



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

**ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ**

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων
για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Χάρης Ν. Μεσαριτάκης

ΑΘΗΝΑ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2011

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Χάρης Ν. Μεσαριτάκης

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής ΕΚΠΑ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ:

**Δημήτριος Συβρίδης, Καθηγητής ΕΚΠΑ
Θωμάς Σφηκόπουλος, Καθηγητής ΕΚΠΑ
Αγγελική Αραπογιάννη, Αν. Καθηγήτρια ΕΚΠΑ**

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

(Υπογραφή)

**Δημήτριος Συβρίδης,
Καθηγητής ΕΚΠΑ**

(Υπογραφή)

**Αγγελική Αραπογιάννη
Αν. Καθηγήτρια ΕΚΠΑ**

(Υπογραφή)

**Κυριάκος Χιτζανίδης
Καθηγητής ΕΜΠ**

(Υπογραφή)

**Εμμανουήλ Τσίλης,
Επικ. Καθηγητής ΕΚΠΑ**

(Υπογραφή)

**Θωμάς Σφηκόπουλος,
Καθηγητής ΕΚΠΑ**

(Υπογραφή)

**Ηλίας Γλύτσης,
Καθηγητής ΕΜΠ**

(Υπογραφή)

**Νικόλαος Στεφάνου,
Καθηγητής ΕΚΠΑ**

Ημερομηνία εξέτασης 17/05/2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη διδακτορική διατριβή πραγματεύεται την μελέτη ολοκληρωμένων διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, για την επίτευξη παθητικής εγκλειδωσης τρόπων και κατ' επέκταση την παραγωγή οπτικών παλμών μικρού χρονικού εύρους και μεγάλης οπτικής ισχύος. Στα πλαίσια της διερεύνησης πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική μελέτη για την ανάδειξη των δυνατοτήτων των ημιαγωγικών λείζερ όσο αναφορά την ποιότητα της παλμικής λειτουργίας, καθώς και σκιαγραφήθηκαν τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τα προβλήματα που παρουσιάζουν. Η βιβλιογραφική μελέτη των συμβατικών δομών κατέδειξε την αναγκαιότητα για χρήση νέων υλικών όπως είναι η κβαντικές τελείες για την άρση των περιορισμών. Στη συνέχεια αναπτύχθηκε ένα θεωρητικό μοντέλο βασισμένο σε πολυπληθισμιακές εξισώσεις φορέων για την μοντελοποίηση διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών σε παθητική εγκλειδωση τρόπων. Η θεωρητική μελέτη που πραγματοποιήθηκε ανέδειξε εξαιρετικά ενδιαφέροντα αποτελέσματα όσο αναφορά την επίδραση των συνθηκών πόλωσης στα χρονικά χαρακτηριστικά των παλμών όσο και αποκάλυψε νέες περιοχές λειτουργίας που σχετίζονται με την ύπαρξη επιπλέον φασματικών περιοχών εκπομπής.

Τη θεωρητική μελέτη ακολούθησε η πειραματική διερεύνηση διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών με αρχικό κίνητρο την επιβεβαίωση των θεωρητικά προβλεφθέντων συμπεριφορών. Στο πρώτο τμήμα της πειραματικής μελέτης παρουσιάζεται η εξέλιξη μεγεθών όπως είναι το οπτικό φασματικό εύρος, το ηλεκτρικό φάσμα των διατάξεων καθώς και τα χρονικά χαρακτηριστικά ως προς τις συνθήκες πόλωσης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση φαινομένων ταυτόχρονης εγκλειδωσης από δύο ανεξάρτητες φασματικές περιοχές σε πλήρη συμφωνία με τα θεωρητικά αποτελέσματα. Στο επόμενο τμήμα της πειραματικής διερεύνησης μελετήθηκαν συμπεριφορές, οι οποίες δεν είχαν προβλεφθεί θεωρητικά λόγω απλοποιήσεων που είχαν πραγματοποιηθεί στο θεωρητικό μοντέλο. Αυτές οι νέες περιοχές λειτουργίας παρουσίασαν έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον λόγω των πιθανών μελλοντικών τους εφαρμογών στον τηλεπικοινωνιακό και βιο-ιατρικό τομέα. Η πρώτη περιοχή λειτουργίας σχετίζεται με την ύπαρξη δύο διακριτών φασματικών περιοχών εκπομπής, που οφείλονται σε φαινόμενα κορεσμού της απολαβής και επέτρεψαν την ταυτόχρονη και συντονιζόμενη εγκλειδωση τρόπων και από τις δύο κορυφές όσο και την μείωση της διάρκειας των παλμών. Επιπλέον μελετήθηκε για πρώτη φορά η ανοχή των διατάξεων κβαντικών τελειών στην ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης σε όλες τις δυνατές περιοχές εκπομπής και εξάχθηκαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα για τη διαφορετική δυναμική περιοχή λειτουργίας της κάθε φασματικής περιοχής. Επιπλέον μελετήθηκαν οι επιπτώσεις ανομοιογενούς άντλησης σε διατάξεις κβαντικών τελειών πολλαπλών τμημάτων. Η συγκεκριμένη διερεύνηση αποκάλυψε την ύπαρξη εγγενών ασταθειών που δεν σχετιζόντουσαν με την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης αλλά με τη δυναμική των φορέων, και επέτρεψε την επίτευξη παλμικής λειτουργίας αλλά και χαοτικής λειτουργίας χωρίς τη χρήση επιπλέον διατάξεων. Αυτή η τελευταία εφαρμογή είναι εξαιρετικά σημαντική και μπορεί να επιτρέψει την χρήση πιο απλών διατάξεων βασισμένων σε κβαντικές τελείες για χρήση σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα που βασίζονται στη χαοτική κρυπτογραφία. Τέλος ο πειραματικός χαρακτηρισμός ενός μεγάλου εύρους διατάξεων οι οποίες διέθεταν διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά επέτρεψε την εξαγωγή σχεδιαστικών κανόνων για τις νέες γενιές λείζερ κβαντικών τελειών.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Ολοκληρωμένες φωτονικές διατάξεις

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: ημιαγωγικά λείζερ, κβαντικές τελείες, παθητική εγκλειδωση τρόπων, οπτικοί παλμοί

ABSTRACT

This work is focused on the experimental and theoretical study of quantum dot passively mode locked lasers. The first part of this thesis is focused on the analytical study of current literature regarding the generation of ultra short optical pulses through the mechanism of passive mode locking in semiconductor lasers. The benefits and drawbacks of this approach are analyzed, whereas the need for implementation of new materials like quantum dots is discussed in detail. In the second part of this thesis a numerical model based on multi-population rate equations has been developed, in order to study the complex dynamics of multiple energy states present in a quantum dot gain medium. Moreover by incorporating delayed differential equations passive mode locking has been achieved and the impact of bias conditions on the temporal properties of the pulses is discussed. The possibility of dual state mode locking from different spectral bands, which is a highly required feature for newly emerging applications, is also analyzed numerically.

The third part is focused on the experimental verification of the numerical results of the previous section, whereas the experimental investigation allowed new regimes of operation, which could not be predicted numerically. In detail dual wavelength mode locking, alongside the impact of higher energy state emission in the mode locking procedure has been studied. Furthermore dual ground-state emission due to gain saturation effects has been shown, whereas two new regimes of operation related to this effect has been identified. The first consists of tunable dual wavelength mode-locking from the ground state, whereas the second consists of pulse width narrowing in the presence of dual state emission. In addition the dynamic response of several quantum dot mode locked devices have been performed in the presence of varying optical feedback. The analysis consisted on the effect of feedback on both emission bands revealing a variation on the dynamic properties of each state. Moreover inhomogeneous current injection has been applied in a multi-section quantum dot laser enabling new operation regimes like self-pulsations due to inter-state carrier dynamics and chaotic operation without the use of sophisticated feedback-based-setups. Finally the experimental characterization of devices having different structural characteristics allowed the extracture of design guidelines for pulse width and peak power optimization.

SUBJECT AREA: Integrated photonic devices

KEYWORDS: semiconductor laser, quantum dots, passive mode locking, optical pulses

Στη Μητέρα μου Σοφία Μπουλούκου

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατ' αρχήν θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Δ. Συβρίδη που με εμπιστεύτηκε δίνοντάς μου την δυνατότητα να ασχοληθώ ερευνητικά με το παρόν αντικείμενο. Επιπλέον, με τις καθοδηγήσεις του και τις συμβουλές του αυτά τα χρόνια συνέβαλε καθοριστικά στην βελτίωση μου ως άνθρωπο αλλά και ως νέο επιστήμονα. Επίσης, η προσωπική του υποστήριξη και ανοχή-αντοχή που επέδειξε μου έδωσαν την απαραίτητη βοήθεια να αντιμετωπίσω τις δυσκολίες που ανέκυψαν αυτά τα χρόνια, αλλά και την απαιτούμενη ελευθερία να καθορίσω μόνος μου τους ερευνητικούς και επαγγελματικούς μου στόχους.

Ιδιαίτερη μνεία οφείλεται στην οικογένειά μου, η οποία με άπειρη κατανόηση και αγάπη όλα αυτά τα χρόνια διαμόρφωσε αυτό που είμαι σήμερα και συνέβαλε ουσιαστικά στην πραγματοποίηση αυτής της διδακτορικής διατριβής. Αν και η απλή παράθεση των ονομάτων δεν αρκεί για να επιδείξω την ευγνωμοσύνη μου, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη μητέρα μου Σοφία Μπουλούκου, τους παππούδες μου Νίκο Μπουλούκο και Χαρίκλεια Μπουλούκου, το θείο μου Γεώργιο Μπουλούκο· τα ξαδέρφια μου Νίκο, Γιάννη Μπουλούκο και τη μητέρα τους Μ. Μπαζιώτη. Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω το πνευματικό μου παιδί Φοίβο Μπουλούκο και τη μητέρα του Ε. Κουσοκέρα. Όλοι οι παραπάνω στάθηκαν δίπλα μου καθόλη την πορεία μου και έδωσαν την απαραίτητη πνευματική, συναισθηματική και υλική υποστήριξη που επέτρεψε τη συνέχεια των σπουδών και τη διαμόρφωση του χαρακτήρα μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους συναδέλφους Α. Καψάλη, Ε. Γρίβα, Α. Αργύρη, Η. Σίμο, Α. Μπόγρη, Α. Φράγκο, Χ. Σίμο, Σ. Μικρούλη, Σ. Δεληγιαννίδη, Κ. Χλουβεράκη, Ι. Σταματάκη, οι οποίοι μέσω των πολύτιμων συμβουλών και συζητήσεων διευκόλυναν την απόκτηση όλου του θεωρητικού υποβάθρου, που απαιτείται για την πραγματοποίηση μιας διατριβής, ενώ παράλληλα με τη στάση τους κατέστησαν την εργασία στον χώρο του πανεπιστημίου μια εξαιρετικά ευχάριστη και γόνιμη διαδικασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την επικ. καθηγήτρια Ευγενία Ροδίτη για την υποστήριξη που μου παρείχε στα πλαίσια της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να αναφερθώ στον ρόλο των παιδικών μου φίλων, οι οποίοι με την υπομονή και την ηθική υποστήριξη που επέδειξαν, υποβοήθησαν εξαιρετικά όλη τη διαδικασία αυτής της διδακτορικής διατριβής, ενώ διαμόρφωσαν με το δικό τους τρόπο τον χαρακτήρα και τις αξίες μου. Πιο συγκεκριμένα, ευχαριστώ τους φίλους Α. Σαλτερή, Ν. Σαλτερή, Μ. Μπούμπουλη, Γ. Νικολόπουλο, Μ. Κυρούδη, Φ. Στεργίου για την πολυετή υποστήριξη τους.

Θα ήθελα επίσης να αναφερθώ στη σύντροφό μου Μαριλένα Ζαμπέλη, η οποία ήταν δίπλα μου κατά τη συγγραφή αυτής της διατριβής και με τις πολύτιμες συμβουλές της αλλά και την αγάπη της, κατέστησε τη συγγραφή αυτής της διδακτορικής διατριβής μια εξαιρετικά ευχάριστη και παραγωγική διαδικασία.

Χάρης Μεσαριτάκης

Ιούνιος 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	35
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	37
1.1 Ιστορική αναδρομή.....	37
1.2 Εισαγωγή στα λέιζερ.....	38
1.3 Λέιζερ παλμικής λειτουργίας.....	39
1.4 Κβαντικές τελείες και ο ρόλος του χωρικού περιορισμού των φορέων.....	41
1.4.1 Η επίδραση του χωρικού περιορισμού στα ημιαγωγικά λέιζερ.....	41
1.4.2 Υλικά και διαδικασίες κατασκευής των κβαντικών τελειών.....	42
1.5 Εφαρμογές των παλμικών λέιζερ κβαντικών τελειών.....	45
1.5.1 Οπτικές επικοινωνίες.....	46
1.5.2 Ολοκληρωμένα συστήματα.....	46
1.5.3 Βιο-φωτονικές και ιατρικές εφαρμογές.....	47
1.6 Κίνητρο της διατριβής.....	48
1.7 Δομή της διατριβής.....	49
2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΛΕΙΖΕΡ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ ΜΕ ΕΓΚΛΕΙΔΩΣΗ ΤΡΟΠΩΝ.....	51
2.1 Βασικές αρχές της εγκλείδωσης τρόπων.....	51
2.2 Τεχνικές εγκλείδωσης τρόπων σε ημιαγωγικά λέιζερ.....	52
2.2.1 Ενεργή εγκλείδωση τρόπων.....	53
2.2.2 Παθητική Εγκλείδωση Τρόπων.....	53
2.2.3 Υβριδική Εγκλείδωση τρόπων.....	54
2.3 Διατάξεις και φυσική της παθητικής εγκλείδωσης τρόπων.....	55
2.4 Απαραίτητες συνθήκες για την επίτευξη αποτελεσματικής παθητικής εγκλείδωσης τρόπων.....	56
2.5 Παράγοντες που περιορίζουν την αποτελεσματική εγκλείδωση των τρόπων.....	58
2.5.1 Εύρος ζώνης της Απολαβής.....	58

2.5.2	Κορεσμός της απολαβής	58
2.5.3	Αυτοδιαμόρφωση της φάσης και διασπορά	59
2.5.4	Μικρή ισχύς κορυφής	62
2.6	Βασικά πλεονεκτήματα των διατάξεων κβαντικών τελείων για χρήση ως γεννήτριες παλμών	63
2.6.1	Αυξημένο εύρος ζώνης απολαβής	63
2.6.2	Γρήγορη δυναμική των φορέων.....	63
2.6.3	Χαμηλή ενέργεια κορεσμού στον απορροφητή	64
2.6.4	Χαμηλό ρεύμα κατωφλίου	65
2.6.5	Χαμηλή ευαισθησία στη θερμοκρασία.....	66
2.6.6	Μικρή διάχυση φορέων (carrier diffusion).....	66
2.6.7	Χαμηλότερα επίπεδα αυθόρμητης εκπομπής	67
2.6.8	Χαμηλός παράγοντας διεύρυνσης της οπτικής γραμμής (παράγοντας – α)	67
2.7	Εξελίξεις στα παλμικά λέιζερ κβαντικών τελείων.....	67
2.8	Συμπεράσματα.....	69
3.	ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΛΕΙΖΕΡ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΕΓΚΛΕΙΔΩΣΗΣ ΤΡΟΠΩΝ	71
3.1	Εισαγωγή	71
3.2	Μοντέλο βασισμένο στις εξισώσεις ρυθμών πολύ-πληθυσμιακών φορέων.....	72
3.2.1	Περιγραφή του μοντέλου του λέιζερ για συνθήκες συνεχούς λειτουργίας	72
3.2.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	77
3.3	Μοντέλο για την επίτευξη παλμικής λειτουργίας μέσω παθητικής εγκλείδωσης των τρόπων	84
3.3.1	Περιγραφή μοντέλου παθητικής εγκλείδωσης των τρόπων μέσω διαφορικής εξίσωσης καθυστέρησης. 84	
3.3.2	Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	85
3.4	Ταυτόχρονη παθητική εγκλείδωση τρόπων από τις δύο διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες (GS/ES)	88
3.5	Συμπεράσματα.....	92
4.	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΛΕΙΖΕΡ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΟΛΩΣΗΣ	93
4.1	Τεχνικές χαρακτηρισμού της ποιότητας οπτικών παλμών λόγω εγκλείδωσης τρόπων.....	93
4.1.1	Μέτρηση χρονικής διάρκειας των παλμών.....	93

4.1.2	Μέτρηση ηλεκτρικού φάσματος (RF spectrum)	95
4.1.3	Μέτρηση οπτικού φάσματος (optical spectrum).....	96
4.2	Περιγραφή της πειραματικής διάταξης.....	96
4.3	Περιγραφή συσκευών.....	98
4.3.1	Διατάξεις ευθύγραμμων κυματοδηγών (Innolume)	99
4.3.2	Πειραματικός χαρακτηρισμός διατάξεων με ευθύγραμμο ενισχυτή	101
4.3.3	Διατάξεις αδιαβατικά πεπλατυσμένου ενισχυτή (Alcatel – Thales)	111
4.3.4	Πειραματικά αποτελέσματα για τις αδιαβατικά πεπλατυσμένες διατάξεις	113
4.3.5	Πειραματικά αποτελέσματα για τη δεύτερη γενιά αδιαβατικά εκλεπτυσμένων διατάξεων.....	115
4.4	Συμπεράσματα.....	121
5.	ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΚΠΛΕΙΔΩΣΗ ΣΕ ΛΕΙΖΕΡ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΔΙΠΛΗΣ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	123
5.1	Εισαγωγή	123
5.2	Ταυτόχρονη εγκλείδωση τρόπων από τις δύο διαθέσιμες φασματικές περιοχές (GS/ES).....	124
5.3	Αστάθεια λειτουργίας λόγω ύπαρξης ταυτόχρονης εκπομπής από το GS και το ES.....	127
5.4	Επίδραση της εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES στην παλμική συμπεριφορά του GS	130
5.5	Χαμηλή ευαισθησία του χρονικού εύρους των παλμών από το ES στην αύξηση του ρεύματος άντλησης 133	
5.6	Συμπεράσματα.....	136
6.	ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΠΑΛΜΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΩ ΔΙΠΛΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ GS.....	139
6.1	Αίτια διπλής εκπομπής από το GS.....	139
6.2	Ανεξάρτητη εγκλείδωση τρόπων στα δύο μήκη κύματος του GS	142
6.3	Περιορισμός του εύρους παλμού λόγω ύπαρξης διπλής φασματικής εκπομπής από το GS.....	146
6.4	Διπλή εκπομπή από το ES	150
6.5	Συμπεράσματα.....	152

7. ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΛΕΙΔΩΣΗΣ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ	153
7.1 Εισαγωγή	153
7.2 Πειραματικός Χαρακτηρισμός των διατάξεων	154
7.2.1 Χαρακτηρισμός παραμέτρων που επηρεάζουν την εκπεμπόμενη ισχύ	154
7.2.2 Χρονικό εύρος παλμού.....	158
7.2.3 Ισχύ κορυφής	161
7.2.4 Δυνατότητα πολύ-φασματικής εκπομπής	164
7.3 Προσομοίωση και εξαγωγή συμπερασμάτων	168
7.3.1 Προσομοιώσεις	168
7.3.2 Εξαγωγή συμπερασμάτων	174
7.4 Συμπεράσματα.....	176
8. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΕΧΗ ΚΑΙ ΠΑΛΜΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	177
8.1 Εισαγωγή	177
8.2 Πειραματική Διάταξη	178
8.3 Συνεχής Λειτουργία.....	179
8.4 Παλμική λειτουργία	182
8.4.1 Παλμική συμπεριφορά από τη φασματική περιοχή του GS	182
8.4.2 Παλμική συμπεριφορά από δύο φασματικές περιοχές (GS/ES).....	186
8.5 Συμπεράσματα.....	193
9. ΠΑΛΜΙΚΗ ΚΑΙ ΧΑΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΥΠΑΡΞΗ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΕ ΛΕΙΖΕΡ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ ΠΟΛΛΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ	195
9.1 Εισαγωγή	195
9.2 Χαρακτηριστική λειτουργία υπό συνθήκες μη ομογενούς έγχυσης ρεύματος	196
9.2.1 Παλμική συμπεριφορά λόγω ταυτόχρονης ύπαρξης εξαναγκασμένης εκπομπής από το GS και το ES	

9.2.2	Παλμική συμπεριφορά λόγω διαφορετικών προφίλ της απολαβής	199
9.3	Εισαγωγή στην έννοια του Χάους	202
9.3.1	Χαοτική συμπεριφορά λόγω διαφορετικών προφίλ της απολαβής	203
9.3.2	Μέτρηση της πολυπλοκότητας	205
9.3.3	Πειραματική Επαλήθευση.....	207
9.4	Συμπεράσματα.....	208
10.	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ	209
10.1	Συμπεράσματα	209
10.2	Μελλοντικές δραστηριότητες	211
10.2.1	Μελέτη ολοκληρωμένων διατάξεων και ενισχυτών	211
10.2.2	Μελέτη της οπτικής ανάδρασης για την επίτευξη σταθερής πολύ φασματικής εγκλείδωσης	212
10.2.3	Ταυτόχρονη ενίσχυση παλμών και από τα δύο μήκη κύματος.....	212
10.2.4	Μελέτη πηγών ενός φωτονίου βασισμένες σε διατάξεις που περιέχουν μόνο μια κβαντική τελεία 213	
ΑΝΑΦΟΡΕΣ	215

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1-1 Η δομή του ενεργού υλικού (πάνω) και οι αντίστοιχη πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων (κάτω) για α) ομογενές υλικό, β) κβαντικό φρέαρ, γ) κβαντικό καλώδιο, και δ) κβαντική τελεία.....	42
Σχήμα 1-2 Σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας κατασκευής κβαντικών τελειών μέσω της μεθόδου Stranski-Krastanow.	43
Σχήμα 1-3 Χωρικές κατανομές τελειών ανάλογα με τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό του υποστρώματος.	44
Σχήμα 1-4 α) Οπτικό φάσμα λέιζερ κβαντικών τελειών με διαφορετικό αριθμό κβαντικών στρωμάτων. Β) Διατομή και κάτοψη του ενεργού υλικού [45]	44
Σχήμα 1-5 Μεταβολή της κεντρικής φασματικής κορυφής και του εύρους της οπτικής γραμμής με τον αριθμό των κβαντικών τελειών [48].	45
Σχήμα 2-1 Διαγραμματική απεικόνιση της ενεργής εγκλείδωσης τρόπων.....	53
Σχήμα 2-2 Διαγραμματική απεικόνιση της παθητικής εγκλείδωσης τρόπων.....	54
Σχήμα 2-3 α) Υβριδική εγκλείδωση των τρόπων με διαμόρφωση της τάσης του απορροφητή ενώ β) διαμόρφωση του ρεύματος του ενισχυτή.....	54
Σχήμα 2-4 Σχηματική αναπαράσταση της διακύμανσης των απωλειών με τη χρήση (α) ενός γρήγορου και ενός (β) αργού απορροφητή.....	56
Σχήμα 2-5 Απεικόνιση της διεύρυνσης των παλμών λόγω κορεσμού της απολαβής και του φαινομένου του περιορισμού του εύρους.	59
Σχήμα 2-6 Απεικόνιση παλμών οι οποίοι έχουν υποστεί θετική χρωματική διασπορά, με αποτέλεσμα την αύξηση της χρονικής τους διάρκειας.....	61
Σχήμα 2-7 Μετρήσεις μέσω της μεθόδου της άντλησης-ελέγχου για το χρόνο αποκατάστασης [25]	64
Σχήμα 2-8 Χαρακτηριστική καμπύλη οπτικής έντασης (τάσης) προς το ρεύμα άντλησης για την δομή [29]......	65
Σχήμα 3-1 Διαγραμματική απεικόνιση της μεθοδολογίας μοντελοποίησης της απολαβής του ενεργού υλικού.	73

Σχήμα 3-2 Διαγραμματική απεικόνιση των διαφορετικών ενεργειακών σταθμών που έχουν χρησιμοποιηθεί στη ζώνη αγωγιμότητας, μαζί με τους χαρακτηριστικούς χρόνους όλων των δυνατών μεταπτώσεων.	74
Σχήμα 3-3 Πυκνότητα φωτονίων προς την κυκλική συχνότητα για διαφορετικές τιμές ηλεκτρικής άντλησης.....	78
Σχήμα 3-4 Οπτικό φάσμα (πυκνότητα φωτονίων) προς την κυκλική συχνότητα για ρεύμα άντλησης ίσο με 400mA.	78
Σχήμα 3-5 Καμπύλη πυκνότητας φωτονίων προς την πυκνότητα ρεύματος	79
Σχήμα 3-6 Πυκνότητα ηλεκτρικών φορέων προς το χρόνο προσομοίωσης για το WL .	80
Σχήμα 3-7 Πυκνότητα ηλεκτρικών φορέων προς το χρόνο προσομοίωσης για το ES..	80
Σχήμα 3-8 Πυκνότητα ηλεκτρικών φορέων προς το χρόνο προσομοίωσης για το GS..	80
Σχήμα 3-9 Πυκνότητα φορέων προς το χρόνο προσομοίωσης για ρεύμα άντλησης 2mA (κάτω από το κατώφλι)	81
Σχήμα 3-10 Διαγραμματική απεικόνιση της διάταξης που προσομοιώθηκε.....	84
Σχήμα 3-11 Η οπτική έξοδος της διάταξης (αριστερά) και μεγέθυνση της χρονοσειράς (δεξιά) για δύο περιπτώσεις: στην πρώτη το ρεύμα άντλησης είναι 100mA ενώ η τάση μεταβάλεται από -3V (πάνω) σε -10V (κάτω).....	87
Σχήμα 3-12 Μαθηματική προσαρμογή των δύο παλμών θεωρώντας ότι το σχήμα των παλμών ακολουθεί gaussian κατανομή.	87
Σχήμα 3-13 Η οπτική έξοδος της διάταξης (αριστερά) και η μεγέθυνση της χρονοσειράς (δεξιά) για δύο περιπτώσεις: και στις δύο περιπτώσεις η τάση είναι -10V ενώ το ρεύμα άντλησης κυμαίνεται από 100mA (πάνω) σε 150mA (κάτω).....	88
Σχήμα 3-14 Χαρτογράφηση των διαφορετικών περιοχών λειτουργίας της διάταξης προς τις συνθήκες πόλωσης (ρεύμα άντλησης και ανάστροφη τάση).....	89
Σχήμα 3-15 Χαρακτηριστικό δείγμα παλμών από το GS με εύρος 3ps.....	90
Σχήμα 3-16 Οπτικό φάσμα για την περιοχή του GS	90
Σχήμα 3-17 Χαρακτηριστικοί παλμοί από το GS και το ES με χρονικό εύρος ίσο με 7ps και 9ps αντίστοιχα.....	91

Σχήμα 3-18 Ηλεκτρικό φάσμα το οποίο παρουσιάζει δύο κορυφές που αντιστοιχούν στο GS και στο ES.....	91
Σχήμα 4-1 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης	97
Σχήμα 4-2 Οπτική ισχύς προς το ρεύμα του ενισχυτή για δύο περιπτώσεις μαύρο-τετράγωνο: εκλεπτυσμένη ίνα, κόκκινος κύκλος φωτοδίοδος μεγάλης επιφάνειας.	98
Σχήμα 4-3 Σχηματική απεικόνιση των συσκευών της Inpolume και των ηλεκτρικών τους επαφών (α) 2mm (β) 4mm και (γ) 8mm.	100
Σχήμα 4-4 Προφίλ του H/M πεδίου για τους δύο διαφορετικούς άξονες συναρτήσει της γωνίας. Οι μετρήσεις είναι για συσκευή 2mm με 5 στρώματα κβαντικών σημείων και είναι χαρακτηριστική και για τις άλλες συσκευές.	100
Σχήμα 4-5 Συνδεσμολογία βραχυκύκλωσης, η δεύτερη δίοδος παρακάμπτεται και υπολογίζεται απευθείας το ρεύμα διαρροής.....	102
Σχήμα 4-6 Συνδεσμολογία ανοιχτοκυκλώματος, από την πτώση τάσης στα ηλεκτρόδια της δεύτερης δίοδου υπολογίζεται το γινόμενο της αντίστασης επί το ρεύμα διαρροής.	102
Σχήμα 4-7 Καμπύλη ρεύματος – τάσης για την πρώτη δίοδο (ενισχυτής).....	103
Σχήμα 4-8 Η αντίσταση απομόνωσης συναρτήσει του ρεύματος (μαύρο), οπτική ισχύς συναρτήσει του ρεύματος της πρώτης δίοδου (μπλε).....	103
Σχήμα 4-9 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης για την μέτρηση του φωτο-ρεύματος υπό συνθήκες ανάστροφης πόλωσης.	104
Σχήμα 4-10 Το ρεύμα απορρόφησης (φωτόρευμα) για 4 διαφορετικά ρεύματα και για διάφορες ανάστροφες τάσεις στο τμήμα απορρόφησης	104
Σχήμα 4-11 Καμπύλη Οπτικής ισχύος προς το ρεύμα του ενισχυτή, για μια συσκευή 10 στρωμάτων, 4mm πλάτος κυματοδηγού και 2mm μήκος.....	105
Σχήμα 4-12 Καμπύλη Οπτικής ισχύος προς το ρεύμα του ενισχυτή για μια συσκευή 10 στρωμάτων, 4mm πλάτος κυματοδηγού και 4mm μήκος.....	105
Σχήμα 4-13 Εύρος παλμού ως προς το ρεύμα του ενισχυτή για τρεις διαφορετικές τιμές ανάστροφης πόλωσης (διάταξη των 2mm).....	106
Σχήμα 4-14 Εύρος παλμού ως προς το ρεύμα του ενισχυτή για πέντε διαφορετικές τιμές ανάστροφης πόλωσης (διάταξη των 4mm).....	107

Σχήμα 4-15 Ισχύς κορυφής συναρτήσει του ρεύματος ενισχυτή για τρεις διαφορετικές τιμές ανάστροφης τάσης (διάταξη 2mm).....	108
Σχήμα 4-16 Ισχύς κορυφής συναρτήσει του ρεύματος ενισχυτή για πέντε διαφορετικές τιμές ανάστροφης τάσης (διάταξη 4mm).....	108
Σχήμα 4-17 Κεντρικό μήκος κύματος εκπομπής για την διάταξη των 2mm, συναρτήσει του ρεύματος του ενισχυτή.....	109
Σχήμα 4-18 Εύρος στα -20dB του οπτικού φάσματος συναρτήσει του ρεύματος ενισχυτή για δύο διαφορετικές τιμές ανάστροφης τάσης (διάταξη 2mm)	110
Σχήμα 4-19 Εύρος κορυφής ηλεκτρικού φάσματος στα -10dB συναρτήσει του ρεύματος ενισχυτή για τρεις διαφορετικές τιμές ανάστροφης τάσης (διάταξη 4mm)	111
Σχήμα 4-20 Εύρος γραμμής στα -10dB (δεξιά) χαρακτηριστικά φάσματα (αριστερά) για την διάταξη με μήκος 4mm.....	111
Σχήμα 4-21 Σχηματική απεικόνιση των δύο διατάξεων πεπλατυσμένου ενισχυτή. Η αριστερή διάταξη ακολουθεί κυματοδότηση μέσω διαφοράς του δείκτη διάθλασης, ενώ η δεξιά ακολουθεί κυματοδότηση μέσω της απολαβής.....	113
Σχήμα 4-22 Εξέλιξη του εύρους παλμού ως προς την ανάστροφη τάση για ρεύμα ενισχυτή 800mA (αριστερά), τυπικός παλμός μετά από τη διαδικασία αυτοσυσχέτισης (δεξιά).	114
Σχήμα 4-23 Οπτικό φάσμα που παρουσιάζει το ES να είναι πάνω από το κατώφλι εξαναγκασμένης εκπομπής (αριστερά), αντίστοιχο ηλεκτρικό φάσμα που δείχνει μια κορυφή σε συχνότητα που αντιστοιχεί στο ρυθμό επανάληψης του ES (δεξιά).	115
Σχήμα 4-24 Σχηματική αναπαράσταση της διάταξης, και η αντίστοιχη συνδεσμολογία πόλωσης.....	116
Σχήμα 4-25 Καμπύλες οπτικής έντασης συναρτήσει του ρεύματος άντλησης για διάταξη 3-τμημάτων	117
Σχήμα 4-26 Χρονικό εύρος οπτικών παλμών προς το ρεύμα ενίσχυσης για τη διάταξη 3-τμημάτων	118
Σχήμα 4-27 Αποτελέσματα αυτοσυσχέτισης (μαύρο) και η Gaussian προσαρμογή (κόκκινο) για τους παλμούς της διάταξης 3-τμημάτων όταν η ανάστροφη τάση ήταν ίση με -3V ενώ το ρεύμα κυμαινόταν από 1050mA (αριστερά) μέχρι 1150mA (δεξιά)	118

Σχήμα 4-28 Ισχύ κορυφής συναρτήσει των συνθηκών πόλωσης για τη διάταξη των 3- τμημάτων.....	119
Σχήμα 4-29 Οπτική ισχύς προς τις συνθήκες πόλωσης για τη διάταξη των 2-τμημάτων	120
Σχήμα 4-30 Χρωματική αναπαράσταση του χρονικού εύρους των παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης για διάταξη 2-τμημάτων	120
Σχήμα 4-31 Αποτελέσμα αυτοσυσχέτισης (μαύρο) και η Gaussian προσαρμογή (κόκκινο) για την διάταξη 2-τμημάτων όταν η ανάστροφη τάση ήταν ίση με -6V ενώ το ρεύμα ήταν ίσο με 680mA.....	121
Σχήμα 4-32 Χρωματική αναπαράσταση της ισχύος κορυφής των παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης για διάταξη 2-τμημάτων	121
Σχήμα 5-1 Χαρτογράφηση των διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας της διάταξης ως προς τις συνθήκες πόλωσης.....	125
Σχήμα 5-2 Το οπτικό και ηλεκτρικό φάσμα της διάταξης για την περιοχή που επετεύχθη ταυτόχρονη εγκλείδωση των τρόπων.	126
Σχήμα 5-3 Δύο χαρακτηριστικοί παλμοί από το GS και το ES αντίστοιχα.....	126
Σχήμα 5-4 Ηλεκτρικά φάσματα για αυξανόμενο ρεύμα άντλησης από 300mA(a) σε 450mA(d). Η τάση στον απορροφητή παρέμεινε σταθερή στα -7V.....	128
Σχήμα 5-5 Έξοδος του αναλυτή δικτύου για δύο διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Παρουσιάζεται μια (α) αργή μεταβολή της τάξης των 2GHz, και (β) μια γρήγορη της τάξης των 20GHz.....	129
Σχήμα 5-6 Χαρακτηριστικό ηλεκτρικό φάσμα για ανάστροφη τάση ίση με -1V και ρεύμα ενισχυτή 450mA, το οποίο παρουσιάζει ταυτόχρονο Q-switching και στις δύο φασματικές περιοχές.....	130
Σχήμα 5-7 Τα ηλεκτρικά φάσματα για δύο διαφορετικές τιμές ανάστροφης πόλωσης ως προς τα ρεύματα άντλησης του τμήματος ενίσχυσης.....	131
Σχήμα 5-8 Οπτικά φάσματα για δύο διαφορετικές ανάστροφες πολώσεις -5V και -6V και διάφορες τιμές του ρεύματος ενίσχυσης	132
Σχήμα 5-9 Εξέλιξη του χρονικού εύρους των παλμών του GS για δύο διαφορετικές τιμές ανάστροφης τάσης -5 και -6V.	132

Σχήμα 5-10 Συνολική οπτική ισχύς προς το ρεύμα του ενισχυτή για τάση στον απορροφητή ίση με $-6V$	133
Σχήμα 5-11 Οπτικά φάσματα ως προς το ρεύμα του ενισχυτή για δύο διαφορετικές ανάστροφες τάσεις στον απορροφητή $-7V$ και $-8V$	134
Σχήμα 5-12 Ηλεκτρικό φάσμα ως προς το ρεύμα του ενισχυτή για την περιοχή του ES.	135
Σχήμα 5-13 Μεταβολή του χρονικού εύρους των παλμών ως προς το ρεύμα του ενισχυτή για δύο διαφορετικές ανάστροφες τάσεις στον απορροφητή $-7V$ και $-8V$	135
Σχήμα 6-1 Εξάρτηση της φασματικής απόστασης των δύο κορυφών συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας της εκπεμπόμενης ισχύος. (μαύρος-κύκλος): μετρήσεις, (κόκκινη-καμπύλη) : πολυονημική προσαρμογή	140
Σχήμα 6-2 Οπτικά φάσματα για διαφορετικές τιμές του ρεύματος και μηδενική τάση στον απορροφητή, για διάταξη 5 στρωμάτων κβαντικών σημείων, μήκους 4mm και πλάτους $6\mu\text{m}$	141
Σχήμα 6-3 Οπτικά φάσματα για διαφορετικές τιμές ρεύματος και για ανάστροφη τάση στον απορροφητή $-7V$. για διάταξη 5 στρωμάτων κβαντικών σημείων, μήκους 4mm και πλάτους $6\mu\text{m}$	142
Σχήμα 6-4(α)-(γ) Ηλεκτρικά φάσματα για διαφορετικές συνθήκες πόλωσης, (δ)-(στ) αντίστοιχα οπτικά φάσματα.....	143
Σχήμα 6-5 Οπτικά φάσματα για δύο περιπτώσεις (μαύρο) μη φιλτραρισμένο και (κόκκινο) φιλτράροντας την φασματική κορυφή που βρίσκεται σε υψηλότερα μήκη κύματος.....	144
Σχήμα 6-6 Το χρονικό προφίλ του παλμού (μαύρο) και η Lorentzian προσαρμογή (κόκκινο) για δύο περιπτώσεις μη φιλτραρισμένο (πάνω) και φιλτράροντας μία από τις δύο κορυφές (κάτω).....	144
Σχήμα 6-7 Θεωρητικά υπολογισμένη συχνότητα του διακροτήματος βάση της πειραματικής φασματικής απόστασης των δύο κορυφών.....	146
Σχήμα 6-8 Εύρος παλμού συναρτήσει ρεύματος ενισχυτή για διάφορες τιμές ανάστροφης τάσης, για μια διάταξη με πλάτος κυματοδηγού $6\mu\text{m}$. Σε μαύρο κύκλο σημειώνεται η περιοχή ύπαρξης διπλής κορυφής.....	147

Σχήμα 6-9 Καμπύλη οπτικής ισχύος – έντασης ρεύματος για ανάστροφη τάση -4V και για τη διάταξη του σχήματος 6.8.	147
Σχήμα 6-10 Εύρος παλμού συναρτήσεως ρεύματος ενισχυτή για διάφορες τιμές ανάστροφης τάσης, για μια διάταξη με πλάτος κυματοδηγού 4μm. Σε μαύρο κύκλο σημειώνεται η περιοχή ύπαρξης διπλής κορυφής.....	148
Σχήμα 6-11 Ισχύ κορυφής συναρτήσεως ρεύματος ενισχυτή για διάφορες τιμές ανάστροφης τάσης, για μια διάταξη με πλάτος κυματοδηγού 4μm.	149
Σχήμα 6-12 Γινόμενο μέσης ισχύος και ισχύος κορυφής συναρτήσεως ρεύματος ενισχυτή για διάφορες τιμές ανάστροφης τάσης, για μια διάταξη με πλάτος κυματοδηγού 4μm.	149
Σχήμα 6-13 Χαρακτηριστικά οπτικά φάσματα από κάθε περιοχή λειτουργίας και η αντίστοιχη εξέλιξη του εύρους των παλμών	150
Σχήμα 6-14 Οπτικά φάσματα για το λέιζερ 5 κβαντικών στρωμάτων και μήκους 2mm.	151
Σχήμα 6-15 Οπτικά φάσματα για τη διάταξη των 5 στρωμάτων κβαντικών σημείων και του μήκους 2mm, όπου είναι εμφανής η διπλή εκπομπή από το ES.	152
Σχήμα 7-1 Οπτική ισχύς προς την πυκνότητα ρεύματος για διατάξεις με κυμαινόμενο μήκος και αριθμό κβαντικών στρωμάτων (5 στρώματα: μαύρο-τετράγωνο, 10 στρώματα: κόκκινος-κύκλος, 15 στρώματα: μπλε-τρίγωνο)	155
Σχήμα 7-2 Οπτική ισχύς συναρτήσεως του μήκους της κοιλότητας του λέιζερ για δύο περιπτώσεις 5 και 10 κβαντικών στρωμάτων.	156
Σχήμα 7-3 Οπτική ισχύς προς το ρεύμα του ενισχυτή για δύο διαφορετικά πλάτη κυματοδηγών (μαύρο-τετράγωνο:4μm και κόκκινος-κύκλος:6μm) και δύο περιπτώσεις: 5 και 15 στρώματα κβαντικών τελειών.	156
Σχήμα 7-4 Εξωτερική κβαντική απόδοση για διατάξεις με κυμαινόμενο μήκος και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών (5 στρώματα: μαύρο-τετράγωνο, 10 στρώματα: κόκκινος-κύκλος, 15 στρώματα: μπλε-τρίγωνο)	157
Σχήμα 7-5 Χρωματική αναπαράσταση του χρονικού εύρους σε ps των παραγόμενων παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 2mm και 4mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5,10 και 15.....	158

Σχήμα 7-6 Χρωματική αναπαράσταση του χρονικού εύρους των παραγόμενων παλμών σε ps προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 8mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5,10 και 15.	159
Σχήμα 7-7 Χρωματική αναπαράσταση του χρονικού εύρους των παραγόμενων παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 2mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 15 (πάνω), για διατάξεις με μήκος 4mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5 (κάτω)	161
Σχήμα 7-8 Χρωματική αναπαράσταση της ισχύος κορυφής των παραγόμενων παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 2mm και 4mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5,10 και 15.....	162
Σχήμα 7-9 Χρωματική αναπαράσταση της ισχύος κορυφής των παραγόμενων παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 8mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5,10 και 15.	163
Σχήμα 7-10 Χρωματική αναπαράσταση του χρονικού εύρους των παραγόμενων παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 2mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 15 (πάνω), για διατάξεις με μήκος 4mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5 (κάτω).....	163
Σχήμα 7-11 Μέση ισχύ για την διάταξη με μήκος 1.3mm, ως προς το ρεύμα άντλησης για δύο διαφορετικές συνθήκες 0V(α) και -2V(β).....	165
Σχήμα 7-12 Χαρτογράφηση των περιοχών λειτουργίας της διάταξης προς τις συνθήκες πόλωσης, για δύο θερμοκρασίες λειτουργίας 20oC (πάνω) και 14oC (κάτω).	166
Σχήμα 7-13 Χρωματική αναπαράσταση ως προς τις συνθήκες πόλωσης του χρονικού εύρους των παλμών (α) και της ισχύος κορυφής (β).....	166
Σχήμα 7-14 Περιοχές λειτουργίας προς τον όγκο και τη διατομή του κυματοδηγού....	168
Σχήμα 7-15 Το προφίλ του δείκτη διάθλασης της δομής σε συνδυασμό με τον βασικό τρόπο κυματοδηγησης για 3 δομές (5, 10, 15 στρωμάτων κβαντικών τελειών)	172
Σχήμα 7-16 Συντελεστής περιορισμού του οπτικού τρόπου προς τον αριθμό των στρωμάτων κβαντικών σημείων για διατάξεις με πλάτος κυματοδηγού 6mm	172
Σχήμα 7-17 Απολαβή συναρτήσεως της πυκνότητας ρεύματος για τρεις διαφορετικές δομές (γραμμή 5 στρώματα κβαντικών στρωμάτων, ρόμβος 10 στρώματα, κύκλος 15 στρώματα)	173

Σχήμα 7-18 Υπολογισμός των δύο τμημάτων της ανισότητας 7.9 για τις τιμές της προσομοίωσης	174
Σχήμα 7-19 Η οπτική ένταση προς το ρεύμα ενισχυτή για διαφορετικό αριθμό στρωμάτων κβαντικών σημείων (n) και οι υπολογιζόμενες απώλειες διάδοσης (α) [2]	176
Σχήμα 8-1 Διαγραμματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης για την μέτρηση της επίδρασης της οπτικής ανάδρασης.....	179
Σχήμα 8-2 Το ηλεκτρικό φάσμα για μια διάταξη 15 κβαντικών στρωμάτων, 2mm μήκος και 6μm πλάτος, για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις: (μαύρο) χωρίς την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης και (κόκκινο) με τη μέγιστη δυνατή ανατροφοδότηση -23dB.	181
Σχήμα 8-3 Το ηλεκτρικό φάσμα για μια διάταξη 10 κβαντικών στρωμάτων, 2mm μήκος και 6μm πλάτος, για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις (μαύρο) χωρίς την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης και (κόκκινο) με τη μέγιστη δυνατή ανατροφοδότηση -23dB. Εκπομπή μόνο από το GS	181
Σχήμα 8-4 Καμπύλες οπτικής έντασης (κόκκινο) – τάσης (μπλε) ως προς το ρεύμα για τις δύο διατάξεις.....	182
Σχήμα 8-5 Περιοχές λειτουργίας (σταθερή – ασταθής) συναρτήσει του ρεύματος άντλησης και της εξωτερικής ανακλαστικότητα [13].	183
Σχήμα 8-6 Εύρος παλμού συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης για ρεύμα 200mA στο τμήμα ενίσχυσης, με διακεκομμένη γραμμή η τιμή χωρίς οπτική ανάδραση	185
Σχήμα 8-7 Μεταβολή του λόγου ισχύος κορυφής προς την ισχύ θορύβου συναρτήσει του λόγου μηκών της εσωτερικής προς εξωτερική κοιλότητα, για τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος ανατροφοδότησης [13].	186
Σχήμα 8-8 Εύρος παλμού συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης για ανάστροφη τάση -6V και για διάφορα ρεύματα. Η διάταξη είχε 5 στρώματα κβαντικών σημείων, 4mm μήκος και 6μm πλάτος κυματοδηγού	186
Σχήμα 8-9 Χαρτογράφηση των περιοχών λειτουργίας. Σε συνεχή μαύρο κύκλο βρίσκεται η περιοχή που παρουσιάστηκε μόνο εκπομπή από το GS και με διακεκομμένο κύκλο η περιοχή που υπήρχε εκπομπή μόνο από το ES.	188

Σχήμα 8-10 Εύρος γραμμής του ηλεκτρικού φάσματος (μαύρο) και κεντρική συχνότητα κορυφής (κόκκινο) ως προς το ποσοστό οπτικής ανάδρασης για μηδενική τάση στον απορροφητή και ρεύμα 300mA στο τμήμα ενίσχυσης.....	189
Σχήμα 8-11 Χαρακτηριστικά ηλεκτρικά φάσματα για έξι περιπτώσεις στις οποίες μεταβάλλεται το ποσοστό οπτικής ανάδρασης	190
Σχήμα 8-12 Η εξέλιξη του εύρους ημίσειας ισχύος της κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος προς την χρονική καθυστέρηση για ρεύμα 420mA, $V_{abs}=-6V$ και ισχύ οπτικής ανάδρασης ίση με -27dB.....	191
Σχήμα 8-13 Η εξέλιξη του εύρους ημίσειας ισχύος και της κεντρικής συχνότητας συναρτήσει της οπτικής ανάδρασης.....	191
Σχήμα 8-14 Καμπύλες οπτικής έντασης προς το ρεύμα ενισχυτή για 0V τάση στον απορροφητή (μαύρο) και -6V (κόκκινο).....	192
Σχήμα 8-15 Οπτικά φάσματα χωρίς την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης (μαύρο) και με ανατροφοδότηση της τάξης των -20dB (κόκκινο) για δύο περιπτώσεις α) GS και β) ES.....	193
Σχήμα 9-1 Χαρτογράφηση του ηλεκτρικού φάσματος ως προς το ρεύμα και των δύο τμημάτων για ένα λέιζερ 5 στρωμάτων κβαντικών σημείων 2mm μήκος, 4μm πλάτος.	196
Σχήμα 9-2 Καμπύλες οπτικής ισχύος ως προς το ρεύμα του τμήματος 1, για διάφορες τιμές του τμήματος 2	197
Σχήμα 9-3(α) μεταβολή της συχνότητας του ηλεκτρικού φάσματος προς το ρεύμα του πρώτου τμήματος για τη πρώτη περιοχή λειτουργίας. (β) Χαρακτηριστικό δείγμα του ηλεκτρικού φάσματος. (γ) Χαρακτηριστικό οπτικό φάσμα της περιοχής λειτουργίας. .	198
Σχήμα 9-4 Οπτική ισχύς (α) στο GS και β) στο ES, συναρτήσει του χρόνου	199
Σχήμα 9-5 α) Οπτικά φάσματα για σταθερό ρεύμα $I=200mA$ στο πρώτο τμήμα και για μεταβολή του ρεύματος του τμήματος 2 από 10mA σε 30mA. β) Οπτικά φάσματα για σταθερό ρεύμα $I=200mA$ στο πρώτο τμήμα και για μεταβολή του ρεύματος του τμήματος 2 από 10mA σε 60mA. γ) Οπτικά φάσματα για σταθερό ρεύμα $I=30mA$ στο δεύτερο τμήμα και για μεταβολή του ρεύματος του τμήματος 1 από 200mA σε 400mA.	200
Σχήμα 9-6 Διαγραμματική απεικόνιση της κοιλότητας καθώς και της οπτικής ισχύος. 201	

Σχήμα 9-7 Σχηματική αναπαράσταση της δημιουργίας της παλμικής συμπεριφοράς. Η απολαβή του κάθε τμήματος έχει προσομοιωθεί ως μια Gaussian κατανομή.....	202
Σχήμα 9-8 α) Συχνότητα κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος ως προς το ρεύμα του τμήματος 2, για διάφορες τιμές ρεύματος του τμήματος 1 β) Συχνότητα κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος ως προς το ρεύμα του τμήματος 1, για διάφορες τιμές ρεύματος του τμήματος 2.....	202
Σχήμα 9-9 Εξέλιξη του ηλεκτρικού φάσματος συναρτήσει του ρεύματος του τμήματος 1 (200mA-450mA), για ρεύμα στο τμήμα 2 ίσο με 50mA	204
Σχήμα 9-10 Εξέλιξη του οπτικού φάσματος συναρτήσει του ρεύματος του τμήματος 1 (200mA-450mA), για ρεύμα στο τμήμα 2 ίσο με 50mA	204
Σχήμα 9-11 Χαρτογράφηση της διάστασης αυτοσυσχετισμού συναρτήσει των ρευμάτων των δύο τμημάτων.	206
Σχήμα 9-12 Ηλεκτρικά φάσματα για τη νέα διάταξη. Το ρεύμα του τμήματος 1 είναι ίσο 298mA ενώ το ρεύμα του τμήματος κυμαίνεται από 0 μέχρι 50mA.....	207
Σχήμα 9-13 Χαρτογράφηση της διάστασης αυτοσυσχέτισης συναρτήσει των ρευμάτων των δύο τμημάτων.	208
Σχήμα 10-1 Οπτικοί παλμοί με και χωρίς ενίσχυση για δύο διαφορετικές τιμές ρεύματος άντλησης.....	212

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1 αριστερά λείζερ τιτανίου-ζαφειρίου, ενώ δεξιά ημιαγωγικό λείζερ διπλά σε ακίδα για σύγκριση του μεγέθους τους.....	38
Εικόνα 10-1 Πακεταρισμένο λείζερ κβαντικών τελειών με 5 στρώματα κβαντικών τελειών και μήκος 2mm.....	211

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2-1 ενδεικτικές τιμές μήκους κοιλοτήτων και αντίστοιχα ρυθμού επανάληψης και μέγιστου χρόνου απόκρισης που απαιτείται.	57
Πίνακας 3-1 Βασικές παράμετροι της προσομοίωσης μαζί με τις χαρακτηριστικές τιμές τους.....	81
Πίνακας 4-1 Το ύψος καθώς και τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών στρωμάτων που αναπτύχτηκαν κατά την επιταξία.....	101
Πίνακας 7-1 Τα διαφορετικά είδη διατάξεων που μετρήθηκαν πειραματικά.	154

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Τα θεωρητικά και πειραματικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκαν στο τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών και πιο ειδικά η μελέτη και ο χαρακτηρισμός των διατάξεων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο οπτικών επικοινωνιών του συγκεκριμένου τμήματος, υπό την επίβλεψη του καθηγητή Δημήτριου Συβρίδη.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί τμήμα του ερευνητικού ευρωπαϊκού προγράμματος με τίτλο “FAST-DOT : Compact Ultrafast Laser Sources Based on Novel Quantum Dot Structures” με αριθμό άδειας EU-FP7, No. 224338. Επιπροσθέτως το συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα χρηματοδότησε την πραγματοποίηση αυτής της μελέτης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται το κίνητρο καθώς και οι στόχοι αυτής της διδακτορικής διατριβής, μέσω της ανάδειξης της σύγχρονης ανάγκης για αποδοτικές πηγές οπτικών παλμών. Στο πρώτο τμήμα παρουσιάζεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή για τις σύμφωνες οπτικές πηγές, ενώ στη συνέχεια το ενδιαφέρον εστιάζεται στις μεθοδολογίες παραγωγής οπτικών παλμών και παρατίθενται τα εγγενή πλεονεκτήματα των ημιαγωγικών δομών έναντι των υπολοίπων. Κατόπιν αναλύεται εν συντομία η δομή των υλικών κβαντικών τελειών, επιτρέποντας την καλύτερη κατανόηση των μοναδικών πλεονεκτημάτων που προσφέρουν στην δημιουργία οπτικών παλμών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά εφαρμογές που θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν τέτοιες πηγές, τόσο στον τηλεπικοινωνιακό τομέα, όσο και σε προηγμένες βιο-ιατρικές εφαρμογές. Η ενδελεχής επισκόπηση των παραπάνω αποτέλεσε το έναυσμα για την υλοποίηση της παρούσας ερευνητικής προσπάθειας.

1.1 Ιστορική αναδρομή

Η άνθιση του τομέα της θεωρητικής φυσικής που παρατηρήθηκε στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, άλλαξε ριζικά τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε το φυσικό κόσμο και συντάραξε παραδοσιακές αρχές και αξίες της κοινωνίας μας. Για πρώτη φορά εισήχθησαν ριζοσπαστικές θεωρίες που αφορούσαν τόσο την μικροσκοπική, όσο και τη μακροσκοπική δομή του κόσμου. Η σταδιακή πειραματική επιβεβαίωση αυτών των θεωριών, ακολουθήθηκε από τις πρώτες προσπάθειες αξιοποίησης των θεωρητικών προβλέψεων, που με τη σειρά τους επέτρεψαν την τεχνολογική έκρηξη, της οποίας τις συνέπειες βιώνουμε ακόμα και στις μέρες μας.

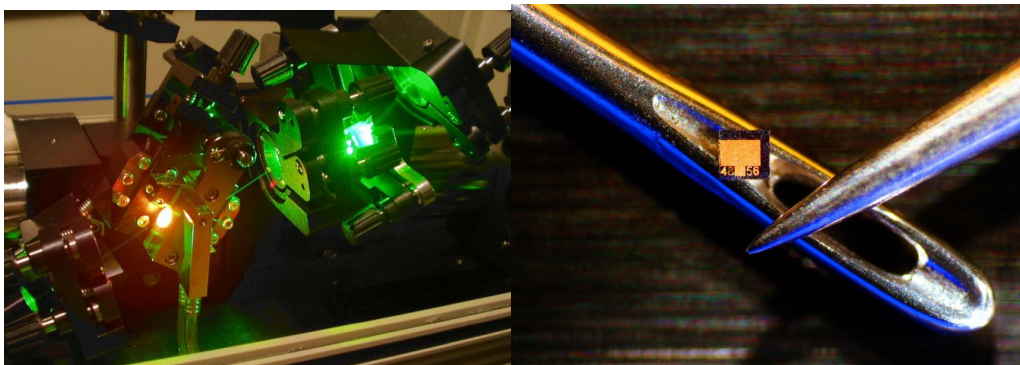
Η πιο καινοτόμος θεωρία που προτάθηκε εκείνη την εποχή ήταν αυτή της κβαντικής μηχανικής. Η ίδια η φύση της συγκεκριμένης θεωρίας ερχόταν σε αντιπαράθεση με τον καλά εδραιωμένο επιστημονικό ντετερμινισμό και πρότεινε έναν εναλλακτικό τρόπο θεώρησης του φυσικού κόσμου. Η δυϊκή φύση του φωτός, η έννοια της απροσδιοριστίας, η αλληλεπίδραση ενέργειας και ύλης είναι λίγα μόνο παραδείγματα των καινοτομιών που εισήγαγε η κβαντική μηχανική στην θεώρηση του κόσμου. Η έντονη ριζοσπαστικότητα καθώς και ο πολύπλοκος μαθηματικός φορμαλισμός ήταν και τα βασικά αίτια που ολόκληρο το θεωρητικό οικοδόμημα της κβαντομηχανικής δέχτηκε τόσο ισχυρή κριτική από μεγάλο τμήμα της επιστημονικής κοινότητας. Χαρακτηριστικές είναι η δηλώσεις μεγάλων πνευμάτων της εποχής όπως αυτή του P. Φεινμαν «Είμαι σίγουρος πλέον ότι κανείς δεν καταλαβαίνει τι είναι η κβαντική φυσική» ή ακόμα και θεμελιωτών της θεωρίας όπως ο A. Αϊνστάιν «ο θεός δεν παίζει ζάρια με το σύμπαν».

Παρόλα αυτά, η εδραίωση και η επικράτηση της κβαντομηχανικής δεν προήλθε μέσω της θεωρητικής αντιπαράθεσης, αλλά μέσω της πειραματικής επιβεβαίωσής της, και την εφαρμογή της σε νέες τεχνολογίες, οι οποίες κατέστησαν ρεαλιστικές χάρη στα πορίσματα και τους νόμους που αυτή προέβλεπε. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εφαρμογών, που όχι μόνο θεμελίωσαν τον τεχνικό πολιτισμό του σήμερα αλλά και μετέβαλαν δραστικά τις ίδιες τις κοινωνικές μας δομές, είναι η ανάπτυξη των πρώτων δομών τρανζίστορ και κατ' επέκταση των πρώτων μικροεπεξεργαστών, η δημιουργία νέων διαγνωστικών μεθόδων στο χώρο της ιατρικής (ηλεκτρονική μικροσκοπία, μαγνητική τομογραφία), η ανάπτυξη των πρώτων δομών παραγωγής σύγχρονης οπτικής ακτινοβολίας (λέιζερ) και η υλοποίηση εξωτικών εφαρμογών όπως είναι η κβαντική κρυπτογραφία [1]-[3], η κβαντική τηλεμεταφορά [4]-[5] και η δημιουργία κβαντικών υπολογιστών [6].

1.2 Εισαγωγή στα λέιζερ

Ιδιαίτερο ρόλο στην ανάπτυξη του τεχνολογικού πολιτισμού που παρατηρείται στις μέρες μας διαδραμάτισαν οι πηγές σύγχρονης οπτικής ακτινοβολίας ή αλλιώς λέιζερ (LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Η αρχική ιδέα για την υλοποίηση τέτοιων δομών προήλθε από τη θεωρητική εργασία του Α. Αϊνστάιν που αφορούσε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο [7], δηλαδή την εκπομπή φωτονίων λόγω μετάπτωσης ηλεκτρικών φορέων από μια υψηλή ενεργειακή στάθμη σε μία χαμηλότερη. Αυτό το θεωρητικό υπόβαθρο επέτρεψε την κατασκευή ενός διαρκώς αυξανόμενου πλήθους διατάξεων λέιζερ χρησιμοποιώντας διαφορετικά υλικά και τεχνικές για την διέγερση και την ακτινοβολική επανασύνδεση των ηλεκτρικών φορέων. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η χρήση αερίου ως ενεργού υλικού (λέιζερ HeNe, CO₂, ιόντων Αργού) υγρών διαλυμάτων (rhodamine, stilbene, umbelliferone, tetracene, malachite green κλπ), στερεών (λέιζερ ρουμπινίου, τιτανίου-ζαφειρίου, ερβίου κλπ). Μια ειδική κατηγορία λέιζερ η οποία ναι μεν χρησιμοποιεί στερεά υλικά για τη δημιουργία της ενεργού περιοχής, αλλά παρουσιάζει σημαντικές διαφορές σε σχέση με τα υπόλοιπα λέιζερ στερεάς κατάστασης είναι τα ημιαγωγικά λέιζερ, τα οποία τείνουν να αναφέρονται σαν ξεχωριστή κατηγορία.

Ο συγκεκριμένος τύπος λέιζερ, αν και σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάζει υποδεέστερα χαρακτηριστικά εκπομπής σε σχέση με τις άλλες κατηγορίες λέιζερ (ισχύ, εύρος οπτικής γραμμής, δυνατότητα συντονισμού κλπ) έχει αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω του εξαιρετικά μικρού μεγέθους (εικόνα 1.1), της μικρής ηλεκτρικής κατανάλωσης αλλά και την δυνατότητα μαζικής και φθηνής παραγωγής του χρησιμοποιώντας ώριμες τεχνικές, οι οποίες εφαρμόζονται εδώ και δεκαετίες στο χώρο της κατασκευής ηλεκτρονικών κυκλωμάτων.



Εικόνα 1-1 αριστερά λέιζερ τιτανίου-ζαφειρίου, ενώ δεξιά ημιαγωγικό λέιζερ διπλά σε ακίδα για σύγκριση του μεγέθους τους.

Η χρήση των ημιαγωγικών λέιζερ έδωσε νέα ώθηση στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Πιο συγκεκριμένα, αναπτύχθηκαν νέες τεχνικές οι οποίες χρησιμοποιούσαν σαν φέρουσα για την μεταγωγή της πληροφορίας σύμφωνη οπτική ακτινοβολία, αντί ηλεκτρικών σημάτων. Αυτή η θεμελιώδης διαφορά επέτρεψε πολύ χαμηλά επίπεδα απωλειών κατά τη μεταφορά της πληροφορίας (με χρήση οπτικών ινών), την μεταφορά τεράστιου επικοινωνιακού φόρτου (εκμεταλλεόμενοι το διαθέσιμο εύρος ζώνης των οπτικών ινών) και τέλος, τη δυνατότητα επεξεργασίας της πληροφορίας στο οπτικό επίπεδο (all optical signal processing) με αποτέλεσμα την άρση των περιορισμών του εύρους ζώνης (bandwidth) που επιβάλλουν ακόμα και τα πιο σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα. Στον τομέα της ιατρικής, η αντικατάσταση της ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας (ακτίνες Χ και Γ) με οπτικές συχνότητες επέτρεψε νέες τεχνικές τομογραφίας για την απεικόνιση δομών του ανθρωπίνου σώματος (φωτο-ακουστική τομογραφία,

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές
τομογραφία χαμηλής συμφωνίας κλπ) χωρίς τον κίνδυνο καταστροφής ή αλλοίωσης των κυττάρων.

Οι παραπάνω πλειάδα εφαρμογών καθιστά σαφές ότι η ανάπτυξη εμπορικά διαθέσιμων οπτικών πηγών, με μικρή κατανάλωση ενέργειας και εξαιρετικά φασματικά χαρακτηριστικά αποτελεί θεμελιώδη στόχο της βιομηχανίας, με απώτερο σκοπό την επέκταση χρήσης τέτοιων λέιζερ σε όλο και περισσότερες εφαρμογές.

1.3 Λέιζερ παλμικής λειτουργίας

Τις τελευταίες δύο δεκαετίες η ανάπτυξη δομών λέιζερ, τα οποία μπορούν να παράγουν οπτικούς παλμούς εξαιρετικά μικρής χρονικής διάρκειας, έδωσε νέα ώθηση στη μελέτη των μηχανισμών που προβλέπονται από την κβαντομηχανική και αφορούν την αλληλοεπίδραση φωτός-ύλης. Η επιστημονική κοινότητα, χρησιμοποιώντας τέτοιες δομές σαν εργαλεία, απέκτησε ενδελεχή γνώση μικροσκοπικών και ταχέων διαδικασιών της φύσης, όπως είναι η παρακολούθηση, σε πραγματικό χρόνο, χημικών διεργασιών [8]-[9].

Η ανάπτυξη δομών παλμικών λέιζερ, με δυνατότητα παραγωγής οπτικών παλμών εξαιρετικά μικρής χρονικής διάρκειας στο φάσμα των fs (τρισεκατομμυριοστού του δευτερολέπτου), επέτρεψε την υλοποίηση εμπορικά διαθέσιμων εφαρμογών, τόσο στον ιατρικό, όσο και στον τηλεπικοινωνιακό τομέα. Ειδικότερα, η δυνατότητα παραγωγής στενών οπτικών παλμών με πολύ μεγάλους ρυθμούς (εκατοντάδες GHz) επέτρεψε την ανάπτυξη νέων εφαρμογών όπως οπτικές επικοινωνίες με εξαιρετικά υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης [10]-[12], αμιγώς οπτική επεξεργασία της πληροφορίας παρακάμπτοντας έτσι τους εγγενείς περιορισμούς των ηλεκτρονικών συστημάτων [13]-[17], ηλεκτρο-οπτική δειγματοληψία [18], μετατροπείς αναλογικού-ψηφιακού σήματος (AD converters) [19]-[20], και ανάκτηση και διανομή ρολογιού (clock distribution and recovery) σε σύγχρονα οπτικά δίκτυα [21]-[25].

Εκτός από τον χώρο των τηλεπικοινωνιών, ο συνδυασμός μεγάλης ισχύος κορυφής (οπτική ισχύς εντός του παλμού) και χαμηλής μέσης εκπεμπόμενης ισχύος από τις διατάξεις επέτρεψε την χρήση παλμικών λέιζερ σε εφαρμογές όπως η μικρο-μηχανική [26] και η χειρουργική βιολογικών ιστών με ελάχιστα θερμικά αποτελέσματα [27], ενώ το μεγάλο φασματικό εύρος των οπτικών παλμών έχει χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση πρωτοποριακών μεθόδων τομογραφίας (Optical coherence tomography – OCT), οι οποίες επιτρέπουν μικρο-μετρική διακριτική ικανότητα, ενώ παράλληλα αποφεύγεται η χρήση επιβλαβών μορφών ακτινοβολίας όπως είναι οι ακτίνες Γ και Χ [28].

Για την υλοποίηση αυτών των εφαρμογών έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως λέιζερ στερεάς κατάστασης, όπως είναι τα λέιζερ τιτανίου-ζαφειρίου και τα Cr:YAG. Αυτές οι δομές παρουσιάζουν εξαιρετικά παλμικά χαρακτηριστικά, όπως παλμούς με χρονικό εύρος έως και 5fs [29] και μέση ισχύ εκπομπής έως και 60W [30]. Παρόλα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζονται στα λέιζερ στερεάς κατάστασης, κάποιες ιδιαιτερότητές τους τα καθιστούν δύσχρηστα και ακατάλληλα για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Το πρώτο πρόβλημα έγκειται στο μέγεθος αυτών των διατάξεων, το οποίο είναι αρκετά μεγάλο με αποτέλεσμα να καθίσταται πρακτικά αδύνατη η ολοκλήρωσή τους. Επιπλέον, δεν υπάρχει η δυνατότητα για ηλεκτρική άντληση των φορέων, με αποτέλεσμα να γίνεται απαραίτητη η χρήση δεύτερης πηγής λέιζερ για την λειτουργία τους. Αυτό το γεγονός συνεπάγεται μεγαλύτερη πολυπλοκότητα και μέγεθος, μια και το δεύτερο λέιζερ συνήθως έχει ανεξάρτητο σύστημα τροφοδοσίας και ψύξης. Επίσης καθιστά δύσκολο των απευθείας ηλεκτρικό έλεγχο της διάταξης και τον συγχρονισμό του λέιζερ με ένα εξωτερικό ηλεκτρικό σήμα.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Ένα ακόμα θέμα είναι η σταθερότητα τέτοιων διατάξεων μια και για την ορθή λειτουργία τους απαιτείται ένα σύνολο υποστηρικτικών συστημάτων, όπως κρύσταλλοι, φακοί και ανακλαστήρες, των οποίων η ευθυγράμμιση αλλά και η μηχανική σταθερότητα είναι εξαιρετικά δύσκολη. Τέλος, η διαθέσιμη απολαβή από τους κρυστάλλους είναι συνήθως μικρή, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται κρύσταλλοι μεγαλύτερου μήκους και ως εκ τούτου ο ρυθμός εκπομπής των παλμών να μειώνεται σημαντικά. Επιπροσθέτως η υψηλή πολυπλοκότητα αυτών των δομών επιβάλλει την ειδική επιμόρφωση του προσωπικού που τα χειρίζεται, καθιστώντας έτσι την ευρεία εξάπλωση τους ακόμα πιο δύσκολη.

Σε αντίθεση, τα ημιαγωγικά λέιζερ έχουν μικρό μέγεθος το οποίο δεν ξεπερνά τα λίγα χιλιοστά. Αυτό το γεγονός επιτρέπει μεγάλους ρυθμούς εκπομπής παλμών που μπορούν να φτάσουν τα εκατοντάδες GHz [24]-[25]. Παράλληλα, οι διατάξεις των ημιαγωγικών λέιζερ είναι κατάλληλές για υψηλού βαθμού ολοκλήρωση χρησιμοποιώντας ώριμες τεχνικές κατασκευής, που εφαρμόζονται εδώ και δεκαετίες στην ανάπτυξη μικροηλεκτρονικών διατάξεων. Ένα ακόμα βασικό πλεονέκτημα των λέιζερ ημιαγωγού είναι η δυνατότητα ηλεκτρικής άντλησης (electroluminescence), η οποία προσφέρει ευελιξία στο χειρισμό της διάταξης (δεν χρειάζονται διπλές διατάξεις λέιζερ) ενώ, ταυτόχρονα, επιτρέπει τον έλεγχο, τόσο της χρονικής διάρκειας των παλμών, μέσω της αλλαγής της δυναμικής συμπεριφοράς της διάταξης [31], όσο και του ρυθμού εκπομπής των παλμών [32].

Αποτέλεσμα αυτών των πλεονεκτημάτων των ημιαγωγικών λέιζερ έναντι των λέιζερ στερεάς κατάστασης είναι η δραματική πτώση του κόστους κατασκευής, η πτώση του κόστους ανάπτυξης και χρήσης των διατάξεων, καθώς και ο εύκολος χειρισμός των παλμικών χαρακτηριστικών μέσω της ρύθμισης των συνθηκών πόλωσης (bias). Αυτά τα πλεονεκτήματα επιτρέπουν την προώθηση της χρήσης των διατάξεων σε νέες εφαρμογές, όπου το μικρό μήκος και η σταθερότητα λειτουργίας αποτελούν κρίσιμα προβλήματα (ιατρικές εφαρμογές). Επιπροσθέτως, ο μεγάλος και ταυτόχρονα ρυθμιζόμενος ρυθμός παραγωγής παλμών επιτρέπει την αποδοτική ενσωμάτωσή τους σε σύγχρονα οπτικά δίκτυα.

Παρόλα τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα ημιαγωγικά λέιζερ, επιδεικνύουν σημαντικά υποδεέστερες επιδόσεις σε σύγκριση με τα λέιζερ στερεάς κατάστασης. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο διαφορετικό φυσικό μηχανισμό που είναι υπεύθυνος για τη δημιουργία των οπτικών παλμών στα δύο είδη λέιζερ. Πιο συγκεκριμένα, το ενεργό υλικό των ημιαγωγικών λέιζερ παρουσιάζει πολύ έντονη μη γραμμικότητα, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται ισχυρές μεταβολές των χαρακτηριστικών του υλικού (δείκτης διάθλασης) με την μεταβολή της οπτικής έντασης. Λόγω αυτής της μη γραμμικότητας, οι διαδιδόμενοι παλμοί στα ημιαγωγικά λέιζερ υπόκεινται σε μεταβολή της στιγμιαίας φάσης τους (chirp) που σε συνδυασμό με τη χρωματική διασπορά που παρατηρείται στους ημιαγωγούς προκαλεί σημαντική αύξηση της χρονικής διάρκειας των παραγόμενων παλμών [33]. Αυτό το χαρακτηριστικό δεν επιτρέπει την παραγωγή πολύ στενών οπτικών παλμών, με αποτέλεσμα το χρονικό εύρος να βρίσκεται στην κλίμακα των ps. Επιπλέον, ο κορεσμός της απολαβής προκαλεί σημαντική μείωση της διαθέσιμης οπτικής ισχύος με αποτέλεσμα να παρατηρούνται χαμηλές τιμές, τόσο στην μέση εκπεμπόμενη ισχύ, όσο και στην ισχύ κορυφής, οι οποία δεν ξεπερνά τα 100mW σε αντίθεση με τα λέιζερ στερεάς κατάστασης που επιτρέπουν παλμούς με ισχύ κορυφής της τάξης των δεκάδων KW [34].

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Όλα τα προαναφερθέντα μειονεκτήματα οφείλονται στην ίδια την φύση των ημιαγωγικών υλικών και ως εκ τούτου είναι εξαιρετικά δύσκολο να αρθούν. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια προτάθηκε η δημιουργία ημιαγωγικών λέιζερ, των οποίων το ενεργό υλικό δεν βασίζεται ούτε σε ομογενείς ημιαγωγούς (bulk), ούτε σε κβαντικά φρέατα (quantum wells). Οι νέες αυτές δομές ονομάζονται λέιζερ κβαντικών νημάτων (quantum wires) και τελειών (quantum dots) και λόγω της μοναδικής δομής τους προσφέρουν πλεονεκτήματα που μπορούν να άρουν σε ένα βαθμό τους προαναφερόμενους περιορισμούς.

Η δυνατότητα εκμετάλλευσης όλων των πλεονεκτημάτων που προσφέρουν τα ημιαγωγικά λέιζερ, με ταυτόχρονη βελτίωση των επιδόσεων της παλμικής λειτουργίας λόγω χρήσης κβαντικών τελειών ως ενεργό υλικό, θα επιτρέψει την εξάπλωση χρήσης τέτοιων διατάξεων σε μια σειρά από ιδιαίτερα κρίσιμες εφαρμογές. Η επίπτωση που θα έχει μία τέτοια μεταβολή τόσο στο χώρο των οπτικών δικτύων όσο και στον τομέα των βιο-ιατρικών εφαρμογών αποτέλεσε και το βασικό κίνητρο για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

1.4 Κβαντικές τελείες και ο ρόλος του χωρικού περιορισμού των φορέων

1.4.1 Η επίδραση του χωρικού περιορισμού στα ημιαγωγικά λέιζερ

Βασικό στοιχείο για την άρση των μειονεκτημάτων που εμφανίζονται σε ημιαγωγικά λέιζερ όταν αυτά βρίσκονται σε παλμική λειτουργία είναι ο χωρικός περιορισμός των ηλεκτρικών φορέων του ενεργού μέσου. Συνεπώς, για την καλύτερη κατανόηση των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η αντικατάσταση του ενεργού υλικού από κβαντικές τελείες, στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζεται σύντομα η φύση των κβαντικών τελειών με ιδιαίτερη έμφαση στο ρόλο του χωρικού περιορισμού των ηλεκτρικών φορέων.

Στα πρώτα βήματα κατασκευής ημιαγωγικών λέιζερ το ενεργό υλικό ήταν ομοιογενές (bulk) με αποτέλεσμα να παρουσιάζει εξαιρετικά μικρή αποδοτικότητα λόγω υψηλών οπτικών και ηλεκτρικών απωλειών [35]. Η εισαγωγή της εταιροεπαφής, δηλαδή η χρήση ενός στρώματος ημιαγωγικού υλικού με υψηλό ενεργειακό χάσμα και ως εκ τούτου με υψηλότερο δείκτη διάθλασης το οποίο περιβάλλεται από διαφορετικά υλικά με χαμηλότερο ενεργειακό χάσμα, επέτρεψε τον καλύτερο οπτικό και ηλεκτρονικό περιορισμό. Αποτέλεσμα αυτού του περιορισμού ήταν η μείωση του ρεύματος κατωφλίου κατά δύο τάξεις μεγέθους και ως εκ τούτου η ραγδαία αύξηση της απόδοσης των λέιζερ [36].

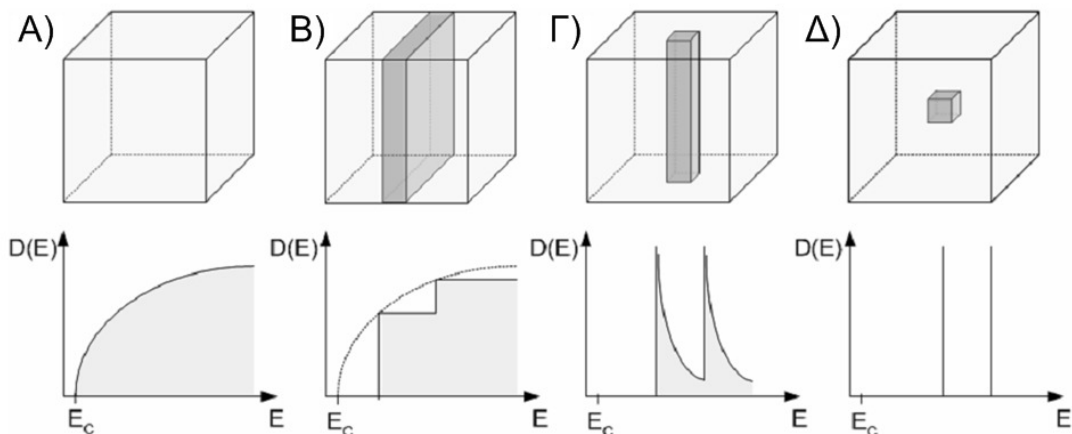
Η χρήση εταιροεπαφής κατέστησε σαφές ότι ο χωρικός περιορισμός σε τέτοιες διατάξεις μπορεί να επιτρέψει νέες ηλεκτρο-οπτικές ιδιότητες και αύξηση της απόδοσης. Για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας του περιορισμού παρατίθεται ο τύπος 1.1, ο οποίος περιγράφει το μήκος κύματος θερμικών ηλεκτρονίων (thermalized electrons) κατά Broglie, όπου h είναι η σταθερά του Planck, m^* η ενεργή μάζα του ηλεκτρονίου και E η ενέργεια.

$$\lambda_B = \frac{h}{\sqrt{2m^*E}} \quad (1.1)$$

Αυτό που μπορεί να εξαχθεί από την σχέση, όταν χρησιμοποιείται για ημιαγωγικά υλικά είναι ότι αν μία διάσταση της δομής είναι μικρότερη ή συγκρίσιμη με το λ_B , τότε οι ηλεκτρικοί φορείς θα περιοριστούν χωρικά σε αυτή τη διάσταση, ενώ θα κινούνται ελεύθερα στις υπόλοιπες. Αυτή είναι η περίπτωση μιας δομής κβαντικού φρέατος. Αν ο περιορισμός επιτευχθεί σε δύο διαστάσεις τότε αναφερόμαστε σε υλικά κβαντικού

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

νήματος (quantum wires) [] ενώ στην περίπτωση των κβαντικών τελειών, ο περιορισμός λόγω δομής είναι και στις τρεις διαστάσεις. Ο περιορισμός των φορέων επιφέρει τελείως διαφορετική πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 1.1, ενώ ο περιορισμός των διαστάσεων ελευθερίας μετασχηματίζει την πυκνότητα των ενεργειακών καταστάσεων από συνεχή (α) σε ημι-συνεχή (quasi-continues) (β-γ) και τέλος σε διακριτή (δ). Σε πρακτικό, επίπεδο αυτή η αλλαγή μεταφράζεται στο ότι η μείωση της πυκνότητας ισοδυναμεί με μείωση του αριθμού των ηλεκτρικών φορέων που πρέπει να διεγερθούν για να καταστεί μια ενεργειακή κατάσταση πλήρης. Αυτό έχει σαν συνέπεια τη μείωση του ρεύματος κατωφλίου και της επίδρασης της θερμοκρασίας στην απόδοση της διάταξης.



Σχήμα 1-1 Η δομή του ενεργού υλικού (πάνω) και οι αντίστοιχη πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων (κάτω) για α) ομογενές υλικό, β) κβαντικό φρέαρ, γ) κβαντικό καλώδιο, και δ) κβαντική τελεία

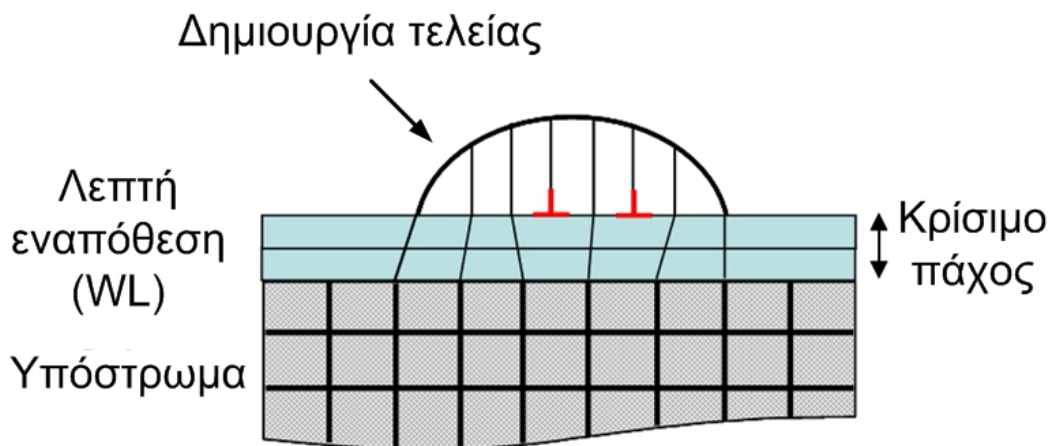
1.4.2 Υλικά και διαδικασίες κατασκευής των κβαντικών τελειών

Η βασική τεχνική κατασκευής κβαντικών τελειών βασίζεται στη χρήση κραμάτων υλικών της III και V ομάδας του περιοδικού συστήματος, τα οποία αναπτύσσονται πάνω σε ένα ημιαγωγικό υπόστρωμα. Παραδείγματος χάρη οι κβαντικές τελείες αποτελούνται από κράμα InGaAs/InAs, το οποίο αναπτύσσεται πάνω σε υπόστρωμα GaAs με αποτέλεσμα το μήκος κύματος εκπομπής να κυμαίνεται από το 1μm μέχρι τα 1.55μm, ή εναλλακτικά πάνω σε υπόστρωμα InP, το οποίο ευνοεί την εκπομπή σε μια διαφορετική ενεργειακή ζώνη (1.4μm – 1.9μm) [37].

Η πιο αποδοτική τεχνική για την ανάπτυξη κβαντικών τελειών σε κάποιο υπόστρωμα βασίζεται στην αυτοοργάνωση τρισδιάστατων νησίδων υλικού, λόγω επιταξιακής εναπόθεσης υπό την παρουσία μηχανικής παραμόρφωσης γνωστή ως μέθοδος Stranski-Krastanow (σχήμα 1.2) [37]-[38]. Σύμφωνα με αυτή τη διεργασία, όταν ένα στρώμα ημιαγωγού (A) αναπτύσσεται μέσω επιταξίας πάνω από ένα στρώμα ημιαγωγού (B), το νέο στρώμα αναπτύσσεται σταδιακά. Στην περίπτωση όμως που ξεπεραστεί ένα συγκεκριμένο όριο πάχους, στην επιφάνεια του νέου στρώματος αναπτύσσονται νησίδες υλικού με διαστάσεις νανομέτρων (quantum dots). Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι ένα λεπτό στρώμα υποκείμενου υλικού πάνω στο οποίο έχουν διαμορφωθεί οι κβαντικές τελείες. Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η σταθερά του κρυσταλλικού πλέγματος του υπερκείμενου υλικού να είναι μεγαλύτερη από αυτή του υποστρώματος. Στο σχήμα 1.3

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

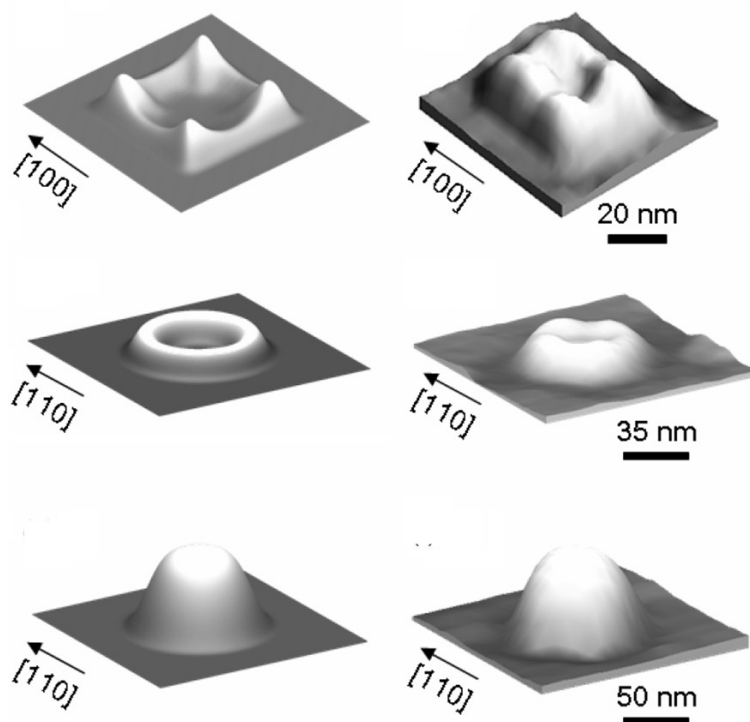
παρουσιάζονται τυπικές μορφές κβαντικών τελειών που μπορούν να παραχθούν μέσω της μεθόδου Stranski-Krastanow. Οι διαφορετικές χωρικές κατανομές που αποκτούν οι νησίδες υλικού σχετίζονται με τις διαφορετικές κρυσταλογραφικές διευθύνσεις του υποστρώματος.



Σχήμα 1-2 Σχηματική αναπαράσταση της διεργασίας κατασκευής κβαντικών τελειών μέσω της μεθόδου Stranski-Krastanow.

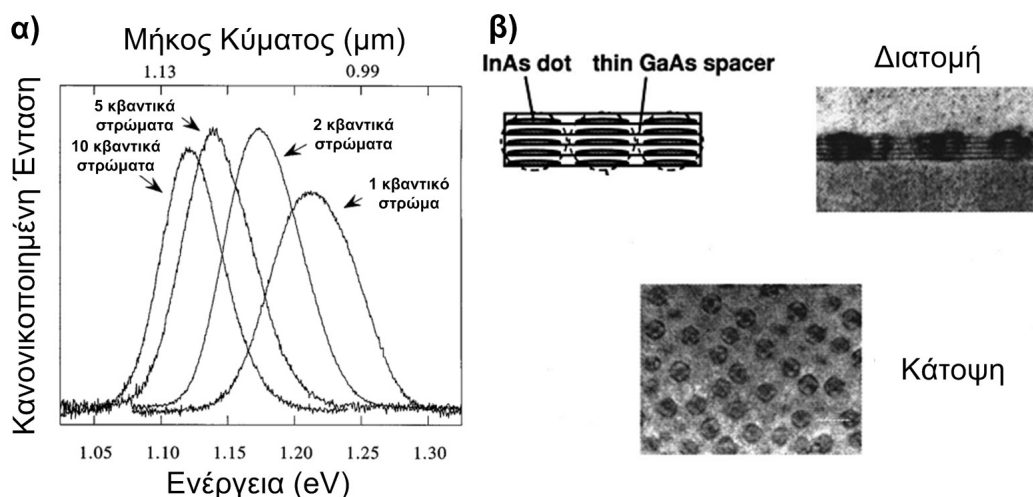
Παρόλο που η μέθοδος Stranski-Krastanow είναι μια εξαιρετικά περίπλοκη διαδικασία, χρησιμοποιεί τυπικές μεθόδους επιταξίας, όπως είναι η επιταξία μοριακής δέσμης (Molecular beam epitaxy) και η χημική εναπόθεση μετάλλου (Metal organic chemical vapor deposition). Αυτό το γεγονός προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα μια και οι δύο μέθοδοι είναι καλά καθορισμένες και τα τεχνικά προβλήματα που παρουσιάζουν έχουν επιλυθεί σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον, η χρήση γνωστών τεχνικών για την ανάπτυξη κβαντικών τελειών υποβοηθά την εμπορική τους εξάπλωση μια και δεν απαιτείται η ανακάλυψη νέων τεχνικών επιταξίας.

Η φύση της διαδικασίας ανάπτυξης κβαντικών τελειών επιτρέπει την διακύμανση των χωρικών διαστάσεων των τελειών με αποτέλεσμα να παρατηρούνται στατιστικές αποκλίσεις που ανάλογα με την τεχνική που θα ακολουθηθεί, μπορούν να μειωθούν σε λίγες ποσοστιαίες μονάδες [39]-[40]. Επίσης, στην περίπτωση που οι κβαντικές τελείες κατασκευαστούν αξιοποιώντας επίπεδη (Planar) τεχνολογία, οι ακριβείς θέσεις που θα αναπτυχθούν πάνω στην επιφάνεια είναι τυχαίες. Για τον σαφή προσδιορισμό της θέσης στην οποία θα αναπτυχθεί μία κβαντική τελεία απαιτείται σε προηγούμενο στάδιο της μεθόδου οι περιοχές που θα ευνοήσουν την ανάπτυξη κβαντικών τελειών, να έχουν υποστεί κατάλληλη επεξεργασία [41]. Τέλος, η παρούσα τεχνολογία κατασκευής επιτρέπει τη χωρική πυκνότητα των τελειών να κυμαίνεται από 10^9cm^{-2} μέχρι 10^{11}cm^{-2} [42]. Ακόμα και υψηλή τιμή των 10^{11}cm^{-2} θεωρείται σχετικά χαμηλή με αποτέλεσμα, τόσο ο χωρικός περιορισμός του οπτικού τρόπου, όσο και η διαθέσιμη απολαβή του υλικού να είναι περιορισμένη. Αποτέλεσμα αυτού είναι οι διατάξεις που αποτελούνται από ένα μόνο στρώμα κβαντικών τελειών να παρουσιάζουν μικρή εκπεμπόμενη ισχύ.



Σχήμα 1-3 Χωρικές κατανομές τελειών ανάλογα με τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό του υποστρώματος.

Η επίλυση αυτού του προβλήματος θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί είτε με την αύξηση του πλάτους της διάταξης, με ανεπιθύμητο αποτέλεσμα το λέιζερ να παύσει να είναι χωρικά μονότροπο, είτε με την αύξηση του συνολικού μήκους της διάταξης, με αποτέλεσμα όμως την αύξηση και των απωλειών διάδοσης αλλά και την αδυναμία υψηλής ολοκλήρωσης των διατάξεων.



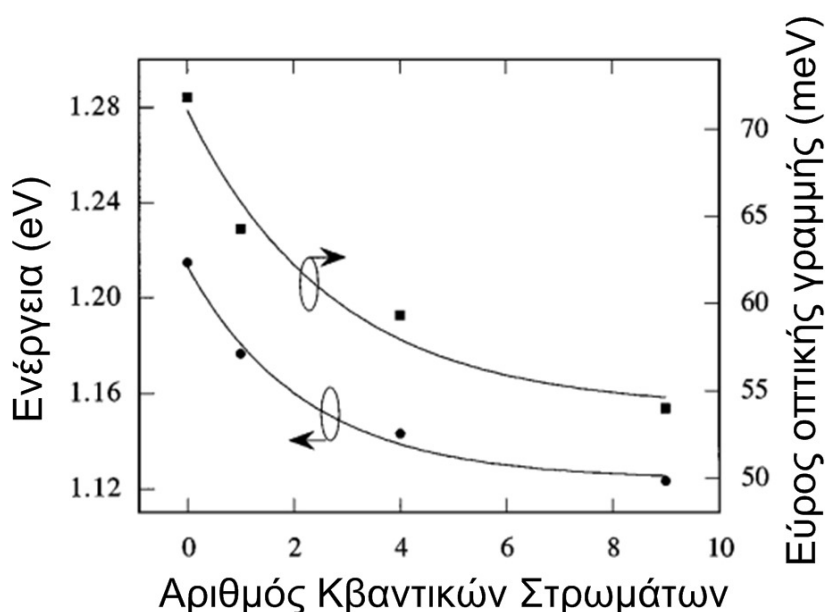
Σχήμα 1-4 α) Οπτικό φάσμα λέιζερ κβαντικών τελειών με διαφορετικό αριθμό κβαντικών στρωμάτων. β) Διατομή και κάτοψη του ενεργού υλικού [45]

Ένα από τα βασικά βήματα στην βελτίωση της εκπεμπόμενης ισχύος ήταν η χρήση επιταξίας πολλαπλών στρωμάτων κβαντικών τελειών, που επέτρεπε την εναπόθεση πολλών στρωμάτων κβαντικών τελειών στην ίδια διάταξη. Το αποτέλεσμα αυτής της τεχνικής ήταν η ραγδαία αύξηση της πυκνότητας των τελειών αλλά και η αύξηση του μεγέθους της ενεργής κοιλότητας [43]-[44]. Στην πράξη αυτή η τεχνική περιλαμβάνει την εναπόθεση ενός λεπτού στρώματος πάνω από το πρώτο στρώμα τελειών (buffer), το

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

οποίο επιτρέπει την επιταξία νέων τελειών οι οποίες παρουσιάζουν την ίδια χωρική κατανομή με τις υποκείμενες [45]-[47] (σχήμα 1.4).

Η κοινή χωρική κατανομή των νέων στρωμάτων έχει εξαιρετική σημασία διότι εξασφαλίζει μεγάλη πυκνότητα τελειών με αποτέλεσμα να παρατηρείται μικρό οπτικό εύρος, λόγω περιορισμένης διακύμανσης του μεγέθους των τελειών αλλά και μεγάλη απολαβή σε κάθε μήκος κύματος. Για την επίτευξη αυτής της ομοιογένειας απαιτείται το πάχος του βοηθητικού στρώματος να είναι αρκετά μικρό (10nm) ώστε οι μηχανικές δυνάμεις που δημιουργήσαν το πρώτο στρώμα τελειών να επηρεάσουν με τον ίδιο τρόπο και τις υπερκείμενες. Σε αντίθετη περίπτωση το φασματικό εύρος καθίσταται εξαιρετικά μεγάλο καθώς και παρατηρείται ισχυρή μείωση της διαθέσιμης απολαβής σε κάθε φασματική περιοχή. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1.5 η αύξηση των κβαντικών στρωμάτων εκτός από αύξηση της κβαντικής απόδοσης των λέιζερ επιφέρει μείωση του εύρους της οπτικής γραμμής καθώς και την ολίσθηση του μήκους κύματος εκπομπής σε μικρότερες τιμές [48]. Η νέα αυτή προσέγγιση έδωσε νέα ώθηση στην μελέτη της επίδρασης των διαφορετικών κατασκευαστικών παραμέτρων και ιδιαίτερα του αριθμού στρωμάτων κβαντικών τελειών, στις επιδόσεις τέτοιων λέιζερ, όπως θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια.



Σχήμα 1-5 Μεταβολή της κεντρικής φασματικής κορυφής και του εύρους της οπτικής γραμμής με τον αριθμό των κβαντικών τελειών [48].

1.5 Εφαρμογές των παλμικών λέιζερ κβαντικών τελειών

Στις προηγούμενες παραγράφους αναδείχτηκε η επιτακτική ανάγκη για την κατασκευή ημιαγωγικών λέιζερ υψηλών επιδόσεων, ενώ αναδείχτηκαν τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα υλικά κβαντικών τελειών. Στη συνέχεια ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση των διαφορετικών εφαρμογών που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν τα παλμικά λέιζερ κβαντικών τελειών αντικαθιστώντας, είτε λέιζερ κβαντικού φρέατος, τα οποία παρουσιάζουν χαμηλές επιδόσεις ή δύσχρηστα λέιζερ στερεάς κατάστασης.

1.5.1 Οπτικές επικοινωνίες

Ο συνδυασμός υψηλού ρυθμού παραγωγής παλμών και χαμηλού θορύβου φάσης που προσφέρουν τα λέιζερ κβαντικών τελειών, τα καθιστούν εξαιρετικούς υποψηφίους για μεγάλη γκάμα τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών. Ιδιαίτερα για δίκτυα διαμοιρασμού χρονοθυρίδων (time division multiplexing systems) στα οποία ροές πληροφορίας χαμηλού ρυθμού πολυπλέκονται χρονικά ώστε να δημιουργήσουν μία ενιαία ροή πληροφορίας πολύ υψηλότερου ρυθμού, τα παλμικά λέιζερ κβαντικών σημείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο ως πηγές όσο και ως συστήματα ανάκτησης του χρονισμού (clock recovery systems). Πιο συγκεκριμένα, ο μεγάλος ρυθμός επανάληψης όπως και οι εξαιρετικά στενοί οπτικοί παλμοί μπορούν να μειώσουν τη χρονική διάρκεια κάθε χρονοθυρίδας, με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού του δικτύου.

Το μεγάλο φασματικό εύρος που παρέχεται μέσω της ανομοιογένειας των χωρικών διαστάσεων των τελειών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την υλοποίηση αποτελεσματικών πηγών για συστήματα πολυπλεξίας μήκους κύματος (wavelength multiplexing systems). Χρησιμοποιώντας τεχνικές χωρισμού του διαθέσιμου φάσματος σε τμήματα (slicing) μπορούν να δημιουργηθούν ανεξάρτητα μήκη κύματος, το καθένα από τα οποία μπορεί να φέρει διαφορετική ροή πληροφορίας, χωρίς τη χρήση πολλών συμβατικών πηγών λέιζερ αλλά χρησιμοποιώντας ένα μόνο λέιζερ κβαντικών τελειών. Στην πράξη, η προαναφερθείσα τεχνική έχει χρησιμοποιηθεί δημιουργώντας ενενήντα τρεις διαφορετικές ροές πληροφορίας από ένα μόνο λέιζερ κβαντικών τελειών για ένα εύρος μηκών κύματος από τα 1638nm έως τα 1646nm [49].

Η χρήση λέιζερ κβαντικών τελειών έχει ιδιαίτερο ενδιαφέρον σε διαστημικές εφαρμογές. Η διακριτή φύση των ενεργειακών σταθμών αλλά και ο τρισδιάστατος χωρικός περιορισμός των φορέων επιτρέπει στις διατάξεις να παρουσιάζουν εξαιρετική ανοχή στις ατέλειες που δημιουργούνται λόγω ύπαρξης σωματιδίων υψηλής ενέργειας σε σχέση με διατάξεις κβαντικού φρέατος. Αποτέλεσμα αυτού είναι να μην μειώνεται σημαντικά η απόδοση των διατάξεων με το χρόνο και να είναι εξαιρετικοί υποψήφιοι για εφαρμογές όπως είναι οι δια-δορυφορικές επικοινωνίες (Inter-satellite communications) [50].

Μια επιπλέον μελλοντική εφαρμογή των λέιζερ κβαντικών τελειών που θα παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 9 της παρούσας διατριβής είναι η χρήση τους σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα που βασίζονται σε τεχνικές χαοτικής κρυπτογραφίας, λόγω της ικανότητας τους να παράγουν οπτικά φέροντα υψηλής πολυπλοκότητας χωρίς τη χρήση πολύπλοκων συστημάτων οπτικής ανατροφοδότησης [51].

1.5.2 Ολοκληρωμένα συστήματα

Παλμικά λέιζερ έχουν χρησιμοποιηθεί και σε ολοκληρωμένα συστήματα είτε ως οπτικές διασυνδέσεις (optical interconnects) εντός του επεξεργαστή (on-chip) είτε μεταξύ επεξεργαστών (inter-chip), είτε μεταξύ επεξεργαστών και μητρικής πλακέτας (inter board) [52]. Η χρήση των παλμικών λέιζερ σε τέτοιες εφαρμογές έγκειται στην δημιουργία ενός οπτικού ρολογιού εντός της μητρικής πλακέτας για την αποφυγή αλληλοπαρεμβολών (crosstalk) μεταξύ των ηλεκτρικών γραμμών. Σε αυτές τις εφαρμογές δεν απαιτούνται ιδιαίτερα υψηλοί ρυθμοί του παλμικού λέιζερ, έτσι ώστε να μπορέσουν να ακολουθήσουν τα υπόλοιπα αμιγώς ηλεκτρικά συστήματα της διάταξης. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται λέιζερ με σχετικά μεγάλο μήκος (>8mm) ώστε να παρέχουν χαμηλό ρυθμό επανάληψης των παλμών. Στην περίπτωση που για την υλοποίηση τέτοιων διατάξεων χρησιμοποιηθούν λέιζερ κβαντικού φρέατος, το αυξημένο μήκος τους επάγει ιδιαίτερα αυξημένες απώλειες με αποτέλεσμα να δημιουργούνται

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

εξαιρετικά αυστηρές προδιαγραφές για τα υπόλοιπα υποστηρικτικά συστήματα (κυματοδηγοί εξαιρετικά χαμηλών απωλειών, απαίτηση για υψηλή σύζευξη του φωτός από το λέιζερ) [53]. Η μοναδική φύση των λέιζερ κβαντικών σημείων επιτρέπει χαμηλές απώλειες διάδοσης και μικρό ρεύμα κατωφλίου επιτρέποντας έτσι την πιο εύκολη ενσωμάτωση των διατάξεων εντός του συστήματος.

1.5.3 Βιο-φωτονικές και ιατρικές εφαρμογές

Στις εφαρμογές που σχετίζονται με τις οπτικές επικοινωνίες ή με τα ολοκληρωμένα συστήματα, τα παλμικά ημιαγωγικά λέιζερ έχουν ήδη καταφέρει να διεισδύσουν, συνεπώς ο ρόλος των λέιζερ κβαντικών τελειών είναι η βελτίωση της λειτουργίας τέτοιων συστημάτων. Στο χώρο όμως των βιοφωτονικών και ιατρικών εφαρμογών, οι απαιτήσεις είναι διαφορετικές με αποτέλεσμα η πλειοψηφία των εφαρμογών να χρησιμοποιεί λέιζερ στερεάς κατάστασης, με ότι προβλήματα αυτό συνεπάγεται. Επιπλέον, η υλοποίηση πολλών εφαρμογών καθίσταται ακόμα αδύνατη λόγω, είτε της αδυναμίας ολοκλήρωσης των λέιζερ στέρεας κατάστασης, είτε λόγω των περιορισμένων επιδόσεων των ημιαγωγικών λέιζερ. Συνεπώς ο χώρος της ιατρικής θα ωφεληθεί πολύ πιο έντονα από την ανάπτυξη ποιοτικών ημιαγωγικών δομών.

Η οπτική τομογραφία χαμηλής συμφωνίας (optical coherence tomography) είναι μια νέα μέθοδος που επιτρέπει την απεικόνιση βιολογικών δομών με μικρομετρική ανάλυση. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην αρχή της ιντερφερομετρίας. Πιο συγκεκριμένα, μια πηγή φωτός με μεγάλο φασματικό εύρος, και άρα μικρό μήκος συμφωνίας, ακτινοβολεί ένα βιολογικό ιστό. Το μεγαλύτερο τμήμα της ακτινοβολίας σκεδάζεται λόγω της ανομοιογένειας του ιστού και μόνο ένα μικρό τμήμα της ανακλάται. Το ανακλώμενο τμήμα οδηγείται μαζί με ένα σήμα αναφοράς σε ένα ιντερφερόμετρο (Mach zehnder – Michelson), όπου πραγματοποιείται η συμβολή της αναφοράς και του σήματος. Η διαφορά φάσης του ανακλώμενου σήματος σε σχέση με την αναφορά λόγω διάδοσης εντός του ιστού μετατρέπεται από το ιντερφερόμετρο σε διαφορά ισχύος, η οποία και προσφέρει πληροφορίες για την δομή του προς εξέταση ιστού. Το μεγάλο φασματικό εύρος απαιτείται έτσι ώστε το μήκος συμφωνίας να παραμένει εξαιρετικά μικρό και κατά συνέπεια και το μήκος του ιντερφερόμετρου να μην γίνεται απαγορευτικά μεγάλο.

Διάφορες πηγές έχουν χρησιμοποιηθεί για την επίτευξη αυτού του είδους τομογραφίας, συμπεριλαμβανομένων LED, οι οποίες παρουσιάζουν μεγάλο φασματικό εύρος αλλά μικρή ισχύ εκπομπής [54], και παλμικά λέιζερ στερεάς κατάστασης τα οποία παρέχουν μεγάλη οπτική ισχύ και μεγάλο φασματικό εύρος λόγω της ύπαρξης πολύ στενών παλμών [55]. Η εφαρμογή κβαντικών τελειών σε αυτή την περίπτωση μπορεί να πραγματοποιηθεί, είτε χρησιμοποιώντας ειδικές τεχνικές κατασκευής των τελειών ώστε να αυξηθεί η μη ομογενής απολαβή και να ξεπεράσει τα 100nm, είτε χρησιμοποιώντας τα λέιζερ σε παλμική λειτουργία ώστε να επιτραπεί η δημιουργία μεγάλου φασματικού περιεχομένου λόγω ύπαρξης στενών οπτικών παλμών. Η χρήση κβαντικών τελειών σε αυτή την εφαρμογή θα μειώσει δραστικά, τόσο το μέγεθος των διατάξεων όσο και την πολυπλοκότητα τους.

Μια ακόμα ιατρική εφαρμογή είναι η φωτο-ακουστική τομογραφία, η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της οπτικής τομογραφίας με τα πλεονεκτήματα της τομογραφίας υπερήχων. Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στην διέγερση ιστών μέσω οπτικών παλμών με μήκος κύματος το οποίο απορροφάται έντονα από τον προς μελέτη ιστό. Το διεγερμένο δείγμα υπόκειται σε θερμική διαστολή με αποτέλεσμα την δημιουργία υπερήχων, οι οποίοι ανιχνεύονται από ειδικούς αισθητήρες. Το βασικό πλεονέκτημα της διάταξης είναι το μεγάλο βάθος διείσδυσης με ελάχιστο θερμικό αντίκτυπο στα κύτταρα λόγω του γεγονότος ότι η λειτουργία δεν βασίζεται στην ανάκλαση αλλά στην

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

απορρόφηση. Επιπρόσθετα, οι υπέρηχοι οι οποίοι παράγονται υπόκεινται σε σημαντικά πιο ασθενή φαινόμενα σκέδασης από την οπτική ακτινοβολία, με αποτέλεσμα την εξαιρετικά καλή διακριτική ικανότητα που μπορεί να φτάσει τα λίγα μικρόμετρα [56].

Το χρονικό εύρος των οπτικών παλμών καθορίζει τη διακριτική ικανότητα του συστήματος και πρέπει να είναι μικρότερο από το χρόνο της μεταφοράς της θερμότητας (thermal diffusion). Συνήθως, σε εμπορικά διαθέσιμα συστήματα οι παλμοί που χρησιμοποιούνται είναι της τάξης των ns ή μερικών εκατοντάδων ps. Αν σε αυτή την εφαρμογή χρησιμοποιηθούν διατάξεις κβαντικών τελειών, μπορεί να μειωθεί δραστικά το μέγεθος των διατάξεων καθώς και να αυξηθεί σημαντικά η χωρική διακριτική ικανότητα, επιτρέποντας έτσι την τομογραφία εξαιρετικά μικρών ιστών ή κυττάρων.

1.6 Κίνητρο της διατριβής

Οι παραπάνω παράγραφοι κατέστησαν σαφές ότι η εισαγωγή ημιαγωγικών λέιζερ σε ένα ολοένα αυξανόμενο εύρος εφαρμογών και η αντικατάσταση των συμβατικών παλμικών λέιζερ στερεάς κατάστασης, θα πρόσφερε σημαντικά τεχνολογικά οφέλη. Ειδικότερα θα μείωνε την κατανάλωση ισχύος, το συνολικό μέγεθος και την πολυπλοκότητα της διαδικασίας ελέγχου τέτοιων δομών, επιτρέποντας έτσι την χρήση παλμικών λέιζερ σε νέες εφαρμογές τόσο στον χώρο της ιατρικής όσο και στον τομέα των τηλεπικοινωνιών. Εφαρμογές όπως νέα είδη τομογραφίας με εξαιρετικά υψηλές δυνατότητες απεικόνισης βιολογικών δομών, εφαρμογές νανο-χειρουργικής, τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές όπως η οπτική διασύνδεση συστημάτων, ή παραγωγή οπτικών παλμών ως ρολόι συγχρονισμού σε σύγχρονα δίκτυα, αποτελούν μόνο λίγα παραδείγματα εφαρμογών που η χρήση ημιαγωγικών λέιζερ θα της καθιστούσε άμεσα υλοποιήσιμες. Παρόλα αυτά τα συμβατικά ημιαγωγικά λέιζερ παρουσιάζουν εγγενείς αδυναμίες όσο αναφορά τις επιδόσεις τους, με αποτέλεσμα η εφαρμογή τους στις προαναφερθείσες εφαρμογές να καθίσταται εξαιρετικά δυσεφάρμοστη. Ειδικότερα η χαμηλή τιμή ισχύος, η δυσκολία να επιτευχθούν παλμοί με εύρος μικρότερο από μερικά ps και η ύπαρξη αυξημένων επιπέδων θορύβου στους παλμούς, καθιστά τα ημιαγωγικά λέιζερ μη ανταγωνιστικά συγκρινόμενα με τα λέιζερ στερεάς κατάστασης.

Η χρήση νέων υλικών βασισμένων στις κβαντικές τελείες σε ημιαγωγικά λέιζερ, επιτρέπει την άρση κάποιων από τα παραπάνω μειονεκτήματα. Η σχεδόν ατομική ενεργειακή τους κατανομή επιτρέπει την ύπαρξη εξαιρετικά μικρών χρόνων επαναφοράς των φορέων, θερμοκρασιακή σταθερότητα, μεγάλη φωτο-ηλεκτρική απόδοση και τη δυνατότητα ταυτόχρονης εκπομπής από πολλές διαφορετικές ενεργειακές στάθμες. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι η βελτίωση της παλμικής απόδοσης των λέιζερ και η παραγωγή οπτικών παλμών με μικρό χρονικό εύρος και μεγάλη ισχύ κορυφής. Συνεπώς η μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοση της λειτουργίας διατάξεων που είναι βασισμένες σε κβαντικές τελείες είναι ένα γόνιμο και ενδιαφέρον πεδίο έρευνας με μεγάλη πρακτική σημασία.

Στα πλαίσια αυτής της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε η προσπάθεια τόσο μέσω της θεωρητικής όσο και μέσω της πειραματικής διερεύνησης τέτοιων δομών να χαρτογραφηθούν οι διαφορετικές περιοχές λειτουργίας και να εντοπιστούν οι κατασκευαστικές παράμετροι που επιτρέπουν την βελτίωση της απόδοσης των παλμικών λέιζερ κβαντικών τελειών. Επιπροσθέτως η πειραματική διερεύνηση επέτρεψε την καταγραφή νέων περιοχών λειτουργίας οι οποίες επιτρέπουν την περαιτέρω βελτίωση των χαρακτηριστικών των παραγόμενων οπτικών παλμών και την χρήση τους σε τελείως διαφορετικά πεδία εφαρμογής όπως είναι η χασοκή κρυπτογραφία και η παλμικές πηγές στην φασματική περιοχή των THz.

1.7 Δομή της διατριβής

Στο δεύτερο κεφάλαιο θα παρουσιαστούν συνοπτικά όλες οι τεχνικές που επιτρέπουν την παλμική λειτουργία σε ημιαγωγικά λείζερ, ενώ παράλληλα καταδεικνύονται και τα μειονεκτήματα που παρουσιάζονται. Στη συνέχεια θα αναφερθούν τα βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρονται αν πραγματοποιηθεί αντικατάσταση των υλικών κβαντικού φρέατος από κβαντικές τελείες, όταν η διάταξη βρίσκεται σε παλμική λειτουργία λόγω παθητικής εγκλειδωσης των τρόπων.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση του θεωρητικού μοντέλου για την μεσοσκοπική προσομοίωση της απολαβής των λείζερ κβαντικών τελειών, ενώ στη συνέχεια η απολαβή του υλικού θα ενσωματωθεί σε ένα μοντέλο διαφορικών εξισώσεων καθυστέρησης (delayed differential equations), μέσω του οποίου θα διερευνηθούν θεωρητικά οι επιπτώσεις των συνθηκών πόλωσης στην επίτευξη εγκλειδωσης των τρόπων καθώς και στην επίτευξη εγκλειδωσης τρόπων από πολλά μήκη κύματος, το οποίο και αποτελεί μια εξαιρετικά ενδιαφέρουσα ιδιότητα του υλικού των κβαντικών τελειών.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα παρουσιαστεί η πειραματική διάταξη, η οποία υλοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της διατριβής, καθώς και η πειραματική επιβεβαίωση των θεωρητικών αποτελεσμάτων όσο αφορά την εγκλειδωση των τρόπων από το βασικό μήκος κύματος εκπομπής.

Στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιείται περαιτέρω πειραματική διερεύνηση, η οποία περιλαμβάνει την ανάδειξη των δυνατοτήτων των λείζερ κβαντικών τελειών για πολυφασματική λειτουργία, ενώ για πρώτη φορά επιβεβαιώνονται τα θεωρητικά αποτελέσματα για την δυνατότητα διπλής εγκλειδωσης τρόπων από διαφορετικά μήκη κύματος.

Το έκτο κεφάλαιο περιλαμβάνει πρωτότυπα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζουν συμπεριφορές εκτός των δυνατοτήτων του θεωρητικού μοντέλου, όπως είναι η διπλή συντονιζόμενη εκπομπή από το GS, καθώς και φαινόμενα περιορισμού του χρονικού εύρους των παλμών λόγω ύπαρξης διπλής εκπομπής. Παράλληλα καταδεικνύεται η σπουδαιότητα των συγκεκριμένων αποτελεσμάτων για νέες εφαρμογές όπως η δημιουργία παλμικών πηγών στη φασματική περιοχή των THz και η ταυτόχρονη αύξηση της μέσης ισχύος και της ισχύος κορυφής.

Το έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζει πειραματικά αποτελέσματα που αποκτήθηκαν κατά τον χαρακτηρισμό διατάξεων κβαντικών τελειών, οι οποίες διέφεραν σε συγκεκριμένα δομικά χαρακτηριστικά όπως είναι το μήκος, το πλάτος, ο αριθμός στρωμάτων κβαντικών τελειών κλπ. Σκοπός του χαρακτηρισμού ήταν η διερεύνηση του ρόλου κάθε δομικού παράγοντα στην ποιότητα της παλμικής λειτουργίας και η δημιουργία κατασκευαστικών οδηγιών για την επόμενη γενιά διατάξεων. Τα πειραματικά αποτελέσματα του κεφαλαίου στοιχειοθετούνται από κυματοδηγικές προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν για τις διαφορετικές δομές που μελετήθηκαν.

Στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται πρωτότυπα αποτελέσματα για την επίδραση της οπτικής ανατροφοδότησης στην σταθερότητα της λειτουργίας των διατάξεων, όταν αυτές βρίσκονται, είτε σε συνεχή, είτε σε παλμική λειτουργία. Ιδιαίτερη έμφαση δίδεται στην διερεύνηση των επαγόμενων ασταθειών λόγω οπτικής ανατροφοδότησης και για τα δύο δυνατά μήκη κύματος εκπομπής (GS/ES), κάτι το οποίο πραγματοποιήθηκε για πρώτη φορά.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται πρωτότυπα πειραματικά αποτελέσματα που σχετίζονται με τη δυνατότητα χαοτικής λειτουργίας των λέιζερ κβαντικών σημείων χωρίς την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης. Η χαοτική λειτουργία επιβεβαιώθηκε αναλύοντας θεωρητικά τις πειραματικές χρονοσειρές από την έξοδο του λέιζερ, με χρήση της διάστασης συσχέτισης (correlation dimension). Αυτή η περιοχή λειτουργίας επιτρέπει τη μελλοντική χρήση λέιζερ κβαντικών τελειών σε εφαρμογές χαοτικής κρυπτογραφίας χωρίς την ανάγκη χρήσης περίπλοκων διατάξεων οπτικής ανατροφοδότησης μια και η δυναμική συμπεριφορά του συστήματος οφείλεται στη δυναμική των φορέων του υλικού.

Τέλος, στο δέκατο κεφάλαιο συνοψίζονται τα αποτελέσματα που αποκτήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής και σχολιάζονται σύντομα οι μελλοντικές δραστηριότητες όσο αναφορά τα λέιζερ κβαντικών σημείων.

2. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΛΕΙΖΕΡ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ ΜΕ ΕΓΚΛΕΙΔΩΣΗ ΤΡΟΠΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζεται μια σύντομη εισαγωγή στη θεωρία της εγκλειδωσης τρόπων σε ημιαγωγικά λέιζερ, ώστε να δοθεί στον αναγνώστη το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο για την καλύτερη κατανόηση, τόσο των θεωρητικών υπολογισμών, όσο και των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Στο πρώτο τμήμα αυτού του κεφαλαίου, παρουσιάζονται οι τρεις διαφορετικές τεχνικές εγκλειδωσης και καταδεικνύεται ότι η παθητική εγκλειδωση παρέχει συγκριτικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων μεθόδων. Κατόπιν, παρουσιάζονται εν συντομία οι συνθήκες λειτουργίας που απαιτούνται για την επίτευξη αποδοτικής παθητικής εγκλειδωσης τρόπων, καθώς και τα εγγενή προβλήματα που παρουσιάζονται στην περίπτωση ημιαγωγικών λέιζερ. Τέλος, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα ημιαγωγικά λέιζερ βασισμένα σε κβαντικές τελείες.

2.1 Βασικές αρχές της εγκλειδωσης τρόπων

Στη γενική περίπτωση, η εκπομπή ενός λέιζερ αποτελείται από ένα μεγάλο αριθμό φασματικών γραμμών, των οποίων η φασματική απόσταση επιβάλλεται από τη συνθήκη στάσιμων κυμάτων. Η ένταση και η φάση αυτών των φασματικών γραμμών (διαμήκεις τρόποι) δεν έχουν σταθερή τιμή και μεταβάλλονται τυχαία λόγω παρουσίας δυναμικών φαινομένων εντός της κοιλότητας. Συνεπώς, δεν υπάρχει κανένας σαφής συσχετισμός μεταξύ των φάσεων των διαφορετικών διαμηκών τρόπων. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ένταση του λέιζερ να παρουσιάζει σχεδόν θορυβική συμπεριφορά (τυχαίες διακυμάνσεις) ενώ ταυτόχρονα τείνει να αποκτήσει μια σταθερή μέση τιμή, χωρίς σημαντικές αυξομειώσεις. Η συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας χαρακτηρίζεται ως συνεχής λειτουργία (continues wave – CW).

Ωστόσο αν για κάποιο λόγο οι διαμήκεις τρόποι ενός λέιζερ αποκτήσουν στιγμιαία την ίδια φάση, η κατάσταση λειτουργίας αλλάζει και αντί σταθερής ή τυχαία μεταβαλλόμενης έντασης, το λέιζερ εκπέμπει οπτικούς παλμούς. Βασικό αίτιο για την συγκεκριμένη συμπεριφορά είναι ότι οι τρόποι με την ίδια φάση συμβάλουν ενισχυτικά μεταξύ τους σε μια δεδομένη χρονική στιγμή επιτρέποντας, έτσι, την δημιουργία παλμών φωτός. Η χρονική περίοδος αυτής της παλμικής συμπεριφοράς ταυτίζεται με το χρόνο που χρειάζεται το πεδίο να πραγματοποιήσει μια πλήρη ταλάντωση εντός της κοιλότητας. Στην εξίσωση 2.1 παρουσιάζεται η μαθηματική σχέση, η οποία επιτρέπει τον απευθείας υπολογισμό του ρυθμού επανάληψης των παλμών (repetition rate), όπου c η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό, n_{eff} ο ενεργός δείκτης διάθλασης και L το συνολικό μήκος της κοιλότητας.

$$f_r = \frac{c}{2 \cdot n_{eff} \cdot L} \quad (2.1)$$

Αν η διαδικασία της εγκλειδωσης εξεταστεί στα πλαίσια ανάλυσης κατά Fourier, το χρονικό εύρος του παλμού και ο αριθμός των τρόπων που συμμετέχει στην εγκλειδωση είναι αντιστρόφως ανάλογα. Πιο συγκεκριμένα αν N είναι ο αριθμός των τρόπων που μετέχουν στην παραγωγή του παλμού και Δn είναι η φασματική τους απόσταση, τότε το χρονικό εύρος του παλμού είναι αντιστρόφως ανάλογο του γινόμενου $N \cdot \Delta n$.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Στην πράξη, για τον υπολογισμό της ποιότητας της εγκλειδωσης των τρόπων χρησιμοποιείται το γινόμενο $\Delta\tau \cdot \Delta\lambda$, όπου $\Delta\tau$ είναι το εύρος του παλμού και $\Delta\lambda$ το εύρος ημίσειας ισχύος του οπτικού φάσματος, και αποκαλείται γινόμενο χρόνου-εύρους ζώνης (time-bandwidth product ή TBWP). Λαμβάνοντας υπόψη μας ότι για κάθε οπτικό εύρος υπάρχει ένα ελάχιστο χρονικό εύρος παλμού που μπορεί να παραχθεί (μέγιστος αριθμός τρόπων σε κατάσταση εγκλειδωσης), τότε ανάλογα με το σχήμα του χρονικού προφίλ του παλμού (Gaussian, Lorentzian hyperbolic κλπ) αυτό το γινόμενο ισούται με μια σταθερά κ. Ο τύπος 2.2 παρουσιάζει την μαθηματική σχέση για τον υπολογισμό του γινομένου:

$$\Delta\nu \cdot \Delta\tau = K \Rightarrow \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda \cdot \Delta\tau = K \quad (2.2)$$

όπου c η ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο κενό, λ το κεντρικό μήκος κύματος, Δλ το εύρος ημίσειας ισχύος του οπτικού φάσματος και Δτ η χρονική διάρκεια του παλμού. Αν η τιμή του TBWP ισούται με αυτή τη σταθερά, τότε οι παλμοί ονομάζονται περιορισμένης μετατροπής (transform limited) και έχουν την μικρότερη χρονική διάρκεια που επιτρέπει ο συγκεκριμένος αριθμός οπτικών τρόπων (εύρος του οπτικού φάσματος). Στην αντίθετη περίπτωση, που το TBWP αποκλίνει από την ιδανική τιμή, αυτό ισοδυναμεί με μικρότερο αριθμό τρόπων σε κατάσταση εγκλειδωσης και ως εκ τούτου σε παλμική λειτουργία χαμηλότερης ποιότητας. Συνεπώς το TBWP μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της ποιότητας της παλμικής λειτουργίας. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής οι παραγόμενοι παλμοί θεωρήθηκε ότι έχουν σχήμα που ακολουθεί Gaussian κατανομή και το ιδανικό TBWP ισούταν με 0.44.

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω σε μια διάταξη λέιζερ η οποία λειτουργεί με συνεχή τρόπο, η ένταση του πεδίου τήνει να πάρει μια σχεδόν σταθερή μέση τιμή. Από την άλλη μεριά, όταν η διάταξη λειτουργεί παλμικά, το σύνολο της ενέργειας εγκλωβίζεται στο χρονικό παράθυρο δημιουργίας του παλμού. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ραγδαία αύξηση της στιγμιαίας ισχύος που μπορεί να φτάσει αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τη μέση μετρούμενη οπτική ισχύ. Στην περίπτωση των παλμικών λέιζερ, πειραματικά μπορεί να μετρηθεί απευθείας μόνο η μέση ισχύς, ενώ η ισχύς κορυφής μπορεί να υπολογιστεί μόνο προσεγγιστικά βάσει του τύπου 2.3, όπου P_{av} είναι η μέση ισχύς η οποία καταγράφεται από τη διάταξη, f_r ο ρυθμός επανάληψης και τέλος Δτ η χρονική διάρκεια του παλμού. Όπως είναι σαφές, για την επίτευξη μεγάλης τιμής ισχύος κορυφής απαιτούνται παλμοί περιορισμένου χρονικού εύρους, ενώ ταυτόχρονα μεγάλη μέση οπτική ισχύς.

$$P_{peak} = \frac{1}{\Delta\tau} \cdot \frac{P_{av}}{f_r} \quad (2.3)$$

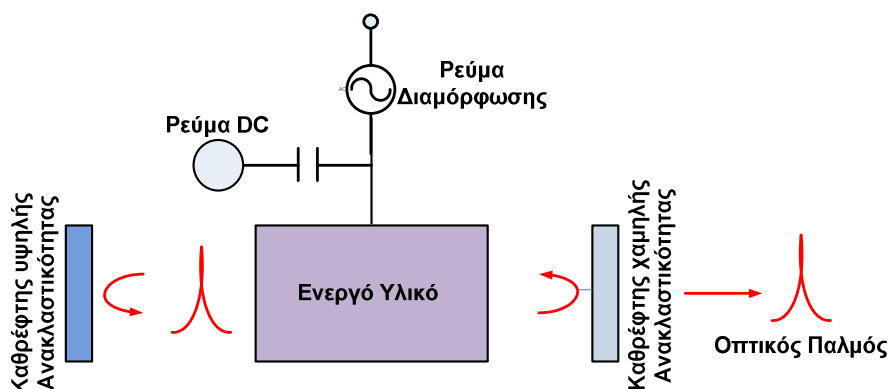
2.2 Τεχνικές εγκλειδωσης τρόπων σε ημιαγωγικά λέιζερ

Τα ημιαγωγικά λέιζερ ως γεννήτριες παλμών τράβηξαν το ενδιαφέρον των ερευνητών από πολύ νωρίς λόγω βασικών πλεονεκτημάτων που διαθέτουν [1]. Το μικρό τους μέγεθος επέτρεψε μεγάλο βαθμό ηλεκτρο-οπτικής ολοκλήρωσης, πολύ μεγάλους ρυθμούς επανάληψης, και πολύ μικρή κατανάλωση ισχύος. Για την επίτευξη παλμικής λειτουργίας σε αυτά τα λέιζερ, χρησιμοποιείται μια σειρά μεθόδων που περιλαμβάνει την ενεργή, την παθητική και την υβριδική εγκλειδωση τρόπων. Λόγω του ότι η βασική τεχνική που υλοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής ήταν η παθητική εγκλειδωση τρόπων, ιδιαίτερο βάρος δόθηκε στην τεκμηρίωση και επεξήγηση αυτής της μεθόδου.

2.2.1 Ενεργή εγκλειδωση τρόπων

Η ενεργή εγκλειδωση τρόπων περιλαμβάνει την άμεση διαμόρφωση της απολαβής ή των απωλειών της διάταξης, με συχνότητα διαμόρφωσης ίση ή μικρότερη από τη χαρακτηριστική συχνότητα της κοιλότητας (συχνότητα επανάληψης των παλμών – repetition rate) [2]-[4]. Αυτή η διαμόρφωση μπορεί να επιτευχθεί, είτε με χρήση ενσωματωμένου στην ενεργή κοιλότητα ημιαγωγικού ηλεκτρο-απορροφητή, ο οποίος διαμορφώνει περιοδικά τα επίπεδα απωλειών [5], είτε να γίνει χρήση ανεξάρτητου ηλεκτρο-οπτικού ή ακουστό-οπτικού διαμορφωτή της απολαβής [6].

Η συγκεκριμένη τεχνική παρουσιάζει δύο βασικά πλεονεκτήματα. Το πρώτο είναι ο χαμηλός θόρυβος φάσης που παρουσιάζουν οι εκπεμπόμενοι παλμοί, ενώ το δεύτερο σχετίζεται με τη δυνατότητα δυναμικού καθορισμού του ρυθμού επανάληψης των παλμών. Το εύρος της διακύμανσης του ρυθμού επανάληψης που μπορεί να επιτευχθεί μέσω αυτού του μηχανισμού, κυμαίνεται από τη χαρακτηριστική συχνότητα της κοιλότητας μέχρι αρκετές υπο-αρμονικές. Ένα βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου επίτευξης εγκλειδωσης τρόπων είναι ο περιορισμένος ρυθμός επανάληψης. Αυτό το πρόβλημα προκύπτει λόγω του γεγονότος ότι τα ηλεκτρονικά συστήματα έχουν περιορισμένο εύρος ζώνης, και κατ' επέκταση δεν μπορούν να διαμορφώσουν την ένταση του λέιζερ με μεγάλη συχνότητα. Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζεται μια διαγραμματική απεικόνιση ενός παλμικού λέιζερ που βασίζεται στην ενεργή εγκλειδωση τρόπων.

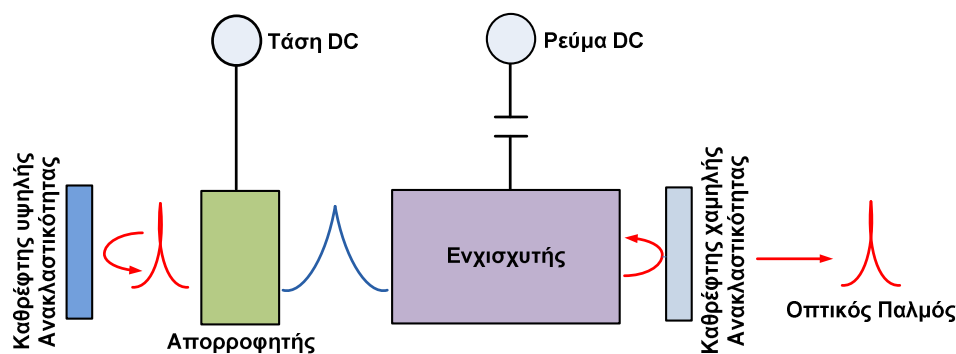


Σχήμα 2-1 Διαγραμματική απεικόνιση της ενεργής εγκλειδωσης τρόπων

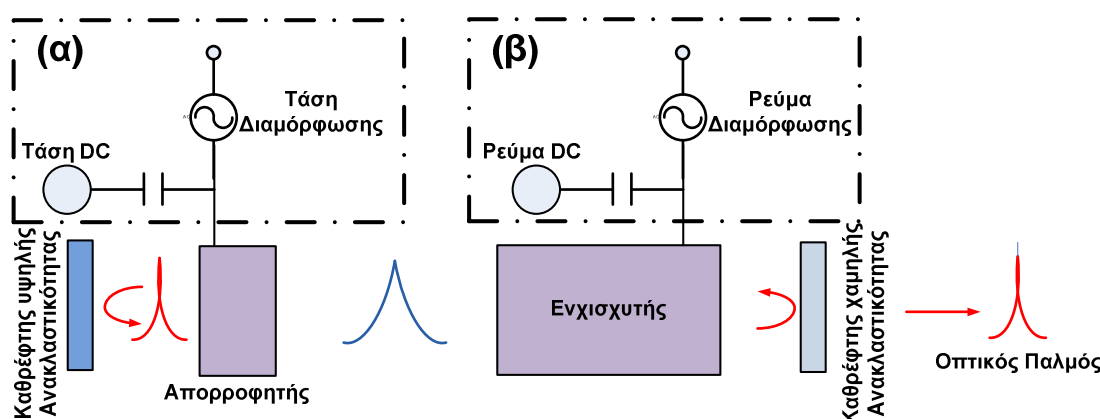
2.2.2 Παθητική Εγκλειδωση Τρόπων

Μια εναλλακτική προσέγγιση για την επίτευξη εγκλειδωσης τρόπων βασίζεται στην ενσωμάτωση ενός κορεσμένου απορροφητή εντός της ενεργής κοιλότητας του λέιζερ. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει παλμική λειτουργία χωρίς την χρήση ηλεκτρικών διαμορφωτών, με αποτέλεσμα οι παραγόμενοι παλμοί να παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένη συχνότητα επανάληψης, οι οποία καθορίζεται μόνο από το μήκος της κοιλότητας και όχι από το μέγιστο εύρος ζώνης των ηλεκτρονικών συστημάτων. Επιπλέον, μέσω της παθητικής εγκλειδωσης και της χρήσης κορεσμένου απορροφητή, μπορεί να βελτιωθεί σημαντικά το χρονικό εύρος των παραγόμενων παλμών. Πιο ειδικά η αρνητική χρωματική διασπορά που έχει παρατηρηθεί στους κορεσμένους απορροφητές επιτρέπει τη μείωση του χρονικού προφίλ των παλμών. Περισσότερες λεπτομέρειες για την παθητική εγκλειδωση τρόπων θα δοθούν στις επόμενες παραγράφους.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 2-2 Διαγραμματική απεικόνιση της παθητικής εγκλειδωσης τρόπων



Σχήμα 2-3 α) Υβριδική εγκλειδωση των τρόπων με διαμόρφωση της τάσης του απορροφητή ενώ β) διαμόρφωση του ρεύματος του ενισχυτή

2.2.3 Υβριδική Εγκλειδωση τρόπων

Η υβριδική εγκλειδωση τρόπων συνδυάζει και τις δύο προαναφερθείσες τεχνικές, ώστε να αποκτηθεί πρόσβαση στα πλεονεκτήματα και των δύο. Πιο συγκεκριμένα η εκκίνηση της παλμικής λειτουργίας επιτυγχάνεται μέσω της εφαρμογής ενός ηλεκτρικού διαμορφωμένου σήματος (είτε στον ενισχυτή ή στον απορροφητή) ενώ η ύπαρξη κορεσμένου απορροφητή επιδρά ευεργετικά στο χρονικό εύρος των παραγόμενων παλμών [7]-[9]. Βασικό πλεονέκτημα του συνδυασμού των δύο μεθόδων είναι στενοί παλμοί με εξαιρετικά χαρακτηριστικά θορύβου. Στο σχήμα 2.3 παρουσιάζονται δύο σχηματικές αναπαραστάσεις διατάξεων με υβριδική εγκλειδωση των τρόπων: στο σχήμα 2.3α παρουσιάζεται η διαμόρφωση του ρεύματος ενίσχυσης και στο 2.3β παρουσιάζεται η διαμόρφωση του τμήματος απορρόφησης. Με τον όρο ΥΑ εννοείται υψηλή ανακλαστικότητα και με τον όρο ΧΑ χαμηλή ανακλαστικότητα. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι η υβριδική εγκλειδωση αν και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα παρουσιάζει και κάποιες θεμελιώδεις δυσκολίες στην εφαρμογή της. Πρώτον ο ρυθμός επανάληψης των παλμών περιορίζεται από το διαθέσιμο εύρος ζώνης του διαμορφωτή, ενώ απαιτείται η χρήση πιο περίπλοκων διατάξεων για την επίτευξη της.

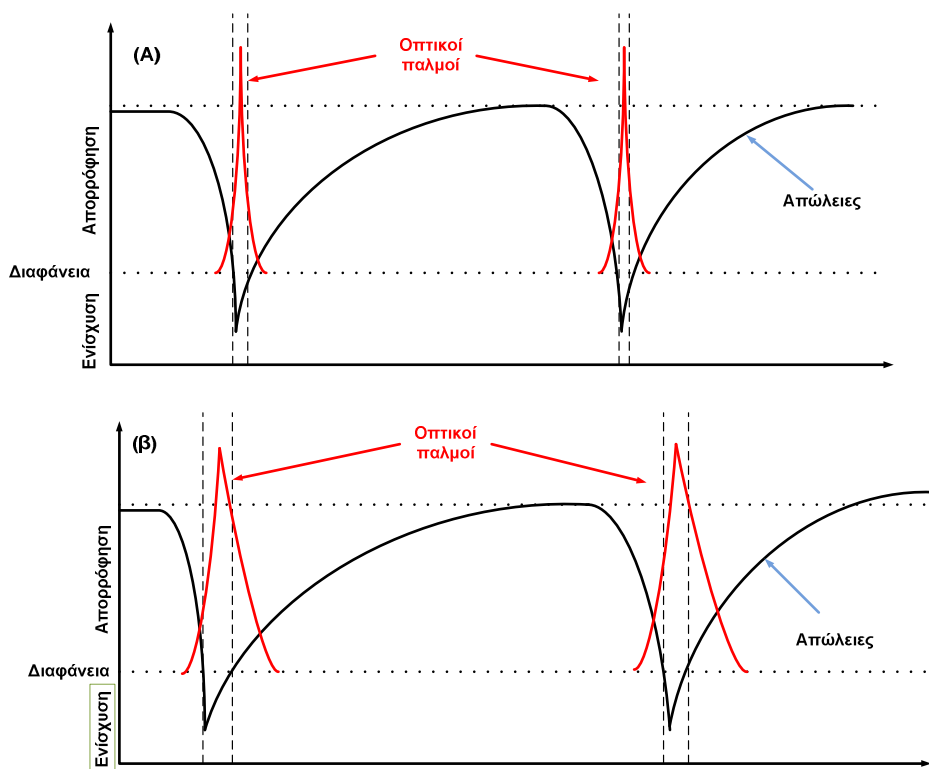
2.3 Διατάξεις και φυσική της παθητικής εγκλειδωσης τρόπων

Η έναυση αλλά και η σταθεροποίηση της παλμικής λειτουργίας μέσω παθητικής εγκλειδωσης τρόπων μπορεί να εξηγηθεί εξαιρετικά απλά στο πεδίο του χρόνου. Στην διαδικασία έναυσης της εξαναγκασμένης εκπομπής, οι διαμήκεις τρόποι που επιβάλλονται από την κοιλότητα του λείζερ ταλαντώνονται ανεξάρτητα και δεν υπάρχει συσχέτιση των φάσεων τους. Η έξοδος του λείζερ σε αυτή τη περιοχή λειτουργίας αποτελείται από κορυφές εκπομπής οι οποίες παρουσιάζουν θορυβική εικόνα. Αν κάποια από αυτές τις κορυφές έχει αρκετά μεγάλη ένταση ώστε να ξεπεράσει το όριο κορεσμού του απορροφητή, προκαλείται απότομη πτώση των απωλειών εντός της κοιλότητας. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την περαιτέρω εξασθένηση των κορυφών μικρής έντασης και την ενίσχυση μίας μόνο ισχυρής κορυφής. Η επιλογή μιας κορυφής, δηλαδή μιας συγκεκριμένης χρονικής στιγμής (φάσης) κατά την οποία οι απώλειες της κοιλότητας παραμένουν χαμηλές, οδηγεί στην εναρμόνιση και άλλων διαμηκών τρόπων με τη συγκεκριμένη φάση (χρονική σταθερά). Το τελικό αποτέλεσμα είναι ο συγχρονισμός της φάσης ενός μεγάλου πλήθους τρόπων και ως εκ τούτου η έναυση της παλμικής λειτουργίας. Μετά την έναυση της παλμικής λειτουργίας, ο παραγόμενος παλμός διαδίδεται εντός της κοιλότητας με αποτέλεσμα να ενισχύεται-διαπλάτνεται περιοδικά από το τμήμα ενίσχυσης και να εξασθενεί-περιορίζεται χρονικά από τον απορροφητή.

Τα δυναμικά χαρακτηριστικά και πιο συγκεκριμένα ο χρόνος αποκατάστασης, τόσο του απορροφητή όσο και του ενισχυτή, δεν υποβοηθούν μόνο την έναυση της παλμικής λειτουργίας, αλλά και καθορίζουν σημαντικά τόσο το σχήμα όσο και τη χρονική διάρκεια του οπτικού παλμού. Πιο αναλυτικά, στην περίπτωση μη ύπαρξης παλμού, οι μη κορεσμένες απώλειες της κοιλότητας είναι μεγαλύτερες από την συνολική ενίσχυση. Ωστόσο, όταν πραγματοποιηθεί έναυση της παλμικής λειτουργίας, η προπορευόμενη ουρά του παλμού φτάνει στον απορροφητή με αποτέλεσμα τη μείωση των απωλειών με πολύ γρηγορότερο ρυθμό από το ρυθμό μείωσης της απολαβής. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δημιουργία ενός στενού χρονικού παραθύρου κατά το οποίο η απολαβή λαμβάνει μεγαλύτερη τιμή από τις απώλειες και η διάταξη ξεπερνά το σημείο διαφάνειας. Αυτή η απότομη πτώση των απωλειών ακολουθείται από μια γρήγορη αποκατάσταση τους, με αποτέλεσμα την ισχυρή εξασθένηση του πίσω μέρος του παλμού. Συνεπώς, το ακριβές σχήμα και η χρονική διάρκεια του παραγόμενου παλμού να εξαρτώνται από το χρόνο αποκατάστασης της δυναμικής ισορροπίας του συστήματος. Στο σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η χρονική αναπαράσταση ενός αργού και ενός γρήγορου απορροφητή μαζί με τη διακύμανση της έντασης του πεδίου εντός της κοιλότητας.

Σε πρακτικό επίπεδο, η ενσωμάτωση του απορροφητή στη δομή του λείζερ μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, ανάλογα με τη δομή του λείζερ αλλά και το είδος του απορροφητή. Βασικά είδη απορροφητών είναι οι ημιαγωγικοί κορεσμένοι καθρέφτες-απορροφητές (semiconductor saturable absorber mirror-SESAMs) οι οποίοι λειτουργούν ταυτόχρονα ως ανακλαστήρες bragg και ως απορροφητές [10]-[11], ή οι ημιαγωγικοί απορροφητές με ιόντα αζώτου (N⁺) [12]. Η πιο απλή προσέγγιση περιλαμβάνει απορροφητές οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από το ίδιο ενεργό υλικό με το τμήμα ενίσχυσης, με τη βασική διαφορά ότι λόγω διαφορετικών συνθηκών πόλωσης, βρίσκονται σε φωτοβολταϊκή λειτουργία. Τέλος, ένας εναλλακτικός τρόπος βάσει του οποίου μπορεί να ενσωματωθεί ο απορροφητής εντός της κοιλότητας είναι η εμφύτευση ιόντων στον καθρέφτη υψηλής ανακλαστικότητας της διάταξης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ισχυρών ατελειών στο κρυσταλλικό πλέγμα και ως εκ τούτου την ενίσχυση των φαινομένων απορρόφησης.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 2-4 Σχηματική αναπαράσταση της διακύμανσης των απωλειών με τη χρήση (α) ενός γρήγορου και ενός (β) αργού απορροφητή

Στα πλαίσια αυτής της διατριβής, οι διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη του φαινομένου της παθητικής εγκλειδωσης τρόπων περιείχαν κορεσμένους απορροφητές οι οποίοι ήταν κατασκευασμένοι από το ίδιο ενεργό υλικό με το τμήμα ενίσχυσης. Η βασική διαφορά όπως αναφέρθηκε ήταν η χρήση ανάστροφης πόλωσης σε αυτά τα τμήματα. Αυτή η μεθοδολογία απλοποίησε σημαντικά τη διαδικασία κατασκευής των διατάξεων ενώ ταυτόχρονα μέσω της δυναμικής ρύθμισης της ανάστροφης πόλωσης που εφαρμοζόταν στον απορροφητή, κατέστη δυνατή η διακύμανση της χρονικής σταθεράς ανάκαμψης (recovery time) καθώς και οι απώλειες της κοιλότητας.

2.4 Απαραίτητες συνθήκες για την επίτευξη αποτελεσματικής παθητικής εγκλειδωσης τρόπων

Έχει καταστεί σαφές μέχρι τώρα ότι η ύπαρξη μικρών χρόνων αποκατάστασης, ιδιαίτερα στον κορεσμένο απορροφητή, αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για την επίτευξη αποτελεσματικής εγκλειδωσης τρόπων. Πιο συγκεκριμένα, ο χρόνος επαναφοράς του απορροφητή θα πρέπει να είναι σημαντικά μικρότερος από το χαρακτηριστικό χρόνο της κοιλότητας, δηλαδή το χρόνο που χρειάζεται ένας παλμός για να διαδοθεί εντός του λέιζερ. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για να μπορέσει να διατηρηθεί η παλμική λειτουργία και να μην εμφανιστούν αστάθειες, όπως διαμόρφωση του πλάτους των παλμών, ο κορεσμένος απορροφητής θα πρέπει να έχει προλάβει να επανέλθει σε συνθήκες υψηλών απωλειών πριν επιστρέψει ο οπτικός παλμός. Οι ίδιες απαιτήσεις ισχύουν και για την περίπτωση της απολαβής, η οποία θα πρέπει να έχει αποκατασταθεί πριν την επιστροφή του παλμού. Στην περίπτωση ημιαγωγικών λέιζερ μικρού μήκους, όπου ο ρυθμός επανάληψης παλμών είναι αρκετά μεγάλος (>20GHz), οι απαιτήσεις για μικρούς χρόνους επαναφοράς αυξάνονται. Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται χαρακτηριστικά μήκη και ρυθμοί επανάληψης, μαζί με τους μέγιστους

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

δυνατούς χρόνους αποκατάστασης της απορρόφησης και της απολαβής, αν θεωρηθεί ότι ο δείκτης διάθλασης του υλικού ισούται με 3.4 (InAs//InGaAs).

Πίνακας 2-1 ενδεικτικές τιμές μήκους κοιλοτήτων και αντίστοιχα ρυθμού επανάληψης και μέγιστου χρόνου απόκρισης που απαιτείται.

Μήκος Κοιλοτήτας	Ρυθμός Επανάληψης	Μέγιστος Χρόνος Απόκρισης
0.25mm	160GHz	6,25ps
0.5mm	80GHz	12,5ps
1mm	40GHz	25ps
2mm	20GHz	50ps
4mm	10GHz	100ps
8mm	5GHz	200ps

Η γρήγορη αποκατάσταση των απωλειών της κοιλοτήτας δεν είναι απαραίτητη μόνο για τη διασφάλιση του μικρού χρονικού εύρους του παλμού, αλλά είναι βασικό κριτήριο για την σταθερότητα της παλμικής λειτουργίας. Ειδικά στην περίπτωση που η χρονική σταθερά επαναφοράς είναι αρκετά μεγάλη, το χρονικό παράθυρο είναι αρκούτσως ευρύ ώστε να υποστηρίξει την ύπαρξη πολλών διαφορετικών παλμών με αποτέλεσμα την δημιουργία παλμών δορυφόρων (satellite pulses) οι οποίοι αποσταθεροποιούν την λειτουργία της διάταξης.

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος για τον εντοπισμό των απαιτούμενων συνθηκών για την επίτευξη εγκλειδωσης είναι η ενέργεια κορεσμού του απορροφητή (E_a) και του ενισχυτή (E_g). Αυτά τα μεγέθη συμβολίζουν την ενέργεια που πρέπει να δεχτεί ο απορροφητής ή ο ενισχυτής, αντίστοιχα, για να εισέρθουν σε λειτουργία κόρου και δίδονται από τις σχέσεις 2.4 και 2.5 αντίστοιχα. A είναι το εμβαδό του οπτικού τρόπου, h η σταθερά του Planck, f η οπτική συχνότητα και τέλος θ_G/θ_N και θ_A/θ_N είναι η διαφορική απολαβή και η διαφορική απορρόφηση αντίστοιχα.

$$E_g = \frac{h \cdot f \cdot A}{\theta_G/\theta_N} \quad (2.4)$$

$$E_a = \frac{h \cdot f \cdot A}{\theta_A/\theta_N} \quad (2.5)$$

Για την επίτευξη αποδοτικής παλμικής λειτουργίας, το τμήμα απορρόφησης πρέπει να διαθέτει μικρή ενέργεια κορεσμού ώστε να οδηγείται στον κόρο από την ύπαρξη μικρής οπτικής έντασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την γρήγορη εκκίνηση της παλμικής λειτουργίας με χρήση μικρών τιμών ηλεκτρικής άντλησης στη διάταξη. Αντίθετα ο κορεσμός της απολαβής προκαλεί μείωση της έντασης του οπτικού πεδίου και την ενίσχυση μη γραμμικών φαινομένων που δυσχεραίνουν την διατήρηση σταθερής παλμικής λειτουργίας. Συνεπώς, πρέπει να ισχύει ότι $E_g = \frac{h \cdot f \cdot A}{\theta_G/\theta_N} > E_a = \frac{h \cdot f \cdot A}{\theta_A/\theta_N}$. Όσο

μεγαλύτερη η διαφορά μεταξύ των δύο λόγων, τόσο αποδοτικότερη γίνεται η παλμική

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

λειτουργία μια και διασφαλίζεται ότι το παράθυρο στο οποίο οι απώλειες είναι μικρότερες της απολαβής θα συνεχίσει να έχει περιορισμένο χρονικό εύρος (σχήμα 2.4). Από την προηγούμενη ανισότητα είναι εύκολο να εξαχθεί ότι για την περίπτωση που το τμήμα απορρόφησης και ενίσχυσης παρουσιάζουν τις ίδιες κυματοδηγικές ιδιότητες και ο παράγοντας A παραμένει σταθερός και για τους δύο λόγους, προκειμένου να ισχύσει η σχέση, θα πρέπει η διαφορική απολαβή να είναι σαφώς μικρότερη από την διαφορική απορρόφηση.

2.5 Παράγοντες που περιορίζουν την αποτελεσματική εγκλειδωση των τρόπων

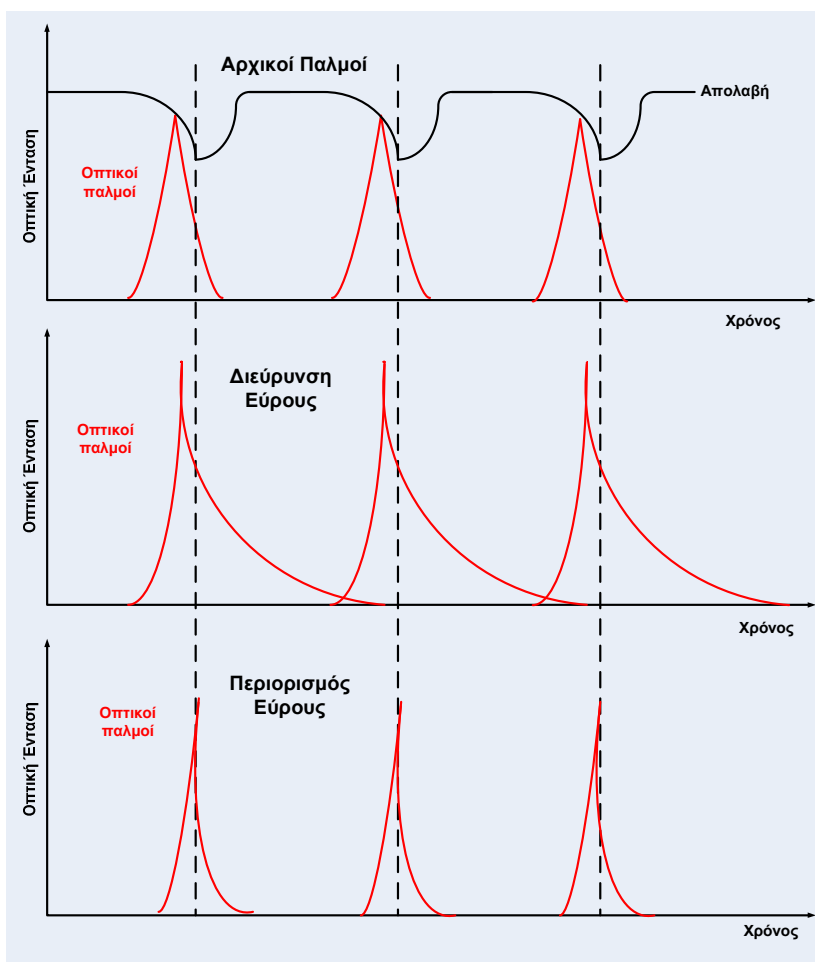
2.5.1 Εύρος ζώνης της Απολαβής

Ένα βασικό στοιχείο για την επίτευξη αποδοτικής εγκλειδωσης τρόπων είναι η ύπαρξη μεγάλου φασματικού εύρους της απολαβής. Αυτό το γεγονός επιτρέπει την ύπαρξη μεγάλου αριθμού τρόπων, οι οποίοι εν δυνάμει μπορούν να αποκτήσουν κοινή φάση και όπως αναφέρθηκε στον ορισμό του TBWP να συνεισφέρουν στη μείωση του χρονικού εύρους των παλμών. Στη περίπτωση των ημιαγωγικών λέιζερ, το διαθέσιμο εύρος ζώνης της απολαβής είναι αρκετά εκτενές. Παρόλα αυτά, μετά την έναυση της εξαναγκασμένης εκπομπής παρατηρείται ένας σημαντικός περιορισμός του εύρους. Η μείωση του εύρους ζώνης της απολαβής κατά την εξαναγκασμένη εκπομπή οφείλεται κυρίως στην καταστολή της αυθόρμητης εκπομπής και τη διοχέτευση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων στους διαμήκεις τρόπους που βρίσκονται στο φασματικό κέντρο της απολαβής. Αυτός ο περιορισμός του εύρους μειώνει τον αριθμό των τρόπων που βρίσκονται πάνω από το κατώφλι και ως εκ τούτου τον αριθμό των δυνητικά διαθέσιμων τρόπων για εγκλειδωση. Επιπλέον, στην περίπτωση που η κοιλότητα έχει μικρό μήκος, η φασματική απόσταση μεταξύ των τρόπων αυξάνεται με αποτέλεσμα την περεταίρω μείωση των διαθέσιμων τρόπων.

Μια μεθοδολογία για τον περιορισμό του προαναφερθέντος φαινομένου είναι η χρήση κατόπτρων μεταβλητής απόστασης εντός της κοιλότητας, τα οποία δίνουν την δυνατότητα μεταβολής του ενεργού μήκους της κοιλότητας και κατ' επέκταση της φασματικής απόστασης μεταξύ των τρόπων [13]-[14]. Πιο αναλυτικά, μέσω του συντονιζόμενου φίλτρου δύο τρόποι τοποθετούνται στις ουρές της απολαβής. Αποτέλεσμα αυτού είναι, λόγω εξαναγκασμένης λειτουργίας, αυτή η φασματική περιοχή να ενισχύεται και να αυξάνεται σημαντικά το φασματικό εύρος του λέιζερ. Ακολουθώντας αυτή τη τεχνική σε συνδυασμό με την παθητική εγκλειδωση παρήχθησαν οπτικοί παλμοί μικρής διάρκειας (330fs) [13]. Βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι το αυξημένο μέγεθος της διάταξης λόγω της χρήσης οπτικών συστημάτων ελεύθερου χώρου και του συντονιζόμενου φίλτρου.

2.5.2 Κορεσμός της απολαβής

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, το τμήμα ενίσχυσης υποβοηθά την αύξηση της ισχύος του παλμού κατά τη διάδοση του εντός της κοιλότητας. Παρόλα αυτά, η διέλευση ενός παλμού μεγάλης οπτικής ισχύος μέσω του ενεργού υλικού επάγει δυναμικές αλλαγές στη συγκέντρωση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Πιο συγκεκριμένα, ενισχύεται η απορρόφηση φωτονίων μέσω των φαινομένων της απορρόφησης ελεύθερων φορέων (free carrier absorption) καθώς και της δι-φωτονικής απορρόφησης (two-photon absorption), η οποία με τη σειρά της προκαλεί μετάβαση των ηλεκτρικών φορέων σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες [15].



Σχήμα 2-5 Απεικόνιση της διεύρυνσης των παλμών λόγω κορεσμού της απολαβής και του φαινομένου του περιορισμού του εύρους.

Αυτή η μετάβαση απογυμνώνει το υλικό από ενεργούς φορείς με αποτέλεσμα την μείωση της διαθέσιμης απολαβής. Λόγω του δυναμικού χαρακτήρα των φαινομένων, μπορεί να προκληθεί διεύρυνση του χρονικού προφίλ των παλμών. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται πως μπορεί ο δυναμικός κορεσμός της απολαβής να προκαλέσει διεύρυνση του παλμού.

Το πρόσθιο τμήμα του παλμού λαμβάνει τη μέγιστη δυνατή απολαβή και παράλληλα οδηγεί τον ενισχυτή στον κόρο λειτουργίας του, με αποτέλεσμα η απολαβή να μειώνεται. Συνεπώς το οπίσθιο τμήμα του παλμού δεν ενισχύεται ισόποσα. Άμεση επίπτωση αυτού, είναι η στρέβλωση του σχήματος του παλμού. Λόγω του γεγονότος ότι το φαινόμενο είναι δυναμικό, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο χρόνος αποκατάστασης της απολαβής. Σε περίπτωση που η απολαβή ανακάμπτει γρήγορα παρουσιάζονται φαινόμενα διαπλάτυνσης, ενώ στην περίπτωση που η επαναφορά της απολαβής πραγματοποιείται σε χρόνο ο οποίος είναι μεγαλύτερος από το χρονικό εύρος του παλμού, τότε το οπίσθιο μέρος του παλμού μπορεί είτε να λάβει πολύ μικρή ενίσχυση, είτε και να μην ενισχυθεί καθόλου, με άμεση απόρροια τον χρονικό περιορισμό του παλμού.

2.5.3 Αυτοδιαμόρφωση της φάσης και διασπορά

Στα ημιαγωγικά υλικά ο δείκτης διάθλασης αλλά και η απολαβή σχετίζονται άμεσα με την πυκνότητα ηλεκτρικών φορέων και ως εκ τούτου τα δύο μεγέθη είναι ισχυρά συζευγμένα μεταξύ τους. Κατά τη διαδικασία διάδοσης ενός παλμού εντός της

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

κοιλότητας, οι ελεύθεροι φορείς που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας μειώνονται δραστικά λόγω της εξαναγκασμένης εκπομπής και της επανασύνδεσης τους με οπές στη ζώνη σθένους. Αυτή η απότομη αλλαγή στη συγκέντρωση φορέων κατά την διέλευση του παλμού επάγει αύξηση του δείκτη διάθλασης και ως εκ τούτου αλλάζει τη σταθερά διάδοσης των παλμών εντός του κυματοδηγού, επάγοντας μια στιγμιαία μεταβολή της φάσης τους. Αυτό το φαινόμενο αποκαλείται αυτοδιαμόρφωση της φάσης και αποτελεί το βασικό μη γραμμικό φαινόμενο που παρατηρείται κατά τη διάδοση παλμών σε ένα ημιαγωγικό μέσο.

Για καλύτερη κατανόηση του φαινομένου μπορεί να θεωρηθεί η εξίσωση ενός απλού αρμονικού κύματος (2.6-2.7):

$$E(t, x) = E_0 e^{i\Phi(t)} = E_0 e^{i(\omega_0 t - kx)} \quad (2.6)$$

$$k = \frac{\omega_0}{c} n(t) \quad (2.7)$$

Όπου $\Phi(t)$ είναι η μεταβαλλόμενη φάση, k ο κυματάριθος, ω_0 είναι η συχνότητα του οπτικού φέροντος, c είναι η ταχύτητα του φωτός και $n(t)$ είναι ο μεταβαλλόμενος δείκτης διάθλασης. Η στιγμιαία συχνότητα του κύματος είναι η παράγωγος της φάσης και ως εκ τούτου μπορεί να γραφτεί ως :

$$\omega(t) = \frac{\partial}{\partial t} \Phi(t) = \omega_0 - \frac{\omega_0}{c} \cdot \frac{\partial n(t)}{\partial t} x \quad (2.8)$$

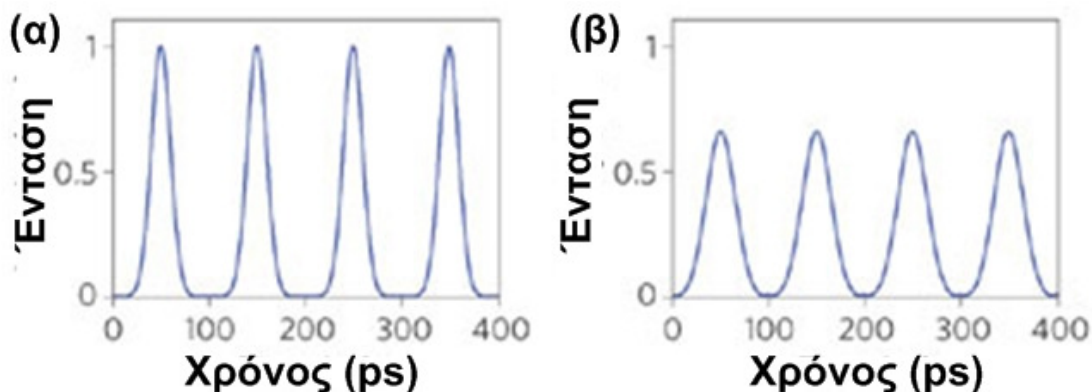
Από τη σχέση 2.8 είναι σαφές ότι ο δείκτης διάθλασης δεν είναι σταθερός, αλλά αντίθετα μεταβάλλεται με το χρόνο και μεταβάλλει με τη σειρά του τη συχνότητα του κύματος ως προς την κεντρική συχνότητα (ω_0). Η χρονική εξάρτηση αυτής της στιγμιαίας συχνότητας ονομάζεται *chirp* και ανάλογα με το πρόσημο της, ισοδυναμεί με αύξηση ή μείωση της συχνότητας (*up chirp* – *down chirp*) [16]-[17]. Παρόλο που το ίδιο το φαινόμενο από τη φύση του δεν προκαλεί διαπλάτυνση του χρονικού προφίλ του παλμού, όταν ένας παλμός, ο οποίος έχει υποστεί ισχυρή αυτοδιαμόρφωση, διαδοθεί εντός ενός μέσου που παρουσιάζει φαινόμενα χρωματικής διασποράς, το πρόσθιο τμήμα του παλμού θα έχει διαφορετικό χρόνο διάδοσης από ότι το οπίσθιο, λόγω της διαφορετικής συχνότητας. Συνεπώς, ανάλογα με το αν το μέσο διάδοσης παρουσιάζει θετική ή αρνητική διασπορά, ο διαδιδόμενος παλμός μπορεί είτε να αυξήσει τη χρονική του διάρκεια, είτε να την μειώσει.

Στην περίπτωση ενός λέιζερ δύο τμημάτων, όπου το ένα τμήμα λειτουργεί ως ενισχυτής και το άλλο τμήμα ως απορροφητής, τα δύο φαινόμενα συνυπάρχουν. Ειδικότερα, στο τμήμα ενίσχυσης εμφανίζονται φαινόμενα θετικής διασποράς, ενώ στο τμήμα του απορροφητή, λόγω του ότι βρίσκεται σε διαφορετική συνθήκη λειτουργίας (ανάστροφη πόλωση), υπερτερούν τα φαινόμενα αρνητικής διασποράς. Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται σχηματικά η επίπτωση της θετικής διασποράς στο σχήμα του παλμού.

Αν και είναι λογικό να σκεφτεί κάποιος ότι χρησιμοποιώντας λέιζερ δύο τμημάτων η χρωματική διασπορά θα μπορούσε να απαλειφθεί, η περίπτωση της πλήρους εξάλειψης της διασποράς αποτελεί την εξαίρεση και όχι τον κανόνα στη σχεδίαση λέιζερ. Κάτι τέτοιο θα απαιτούσε το πολύ προσεχτικό σχεδιασμό του μήκους της δομής του κάθε τμήματος. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι πάντα εφικτή μια και, εκτός από τη διασπορά, υπάρχουν και άλλες απαιτήσεις που καθορίζουν το τελικό μήκος κάθε τμήματος, όπως είναι η ποιότητα της εγκλειδωσης τρόπων, οι απώλειες κλπ. Ως εκ τούτου, η θετική στιγμιαία συχνότητα, σε συνδυασμό με ένα λέιζερ το οποίο εισάγει

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

φαινόμενα διασποράς, είναι ο πλέον περιοριστικός παράγοντας όσο αφορά το χρονικό εύρος του εκπεμπόμενου παλμού.



Σχήμα 2-6 Απεικόνιση παλμών οι οποίοι έχουν υποστεί θετική χρωματική διασπορά, με αποτέλεσμα την αύξηση της χρονικής τους διάρκειας.

Το φαινόμενο της αυτοδιαμόρφωσης της φάσης ενός παλμού δεν έχει μόνο αρνητικές επιπτώσεις. Λόγω του γεγονότος ότι η αυτοδιαμόρφωση της φάσης επιτρέπει την ύπαρξη αρκετών συχνοτήτων γύρω από την κεντρική (ω_0) δίνει στον παραγόμενο παλμό ένα πλουσιότερο φασματικό περιεχόμενο που μπορεί να δώσει τη δυνατότητα αύξησης του εύρους ζώνης και να οδηγήσει σε παλμούς με μικρότερο χρονικό εύρος. Επιπλέον για τη αξιοποίηση του φαινομένου της αυτοδιαμόρφωσης με σκοπό την μείωση του χρονικού εύρους των παλμών, μπορεί να γίνει χρήση υποστηρικτικών διατάξεων οι οποίες παρουσιάζουν ανώμαλη αρνητική ταχύτητα ομάδας, με αποτέλεσμα την καθυστέρηση του πρόσθιου τμήματος του παλμού (με την υψηλότερη συχνότητα) και την επιτάχυνση του οπίσθιου τμήματος (χαμηλότερη συχνότητα). Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας διάταξης είναι η εξισορρόπηση της ταχύτητας διάδοσης ολόκληρου του παλμού και ως εκ τούτου, παλμοί με καλύτερα χρονικά χαρακτηριστικά. Γενικά, λόγω της ύπαρξης της αυτοδιαμόρφωσης της φάσης η παραγωγή παλμών με χρονικό εύρος μικρότερο του 1ps από μονολιθικά ημιαγωγικά λέιζερ θεωρείται εξαιρετικά δύσκολο εγχείρημα. Από την άλλη, η χρήση διατάξεων οι οποίες καταστέλλουν τη χρωματική διασπορά και προκαλούν περιορισμό στο εύρος των παλμών αυξάνουν σημαντικά το τελικό μέγεθος της διάταξης και απαιτούν την χρήση πολύπλοκων συστημάτων ελέγχου και τροφοδοσίας, με αποτέλεσμα να καθιστούν δύσχρηστη την εφαρμογή του λέιζερ σε μια κατηγορία εφαρμογών που το περιορισμένο μέγεθος θεωρείται σημαντικός παράγοντας. Παρόλα αυτά τα τελευταία χρονιά έχει αρχίσει η ανάπτυξη μονολιθικών συστημάτων αντιστάθμισης της διασποράς [18]-[19], τα οποία μπορούν να άρουν τους παραπάνω περιορισμούς και να βελτιώσουν σημαντικά το χρονικό εύρος των παραγόμενων παλμών.

Ένας εναλλακτικός τρόπος περιορισμού του φαινομένου έγκειται στην επιλογή ενεργών υλικών τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετικά μικρό παράγοντα διεύρυνσης της φασματικής γραμμής ή αλλιώς παράγοντα-α (linewidth enhancement factor – a Factor). Το συγκεκριμένο μέγεθος περιγράφει το πόσο συζευγμένες είναι η μεταβολή του δείκτη διάθλασης προς την πυκνότητα φορέων με την μεταβολή της απολαβής του υλικού προς την πυκνότητα των φορέων (σχέση 2.9). Όπου λ το μήκος κύματος, dn/dN και dg/dN η μεταβολή του δείκτη διάθλασης προς τη μεταβολή των φορέων και η μεταβολή της απολαβής ως προς την αλλαγή των φορέων, αντίστοιχα.

$$\alpha = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{dn/dN}{dg/dN} \quad (2.9)$$

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, το γενεσιουργό αίτιο της θετικής ή αρνητικής στιγμιαίας μεταβολής της συχνότητας οφείλεται στη μεταβολή του δείκτη διάθλασης λόγω της απογύμνωσης των ηλεκτρικών φορέων από το διαδιδόμενο παλμό. Στην περίπτωση που το ενεργό υλικό έχει μικρό παράγοντα-α, τότε η επίδραση του παλμού στο δείκτη διάθλασης είναι αμελητέα και κατά συνέπεια και η διεύρυνση των παλμών είναι εξαιρετικά μικρή. Έχει αναφερθεί ότι τα λέιζερ κβαντικών σημείων λόγω του τρισδιάστατου χωρικού περιορισμού των φορέων, παρουσιάζουν εξαιρετικά μικρές τιμές παράγοντα-α [20]-[21], οι οποίες θα μπορούσαν να διασφαλίσουν την μείωση των περιορισμών που επάγει η αυτοδιαμόρφωση της φάσης.

2.5.4 Μικρή ισχύς κορυφής

Ένα από τα βασικότερα προβλήματα που παρουσιάζονται στα ημιαγωγικά λέιζερ όταν αυτά βρίσκονται σε παλμική λειτουργία είναι η μικρή ισχύς κορυφής. Αυτό το βασικό μειονέκτημα οφείλεται σε πολλούς λόγους από τους οποίους οι βασικότεροι είναι: η μικρή μέση οπτική ισχύς η οποία δεν ξεπερνά τα μερικά mW, το σχετικά μεγάλο εύρος των παλμών το οποίο κυμαίνεται στην κλίμακα των ps, και ο μεγάλος ρυθμός επανάληψης που οφείλεται στο περιορισμένο μήκος της κοιλότητας. Ένας προφανής τρόπος για την αύξηση της ισχύος του λέιζερ σύμφωνα με τη σχέση 2.3 είναι η αύξηση της μέσης ισχύος, μέσω χρήσης υψηλότερης ηλεκτρικής άντλησης. Αυτή η προσέγγιση, αν και αυξάνει την μέση ισχύ, προκαλεί ισχυροποίηση φαινομένων όπως ο κορεσμός της απολαβής και η αυτοδιαμόρφωση της φάσης (αύξηση του παράγοντα-α) με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη αύξηση του χρονικού εύρους του παλμού. Επιπλέον, μια σειρά από κυρίως ιατρικές εφαρμογές απαιτούν την ύπαρξη μεγάλης ισχύος κορυφής με μικρή μέση ισχύ για τον περιορισμό των θερμικών φαινομένων σε βιολογικούς ιστούς (thermal diffusion), με αποτέλεσμα η συγκεκριμένη προσέγγιση να καθίσταται δυσεφάρμοστη.

Ο πιο αποδοτικός τρόπος που έχει προταθεί για την βελτίωση της ισχύος κορυφής είναι ο σχεδιασμός μιας διάταξης η οποία περιλαμβάνει ένα λέιζερ το οποίο και παράγει τους οπτικούς παλμούς, ακολουθούμενο από ένα οπτικό ενισχυτή για την ενίσχυση των παλμών και μια διάταξη συμπίεσης του χρονικού εύρους του παλμού η οποία υποβοηθά στον περιορισμό της αύξησης του χρονικού εύρους [15]. Η βασική αρχή λειτουργίας βασίζεται στην δημιουργία οπτικών παλμών εντός του λέιζερ, των οποίων η στιγμιαία μεταβολή της συχνότητας έχει γραμμική εξάρτηση (Linear-chirp) και έχουν αρκετά μεγάλο χρονικό εύρος. Λόγω του μεγάλου χρονικού εύρους, οι παραγόμενοι παλμοί δεν οδηγούν σε κορεσμό την απολαβή του λέιζερ με αποτέλεσμα την αποδοτικότερη ενίσχυση τους. Οι παλμοί, κατόπιν, οδηγούνται σε ένα ενισχυτή ώστε να αυξηθεί σημαντικά η ισχύς τους αποφεύγοντας πάλι την οδήγηση του ενισχυτή σε κορεσμό. Οι ενισχυμένοι παλμοί στη συνέχεια συμπιέζονται χρονικά με τη χρήση ενός αντισταθμιστή διασποράς που μπορεί να είναι ένα ιντερφερομετρικό φίλτρο (Gires-Tournois interferometer), ένα φράγμα περίθλασης (chirped bragg grating), ένα κατάλληλα διαμορφωμένο κάτοπτρο (chirped mirror), είτε μια κατάλληλα διαμορφωμένη οπτική ίνα, η οποία μπορεί να αντισταθμίσει τη χρωματική διασπορά μέσω χρήση φωτονικών κρυστάλλων (PC-Fibers).

Με τη συγκεκριμένη τοπολογία τριών σταδίων μπορούν να παραχθούν οπτικοί παλμοί με χρονικό εύρος fs και ισχύ κορυφής που φτάνει τα δεκάδες KW. Παρόλα αυτά, η

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

χρήση τριών διακριτών διατάξεων αυξάνει σημαντικά το τελικό μέγεθος της διάταξης, δυσχεραίνει την ολοκλήρωση της απαιτεί την χρήση πολύπλοκων διατάξεων για τον έλεγχο και την τροφοδοσία της καθώς και αυξάνει σημαντικά την ηλεκτρική κατανάλωση ισχύος.

2.6 Βασικά πλεονεκτήματα των διατάξεων κβαντικών τελειών για χρήση ως γεννήτριες παλμών

2.6.1 Αυξημένο εύρος ζώνης απολαβής

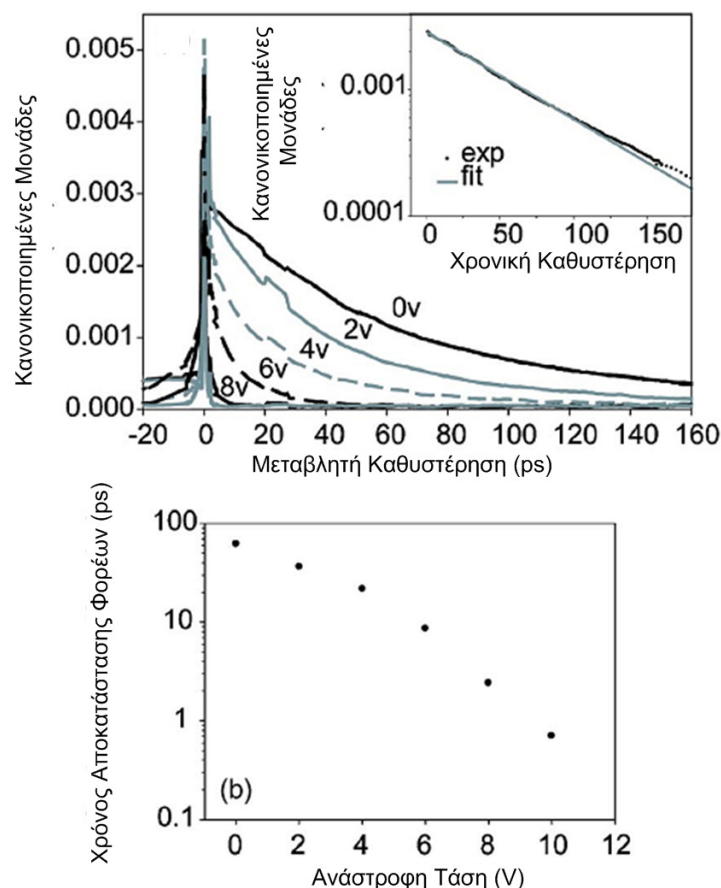
Ένα από τα χαρακτηριστικά των λέιζερ κβαντικών σημείων το οποίο προκάλεσε ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι το αυξημένο εύρος ζώνης της απολαβής το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί, είτε για τη δημιουργία πολύ στενών οπτικών παλμών, οι οποίοι θα έχουν εύρος μικρότερο των 100fs, είτε για την ενίσχυση στενών παλμών, οι οποίοι λόγω του μικρού τους χρονικού εύρους έχουν πολύ μεγάλο φασματικό περιεχόμενο. Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, το μεγάλο εύρος της απολαβής οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε κβαντική τελεία στην πράξη αποτελεί ένα μικροσκοπικό ανεξάρτητο λέιζερ το οποίο διαθέτει τη δική του απολαβή (ομογενής απολαβή), της οποίας το εύρος και η κεντρική συχνότητα εξαρτάται από τα χωρικά χαρακτηριστικά της τελείας. Λαμβάνοντας υπόψη το πλήθος των τελειών καθώς και την χωρική τους κατανομή εντός του λέιζερ, η συνολική απολαβή της δομής αποτελείται από την υπέρθεση όλων αυτών των μεμονωμένων απολαβών (μη ομογενής απολαβή).

Αυτό το γεγονός, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι φαινόμενα περιορισμού της απολαβής λόγω εξαναγκασμένης εκπομπής δεν είναι σημαντικά στην περίπτωση των λέιζερ κβαντικών σημείων, επιτρέπουν την υποστήριξη μεγάλου πλήθους διαμηκών τρόπων οι οποίοι δυνητικά μπορούν να αποκτήσουν την ίδια φάση και να παράγουν εξαιρετικά στενούς οπτικούς παλμούς. Επιπροσθέτως η ύπαρξη αυξημένης μη ομογενούς απολαβής επιτρέπει τη σημαντική μείωση του σχετικού θορύβου των τρόπων με αποτέλεσμα την παραγωγή παλμών με σημαντικά μικρότερα επίπεδα θορύβου (jitter) [21].

Παρόλα αυτά, όπως θα δειχτεί και στα επόμενα κεφάλαια, ο μεγάλος αριθμός διαθέσιμων τρόπων δεν επιφέρει σε όλες τις περιπτώσεις βελτίωση της παλμικής λειτουργίας. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να οδηγήσει σε αδυναμία αποτελεσματικής εγκλείδωσης όλου του φασματικού περιεχομένου, μια και παρατηρούνται αυξημένα φαινόμενα ανταγωνισμού μεταξύ ομάδων διαμηκών τρόπων, τα οποία αυξάνουν σημαντικά το θόρυβο φάσης της διάταξης.

2.6.2 Γρήγορη δυναμική των φορέων

Οι πρώτες θεωρητικές μελέτες για την δυναμική συμπεριφορά των λέιζερ κβαντικών τελειών, υποστήριζαν ότι η αποκατάσταση των φορέων, θα ήταν αρκετά πιο αργή από ότι στα λέιζερ κβαντικού φρέατος λόγω φαινομένων στραγγαλισμού από την παραγωγή φωνονίων (phonon bottleneck effect) [22].



Σχήμα 2-7 Μετρήσεις μέσω της μεθόδου της άντλησης-ελέγχου για το χρόνο αποκατάστασης [25]

Παρόλα αυτά, η σχολαστικότερη μελέτη της δυναμικής των φορέων σε τέτοια συστήματα έδειξε ακριβώς το αντίθετο. Η δυνατότητα επανασύνδεσης των φορέων μέσω πολλαπλών ενεργειακών μονοπατιών, λόγω της σχεδόν ατομικής φύσης των κβαντικών τελειών, δίνει τη δυνατότητα πολύ μικρών χρόνων αποκατάστασης [23]. Ιδιαίτερα στην περίπτωση που το ενεργό υλικό πολώνεται ανάστροφα, δηλαδή λειτουργεί ως κορεσμένος απορροφητής, αποδείχτηκε πειραματικά, ότι η επαναφορά των φορέων (recovery time) καθίσταται εξαιρετικά γρήγορη. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τεχνικές άντλησης-ελέγχου (Pump and probe) [24]-[25] αποδείχτηκε ότι υπάρχουν δύο χαρακτηριστικοί χρόνοι αποκατάστασης των φορέων, ένας γρήγορος ο οποίος είναι της τάξης του 1ps και ένας αργός ο οποίος είναι μεγαλύτερος από 100ps (σχήμα 2.7) [24]. Ακολουθώντας την ίδια μέθοδο και αξιοποιώντας την δυνατότητα για ισχυρή ανάστροφη πόλωση στον απορροφητή δείχτηκε ότι ο χρόνος αποκατάστασης μπορεί να μειωθεί περαιτέρω και να φτάσει την κλίμακα των fs [26]. Αυτό το γεγονός όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους καθιστά τα λέιζερ κβαντικών τελειών εξαιρετικούς υποψήφιους για την παραγωγή οπτικών παλμών μέσω της παθητικής εγκλειδωσης των τρόπων.

2.6.3 Χαμηλή ενέργεια κορεσμού στον απορροφητή

Οι απορροφητές που βασίζονται σε κβαντικές τελείες παρουσιάζουν πολύ χαμηλότερη ενέργεια κορεσμού από ότι οι αντίστοιχοι απορροφητές κβαντικού φρέατος [27]. Αυτό οφείλεται στην σχεδόν ατομική συμπεριφορά των κβαντικών τελειών που προσφέρει διακριτή πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων (κεφάλαιο 1). Αυτή συμπεριφορά επιτρέπει την επίτευξη διαφάνειας ακόμα και στην ακραία περίπτωση ύπαρξης ενός

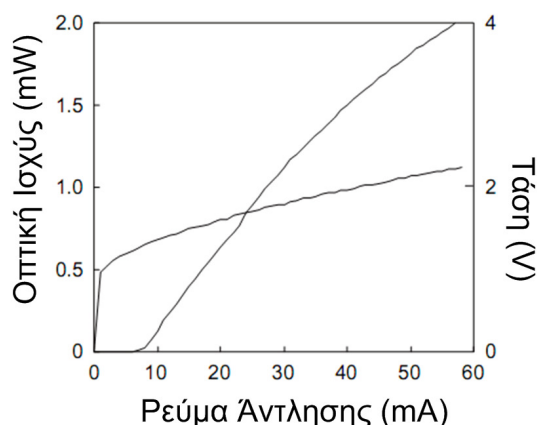
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελείων, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

μόνο ελεύθερου ηλεκτρικού φορέα στη ζώνη αγωγιμότητας. Αυτό το πλεονέκτημα υποβοηθά την έναυση της εγκλειδωσης των τρόπων με μικρή οπτική ένταση, γεγονός το οποίο είναι εξαιρετικά σημαντικό στην περίπτωση διατάξεων με μικρό μήκος και μεγάλη συχνότητα επανάληψης παλμών. Στην χαμηλή τιμή κορεσμού του απορροφητή συνεισφέρει επίσης και η εξαιρετικά μικρή τιμή διαφορικής απορρόφησης η οποία έχει μετρηθεί σε λέιζερ κβαντικών τελείων. Παρόλο που χαμηλή τιμή ενέργειας κορεσμού είναι εξαιρετικά ευεργετική για την διαδικασία της εγκλειδωσης τρόπων, θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το ίδιο φαινόμενο παρουσιάζεται και στο τμήμα ενίσχυσης. Η μικρή ενέργεια κορεσμού στο τμήμα ενίσχυσης οδηγεί το λέιζερ σε κατάσταση κορεσμού εξαιρετικά εύκολα με αποτέλεσμα την μεγιστοποίηση μη γραμμικών φαινομένων που τείνουν να αυξήσουν το εύρος των παλμών. Όπως θα δειχθεί και στα επόμενα κεφάλαια αυτός ο περιορισμός μπορεί να αρθεί χρησιμοποιώντας κυματοδηγούς αδιαβατικά πεπλατυσμένους για το τμήμα ενίσχυσης. Αυτή η τεχνική έχει επιτρέψει την παραγωγή παλμών με καλύτερα χρονικά χαρακτηριστικά τα οποία φτάνουν τα μερικά εκατοντάδες fs [28].

2.6.4 Χαμηλό ρεύμα κατωφλίου

Τα λέιζερ κβαντικών τελείων μπορούν να εισέρθουν σε κατάσταση εξαναγκασμένης εκπομπής, υπό συνθήκες χαμηλής ηλεκτρικής άντλησης [29]. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η εύκολη επίτευξη διαφάνειας επιτρέπει την έναυση της εξαναγκασμένης εκπομπής με χρήση ασθενούς ηλεκτρικής άντλησης. Πιο συγκεκριμένα, έχουν αναφερθεί τιμές κατωφλίου που φτάνουν τα 7mA για θερμοκρασία λειτουργίας ίση με 20° (σχήμα 2.8).

Αυτό το πλεονέκτημα συσχετίζεται με την ίδια τη φύση του υλικού και διατηρείται ακόμα και στην περίπτωση παλμικής λειτουργίας παρόλη την ύπαρξη του κορεσμένου απορροφητή. Επιπροσθέτως στα πλαίσια της εγκλειδωσης τρόπων προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των λέιζερ κβαντικού φρέατος. Λαμβάνοντας υπόψη ότι η έναυση της εγκλειδωσης τρόπων πραγματοποιείται από το κατώφλι κιάλας της εξαναγκασμένης εκπομπής, το χαμηλό ρεύμα έγχυσης επιτρέπει τον περιορισμό φαινομένων διαπλάτυνσης των παλμών. Επίσης, η χρήση μικρών τιμών ηλεκτρικής άντλησης επιτρέπει τον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης των διατάξεων και ως εκ τούτου την πιο εύκολη ολοκλήρωσή τους, ενώ τέλος, η χρήση μικρότερου ρεύματος πόλωσης μειώνει τα επίπεδα αυθόρμητης εκπομπής και κατά επέκταση μειώνει και τα επίπεδα θορύβου στους παραγόμενους παλμούς.



Σχήμα 2-8 Χαρακτηριστική καμπύλη οπτικής έντασης (τάσης) προς το ρεύμα άντλησης για την δομή [29].

2.6.5 Χαμηλή ευαισθησία στη θερμοκρασία

Τα λέιζερ κβαντικών τελειών επιδεικνύουν εξαιρετικά μεγάλη ανοχή στις θερμοκρασιακές μεταβολές [30], αυτό το πλεονέκτημα επιτρέπει την πιθανή λειτουργία των διατάξεων χωρίς χρήση θερμοζεύγους και κλειστού κυκλώματος ελέγχου της θερμοκρασίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του αριθμού των απαιτούμενων υποστηρικτικών ηλεκτρονικών συστημάτων, την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και την απλοποίηση της χρήσης τέτοιων λέιζερ. Η ανοχή αυτή οφείλεται, και επίσης, στην ενεργειακή φύση του υλικού και έχει παρατηρηθεί τόσο θεωρητικά όσο και πειραματικά. Αυτή η ιδιαιτερότητα των λέιζερ κβαντικών τελειών ισχύει και στην περίπτωση παλμικής λειτουργίας και επιτρέπει την διατήρηση ακόμα και βελτίωση της εγκλειδωσης τρόπων υπό συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας λειτουργίας [31].

Παρόλα αυτά, στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής, χρησιμοποιήθηκε θερμοκρασιακός έλεγχος μια και στην περίπτωση παραγωγής ισχυρών οπτικών παλμών, η ύπαρξη ισχυρού φωτορεύματος στον απορροφητή και ισχυρής ανάστροφης πόλωσης οδήγησε σε αύξηση των επιπτώσεων των θερμικών φαινομένων.

2.6.6 Μικρή διάχυση φορέων (carrier diffusion)

Στην περίπτωση των κβαντικών τελειών η συγκέντρωση του ενεργού υλικού σε μικρές αυτό-όργανωμένες δομές (πυραμίδων ή σφαιρών) καταστέλλει σε μεγάλο βαθμό την διάχυση των φορέων στο ενεργό υλικό σε σχέση με τα υλικά κβαντικού φρέατος [32]. Η μειωμένη διάχυση φορέων επιτρέπει τη κατασκευή δομών λέιζερ με πολύ μικρό αριθμό ατελειών, με αποτέλεσμα την ύπαρξη πολύ λίγων σημείων στην επιφάνεια της διάταξης και στα ενδιάμεσα στρώματα της επιταξίας που επιτρέπουν μη-ακτινοβολικές επανασυνδέσεις. Αυτό το πλεονέκτημα των κβαντικών σημείων επιτρέπει την εγχάραξη του ενεργού υλικού χωρίς να παρουσιαστεί σημαντική αύξηση των απωλειών και του ρεύματος κατωφλίου [33]-[34]. Επίσης, διευκολύνεται σημαντικά η ενσωμάτωση και άλλων δομών που απαιτούν εγχάραξη όπως φωτονικών κρυστάλλων, ειδικών κατόπτρων για την αντιστάθμιση της διασποράς και φραγμάτων περίθλασης. Επιπλέον, η δυνατότητα εγχάραξης με μειωμένες απώλειες επιτρέπει τη δημιουργία κυματοδηγών μικρού πλάτους οι οποίοι επιτρέπουν τον καλύτερο περιορισμό της οπτικής ισχύος λόγω ισχυρής κυματοδότησης μέσω του δείκτη διάθλασης (Index guiding), αλλά και καλύτερα προφίλ εξερχόμενης δέσμης με σχεδόν συμμετρικό σχήμα (quasi symmetric near field profile) [35].

Η βαθιά εγχάραξη προσφέρει βελτίωση και στην περίπτωση που ως μέθοδος εγκλειδωσης χρησιμοποιηθεί, είτε ενεργή, είτε υβριδική προσέγγιση. Σε αυτές τις δύο μεθόδους απαιτείται η εφαρμογή εναλλασσόμενου ηλεκτρικού σήματος, είτε στο τμήμα του απορροφητή ή του ενισχυτή (σχήμα 2.2) και έχει αποδειχτεί πειραματικά ότι, όταν γίνεται χρήση εγχάραξης μεγαλύτερου βάθους παρατηρείται μείωση της παρασιτικής χωρητικότητας, με αποτέλεσμα την βελτίωση της απόκρισης της διάταξης σε ρεύματα διαμόρφωσης υψηλής συχνότητας [35].

Τέλος, ένα πλεονέκτημα που προσφέρει η μειωμένη διάχυση των φορέων σε υλικά κβαντικών τελειών είναι η μειωμένη διάσπαση της δέσμης (beam filamentation). Αυτό το φαινόμενο προκαλείται από τυχαίες διακύμανσης του μετώπου του κύματος λόγω τοπικών μη ακτινοβολικών επανασυνδέσεων που προκαλούν απώλειες [36]-[37]. Αυτή η διακύμανση της ισχύος στην περίπτωση ισχυρών οπτικών παλμών γίνεται πολύ έντονη με αποτέλεσμα να παραμορφώνεται έντονα το προφίλ του πεδίου και να καθίσταται εξαιρετικά δύσκολη η συγκέντρωση του φωτός με χρήση αδιαβατικά εκλεπτυσμένων οπτικών ινών, οι οποίες έχουν περιορισμένο αριθμητικό άνοιγμα.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Επιπροσθέτως η μειωμένη ύπαρξη ατελειών στα κάτοπτρα των λέιζερ μειώνει δραστικά την πιθανότητα καταστροφής του κατόπτρου, στην περίπτωση παλμών μεγάλης οπτικής ισχύος [38].

2.6.7 Χαμηλότερα επίπεδα αυθόρμητης εκπομπής

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, η διαδικασία παθητικής εγκλειδωσης εκκινείται χωρίς τη χρήση εξωτερικής ηλεκτρικής διαμόρφωσης (self-starting). Παρόλο που η αυθόρμητη εκπομπή υποβοήθη την έναυση της εγκλειδωσης προκαλεί τυχαίες μεταβολές στα δυναμικά χαρακτηριστικά του λέιζερ όπως ο δείκτης διάθλασης και η συγκέντρωση των οπτικών φορέων. Αυτές οι μεταβολές προκαλούν με τη σειρά τους, διακυμάνσεις στο ενεργό μήκος της κοιλότητας και κατ'επέκταση στο ρυθμό επανάληψης των παλμών, με αποτέλεσμα την συχνοτική ολίσθηση του ρυθμού εκπομπής των παλμών. Αυτό το φαινόμενο ονομάζεται jitter και είναι εγγενές πρόβλημα σε όλα τα λέιζερ παθητικής εγκλειδωσης, ενώ η επίδραση του φαινομένου είναι πιο ισχυρή σε λέιζερ με αυξημένο μήκος. Τα λέιζερ κβαντικών τελειών, παρουσιάζουν ένα συγκριτικό πλεονέκτημα και σε αυτό τον τομέα σε σχέση με τα υπόλοιπα ημιαγωγικά λέιζερ. Η διακριτή φύση των ενεργειακών καταστάσεων μειώνει τα επίπεδα αυθόρμητης εκπομπής και κατ'επέκταση μειώνει σημαντικά τόσο το jitter όσο και το θόρυβο φάσης της διάταξης[39]-[40].

2.6.8 Χαμηλός παράγοντας διεύρυνσης της οπτικής γραμμής (παράγοντας – α)

Η θεωρητική πρόβλεψη ύπαρξης εξαιρετικά μικρού συντελεστή διεύρυνσης της οπτικής γραμμής (παράγοντας – α) σε λέιζερ κβαντικών σημείων, λόγω της συμμετρικότητας της απολαβής του υλικού, ήταν ένας καθοριστικός παράγοντας για τη μεγάλη δραστηριότητα στον τομέα της μελέτης τέτοιων νανο-δομών. Όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, η ύπαρξη περιορισμένου παράγοντα α θα επέτρεπε την μείωση φαινομένων αυτοδιαμόρφωσης της φάσης και διάσπασης της οπτικής δέσμης ενώ ταυτόχρονα, θα αύξανε σημαντικά τη μέγιστη συχνότητα διαμόρφωσης και την ανοχή στην ύπαρξη οπτικής ανάδρασης. Παρόλα αυτά η πειραματική διερεύνηση του παράγοντα α έδωσε αλληλοαντικρουόμενα αποτελέσματα, στα οποία ο παράγοντας α κυμαινόταν από σχεδόν μηδενικός [41] (ακόμα κι αρνητικός), μέχρι και αρκετά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο των λέιζερ κβαντικού φρέατος [42]-[43]. Στην πλαίσια της παρούσας διατριβής δεν έγινε αναλυτικός προσδιορισμός του παράγοντα – α. Εντούτοις στο κεφάλαιο 7 πραγματοποιήθηκε πειραματική μελέτη της ανοχής της διάταξης στην ύπαρξη οπτικής ανάδρασης, η οποία σχετίζεται ευθέως με την τιμή του παράγοντα α.

2.7 Εξελίξεις στα παλμικά λέιζερ κβαντικών τελειών

Σε αυτό τη παράγραφο θα πραγματοποιηθεί μια ανασκόπηση των εξελίξεων στον τομέα των λέιζερ κβαντικών τελειών για την παραγωγή στενών οπτικών παλμών. Σκοπός αυτής της ανασκόπησης είναι η ανάδειξη των επιδόσεων αλλά και των προβλημάτων που έχουν παρουσιαστεί στη μελέτη και χρήση τέτοιων διατάξεων, ώστε να καταστεί σαφής η χρησιμότητα της παρούσας διατριβής.

Η πρώτη υλοποίηση λέιζερ κβαντικών σημείων σε λειτουργία εγκλειδωσης τρόπων πραγματοποιήθηκε το 2001, με χρονικό εύρος παραγόμενων παλμών 17ps και ρυθμό επανάληψης παλμών 7.4GHz, ενώ για την επίτευξη παλμικής λειτουργίας χρησιμοποιήθηκε παθητική εγκλειδωση τρόπων [44]. Το 2003 χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά υβριδικές τεχνικές επιτυγχάνοντας 14.2 ps ελάχιστο εύρος παλμού με ρυθμό επανάληψης 10GHz [45]. Το 2004 από την ίδια ομάδα πραγματοποιήθηκε μια μικρή βελτίωση των επιδόσεων με αποτέλεσμα την επίτευξη παλμών με χρονικό εύρος

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

10ps και ρυθμό επανάληψης ίσο με 18GHz. Οι οπτικοί παλμοί ήταν περιορισμένης μετατροπής (transform limited), ενώ έγινε χρήση παθητικής εγκλειδωσης των τρόπων. Η πρώτη επίτευξη παραγωγής οπτικών παλμών με χρονικό εύρος της τάξης των εκατοντάδων fs (390fs) πραγματοποιήθηκε επίσης το 2004 [46]-[47], περιλάμβανε τεχνικές παθητικής εγκλειδωσης και το μικρό χρονικό εύρος κατέστη δυνατό, μέσω χρήσης πολύ υψηλής ανάστροφης τάσης στον απορροφητή (-10V). Η συγκεκριμένη διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε αποτελείτο από δύο τμήματα και διέθετε εξαιρετική ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των τμημάτων, επιτρέποντας έτσι την ισχυρή πόλωση του απορροφητή.

Το 2006 κατέστη δυνατό και από άλλες ερευνητικές ομάδες να παράγουν παλμούς της τάξης των fs (790fs), χρησιμοποιώντας όμως, διαφορετικές δομές λέιζερ οι οποίες δεν διέθεταν ευθύγραμμους κυματοδηγούς αλλά αντίθετα το τμήμα ενίσχυσης ήταν αδιαβατικά πεπλατυσμένου σχήματος (tapered) [48]. Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, το πεπλατυσμένο σχήμα της διάταξης επέτρεψε την αύξηση της έντασης κορεσμού της απολαβής σε συνδυασμό με την αύξηση της ισχύος, με αποτέλεσμα την παραγωγή στενών παλμών με υψηλή ισχύ κορυφής. Η ίδια ερευνητική ομάδα πρόσφατα μείωσε και άλλο το εύρος των παλμών στα 790fs ενώ αύξησε το ρυθμό επανάληψης των παλμών στα 24GHz [28].

Το μήκος κύματος εκπομπής όλων των προηγούμενων διατάξεων ήταν στο φασματικό παράθυρο των 1300nm λόγω του κράματος των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν (InAs/GaAs/AlGaAs), παρόλα αυτά πραγματοποιήθηκαν αρκετές προσπάθειες μεταφοράς αυτών των διατάξεων σε άλλο σύστημα υλικών για την επίτευξη μηκών κύματος στο τηλεπικοινωνιακό παράθυρο των 1500nm [49]-[50]. Οπτικοί παλμοί με πολύ μικρά χρονικά εύρη καταγράφηκαν από λέιζερ ενός τμήματος, το οποίο αποτελείτο, είτε από κβαντικές τελείες [50]-[51], είτε από κβαντικές παύλες (quantum dash) [52]-[53]. Επιπρόσθετα, η ίδια ερευνητική ομάδα κατάφερε πρόσφατα, χρησιμοποιώντας το ίδιο σύστημα υλικών, να παράγει οπτικούς παλμούς με εύρος 960fs και ρυθμό επανάληψης 96GHz από δύο διαφορετικά μήκη κύματος (1560nm-1540nm) χωρίς την χρήση απορροφητή. Ο μηχανισμός εγκλειδωσης σε αυτή τη περίπτωση βασιζόταν στο φαινόμενο αυτό-εστίασης (self focusing) του παλμού λόγω ισχυρού φαινομένου Kerr εντός του τμήματος ενίσχυσης [54]. Η συγκεκριμένη τεχνική έχει πολύ μεγάλο ενδιαφέρον μια και η έλλειψη απορροφητή επιτρέπει την ραγδαία μείωση των απωλειών εντός της κοιλότητας και ως εκ τούτου την αύξηση της ισχύος κορυφής.

Σημαντικό βάρος έχει δοθεί στην υλοποίηση κάθετων δομών λέιζερ (VCSEL-vertical cavity emitting lasers) τα οποία είναι βασισμένα σε κβαντικές τελείες με σκοπό την αύξηση της ισχύος κορυφής των παλμών, αλλά και την μείωση της χρονικής διάρκειας των παλμών. Από το 2000, όπου παρουσιάστηκαν οι πρώτες κάθετες δομές βασισμένες σε υλικά κβαντικών τελειών [55], μέχρι σήμερα, έχει επιτευχθεί σημαντική βελτίωση της απόδοσης των διατάξεων με αποτέλεσμα οι επιδόσεις αυτών των λέιζερ να καταστούν καλύτερες από αυτές τυπικών λέιζερ επίπεδης τεχνολογίας. Ειδικότερα έχει επιτευχθεί η παραγωγή παλμών με χρονικό εύρος μικρότερο των 135fs [56]-[57] και ισχύς κορυφής που ξεπερνούσε τα 2W για παλμούς χρονικού εύρους της τάξης των 4 ps. Σε όλες τις προαναφερθείσες διατάξεις ο κορεσμένος απορροφητής δεν ήταν ενσωματωμένος εντός της κοιλότητας (SESAM) με αποτέλεσμα το συνολικό μήκος της διάταξης να είναι απαγορευτικά μεγάλο για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ολοκλήρωση και μεγάλο ρυθμό επανάληψης παλμών [57]. Στην προσπάθεια βελτίωσης αυτού του χαρακτηριστικού έχουν γίνει προσπάθειες ενσωμάτωσης του απορροφητή

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

εντός της κοιλότητας, με αποτέλεσμα την επίτευξη σημαντικά μικρότερων τιμών ισχύος (600mW) [58]-[60] και σημαντικά πιο διευρυμένων παλμών (24ps).

Όσο αφορά το θορυβικά χαρακτηριστικά των πηγών, όπως αναφέρθηκε τα λέιζερ κβαντικών σημείων εγγενώς παρουσιάζουν εξαιρετικά μειωμένο θόρυβο αυθόρμητης εκπομπής, με αποτέλεσμα την παραγωγή παλμών με πολύ μικρή ολίσθηση συχνότητας (low jitter). Πιο συγκεκριμένα, εξαιρετικά μικρές τιμές ολίσθησης συχνότητας (7.5fs) καταγράφηκαν σε ένα λέιζερ κβαντικών τελειών, με τοπολογία δακτυλίου, στο οποίο πραγματοποιήθηκε ενεργή εγκλειδωση των τρόπων [61]. Επιπλέον, σε λέιζερ τα οποία χρησιμοποιούν παθητική εγκλειδωση καταγράφηκε πολύ μικρή ολίσθηση της τάξης των 390fs, [62] που, αν και μεγαλύτερη από αυτή των κοιλοτήτων με ενεργή εγκλειδωση, είναι 30 φορές μικρότερη από την αντίστοιχη ολίσθηση που παρατηρείται σε λέιζερ κβαντικού φρέατος. Χρησιμοποιώντας υβριδικές τεχνικές, η ολίσθηση συχνότητας μειώθηκε ακόμα περισσότερο έχοντας τιμές 291fs και 124fs, οι οποίες αποτελούν εξαιρετικά χαμηλές τιμές για λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων [63].

Έκτος από το χρονικό προφίλ των παλμών, σημαντικό τμήμα της ερευνητικής προσπάθειας έχει εστιαστεί στην αύξηση του ρυθμού επανάληψης για την χρήση των παλμικών πηγών σε υψίρρυθμα τηλεπικοινωνιακά συστήματα τα οποία απαιτούν μεγάλους ρυθμούς. Πιο συγκεκριμένα, λέιζερ παθητικής εγκλειδωσης κατέστη δυνατό πρόσφατα, να παράγει παλμούς 700fs με ρυθμούς επανάληψης που έφταναν τα 160GHz [64]. Εναλλακτικά, αξιοποιώντας την εγκλειδωση των τρόπων σε υψηλότερες αρμονικές, παρουσιάστηκε διάταξη με ικανότητα εκπομπής παλμών με ρυθμούς που υπερβαίνουν τα 235GHz ή τα 295GHz, στην περίπτωση που το μήκος εκπομπής ήταν τα 1560nm [65]. Για την επίτευξη τη εγκλειδωσης υψηλότερων αρμονικών ο απορροφητής τοποθετείται στο μέσω της διάταξης. Επιπροσθέτως οι παραγόμενοι παλμοί παρουσιάζουν καλύτερα χρονικά χαρακτηριστικά επειδή ο απορροφητής κορένεται πιο αποδοτικά από την ύπαρξη δύο παλμών έναντι ενός (colliding pulse effect).

Τα τελευταία χρόνια ένα σημαντικό τμήμα της ερευνητικής προσπάθειας έχει εστιαστεί περισσότερο στην διερεύνηση νέων φαινομένων που σχετίζονται με την σχεδόν ατομική φύση του ενεργού υλικού και μπορούν να επιτρέψουν τη χρήση αυτών των πηγών σε νέες τεχνολογίες, τόσο στον τομέα των τηλεπικοινωνιών όσο και στον βιο-ιατρικό τομέα.

Σημαντικά βήματα προς αυτή την κατεύθυνση αποτελεί η προσπάθεια για την επίτευξη ταυτόχρονης εγκλειδωσης και στα δύο μήκη κύματος (GS/ES) που μπορούν να εκπεμφθούν από τα υλικά κβαντικών τελειών [66]-[67]. Αποτέλεσμα αυτού είναι η δυνατότητα χρήσης αυτών των πηγών, είτε για νέες τεχνικές τομογραφίας που απαιτούν την ύπαρξη παλμών από δύο μήκη κύματος [68]-[69], είτε μέσω διακροτήματος (beating) των δύο παλμών να κατασκευαστούν νέες παλμικές πηγές στην περιοχή των THz. Επιπρόσθετα, η ύπαρξη δύο ταυτόχρονων μηκών κύματος εκπομπής παρέχει νέες δυνατότητες όπως είναι ο περιορισμός του εύρους των παραγόμενων παλμών από το GS λόγω ύπαρξης συνεχούς λειτουργίας από το ES [70], το οποίο θα επέτρεπε την ταυτόχρονη ύπαρξη υψηλής τόσο μέσης ισχύος όσο και ισχύος κορυφής.

2.8 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε εν συντομία το θεωρητικό υπόβαθρο, που αφορά την εγκλειδωση τρόπων σε ημιαγωγικά λέιζερ. Ιδιαίτερη βάση δόθηκε στις διαφορετικές τεχνικές εγκλειδωσης καθώς και τα βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους. Ακολούθησε μια σύντομη παρουσίαση των συνθηκών που απαιτούνται για την επίτευξη αποδοτικής παλμικής λειτουργίας καθώς και των προβλημάτων που παρουσιάζονται

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

στα ημιαγωγικά λέιζερ όταν βρίσκονται σε κατάσταση εγκλειδωσης. Κατόπιν πραγματοποιήθηκε παρουσίαση των βασικών εγγενών πλεονεκτημάτων που διαθέτουν τα λέιζερ κβαντικών τελειών έναντι των συμβατικών δομών, έτσι ώστε να στοιχειοθετηθεί η αναγκαιότητα της παρούσας διατριβής. Τέλος παρουσιάστηκαν οι τελευταίες εξελίξεις στον χώρο των λέιζερ κβαντικών τελειών ώστε να καταδειχτεί το έντονο παγκόσμιο ερευνητικό ενδιαφέρον που έχει εστιαστεί σε αυτό τον επιστημονικό τομέα καθώς και να σκιαγραφηθεί το τρέχον τεχνολογικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο η παρούσα διατριβή στηρίχτηκε και το οποίο προσπάθησε να επεκτείνει.

3. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΛΕΙΖΕΡ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΕΓΚΛΕΙΔΩΣΗΣ ΤΡΟΠΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο θα περιγραφεί η φιλοσοφία ενός μεσοσκοπικού θεωρητικού μοντέλου που αναπτύχθηκε με σκοπό την περιγραφή ενεργών υλικών, τα οποία είναι βασισμένα σε κβαντικές τελείες. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του μοντέλου ήταν η ενσωμάτωση των διαφορετικών ενεργειακών σταθμών που παρουσιάζονται στα υλικά κβαντικών τελειών, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα προσομοίωσης της δυναμικής συμπεριφοράς των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τον υπολογισμό της συνολικής απολαβής του υλικού για διάφορες συνθήκες ηλεκτρικής άντλησης, από όλες τις διαθέσιμες ενεργειακές ζώνες.

Στη συνέχεια, το μοντέλο αυτό ενσωματώθηκε σε ένα μοντέλο διαφορικών εξισώσεων καθυστέρησης (delayed differential equations) με σκοπό την μελέτη της παλμικής λειτουργίας μέσω παθητικής εγκλείδωσης των τρόπων. Τα αποτελέσματα αυτών των προσομοιώσεων αποδεικνύουν την επίδραση των συνθηκών πόλωσης στο χρονικό εύρος των παλμών και αποσαφηνίζουν τους φυσικούς μηχανισμούς οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη διακύμανση των επιδόσεων των λείζερ κβαντικών τελειών. Τέλος, η ενσωμάτωση των πολλαπλών ενεργειακών σταθμών του υλικού στο μοντέλο έδωσε τη δυνατότητα μελέτης φαινομένων με ιδιαίτερο ερευνητικό ενδιαφέρον, όπως είναι η ταυτόχρονη παραγωγή παλμών από τις δύο διαθέσιμες φασματικές περιοχές.

3.1 Εισαγωγή

Η διαδικασία της κατασκευής ενεργών οπτικών διατάξεων, οι οποίες βασίζονταν στις κβαντικές τελείες, συμπορεύτηκε με την προσπάθεια δημιουργίας αποδοτικών θεωρητικών μοντέλων που θα μπορούσαν να αναπαράγουν τα πρωτόλεια πειραματικά αποτελέσματα. Βασικό κίνητρο πίσω από αυτή τη προσπάθεια ήταν η βαθύτερη κατανόηση των φυσικών μηχανισμών που διέπουν την λειτουργία αυτών των διατάξεων καθώς και η αποσαφήνιση των παραγόντων που επηρεάζουν την απόδοσή τους. Τα θεωρητικά μοντέλα που δημιουργήθηκαν βασίστηκαν σε καλά θεμελιωμένες μεθοδολογίες, οι οποίες είχαν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν για τη μοντελοποίηση υλικών κβαντικού φρέατος [1]-[2]. Η βασική διαφορά των κβαντικών τελειών έγκειται στο γεγονός ότι το ενεργό υλικό δεν είναι ενιαίο, όπως στην περίπτωση των διατάξεων κβαντικού φρέατος, αλλά αποτελείται από ηλεκτρικά και χωρικά απομονωμένες συγκεντρώσεις υλικού, οι οποίες παρουσιάζουν πολλές διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες. Κατά συνέπεια, η δυναμική των ελεύθερων φορέων παρουσιάζει σημαντικά διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τα συμβατικά υλικά. Με σκοπό την μοντελοποίηση αυτών των διαφοροποιήσεων αναπτύχθηκαν πιο περίπλοκα αριθμητικά μοντέλα, τα οποία λάμβαναν υπόψη τους μεγαλύτερο αριθμό μικροσκοπικών φαινομένων, όπως είναι η χωρική διάταξη των τελειών, καθώς και οι μεταβλητοί χρόνοι αποδιέγερσης των φορέων μεταξύ των πολλών ενεργειακών σταθμών [3]-[9].

Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το μοντέλο που αναπτύχθηκε για την περιγραφή της απολαβής του υλικού κβαντικών τελειών ακολουθώντας την προαναφερθείσα μεθοδολογία [10]. Σκοπός αυτής της προσπάθειας ήταν η ποιοτική εξήγηση των πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια καθώς και η αποσαφήνιση των φυσικών μηχανισμών που είναι υπεύθυνοι για τη δυναμική συμπεριφορά των λείζερ κβαντικών τελειών. Στη συνέχεια, το μοντέλο της απολαβής συνδυάστηκε με ένα μοντέλο διαφορικών εξισώσεων καθυστέρησης (delayed differential equations) [11]-[12] το οποίο έδωσε τη δυνατότητα ενσωμάτωσης

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

κορεσμένου απορροφητή και κατ' επέκταση την επίτευξη παθητικής εγκλείδωσης των τρόπων.

Χρησιμοποιώντας αυτή τη προσέγγιση πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις που παρήγαγαν ποιοτικά αποτελέσματα όσο αναφορά την επίδραση των συνθηκών πόλωσης (ρεύμα ενίσχυσης, ανάστροφη πόλωση) στα χρονικά χαρακτηριστικά των παλμών. Επιπλέον, η ενσωμάτωση στο μοντέλο όλων των διαθέσιμων ενεργειακών σταθμών, έδωσε τη δυνατότητα μελέτης του φαινομένου της ταυτόχρονης εγκλείδωσης τρόπων, οι οποίοι προέρχονται από ακτινοβολικές επανασυνδέσεις διαφορετικών ενεργειακών σταθμών.

3.2 Μοντέλο βασισμένο στις εξισώσεις ρυθμών πολύ-πληθυσμιακών φορέων.

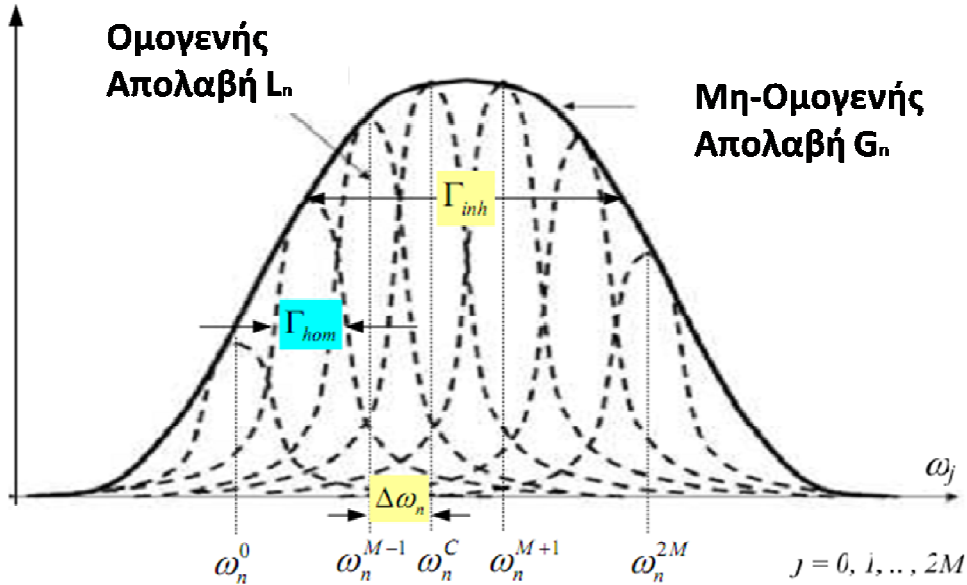
3.2.1 Περιγραφή του μοντέλου του λέιζερ για συνθήκες συνεχούς λειτουργίας

Για την καλύτερη κατανόηση του μοντέλου θα πρέπει να αποσαφηνιστούν κάποιες βασικές έννοιες όπως είναι η ομογενής και μη ομογενής απολαβή καθώς και η εξάρτηση των φασματικών χαρακτηριστικών των κβαντικών τελειών από τη χωρική τους κατανομή. Οι κβαντικές τελείες, όπως αναφέρθηκε και στο εισαγωγικό κεφάλαιο, είναι αυτόνομες νησίδες υλικού οι οποίες έχουν κατασκευαστεί πάνω σε ένα λεπτό επιταξιακό στρώμα μέσω της διαδικασίας Stranski-Krastanov. Λόγω της φύσης του ενεργού υλικού, κάθε κβαντική τελεία μπορεί να θεωρηθεί ηλεκτρικά απομονωμένη από τις υπόλοιπες, με αποτέλεσμα η μοναδική οδός ανταλλαγής ηλεκτρικών φορέων να είναι μέσω του κοινού ρεζερβουάρ (wetting layer). Λόγω αυτής της χωρικής απομόνωσης, η κάθε κβαντική τελεία μπορεί να θεωρηθεί ένα ανεξάρτητο μικροσκοπικό λέιζερ το οποίο παρουσιάζει τη δική του απολαβή (ομογενής απολαβή). Θεωρητικά η γραμμή εκπομπής μίας μόνο κβαντικής τελείας είναι αυστηρά μονοχρωματική. Παρόλα αυτά στην μη ιδανική περίπτωση το εύρος γραμμής της κάθε τελείας παρουσιάζει μια Lorentzian κατανομή.

Το κεντρικό μήκος κύματος καθώς και το εύρος ζώνης αυτής της ομογενούς απολαβής καθορίζονται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος και το σχήμα της κάθε τελείας. Λαμβάνοντας υπ' όψιν την πυκνότητα των τελειών σε μια τυπική διάταξη, που μπορεί να φτάσει τα 10^{11}cm^{-2} [13]-[14], παρατηρούνται διακυμάνσεις στο μέγεθος αλλά και στο σχήμα των τελειών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι φασματικές εκπομπές της κάθε τελείας να μην συμπίπτουν. Συνέπεια αυτού είναι η συνολική απολαβή ολόκληρου του υλικού να αποτελείται από την υπέρθεση των ομογενών απολαβών των διαφορετικών κβαντικών τελειών. Αυτή η συνολική απολαβή ονομάζεται μη ομογενής απολαβή και το σχήμα της ακολουθεί κατανομή gaussian λόγω της αντίστοιχης χωρικής κατανομής των τελειών. Για τις ανάγκες της ορθής μοντελοποίησης, οι τελείες χωρίστηκαν σε διαφορετικές ομάδες που διέθεταν παρεμφερή φασματικά χαρακτηριστικά, με αποτέλεσμα η απολαβή ολόκληρης της ομάδας να αντιμετωπίζεται επίσης συνολικά με χρήση μιας Lorentzian κατανομής [3]-[10].

Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης οι κβαντικές τελείες χωρίζονται σε $2M+1$ ομάδες. Το φασματικό κέντρο της κάθε ομάδας (j) δίδεται από τον τύπο 3.1, όπου ω_n^C είναι η κεντρική συχνότητα, ενώ $\Delta\omega_n$ είναι η συχνοτική απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ομάδων. Στο σχήμα 3.1 παρουσιάζεται διαγραμματικά η μεθοδολογία μοντελοποίησης της συνολικής απολαβής της διάταξης.

$$\omega_j = \omega_n^C - (M - j) \cdot \Delta\omega_n \quad (3.1)$$



Σχήμα 3-1 Διαγραμματική απεικόνιση της μεθοδολογίας μοντελοποίησης της απολαβής του ενεργού υλικού.

Λαμβάνοντας υπ'όψιν μας ότι τα υλικά κβαντικών τελειών δύναται να εκπέμπουν από δύο διαφορετικές φασματικές περιοχές, η εξίσωση 3.1 χρησιμοποιήθηκε δύο φορές ώστε να θεωρηθούν δύο ανεξάρτητες ομάδες κβαντικών τελειών, μία για τη φασματική περιοχή του GS και μία για τη περιοχή του ES.

Για τις ανάγκες μοντελοποίησης μίας διάταξης λείζερ βασισμένης σε ενεργό υλικό κβαντικών τελειών, εκτός από τα φασματικά χαρακτηριστικά της κάθε ομάδας τελειών, πρέπει να υπολογιστούν και οι συχνότητες των διαμηκών τρόπων της κοιλότητας. Η φασματική απόσταση των τρόπων καθώς και η κεντρική συχνότητα τους, δεν σχετίζεται με τη συχνότητα της κάθε ομάδας, αλλά επιβάλλεται από τη συνθήκη στάσιμων κυμάτων. Στον τύπο 3.2 περιγράφεται η σχέση συντονισμού των στάσιμων κυμάτων, η οποία καθορίζεται από τον ενεργό δείκτη διάθλασης του υλικού καθώς και το συνολικό μήκος της κοιλότητας.

$$\omega_m = \omega_m^c - (M - i)\Delta\omega_m \quad i=0,1,\dots,2M \quad (3.2)$$

και

$$\Delta\omega_m = 2\pi \cdot c / (L \cdot n_{eff})$$

Για τη μοντελοποίηση της gaussian και της Lorentzian κατανομής, αντίστοιχα, χρησιμοποιήθηκαν οι κανονικοποιημένες σχέσεις 3.3 και 3.4 αντίστοιχα.

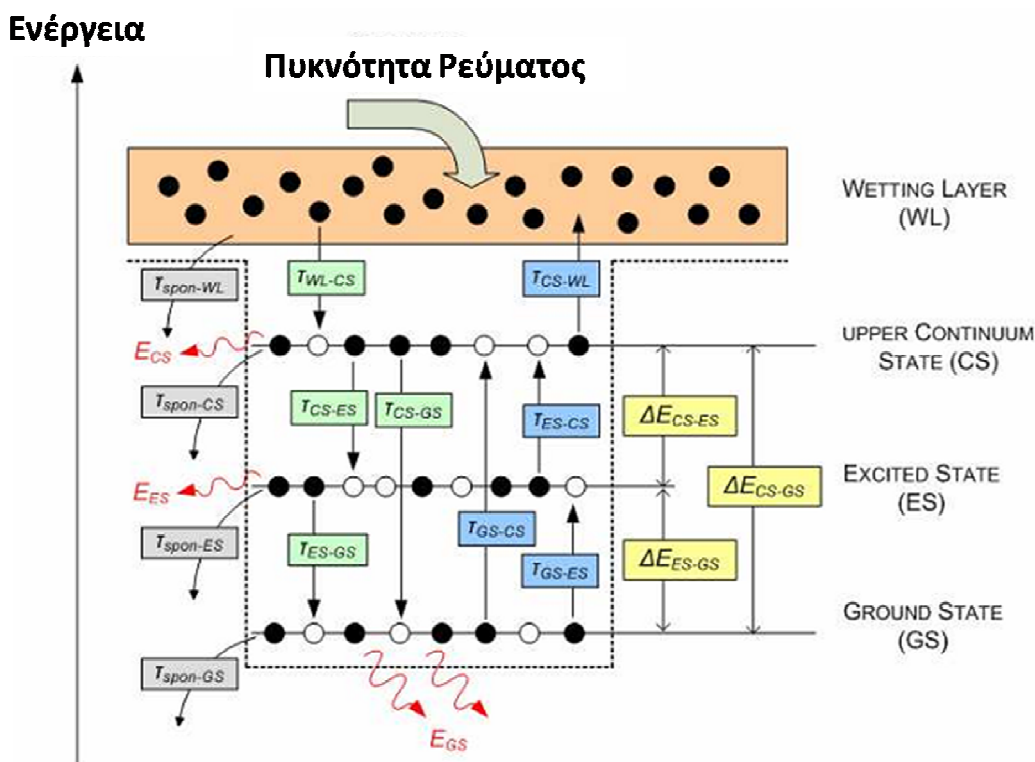
$$G^j(\omega_n^j) = \Delta\omega_n \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} \cdot \exp\left(\frac{-(\omega_n^j - \omega_n^c)^2}{2\sigma_0^2}\right) \quad (3.3)$$

$$\sigma_0 = \frac{\Gamma_{inhomo}}{2.35}$$

$$L_n^j(\omega_m) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Gamma_{homo}}{(\omega_m - \omega_n^j)^2 + (\Gamma_{homo}/2)^2} \quad (3.4)$$

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Σε πλήρη αντιστοιχία με τα συμβατικά ημιαγωγικά υλικά, στη διαδικασία της μοντελοποίησης έγινε χρήση δύο βασικών ενεργειακών ζωνών: της ζώνης αγωγιμότητας και της ζώνης σθένους. Ενώ στα υλικά βασισμένα σε κβαντικά φρέατα αυτή η προσέγγιση είναι επαρκής για την πλήρη μοντελοποίηση του υλικού, στην περίπτωση των κβαντικών τελειών απαιτείται η ύπαρξη επιπλέον ενδιάμεσων ενεργειακών ζωνών. Πιο συγκεκριμένα, κάθε μία από τις δύο ενεργειακές ζώνες (αγωγιμότητας – σθένους) χωρίζεται σε τέσσερις επιπλέον ενεργειακές στάθμες. Η πρώτη ενεργειακή στάθμη είναι το wetting layer και αποτελεί το κοινό ρεζερβουάρ ηλεκτρονίων μέσω του οποίου αλληλεπιδρούν οι κβαντικές τελείες. Η δεύτερη στάθμη είναι η άνω διεγερμένη στάθμη (upper continuum state – CS), ακολουθεί η πρώτη διεγερμένη στάθμη (excited state – ES) ενώ, τέλος, υπάρχει η βασική ενεργειακή στάθμη (ground state – GS). Στο σχήμα 3.2 παρουσιάζεται σχηματικά η ενεργειακή δομή του υλικού ως προς την ενέργεια της κάθε στάθμης.



Σχήμα 3-2 Διαγραμματική απεικόνιση των διαφορετικών ενεργειακών σταθμών που έχουν χρησιμοποιηθεί στη ζώνη αγωγιμότητας, μαζί με τους χαρακτηριστικούς χρόνους όλων των δυνατών μεταπτώσεων.

Η ύπαρξη αυτών των ενεργειακών σταθμών, επιτρέπει είτε την αποδιέγερση των ηλεκτρονίων από κάθε υποστάθμη της ζώνης αγωγιμότητας στη αντίστοιχη ζώνη σθένους, είτε την μη ακτινοβολική μετάπτωση των φορέων ανάμεσα στις στάθμες.

Παρόλο που, όπως δείχνει το σχήμα, κάθε μετάπτωση είναι δυνατή με ένα χαρακτηριστικό χρόνο, για την απλοποίηση της μοντελοποίησης και χωρίς να διαταραχθεί η γενικότητα, μπορούν να πραγματοποιηθούν κάποιες παραδοχές. Η πρώτη απλοποίηση συνίσταται στην μοντελοποίηση μόνο της δυναμικής συμπεριφοράς των ηλεκτρονίων, η δεύτερη περιλαμβάνει την απάλειψη της πρώτης διεγερμένης στάθμης (CS) με αποτέλεσμα οι επαγόμενοι από το ρεύμα ελεύθεροι φορείς του wetting layer να κινούνται απευθείας προς το ES, ενώ τέλος δεν έχουν μοντελοποιηθεί οι

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

αποδιεγέρσεις από το WL κατευθείαν στο GS, μια και αυτές έχουν πολύ μικρότερη πιθανότητα εμφάνισης [4]-[7]. Για την περιγραφή της δυναμικής συμπεριφοράς των ηλεκτρονίων χρησιμοποιήθηκαν οι εξισώσεις 3.5 – 3.7, οι οποίες περιγράφουν την πυκνότητα φορέων στην κάθε στάθμη.

$$\frac{\partial n_{WL}}{\partial t} = \frac{I}{e \cdot V} + \sum_j \frac{n_{ES}^j}{\tau_{ES \rightarrow WL}} - \frac{n_{WL}}{\tau_{WL \rightarrow ES}} - \frac{n_{WL}}{\tau_{sponWL}} \quad (3.5)$$

$$\frac{\partial n_{GS}}{\partial t} = \frac{n_{ES}}{\tau_{ES \rightarrow GS}} - \frac{n_{GS}}{\tau_{GS \rightarrow ES}} - \frac{n_{GS}}{\tau_{sponGS}} - \frac{\Gamma c g_{GS} |A_{GS}(t)|^2}{n_{eff}} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial n_{ES}}{\partial t} = \frac{G \cdot n_{WL}}{\tau_{ES \rightarrow GS}} + \frac{n_{GS}}{\tau_{GS \rightarrow ES}} - \frac{n_{ES}}{\tau_{ES \rightarrow WL}} - \frac{n_{ES}}{\tau_{ES \rightarrow GS}} - \frac{n_{ES}}{\tau_{sponES}} - \frac{\Gamma c g_{GE} |A_{ES}(t)|^2}{n_{eff}} \quad (3.7)$$

Στις τρεις παραπάνω εξισώσεις, οι όροι $\tau_{x \rightarrow y}$ περιγράφουν τους χαρακτηριστικούς χρόνους μετάβασης των ηλεκτρονίων από την στάθμη x στην στάθμη y , ενώ αντίστοιχα με τους όρους τ_{sponx} περιγράφεται ο χαρακτηριστικός χρόνος της αυθόρμητης εκπομπής κάθε στάθμης x . Ο συντελεστής Γ εκφράζει τον χωρικό περιορισμό του οπτικού τρόπου εντός της κοιλότητας. Με τον όρο g_n παρουσιάζεται η απολαβή σε κάθε ενεργειακή ζώνη n , το I είναι το ρεύμα έγχυσης στο WL κανονικοποιημένο ως προς τον όγκο της διάταξης και με τον όρο $A_n(t)$ παρουσιάζεται η οπτική ισχύς της κάθε φασματικής περιοχής (n).

Η μελέτη των εξισώσεων 3.5 – 3.7 παρουσιάζει την φιλοσοφία μοντελοποίησης που βασίζεται στην δυναμική ισορροπία μεταξύ των φορέων διαφορετικών ενεργειακών σταθμών. Ο αριθμός ηλεκτρονίων στην κάθε υποστάθμη καθορίζεται από θετικούς όρους που περιγράφουν την μετακίνηση φορέων προς τη στάθμη και αρνητικούς όρους που οφείλονται ή στην μετακίνηση ηλεκτρονίων από την συγκεκριμένη στάθμη σε άλλες, ή σχετίζονται με την αυθόρμητη εκπομπή φορέων, είτε τέλος συνδέονται με την αποδιέγερση φορέων μέσω του μηχανισμού της εξαναγκασμένης εκπομπής. Για την επίλυση και των τριών διαφορικών εξισώσεων ακολουθήθηκε η μέθοδος Euler η οποία, αν και παρουσιάζει προβλήματα σύγκλισης όταν το χρονικό βήμα είναι σχετικά μεγάλο, στην παρούσα μελέτη παρουσίασε ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Για τον υπολογισμό της απόδοσης της απολαβής σε κάθε ομάδα τελειών χρησιμοποιείται η εξίσωση 3.8

$$g^j(t, \omega_m) = \frac{2\pi q^2}{c \cdot n \epsilon_0 m^2} \cdot \frac{|P_{cv}|^2 D_n N_D^{Vol}}{h \omega_n^j} \cdot (2P_n^j - 1) \cdot G^j(\omega_n) \cdot L^j(\omega_m) \quad (3.8)$$

όπου D_n είναι ο παράγοντας εκφυλισμού της κάθε ενεργειακής ζώνης, N_D^{Vol} είναι η πυκνότητα τελειών ανά μονάδα όγκου, $|P_{cv}|^2$ είναι ο παράγοντας διαζωνικής μετάβασης [4]-[9], P_n^j είναι η πιθανότητα κατάληψης οπής από ηλεκτρόνιο για κάθε ομάδα τρόπων και ζώνη, ενώ τέλος, με τους όρους G και L , όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, μοντελοποιείται η επίδραση της ομογενούς και μη ομογενούς απολαβής, αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό της συνολικής απολαβής σε μια συγκεκριμένη συχνότητα που αντιστοιχεί στον διαμήκη τρόπο αθροίζεται η συνολική συνεισφορά όλων των ομάδων τελειών της ζώνης σύμφωνα με την σχέση 3.9. Η ίδια διαδικασία πραγματοποιείται τόσο για τους διαμήκεις τρόπους της φασματικής περιοχής του GS και του ES.

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

$$g_n(t, \omega_m) = \sum_j g_n^j(t, \omega_m) \quad (3.9)$$

Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι οι χαρακτηριστικοί χρόνοι που περιγράφονται, τόσο στο σχήμα 3.2, όσο και στις εξισώσεις 3.5 – 3.7, σχετίζονται άμεσα με την πιθανότητα κατάληψης της κάθε στάθμης, σύμφωνα με τις σχέσεις (3.10 – 3.14). Αυτή η εξάρτηση συνεπάγεται ότι, στην περίπτωση αύξησης του πληθυσμού των ηλεκτρικών φορέων μίας στάθμης, προκαλείται επίσης αύξηση της πιθανότητας κατάληψης, με συνέπεια την σημαντική αύξηση των χαρακτηριστικών χρόνων που σχετίζονται με την συγκεκριμένη μετάβαση. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της πιθανότητας αποδιέγερσης προς την συγκεκριμένη στάθμη.

$$\tau^j_{GS \rightarrow ES} = \frac{\tau_{GS \rightarrow ES}^0}{(1 - P_{ES}^j)} \quad (3.10)$$

$$\tau^j_{ES \rightarrow GS} = \frac{\tau_{ES \rightarrow GS}^0}{(1 - P_{GS}^j)} \quad (3.11)$$

$$\tau^j_{WL \rightarrow ES} = \frac{\tau_{WL \rightarrow ES}^0}{(1 - P_{ES}^j)} \quad (3.12)$$

$$\tau_{ES \rightarrow WL} = \frac{\tau_{ES \rightarrow WL}^0}{(1 - P_{WL})} \quad (3.13)$$

$$\tau^{mean}_{WL \rightarrow ES} = \sum_j \frac{\tau_{WL \rightarrow ES}^0}{G^j (1 - P_{ES}^j)} \quad (3.14)$$

Όπου μέσω των όρων τ_x^0 , εκφράζονται οι αρχικοί χαρακτηριστικοί χρόνοι χωρίς την ύπαρξη ηλεκτρικής άντλησης της κάθε στάθμης x . Τέλος, η πιθανότητα κατάληψης των διαφορετικών σταθμών εξαρτάται άμεσα από τον αριθμό των ηλεκτρικών φορέων σε κάθε στάθμη και ως εκ τούτου και αυτή μεταβάλλεται δυναμικά κατά την έναρξη της εξαναγκασμένης εκπομπής. Οι αναλυτικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της πιθανότητας κατάληψης, τόσο στο WL, όσο και στις υπόλοιπες ζώνες, δίδεται από τις σχέσεις 3.15 και 3.16, όπου με το δείκτη n εννοείται είτε η φασματική περιοχή του GS, είτε του ES.

$$P_{WL} = \frac{N_{WL}}{2\rho_{WL}} \quad (3.15)$$

$$P_n^j = \frac{N_n^j}{2D_n N_D^{VOL} G^j (\omega_n^j)} \quad (3.16).$$

Για την μοντελοποίηση του ενεργού υλικού ως απλή διάταξη λείζερ σε συνεχή λειτουργία χωρίς τη χρήση κορεσμένου απορροφητή, όλο το ενεργό υλικό θεωρήθηκε ενιαίο και ομογενές. Στις εξισώσεις 3.6-3.8 χρησιμοποιήθηκε η πυκνότητα φωτονίων για κάθε συχνότητα (S_m), η οποία δίδεται από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης 3.17.

$$\frac{dS_m}{dt} = \frac{c}{n_{eff}} \cdot \Gamma \cdot g_n^j(t, \omega_m) S_m - \frac{S_m}{\tau_{photon}} + \beta_{sp} \cdot \sum_j L_n^j(\omega_m) \frac{N_n^j}{\tau_{spont,n}} \cdot \Delta\omega_m \quad (3.17)$$

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Όπου β_{sp} είναι ο συντελεστής αυθόρμητης εκπομπής, T_{photon} ο χαρακτηριστικός χρόνος ζωής φωτονίων, ο οποίος υπολογίζεται από την σχέση 3.18, όπου R_1 και R_2 είναι η ανακλαστικότητα των δύο κατόπτρων του λέιζερ και a είναι οι γραμμικές απώλειες διάδοσης.

$$\tau_{ph} = \frac{1}{\frac{c}{n} \left[a + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R_1 R_2}\right) \right]} \quad (3.18)$$

3.2.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Για τις συγκεκριμένες προσομοιώσεις χρησιμοποιήθηκαν 801 διαφορετικές ομάδες κβαντικών τελειών, ενώ σε κάθε ενεργειακή ζώνη θεωρήθηκαν 901 διαμήκεις τρόποι. Το συνολικό φασματικό εύρος που κάλυπταν οι διαμήκεις τρόποι υπερκάλυπτε το εύρος των ομάδων, έτσι ώστε τα αποτελέσματα να προσεγγίζουν όσο το δυνατό τη συμπεριφορά ενός πραγματικού συστήματος. Το φασματικό εύρος της ομογενούς απολαβής τέθηκε ίσο με 1nm, το εύρος της μη-ομογενούς απολαβής τέθηκε ίσο με 60nm, η απόσταση μεταξύ των κεντρικών συχνοτήτων των διαφορετικών ομάδων θεωρήθηκε ίσο με 0.5nm, ενώ το κεντρικό μήκος κύματος κάθε ενεργειακής περιοχής τέθηκε σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα και ήταν 1280nm για το GS και 1190nm για το ES. Η διάταξη η οποία προσομοιώθηκε είχε μήκος 700μm, πλάτος 6μm ενώ το ύψος της ήταν ίσο με το ύψος του WL (100nm). Στον πίνακα 3.1 παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι τιμές των μεταβλητών που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις.

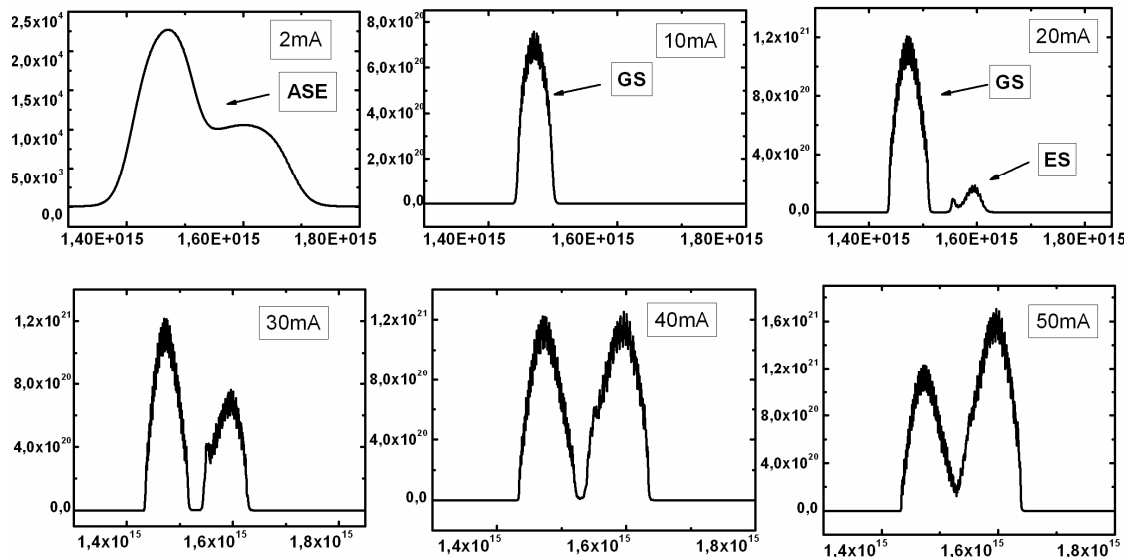
Η αύξηση του αριθμού των ομάδων καθώς και η μείωση της μεταξύ τους απόστασης αυξάνει την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, με ανεπιθύμητο αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση του υπολογιστικού φόρτου. Λόγω αυτού του γεγονότος, οι τιμές που ακολουθήθηκαν αποτελούν μια χρυσή τομή και των δύο απαιτήσεων. Επιπλέον, για τον περαιτέρω περιορισμό της υπολογιστικής πολυπλοκότητας του προβλήματος μπορεί να ακολουθηθεί μια εναλλακτική προσέγγιση, η οποία θεωρεί την ύπαρξη δύο διαφορετικών ομάδων διαμηκών τρόπων (μία για κάθε ενεργειακή περιοχή). Αποτέλεσμα αυτού είναι οι διαμήκεις τρόποι να μην καλύπτουν τη συνολική φασματική περιοχή της προσομοίωσης, αλλά να βρίσκονται τοποθετημένοι μόνο γύρω από τις φασματικές περιοχές που υπάρχει απολαβή. Αυτή η προσέγγιση μειώνει σημαντικά το πλήθος των απαιτούμενων τρόπων με αποτέλεσμα να μειώνει σημαντικά το χρόνο των προσομοιώσεων.

Αν και η απουσία τρόπων ανάμεσα στις δύο ζώνες (GS/ES) δεν επηρεάζει τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, δυστυχώς, όταν χρησιμοποιείται για την γραφική απεικόνιση του οπτικού φάσματος, τα αποτελέσματα που προσφέρει έχουν κακό οπτικό αποτέλεσμα. Αυτό οφείλεται στην έλλειψη ισχύος στις φασματικές περιοχές ανάμεσα στις δύο ζώνες εκπομπής. Λόγω αυτού, στις περιπτώσεις που απαιτήθηκε ο υπολογισμός του οπτικού φάσματος του λέιζερ, ακολουθήθηκε η αρχική προσέγγιση, ενώ στην περίπτωση που η μελέτη περιελάμβανε μόνο την μελέτη της χρονικής εξέλιξης των φορέων της κάθε στάθμης, ακολουθήθηκε η απλοποιημένη προσέγγιση.

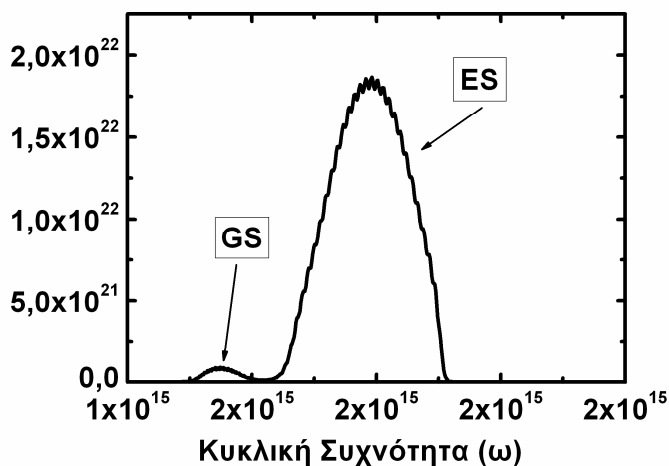
Στο σχήμα 3.3 παρουσιάζεται η υπολογιζόμενη πυκνότητα φωτονίων (S) προς την κυκλική συχνότητα (ω) για διαφορετικές τιμές ηλεκτρικής άντλησης, οι οποίες κυμαίνονται από 2mA μέχρι 50mA. Μπορεί να παρατηρηθεί ότι για 2mA, η διάταξη βρίσκεται κάτω από το κατώφλι εξαναγκασμένης εκπομπής και παρατηρείται εξαιρετικά μειωμένη πυκνότητα φωτονίων. Όταν το ρεύμα άντλησης ξεπεράσει τα 5mA, ξεκινά η εξαναγκασμένη εκπομπή και η πυκνότητα φωτονίων αυξάνεται ραγδαία (16 τάξεις μεγέθους 10^{20}). Όπως είναι εμφανές, για μικρές τιμές ηλεκτρικής άντλησης (<20mA),

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

εξανασμένη εκπομπή παρατηρείται μόνο από τη φασματική περιοχή του GS. Η περαιτέρω αύξηση του ρεύματος άντλησης οδηγεί το ES πάνω από το κατώφλι εξανασμένης εκπομπής (30mA) ενώ τέλος, για μεγάλες τιμές ρεύματος, οι δύο φασματικές περιοχές παρουσιάζουν αντίστοιχη πυκνότητα φωτονίων ή το ES ενισχύεται σημαντικά σε σχέση με το GS με αποτέλεσμα να επικρατεί η εξανασμένη εκπομπή μόνο από αυτή τη φασματική περιοχή (σχήμα 3.4).

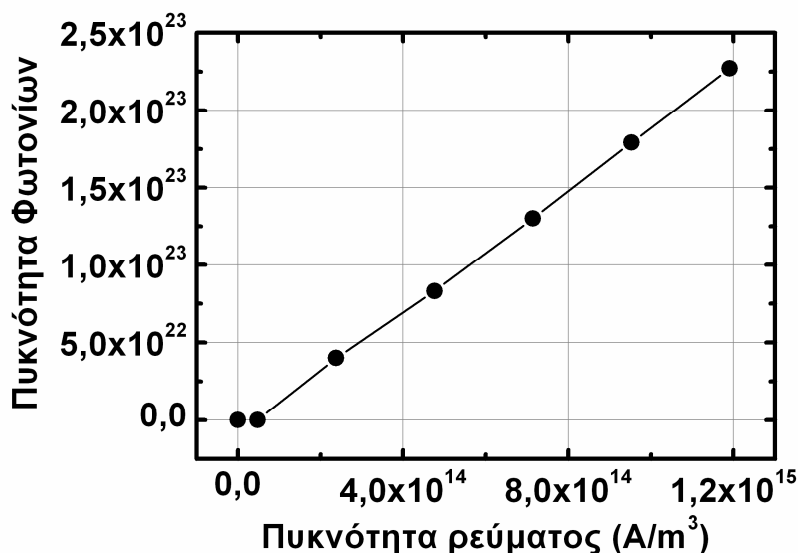


Σχήμα 3-3 Πυκνότητα φωτονίων προς την κυκλική συχνότητα για διαφορετικές τιμές ηλεκτρικής άντλησης.



Σχήμα 3-4 Οπτικό φάσμα (πυκνότητα φωτονίων) προς την κυκλική συχνότητα για ρεύμα άντλησης ίσο με 400mA.

Το σχήμα 3.5 παρουσιάζει την πυκνότητα φωτονίων προς την πυκνότητα ρεύματος της διάταξης, η οποία αποδεικνύει την λειτουργία εξανασμένης εκπομπής.



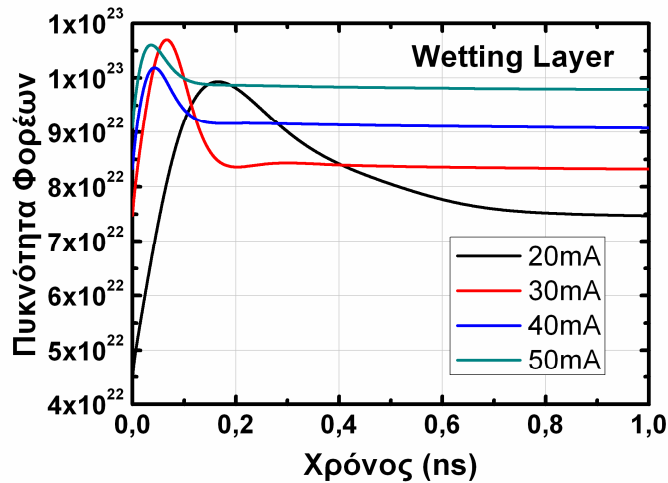
Σχήμα 3-5 Καμπύλη πυκνότητας φωτονίων προς την πυκνότητα ρεύματος

Η εξέλιξη του οπτικού φάσματος με την αύξηση του ρεύματος άντλησης καθορίζεται από το ρόλο που διαδραματίζει κάθε ενεργειακή στάθμη. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του ρεύματος άντλησης προκαλεί αύξηση των ηλεκτρικών φορέων που επάγονται στο WL. Στη συνέχεια, αυτοί οι φορείς μεταφέρονται στο ES, από όπου δεν αποδιεγείρονται ακτινοβολικά μια και ο χρόνος μεταφοράς των ηλεκτρικών φορέων από το ES στο GS είναι εξαιρετικά μικρός. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, να επιβάλλεται η ταχύτερη μεταφορά φορέων στο GS. Αυτή η μετακίνηση προκαλεί συσσώρευση μεγάλου αριθμού φορέων στο GS και η ενίσχυση ακτινοβολικών επανασυνδέσεων από αυτή την ενεργειακή ζώνη. Για να ενισχυθεί η εξαναγκασμένη εκπομπή από το ES θα πρέπει πρώτα η πιθανότητα κατάληψης του GS να φτάσει σε κορεσμό, με αποτέλεσμα οι συσσωρευμένοι φορείς στο ES να αρχίζουν να επανασυνδέονται ακτινοβολικά από αυτή την ενεργειακή περιοχή, αντί να εκπέσουν στην επόμενη στάθμη.

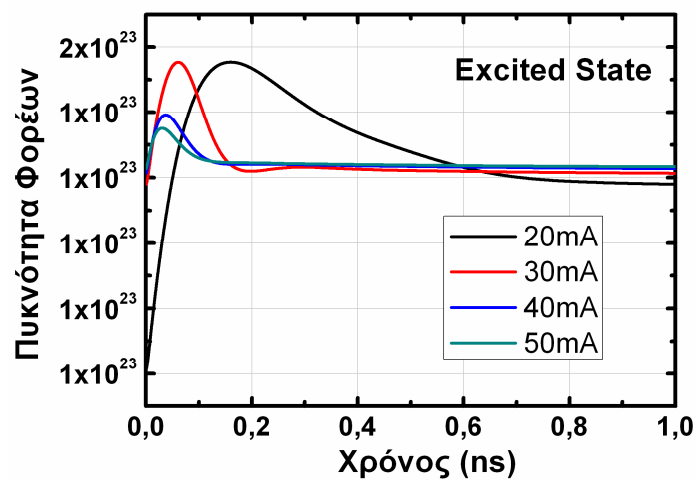
Στην περίπτωση που το ρεύμα άντλησης είναι εξαιρετικά υψηλό (σχήμα 3.4) παρατηρείται έντονη ενίσχυση της εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES και μείωση του ποσοστού εξαναγκασμένης εκπομπής από το GS. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω αυξημένης εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES ολοένα μικρότερος αριθμός φορέων έχει τη δυνατότητα να μεταπέσει στη ζώνη του GS.

Στα σχήματα 3.6-3.8 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες πυκνότητες ηλεκτρικών φορέων για την κάθε ενεργειακή στάθμη (WL/GS/ES), για το ίδιο εύρος τιμών άντλησης που χρησιμοποιήθηκαν και στο σχήμα 3.4. Στα τρία διαγράμματα μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι πρώτες χρονικές στιγμές δεν παρουσιάζουν σταθερή πυκνότητα φορέων αλλά, αντίθετα, παρουσιάζεται μια ισχυρή ταλάντωση της πυκνότητάς τους. Τέτοιες ταλαντώσεις είναι συνήθεις σε όλες τις διατάξεις λέιζερ και αποτελούν ταλαντώσεις αποκατάστασης (relaxation oscillation) [15]-[16].

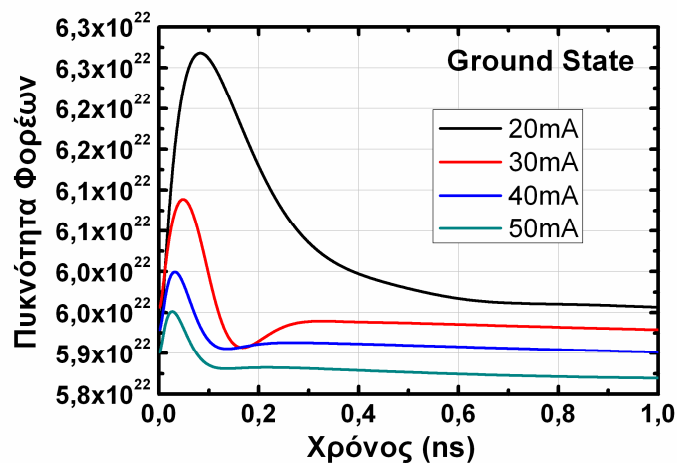
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 3-6 Πυκνότητα ηλεκτρικών φορέων προς το χρόνο προσομοίωσης για το WL



Σχήμα 3-7 Πυκνότητα ηλεκτρικών φορέων προς το χρόνο προσομοίωσης για το ES

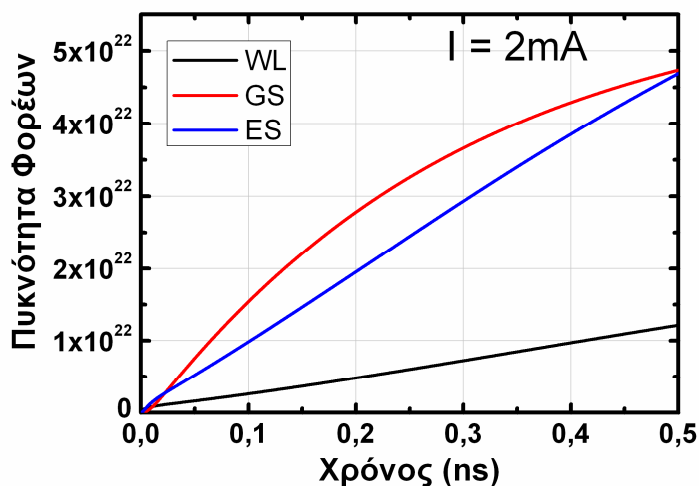


Σχήμα 3-8 Πυκνότητα ηλεκτρικών φορέων προς το χρόνο προσομοίωσης για το GS

Στα ημιαγωγικά λέιζερ οι ταλαντώσεις αποκατάστασης είναι πιο ισχυρές κοντά στο κατώφλι λειτουργίας (<20mA), ενώ η ισχύς τους περιορίζεται με την αύξηση του ρεύματος. Αυτό το γεγονός είναι ένας χαρακτηριστικός λόγος που οι επιδόσεις των ημιαγωγικών λέιζερ περιορίζονται όταν υπόκεινται σε άμεση διαμόρφωση [15]-[16].

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Επιπλέον, η αύξηση του ρεύματος, εκτός από μείωση του πλάτους ταλαντώσεων αποκατάστασης, επιφέρει και αύξηση της συχνότητάς τους [15]-[16]. Και οι δύο συμπεριφορές μπορούν να παρατηρηθούν στα διαγράμματα 3.6-3.8. Επιπρόσθετα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι, στην περίπτωση των φορέων του WL (σχήμα 3.6), η αύξηση του ρεύματος επιφέρει αύξηση των ηλεκτρικών φορέων ενώ, στην περίπτωση του GS (σχήμα 3.8), η αύξηση του ρεύματος προκαλεί μείωση των διαθέσιμων ηλεκτρικών φορέων. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να αιτιολογηθεί μέσω του μηχανισμού της εξαναγκασμένης εκπομπής. Πιο αναλυτικά, οι ηλεκτρικοί φορείς στο GS μειώνονται με την αύξηση του ρεύματος μια και όλο και μεγαλύτερος αριθμός φορέων αναλώνεται σε ακτινοβολικές αποδιεγέρσεις. Στην περίπτωση του ES (σχήμα 3.7), ο αριθμός φωτονίων για αυτό το εύρος τιμών παραμένει σχεδόν σταθερός παρουσιάζοντας μικρή πτώση με την έναυση εξαναγκασμένης εκπομπής. Αυτό το γεγονός μπορεί να αποδοθεί στο ότι η υποκείμενη ενεργειακά στάθμη (GS) βρίσκεται σε κορεσμό, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να δεχθεί πλεονάζοντα αριθμό φορέων. Απόρροια τούτου είναι οι φορείς που επάγονται από το WL λόγω αυξημένης έγχυσης να οδηγούνται σε ακτινοβολικές επανασυνδέσεις από το ES, χωρίς να διαταράσσεται σημαντικά ο πληθυσμός φορέων της συγκεκριμένης στάθμης.



Σχήμα 3-9 Πυκνότητα φορέων προς το χρόνο προσομοίωσης για ρεύμα άντλησης 2mA (κάτω από το κατώφλι)

Τέλος, στην περίπτωση που η ηλεκτρική άντληση είναι ασθενής, η εξέλιξη της πυκνότητας φορέων για κάθε στάθμη δεν παρουσιάζει ταλαντώσεις αποκατάστασης (σχήμα 3.9).

Πίνακας 3-1 Βασικές παράμετροι της προσομοίωσης μαζί με τις χαρακτηριστικές τιμές τους.

Όνομα	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδες
QD ομάδες	m	301	-
Ομάδες τρόπων	n	501	-
Ταχύτητα φωτός	c	299792458	<i>m/sec</i>
Μάζα ηλεκτρονίου	m0	$9.10938188 \cdot 10^{-31}$	<i>Kg</i>
Φορτίο	Q	$1.6021764 \cdot 10^{-19}$	<i>Cb</i>

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

ηλεκτρονίου			
Διηλεκτρική σταθερά του κενού	ϵ_0	$8.8541 \cdot 10^{-12}$	F/m
Σταθερά του Planck	h	$1.054571476 \cdot 10^{-34}$	$m^2 \cdot kg / s$
Αριθμός αρχικών φορέων σε κάθε στάθμη	$N_{GS,ES,WL}$	10^{10}	-
Σταθερά του Boltzmann	K	$1.3806 \cdot 10^{-23}$	$m^2 \cdot Kg \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$
Ενεργός δείκτης διάθλασης υλικού	n_{eff}	3.4	-
Συντελεστής περιορισμού οπτικού τρόπου	Γ	0.05	-
Ύψος λέιζερ	h	10^{-9}	m
Πλάτος λέιζερ	w	$6 \cdot 10^{-6}$	m
Μήκος λέιζερ	L	$700 \cdot 10^{-6}$	m
Θερμοκρασία διάταξης	T	295	K
Ύψος κβαντικών τελειών	H_{dot}	$8 \cdot 10^{-9}$	m
Πυκνότητα κβαντικών τελειών	N_{dot}	$3 \cdot 10^{12}$	m^{-2}
Συντελεστής εκφυλισμού GS	Dn_{GS}	1	-
Συντελεστής εκφυλισμού ES	Dn_{ES}	3	-
Ενεργό πάχος του WL	H_{wl}	10^{-9}	m
Χρονική διαμέριση	dt	10^{-15}	sec
Συνολικός χρόνος προσομοίωσης	t_{TOTAL}	$100 \cdot 10^{-9}$	sec
Χαρακτηριστικός χρόνος αυθόρμητης εκπομπής από το GS	$tspon_{GS}$	$1.2 \cdot 10^{-9}$	sec

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

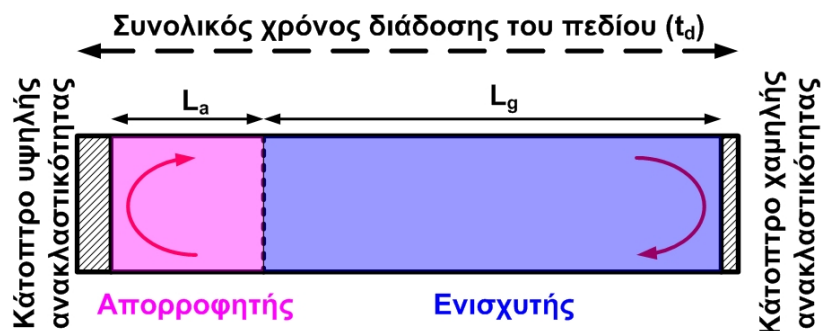
Χαρακτηριστικός χρόνος αυθόρμητης εκπομπής από το ES	tspon_{ES}	$500 \cdot 10^{-12}$	sec
Χαρακτηριστικός χρόνος αυθόρμητης εκπομπής από το WL	tspon_{WL}	$500 \cdot 10^{-12}$	sec
Χαρακτηριστικός χρόνος μετάβασης από το WL στο ES χωρίς την ύπαρξη οπτικού πεδίου	t_{0_{WL_ES}}	$2 \cdot 10^{-12}$	sec
Χαρακτηριστικός χρόνος μετάβασης από το ES στο WL χωρίς την ύπαρξη οπτικού πεδίου	t_{0_{ES_WL}}	$10 \cdot 10^{-12}$	sec
Χαρακτηριστικός χρόνος μετάβασης από το ES στο GS χωρίς την ύπαρξη οπτικού πεδίου	t_{0_{ES_GS}}	$8 \cdot 10^{-12}$	sec
Χαρακτηριστικός χρόνος μετάβασης από το GS στο ES χωρίς την ύπαρξη οπτικού πεδίου	t_{0_{GS_ES}}	$18 \cdot 10^{-12}$	sec
Κεντρικό μήκος κύματος για το GS	Lcn_{GS}	$1280 \cdot 10^{-9}$	m
Κεντρικό μήκος κύματος για το ES	Lcn_{ES}	$1180 \cdot 10^{-9}$	m
Εύρος ομογενούς απολαβής για το GS	L_{homoGS}	10^{-9}	m
Εύρος ομογενούς απολαβής για το ES	L_{homoES}	10^{-9}	m

Εύρος μη-ομογενούς απολαβής για το GS	$L_{inhomoGS}$	$70 \cdot 10^{-9}$	m
Εύρος μη-ομογενούς απολαβής για το ES	$L_{inhomoES}$	$70 \cdot 10^{-9}$	m
Φασματική απόσταση μεταξύ των ομάδων του GS	DL_{GS}	$0.5 \cdot 10^{-9}$	m
Φασματική απόσταση μεταξύ των ομάδων του ES	DL_{ES}	$0.5 \cdot 10^{-9}$	m
Μήτρα σκέδασης διαζωνικής μετάβασης	P_{cv2}	$2.7 \cdot 10^{-49}$	$e.V.Kg$

3.3 Μοντέλο για την επίτευξη παλμικής λειτουργίας μέσω παθητικής εγκλειδωσης των τρόπων

3.3.1 Περιγραφή μοντέλου παθητικής εγκλειδωσης των τρόπων μέσω διαφορικής εξίσωσης καθυστέρησης.

Για την επίτευξη παθητικής εγκλειδωσης τρόπων, η βασική αλλαγή που πραγματοποιήθηκε στο προαναφερθέν μοντέλο έγκειται στην χρήση του οπτικού πεδίου αντί της πυκνότητας φωτονίων, ενώ για την επίλυση του χρησιμοποιήθηκε μια διαφορική εξίσωση καθυστέρησης (time delay differential equation) [10]-[12]. Η διάταξη θεωρείται ότι έχει κυκλική γεωμετρία (ring resonator) η οποία αποτελείται από δύο διακριτά τμήματα που αν και θεωρούνται ότι είναι κατασκευασμένα από το ίδιο ενεργό υλικό, διαφέρουν ως προς τις συνθήκες πόλωσης. Αποτέλεσμα αυτού είναι το ένα τμήμα να θεωρείται ενισχυτικό μέσο (όπως στις προηγούμενες παραγράφους) ενώ το δεύτερο κορεσμένος απορροφητής. Στο σχήμα 3.10 παρουσιάζεται η διαγραμματική απεικόνιση της διάταξης που προσομοιώθηκε με τους όρους L_g και L_a αναπαριστάται το μήκος του ενισχυτή και απορροφητή αντίστοιχα, ενώ με τον όρο t_d ορίζεται ο χρόνος που χρειάζεται το οπτικό πεδίο να πραγματοποιήσει μια πλήρη ταλάντωση εντός της κοιλότητας.



Σχήμα 3-10 Διαγραμματική απεικόνιση της διάταξης που προσομοιώθηκε

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Ο υπολογισμός του πεδίου πραγματοποιείται μέσω της επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης 3.19, όπου με τον δείκτη n εννοείται η κάθε στάθμη (GS - ES), με τους όρους a_g και a_q εννοείται ο παράγοντας διεύρυνσης της οπτικής γραμμής για κάθε τμήμα (παράγοντας a), με τον όρο κ συμβολίζονται οι απώλειες διάδοσης εντός της κοιλότητας, με τον όρο τ_p το εύρος του φίλτρου περιορισμού του φάσματος, ενώ, τέλος, με τους όρους g και q συμβολίζεται η συνολική απολαβή και η συνολική απορρόφηση αντίστοιχα.

$$\frac{\partial A_n(t)}{\partial t} = \frac{\kappa}{\tau_p} \cdot e^{(1+ja_g)L_g g(1-t_d)/2 + (1+ja_q)L_a q(1-t_d)/2} A_n(t - t_d) - \frac{1}{\tau_p} A_n(t) \quad (3.19)$$

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης φορέων καθώς και της πιθανότητας κατάληψης χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες εξισώσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους. Η επίλυσή τους πραγματοποιήθηκε για κάθε ένα τμήμα (ενισχυτής – απορροφητής) ανεξάρτητα. Μια ακόμα βασική διαφορά έγκειται στην χρήση μηδενικής τιμής ηλεκτρικής άντλησης για τον απορροφητή, μια και δεν υπάρχει έγχυση ρεύματος, ενώ η ύπαρξη ανάστροφης τάσης επηρεάζει μόνο τους χαρακτηριστικούς χρόνους του συγκεκριμένου τμήματος, καθιστώντας τους πιο σύντομους από τους αντίστοιχους χρόνους του τμήματος ενίσχυσης, μέσω της σχέσης 3.20.

$$t_{ES \rightarrow WL}(V) = t_{ES \rightarrow WL}^0 \cdot e^{-V \cdot 0.2} \quad (3.20)$$

Η αποφυγή χρήσης πολλών συχνοτήτων για κάθε διαμήκη τρόπο είναι μία ακόμα διαφοροποίηση της συγκεκριμένης προσέγγισης σε σχέση με αυτή που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους. Στην παρούσα περίπτωση γίνεται χρήση ενός οπτικού πεδίου το οποίο έχει μία χαρακτηριστική συχνότητα (φέρουσα), ενώ οι επιπλέον συχνότητες (συντονισμοί στάσιμων κυμάτων) παράγονται μέσα από την επίλυση της διαφορικής εξίσωσης καθυστέρησης. Για αυτόν ακριβώς το λόγο γίνεται και χρήση του φίλτρου περιορισμού του φασματικού εύρους, ώστε να περιοριστεί το πλήθος των διαμηκών τρόπων που προκύπτουν από την εξίσωση, μόνο σε αυτούς που μπορεί να υποστηρίξει η απολαβή του υλικού. Το εύρος ζώνης του περιοριστικού φίλτρου τίθεται ίσο με τη μη ομογενή απολαβή της κάθε στάθμης. Στην περίπτωση απουσίας του φίλτρου θα προέκυπτε μεγάλο πλήθος διαμηκών τρόπων και αποτέλεσμα αυτού θα ήταν η εγκλειδωσή τους στην ίδια φάση και η παραγωγή παλμών με μη ρεαλιστικό χρονικό προφίλ.

3.3.2 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση μιας διάταξης, η οποία είχε παρόμοια χαρακτηριστικά με τις διαθέσιμες προς μέτρηση διατάξεις. Αναλυτικότερα, το συνολικό μήκος της διάταξης ήταν 2mm, ενώ το ποσοστό απορροφητή προς τον ενισχυτή ήταν ίσο με 15%. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται σε αυτό το τμήμα είναι ενδεικτικά και σκοπό έχουν να παρουσιάσουν ποιοτικά την επίδραση των συνθηκών πόλωσης στο χρονικό εύρος αλλά και στο σχήμα των οπτικών παλμών και όχι να χαρτογραφήσουν πλήρως τη λειτουργία εγκλειδωσης των τρόπων.

Στο σχήμα 3.11 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της οπτικής ισχύος στην έξοδο της διάταξης (αριστερά), ενώ στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται σε μεγέθυνση οι οπτικοί παλμοί (δεξιά). Το ρεύμα στον ενισχυτή είναι ίσο με 100mA και η ανάστροφη τάση μεταβάλλεται από -3V (πάνω) σε -10V (κάτω). Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι ότι, κατά την έναυση του λείζερ, οι παλμοί δεν έχουν σταθερό πλάτος, ενώ αντίθετα

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

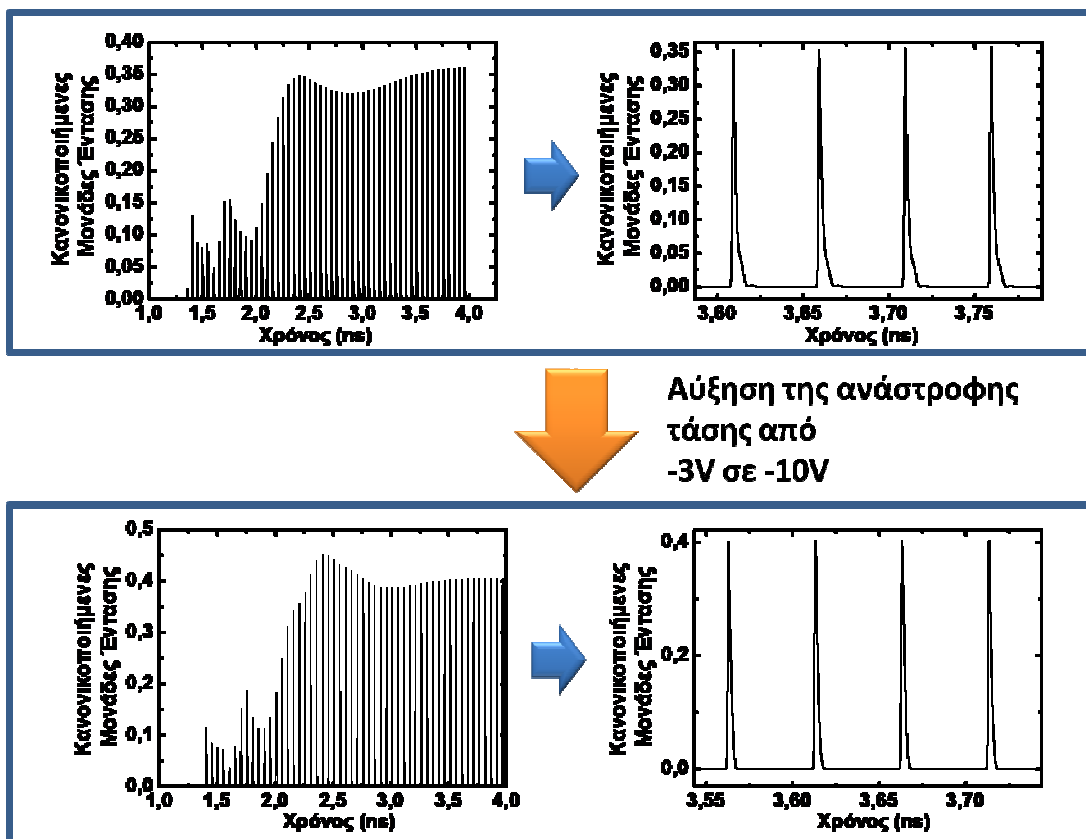
αυτό παρουσιάζει διακυμάνσεις οι οποίες σχετίζονται με τις ταλαντώσεις αποκατάστασης του λέιζερ [15]-[16]. Στην περίπτωση που ο χρόνος προσομοίωσης είναι μεγαλύτερος των 2ns αποκαθίσταται ισορροπία και οι παλμοί αποκτούν σταθερή ένταση.

Η αύξηση της ανάστροφης τάσης προκαλεί μείωση του χαρακτηριστικού χρόνου μετάβασης των φορέων από το ES στο WL, με αποτέλεσμα οι φωτο-παραγόμενοι φορείς να απομακρύνονται γρήγορα από την περιοχή του ES. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη πιο γρήγορη επαναφορά του απορροφητή σε κατάσταση υψηλών απωλειών και ως εκ τούτου την παραγωγή παλμών με σημαντικά μικρότερο χρονικό εύρος [17]-[18]. Στο σχήμα 3.12 παρουσιάζονται οι δύο παλμοί για τις προαναφερθείσες συνθήκες πόλωσης μαζί με την μαθηματική προσαρμογή τους (fitting), θεωρώντας ότι το σχήμα τους παρουσιάζει κατανομή gaussian. Το υπολογιζόμενο χρονικό εύρος μετά την προσαρμογή ήταν 8.6ps για τα -10V και 9.7ps για τα -3V. Όπως είναι εμφανές από το σχήμα 3.12, παρόλο που η προσαρμογή των παλμών δεν δίνει μεγάλη διαφοροποίηση στο εύρος του παλμού, η χαμηλή τάση στον απορροφητή και ως εκ τούτου η αργή επαναφορά του, επιφέρει αλλοίωση στο σχήμα του παλμού καθιστώντας τη μαθηματική προσαρμογή δυσεφάρμοστη.

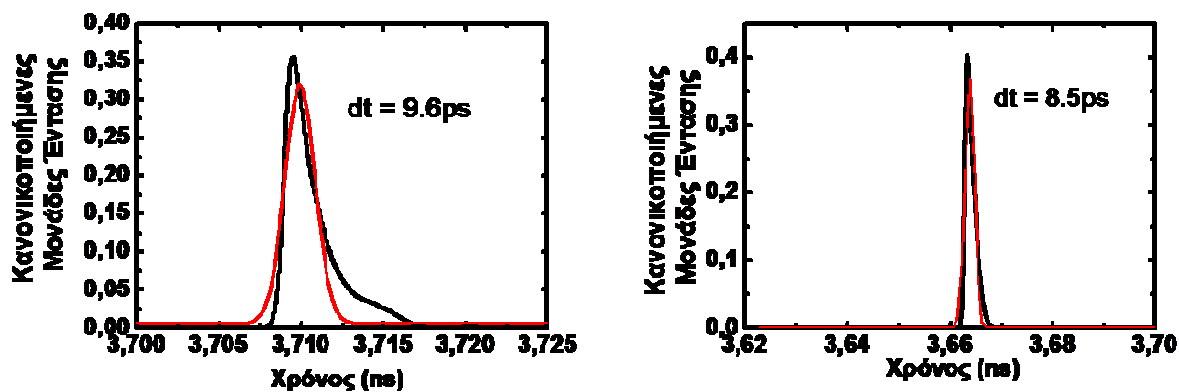
Στη δεύτερη περίπτωση η τάση παρέμεινε σταθερή στα -10V και μεταβλήθηκε το ρεύμα άντλησης έτσι ώστε να μελετηθεί η επίδραση του ρεύματος στο χρονικό εύρος των παλμών. Στο σχήμα 3.13 παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικές χρονοσειρές παλμών:

Αυτό που αξίζει να σημειωθεί είναι ότι η αύξηση του ρεύματος, σε πρώτη ανάγνωση, δεν επιδρά σημαντικά στο χρονικό εύρος των παλμών και η μόνη σημαντική επίπτωσή της είναι η δημιουργία ενός ακόμα υπολειμματικού παλμού. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση πειραματικής καταγραφής των παλμών με χρήση οπτικού αυτοσυσχετιστή, οι διπλοί παλμοί θα ενσωματώνονταν σε ένα κοινό παλμό παρουσιάζοντας αυξημένο εύρος [19]. Η αλλοίωση στο σχήμα του παλμού οφείλεται στην αργή επαναφορά (recovery time) της απολαβής λόγω της μεταβολής των χαρακτηριστικών χρόνων του ενισχυτή, όπως αυτός περιγράφηκε από το μοντέλο της προηγούμενης παραγράφου. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στο συγκεκριμένο μοντέλο δεν έχει περιληφθεί το φαινόμενο της χρωματικής διασποράς. Αποτέλεσμα αυτού είναι το εύρος των υπολογισμένων παλμών να υποεκτιμείται, μια και η μικρή αύξηση στο χρονικό εύρος να σχετίζεται μόνο με την αύξηση του χρόνου επαναφοράς της απολαβής.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

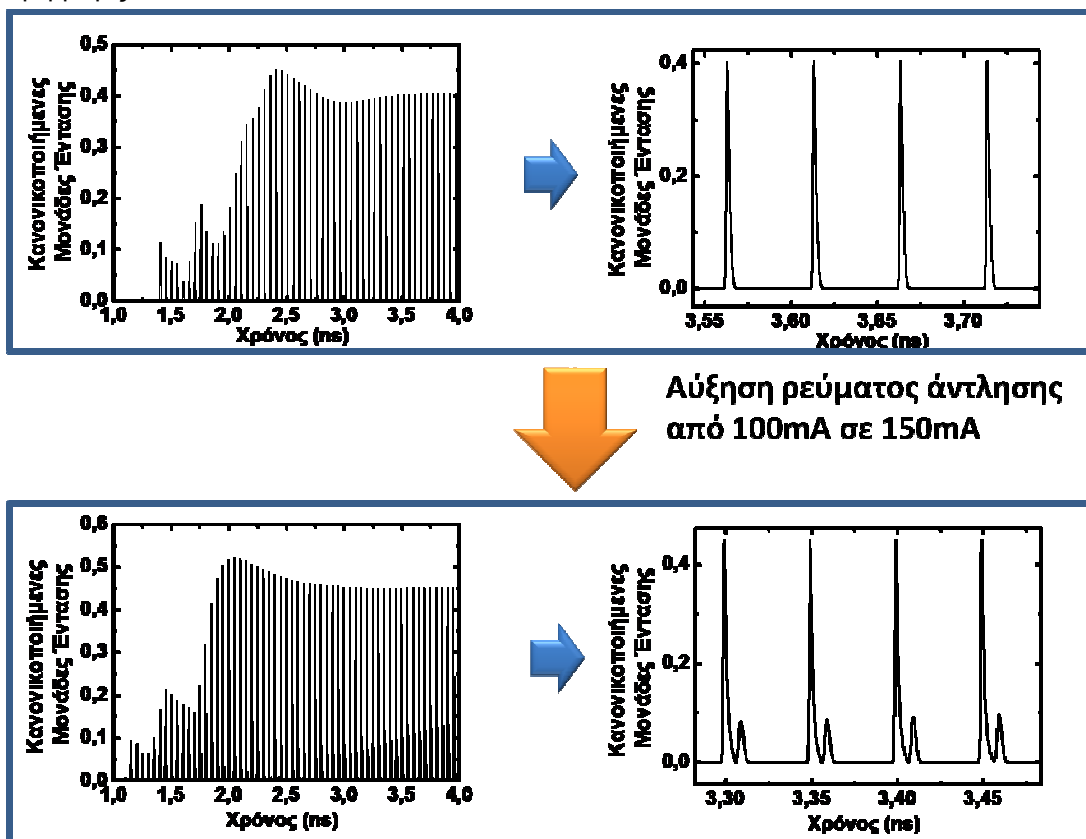


Σχήμα 3-11 Η οπτική έξοδος της διάταξης (αριστερά) και μεγέθυνση της χρονοσειράς (δεξιά) για δύο περιπτώσεις: στην πρώτη το ρεύμα άντλησης είναι 100mA ενώ η τάση μεταβάλλεται από -3V (πάνω) σε -10V (κάτω).



Σχήμα 3-12 Μαθηματική προσαρμογή των δύο παλμών θεωρώντας ότι το σχήμα των παλμών ακολουθεί gaussian κατανομή.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 3-13 Η οπτική έξοδος της διάταξης (αριστερά) και η μεγέθυνση της χρονοσειράς (δεξιά) για δύο περιπτώσεις: και στις δύο περιπτώσεις η τάση είναι $-10V$ ενώ το ρεύμα άντλησης κυμαίνεται από $100mA$ (πάνω) σε $150mA$ (κάτω).

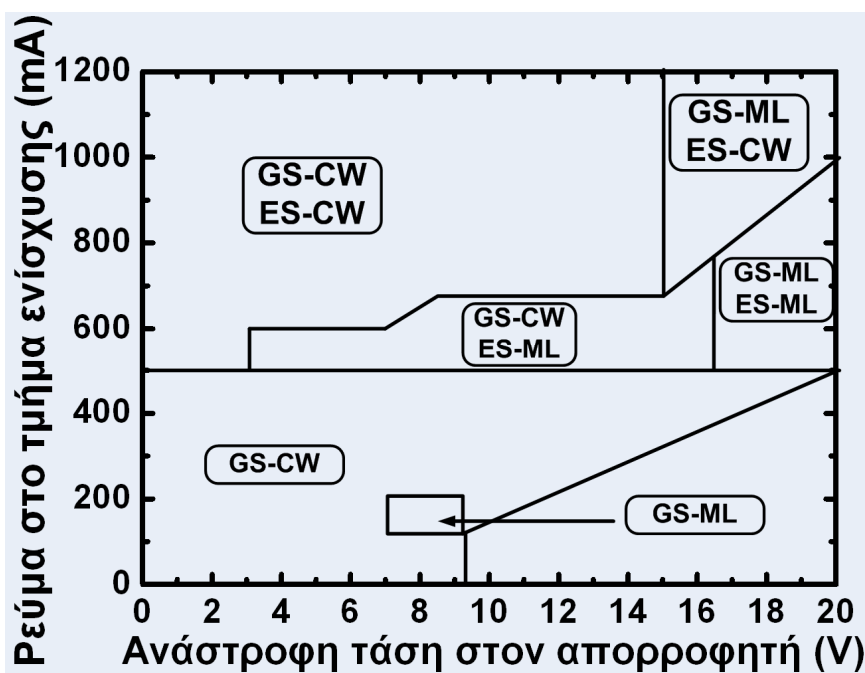
3.4 Ταυτόχρονη παθητική εγκλειδωση τρόπων από τις δύο διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες (GS/ES)

Για την μελέτη της δυνατότητας να παραχθεί εγκλειδωση τρόπων και από τις δύο στάθμες (GS/ES) χρησιμοποιήθηκε το ίδιο μοντέλο με πριν, ενώ οι τιμές πόλωσης μεταβλήθηκαν σε ένα μεγάλο εύρος τιμών ώστε να καταστεί δυνατή η καταγραφή όλων των διαφορετικών περιοχών λειτουργίας. Πιο λεπτομερώς, όπως φαίνεται και στο σχήμα 3.14, οι περιοχές λειτουργίας που καταγράφηκαν ήταν συνεχής εκπομπή από το GS (GS-CW), συνεχής λειτουργία και από τις δύο στάθμες (GS-CW, ES-CW), παλμική λειτουργία μόνο από το GS (GS-ML), παλμική λειτουργία και από τις δύο στάθμες (GS_ML, ES-ML) και, τέλος, παλμική λειτουργία μόνο από το ES (GS-CW, ES-ML). Οι τιμές πόλωσης δεν αντιστοιχούν σε πραγματικές τιμές πόλωσης αλλά παρέχουν μόνο ποιοτικά αποτελέσματα. Για αυτόν το λόγο και η σύγκρισή τους με τις πειραματικές μετρήσεις που ακολουθούν στα επόμενα κεφάλαια πρέπει να πραγματοποιηθεί μόνο σε ποιοτικό επίπεδο και όχι σε επίπεδο απόλυτων τιμών τάσης και ρεύματος. Αυτό το γεγονός οφείλεται στην ύπαρξη αρκετών μικροσκοπικών παραμέτρων στο μοντέλο, των οποίων οι τιμές είναι προσεγγιστικές και δεν είναι απόλυτα σύμφωνες με τις προς μελέτη διατάξεις.

Αυτό που μπορεί να εξαχθεί από το διάγραμμα 3.14 είναι ότι για μικρές τιμές ανάστροφης τάσης δεν παρατηρείται παλμική λειτουργία από το GS λόγω μεγάλου χρόνου επαναφοράς του απορροφητή, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται απουσία εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES λόγω του γεγονότος ότι η ενεργειακή στάθμη του

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

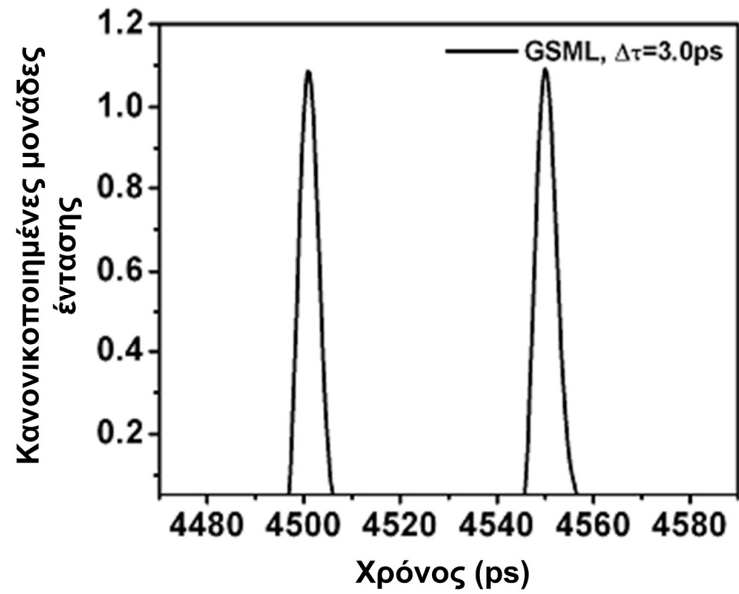
GS δεν έχει μπει σε κατάσταση κορεσμού ώστε να επιτρέψει την συσσώρευση φορέων στο ES (παράγραφος 3.2). Στην περίπτωση που η ανάστροφη τάση αυξηθεί, οι χαρακτηριστικοί χρόνοι του απορροφητή (χρόνοι αποκατάστασης των φορέων) μειώνονται σημαντικά με αποτέλεσμα, σύμφωνα με τη θεωρία που παρουσιάστηκε στο 2^ο κεφάλαιο, να επιτρέπεται η παραγωγή σταθερών παλμο-σειρών. Στο σχήμα 3.15 παρουσιάζονται τυπικοί παλμοί που καταγράφηκαν σε αυτή τη περιοχή λειτουργίας, οι οποίοι έχουν χρονικό εύρος ίσο με $3\tau_s$ και παρουσιάζουν μια ελαφριά ασυμμετρία στο χρονικό προφίλ τους, λόγω φαινομένων κορεσμού του απορροφητή, τα οποία επιφέρουν διατάραξη στο οπίσθιο τμήμα του παλμού. Στο σχήμα 3.16 παρουσιάζεται το οπτικό φάσμα της διάταξης, το οποίο προκύπτει αν εφαρμοστεί μετασχηματισμός Fourier στο οπτικό πεδίο που καταγράφεται κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης. Από το οπτικό φάσμα είναι εμφανές ότι οι διαμήκεις τρόποι έχουν 20GHz φασματική απόσταση, η οποία αντιστοιχεί σε ενεργή κοιλότητα με μήκος 2mm, ενώ η περιβάλλουσα προσφέρει μια απεικόνιση της μη ομογενούς απολαβής του υλικού.



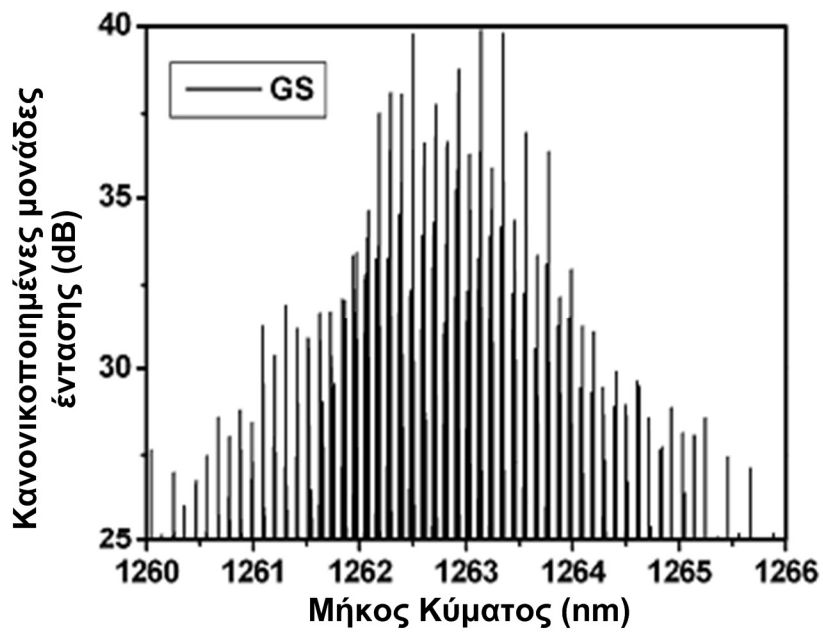
Σχήμα 3-14 Χαρτογράφηση των διαφορετικών περιοχών λειτουργίας της διάταξης προς τις συνθήκες πόλωσης (ρεύμα άντλησης και ανάστροφη τάση)

Αν η τιμή του ρεύματος άντλησης αυξηθεί ακόμα περισσότερο (>500mA), τότε ο κορεσμός των ηλεκτρικών φορέων του GS επιτρέπει την ύπαρξη εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES και την επίτευξη παλμικής λειτουργίας για ένα αρκετά μεγάλο εύρος τιμών πόλωσης. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί από το σχήμα 3.14 οι περιοχές στις οποίες παρατηρείται εγκλείδωση τρόπων από το GS εναλλάσσεται με περιοχές που παρουσιάζεται παλμική λειτουργία από το ES. Σε αυτές τις περιοχές, η άλλη στάθμη βρίσκεται σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας, στην οποία δεν παρατηρούνται ξεκάθαροι παλμοί. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει μια σχετικά μικρή περιοχή λειτουργίας, η οποία επιτυγχάνεται για ρεύμα άντλησης μεγαλύτερο των 500mA και ανάστροφη τάση που ξεπερνά τα 15V. Στη συγκεκριμένη περιοχή παρουσιάζεται εγκλείδωση και από τις δύο φασματικές περιοχές, με αποτέλεσμα την παραγωγή δύο ανεξάρτητων παλμο-σειρών.

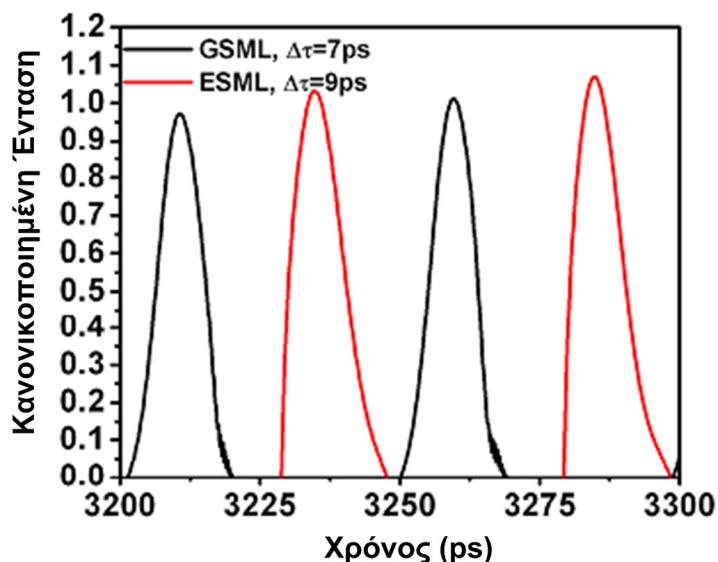
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



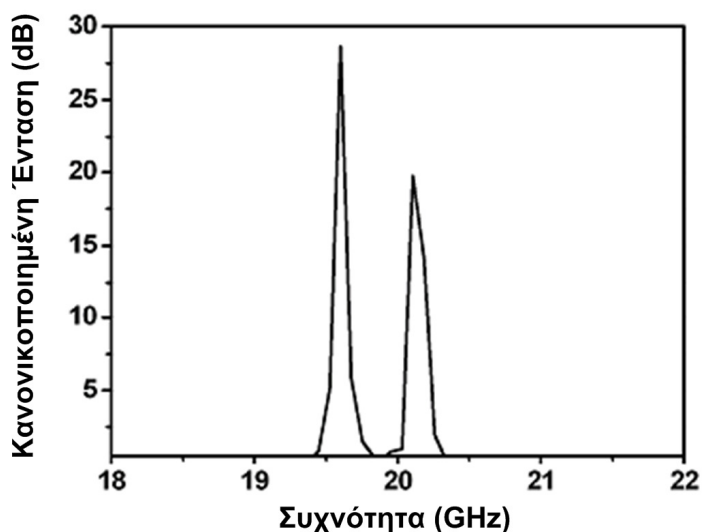
Σχήμα 3-15 Χαρακτηριστικό δείγμα παλμών από το GS με εύρος 3ps



Σχήμα 3-16 Οπτικό φάσμα για την περιοχή του GS



Σχήμα 3-17 Χαρακτηριστικοί παλμοί από το GS και το ES με χρονικό εύρος ίσο με 7ps και 9ps αντίστοιχα.



Σχήμα 3-18 Ηλεκτρικό φάσμα το οποίο παρουσιάζει δύο κορυφές που αντιστοιχούν στο GS και στο ES

Οι παραγόμενοι παλμοί καθώς και το χαρακτηριστικό ηλεκτρικό φάσμα της διάταξης παρουσιάζονται στα σχήματα 3.17 και 3.18, αντίστοιχα. Οι παλμοί που προέρχονται από το GS παρουσιάζονται με μαύρο χρώμα και έχουν χρονικό εύρος το οποίο φτάνει τα 7ps. Αντίθετα οι παλμοί από το ES διαθέτουν χρονικό εύρος ίσο με 9ps και αναπαριστώνται με κόκκινο. Το αυξημένο χρονικό εύρος των παλμών που καταγράφηκαν από τη φασματική περιοχή του ES μπορεί να αποδοθεί στις υψηλές τιμές ηλεκτρικής άντλησης που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη αυτής της περιοχής λειτουργίας. Οι υψηλές τιμές άντλησης στην πράξη μεταβάλουν τόσο τη χρωματική διασπορά του υλικού, τον παράγοντα α καθώς και μεταβάλουν τους χαρακτηριστικούς χρόνους ανάκαμψης του τμήματος ενίσχυσης. Παρόλα αυτά στο συγκεκριμένο μοντέλο ο παράγοντας α θεωρήθηκε σταθερός και δεν μεταβαλλόταν με τις συνθήκες πόλωσης, ενώ παράλληλα δεν είχε ενσωματωθεί η συνεισφορά της χρωματικής διασποράς λόγω διάδοσης εντός της κοιλότητας. Συνεπώς οι μεταβολές στη χρονική διάρκεια και στο σχήμα των παλμών μπορούν να αποδοθούν μόνο στη μεταβολή των χαρακτηριστικών

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

χρόνων του απορροφητή και ενισχυτή, αλλά και σε φαινόμενα αυτοδιαμόρφωσης της φάσης [20].

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η ύπαρξη εγκλείδωσης τρόπων γίνεται εμφανής στο ηλεκτρικό φάσμα με την ύπαρξη μιας ισχυρής κορυφής, η οποία συμπίπτει με το χαρακτηριστικό χρόνο της κοιλότητας. Στην παρούσα περίπτωση (σχήμα 3.15), το ηλεκτρικό φάσμα παρουσιάζει δύο τέτοιες κορυφές, οι οποίες αντιστοιχούν σε εγκλείδωση από δύο διαφορετικά μήκη κύματος. Η διαφορά στη συχνότητα μπορεί να αποδοθεί στο διαφορετικό ενεργό δείκτη διάθλασης κάθε περιοχής, ο οποίος συνεπάγεται διαφορετικό ενεργό μήκος για κάθε φασματική περιοχή και κατ' επέκταση διαφορετικό ρυθμό επανάληψης.

Τέλος, αξίζει να αναφερθεί ότι η ταυτόχρονη εγκλείδωση αποτελεί μια εξαιρετικά ειδική περιοχή λειτουργίας και όχι τον κανόνα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όλες οι παράμετροι του μοντέλου βελτιστοποιήθηκαν ώστε να αναπαραχθούν πειραματικά αποτελέσματα (κεφάλαιο 7). Το αίτιο για την δυσκολία επίτευξης πολυφασματικής εγκλείδωσης έγκειται στο γεγονός ότι οι φορείς της κάθε στάθμης δεν είναι ανεξάρτητοι, όπως δείχτηκε και παραπάνω, αλλά παραμένουν συζευγμένοι [10]. Αυτή η σύζευξη προκαλεί ισχυρά φαινόμενα ανταγωνισμού μεταξύ των δύο περιοχών, με αποτέλεσμα την ύπαρξη φαινομένων υπερ-διαμόρφωσης του πλάτους των παλμών (Q-switching), όπως θα δειχτεί και στα πειραματικά αποτελέσματα των επόμενων κεφαλαίων.

3.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε ένα μοντέλο πολύ-πληθυσμιακών εξισώσεων ρυθμών, το οποίο περιελάμβανε όλες τις διαθέσιμες ενεργειακές στάθμες που υπάρχουν στα υλικά κβαντικών τελειών. Αυτή η προσέγγιση επέτρεψε την μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των φορέων της κάθε στάθμης και την καταγραφή της διπλής εκπομπής από το GS και το ES σε συνεχή λειτουργία. Στη συνέχεια, στο μοντέλο ενσωματώθηκε μια διαφορική εξίσωση καθυστέρησης για την επίλυση του οπτικού πεδίου, ενώ η διάταξη θεωρήθηκε ότι αποτελείται από δύο τμήματα: έναν ενισχυτή και έναν κορεσμένο απορροφητή. Αποτέλεσμα της συγκεκριμένης προσέγγισης ήταν η επίτευξη παθητικής εγκλείδωσης των τρόπων και η μελέτη της επίδρασης των συνθηκών πόλωσης, τόσο στο χρονικό εύρος των παλμών, όσο και στην χαρτογράφηση μιας νέας περιοχής λειτουργίας, η οποία σχετίζεται με την επίτευξη ταυτόχρονης παλμικής συμπεριφοράς και από τα δύο διαθέσιμα μήκη κύματος. Αυτή η μελέτη αποτέλεσε αφορμή για την πειραματική διερεύνηση που παρουσιάζεται στα επόμενα κεφάλαια, ενώ αξίζει να σημειωθεί ότι οι θεωρητικές προβλέψεις του παρόντος κεφαλαίου βρίσκονται σε εξαιρετική συμφωνία με τα πειραματικά αποτελέσματα που ακολουθούν.

4. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΩΝ ΛΕΙΖΕΡ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΙΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΟΛΩΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα που επιβεβαιώνουν τον ρόλο της πόλωσης στην ποιότητα της παλμικής λειτουργίας. Στο πρώτο τμήμα του παρόντος κεφαλαίου παρουσιάζονται οι διαφορετικές πειραματικές μετρήσεις που απαιτούνται για τον πλήρη χαρακτηρισμό της παλμικής λειτουργίας, καθώς και η πειραματική διάταξη που σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε για την πραγματοποίηση αυτών των μετρήσεων. Στο δεύτερο τμήμα ακολουθεί η περιγραφή των δύο διαφορετικών ειδών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν στις μετρήσεις, τα οποία διέφεραν ως προς τη γεωμετρία του τμήματος ενίσχυσης. Τέλος παρουσιάζεται ο ηλεκτρικός και οπτικός χαρακτηρισμός των δύο διατάξεων ως προς τις συνθήκες πόλωσης ενώ χαρτογραφούνται πειραματικά οι διαφορετικές περιοχές λειτουργίας.

4.1 Τεχνικές χαρακτηρισμού της ποιότητας οπτικών παλμών λόγω εγκλείδωσης τρόπων

4.1.1 Μέτρηση χρονικής διάρκειας των παλμών

Ο πλέον απλός και άμεσος τρόπος για την καταγραφή του εύρους των οπτικών παλμών είναι η απευθείας ανίχνευση τους μέσω μιας φωτοδιόδου και η απεικόνιση τους σε ένα ηλεκτρικό παλμογράφο. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη τεχνική παρουσιάζει τεχνικές δυσκολίες που την καθιστούν ανεφάρμοστη. Πιο συγκεκριμένα, για την ορθή μέτρηση της διάρκειας των οπτικών παλμών και για την αποφυγή υπερεκτίμησης θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί φωτοδιόδος με εύρος ζώνης ανάλογο της χρονικής διάρκειας του παλμού. Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι παραγόμενοι παλμοί έχουν χρονική διάρκεια που μπορεί να φτάσει το 1ps ή και μικρότερη, η φωτοδιόδος που απαιτείται θα πρέπει να έχει εύρος ζώνης μεγαλύτερο των 100GHz. Δεδομένου ότι το εύρος ζώνης των εμπορικά διαθέσιμων φωτοδιοδών δεν ξεπερνά τα 70GHz, κάτι τέτοιο καθίσταται πρακτικά ανεφάρμοστο. Επιπλέον, τα υποστηρικτικά ηλεκτρονικά που απαιτούνται για την ανάκτηση του ηλεκτρικού σήματος (ηλεκτρικοί ενισχυτές κλπ) δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να υποστηρίξουν τέτοιες συχνότητες.

Ένα ακόμα πρόβλημα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη τεχνική είναι η ορθή απεικόνιση των παλμών από ένα παλμογράφο. Πιο συγκεκριμένα, ο σκανδαλιστής (trigger) που απαιτείται, θα έπρεπε να λειτουργεί σε συχνότητα παρόμοια με το ρυθμό επανάληψης εκπομπής των οπτικών παλμών (repetition rate). Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι ρυθμοί επανάληψης (repetition rate) από ολοκληρωμένα ημιαγωγικά λέιζερ μπορούν να φτάσουν τα εκατοντάδες GHz, ο συγκεκριμένος τρόπος απεικόνισης καθίσταται επίσης δυσεφάρμοστος.

Ένας εναλλακτικός τρόπος καταγραφής των παλμών είναι η χρήση κάμερας υψηλής ταχύτητας (streak camera). Η αρχή λειτουργίας της βασίζεται στη μετατροπή του χρονικού προφίλ ενός παλμού σε μια χωρική κατανομή. Αυτή η μετατροπή από το πεδίο του χρόνου στο χώρο επιτυγχάνεται μέσω της διέλευσης του παλμού από ένα λεπτό άνοιγμα προς μία κατεύθυνση. Ο παλμός στη συνέχεια ανακλάται προς τον άλλο άξονα, με αποτέλεσμα τα φωτόνια που εισέρχονται πρώτα στη σχισμή (εμπρόσθιο τμήμα του παλμού) να φτάνουν σε διαφορετικό τμήμα της φωτοδιόδου από ότι τα φωτόνια που βρίσκονται στο πίσω μέρος του παλμού. Αυτή η μέθοδος μέτρησης δεν απαιτεί οπτικό-ηλεκτρική μετατροπή και ως εκ τούτου αποφεύγει τα προβλήματα που αυτή περιλαμβάνει. Παρόλα αυτά η χρονική διακριτική ικανότητα που μπορεί να παρέχει

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

δεν ξεπερνά τα 200fs, κάνοντας την ακατάλληλη για τον χαρακτηρισμό στενών οπτικών παλμών.

Ο καλύτερος διαθέσιμος τρόπος και ταυτόχρονα ο πιο διαδεδομένος για την καταγραφή των χρονικών χαρακτηριστικών των παλμών, είναι η οπτική αυτοσυσχέτιση (optical autocorrelator). Η βασική αρχή λειτουργίας της αυτοσυσχέτισης βασίζεται στη συσχέτιση του προφίλ έντασης ενός παλμού $I(t)$ με μια καθυστερημένη έκδοση του εαυτού του $I(t+\tau)$. Η χρονική καθυστέρηση είναι μεταβλητή και επιτυγχάνεται με χρήση ιντερφερόμετρου, του οποίου το ένα σκέλος έχει μεταβλητή διαφορά απόστασης Δx σε σχέση με το άλλο. Οι δύο παλμοί προσπίπτουν πάνω σε ένα μη-γραμμικό μέσο και παράγουν ένα παράγωγο σήμα, του οποίου η ένταση εξαρτάται άμεσα από την χρονική αλληλοεπικάλυψη των δύο παλμών (correlation). Λόγω του μεταβλητού μήκους του ιντερφερομέτρου, η διαφορά δρόμου και ως εκ τούτου η διαφορά χρόνου μεταξύ των παλμών αλλάζει με συγκεκριμένο ρυθμό. Συνεπώς, καταγράφοντας την ένταση του παραγώγου συναρτήσει του χρόνου μπορεί να ανακτηθεί η καμπύλη της αυτοσυσχέτισης και κατ' επέκταση να υπολογιστεί το εύρος του παλμού. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία προσφέρει ικανοποιητική διακριτική ικανότητα που φτάνει το 1fs. Αυτό το συγκριτικό πλεονέκτημα έναντι των άλλων μεθόδων βασίζεται στο γεγονός ότι η διακριτική ικανότητα δεν σχετίζεται με την απόκριση του συστήματος (μεθοδολογίες υψηλού εύρους ζώνης) αλλά είναι ευθέως συνυφασμένη με την ελάχιστη διαφορά δρόμου που μπορεί να εισάγει και να διατηρήσει το ιντερφερόμετρο. Μια χρονική καθυστέρηση της τάξης του 1ps απαιτεί μεταβολή της απόστασης κατά 300μm. Συνεπώς για την επίτευξη ακρίβειας της τάξης των fs απαιτείται μια μικρομετρική απόσταση της τάξης λίγων μm που μπορεί εύκολα να ελεγχτεί με χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής το μη γραμμικό το οποίο επιλέχθηκε για την παραγωγή του σήματος αυτοσυσχέτισης ήταν ένας μη γραμμικός κρύσταλλος βασισμένος στο φαινόμενο της παραγωγής δεύτερης αρμονικής (second harmonic generation). Για την ενίσχυση του εξαιρετικά ασθενούς σήματος τοποθετήθηκε ένας φωτοπολλαπλασιαστής πριν τη φωτοδίοδο. Στη φωτοδίοδο η ανάκτηση του παραγώγου μπορεί να γίνει με δύο διαφορετικές μεθοδολογίες. Στην πρώτη οι παλμοί ($I(t)$ και $I(t+\tau)$) είναι ευθυγραμμισμένοι και συμπίπτουν χωρικά με αποτέλεσμα η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης να δίδεται από την εξίσωση 4.1.

$$f_{zb}(\tau) = 1 + 2 \cdot \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} I(t) \cdot I(t-\tau) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} I^2(t) dt} \quad (4.1)$$

Ακολουθώντας αυτή τη μεθοδολογία, στη φωτοδίοδο φτάνουν και τα 3 σήματα (παλμοί και παράγωγο) οπότε η αναλογία κορυφής σήματος προς ελάχιστο σήμα είναι 3 προς 1. Στην περίπτωση που οι δύο παλμοί δεν συμπίπτουν χωρικά, στη φωτοδίοδο φτάνει μόνο το παράγωγο και η διαδικασία αναφέρεται ως αυτοσυσχέτιση δίχως σήμα υποβάθρου (background free). Η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης αυτής της τεχνικής δίδεται από την σχέση 4.2:

$$f_{zb}(\tau) = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} I(t) \cdot I(t - \tau) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} I^2(t) dt} \quad (4.2)$$

Τα βασικά πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης μεθοδολογίας συνοψίζονται α) στην καλή διακριτική ικανότητα και β) στο γεγονός ότι δεν υπάρχει απαίτηση για χρήση φωτοδιόδων με υψηλό εύρος ζώνης. Αυτό το οφείλεται στο ότι το εύρος ζώνης της φωτοδιόδου πρέπει να είναι μόνο μεγαλύτερο του ρυθμού ολοκλήρωσης της αυτοσυσχέτισης (χρόνος που χρειάζεται το ιντερφερόμετρο να κάνει μια πλήρη σάρωση της μέγιστης διαφοράς απόστασης), ο οποίος είναι της τάξης των μερικών ms [1]-[4].

Παρόλα τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μέθοδος, ένα από τα βασικά μειονεκτήματα της είναι ότι δεν μπορεί να ανακτηθεί η πραγματική μορφή του εκπεμπόμενου παλμού και συνεπώς δεν μπορεί να εξαχθεί καμία πληροφορία για τις στιγμιαίες μεταβολές φάσης (chirp). Λόγω αυτού, ο ακριβής υπολογισμός της διάρκειας του παλμού γίνεται μόνο προσεγγιστικά. Στις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν έχει θεωρηθεί ότι το προφίλ των παλμών μπορεί να προσαρμοστεί καλύτερα θεωρώντας Gaussian κατανομές. Επομένως για τον υπολογισμό του σωστού εύρους ημίσειας ισχύος η προσαρμοσμένη τιμή που δίνει η αυτοσυσχέτιση πολλαπλασιάζεται με την τιμή 0.707.

4.1.2 Μέτρηση ηλεκτρικού φάσματος (RF spectrum)

Στην ιδανική περίπτωση εγκλειδωσης τρόπων, όλοι οι διαθέσιμοι διαμήκεις τρόποι αποκτούν ενιαία φάση. Συνεπώς η εικόνα που παρουσιάζει το ηλεκτρικό φάσμα ενός τέτοιου παλμικού λέιζερ περιλαμβάνει μια ισχυρή κορυφή με μηδενικό εύρος (dirac) που αντιστοιχεί στην απόσταση μεταξύ των τρόπων ή εναλλακτικά στον χαρακτηριστικό χρόνο της κοιλότητας και μια αρκετά πιο ασθενή κορυφή που παρουσιάζεται σε χαμηλές συχνότητες και αντιστοιχεί στις ταλαντώσεις αποκατάστασης (relaxation oscillations) της διάταξης [5]-[6].

Στην μη ιδανική περίπτωση το σύνολο των τρόπων δεν κλειδώνει στην ίδια φάση και οι ανεξάρτητοι διαμήκεις τρόποι συνεισφέρουν στην αύξηση του θορύβου φάσης της διάταξης. Αυτό το φαινόμενο απεικονίζεται στο ηλεκτρικό φάσμα ως μια διαπλάτυνση της κεντρικής κορυφής. Συνεπώς μέσω της μέτρησης του φασματικού εύρους της κορυφής μπορεί να τεκμηριωθεί η ποιότητα της εγκλειδωσης των τρόπων [7]-[9]. Παράλληλα μέσω της καταγραφής της συχνότητας αποκατάστασης μπορεί σε πλήρη συμφωνία με τα λέιζερ κβαντικού φρέατος να υπολογιστεί το θεωρητικό όριο για τη μέγιστη συχνότητα άμεσης διαμόρφωσης που μπορεί να εφαρμοστεί στο λέιζερ χωρίς να παρατηρηθούν φαινόμενα αύξησης του σχετικού θορύβου έντασης (relative intensity noise – RIN) [10]-[12].

Επιπροσθέτως η κεντρική συχνότητα του ηλεκτρικού φάσματος καθορίζεται από το ενεργό μήκος της κοιλότητας το οποίο με τη σειρά του εξαρτάται από τον ενεργό δείκτη διάθλασης του υλικού. Συνεπώς μέσω της καταγραφής της εξέλιξης της κεντρικής συχνότητας ως προς τις συνθήκες πόλωσης μπορεί να εξαχθεί η ακριβής συχνότητα επανάληψης των παλμών καθώς και να υπολογιστεί η μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη την εξάρτηση του δείκτη διάθλασης από το μήκος κύματος [13], μπορεί να εξαχθεί χρήσιμη πληροφορία όσο αναφορά τη φασματική περιοχή που συμμετέχει στην εγκλειδωση των τρόπων (GS/ES).

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Τέλος, το ηλεκτρικό φάσμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν διαγνωστικό εργαλείο για τον εντοπισμό ασταθειών στη παλμική λειτουργία όπως είναι η υπέρ-διαμόρφωση του πλάτους των παραγόμενων παλμών, λόγω ταλάντωσης των ηλεκτρικών φορέων της διάταξης (Q-switching) [14]-[17]. Αυτό το φαινόμενο παρουσιάζεται στο ηλεκτρικό φάσμα μέσω της ύπαρξης συμπληρωματικών κορυφών γύρω από τη θεμελιώδη συχνότητα, ενώ η απόσταση τους ακολουθεί τη συχνότητα αποκατάστασης των ταλαντώσεων.

4.1.3 Μέτρηση οπτικού φάσματος (optical spectrum)

Η μέτρηση του εύρους του οπτικού φάσματος μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την ύπαρξη ή μη εγκλείδωσης τρόπων καθώς, και για την ποιότητα της παλμικής λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση που ο παραγόμενος παλμός έχει μικρή χρονική διάρκεια και κατά συνέπεια μεγάλο φασματικό περιεχόμενο, προκαλείται αύξηση του εύρους κάθε διαμήκη τρόπου που μετέχει στη δημιουργία του παλμού. Συνεπαινωγικά μέσω της καταγραφής του οπτικού φάσματος μπορούν να αναζητηθούν περιοχές που παρατηρείται αύξηση του οπτικού εύρους και να συσχετιστούν με την έναυση παλμικής λειτουργίας.

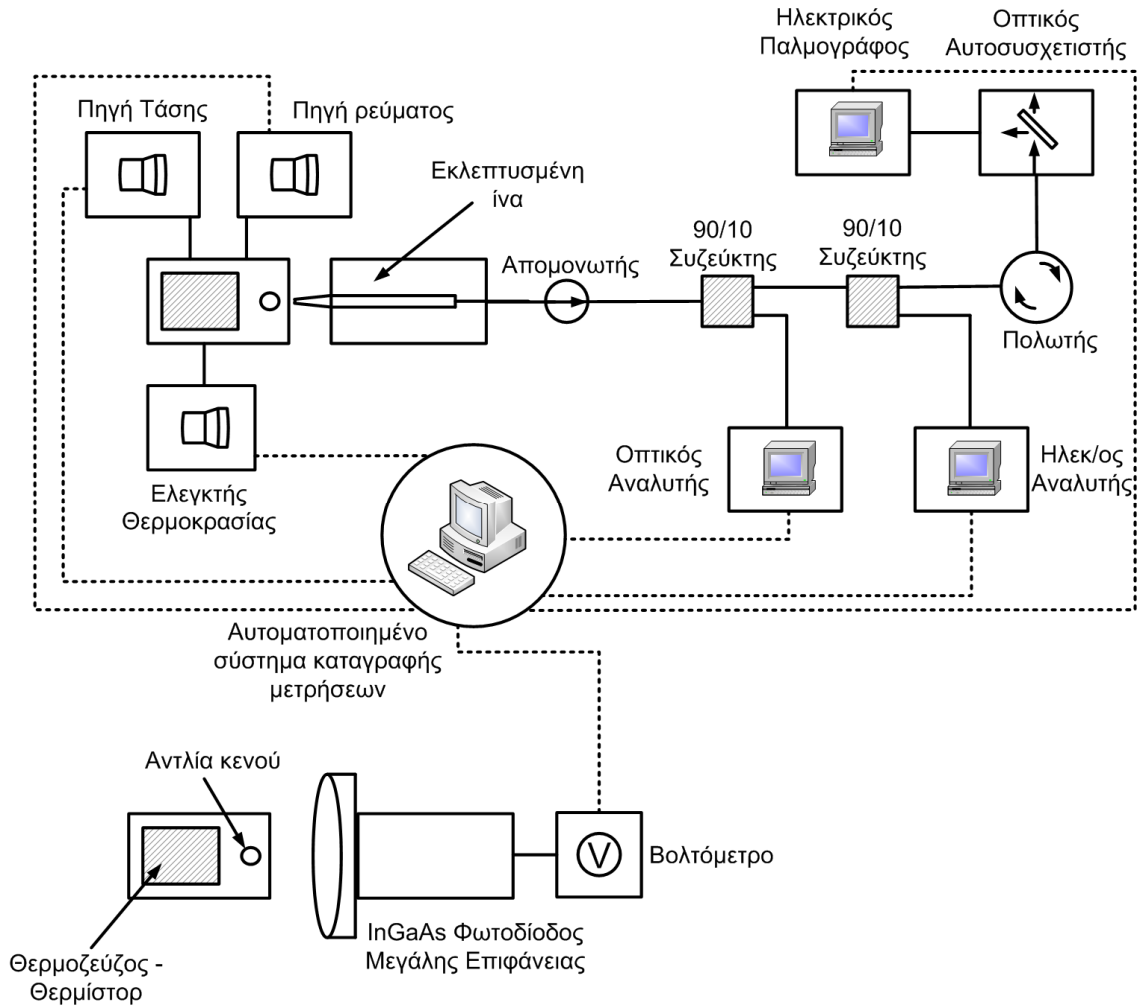
Εντούτοις, η αύξηση του ρεύματος επάγει διεύρυνση του οπτικού φάσματος λόγω της αύξησης της μη-ομογενούς απολαβής (inhomogeneous gain) [18]-[19]. Λαμβάνοντας υπόψη μας ότι η διεύρυνση της απολαβής είναι ισχυρό φαινόμενο, οι μεταβολές στο εύρος από την επίτευξη καλύτερης παλμικής λειτουργίας μπορούν να επισκιαστούν, καθιστώντας έτσι αυτό το κριτήριο επισφαλές για την εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στην παρούσα μελέτη το οπτικό φάσμα καταγράφηκε για δύο βασικούς λόγους α) την μελέτη του παραγόμενου οπτικού εύρους για πιθανή χρήση τέτοιων πηγών σε εφαρμογές όπως φασματοσκοπία χαμηλής συμφωνίας [20]-[23] β) για τον χαρακτηρισμό της αποδοτικότητας των πηγών, μέσω του γινομένου χρόνου-εύρους ζώνης (TPBW). Όπως αναδείχτηκε στο κεφάλαιο 2, μετρώντας το εύρος του οπτικού φάσματος μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια ο αριθμός των τρόπων που βρίσκονται πάνω από το κατώφλι εξαναγκασμένης εκπομπής, ενώ η χρονική διάρκεια του παλμού παρέχει πληροφορίες για τον αριθμό των τρόπων που συνέβαλαν στη δημιουργία του. Χρησιμοποιώντας και τις δύο αυτές πληροφορίες μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό των τρόπων που μετέχουν στη γένεση του παλμού και του ποσοστού των τρόπων που συνεισφέρουν μόνο στην αύξηση του θορύβου φάσης.

4.2 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

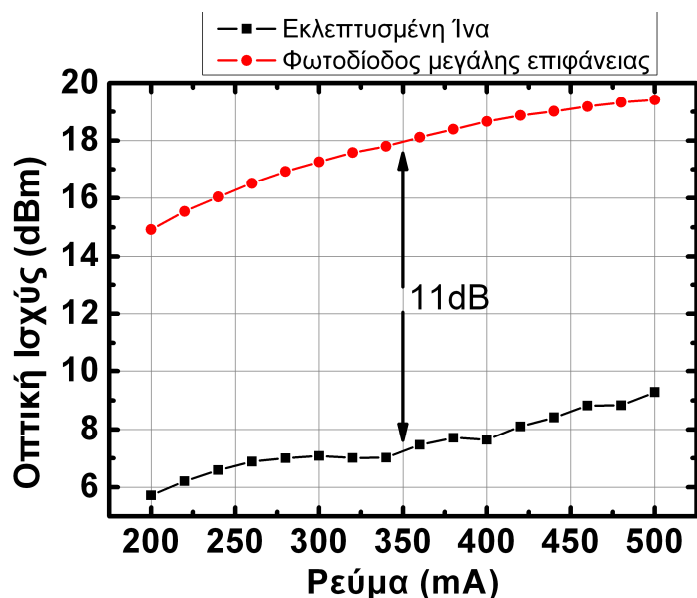
Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των μετρήσεων παρουσιάζεται στο σχήμα 4.1. Αποτελείται από τη διάταξη λείζερ, η οποία ήταν τοποθετημένη πάνω σε μεταλλική πλάκα κατάλληλα διαμορφωμένη ώστε να κρατά τη συσκευή σταθερή και συγχρόνως να υποβοηθά στην αποτελεσματική απαγωγή της θερμότητας (εικόνα 4.1). Ένα θερμοζεύγος μαζί με ένα θερμίστορ σε συνδεσμολογία κλειστού βρόγχου παρακολουθούσαν τη θερμοκρασία του λείζερ και την διατηρούσαν σταθερή στους 20° C σε όλη τη διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 4-1 Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης

Η υπόλοιπη πειραματική διάταξη αποτελούνταν από μία ίνα αδιαβατικά εκλεπτυσμένης άκρης (fiber taper) μεγάλου αριθμητικού ανοίγματος, τοποθετημένη πάνω σε ειδικά διαμορφωμένο χειριστήριο μικρο-μετρικής ακρίβειας (Meles-Grilot). Η συγκεκριμένη διάταξη σαν σκοπό είχε την σταθερή και αποτελεσματική σύζευξη της εκπεμπόμενης οπτικής ισχύος στην ίνα. Για τον ακριβή υπολογισμό του ποσοστού σύζευξης (coupling efficiency) ελήφθησαν τιμές οπτικής έντασης συναρτήσει του εγχεόμενου ρεύματος με δύο διαφορετικούς τρόπους. Ο πρώτος ήταν μέσω της ίνας εκλεπτυσμένης άκρης, ενώ ο δεύτερος περιλάμβανε τη χρήση μιας φωτοδιόδου Ίνδιου-Γάλλιου-Αρσενικού (InGaAs) μεγάλης επιφάνειας (large area photodiode). Στη δεύτερη προσέγγιση, λόγω της μεγάλης επιφάνειας της φωτοδιόδου (1cm^2) καθώς και της μικρής απόστασης που είχε τοποθετηθεί αυτή από τη συσκευή, ο συντελεστής σύζευξης που επιτεύχθηκε ήταν ίσος με τη μονάδα. Συνεπώς η σύγκριση των δύο καμπυλών (σχήμα 4.2) επέτρεψε τον υπολογισμό του συντελεστή σύζευξης, ο οποίος ήταν -11dB με περιθώριο σφάλματός $\pm 0.5\text{dB}$ λόγω τυχαίων μηχανικών ταλαντώσεων της ίνας.



Σχήμα 4-2 Οπτική ισχύς προς το ρεύμα του ενισχυτή για δύο περιπτώσεις μαύρο-τετράγωνο: εκλεπτυσμένη ίνα, κόκκινος κύκλος φωτοδίοδος μεγάλης επιφάνειας.

Ο τερματισμός της εκλεπτυσμένης ίνας, καθώς και όλων των οπτικών ινών που χρησιμοποιήθηκαν στη διάταξη, είχε υποστεί ειδική επεξεργασία (στρέψη 7°) ώστε να ελαχιστοποιηθεί το ποσοστό ανεπιθύμητων ανακλάσεων από τον συνδετήρα (angle polished connector) πίσω στο λέιζερ. Ο οπτικός απομονωτής (optical isolator), που τοποθετήθηκε ακριβώς μετά, συνέβαλε στην ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων ανακλάσεων από τους τερματισμούς των μετρητικών οργάνων. Το ποσοστό της ανακλώμενης ισχύος που επέστρεφε τελικά από την πειραματική διάταξη πίσω στο λέιζερ μετρήθηκε και ήταν μικρότερο από -58dB .

Στη συνέχεια, με χρήση οπτικών συζευκτών ίνας (optical fiber coupler) η οπτική ισχύς οδηγήθηκε στα μετρητικά όργανα τα οποία περιλάμβαναν ένα οπτικό αναλυτή με ελάχιστη διακριτική ικανότητα 0.05nm (Anritsu MS9001B), σκοπός του οποίου ήταν η καταγραφή του οπτικού φάσματος του λέιζερ, ενός αναλυτή ηλεκτρικού φάσματος (RF spectrum analyzer) με οπτικό εύρος ζώνης 26.5GHz (HP 70206A) και έναν αναλυτή δικτύου (network communication analyzer) με εύρος ζώνης της οπτικής εισόδου 30GHz , ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή του ρυθμού επανάληψης των παλμών (repetition rate) καθώς και για τον εντοπισμό αργών διαμορφώσεων πλάτους λόγω Q-switching. Η πραγματική χρονική διάρκεια των παλμών μετρήθηκε με χρήση ενός οπτικού αυτοσυσχετιστή (Femtochrome FR103-MN).

Η τροφοδοσία των συσκευών πραγματοποιήθηκε μέσω μιας πηγής σταθερού ρεύματος (ILX-LIGHTWAVE LDC3724) και μιας πηγής σταθερής τάσης (ELC-ALR3003). Τέλος, για να διατηρηθεί η ακεραιότητα των μετρήσεων αναπτύχθηκε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα καταγραφής των μετρήσεων με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή βασισμένο πάνω στην πλατφόρμα LABVIEW, μέσω του οποίου ελέγχονταν οι δύο πηγές και ταυτόχρονα δινόταν η δυνατότητα αποθήκευσης όλων των μετρήσεων ταυτόχρονα.

4.3 Περιγραφή συσκευών

Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη λέιζερ που παρήχθησαν από την Inpolume και την Alcatel-thales, αντίστοιχα. Τα δύο είδη συσκευών είχαν υποστεί παρόμοια επεξεργασία για την ανάπτυξη των κβαντικών τελειών, αλλά είχαν δομικές διαφορές που εστιάζονταν στο σχήμα του τμήματος ενίσχυσης και στον τρόπο που

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

επιτυγχανόταν η κυματοδηγηση (gain – index guided). Για αυτό το λόγο η παρουσίαση του κάθε είδους διατάξεων και των πειραματικών τους μετρήσεων πραγματοποιείται σε ξεχωριστές παραγράφους. Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου δεν παρουσιάζεται το σύνολο των μετρήσεων, αλλά χαρακτηριστικές μετρήσεις από κάθε είδος διάταξης με σκοπό την πειραματική επιβεβαίωση των θεωρητικών συμπερασμάτων που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

4.3.1 Διατάξεις ευθύγραμμων κυματοδηγών (Innolume)

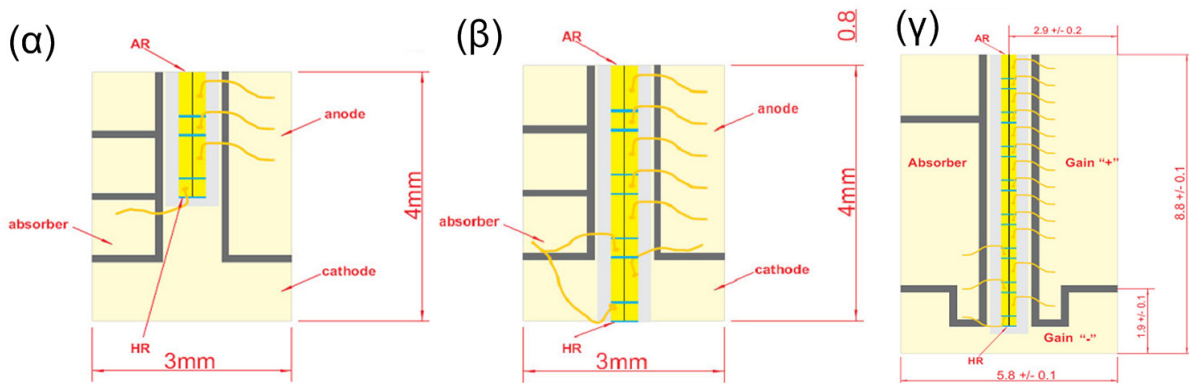
Οι συγκεκριμένες συσκευές κατασκευάστηκαν χρησιμοποιώντας επιταξία μοριακής δέσμης πάνω σε ένα υπόστρωμα GaAs με κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό 100. Η ενεργός κοιλότητα περιείχε 5,10 και 15 στρώματα κβαντικών τελειών με ύψος κυματοδηγού 440nm, πλάτος που κυμαινόταν από 4μm έως 6μm και τρία διαφορετικά μήκη 2mm, 4mm και 8mm. Επιπλέον η επίστρωση αλουμινίου (cladding) που χρησιμοποιήθηκε ανάμεσα στα διαφορετικά στρώματα στην πλειοψηφία των συσκευών ήταν της τάξης του 35%, ενώ μια μόνο μια σειρά συσκευών είχε ποσοστό 15%, ώστε να μελετηθεί και η επίδραση αυτού του δομικού παράγοντα στην ποιότητα της εγκλειδωσης των τρόπων.

Σε όλα τα λέιζερ ο κυματοδηγός ήταν ενιαίος (single section) ενώ η ηλεκτρική τροφοδοσία πραγματοποιήθηκε από διαφορετικά ηλεκτρόδια, δίνοντας έτσι την δυνατότητα διαφορετικής πόλωσης κάθε τμήματος. Σκοπός της παραπάνω συνδεσμολογίας ήταν η δυνατότητα χρήσης του ενός τμήματος της συσκευής ως ενισχυτή (gain section) και του άλλου ως κορεσμένου απορροφητή (saturable absorber). Η κάθε συσκευή είχε μεγάλο αριθμό ηλεκτροδίων που εξαρτιόταν από το μήκος του λέιζερ και επέτρεπε την ανεξάρτητη πόλωση του κάθε τμήματος. Παρόλα αυτά, τα ηλεκτρόδια ήταν βραχυκυκλωμένα σε δύο διαφορετικές επιφάνειες, δίνοντας την δυνατότητα έγχυσης ομογενούς ρεύματος σε όλα τα τμήματα που λειτουργούσαν ως ενισχυτές (gain sections) και ομοιόμορφης κατανομής της τάσης στα τμήματα που προορίζονταν για απορροφητές (absorbing sections). Ανάμεσα στα δύο τμήματα της διάταξης είχε πραγματοποιηθεί ηλεκτρική απομόνωση μέσω εγχάραξης, η οποία είχε βάθος 1.4μm.

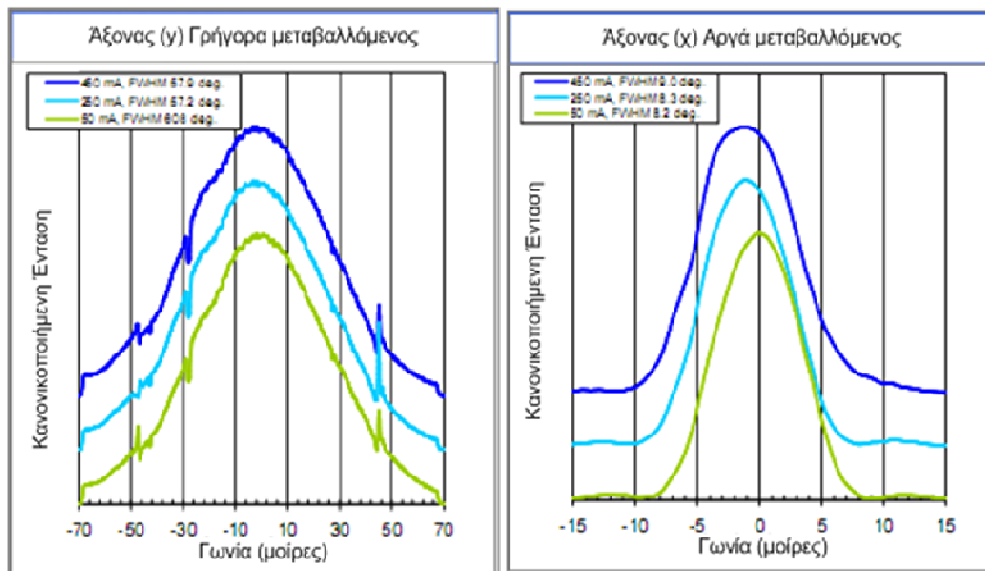
Πιο συγκεκριμένα, τα λέιζερ με μήκος 2mm είχαν το 85% του ενεργού υλικού πολωμένο ως ενισχυτή ενώ το υπόλοιπο τμήμα λειτουργούσε ως απορροφητής. Για τις συσκευές 4mm το ποσοστό ήταν ίδιο με των 2mm ενώ για τις διατάξεις με μήκος 8mm το ποσοστό του απορροφητή ήταν 11%. Η κατανομή των τμημάτων στο μήκος του κυματοδηγού δεν ήταν συνεχόμενη. Αυτή η προσέγγιση ακολουθήθηκε στα λέιζερ που είχαν αυξημένο μήκος (4mm και 8mm) ώστε να γίνεται καλύτερη διαμόρφωση (shaping) του παλμού και να αντισταθμιστούν φαινόμενα διασποράς που ενισχύονται όταν το μήκος των ενισχυτών τμημάτων είναι μεγάλο.

Στο σχήμα 4.3 παρουσιάζεται η ακριβής συνδεσμολογία (ηλεκτρόδια) και ο αριθμός τμημάτων για κάθε λέιζερ. Στο πίνακα 4.1 παρουσιάζονται αναλυτικά όλα τα δομικά χαρακτηριστικά των συσκευών που μελετήθηκαν καθώς και η δομή και το ύψος των διαφορετικών στρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την κατασκευή των λέιζερ. Η μία άκρη της συσκευής (facet) είχε υποστεί ειδική επεξεργασία ώστε να παρουσιάζει ανακλαστικότητα της τάξης του 10% στο επιθυμητό μήκος κύματος (έξοδος του λέιζερ), ενώ η άλλη άκρη είχε υποστεί ειδική επεξεργασία ώστε τα επίπεδα της ανακλαστικότητας να φτάνουν το 95%. Το προφίλ εγγύς πεδίου και για τους δύο άξονες παρουσιάζεται στο σχήμα 4.4. Ο άξονας x (οριζόντιος) παρουσίαζε μικρή απόκλιση (divergence) ενώ λόγω κατασκευής ο άξονας y (κάθετος) παρουσίαζε απόκλιση που

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές έφτανε τις 55°. Η γρήγορη μεταβολή του ηλεκτρικού πεδίου με τη γωνία καθιστούσε την επίτευξη υψηλού ποσοστού σύζευξης δύσκολο εγχείρημα.



Σχήμα 4-3 Σχηματική απεικόνιση των συσκευών της Inpholume και των ηλεκτρικών τους επαφών (α) 2mm (β) 4mm και (γ) 8mm.



Σχήμα 4-4 Προφίλ του Η/Μ πεδίου για τους δύο διαφορετικούς άξονες συναρτήσει της γωνίας. Οι μετρήσεις είναι για συσκευή 2mm με 5 στρώματα κβαντικών σημείων και είναι χαρακτηριστική και για τις άλλες συσκευές.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Πίνακας 4-1 Το ύψος καθώς και τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών στρωμάτων που αναπτύχθηκαν κατά την επιταξία

Layer	Material	Group	Repeat	Mole fraction (x)		Thickness (nm)	Doping profile		Type	Dopant
				start	finish		start	finish		
14	GaAs					200		1e20	P	C
13	Al(x)Ga(1-x)As			0.35	0	20		3e18	P	C
12	Al(x)Ga(1-x)As			0.35		1000		1e18	P	C
11	Al(x)Ga(1-x)As			0.35		500		5e17	P	C
10	GaAs					100			U/D	None
9	GaAs	1	5,10,15			35			U/D	None
8	In(x)Ga(1-x)As	1	5,10,15	0.15		5			U/D	None
7	InAs*	1	5,10,15			0.8			U/D	None
6	GaAs					35			U/D	None
5	GaAs					100			U/D	None
4	Al(x)Ga(1-x)As			0.35		500		5e17	N	Si
3	Al(x)Ga(1-x)As			0.35		1000		1e18	N	Si
2	Al(x)Ga(1-x)As			0	0.35	20		3e18	N	Si
1	GaAs					500		3e18	N	Si
0	GaAs substrate	N+ GaAs 3 inch								

4.3.2 Πειραματικός χαρακτηρισμός διατάξεων με ευθύγραμμο ενισχυτή

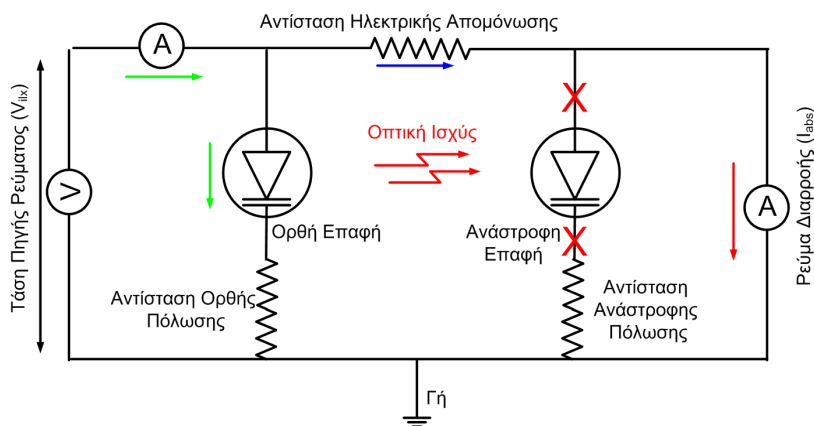
4.3.2.1 Ηλεκτρικός Χαρακτηρισμός

Τα δύο διαφορετικά τμήματα των συσκευών κατασκευάστηκαν μέσω εγχάραξης (etching), η οποία έγινε σε μικρό βάθος (1.4μm), ώστε να μην διαταραχθεί η συνέχεια του κυματοδηγού ενώ παράλληλα να επαχθεί ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ των τμημάτων του απορροφητή και του ενισχυτή. Η γνώση της αντίστασης απομόνωσης είναι σημαντική λόγω του ότι καθόριζε τις μέγιστες τιμές πόλωσης που μπορούσαν να εφαρμοστούν σε κάθε τμήμα, χωρίς να υπάρχουν σημαντικές ηλεκτρικές διαρροές που θα επηρέαζαν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

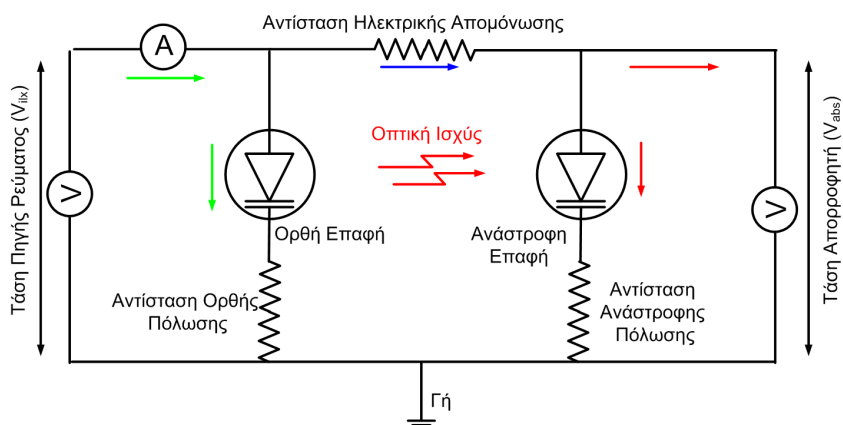
Η διάταξη δύο τμημάτων μπορούσε να θεωρηθεί σαν δύο δίοδοι τοποθετημένες πλάτη-πλάτη. Η πρώτη δίοδος είναι ορθά πολωμένη και επιτελεί την παραγωγή της οπτικής ακτινοβολίας, η δεύτερη είναι πολωμένη ανάστροφα και βρίσκεται σε φωτοβολταϊκή λειτουργία, ενώ ανάμεσα τους θεωρήθηκε μία αντίσταση απομόνωσης πεπερασμένης τιμής. Η τιμή αυτής της αντίστασης δεν μπορούσε να υπολογιστεί απευθείας και ως εκ τούτου πραγματοποιήθηκε ηλεκτρικός χαρακτηρισμός με δύο διαφορετικές συνδεσμολογίες (α) βραχυκύκλωσης και (β) ανοιχτοκύκλωσης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 4.5 και 4.6, αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας την (α) διάταξη η πρώτη δίοδος (ενισχυτή) τροφοδοτήθηκε από μια πηγή σταθερού ρεύματος, της οποίας καταγραφόταν η τάση και η ένταση του ρεύματος. Παράλληλα, στη δεύτερη δίοδο (παράλληλα στα ηλεκτρόδια τροφοδοσίας)

είχε τοποθετηθεί αμπερόμετρο που κατέγραφε το ρεύμα που διέρρεε την αντίσταση απομόνωσης (I_{abs}). Χρησιμοποιώντας τη διάταξη (β) η πρώτη δίοδος πάλι τροφοδοτήθηκε από την ίδια πηγή, ενώ στη δεύτερη δίοδο είχε τοποθετηθεί βολτόμετρο. Με αυτό τον τρόπο μετρήθηκε η πτώση τάσης στα άκρα της δίοδου, δηλαδή το γινόμενο I_{abs} (ρεύμα διαρροής) επί την τιμή της αντίστασης (R_{abs}). Χρησιμοποιώντας το γινόμενο ($I_{abs} \cdot R_{abs}$) καθώς και την τιμή I_{abs} υπολογίστηκε η ακριβής τιμή της αντίστασης R_{abs} μεταξύ των δύο δίοδων (απορροφητής – ενισχυτής).

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



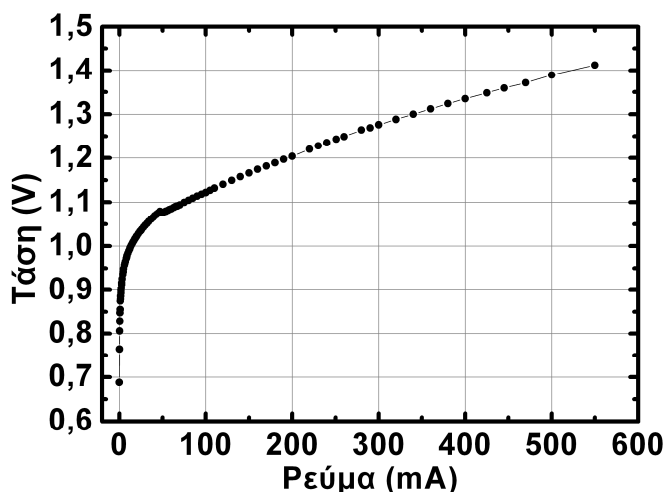
Σχήμα 4-5 Συνδεσμολογία βραχυκύκλωσης, η δεύτερη δίοδος παρακάμπτεται και υπολογίζεται απευθείας το ρεύμα διαρροής.



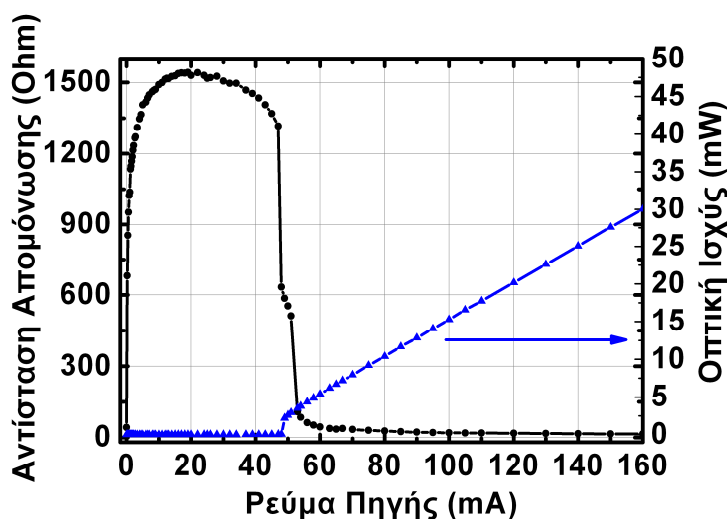
Σχήμα 4-6 Συνδεσμολογία ανοιχτοκυκλώματος, από την πτώση τάσης στα ηλεκτρόδια της δεύτερης δίοδου υπολογίζεται το γινόμενο της αντίστασης επί το ρεύμα διαρροής.

Η παραπάνω μέτρηση καθίσταται ακριβής μόνο αν ισχύουν δύο βασικές προϋποθέσεις: α) η δεύτερη δίοδος (απορροφητή) να μην παράγει φωτόρευμα, δηλαδή το λέιζερ να βρίσκεται κάτω από το κατώφλι έναυσης και β) η αντίσταση παρουσιάζει ωμική συμπεριφορά. Αυτή η περιοχή όπως φαίνεται και από την χαρακτηριστική καμπύλη τάσης – έντασης για την πρώτη δίοδο (σχήμα 4.7) επιτυγχάνεται όταν το ρεύμα είναι μεγαλύτερο των 50mA.

Όπως φαίνεται στο σχήμα 4.8, η τιμή της αντίστασης διαρροής μεταβάλλεται με το ρεύμα. Στη πρώτη φάση η τιμή της είναι μικρή, λόγω του ότι η πρώτη δίοδος δεν άγει, με αποτέλεσμα να μην περνά καθόλου ρεύμα προ της άλλη δίοδο. Στη συνέχεια παρόλη την αύξηση του ρεύματος ορθής πόλωσης, το λέιζερ εξακολουθεί και είναι κάτω από το κατώφλι και η τιμή της αντίστασης σταθεροποιείται στο $\approx 1.4K\Omega$, η οποία είναι και η τελική τιμή της αντίστασης. Στην περίπτωση που το ρεύμα άντλησης οδηγήσει τη διάταξη σε λειτουργία λέιζερ, παρατηρείται σημαντική αύξηση του φωτό-παραγόμενο ρεύματος της δεύτερης δίοδου. Αυτό το γεγονός καθιστά αδύνατη την ακριβή μέτρηση της αντίστασης. Η τιμή της αντίστασης απομόνωσης αν και σε απόλυτη τιμή δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή, συγκρινόμενη με την αντίσταση ορθής πόλωσης της πρώτης δίοδου που είναι $\approx 6\Omega$ είναι αρκετή για να διατηρήσει τα δύο τμήματα του λέιζερ ηλεκτρικά απομονωμένα.



Σχήμα 4-7 Καμπύλη ρεύματος – τάσης για την πρώτη δίοδο (ενισχυτής)



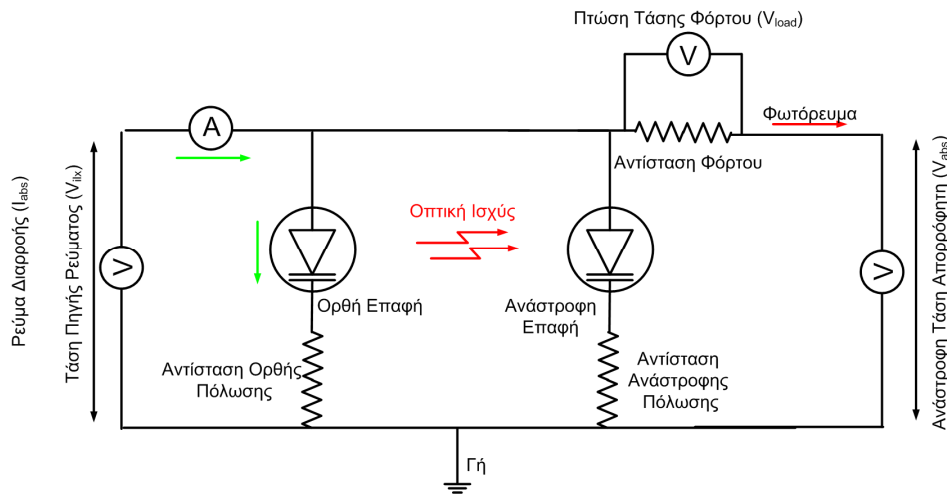
Σχήμα 4-8 Η αντίσταση απομόνωσης συναρτήσει του ρεύματος (μαύρο), οπτική ισχύς συναρτήσει του ρεύματος της πρώτης δίοδου (μπλε)

Για την καλύτερη κατανόηση της αποτελεσματικότητας (efficiency) του απορροφητή μετρήθηκε το επαγόμενο φωτόρευμα για τέσσερις διαφορετικές τιμές ρεύματος στο τμήμα ενίσχυσης, καθώς και για διάφορες τιμές ανάστροφης πόλωσης στο τμήμα του απορροφητή. Για την υλοποίηση της μέτρησης υλοποιήθηκε η συνδεσμολογία του σχήματος 4.9, όπου ο απορροφητής βρισκόταν πολωμένος με ανάστροφη τάση, μέσω ενός τροφοδοτικού τάσης, ενώ σε σειρά είχε τοποθετηθεί ωμική αντίσταση μικρής τιμής (αντίσταση φόρτου - 3.6Ω). Η τιμή της αντίστασης φόρτου επιλέχθηκε να είναι μικρή ώστε να προκαλεί όσο το δυνατό μικρότερη πτώση τάσης και ως εκ τούτου να μην διαταράσσει σημαντικά τις συνθήκες πόλωσης του απορροφητή. Με χρήση ενός βολτομέτρου καταγράφηκε η πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση φόρτου, βάσει του οποίου υπολογίστηκε το αντίστοιχο ρεύμα.

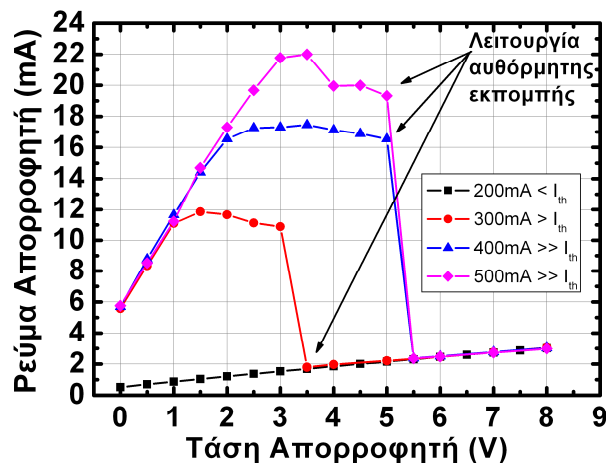
Στην περίπτωση που το λέιζερ λειτουργούσε κάτω από το κατώφλι, το ρεύμα που μετρήθηκε ήταν ρεύμα διαρροής και κυμαινόταν από 0.5 μέχρι 3mA. Αυτή η αύξηση οφειλόταν στην αύξηση της ανάστροφης πόλωσης, που με την σειρά της βοήθησε την γρήγορη και αποτελεσματική σάρωση των φωτο-παραγόμενων φορέων. Το φαινόμενο αυτό όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.10 παρατηρείται και για τις υπόλοιπες τιμές ρεύματος. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η αύξηση της ανάστροφης πόλωσης δεν

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

αυξάνει μόνο το φωτόρευμα αλλά επιδρά και στις απώλειες του απορροφητή και ως εκ τούτου στις συνολικές απώλειες της ενεργού περιοχής. Το συγκεκριμένο φαινόμενο μπορεί να παρατηρηθεί μέσω του σχήματος 4.10 όπου, για μεγάλες τιμές της ανάστροφης τάσης το ρεύμα απότομα μειώνεται και ακολουθεί την τιμή που είχε όταν η διάταξη λειτουργούσε κάτω από το κατώφλι.



Σχήμα 4-9 Σχηματική απεικόνιση της διάταξης για την μέτρηση του φωτο-ρεύματος υπό συνθήκες ανάστροφης πόλωσης.



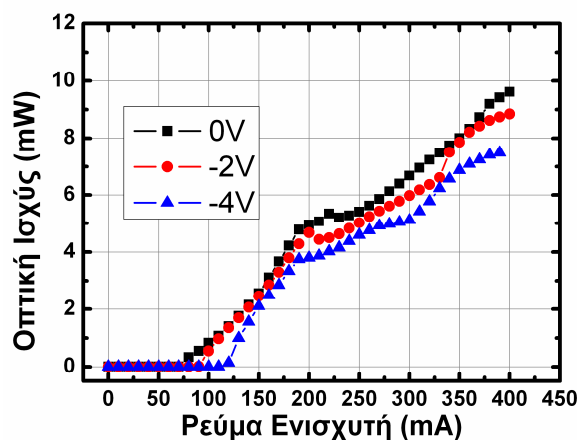
Σχήμα 4-10 Το ρεύμα απορρόφησης (φωτόρρευμα) για 4 διαφορετικά ρεύματα και για διάφορες ανάστροφες τάσεις στο τμήμα απορρόφησης

4.3.2.2 Οπτικός Χαρακτηρισμός

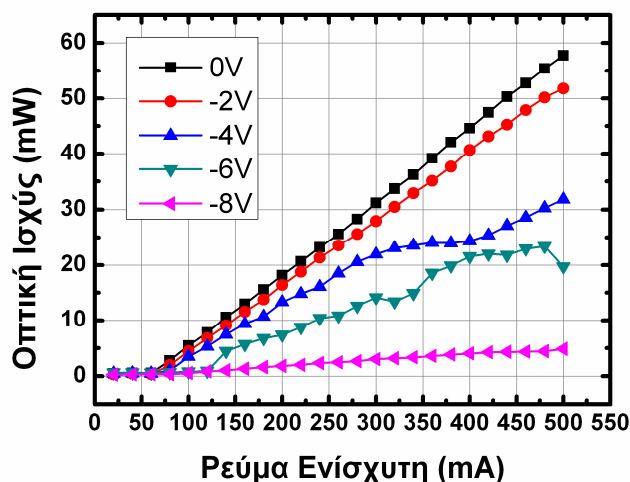
Ο οπτικός χαρακτηρισμός περιελάμβανε μέτρηση της χρονικής διάρκειας του παλμού, μέτρηση της μέσης οπτικής ισχύος της διάταξης, μέτρηση του εύρους γραμμής του ηλεκτρικού φάσματος και τέλος, μέτρηση του εύρους του οπτικού φάσματος. Μεταβάλλοντας τις συνθήκες πόλωσης και των δύο τμημάτων έγινε ένας πλήρης χαρακτηρισμός της λειτουργίας των λέιζερ για διαφορετικές συνθήκες πόλωσης. Το ρεύμα στο τμήμα ενίσχυσης μεταβλήθηκε από 0mA μέχρι την μέγιστη τιμή που επέτρεπε ο κατασκευαστής που ήταν τα 500mA. Συγχρόνως η ανάστροφη τάση στον απορροφητή μεταβλήθηκε από 0V σε -8V που ήταν αντίστοιχα η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή που μπορούσε να εφαρμοστεί χωρίς τη πρόκληση καταστροφής στη δίοδο.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Στο σχήμα 4.11 παρουσιάζεται η οπτική ισχύς συναρτήσει του ρεύματος του τμήματος ενίσχυσης για διάφορες τιμές ανάστροφης πόλωσης και για μία διάταξη με 10 στρώματα κβαντικών σημείων, μήκος 2mm και πλάτος κυματοδηγού 6μm, ενώ στο σχήμα 4.12 παρουσιάζεται, αντίστοιχα, η καμπύλη οπτικής έντασης – ρεύματος ενισχυτή για μια αντίστοιχη συσκευή που έχει τα ίδια δομικά χαρακτηριστικά εκτός του μήκους, που σε αυτή την περίπτωση ήταν 4mm. Τα αποτελέσματα και των δύο διατάξεων είναι χαρακτηριστικά για την πλειοψηφία των συσκευών και παρουσιάζουν κοινές τάσεις ως προς την επίδραση της τάσης του απορροφητή στην οπτική έξοδο. Πιο συγκεκριμένα, τα βασικά φαινόμενα που παρουσιάζονται είναι α) η μείωση της οπτικής ισχύος με την αύξηση της ανάστροφης τάσης και β) η αύξηση του ρεύματος κατωφλίου. Τα δύο αυτά φαινόμενα συσχετίζονται με την εξάρτηση των μη κορεσμένων απωλειών του τμήματος απορρόφησης από την ανάστροφη τάση. Ειδικότερα στην περίπτωση της διάταξης του σχήματος 4.12, όταν η τάση ξεπεράσει τα -8V προκαλεί την έντονη αύξηση των απωλειών της κοιλότητας, με αποτέλεσμα η διάταξη να μην ξεπερνά το κατώφλι εξαναγκασμένης εκπομπής.



Σχήμα 4-11 Καμπύλη Οπτικής ισχύος προς το ρεύμα του ενισχυτή, για μια συσκευή 10 στρωμάτων, 4μm πλάτος κυματοδηγού και 2mm μήκος.



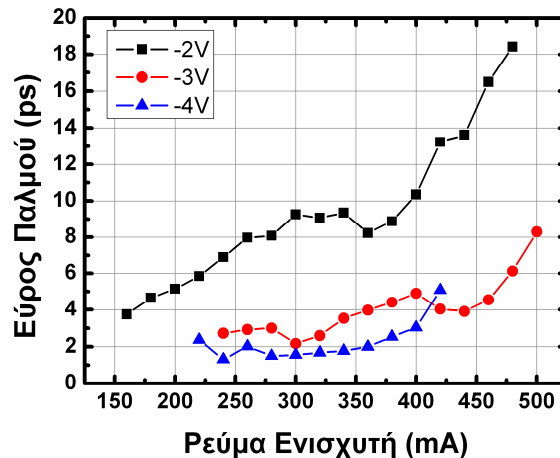
Σχήμα 4-12 Καμπύλη Οπτικής ισχύος προς το ρεύμα του ενισχυτή για μια συσκευή 10 στρωμάτων, 4μm πλάτος κυματοδηγού και 4mm μήκος.

Η επόμενη μέτρηση πραγματοποιήθηκε με χρήση του οπτικού αυτοσυσχετιστή και περιλάμβανε την μέτρηση του χρονικού εύρους των εκπεμπόμενων παλμών. Η διάταξη των 2mm παρουσίασε παλμική λειτουργία όταν η ανάστροφη τάση στον απορροφητή

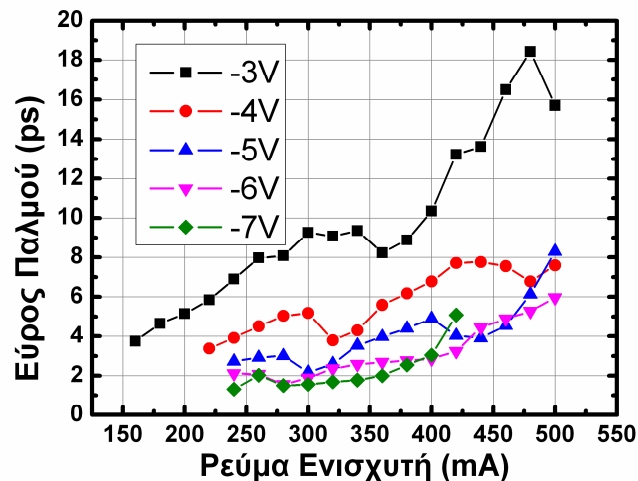
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

κυμαινόταν από $-2V$ μέχρι $-4V$. Για πιο μικρές τιμές, η διάταξη λειτουργούσε είτε σε κατάσταση συνεχούς εκπομπής είτε η παλμική λειτουργία ήταν ασταθής και το εύρος των παραγόμενων παλμών ήταν μεγαλύτερο των $60ps$, που είναι και το μέγιστο το οποίο μπορούσε να μετρήσει ο αυτοσυσχετιστής που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις. Όταν η ανάστροφη τάση αυξήθηκε πέραν των $-4V$, η εκπεμπόμενη οπτική ισχύς μειώθηκε ραγδαία όπως επιβεβαιώνει και η καμπύλη ρεύματος – οπτικής ισχύος (σχήμα 4.11) με αποτέλεσμα, είτε το σήμα να είναι αρκετά ασθενές ώστε η έξοδος του αυτοσυσχετιστή να είναι πολύ κοντά στο όριο του θορύβου και ως εκ τούτου να μην μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια η διάρκεια του παλμού.

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την πειραματική διερεύνηση της χρονικής διάρκειας των παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης της διάταξης βρίσκονται σε πλήρη συμφωνία με τα θεωρητικά αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο 3^ο κεφάλαιο. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάστηκε αύξηση της χρονικής διάρκειας των παλμών με την αύξηση του ρεύματος στο τμήμα ενίσχυσης, ενώ αντίθετα η αύξηση της ανάστροφης τάσης είχε ευεργετικά αποτελέσματα στο εύρος των παλμών μέσω της εκθετικής μείωσης του χρόνου επαναφοράς των φορέων στον απορροφητή [24]-[25]. Η πειραματικά παρατηρούμενη αύξηση του χρονικού εύρους με την αύξηση του ρεύματος έγχυσης αποδίδεται στην ενίσχυση φαινομένων αυτοδιαμόρφωσης της φάσης του παλμού, της χρωματικής διασποράς, καθώς και στην αύξηση του παράγοντα α (κεφάλαια 2-3). Η αύξηση του ρεύματος επάγει και αύξηση της οπτικής ισχύος εντός της κοιλότητας με αποτέλεσμα την ισχυρότερη αλληλεπίδραση των οπτικών φορέων του παλμού με τους ελεύθερους φορείς της διάταξης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ενίσχυση της αυτοδιαμόρφωσης της φάσης. Επιπλέον η μη-γραμμικότητα και κατ'επέκταση η χρωματική διασπορά του υλικού είναι άμεσα εξαρτώμενα από το ρεύμα άντλησης.



Σχήμα 4-13 Εύρος παλμού ως προς το ρεύμα του ενισχυτή για τρεις διαφορετικές τιμές ανάστροφης πόλωσης (διάταξη των 2mm)

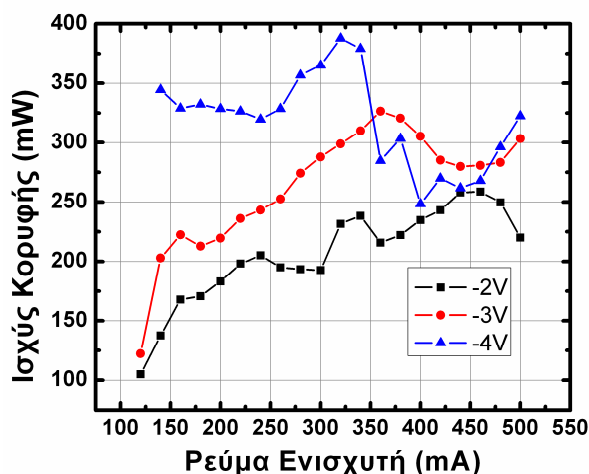


Σχήμα 4-14 Εύρος παλμού ως προς το ρεύμα του ενισχυτή για πέντε διαφορετικές τιμές ανάστροφης πόλωσης (διάταξη των 4mm)

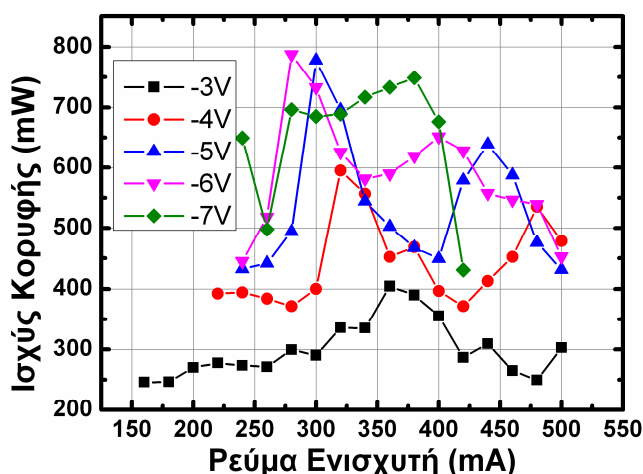
Συνεπώς αυτά τα δύο φαινόμενα αποτελούν τον βασικό λόγο που οι στενότεροι χρονικά παλμοί επιτυγχάνονται όταν το ρεύμα του ενισχυτή έχει τιμές κοντά στην τιμή του ρεύματος κατωφλίου. Όσο αφορά την ανάστροφη τάση, η αύξηση της επάγει μείωση του χρόνου ζωής των φορέων. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της ισχυροποίησης του ηλεκτρικού πεδίου του απορροφητή και κατά συνέπεια την ταχύτατη σάρωση των φωτο-παραγόμενων φορέων.

Στη δεύτερη διάταξη, η παλμική λειτουργία επιτυγχάνεται σε μεγαλύτερο εύρος τιμών ανάστροφης τάσης (-3V - -7V). Η εξέλιξη του χρονικού εύρους των παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης των δύο τμημάτων ακολουθεί την ίδια τάση με την προηγούμενη διάταξη. Επιπροσθέτως, στη συγκεκριμένη διάταξη κατέσκει εφικτή η παραγωγή εξαιρετικά στενών παλμών, με εύρος $\Delta t \approx 1.3ps$. Αυτή το αποτέλεσμα πιθανώς οφείλεται στην αυξημένη οπτική ισχύ της διάταξης, η οποία με τη σειρά της επέτρεψε την καταγραφή παλμών σε συνθήκες πόλωσης κοντά στο κατώφλι λειτουργίας και για υψηλές τιμές ανάστροφης τάσης.

Όπως αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο, η ισχύς κορυφής των παλμών δεν μπορεί να υπολογιστεί άμεσα, αλλά ο υπολογισμός καθίσταται δυνατός μέσω της γνώσης της μέσης ισχύος, του ρυθμού επανάληψης και του χρονικού εύρους των παλμών. Τα δύο αυτά μεγέθη (χρονικό εύρος και μέση ισχύς) έχουν αντίθετη εξέλιξη με τις συνθήκες πόλωσης. Συνεπώς, η εξέλιξη της αύξησης της ισχύος κορυφής δεν έχει μονότονη συμπεριφορά και εξαρτάται από το ρυθμό που μεταβάλλονται τα δύο ανταγωνιστικά μεγέθη. Στα σχήματα 4.15 και 4.16 παρουσιάζεται η ισχύς κορυφής για τις δύο συσκευές. Και στις δύο περιπτώσεις δεν παρατηρείται μονότονη συμπεριφορά ενώ υπάρχουν τοπικά μέγιστα, περιοχές που η ισχύς κορυφής είναι ιδιαίτερα υψηλή λόγω πολύ στενών παλμών (αλλά χαμηλής μέσης ισχύος) ή περιοχές που η ισχύς κορυφής αυξάνεται μόνο λόγω της αύξησης της μέσης ισχύος υπό την παρουσία οπτικών παλμών μεγάλου χρονικού εύρους.



Σχήμα 4-15 Ισχύς κορυφής συναρτήσει του ρεύματος ενίσχυση για τρεις διαφορετικές τιμές αναστροφής τάσης (διάταξη 2mm)

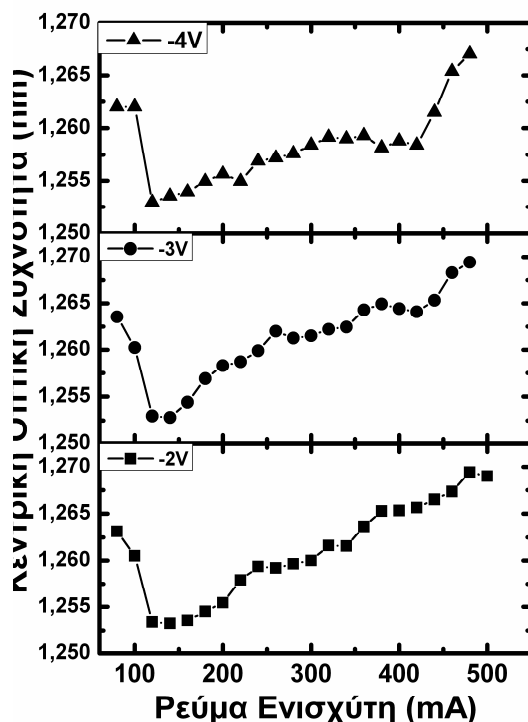


Σχήμα 4-16 Ισχύς κορυφής συναρτήσει του ρεύματος ενίσχυση για πέντε διαφορετικές τιμές αναστροφής τάσης (διάταξη 4mm)

Παράλληλα με την μελέτη των χρονικών χαρακτηριστικών των εκπεμπόμενων παλμών, το ηλεκτρικό καθώς και το οπτικό φάσμα παρείχαν συμπληρωματικά στοιχεία για την ποιότητα της εγκλειδωσης των τρόπων καθώς και για τη γενικότερη δυναμική συμπεριφορά της διάταξης. Στο σχήμα 4.17 παρουσιάζεται η εξέλιξη του κεντρικού μήκους κύματος συναρτήσει του ρεύματος ενίσχυσης για τρεις διαφορετικές τιμές αναστροφής τάσης. Είναι εμφανές ότι υπάρχουν δύο περιοχές λειτουργίας. Η αρχική αύξηση του ρεύματος πάνω από το κατώφλι εξαναγκασμένης εκπομπής οδηγεί το οπτικό φάσμα σε μικρότερα μήκη κύματος. Αυτό το φαινόμενο οφείλεται στην αύξηση της οπτικής ισχύος μέσα στην ενεργό περιοχή με αποτέλεσμα την τετραγωνική αύξηση του ενεργού δείκτη διάθλασης (n_{eff}), λόγω φαινομένου Kerr [26]. Η δεύτερη περιοχή παρατηρείται για υψηλότερο ρεύμα και προκαλεί ολίσθηση του φάσματος προς μεγαλύτερα μήκη κύματος. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται, με τη σειρά του σε θερμικά φαινόμενα εντός της ενεργού περιοχής και έχει παρατηρηθεί και σε συμβατικά λέιζερ κβαντικού φρέατος [27]. Η μέγιστη ολίσθηση (blue shift) προς μικρότερα μήκη κύματος ήταν της τάξης των 10nm, ενώ συνολικά η ολίσθηση προς μεγαλύτερα μήκη κύματος (red shift) ήταν της τάξης των 15nm. Το συγκεκριμένο γεγονός, σε συνδυασμό με τα ευρεία οπτικά φάσματα που παρατηρούνται στα λέιζερ κβαντικών σημείων ($\approx 20\text{nm}$) λόγω μη-ομογενούς διαπλάτυνσης της απολαβής, τα καθιστά εξαιρετικούς υποψήφιους

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

για εφαρμογές που απαιτούν συντονισμένες πηγές χαμηλής συμφωνίας και μεγάλης έντασης. Η ανάστροφη τάση στον απορροφητή δεν διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο εύρος του συντονισμού μια και το φαινόμενο σχετίζεται, κυρίως, με τα δυναμικά χαρακτηριστικά του τμήματος ενίσχυσης.



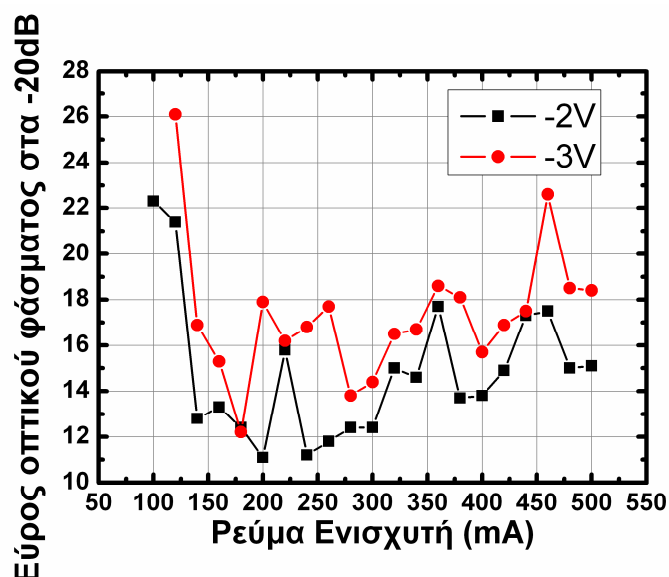
Σχήμα 4-17 Κεντρικό μήκος κύματος εκπομπής για την διάταξη των 2mm, συναρτήσεϊ του ρεύματος του ενισχυτή

Το εύρος του οπτικού φάσματος παρουσίασε μεταβολή με τις συνθήκες πόλωσης λόγω δύο φαινομένων: α) τη διεύρυνση λόγω αύξησης του ρεύματος ενίσχυσης και β) τον περιορισμό του φασματικού εύρους λόγω έναυσης εξαναγκασμένης εκπομπής. Τα δύο φαινόμενα παρουσιάζονται στο σχήμα 4.18, όπου αναπαριστάται το εύρος ζώνης του οπτικού φάσματος στα -20dB συναρτήσεϊ του ρεύματος, για δύο διαφορετικές ανάστροφες τάσεις. Αρχικά το οπτικό φάσμα παρουσιάζει αυξημένο εύρος, το οποίο οφείλεται στην αυθόρμητη εκπομπή και φτάνει τα 26nm. Από τα 100mA η διάταξη εισέρχεται σε κατάσταση εξαναγκασμένης λειτουργίας με αποτέλεσμα τον ισχυρό περιορισμό του φασματικού εύρους (8nm). Όταν το ρεύμα άντλησης ξεπεράσει τη συνθήκη κατωφλίου, το οπτικό εύρος διευρύνεται λόγω της ισχυροποίησης της μη ομογενούς απολαβής και κατ' επέκταση της αύξησης του πλήθους των διαμηκών τρόπων που επιτυγχάνουν τη συνθήκη κατώφλιου. Επιπροσθέτως η διακύμανση του χρονικού εύρους των παραγόμενων παλμών, επηρεάζει με τη σειρά της το εύρος, μέσω του καθορισμού του αριθμού των τρόπων, που κλειδώνουν στην ίδια φάση. Αυτή η εξάρτηση του φασματικού εύρους από την ποιότητα της εγκλειδωσης αναφέρθηκε στο 2^ο κεφάλαιο. Στο σχήμα 4.18 παρουσιάζεται η αύξηση του εύρους ζώνης του οπτικού φάσματος με την αύξηση της ανάστροφης τάσης, και κατ' επέκταση της βελτίωσης της παλμικής λειτουργίας.

Το γεγονός ότι η εξέλιξη του εύρους του οπτικού φάσματος με το ρεύμα έγχυσης εξαρτάται τόσο από την ποιότητα της εγκλειδωσης όσο και από την διεύρυνση της μη ομογενούς απολαβής δυσχεραίνει την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων για την απόδοση της εγκλειδωσης των τρόπων. Ως εκ τούτου η μελέτη του οπτικού φάσματος

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

περιορίστηκε στον εντοπισμό του κύριου μήκους κύματος εκπομπής, και στην ανίχνευση πολύ-φασματικής εκπομπής (GS/ES).



Σχήμα 4-18 Εύρος στα -20dB του οπτικού φάσματος συναρτήσει του ρεύματος ενισχυτή για δύο διαφορετικές τιμές ανάστροφης τάσης (διάταξη 2mm)

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, η μελέτη του ηλεκτρικού φάσματος του λέιζερ μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για την ακριβή συχνότητα επανάληψης των παλμών, για την ποιότητα της εγκλείδωσης, για την ύπαρξη ενδογενών ασταθειών, όπως η υπέρ-διαμόρφωση του πλάτους των παλμών, καθώς και να επιβεβαιώσει την ύπαρξη εγκλείδωσης τρόπων από διαφορετικές φασματικές περιοχές.

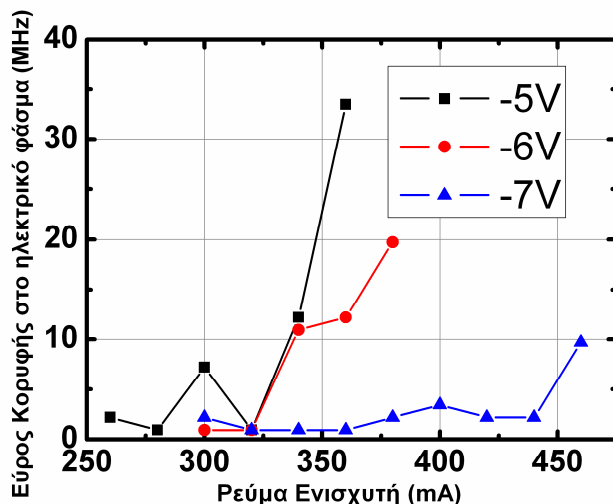
Όσον αφορά την ποιότητα της παλμικής λειτουργίας, στο σχήμα 4.19 παρουσιάζεται η αλλαγή στο εύρος της γραμμής της ηλεκτρικής κορυφής συναρτήσει του ρεύματος για διαφορετικές ανάστροφες τάσεις, οι οποίες κυμαίνονται από -7V μέχρι -5V. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί η αύξηση του ρεύματος ή η μείωση της τάσης, επάγει αύξηση στο εύρος γραμμής του ηλεκτρικού φάσματος, υπονοώντας ατελή εγκλείδωση ή αυξημένη επίπεδα θορύβου φάσης. Η αύξηση του φασματικού εύρους της κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος οφείλεται στην αργή ανάκαμψη του απορροφητή σε κατάσταση υψηλών απωλειών (μειωμένη τάση) είτε στην έναυση μεγάλου αριθμού διαμηκών τρόπων, οι οποίοι δεν διαθέτουν ταυτόσημη φάση και κατ' επέκταση δεν συνεισφέρουν στην παραγωγή των παλμών. Οι πλεονάζοντες διαμηκείς τρόποι επιτρέπουν όπως αναφέρθηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια στην αύξηση της θορυβικής συμπεριφοράς της διάταξης, είτε στην εγκλείδωση σε διαφορετική φάση με άμεσο αποτέλεσμα την ενίσχυση φαινομένων ανταγωνισμού μεταξύ των διαφορετικών ομάδων τρόπων [28].

Στο σχήμα 4.20 παρουσιάζεται η εξέλιξη του εύρους της κεντρικής κορυφής του φάσματος για αύξηση του ρεύματος έγχυσης από 160mA σε 400mA για την διάταξη του σχήματος 4.15. Η αύξηση του ρεύματος επιφέρει μείωση του εύρους του ηλεκτρικού φάσματος, σε πλήρη αντίθεση με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο σχήμα 4.15 και όπου καταδεικνύεται η υποβάθμιση της παλμικής λειτουργίας. Αυτό το αποτέλεσμα, σε πρώτη ανάλυση, παρουσιάζεται ως παράδοξο. Η προσεχτικότερη μελέτη του ηλεκτρικού φάσματος όμως, καταδεικνύει ότι η ύπαρξη πολλών κορυφών

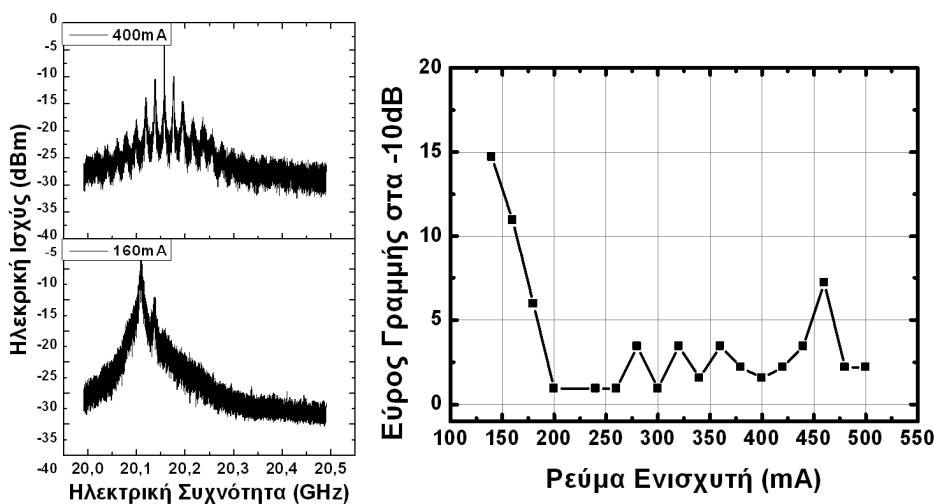
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

στο ηλεκτρικό φάσμα σηματοδοτεί μια περιοχή ασταθούς λειτουργίας, όπου οι παραγόμενοι παλμοί έχουν μεγάλο χρονικό εύρος.

Πιο αναλυτικά, στη συγκεκριμένη περίπτωση υπάρχουν αρκετές ομάδες τρόπων που η ισχύς τους λόγω ανεπαρκούς εξασθένησης του απορροφητή (χαμηλή τάση) έχουν καταφέρει να κλειδώσουν σε διαφορετική φάση από την κεντρική ομάδα τρόπων, με αποτέλεσμα την ενίσχυση φαινομένων ανταγωνισμού μεταξύ των τρόπων και την υποβάθμιση της παλμικής λειτουργίας. Συμπερασματικά, η μείωση του εύρους της κεντρικής ηλεκτρικής κορυφής δεν αποτελεί μοναδική ένδειξη για την επίτευξη επαρκούς εγκλειδωσης τρόπων και θα πρέπει να γίνεται πάντα σε συνδυασμό με τη μέτρηση του εύρους του παλμού ή ,στις περιπτώσεις που αυτό δεν είναι εφικτό (πολύ μικρή οπτική ισχύς) θα πρέπει να εξετάζεται η συνολική εικόνα του ηλεκτρικού φάσματος.



Σχήμα 4-19 Εύρος κορυφής ηλεκτρικού φάσματος στα -10dB συναρτήσει του ρεύματος ενισχυτή για τρεις διαφορετικές τιμές ανάστροφης τάσης (διάταξη 4mm)



Σχήμα 4-20 Εύρος γραμμής στα -10dB (δεξιά) χαρακτηριστικά φάσματα (αριστερά) για την διάταξη με μήκος 4mm.

4.3.3 Διατάξεις αδιαβατικά πεπλατυσμένου ενισχυτή (Alcatel – Thales)

Οι συσκευές που κατασκευάστηκαν από την Alcatel-Thales παρήχθησαν με την ίδια μέθοδο επιταξίας που χρησιμοποιήθηκε και για τις συσκευές της Innolume. Η βασική

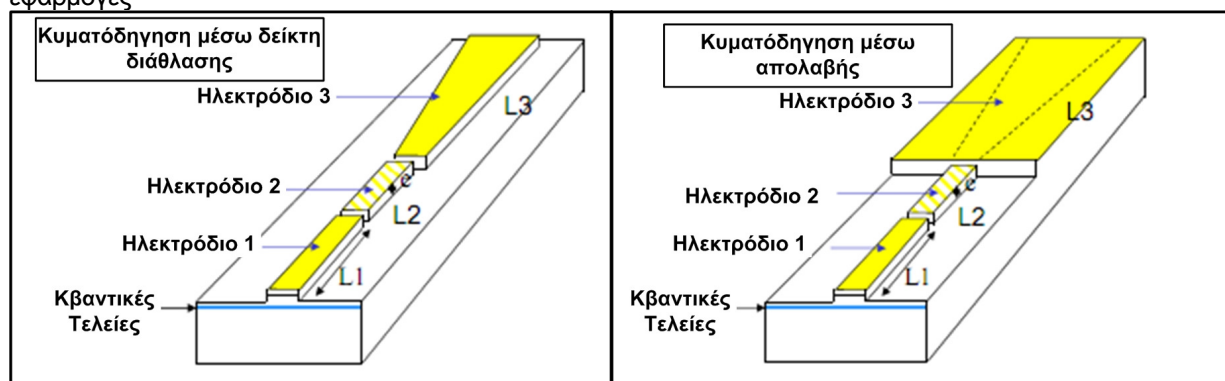
διαφορά μεταξύ των δύο εστιάζεται στη γεωμετρία τμήματος του κυματοδηγού και στον ακριβή τρόπο κυματοδότησης που επιλέχθηκε. Η διαφοροποίηση στη γεωμετρία της διάταξης έγκειται στο σχήμα του τμήματος ενίσχυσης, το οποίο ήταν αδιαβατικά πεπλατυσμένο (tapered). Το συγκεκριμένο χαρακτηριστικό έδινε την δυνατότητα αυξημένου μεγέθους του ενισχυτικού τμήματος, με αποτέλεσμα την παραγωγή περισσότερης ισχύος. Επιπροσθέτως, το αυξημένο πλάτος του κυματοδηγού, σύμφωνα με τη σχέση 2.4, προσφέρει μεγαλύτερη ενέργεια κορεσμού (saturation energy) στο τμήμα ενίσχυσης, με αποτέλεσμα την καλύτερη εγκλειδωση των τρόπων [29]-[32]. Τα βασικά μειονέκτημα της συγκεκριμένης προσέγγισης συνοψίζονται στην χωρικά πολύτροπη λειτουργία λόγω αυξημένης διατομής του κυματοδηγού, στην ύπαρξη ισχυρών μη-γραμμικών φαινομένων, λόγω αυξημένης οπτικής ακτινοβολίας εντός της κοιλότητας και τέλος στο πολύτροπο και εξαιρετικά διευρυμένο προφίλ της εκπεμπόμενης δέσμης, το οποίο καθιστά δύσκολη την συλλογή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας [33].

Το τμήμα απορρόφησης δεν ήταν πεπλατυσμένης γεωμετρίας για δύο λόγους: α) για να φιλτράρει χωρικά τους εγκάρσιους τρόπους του τμήματος ενίσχυσης με αποτέλεσμα το λέιζερ να επιτρέπει μόνο έναν εγκάρσιο τρόπο και β) ώστε το τμήμα απορρόφησης να έχει αρκετά μικρότερη ενέργεια κορεσμού [29]-[31].

Οι συσκευές της Alcatel – Thales χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το είδος της κυματοδότησης που επιτυγχάνεται σε κάθε περίπτωση. Τα δύο βασικά είδη κυματοδότησης είναι α) κυματοδότηση μέσω διαφοράς του δείκτη διάθλασης (index-guided) [34]-[35] και β) κυματοδότηση μέσω της απολαβής (gain-guided) [36]-[37]. Στο πρώτο είδος, η αποτελεσματική διάδοση του φωτός επιτυγχάνεται μέσω της χρήσης κατάλληλων στρωμάτων με κατάλληλη διαφορά του δείκτη διάθλασης και στις 3 διαστάσεις, ενώ στην κυματοδότηση μέσω απολαβής δεν υπάρχουν διαφορετικά στρώματα και στις τρεις διαστάσεις αλλά η περιοχή κυματοδότησης επάγεται μέσω του εγχεόμενου ρεύματος που αλλάζει τοπικά το δείκτη διάθλασης. Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής μελετήθηκε μία διάταξη από κάθε είδος.

Πιο αναλυτικά, η πρώτη διάταξη είχε συνολικό μήκος 2.8mm το οποίο ήταν χωρισμένο σε δύο τμήματα, ένα ευθύγραμμο 400μm και ένα πεπλατυσμένο με μήκος 2,37mm και γωνία εκλέπτυνσης 2° . Το ενεργό υλικό αποτελούνταν από 5 στρώματα κβαντικών σημείων και η κυματοδότηση επιτεύχθηκε μέσω του δείκτη διάθλασης (Index-guided). Η δεύτερη συσκευή χωρίζονταν σε τρία διακριτά τμήματα με δυνατότητα ανεξάρτητης πόλωσης τους, το πρώτο τμήμα ήταν ευθύγραμμο με μήκος 7,8mm και είχε το ρόλο κορεσμένου απορροφητή. Το δεύτερο τμήμα ήταν επίσης ευθύγραμμο με το ίδιο πλάτος, ενώ το μήκος του ήταν 0.2mm. Το συγκεκριμένο τμήμα, το οποίο δεν διέθεταν όλες οι προς μελέτη συσκευές, μπορούσε να πολωθεί είτε ορθά (ενισχυτής) είτε ανάστροφα (απορροφητής) ή να παραμείνει χωρίς πόλωση ώστε να αποτελεί ένα παθητικό τμήμα στη μέση της διάταξης. Τέλος το τρίτο τμήμα είχε του ρόλο του τμήματος ενίσχυσης και διέθετε μήκος 2,38mm, πεπλατυσμένο σχήμα, με γωνία εκλέπτυνσης 1° . Στο σχήμα 4.21 παρουσιάζονται σχηματικά οι δύο δομές.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



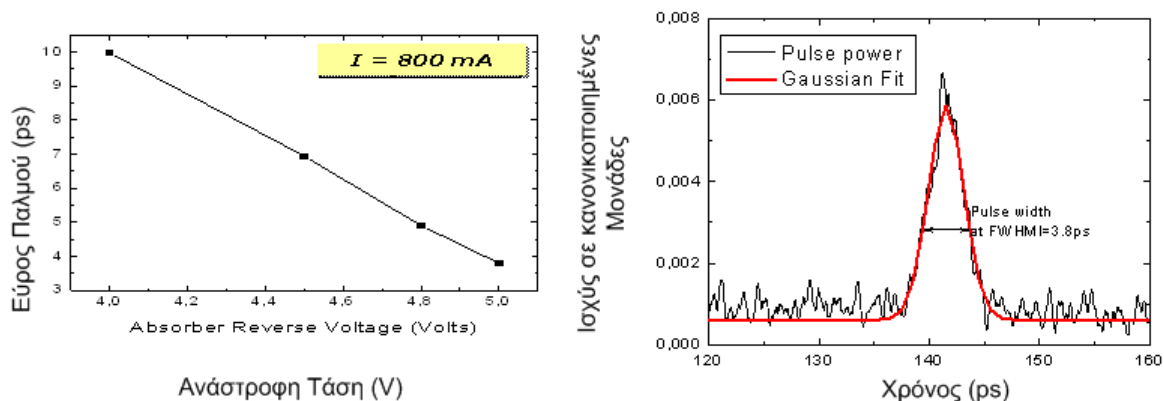
Σχήμα 4-21 Σχηματική απεικόνιση των δύο διατάξεων πεπλατυσμένου ενισχυτή. Η αριστερή διάταξη ακολουθεί κυματοδότηση μέσω διαφοράς του δείκτη διάθλασης, ενώ η δεξιά ακολουθεί κυματοδότηση μέσω της απολαβής.

4.3.4 Πειραματικά αποτελέσματα για τις αδιαβατικά πεπλατυσμένες διατάξεις

Στις συγκεκριμένες διατάξεις πραγματοποιήθηκαν οι ίδιες μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν και για την περίπτωση των συσκευών της Inpolume, με την βασική διαφορά ότι η ιδιαίτερη γεωμετρία που είχαν οι συσκευές της Alcatel, και πιο συγκεκριμένα η πολύτροπη κυματοδότηση που επιτυγχανόταν, δημιούργησε ένα προφίλ εγγύς πεδίου με πολύ μεγάλο αριθμητικό άνοιγμα και αρκετά χωρικά τοπικά μέγιστα στην ένταση του εκπεμπόμενου οπτικού πεδίου. Αυτή η ιδιομορφία οδήγησε σε χαμηλό συντελεστή σύζευξης με την οπτική ίνα, με αποτέλεσμα το ποσοστό ισχύος που μπόρεσε να συγκεντρωθεί να είναι εξαιρετικά μικρό.

Η μικρή οπτική ισχύς δυσχέρανε την καταγραφή των οπτικών παλμών με αποτέλεσμα να υπάρχει μικρός όγκος αποτελεσμάτων για τις συγκεκριμένες συσκευές. Η πρώτη διάταξη (δύο τμημάτων) παρουσίασε λειτουργία εγκλειδωσης τρόπων για τιμές ανάστροφης τάσης μεγαλύτερες από $-4V$. Η εξέλιξη του εύρους του παλμού με την τάση ακολουθεί την ίδια συμπεριφορά όπως αναφέρθηκε και για τις συσκευές της Inpolume. Σταθεροί παλμοί παρόλα αυτά καταγράφηκαν μόνο για ένα μικρό εύρος τιμών ($-4V < V < -5V$). Βασικός λόγος για αυτό ήταν οι αυξημένες απώλειες για μεγαλύτερες τάσεις που μείωναν περαιτέρω την ήδη περιορισμένη οπτική ισχύ που συλλεγόταν. Στο σχήμα 4.22 παρουσιάζεται η εξέλιξη του χρονικού εύρους του παλμού με την ανάστροφη τάση για $800mA$ ρεύματος στο τμήμα ενίσχυσης (αριστερά), ενώ στο δεξί τμήμα παρουσιάζεται ένας χαρακτηριστικός παλμός. Στον πίνακα 4.2 παρουσιάζονται οι οπτικές μετρήσεις για τη συγκεκριμένη διάταξη. Ο στενότερος παλμός που μετρήθηκε είχε εύρος της τάσης των $3.8ps$ με ισχύ κορυφής $1.7W$. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι διατάξεις με πεπλατυσμένη γεωμετρία ενισχυτή παρήγαγαν όντως πολύ μεγαλύτερες τιμές ισχύος σε σύγκριση με τις διατάξεις της Inpolume.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 4-22 Εξέλιξη του εύρους παλμού ως προς την ανάστροφη τάση για ρεύμα ενισχυτή 800mA (αριστερά), τυπικός παλμός μετά από τη διαδικασία αυτοσυσχέτισης (δεξιά).

V_{abs} (V)	I_{gain} (mA)	FWHM (ps)	P_{av} (mW)	P_{peak} (W)
-4	820	9.98	122.32	0.78607
-4	850	9.7	129.8	0.85822
-4	900	10.12	140.8	0.89231
-4	950	10.3	151.58	0.94385
-4	1000	10.8	159.17	0.94522
-4	1050	10.97	168.3	0.98395
-4	1100	12.3	174.9	0.91197
-4.5	800	6.94	112.31	1.0379
-4.5	850	6.5	122.32	1.20692
-4.5	900	8	131.56	1.0547
-4.5	950	9.9	136.62	0.88506
-4.5	1050	10.11	149.16	0.94623
-4.8	810	4.9	110.77	1.44985
-4.8	860	5.55	119.35	1.37919
-5	800	3.8	101.2	1.70802
-5	850	9.11	113.96	0.80229

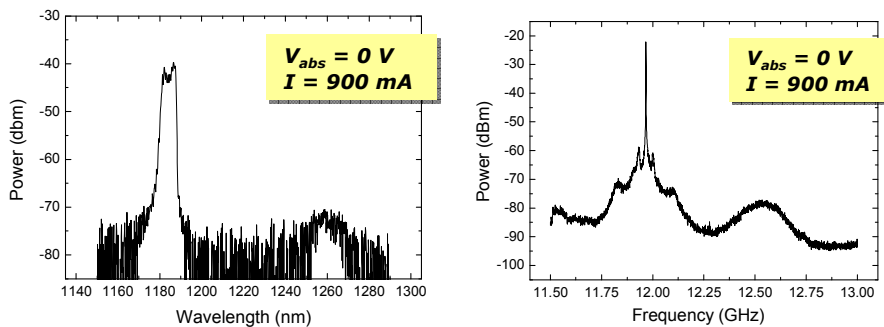
Πίνακας 4.2 Το εύρος του παλμού, η μέση ισχύς καθώς και η ισχύς κορυφής για όλο το εύρος της παλμικής λειτουργίας.

Η δεύτερη συσκευή που χαρακτηρίστηκε ήταν τριών τμημάτων, ενώ η κυματοδήγηση βασιζόταν στην απολαβή (gain-guided). Λόγω της ύπαρξης τριών τμημάτων η διάταξη χαρακτηρίστηκε με δύο διαφορετικά σενάρια πόλωσης. Στην πρώτη περίπτωση το τρίτο τμήμα (200μm) παρέμεινε ανοιχτοκυκλωμένο. Υπό αυτές τις συνθήκες πόλωσης δεν ήταν εφικτή η καταγραφή παλμικής λειτουργίας, παρόλο που το ηλεκτρικό φάσμα

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

παρουσίαζε μια εξαιρετικά στενή κορυφή. Το γεγονός αυτό μπορεί να αποδοθεί στη χαμηλή ισχύ που, με τη σειρά της, συσχετιζόταν με τις υψηλές απώλειες που εισήγαγε το ανοιχτοκυκλωμένο τμήμα. Ένα ακόμα γεγονός που ενισχύει το προηγούμενο σενάριο είναι η έναυση εξαναγκασμένης εκπομπής πρώτα από το ES και μετά από το GS. Κάτι τέτοιο επιτυγχάνεται μόνο στην περίπτωση που λόγω αυξημένων απωλειών στο GS, αυτό οδηγείται γρήγορα σε κορεσμό και ενισχύεται η εκπομπή από υψηλότερες ενεργειακά ζώνες [38]-[39].

Στη δεύτερη περίπτωση, το τμήμα των 200μm πολώθηκε ορθά ώστε να μειωθούν οι απώλειες, ενώ κατάλληλα διαμορφωμένο δικτύωμα αντιστάσεων διασφάλιζε την ομογενή έγχυση ρεύματος και στα δύο τμήματα. Υπό αυτές τις συνθήκες, η εξέλιξη του φάσματος με το ρεύμα ήταν τυπική. Τουτέστιν για χαμηλές τιμές ρεύματος παρουσιάστηκε εξαναγκασμένη εκπομπή από το GS, ενώ η περαιτέρω αύξηση του ρεύματος επέτρεψε την ύπαρξη διπλής φασματικής εκπομπής και από τα δύο μήκη κύματος. Παρόλα αυτά, υπό καμία τιμή ρεύματος ή τάσης το λέιζερ δεν παρουσίασε σταθερή παλμική λειτουργία. Τα ηλεκτρικά φάσματα παρουσίαζαν αστάθειες και δύο πολύ ευρείες κορυφές που αντιστοιχούσαν σε δύο διαφορετικούς ρυθμούς επανάληψης, για το κάθε μήκος εκπομπής, αλλά δεν υποδήλωναν την ύπαρξη εγκλειδωσης τρόπων.



Σχήμα 4-23 Οπτικό φάσμα που παρουσιάζει το ES να είναι πάνω από το κατώφλι εξαναγκασμένης εκπομπής (αριστερά), αντίστοιχο ηλεκτρικό φάσμα που δείχνει μια κορυφή σε συχνότητα που αντιστοιχεί στο ρυθμό επανάληψης του ES (δεξιά).

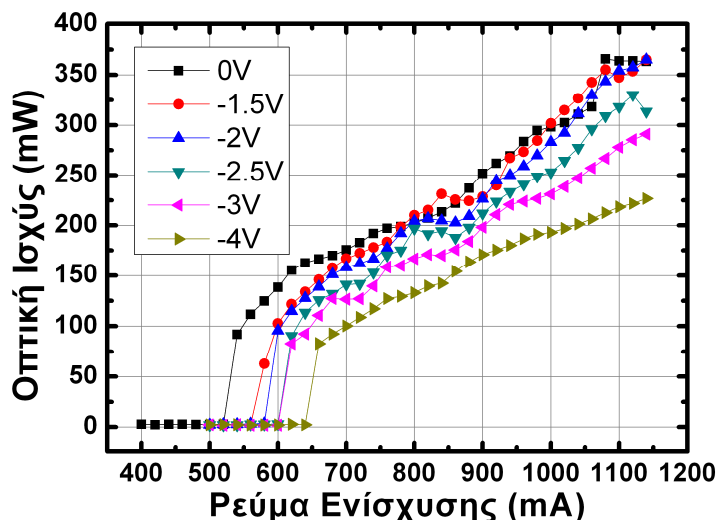
4.3.5 Πειραματικά αποτελέσματα για τη δεύτερη γενιά αδιαβατικά εκλεπτυσμένων διατάξεων.

Η πειραματική διερεύνηση των λέιζερ κβαντικών τελειών με αδιαβατικά πεπλατυσμένη γεωμετρία επέτρεψε την εξαγωγή βασικών συμπερασμάτων για τους κατασκευαστικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα της παλμικής λειτουργίας σε τέτοιες διατάξεις. Πιο συγκεκριμένα αναδείχτηκαν προβλήματα όπως το πολύτροπο χωρικά εγγύς πεδίο της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, καθώς και η χαμηλή ποιότητα της παλμικής λειτουργίας. Τα δύο αυτά εγγενή μειονεκτήματα οφείλονταν στον αναποτελεσματικό αρχικό σχεδιασμό της διάταξης, ο οποίος δεν επέτρεπε την αποδοτική σύζευξη της ισχύος σε οπτική ίνα (low coupling efficiency) αλλά και επιδρούσε σημαντικά σε χαρακτηριστικά μεγέθη όπως η διαφορική απολαβή και απορρόφηση, με αποτέλεσμα τον περιορισμό των επιδόσεων.

Τα συμπεράσματα που εξάχθηκαν μέσω της πειραματικής διερεύνησης της πρώτης γενιάς τέτοιων διατάξεων βοήθησαν στον επανασχεδιασμό τους ώστε να αρθούν οι παραπάνω αδυναμίες. Πιο συγκεκριμένα όλες οι διατάξεις ακολουθούσαν σχεδιαστική προσέγγιση που επέτρεπε την κυματοδότηση μέσω της μεταβολής του δείκτη

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

25. Όπως είναι εμφανές η επίδραση της ανάστροφης τάσης στις καμπύλες είναι παρόμοια με αυτή που παρατηρήθηκε στις διατάξεις ευθύγραμμης γεωμετρίας, δηλαδή παρατηρείται έντονη μείωση της οπτικής ισχύος και αύξηση του ρεύματος κατωφλίου λόγω της εξάρτησης που υπάρχει μεταξύ των απωλειών και της ανάστροφης τάσης. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι η αυξημένη ενεργός περιοχή της διάταξης, η οποία οφείλεται στο αδιαβατικά εκλεπτυσμένο τμήμα ενίσχυσης επέτρεψε την ραγδαία αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος. Η υψηλότερη τιμή οπτικής ισχύος που καταγράφηκε ήταν 363mW και παρατηρήθηκε όταν η ανάστροφη τάση ήταν μηδενική. Η αύξηση της ανάστροφης τάσης στην προκειμένη περίπτωση μετέβαλε την κλίση της καμπύλης από 0.39W/A για μηδενική ανάστροφη τάση σε 0.29W/A για τάση ίση με -4V, επιβεβαιώνοντας έτσι την αύξηση των μη κορεσμένων απωλειών της κοιλότητας.



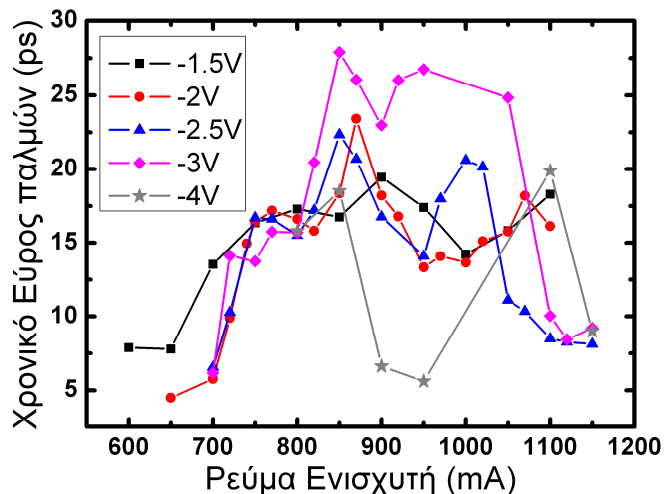
Σχήμα 4-25 Καμπύλες οπτικής έντασης συναρτήσει του ρεύματος άντλησης για διάταξη 3-τμημάτων

Στο σχήμα 4.26 παρουσιάζεται η εξέλιξη του εύρους ημίσειας ισχύος των παραγόμενων παλμών για διαφορετικές συνθήκες πόλωσης. Η πρώτη παρατήρηση συνίσταται στο σχετικά περιορισμένο εύρος συνθηκών πόλωσης που επιτυγχάνεται εγκλειδωση (Τάση: $-1.5V < V < 4V$) καθώς και στο μεγάλο εύρος των οπτικών παλμών που στην καλύτερη περίπτωση έφτασε τα 4.4ps. Στην περίπτωση που η ανάστροφη τάση αυξήθηκε πέραν των -4V παρατηρήθηκε παύση της παλμικής λειτουργίας, ενώ το ηλεκτρικό φάσμα της διάταξης παρουσίασε ισχυρές αστάθειες (αυξημένο εύρος γραμμής και πολλές κορυφές). Αν και η διάταξη είχε υποστεί κατάλληλο σχεδιασμό της γεωμετρίας των τμημάτων της με σκοπό την αύξηση της ενέργειας κορεσμού και κατ' επέκταση την παραγωγή οπτικών παλμών υψηλότερης ποιότητας, κάτι τέτοιο δεν παρατηρήθηκε κατά την πειραματική μέτρηση. Αυτό το γεγονός οφείλεται στην ορθή πόλωση του ενός ευθύγραμμου τμήματος, με αποτέλεσμα τον ταχύτατο κορεσμό του και την ενίσχυση φαινομένων αυτοδιαμόρφωσης.

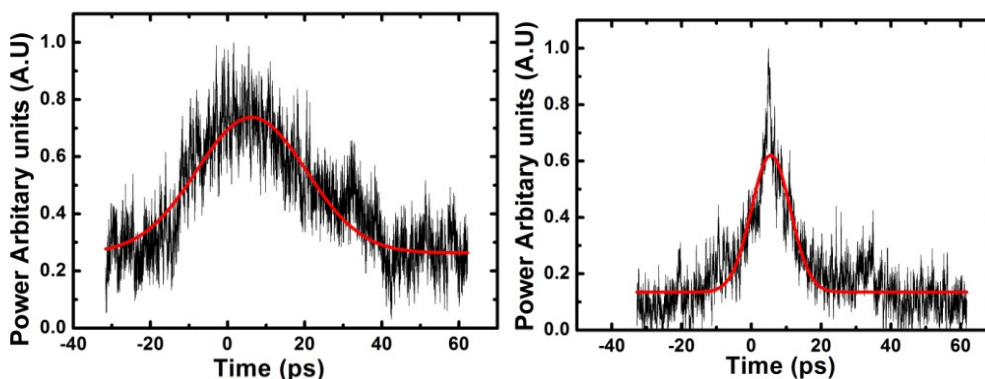
Η περαιτέρω μελέτη των χρονικών χαρακτηριστικών των παλμών ως προς τις συνθήκες πόλωσης παρουσίασε δύο διακριτές περιοχές λειτουργίας. Η πρώτη περιοχή παρατηρήθηκε για ασθενές ρεύμα άντλησης και περιλάμβανε την αύξηση του χρονικού εύρους του παλμού με την αύξηση του ρεύματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η αύξηση του εύρους των παλμών από 4.4 σε 23.2ps όταν η τάση του απορροφητή είχε τεθεί ίση με -2V ενώ το ρεύμα άντλησης αυξήθηκε από 650 σε 820mA. Η δεύτερη περιοχή λειτουργίας παρατηρήθηκε για μεγάλες τιμές άντλησης οι οποίες πλησίαζαν την μέγιστη επιτρεπτή τιμή που μπορούσε να εφαρμοστεί με ασφάλεια στη διάταξη. Σε αυτή

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

τη περιοχή λειτουργίας παρατηρήθηκε πτώση του χρονικού εύρους του παλμού με την ενίσχυση του ρεύματος άντλησης. Η πιο χαρακτηριστική περίπτωση αυτής της περιοχής λειτουργίας παρατηρήθηκε όταν η ανάστροφη τάση ήταν ίση με $-3V$ και το ρεύμα άντλησης αυξήθηκε από $1050mA$ σε $1150mA$. Η πτώση του χρονικού εύρους ήταν της τάξης των $19ps$ (από 24.8 σε $8.2ps$), ενώ συνοδεύτηκε από αύξηση της μέσης εκπνεόμενης ισχύος κατά $53mW$ (σχήμα 4.27).



Σχήμα 4-26 Χρονικό εύρος οπτικών παλμών προς το ρεύμα ενίσχυσης για τη διάταξη 3-τμημάτων



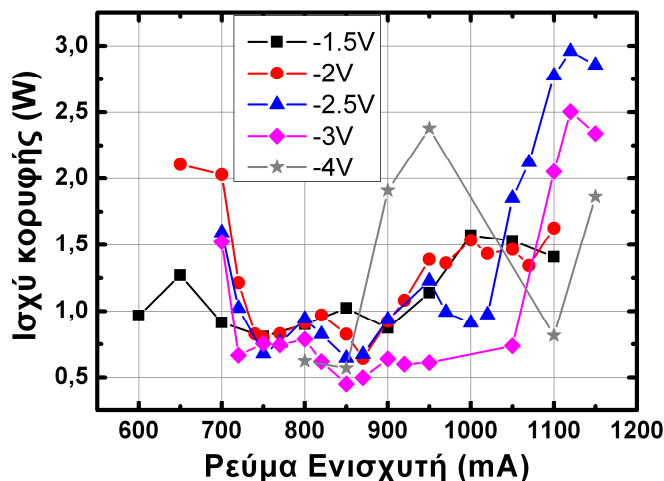
Σχήμα 4-27 Αποτελέσματα αυτοσυσχέτισης (μαύρο) και η Gaussian προσαρμογή (κόκκινο) για τους παλμούς της διάταξης 3-τμημάτων όταν η ανάστροφη τάση ήταν ίση με $-3V$ ενώ το ρεύμα κυμαινόταν από $1050mA$ (αριστερά) μέχρι $1150mA$ (δεξιά)

Το αίτιο πίσω από αυτή τη ισχυρή μείωση του χρονικού εύρους δεν έχει αποσαφηνιστεί ακόμα, αλλά αξίζει να σημειωθεί ότι η ταυτόχρονη μελέτη του οπτικού φάσματος επέτρεψε την καταγραφή μίας ισχυρής μείωσης του εύρους ζώνης του οπτικού φάσματος στην εν λόγω περιοχή λειτουργίας. Όπως θα δειχτεί στο 6^ο κεφάλαιο αυτή η μείωση του οπτικού εύρους σε συνδυασμό με τη μείωση του εύρους των παλμών πιθανώς οφείλεται στην ύπαρξη μη γραμμικών φαινομένων κορεσμού της απολαβής, τα οποία μειώνουν τον αριθμό των διαθέσιμων διαμηκών τρόπων με αποτέλεσμα τη μείωση του θορύβου στη διάταξη. Επιπροσθέτως αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγκεκριμένη διάταξη δεν επέτρεψε την καταγραφή εκπομπής από την φασματική περιοχή του ES ακόμα και για υψηλές τιμές ηλεκτρικής άντλησης.

Τέλος η καταγραφή τόσο του εύρους των παλμών όσο και της μέσης ισχύος επέτρεψε τον υπολογισμό της ισχύος κορυφής, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα 4.28. Σε πλήρη

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

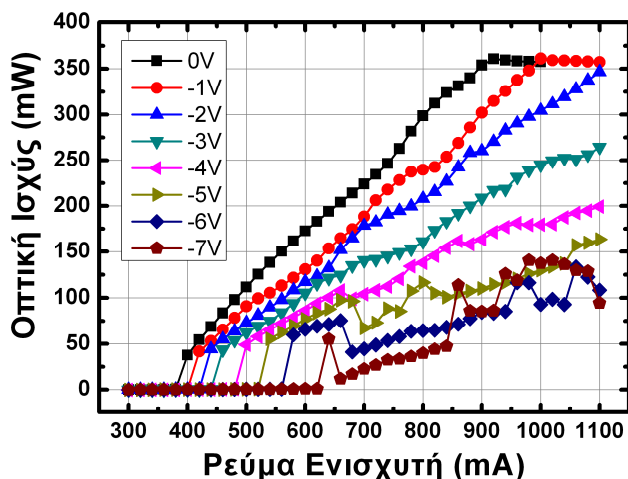
αντιστοιχία με τις μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους και αφορούσαν διατάξεις ευθύγραμμης γεωμετρίας, η ισχύς κορυφής και σε αυτή τη περίπτωση παρουσίαζε τοπικά μέγιστα. Η υψηλότερη τιμή ισχύος κορυφής καταγράφηκε για ανάστροφη τάση ίση με $-2.5V$ για ρεύμα ενισχυτή ίσο με $1100mA$ και ήταν $2.96W$. Αυτή η υψηλή τιμή επιτεύχθηκε λόγω της ύπαρξης της ταυτόχρονης αύξησης της μέσης ισχύος και της μείωσης του εύρους των παλμών που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο.



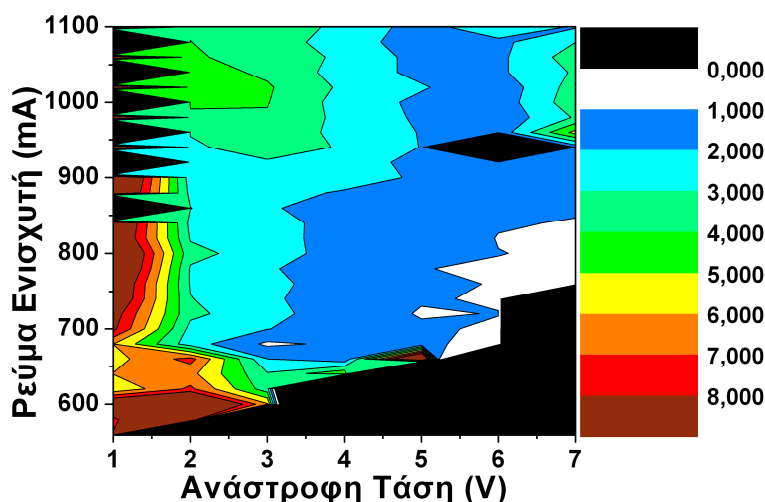
Σχήμα 4-28 Ισχύ κορυφής συναρτήσεϊ των συνθηκών πόλωσης για τη διάταξη των 3-τμημάτων.

Με σκοπό την επιβεβαίωση της εικασίας ότι ένας βασικός λόγος για την αναποτελεσματική διαδικασία εγκλειδωσης στην διάταξη 3 τμημάτων ήταν η ύπαρξη ενός τμήματος ευθύγραμμης γεωμετρίας σε κατάσταση ορθής πόλωσης μελετήθηκε μία ακόμα διάταξη πεπλατυσμένης γεωμετρίας. Η εν λόγω διάταξη αποτελείτο από 2 τμήματα, το πρώτο τμήμα είχε μήκος $2.1mm$ και γωνία 2° , ενώ το δεύτερο τμήμα ήταν ευθύγραμμο με μήκος $0.4mm$ και αποτελούσε τον κορεσμένο απορροφητή της διάταξης. Το συνολικό μήκος της διάταξης επέτρεψε ρυθμό επανάληψης ίσο με $15.9GHz$. Στο σχήμα 4.29 παρουσιάζεται η εκπνεμπόμενη οπτική ισχύς συναρτήσεϊ του ρεύματος άντλησης για διαφορετικές τιμές ανάστροφης τάσεϊ. Η πτώση της μέσης ισχύος με την αύξηση του ρεύματος ήταν αντίστοιχη με αυτή της διάταξης 3-τμημάτων ενώ η μέγιστη οπτική ισχύς που καταγράφηκε ήταν $360mW$, επιβεβαιώνοντας έτσι ότι οι δύο διατάξεις εκπνεμπουν παρεμφερή επίπεδα ισχύος.

Η βασική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο διατάξεων παρατηρήθηκε στην περίπτωση μέτρησης του χρονικού εύρους των παραγόμενων παλμών αλλά και στο εύρος των τιμών πόλωσης που παρατηρήθηκε αποδοτική εγκλειδωση τρόπων. Στο σχήμα 4.30 παρουσιάζεται σε χρωματική απεικόνιση το εύρος των παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης. Είναι εμφανές ότι η περιοχή εγκλειδωσης τρόπων, στην οποία οι παραγόμενοι παλμοί έχουν εύρος μικρότερο των $2ps$ είναι εξαιρετικά διευρυμένη (μπλε περιοχή), ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε μεγάλο εύρος τιμών πόλωσης που επέτρεψαν οπτικούς παλμούς με χρονικό εύρος της τάξεϊ των fs (λευκή περιοχή). Αυτή η τελευταία περιοχή λειτουργίας επιτεύχθηκε σε περιοχές πόλωσης όπου η ανάστροφη τάση ήταν μεγαλύτερη των $-5V$ ενώ το ρεύμα του ενισχυτή ήταν κοντά στο κατώφλι λειτουργίας. Ο παλμός με το μικρότερο χρονικό εύρος ($830fs$) καταγράφηκε για ανάστροφη τάση ίση με $-6V$ ενώ το ρεύμα του ενισχυτή ήταν $680mA$ (σχήμα 4.31). Η συσχέτιση των σχημάτων 4.29 και 4.30 επέτρεψε το υπολογισμό της ισχύος κορυφής, ο οποίος παρουσιάζεται στο σχήμα 4.32.

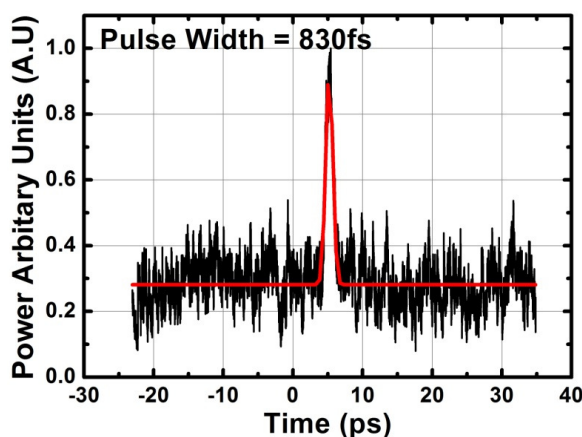


Σχήμα 4-29 Οπτική ισχύς προς τις συνθήκες πόλωσης για τη διάταξη των 2-τμημάτων

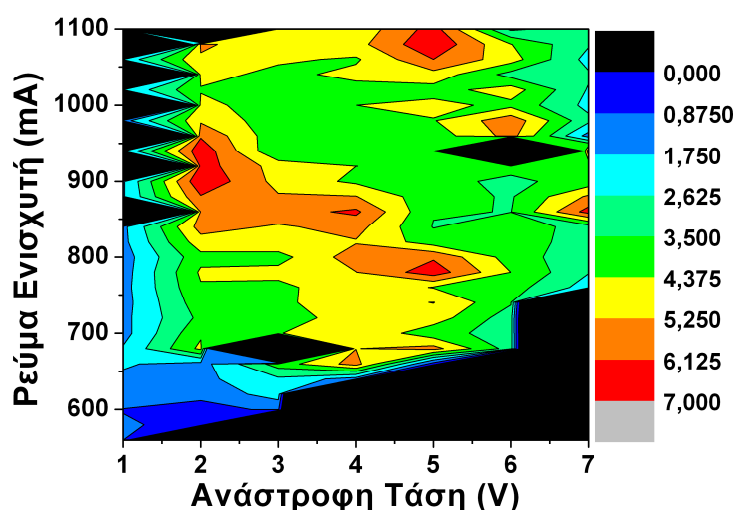


Σχήμα 4-30 Χρωματική αναπαράσταση του χρονικού εύρους των παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης για διάταξη 2-τμημάτων

Είναι εμφανές ότι η μικρή χρονική διάρκεια των παλμών σε συνδυασμό με την αυξημένη μέση οπτική ισχύ της διάταξης, επιτρέπει την ραγδαία αύξηση της ισχύος κορυφής. Πιο συγκεκριμένα παρουσιάζονται αρκετά τοπικά μέγιστα (κόκκινες περιοχές) τα οποία είτε αντιστοιχούν σε περιοχές με μεγάλη οπτική ισχύ και αυξημένο εύρος παλμών είτε σε περιοχές με σχετικά μικρή τιμή μέσης ισχύος αλλά οπτικούς παλμούς με χρονικό εύρος μικρότερο των ps. Η μέγιστη ισχύ κορυφής που καταγράφηκε ήταν 6.8W και παρατηρήθηκε για ανάστροφη τάση ίση με -5V και ένταση ρεύματος ίση με ≈ 800 mA.



Σχήμα 4-31 Αποτέλεσμα αυτοσυσχέτισης (μαύρο) και η Gaussian προσαρμογή (κόκκινο) για την διάταξη 2-τμημάτων όταν η ανάστροφη τάση ήταν ίση με -6V ενώ το ρεύμα ήταν ίσο με 680mA



Σχήμα 4-32 Χρωματική αναπαράσταση της ισχύος κορυφής των παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης για διάταξη 2-τμημάτων

Τέλος η σημαντικά βελτιωμένες επιδόσεις της διάταξης των 2-τμημάτων σε σύγκριση με την διάταξη των 3-τμημάτων, η έλλειψη φαινομένων κορεσμού της απολαβής (μείωση του εύρους ζώνης του οπτικού φάσματος) συνηγορούν στην υψηλότερη ενέργειας κορεσμού της διάταξης των 2-τμημάτων.

4.4 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκαν συνοπτικά οι διαφορετικές πειραματικές μετρήσεις που απαιτούνται για την χαρτογράφηση της λειτουργίας των διατάξεων, ενώ στη συνέχεια παρουσιάστηκε η πειραματική διάταξη η οποία χρησιμοποιήθηκε για την διερεύνηση της επίδρασης των συνθηκών πόλωσης στην ποιότητα της παλμικής λειτουργίας. Κατά αντιστοιχία με τα θεωρητικά αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, τεκμηριώθηκαν πειραματικά φαινόμενα όπως η αύξηση του χρονικού εύρους των παλμών με την αύξηση του ρεύματος του ενισχυτή ή με τη μείωση της ανάστροφης πόλωσης στον απορροφητή, ενώ πραγματοποιήθηκε ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των διατάξεων ο οποίος επέτρεψε τον υπολογισμό χαρακτηριστικών

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

παραμέτρων, όπως η παρασιτική αντίσταση μεταξύ των διαφορετικών τμημάτων, καθώς και της επίδοσης του απορροφητή ως φωτοβολταϊκό στοιχείο. Τέλος μελετήθηκαν δύο διαφορετικές γενιές διατάξεων, οι οποίες διέθεταν αδιαβατικά πεπλατυσμένο τμήμα ενίσχυσης. Η ποιότητα της εγκλείδωσης τρόπων προς τις συνθήκες πόλωσης διερευνήθηκε και για αυτές τις δομές, επιβεβαιώνοντας τις ομοιότητες που παρουσιάζουν τα δύο είδη διατάξεων. Επιπροσθέτως αναδείχτηκαν τα προβλήματα καθώς και τα εγγενή πλεονεκτήματα των πεπλατυσμένων δομών σε σύγκριση με δομές ευθύγραμμης γεωμετρίας.

5. ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΕΚΠΛΕΙΔΩΣΗ ΣΕ ΛΕΙΖΕΡ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΔΙΠΛΗΣ ΠΑΛΜΙΚΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα που σχετίζονται με την ύπαρξη διπλής εκπομπής παλμών από το GS και το ES. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώνουν τις θεωρητικές προβλέψεις που παρουσιάστηκαν στο 3^ο κεφάλαιο και αναδεικνύουν τρεις περιοχές λειτουργίας που σχετίζονται με την ύπαρξη ταυτόχρονης εκπομπής από τις δύο διαθέσιμες φασματικές περιοχές. Η πρώτη περιοχή λειτουργίας σχετίζεται με την επίδραση συνεχούς εκπομπής από το ES στην παλμική λειτουργία του GS, και τη βελτίωση των χρονικών χαρακτηριστικών των παλμών. Η δεύτερη περιοχή περιλαμβάνει την σταθερότητα του χρονικού εύρους των παλμών του ES ως προς τις συνθήκες πόλωσης, ενώ η τρίτη περιοχή σχετίζεται με την δυνατότητα ανεξάρτητης εγκλειδωσης των τρόπων κάθε φασματικής περιοχής (GS/ES) με αποτέλεσμα την παραγωγή δύο ανεξάρτητων σειρών παλμών από διαφορετικό μήκος κύματος. Τέλος, παρουσιάζονται πειραματικά ευρήματα που αφορούν την ύπαρξη ασταθειών λειτουργίας λόγω ταυτόχρονης εκπομπής από το GS και το ES και αποδεικνύουν τη δυσκολία επίτευξης πολυφασματικής λειτουργίας, η οποία παρατηρήθηκε και κατά τη διαδικασία των προσομοιώσεων.

5.1 Εισαγωγή

Η ταυτόχρονη εκπομπή από το GS και το ES αλλάζει σημαντικά τη δυναμική συμπεριφορά του συστήματος, μέσω της μεταβολής του αριθμού των φορέων που βρίσκονται σε κάθε ενεργειακή ζώνη. Αυτή η μεταβολή επιτρέπει την ύπαρξη νέων περιοχών λειτουργίας, οι οποίες μπορούν να λειτουργήσουν υποβοηθητικά στη παλμική λειτουργία και να επιτρέψουν είτε την ύπαρξη οπτικών παλμών με μεγάλη ισχύ κορυφής, είτε να διαμορφώσουν τις κατάλληλες συνθήκες ώστε η διάταξη να εκπέμπει ταυτόχρονα δύο σειρές παλμών από διαφορετικά μήκη κύματος. Ειδικότερα, στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου της ταυτόχρονης εγκλειδωσης από τα δύο μήκη κύματος (GS/ES), το οποίο παρουσιάστηκε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η πειραματική πιστοποίηση του φαινομένου ήταν εξαιρετικά σημαντική, μια και εκτός του ότι επιβεβαίωσε την ορθότητα του υπολογιστικού μοντέλου, επιτρέπει την άμεση αξιοποίηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας σε ένα ευρύ σύνολο εφαρμογών που απαιτούν πολυφασματική λειτουργία [1]-[5].

Στα πλαίσια της πειραματικής διερεύνησης εντοπίστηκαν και άλλες περιοχές λειτουργίας με μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον, που δεν είχαν προβλεφθεί από τις θεωρητικές προσομοιώσεις. Αυτές οι περιοχές περιλαμβάνουν την επίδραση της εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES στην παλμική συμπεριφορά του GS, όσο και τη μελέτη της επίδρασης των συνθηκών πόλωσης στους παλμούς που παράγονται από την υψηλότερη ενεργειακή ζώνη (ES). Όπως θα δειχτεί παρακάτω, ο λόγος που αυτές οι περιοχές δεν παρουσιάστηκαν στις προσομοιώσεις σχετίζεται με τις απλοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο μοντέλο με σκοπό την μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητας.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα που σχετίζονται με την ισχυροποίηση ασταθειών κατά την ύπαρξη ταυτόχρονης φασματικής εκπομπής. Αυτές οι αστάθειες σχετίζονται με την υπερδιαμόρφωση του πλάτους των παραγόμενων παλμών και οφείλονται στην ταλάντωση των ελεύθερων φορέων των δύο σταθμών. Αποτέλεσμα αυτών των ασταθειών είναι η δυσκολία καταγραφής των οπτικών παλμών καθώς και ο σημαντικός περιορισμός της περιοχής που επιτυγχάνονται οι προαναφερθείσες περιοχές λειτουργίας.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή των αποτελεσμάτων είναι ίδια με αυτή που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4. Η μόνη μετατροπή που πραγματοποιήθηκε σχετίζεται με την καταγραφή παλμών από το ES. Πιο συγκεκριμένα, ο κρύσταλλος που χρησιμοποιήθηκε για την διαδικασία της αυτοσυσχέτισης παρουσιάζει ισχυρή επιλεκτικότητα στο μήκος κύματος, ανάλογα με τη γωνία πρόσπτωσης της δέσμης πάνω στην επιφάνεια του. Λαμβάνοντας υπόψη μας ότι οι δυο φασματικές περιοχές (GS-ES) απείχαν απόσταση μεγαλύτερη των 80nm, η ταυτόχρονη καταγραφή και των δύο σειρών παλμών ήταν αδύνατη. Για αυτό το λόγο, με χρήση ειδικού μικρομετρικού ρότορα, πρώτα ο αυτοσυσχετιστής στράφηκε σε γωνία που επέτρεπε την καταγραφή παλμών από το GS (μήκος κύματος 1260-1280nm), ενώ κατόπιν το σύστημα ευθυγραμμίστηκε σε νέα γωνία που ισχυροποιούσε την παραγωγή δεύτερης αρμονικής (second harmonic generation - SHG) από μικρότερα μήκη κύματος (1160-1180nm) που αντιστοιχούσαν στη φασματική περιοχή του ES.

Αν και η επιλεκτικότητα του αυτοσυσχετιστή επέτρεψε την αποφυγή χρήσης επιπλέον οπτικών διατάξεων, όπως φίλτρα για την απομόνωση του κάθε μήκους κύματος, δυσχέρανε την καταγραφή της παλμικής συμπεριφοράς μια και οι μετρήσεις δεν μπορούσαν να πραγματοποιηθούν παράλληλα. Μέσω της καταγραφής του οπτικού φάσματος εντοπίστηκε η ύπαρξη ή μη εκπομπής από το ES, ενώ ο διαχωρισμός της συνεχούς λειτουργίας από το ES και της παλμικής λειτουργίας επετεύχθη μέσω της καταγραφής του ηλεκτρικού φάσματος του λέιζερ. Όπως παρουσιάστηκε στα κεφάλαια 2 και 3, οι δύο φασματικές περιοχές παρουσιάζουν διαφορετικό δείκτη διάθλασης και συνεπώς το οπτικό πεδίο διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα για κάθε μήκος κύματος. Ως εκ τούτου, η φασματική κορυφή που εμφανίζεται στο ηλεκτρικό φάσμα εντοπίζεται σε ελαφρώς διαφορετική ηλεκτρική συχνότητα. Συνεπώς, ανάλογα με το πλήθος των κορυφών αλλά και της συχνότητάς τους, μπορεί να επιβεβαιωθεί η εγκλείδωση τρόπων από το GS-ES ή η ταυτόχρονη παλμική λειτουργία.

Στην προκειμένη πειραματική διερεύνηση χρησιμοποιήθηκαν δύο διατάξεις: η πρώτη είχε 5 στρώματα κβαντικών τελειών, πλάτος κυματοδηγού 6μm και μήκος 2mm, ενώ η δεύτερη ήταν πανομοιότυπη μόνο που το μήκος της ήταν διπλάσιο (4mm). Η χρήση δύο διατάξεων ήταν απαραίτητη λόγω του γεγονότος ότι καμία διάταξη δεν παρουσίασε και τις τρεις περιοχές λειτουργίας ταυτόχρονα. Στην πράξη, η διάταξη 2mm επέδειξε ταυτόχρονη εγκλείδωση των τρόπων και από τα δύο μήκη κύματος, ενώ αντίθετα η διάταξη των 4mm παρουσίασε σταδιακή μετάβαση από το GS στο ES, με αποτέλεσμα να καταστεί δυνατή η μελέτη των άλλων δύο φαινομένων. Η αιτιολόγηση αυτής της διαφορετικότητας μεταξύ των διατάξεων σχετίζεται με τη δυναμική των φορέων ανάλογα με το μήκος της διάταξης [6] και αναλύεται στο κεφάλαιο 7.

5.2 Ταυτόχρονη εγκλείδωση τρόπων από τις δύο διαθέσιμες φασματικές περιοχές (GS/ES)

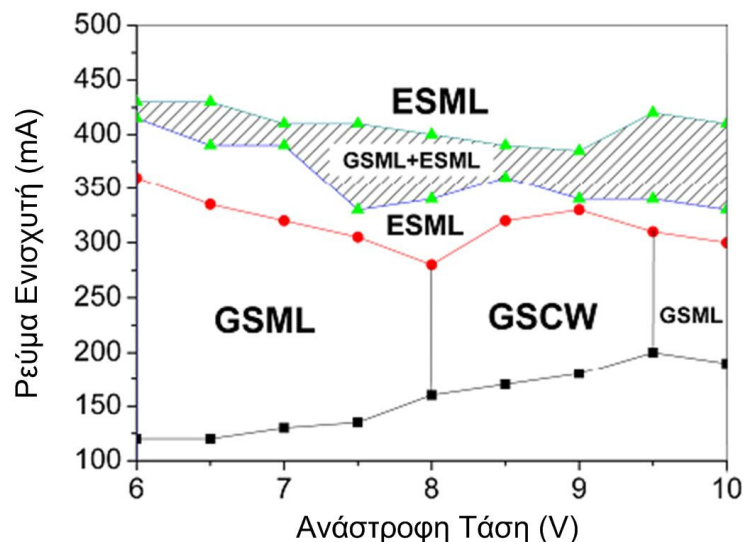
Η δυνατότητα ταυτόχρονης εγκλείδωσης των τρόπων από δύο διαφορετικές φασματικές περιοχές έχει επιτευχθεί στο παρελθόν από λέιζερ στερεάς κατάστασης (Ti: sapphire) [7]-[8], λέιζερ οπτικής ίνας [9], αλλά και από διατάξεις βασισμένες σε κεραμικά υλικά [10]. Παρόλα αυτά, οι δυνατότητες υψηλής ολοκλήρωσης, ο άμεσος ηλεκτρικός έλεγχος, καθώς και τα εγγενή πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα ημιαγωγικά λέιζερ κβαντικών τελειών, τα καθιστά εξαιρετικούς υποψήφιους για την χρήση τους ως γεννήτριες πολλαπλών σειρών παλμών. Το λέιζερ που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις είχε 5 στρώματα κβαντικών τελειών, 6μm πλάτος κυματοδηγού και μήκος 2mm.

Στα πλαίσια της πειραματικής διερεύνησης πραγματοποιήθηκε σάρωση των συνθηκών πόλωσης και ταυτόχρονη καταγραφή του οπτικού και ηλεκτρικού φάσματος καθώς και

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

της εξόδου του οπτικού αυτοσυσχετιστή. Στο σχήμα 5.1 παρουσιάζονται οι διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, ενώ με τους όρους GSML και ESML εννοείται παλμική λειτουργία από το GS και το ES αντίστοιχα, ενώ με τον όρο GSCW εννοείται η ύπαρξη συνεχούς εκπομπής από το GS. Όπως μπορεί να εξαχθεί από το σχήμα, σε χαμηλές τιμές ρεύματος (<300mA) η διάταξη παρουσιάζει εγκλειδωση τρόπων μόνο από το GS λόγω έλλειψης εκπομπής από το ES. Για αυτό το εύρος τιμών ρεύματος, η αύξηση της τάσης στον απορροφητή πέραν του -8V οδηγεί το λέιζερ σε μια ασταθή περιοχή λειτουργίας, ενώ η διάταξη επανέρχεται σε παλμική λειτουργία για ανάστροφη πόλωση ισχυρότερη των -9V.

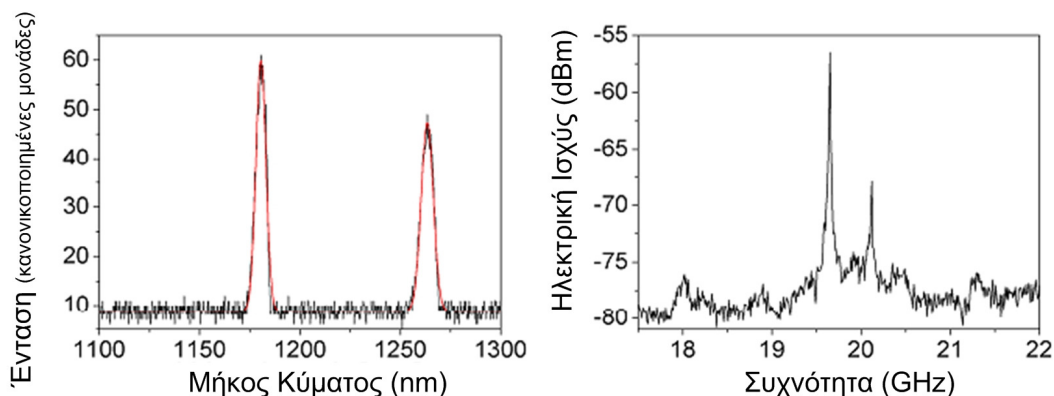
Στην περίπτωση που το ρεύμα άντλησης αυξηθεί πέραν των 350mA, παρατηρείται έναρξη της εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES, με ταυτόχρονη μεταπήδηση της κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος σε μικρότερες συχνότητες, σηματοδοτώντας, έτσι, την αλλαγή φασματικής περιοχής στην οποία επιτυγχάνεται εγκλειδωση. Στην περίπτωση που το ρεύμα άντλησης ξεπεράσει μια προκαθορισμένη από την ανάστροφη τάση τιμή, η οποία κυμαίνεται από 360mA για $V_{abs}=-6V$ και φτάνει τα 300mA για $V_{abs}=-10V$, παρατηρείται μεταβολή της εικόνας του ηλεκτρικού φάσματος που, σε αυτή τη περίπτωση, παρουσιάζει δύο κορυφές, οι οποίες απέχουν $\approx 500MHz$ (σχήμα 5.2). Η απόσταση των φασματικών περιοχών στο οπτικό φάσμα σε αυτή την περιοχή λειτουργίας μετρήθηκε στα 83nm, επιβεβαιώνοντας έτσι ότι οι κορυφές του ηλεκτρικού φάσματος αντιστοιχούν σε εγκλειδωση τρόπων από το GS και το ES (σχήμα 5.2).



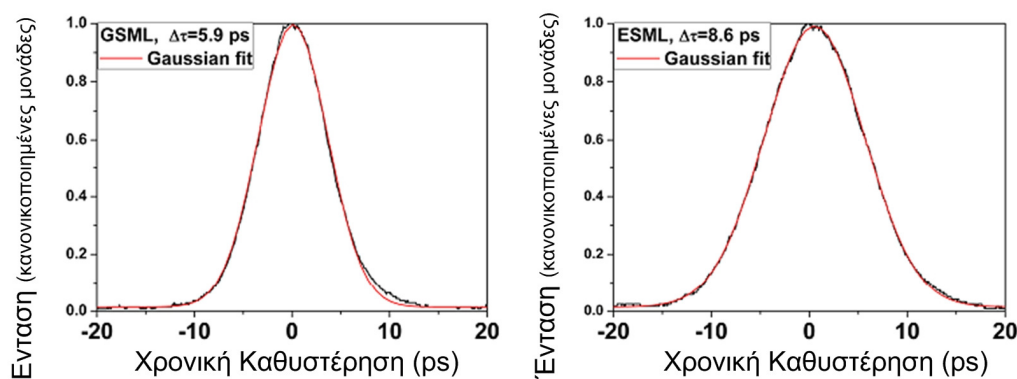
Σχήμα 5-1 Χαρτογράφηση των διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας της διάταξης ως προς τις συνθήκες πόλωσης

Στο σχήμα 5.3 παρουσιάζονται δύο χαρακτηριστικοί παλμοί από αυτή τη περιοχή λειτουργίας, οι οποίοι καταγράφηκαν για ρεύμα άντλησης ίσο με 425mA και ανάστροφη τάση ίση με -6V. Το χρονικό εύρος των παλμών από το ES ήταν 8.6ps, ενώ οι αντίστοιχοι παλμοί του GS ήταν ελαφρώς στενότεροι και το εύρος τους έφτανε τα 5.9ps. Για τον υπολογισμό του χρονικού εύρους και των δύο παλμών θεωρήθηκε ότι το χρονικό τους προφίλ ακολουθεί Gaussian κατανομή (σχήμα 5.3 κόκκινη γραμμή). Το γινόμενο εύρους-ζώνης – χρόνου υπολογίστηκε και για τους δύο παλμούς και ήταν αρκετά υψηλό: 6.7ps και 9ps για το ES και το GS, αντίστοιχα. Κατά συνέπεια απείχαν κατά πολύ από το να θεωρηθούν περιορισμένης μετατροπής (transform limited), ενώ αυτές οι μετρήσεις υπονοούν την ύπαρξη ισχυρής στιγμιαίας μεταβολής της φάσης των παλμών (chirp).

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 5-2 Το οπτικό και ηλεκτρικό φάσμα της διάταξης για την περιοχή που επετεύχθη ταυτόχρονη εγκλειδωση των τρόπων.



Σχήμα 5-3 Δύο χαρακτηριστικοί παλμοί από το GS και το ES αντίστοιχα

Η αύξηση του ρεύματος του ενισχυτή πέραν των 430mA υποβοήθησε την περαιτέρω ενίσχυση του ES, με αποτέλεσμα την διακοπή της παλμικής λειτουργίας από το GS και την επίτευξη εγκλειδωσης μόνο από το ES. Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοχή λειτουργίας που παρουσιάζει διπλή εκπομπή από το GS και το ES βρίσκεται μεταξύ των περιοχών που παρουσιάζεται εγκλειδωση μόνο από το ES. Η εναλλαγή των περιοχών λειτουργίας με την μεταβολή του ρεύματος άντλησης πιθανώς παρέχει μια σημαντική ένδειξη για τις συνθήκες που απαιτούνται για την επίτευξη ταυτόχρονης εγκλειδωσης. Όπως αναφέρθηκε και στην θεωρητική διερεύνηση του φαινομένου, η απαραίτητη συνθήκη για την επίτευξη ταυτόχρονης εγκλειδωσης των τρόπων είναι οι δύο φασματικές περιοχές να παρουσιάζουν παρόμοια επίπεδα μέσης ισχύος.

Στην πειραματική διερεύνηση του φαινομένου, κατά την έναυση του ES προκαλείται ισχυρή πτώση της ισχύος του GS, με αποτέλεσμα τα επίπεδα ισχύος του ES να επηρεάζουν τη δυναμική ισορροπία και τον κορεσμό του απορροφητή σχεδόν αποκλειστικά, μην επιτρέποντας έτσι στους διαμήκεις τρόπους του GS να κλειδώσουν σε μια σταθερή φάση. Στη συνέχεια, η αύξηση του ρεύματος προκαλεί ενίσχυση της ισχύος του GS και αποτέλεσμα αυτού είναι και οι δύο φασματικές περιοχές να αποκτήσουν όμοια ισχύ ($\approx 30\text{mW}$ στην πειραματική μέτρηση) και να επιτραπεί η ταυτόχρονη εγκλειδωση. Η περαιτέρω αύξηση του ρεύματος επιφέρει για μια ακόμα φορά ανισορροπία στα επίπεδα ισχύος, με αποτέλεσμα την έντονη ενίσχυση του ES και την σταθεροποίηση της παλμικής λειτουργίας μόνο από αυτό το μήκος κύματος.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Είναι σαφές ότι τα πειραματικά αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τις θεωρητικές προβλέψεις που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3 επιβεβαιώνοντας έτσι, για πρώτη φορά, τη δυνατότητα ταυτόχρονης παλμικής λειτουργίας τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο.

5.3 Αστάθεια λειτουργίας λόγω ύπαρξης ταυτόχρονης εκπομπής από το GS και το ES

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν, τόσο στην προηγούμενη παράγραφο, επιτεύχθηκαν για ένα περιορισμένο αριθμό διατάξεων και ένα περιορισμένο σύνολο παραμέτρων. Λόγω της δυναμικής φύσης του φαινομένου εγκλείδωσης, η πλειονότητα των διατάξεων παρουσίασε αστάθειες στη λειτουργία της κατά τη διαδικασία πολυφασματικής εκπομπής, όπως είναι η υπερ-διαμόρφωση του πλάτους των παραγόμενων παλμών (Q-switching) [11]-[14]. Αυτό το φαινόμενο δυσχέρανε εξαιρετικά τόσο την καταγραφή των παλμών όσο και την ίδια τη σταθερή ύπαρξη τους.

Το φαινόμενο της υπερδιαμόρφωσης του πλάτους των παλμών παρατηρείται σε όλες τις διατάξεις λέιζερ και έχει ιδιαίτερη σημασία μια και μπορεί να επιτρέψει την παραγωγή παλμών με εξαιρετικά μεγάλη ισχύ κορυφής [15]. Παρόλα αυτά στη γενική περίπτωση μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στην παλμική λειτουργία και δυσκολία στην καταγραφή των παλμών. Τα βασικά αίτια γένεσης του συγκεκριμένου φαινομένου σχετίζονται με την απογύμνωση της ενεργού περιοχής από ελεύθερους φορείς, λόγω ύπαρξης παλμών με μεγάλη οπτική ισχύ. Η αλληλεπίδραση των οπτικών και ηλεκτρικών φορέων οδηγεί τη διάταξη κάτω από το κατώφλι εξαναγκασμένης εκπομπής. Στη συνέχεια, λόγω μείωσης της οπτικής ισχύος, ο πληθυσμός των φορέων επανέρχεται, με αποτέλεσμα την περιοδική έναυση και παύση της λειτουργίας του λέιζερ. Η παρουσία τέτοιων φαινομένων ανιχνεύεται άμεσα στο ηλεκτρικό φάσμα από την παρουσία δορυφόρων κορυφών γύρω από την κεντρική συχνότητα που αντιστοιχεί στο χαρακτηριστικό χρόνο της κοιλότητας. Η φασματική απόσταση από την κεντρική συχνότητα εξαρτάται από τη συχνότητα αποκατάστασης του λέιζερ (relaxation oscillation frequency) και, ως εκ τούτου, αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος του ενισχυτή. Οι περιοχές λειτουργίας που παρατηρείται το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι κοντά στο κατώφλι έναυσης, όπου οι ηλεκτρικοί φορείς έχουν σχετικά περιορισμένη πυκνότητα και κατ' επέκταση μικρή οπτική ισχύς μπορεί να τους απογυμνώσει. Εναλλακτικά σε συνθήκες μακριά από το κατώφλι εκπομπής και υπό την παρουσία εξαιρετικά ισχυρών οπτικών παλμών μπορεί να επιτευχθεί ακριβώς η ίδια συμπεριφορά.

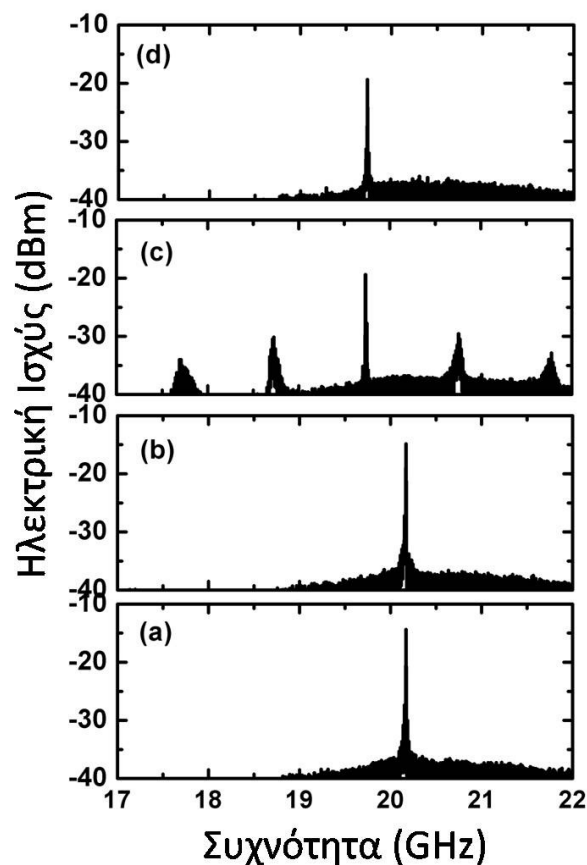
Στην περίπτωση των λέιζερ που μελετήθηκαν, το φαινόμενο της υπερδιαμόρφωσης παρατηρήθηκε σε δύο διακριτές περιοχές λειτουργίας. Η πρώτη παρατηρήθηκε στους παλμούς της φασματικής περιοχής τόσο του GS όσο και του ES για συνθήκες ηλεκτρικής άντλησης που οδηγούσαν τη διάταξη κοντά στο κατώφλι έναυσης της κάθε φασματικής περιοχής. Το αίτιο αυτής της συμπεριφοράς σχετίζεται άμεσα με την απογύμνωση των φορέων και την περιοδική έναυση και παύση λειτουργίας του λέιζερ.

Στο σχήμα 5.4 παρουσιάζεται χαρακτηριστικό ηλεκτρικό φάσμα από αυτή την περιοχή λειτουργίας για μια όμοια διάταξη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Το ρεύμα αυξάνεται σταδιακά από τα 300mA στα 400mA, ενώ η τάση έχει τεθεί στα -7V. Όπως είναι εμφανές δεν παρουσιάζεται ταυτόχρονη εγκλείδωση των τρόπων, αλλά αντίθετα παρατηρείται μια απότομη μετάβαση από το GS στο ES συνοδευόμενη από πλευρικές κορυφές με φασματική απόσταση $\approx 2\text{GHz}$. Η αύξηση του ρεύματος οδηγεί σε σταδιακή μείωση της ισχύος των πλευρικών κορυφών σε συνδυασμό με αύξηση της φασματικής τους απόστασης από την κεντρική. Στην περίπτωση που το ρεύμα άντλησης αυξηθεί περαιτέρω η διάταξη οδηγείται σε

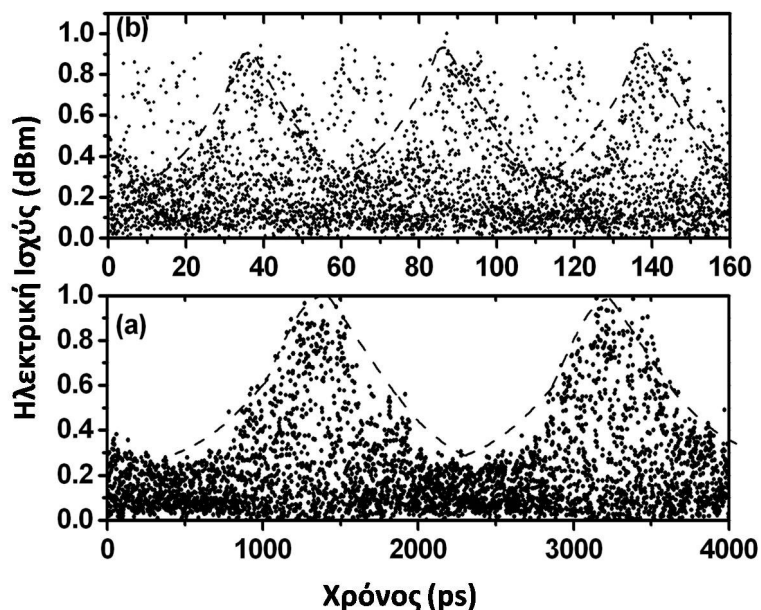
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

σταθεροποίηση της εγκλειδωσης των τρόπων, με αποτέλεσμα την πλήρη σβέση των πλευρικών κορυφών.

Για την διασφάλιση της συσχέτισης του φαινομένου των δορυφόρων κορυφών με την υπερ-διαμόρφωση των παλμών, έγινε χρήση αναλυτή δικτύου, ο οποίος διέθετε οπτική είσοδο με εύρος ζώνης 30GHz, ενώ για την επίτευξη του ηλεκτρικού συγχρονισμού (triggering) χρησιμοποιήθηκε το ίδιο οπτικό σήμα. Ο αναλυτής δικτύου μπορούσε να εντοπίσει την ύπαρξη οπτικών παλμών και να τους απεικονίσει, με τη βασική διαφορά ότι το χρονικό εύρος των παλμών δεν ήταν το πραγματικό αλλά οριζόταν από το εύρος ζώνης του αναλυτή. Στο σχήμα 5.5 παρουσιάζονται δύο στιγμιότυπα της εξόδου με χρήση διαφορετικής χρονικής κλίμακας στην πρώτη παρουσιάζεται μια αργή διαμόρφωση του πεδίου με συχνότητα 2GHz (Q-switching), ενώ στο επόμενο σχήμα, αλλάζοντας τη χρονική ανάλυση του οργάνου, παρατηρείται μια δεύτερη πολύ πιο γρήγορη ταλάντωση της τάξης των 20GHz που αντιστοιχεί στο ρυθμό επανάληψης των οπτικών παλμών. Η ασταθής μορφή που παρουσιάζουν οι παλμοί οφείλεται στην χρονική ολίσθηση (jitter) του συστήματος λόγω ασταθούς λειτουργίας.



Σχήμα 5-4 Ηλεκτρικά φάσματα για αυξανόμενο ρεύμα άντλησης από 300mA(a) σε 450mA(d). Η τάση στον απορροφητή παρέμεινε σταθερή στα -7V

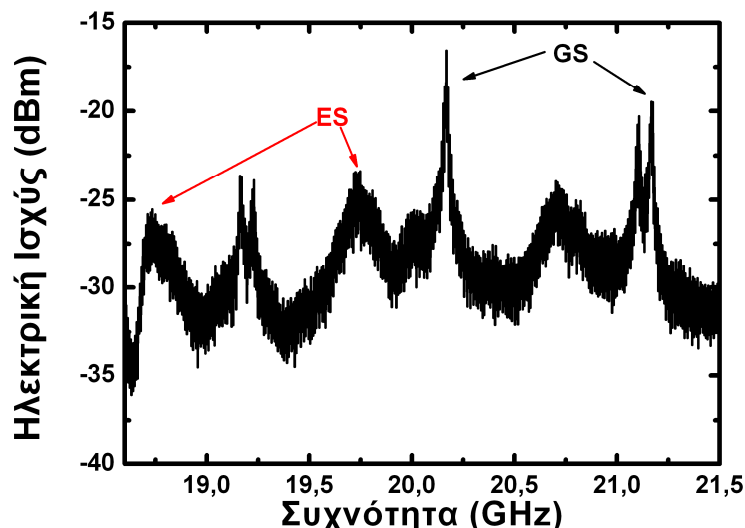


Σχήμα 5-5 Έξοδος του αναλυτή δικτύου για δύο διαφορετικές χρονικές κλίμακες. Παρουσιάζεται μια (α) αργή μεταβολή της τάξης των 2GHz, και (β) μια γρήγορη της τάξης των 20GHz.

Αντίθετα η δεύτερη περιοχή λειτουργίας, δεν απαντάται σε συμβατικές διατάξεις και παρατηρείται κατά την ύπαρξη ταυτόχρονης εγκλειδωσης και από τις δύο φασματικές περιοχές. Όπως δείχτηκε στο 3^ο κεφάλαιο η έναυση εκπομπής από το ES επάγει μια απότομη μεταβολή της πυκνότητας φορέων τόσο στην ενεργειακή ζώνη του ES όσο και στην ζώνη του GS. Αυτή η ταυτόχρονη μεταβολή οφείλεται στο ότι οι φορείς των δύο σταθμών είναι ισχυρά συζευγμένοι [6]. Πιο αναλυτικά η έναυση εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES προκαλεί μια περιοδική ταλάντωση των φορέων λόγω ταλαντώσεων αποκατάστασης (relaxation oscillation). Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι παραγόμενοι από το ES παλμοί να παρουσιάζουν ισχυρά χαρακτηριστικά υπερδιαμόρφωσης του πλάτους τους, ταυτόχρονα αυτές οι μεταβολές του πληθυσμού φορέων της ζώνης του ES επάγουν μεταβολές και στους φορείς του GS. Αποτέλεσμα αυτού είναι η ταυτόχρονη υπερδιαμόρφωση του πλάτους και των δύο σειρών παλμών με συχνότητα, η οποία επιβάλλεται από τις ταλαντώσεις αποκατάστασης της ενεργειακής ζώνης του ES. Η εικόνα του ηλεκτρικού φάσματος σε αυτή τη περιοχή λειτουργίας αποτελείται από δύο διακριτές κορυφές, οι οποίες αντιστοιχούν στην εγκλειδωση της κάθε φασματικής περιοχής, συνακολουθούμενες από διπλές πλευρικές κορυφές, οι οποίες παρουσιάζουν ίση φασματική απόσταση από τις αντίστοιχες κεντρικές. Στο σχήμα 5.6 παρουσιάζεται το ηλεκτρικό φάσμα της διάταξης για συνθήκες που επέτρεψαν την ταυτόχρονη εγκλειδωση και των δύο φασματικών περιοχών. Η ανάστροφη τάση είχε τεθεί ίση με -1V ενώ το ρεύμα ενισχυτή ήταν ίσο με 450mA. Η παρούσα περιοχή λειτουργίας βρισκόταν κοντά στο κατώφλι έναυσης του ES με αποτέλεσμα να παρουσιάζει δύο κεντρικές κορυφές, με συχνότητες 20.16GHz και 19.73GHz αντίστοιχα, οι οποίες αντιστοιχούσαν στην φασματική περιοχή του GS και του ES αντίστοιχα. Παράλληλα στο ηλεκτρικό φάσμα παρουσιάζονται διπλές πλευρικές κορυφές, οι οποίες συνεπάγονται υπερδιαμόρφωση του πλάτους και από τις δύο ζώνες και για τη συγκεκριμένη τιμή ρεύματος έχουν κοινή απόσταση από τις κεντρικές ίση με $\approx 1\text{GHz}$. Τα εύρη των κορυφών που αντιστοιχούν στο GS και στο ES είναι αρκετά διευρυμένα σε αυτή τη περίπτωση, παρόλο που λόγω εγγύτητας στο κατώφλι θα έπρεπε να παρουσιάζουν αποδοτική εγκλειδωση. Αυτή η διεύρυνση πιθανώς οφείλεται στην αστάθεια του συστήματος λόγω της ταλάντωσης των φορέων.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Η καταγραφή ενός σχετικά μεγάλου εύρους τιμών πόλωσης στο οποίο το ηλεκτρικό φάσμα παρουσιάζει δύο διακριτές κεντρικές κορυφές, υπονοώντας ταυτόχρονη εγκλειδωση, σε συνδυασμό το περιορισμένο εύρος συνθηκών πόλωσης, στο οποίο μπορεί όντως καταγράφηκαν οπτικοί παλμοί μέσω του αυτοσυσχετιστή, πιθανώς έχει ως αίτιο το παραπάνω φαινόμενο. Τέλος η συγκεκριμένη συμπεριφορά δεν έχει μόνο αρνητική επίπτωση στις επιδόσεις του συστήματος. Η εκμετάλλευση της υπερδιαμόρφωσης και στα δύο μήκη κύματος (GS/ES) μπορεί να επιτρέψει την παραγωγή δύο ανεξάρτητων σειρών παλμών με εξαιρετικά μεγάλη ισχύ κορυφής.



Σχήμα 5-6 Χαρακτηριστικό ηλεκτρικό φάσμα για ανάστροφη τάση ίση με $-1V$ και ρεύμα ενισχυτή $450mA$, το οποίο παρουσιάζει ταυτόχρονο Q-switching και στις δύο φασματικές περιοχές.

5.4 Επίδραση της εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES στην παλμική συμπεριφορά του GS

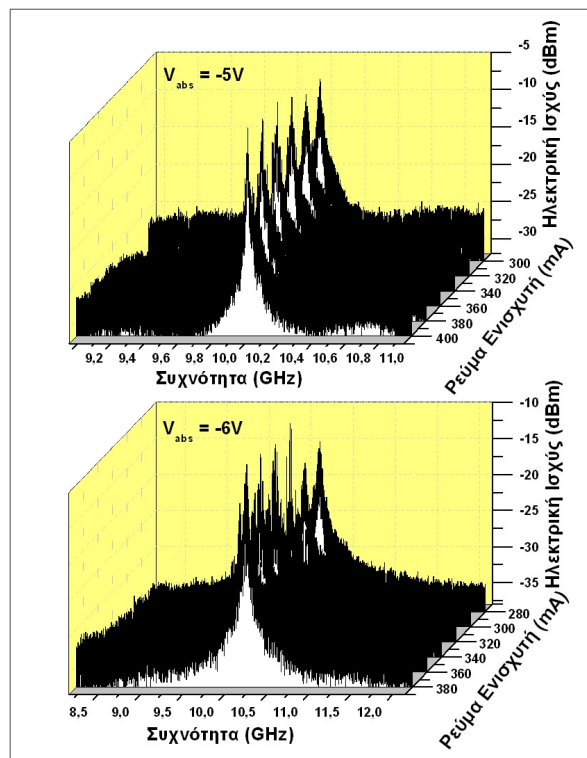
Το τρίτο τμήμα της διερεύνησης περιελάμβανε την μελέτη της επίδρασης της συνεχούς εκπομπής από το ES στην παλμική λειτουργία του GS. Για τον εντοπισμό αυτής της περιοχής λειτουργίας χρησιμοποιήθηκε το οπτικό και ηλεκτρικό φάσμα ενός λέιζερ που ήταν πανομοιότυπο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην παράγραφο 5.2, πλην του μήκους που ήταν $4mm$. Στην πράξη, το οπτικό φάσμα αποδείκνυε την ύπαρξη εκπομπής από το ES, ενώ η ύπαρξη μίας μόνο κορυφής στο ηλεκτρικό φάσμα σε συχνότητα που αντιστοιχούσε στο ενεργό μήκος της κοιλότητας για το GS πιστοποιούσε την εγκλειδωση των τρόπων μόνο από αυτή τη φασματική περιοχή.

Για την επίτευξη αυτής της περιοχής λειτουργίας, το ρεύμα του ενισχυτή αυξήθηκε πέραν των $300mA$, ενώ η ανάστροφη τάση στο τμήμα απορρόφησης έλαβε τιμές μεγαλύτερες των $-5V$. Αυτές οι συνθήκες πόλωσης, όπως αναφέρθηκε και στις θεωρητικές προβλέψεις του 3^{ου} κεφαλαίου, υποβοήθησαν τον γρήγορο κορεσμό των φορέων του GS, είτε μέσω της αύξησης της ηλεκτρικής άντλησης (ρεύμα ενισχυτή), είτε μέσω της αύξησης των μη κορεσμένων απωλειών στο GS και της μείωσης του χαρακτηριστικού χρόνου εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES (αύξηση της ανάστροφης τάσης). Στα σχήματα 5.7 και 5.8 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα οπτικά και ηλεκτρικά φάσματα για τις περιοχές ενδιαφέροντος. Όπως είναι εμφανές στο σχήμα 5.7, υπάρχουν μικρές διακυμάνσεις της κεντρικής συχνότητας του ηλεκτρικού φάσματος εξαιτίας μεταβολής του ενεργού δείκτη διάθλασης από το ρεύμα έγχυσης του ενισχυτή. Παρόλα αυτά, για όλες τις συνθήκες πόλωσης δεν παρατηρείται ύπαρξη δεύτερης κορυφής που να υπονοεί εγκλειδωση τρόπων στη φασματική περιοχή του ES. Στο

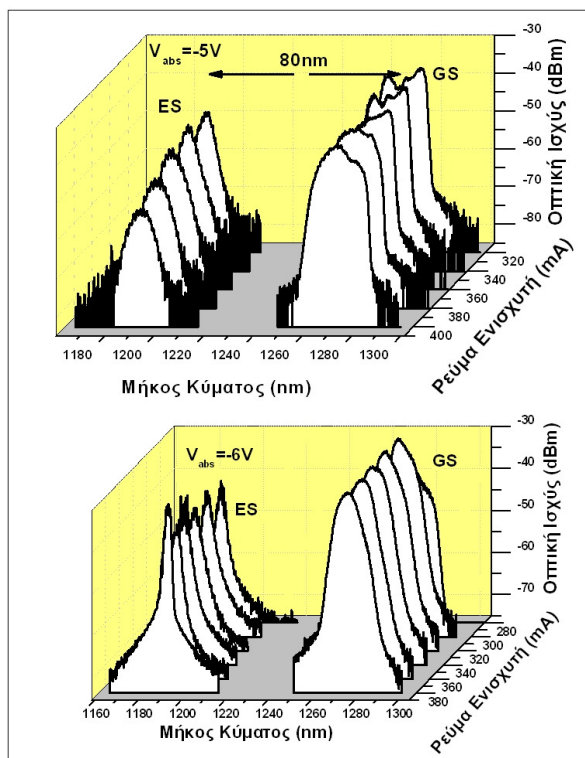
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

σχήμα 5.8 παρατίθενται τα οπτικά φάσματα για το ίδιο εύρος τιμών με το σχήμα 5.7, τα οποία πιστοποιούν την ύπαρξη εκπομπής από το ES, ενώ η φασματική διαφορά μεταξύ των δύο ζωνών ήταν $\approx 80\text{nm}$.

Μετά τον εντοπισμό της περιοχής, μετρήθηκε το χρονικό εύρος των παλμών που παραγόντουσαν από το GS χρησιμοποιώντας τη διαδικασία αυτοσυσχέτισης που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4. Στο σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η εξέλιξη του χρονικού εύρους των παλμών ως προς το ρεύμα ενισχυτή για δύο τάσεις -5 και -6V . Η συμπεριφορά του συστήματος μπορεί να χωριστεί σε δύο διακριτά τμήματα. Το πρώτο τμήμα περιλαμβάνει ρεύμα ενισχυτή μικρότερο των 300mA , όπου τα οπτικά φάσματα παρουσιάζουν εξαναγκασμένη εκπομπή μόνο από το GS. Σε αυτήν την περιοχή, η εξέλιξη του εύρους των παλμών εξαρτάται από το ρεύμα του τμήματος ενίσχυσης, το οποίο προκαλεί αύξηση του χρονικού προφίλ λόγω ισχυροποίησης φαινομένων αυτοδιαμόρφωσης και χρωματικής διασποράς (κεφάλαια 3,4). Η δεύτερη περιοχή λειτουργίας παρατηρείται όταν οι συνθήκες πόλωσης επιτρέψουν την έναυση του ES (σχήμα 5.9 διακεκομμένη γραμμή). Σε αυτή την περιοχή παρατηρείται μείωση του χρονικού εύρους του παλμού. Το ποσοστό της μείωσης εξαρτάται από τις συνθήκες λειτουργίας της διάταξης και δεν είναι σταθερό.

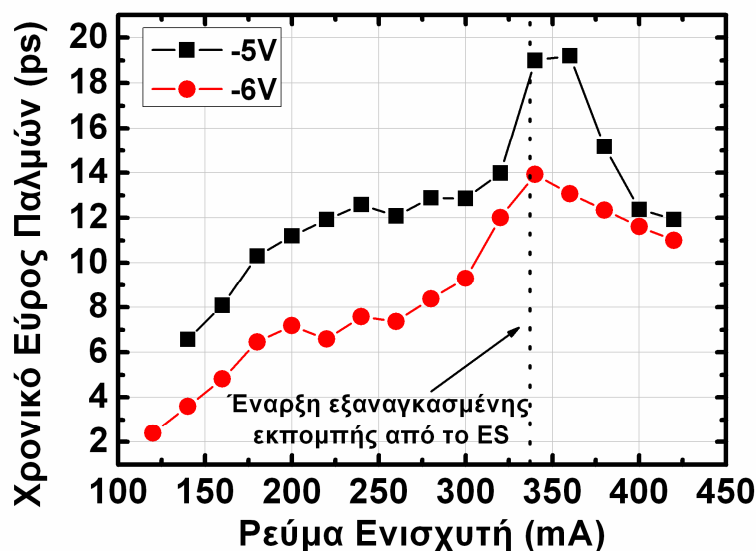


Σχήμα 5-7 Τα ηλεκτρικά φάσματα για δύο διαφορετικές τιμές ανάστροφης πόλωσης ως προς τα ρεύματα άντλησης του τμήματος ενίσχυσης



Σχήμα 5-8 Οπτικά φάσματα για δύο διαφορετικές ανάστροφες πολώσεις -5V και -6V και διάφορες τιμές του ρεύματος ενίσχυσης

Στη περίπτωση του σχήματος 5.9 για ανάστροφη τάση ίση με -5V, η μεταβολή ήταν της τάξης του 38% (από 19,2ps σε 11.9ps), ενώ για τα -6V, η μεταβολή υπολογίστηκε στο 21% (από 13.9ps σε 11ps).

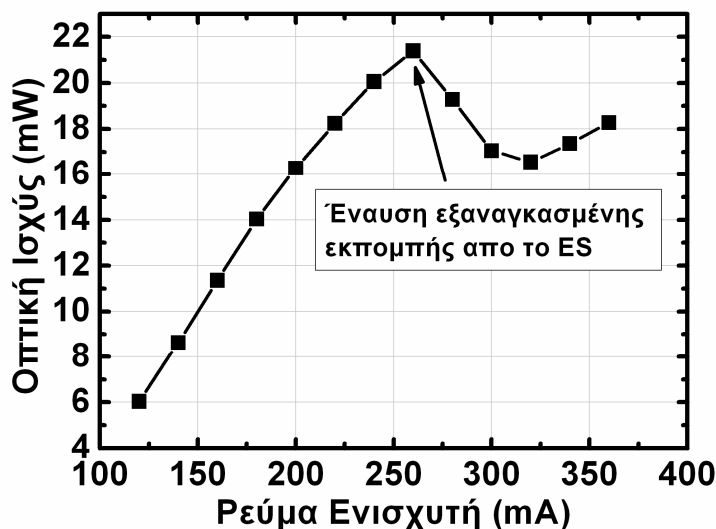


Σχήμα 5-9 Εξέλιξη του χρονικού εύρους των παλμών του GS για δύο διαφορετικές τιμές ανάστροφης τάσης -5 και -6V.

Το συγκεκριμένο φαινόμενο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί άμεσα για αρκετές εφαρμογές, διότι επιτρέπει την μείωση του χρονικού εύρους των παλμών με την αύξηση του ρεύματος του ενισχυτή. Κατά συνέπεια, επιτρέπει την παραγωγή οπτικών παλμών με μεγάλη ισχύ κορυφής υπό καθεστώς υψηλής μέσης ισχύος. Παρόλα αυτά, στη

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

συγκεκριμένη περίπτωση τα οφέλη από την ύπαρξη του φαινομένου δεν είναι τόσο προφανή. Η αλλαγή της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος προκαλεί ταυτόχρονη μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος [16]-[17]. Αυτή η πτώση παρουσιάζεται στο σχήμα 5.10, όπου η έναυση του ES προκαλεί ραγδαία πτώση της συνολικής ισχύος του λέιζερ κατά 82% και μείωση της κβαντικής απόδοσης από 0.11W/A σε 0.04W/A.



Σχήμα 5-10 Συνολική οπτική ισχύς προς το ρεύμα του ενισχυτή για τάση στον απορροφητή ίση με -6V

Το αίτιο της συνολικής συμπεριφοράς του συστήματος έγκειται στα δυναμικά χαρακτηριστικά των ενεργειακών σταθμών. Πιο συγκεκριμένα, όπως δείχτηκε θεωρητικά, η αύξηση του ρεύματος του ενισχυτή προκαλεί την σταδιακή συσσώρευση φορέων στην ενεργειακή ζώνη του GS. Όσο η ηλεκτρική άντληση γίνεται ισχυρότερη, μεγάλο τμήμα των φορέων που αντλούνται αρχίζει να συσσωρεύεται στο ES λόγω αλλαγής των χαρακτηριστικών χρόνων της κάθε ενεργειακής στάθμης [18]. Πριν το σημείο έναυσης της εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES, η πυκνότητα ηλεκτρικών φορέων είναι αρκετά μεγάλη προκαλώντας με τη σειρά της αυξημένη τιμή στον παράγοντα α του υλικού [19]-[21]. Στην περίπτωση, όμως, που ο αριθμός φορέων καταστεί ικανός για λειτουργία λέιζερ από το ES παρατηρείται μια απότομη πτώση του αριθμού ελεύθερων φορέων, που συνεπάγεται απότομη μείωση του παράγοντα διεύρυνσης της οπτικής γραμμής [22].

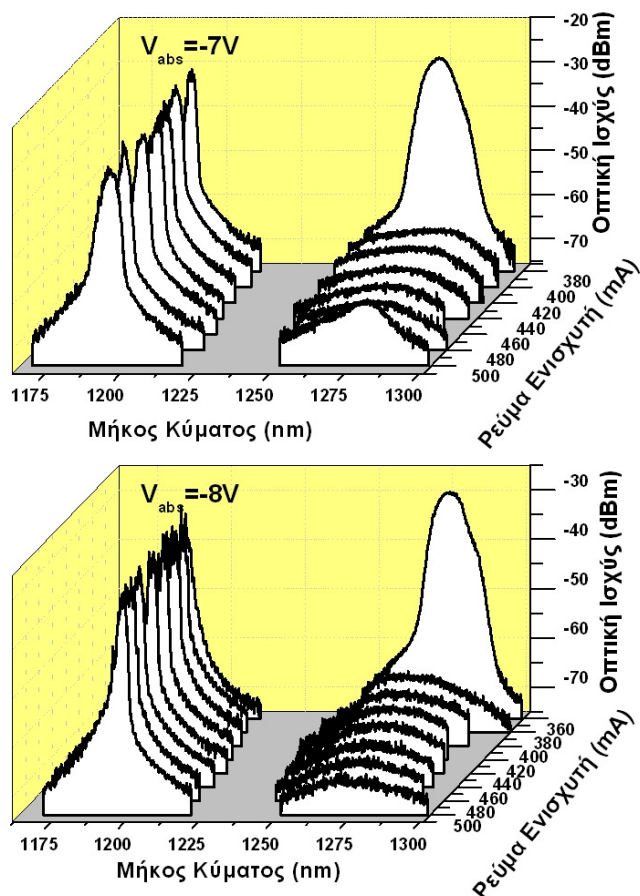
Συνυπολογίζοντας ότι η τιμή του παράγοντα α καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και την ισχύ φαινομένων αυτοδιαμόρφωσης της φάσης (κεφάλαιο 2), η μείωσή του είναι λογικό να επάγει και μείωση του χρονικού εύρους των παλμών. Παρόλο που οι μεταβολές στους πληθυσμούς της κάθε ζώνης προβλέπονται θεωρητικά, το μοντέλο δεν μπορεί να αναπαραστήσει τα πειραματικά αποτελέσματα μια και για λόγους απλότητας έχει θεωρηθεί σταθερή τιμή του παράγοντα α και δεν υπάρχει εξάρτηση από τον αριθμό των φορέων. Επιπλέον, η μείωση της διαθέσιμης οπτικής ισχύος συσχετίζεται και αυτή άμεσα με τη δυναμική των φορέων των διαφορετικών σταθμών. Πιο συγκεκριμένα, η έναυση του ES προκαλεί μετακίνηση μεγάλου αριθμού ηλεκτρικών φορέων από το GS στο ES, με αποτέλεσμα την πτώση της διαθέσιμης απολαβής της ενεργού περιοχής.

5.5 Χαμηλή ευαισθησία του χρονικού εύρους των παλμών από το ES στην αύξηση του ρεύματος άντλησης

Αυξάνοντας το ρεύμα άντλησης στην ίδια συσκευή που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη παράγραφο επιτεύχθηκε εξαναγκασμένη εκπομπή μόνο από το ES.

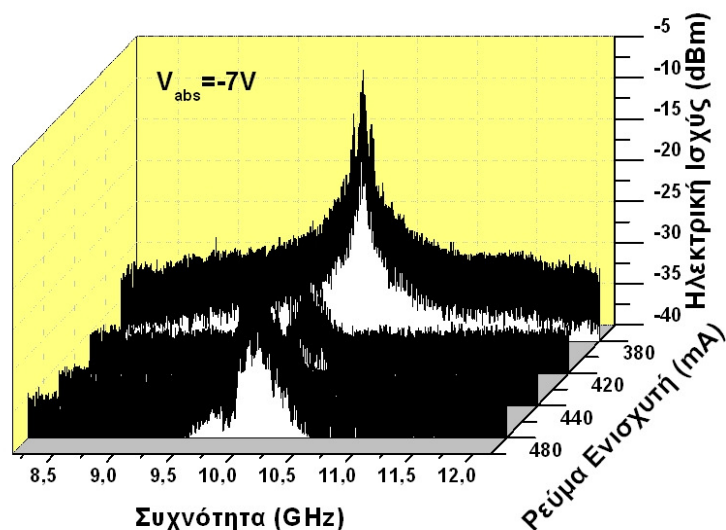
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Όπως φαίνεται στο σχήμα 5.11, για ρεύμα άντλησης μεγαλύτερο των 400mA και τάση στον απορροφητή μεγαλύτερη των -7V, το GS περνά κάτω από το κατώφλι εξαναγκασμένης εκπομπής και παρατηρείται δράση λέιζερ μόνο από το ES.



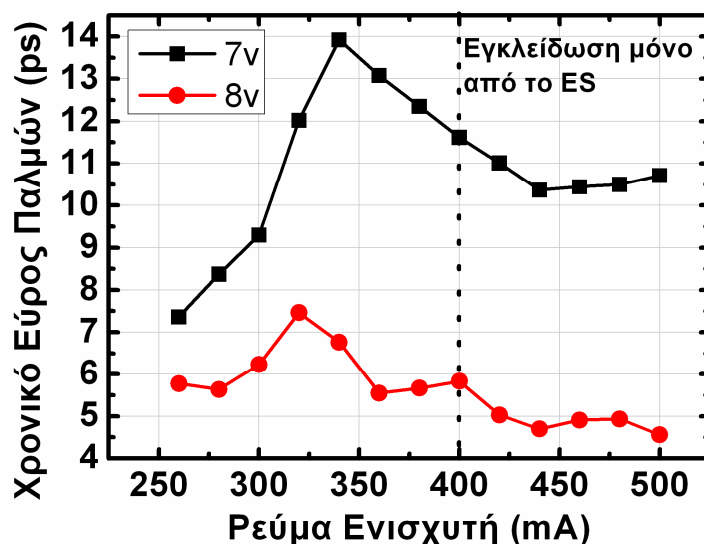
Σχήμα 5-11 Οπτικά φάσματα ως προς το ρεύμα του ενισχυτή για δύο διαφορετικές ανάστροφες τάσεις στον απορροφητή -7V και -8V.

Η μελέτη του ηλεκτρικού φάσματος της διάταξης δεν παρουσίασε δύο κορυφές, το οποίο συνεπάγεται ότι η διάταξη των 4mm δεν παρουσίασε ταυτόχρονη εγκλειδωση των τρόπων και από τις δύο φασματικές περιοχές. Τουναντίον, όσο υπήρχε ισχυρή εκπομπή από το GS, η εγκλειδωση παρέμενε περιορισμένη σε αυτή την περιοχή, ενώ όταν το GS περνούσε κάτω από το κατώφλι εξαναγκασμένης εκπομπής, παρατηρήθηκε απότομη ολίσθηση στην κορυφή του ηλεκτρικού φάσματος σε μικρότερες συχνότητες κατά $\approx 400\text{MHz}$, η οποία και σηματοδοτούσε την εγκλειδωση τρόπων από το ES (σχήμα 5.12). Κατά την καταγραφή του ηλεκτρικού φάσματος παρατηρήθηκε πτώση της ισχύος κορυφής, η οποία είναι σε πλήρη συνάρτηση, τόσο με την αύξηση των μη κορεσμένων απωλειών λόγω ανάστροφης τάσης, όσο και με την αλλαγή συνθηκών λειτουργίας που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Επιπλέον, το ηλεκτρικό φάσμα για τάση στον απορροφητή ίση με -8V δεν παρουσιάζεται στο σχήμα 5.12 λόγω του ότι η ισχύς είναι εξαιρετικά μειωμένη, με αποτέλεσμα οι μεταβολές στο μήκος κύματος να μην είναι εμφανείς.



Σχήμα 5-12 Ηλεκτρικό φάσμα ως προς το ρεύμα του ενισχυτή για την περιοχή του ES.

Για την καταγραφή του χρονικού εύρους των παραγόμενων παλμών, ο κρύσταλλος του αυτοσυσχετιστή μετατοπίστηκε ώστε να μπορούν να καταγραφούν οι παλμοί από το διαφορετικό μήκος κύματος. Στο σχήμα 5.13 παρουσιάζεται η εξέλιξη του χρονικού εύρους των παλμών από το ES ως προς το ρεύμα του ενισχυτή. Η περιοχή στην οποία εστιάζεται το ενδιαφέρον παρουσιάζεται για ρεύμα άντλησης μεγαλύτερο των 400mA, όπου εμφανίζεται ανοχή του χρονικού εύρους των παλμών με την αύξηση του ρεύματος. Πιο αναλυτικά, παρόλο που το ρεύμα άντλησης αυξήθηκε κατά 100mA (από 400mA – 500mA), η διακύμανση του χρονικού εύρους των παλμών ήταν 3% (από 11ps σε 10.7ps). Και στις δύο τάσεις που παρατηρήθηκε το φαινόμενο, το εύρος των παλμών μειώθηκε με την αύξηση του ρεύματος.



Σχήμα 5-13 Μεταβολή του χρονικού εύρους των παλμών ως προς το ρεύμα του ενισχυτή για δύο διαφορετικές ανάστροφες τάσεις στον απορροφητή -7V και -8V.

Τα ακριβή αίτια της συγκεκριμένης συμπεριφοράς, αν και έχουν επιβεβαιωθεί και από άλλες πρόσφατες πειραματικές μελέτες [16]-[17], δεν έχουν αποσαφηνιστεί ακόμα σε θεωρητικό επίπεδο. Τόσο στο μοντέλο που αναπτύχθηκε και παρουσιάστηκε στο 3^ο κεφάλαιο, αλλά και σε άλλες προσεγγίσεις που έχουν παρουσιαστεί στη βιβλιογραφία [18], δεν έχει παρατηρηθεί αντίστοιχη συμπεριφορά. Η πιο πιθανή εξήγηση για την

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

ύπαρξη αυτής της συμπεριφοράς είναι τα διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της ενεργειακής ζώνης του ES και, πιο συγκεκριμένα, ο μικρότερος παράγοντας διεύρυνσης της οπτικής γραμμής (παράγοντας $-a$), οποίος έχει θεωρητικά προβλεφθεί για την εξαναγκασμένη εκπομπή από το ES [22].

Η χαμηλή τιμή του παράγοντα a , όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, επιτρέπει τον περιορισμό φαινομένων αυτοδιαμόρφωσης της φάσης, με αποτέλεσμα τη σημαντική μείωση της επίδρασης της χρωματική διασποράς στο χρονικό εύρος των παλμών. Η χρήση στατικής τιμής του παράγοντα a για κάθε φασματική περιοχή στο μοντέλο που αναπτύχθηκε, στερεί τη δυνατότητα δυναμικής μεταβολής του με τις συνθήκες λειτουργίας και αποκρύπτει την ύπαρξη τέτοιων φαινομένων από τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν. Σε πειραματικό επίπεδο, αν και δεν μετρήθηκε απευθείας η ακριβής τιμή του παράγοντα a κάθε φασματικής περιοχής λόγω της δυσκολίας αλλά και της αβεβαιότητας τέτοιων μετρήσεων, στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται περαιτέρω αποδείξεις για την διαφορετική δυναμική συμπεριφορά της διάταξης, όταν η εκπομπή μεταβαίνει από το GS στο ES, οι οποίες επιβεβαιώνουν την εικασία ότι κάθε φασματική περιοχή έχει αρκετά διαφορετικό παράγοντα διεύρυνσης της οπτικής γραμμής.

Σε πρακτικό επίπεδο, τα οφέλη από την συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας σχετίζονται με την ύπαρξη παλμών σχεδόν σταθερής διάρκειας, με ταυτόχρονη αύξηση της μέσης ισχύος λόγω αύξησης του ρεύματος. Παρόλα αυτά, η δραστική μείωση της μέσης ισχύος που παρατηρείται στην έναυση του ES περιορίζει τα οφέλη, όπως και στην περίπτωση της παραγωγής παλμών από το GS υπό την παρουσία εξαναγκασμένης συνεχούς εκπομπής από το ES.

5.6 Συμπεράσματα

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου ήταν η πειραματική επιβεβαίωση της ταυτόχρονης εγκλειδωσης τρόπων και από τις δύο διαθέσιμες φασματικές περιοχές εκπομπής των λέιζερ κβαντικών τελειών. Όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, τα πειραματικά αποτελέσματα έρχονται σε συμφωνία με τις προσομοιώσεις του 3^{ου} κεφαλαίου, αναδεικνύοντας έτσι, τόσο την ορθότητα της θεωρητικής προσέγγισης, όσο και την πρακτική δυνατότητα εφαρμογής τέτοιων περιοχών λειτουργίας σε ένα μεγάλο πλήθος νέων εφαρμογών.

Στα πλαίσια των πειραματικών μετρήσεων παρουσιάστηκαν δύο ακόμα φαινόμενα με μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον, που σχετίζονται, τόσο με την επίδραση της εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES στην παλμική συμπεριφορά του GS, όσο και με τα ίδια τα χαρακτηριστικά των παλμών που παράγονται από την υψηλότερη ενεργειακή ζώνη. Αυτές οι δύο νέες περιοχές λειτουργίας επιτρέπουν την ταυτόχρονη αύξηση της μέσης ισχύος και τη μείωση του χρονικού εύρους των παλμών, με αποτέλεσμα να οδηγούν στην παραγωγή οπτικών παλμών με ενισχυμένη ισχύ κορυφής. Η ύπαρξη αυτών των περιοχών λειτουργίας δεν είχε προβλεφθεί από το θεωρητικό μοντέλο, λόγω απλοποιήσεων που είχαν γίνει με σκοπό την μείωση της υπολογιστικής πολυπλοκότητάς του. Τέλος μελετήθηκαν πειραματικά τα φαινόμενα αυτοδιαμόρφωσης του πλάτους των παραγόμενων παλμών σε λέιζερ κβαντικών τελειών. Η πειραματική διερεύνηση αποκάλυψε την ύπαρξη τέτοιων ασταθειών σε συνθήκες άντλησης που οδηγούν τη διάταξη κοντά το κατώφλι λειτουργίας. Τα αποτελέσματα αυτά ήταν σε πλήρη συμφωνία με αντίστοιχες συμπεριφορές που έχουν επιδειχτεί σε συμβατικά λέιζερ. Επιπλέον αναδείχτηκε μια νέα περιοχή λειτουργίας η οποία παρατηρείται μόνο σε διατάξεις κβαντικών τελειών και περιλαμβάνει τη ταυτόχρονη υπερδιαμόρφωση του πλάτους των παλμών όταν η διάταξη βρίσκεται σε καθεστώς πολύ φασματικής εγκλειδωσης. Το συγκεκριμένο φαινόμενο μειώνει το εύρος τιμών που μπορούν να

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές
καταγράφουν οπτικοί παλμοί αλλά σε δεύτερη ανάλυση θα μπορούσε να εκμεταλλευτεί
ώστε να παραχθούν παλμοί με μεγάλη ισχύ κορυφής.

6. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΗΝ ΠΑΛΜΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΛΟΓΩ ΔΙΠΛΗΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΑΠΟ ΤΟ GS

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η δυνατότητα ταυτόχρονης εκπομπής δύο διαφορετικών ομάδων τρόπων από το GS. Στα πλαίσια της ανάλυσης του φαινομένου παρουσιάζονται οι δύο διαφορετικές θεωρητικές προσεγγίσεις, που έχουν προταθεί για την εξήγηση του φαινομένου, ενώ παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα που αποσαφηνίζουν τα γενεσιουργά αίτια του φαινομένου. Επιπλέον η πειραματική διερεύνηση αυτής της περιοχής λειτουργίας κατέστησε εφικτή την καταγραφή δύο νέων φαινομένων. Το πρώτο σχετίζεται με την μείωση του χρονικού εύρους των παλμών, παρόλη την αύξηση του ρεύματος ενίσχυσης, ενώ το δεύτερο αφορά την δυνατότητα επίτευξης ταυτόχρονης εγκλειδωσης τρόπων και από τις δύο φασματικές κορυφές του GS. Οι δύο αυτές περιοχές λειτουργίας δίνουν νέες δυνατότητες στα λέιζερ κβαντικών τελιών, όπως η δημιουργία παλμικής λειτουργίας στη φασματική περιοχή των THz καθώς και η επίτευξη ταυτόχρονης αύξησης της μέσης ισχύος και της ισχύος κορυφής των παλμών. Τέλος παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα που σχετίζονται με τον εντοπισμό διπλής εκπομπής και από τη φασματική περιοχή του ES.

6.1 Αίτια διπλής εκπομπής από το GS

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5, ένα από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά των λέιζερ κβαντικών τελιών είναι η δυνατότητα πολυφασματικής εκπομπής από δύο ή τρία διαφορετικά μήκη κύματος (GS/ES/WL) [1]-[2]. Η ταυτόχρονη εκπομπή από διαφορετικά μήκη κύματος μπορεί να επηρεάσει την διαδικασία εγκλειδωσης τρόπων και υπό συγκεκριμένες συνθήκες να την υποβοηθήσει (συνεχής εκπομπή από το ES) [3]-[5]. Επιπροσθέτως αυτή η ικανότητα των διατάξεων μπορεί να παρέχει λύσεις σε μια σειρά βιο-ιατρικών εφαρμογών, που απαιτούν την ταυτόχρονη ύπαρξη παλμών από περισσότερα μήκη κύματος.

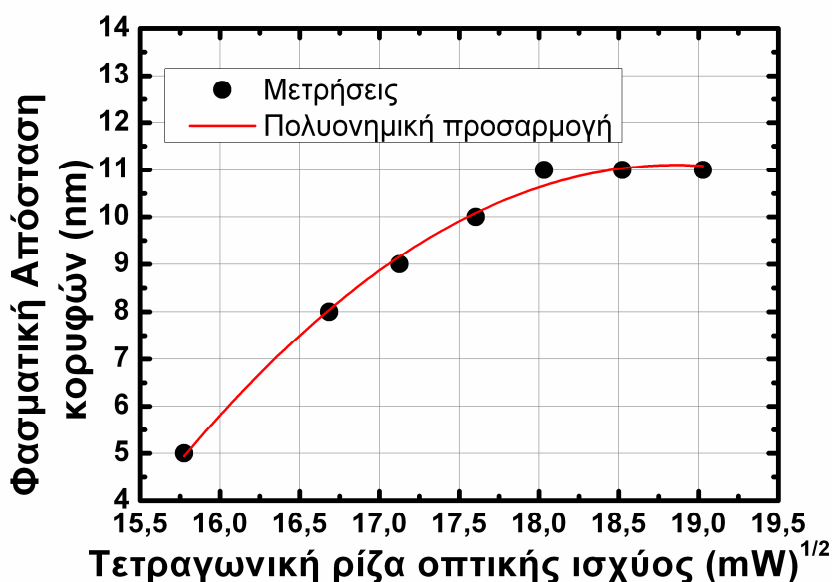
Τα επιπλέον μήκη κύματος εκπομπής που εμφανίζονται σε διατάξεις κβαντικών τελιών σχετίζονται με την ύπαρξη υψηλότερων ενεργειακών σταθμών, οι οποίες μπορούν να δώσουν ακτινοβολικές επανασυνδέσεις στην περίπτωση που οι ζώνες χαμηλότερης ενέργειας έχουν οδηγηθεί σε κορεσμό (κεφάλαιο 3-5). Παρόλα αυτά, στην βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές, για την ύπαρξη επιπλέον μηκών κύματος εκπομπής τα οποία δεν σχετίζονται με την ύπαρξη υψηλότερων ενεργειακών ζωνών. Πιο συγκεκριμένα έχει αναφερθεί η ύπαρξη διπλής εκπομπής από τη φασματική περιοχή του GS, η οποία γινόταν εμφανής στην περίπτωση μεγάλης αύξησης της πυκνότητας ρεύματος [6]. Επιπλέον έχει δείξει ότι σε διατάξεις οι οποίες παρουσίαζαν αυτό το φαινόμενο, οι δύο φασματικές κορυφές επιδείκνυαν δυνατότητα αλλαγής της μεταξύ τους φασματικής απόστασης, με τις συνθήκες πόλωσης [7].

Στα πλαίσια των πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν για της ανάγκες της παρούσας διατριβής, μέρος των διατάξεων που μετρήθηκαν παρουσίασαν αυτό το φαινόμενο. Ειδικότερα οι εν λόγω διατάξεις είχαν μήκος μεγαλύτερο ή ίσο των 4mm και 5 στρώματα κβαντικών τελιών. Το οπτικό φάσμα σε αυτές τις συσκευές συναρτήσε των συνθηκών πόλωσης, ακολουθούσε την παρακάτω εξέλιξη. Για μικρές τάσεις ανάστροφης πόλωσης και για μικρές τιμές ρεύματος το οπτικό φάσμα παρουσίαζε μία μόνο κορυφή στο GS, της οποίας το εύρος ζώνης αυξανόταν με την αύξηση του ρεύματος, λόγω διεύρυνσης της μη ομογενούς απολαβής και έναυση εξαναγκασμένης εκπομπής από μεγαλύτερο πλήθος τρόπων. Στην περίπτωση που το ρεύμα ξεπερνούσε μια ελεγχόμενη από την τάση τιμή, η οπτική εκπομπή παρουσίαζε δύο διακριτές κορυφές. Η φασματική απόσταση των δύο κορυφών αυξανόταν με την αύξηση του ρεύματος, φτάνοντας στη μέγιστη τιμή της τα 14nm. Όταν οι συνθήκες πόλωσης

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

(υψηλό ρεύμα και υψηλή ανάστροφη τάση) της διάταξης επέτρεπαν την εξαναγκασμένη εκπομπή από το ES, το φαινόμενο λάμβανε τέλος και η εικόνα του φάσματος στο GS αποκτούσε πάλι τυπική μορφή.

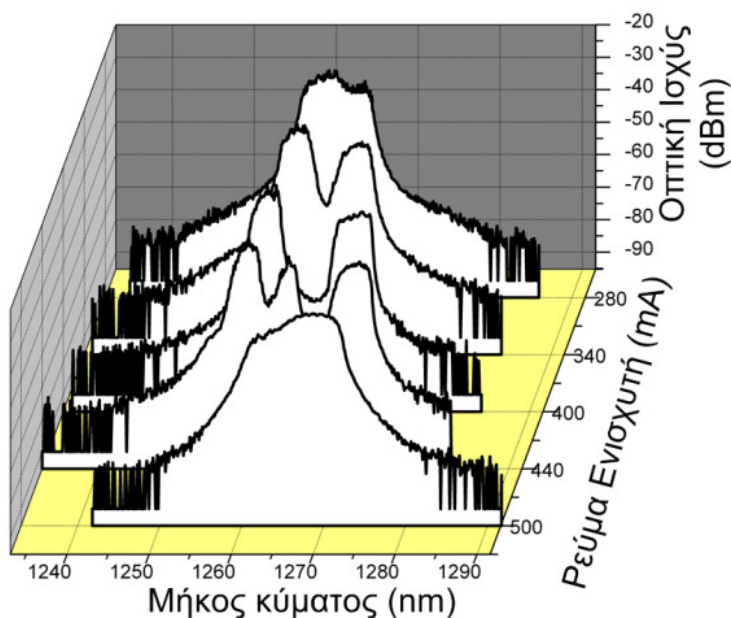
Τα αίτια αυτής της συμπεριφοράς δεν έχουν αναλυθεί πλήρως, και στη βιβλιογραφία παρουσιάζονται δύο διαφορετικές θεωρητικές προσεγγίσεις. Η πρώτη αποδίδει το φαινόμενο στις κβαντομηχανικές ιδιότητες του υλικού, και πιο συγκεκριμένα στην ταλάντωση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων λόγω αλληλεπίδρασης με το ισχυρό οπτικό πεδίο μέσα στην ενεργό περιοχή (AC-Stark effect, Rabi oscillations) [7]. Η συγκεκριμένη προσέγγιση στηρίχτηκε στο γεγονός ότι τέτοιου είδους φαινόμενα, όπως είναι οι ταλαντώσεις Rabi είναι εξαιρετικά πιο ισχυρά σε λέιζερ κβαντικών τελειών λόγω της εξιτονικής φύσης του υλικού, και συνεπώς παρουσιάζεται έντονη αλληλοεπίδραση των οπτικών φορέων με το ισχυρό ηλεκτροστατικό πεδίο των δίπολων (εξιτόνια) [8]. Η δεύτερη εξήγηση σχετίζεται με φαινόμενα κορεσμού της απολαβή [6]. Πιο συγκεκριμένα όταν η έγχυση ρεύματος είναι αρκετά μεγάλη, μη γραμμικά φαινόμενα όπως η δημιουργία φασματικών οπών (spectral hole burning) [9] καταστέλλει την εξαναγκασμένη εκπομπή στο κέντρο του οπτικού φάσματος, δημιουργώντας ένα φασματικό κενό στις συγκεκριμένες συχνότητες. Οι ελεύθεροι φορείς που δεν οδηγούνται σε ακτινοβολικές επανασυνδέσεις μεταφέρονται μέσω της μη ομογενούς απολαβής σε διαμήκης τρόπους μακριά από την κεντρική συχνότητα εκπομπής, με αποτέλεσμα να τους υποβοηθούν να ξεπεράσουν το κατώφλι εξαναγκασμένης εκπομπής. Στην περίπτωση των υπό εξέταση διατάξεων το αίτιο δημιουργίας της διπλής εκπομπής δεν σχετιζόταν με ταλαντώσεις φορέων (Rabi Oscillations) μια και στο συγκεκριμένο φαινόμενο, η απόσταση των δύο φασματικών κορυφών έχει γραμμική εξάρτηση με την τετραγωνική ρίζα της οπτικής ισχύος. Μελετώντας τα οπτικά φάσματα σε συνδυασμό με της καμπύλες οπτικής ισχύος-ηλεκτρικής έντασης, η σχέση φασματικής απόστασης ισχύος δεν ήταν γραμμική (σχήμα 6.1) αλλά αντίθετα παρουσίαζε πολυονημική μορφή. Επιπροσθέτως οι περιοχές διπλής εκπομπής από το GS δεν συνέπιπταν με τις περιοχές μέγιστης οπτικής ισχύος, όπως θα ήταν αναμενόμενο αν το φαινόμενο βασιζόταν σε ταλαντώσεις Rabi.



Σχήμα 6-1 Εξάρτηση της φασματικής απόστασης των δύο κορυφών συναρτήσεως της τετραγωνικής ρίζας της εκπεμπόμενης ισχύος. (μαύρος-κύκλος): μετρήσεις, (κόκκινη- καμπύλη) : πολυονημική προσαρμογή

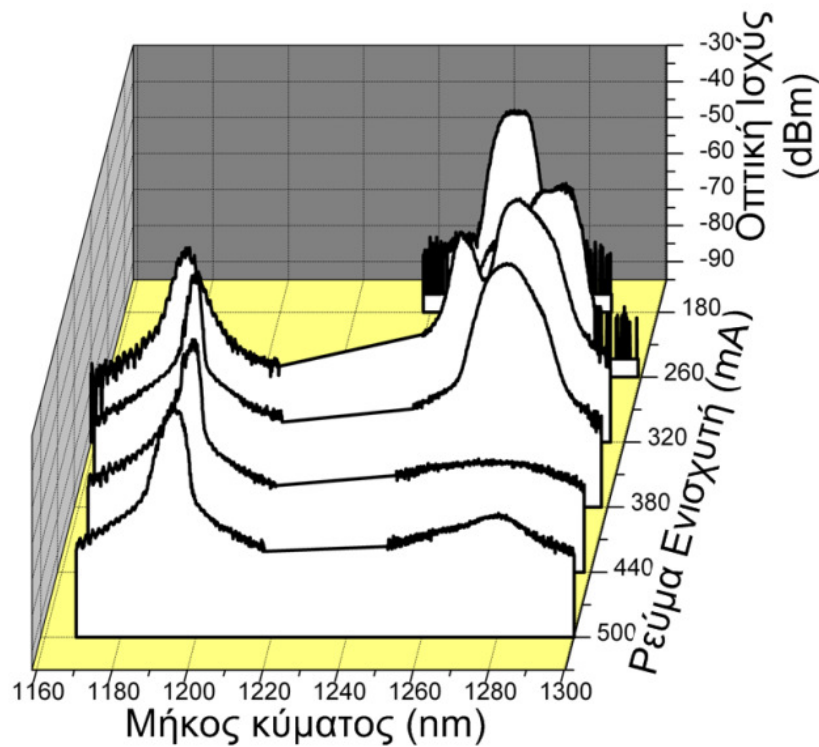
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Το συνολικό αποτέλεσμα του φαινομένου φαίνεται στο οπτικό φάσμα που παρουσιάζεται στο σχήμα 6.2. Οι κεντρικές συχνότητες καταστέλλονται ενώ παρατηρείται διεύρυνση στα πλευρικά τμήματα του φάσματος, δίνοντας την εντύπωση δύο ανεξάρτητων ζωνών εκπομπής. Η περεταίρω αύξηση της πυκνότητας ρεύματος επάγει διεύρυνση της φασματικής απόστασης των δύο κορυφών. Αυτό οφείλεται στο ότι η δημιουργία φασματικών οπών γίνεται πιο έντονη, με αποτέλεσμα μεγαλύτερος αριθμός τρόπων να καταστέλλεται στο κέντρο του φάσματος, ενώ παράλληλα οι ελεύθεροι φορείς διοχετεύονται σε πιο απομακρυσμένους τρόπους δίνοντας την εικόνα ότι η φασματική απόσταση των δύο κορυφών είναι συντονιζόμενη με το ρεύμα. Αξίζει να σημειωθεί ότι, στην περίπτωση που το ρεύμα του τμήματος ενίσχυσης αυξηθεί μέχρι του σημείου να υπάρξει εξαναγκασμένη εκπομπή και από το ES, τότε το φαινόμενο της διπλής εκπομπής στο GS καταστέλλεται και η συμπεριφορά του φάσματος επιστρέφει σε φυσιολογική λειτουργία (σχήμα 6.3). Αυτό το γεγονός μπορεί να αποδοθεί στον περιορισμό της απολαβής στο GS, λόγω έναυσης εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES [10]. Ο περιορισμός της απολαβής του GS έχει ως αποτέλεσμα την εξασθένηση των μη γραμμικών φαινομένων στο κέντρο του οπτικού φάσματος και κατ' επέκταση στην άρση του μηχανισμού που επιτρέπει την διπλή φασματική εκπομπή.



Σχήμα 6-2 Οπτικά φάσματα για διαφορετικές τιμές του ρεύματος και μηδενική τάση στον απορροφητή, για διάταξη 5 στρωμάτων κβαντικών σημείων, μήκους 4mm και πλάτους 6μm.

Από το σύνολο των συσκευών που μελετήθηκαν μόνο συσκευές με 5 στρώματα κβαντικών τελειών και με μήκος μεγαλύτερο των 4mm επέδειξαν πολύ-φασματική εκπομπή από το GS. Αυτό το γεγονός οφείλεται στα κυματοδηγικά χαρακτηριστικά των διατάξεων: συνολικό μήκος, παράγοντας περιορισμού του οπτικού τρόπου καθώς και στο συνολικό όγκο της διάταξης, που επέτρεψαν την αύξηση της οπτικής απολαβής στη φασματική περιοχή του GS, καθώς και στον περιορισμό της εκπομπής από το ES. Πιο αναλυτικά συμπεράσματα για την επίδραση των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών τόσο στις επιδόσεις όσο και στην ύπαρξη αυτών των περιοχών λειτουργίας θα παρουσιαστούν στο επόμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 7).



Σχήμα 6-3 Οπτικά φάσματα για διαφορετικές τιμές ρεύματος και για ανάστροφη τάση στον απορροφητή -7V, για διάταξη 5 στρωμάτων κβαντικών σημείων, μήκους 4mm και πλάτους 6μm.

6.2 Ανεξάρτητη εγκλειδωση τρόπων στα δύο μήκη κύματος του GS

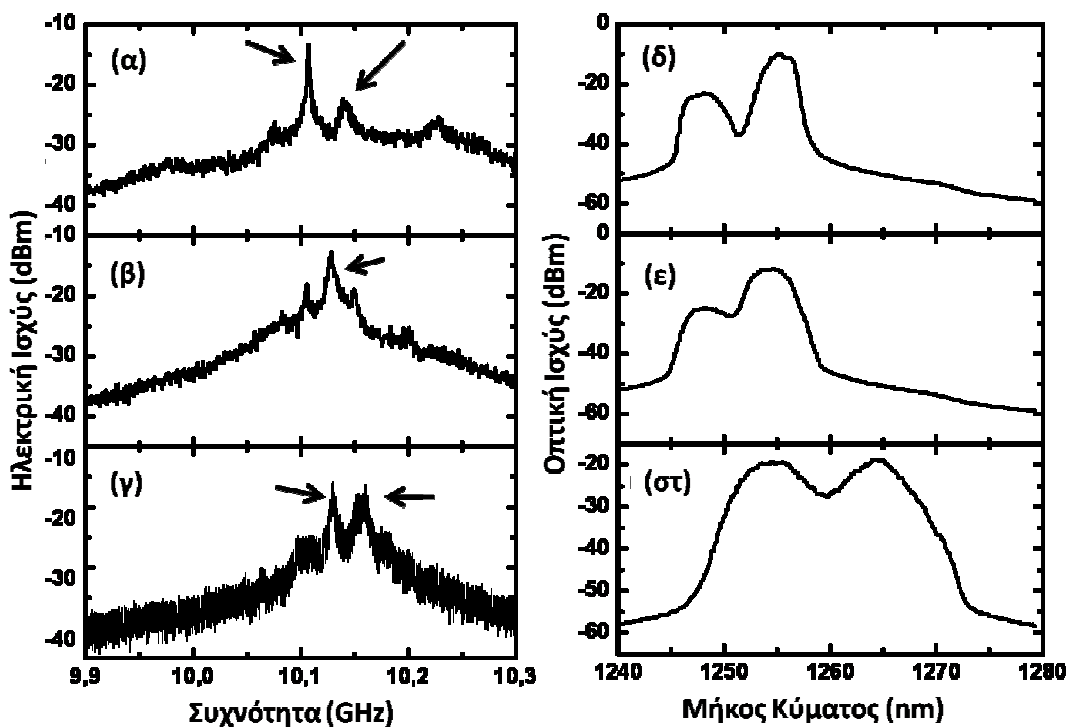
Η ύπαρξη δύο ανεξάρτητων ομάδων τρόπων στο GS έδωσε τη δυνατότητα ανεξάρτητης εγκλειδωσης των τρόπων κάθε ομάδας, με αποτέλεσμα την παραγωγή οπτικών παλμών και από τα δύο μήκη κύματος ταυτόχρονα. Για τον εντοπισμό αυτής της λειτουργίας σαρώθηκαν οι τιμές ρεύματος και τάσης στον ενισχυτή και στον απορροφητή, αντίστοιχα, ενώ παράλληλα καταγραφόταν το ηλεκτρικό και οπτικό φάσμα του λέιζερ. Η ύπαρξη δύο ανεξάρτητων παλμών από το GS, μπορεί να επιβεβαιωθεί στην περίπτωση που το οπτικό και το ηλεκτρικό φάσμα της διάταξης παρουσιάζει δύο διακριτές κορυφές.

Οι δύο κορυφές στο ηλεκτρικό φάσμα οφείλονται σε εγκλειδωση τρόπων, οι οποίοι παρουσιάζουν διαφορετικούς ρυθμούς επανάληψης. Η μικρή διαφορά στο μήκος κύματος των δύο ομάδων τρόπων επάγει ένα διαφορετικό ενεργό μήκος κοιλότητας που με τη σειρά του δίνει ένα ελαφρώς διαφορετικό ρυθμό επανάληψης των παλμών. Το ίδιο φαινόμενο αναφέρθηκε και στο 5^ο κεφάλαιο για την ταυτόχρονη ύπαρξη παλμών από το GS και το ES. Στην περίπτωση όμως των διπλών παλμών από το GS, λόγω εγγύτητας των ομάδων των διαμηκών τρόπων (10nm) η διαφορά συχνότητας στο ηλεκτρικό φάσμα ήταν πολύ μικρότερη από αυτή που παρατηρήθηκε στους διπλούς παλμούς από το GS/ES και ήταν της τάξης των 30 με 32MHz (σχήμα 6.4).

Πιο αναλυτικά για την επίτευξη της συγκεκριμένης περιοχής λειτουργίας η ανάστροφη τάση στον απορροφητή τέθηκε μικρότερη των -3.5V ενώ το ρεύμα άντλησης κυμάνθηκε από το κατώφλι εξαναγκασμένης λειτουργίας μέχρι τα 300mA. Όπως μπορεί να εξαχθεί από το σχήμα 6.4 η ισχύς των δύο διακριτών κορυφών του ηλεκτρικού φάσματος ακολουθούν την διακύμανση της έντασης των αντίστοιχων κορυφών του οπτικού φάσματος, επιβεβαιώνοντας με αυτό τον τρόπο ότι η κορυφές του ηλεκτρικού φάσματος

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

προέρχονται από διαφορετικές φασματικές περιοχές. Επιπλέον μπορεί να παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση που οι δύο περιοχές έχουν μικρή φασματική απόσταση η διπλή εκπομπή παλμών από το GS δυσχεραίνεται (σχήμα 6.4 (β),(ε)). Αυτό το φαινόμενο πιθανώς σχετίζεται με την εταιροδιαμόρφωση απολαβής μεταξύ των διαμηκών τρόπων (cross gain modulation). Πιο συγκεκριμένα η μικρή φασματική απόσταση μεταξύ των διαφορετικών ομάδων διαμηκών τρόπων σε συνδυασμό με τα παρεμφερή επίπεδα ισχύος που επιδεικνύουν οι δύο φασματικές περιοχές, εντείνει τα φαινόμενα ανταγωνισμού και επιτρέπει την αλληλεπαρεμβολή μεταξύ των ομάδων. Στην περίπτωση που η τάση αυξανόταν περαιτέρω, παρατηρήθηκε διακοπή της διπλής εκπομπής παλμών από το GS, ενώ η δεύτερη φασματική περιοχή του GS υποβοηθούσε την εγκλειδωση της άλλης όπως θα δειχτεί στις επόμενες παραγράφους. Επιπροσθέτως όταν οι συνθήκες πόλωσης υποβοηθούσαν την έναυση εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES τότε όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρήθηκε παύση της διπλής εκπομπής από το GS και κατά συνέπεια επίσης διακοπή της διπλής εγκλειδωσης των τρόπων.

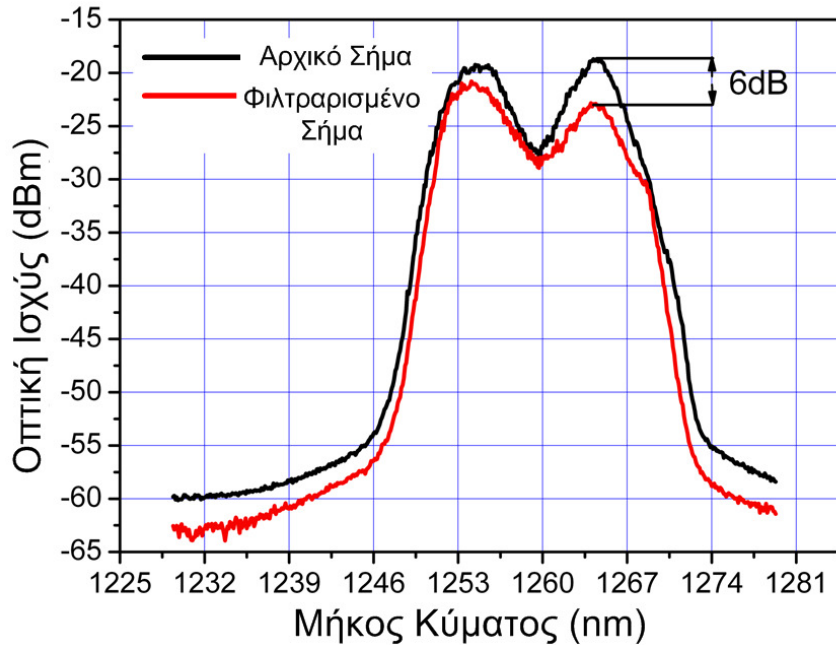


Σχήμα 6-4(α)-(γ) Ηλεκτρικά φάσματα για διαφορετικές συνθήκες πόλωσης, (δ)-(στ) αντίστοιχα οπτικά φάσματα.

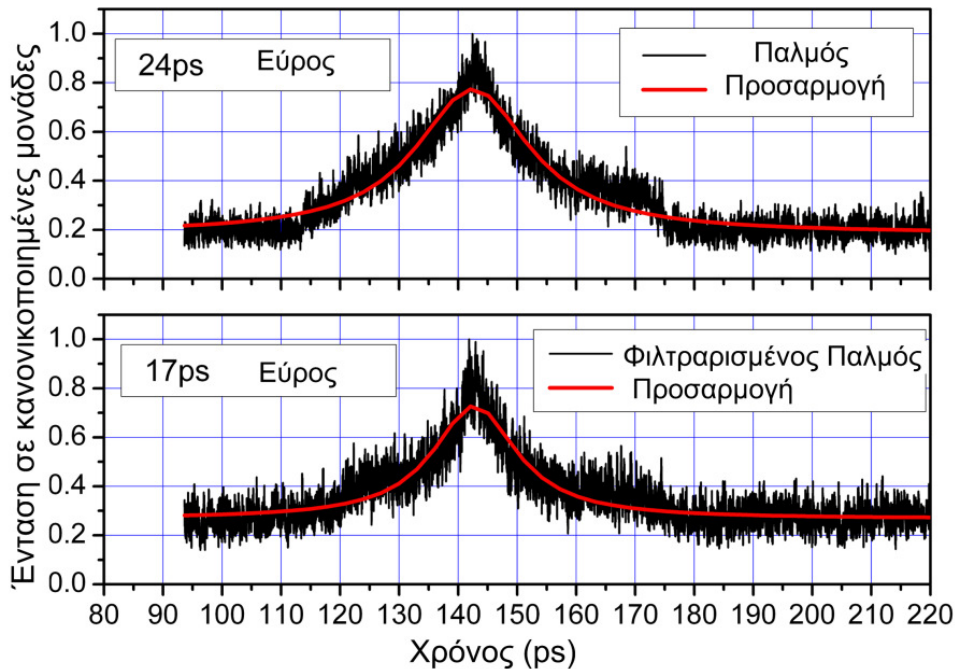
Για την περαιτέρω τεκμηρίωση του φαινομένου, εκτός από το ηλεκτρικό φάσμα έγινε απόπειρα μέτρησης των εκπεμπόμενων παλμών, με τη βοήθεια του αυτοσυσχετιστή που περιγράφηκε στο 4^ο κεφάλαιο. Παρόλα αυτά δεν κατέστη δυνατή η ακριβής μέτρηση τους, διότι στην περίπτωση ύπαρξης δύο διαφορετικών σειρών παλμών σε παραπλήσιο μήκος κύματος ο αυτοσυσχετιστής δεν μπορούσε να τους διαχωρίσει χρονικά. Αποτέλεσμα αυτής της ανικανότητας του συστήματος ήταν, η έξοδος να είναι η αυτοσυσχέτιση και των δύο παλμών ταυτόχρονα, ενώ το σήμα αυτοσυσχέτισης παρουσίαζε αυξημένο χρονικό εύρος. Με σκοπό να αρθεί η συγκεκριμένη αδυναμία, έγινε χρήση ενός συντονιζόμενου οπτικού φίλτρου Fabry-perot, ώστε να απομονωθεί η μια φασματική περιοχή και η έξοδος του αυτοσυσχετιστή να αναπαριστά μόνο τη μία

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

σειρά παλμών. Το κατασκευαστικό φασματικό κέντρο του οπτικού φίλτρου βρισκόταν στη ζώνη των 1500nm με αποτέλεσμα η αποκοπή του στα 1280nm να είναι μόνο 6dB (σχήμα 6.5). Παρόλα αυτά λαμβάνοντας υπόψη τις αυξημένες απαιτήσεις σε οπτική ισχύ του αυτοσυσχετιστή, ο εξασθενημένος παλμός βρισκόταν στα όρια του θορύβου, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να προκαλέσει ισχυρή παραγωγή δεύτερης αρμονικής στον κρύσταλλο, και ως εκ τούτου να μπορεί να αγνοηθεί από το τελικό σήμα με σχετική ασφάλεια.



Σχήμα 6-5 Οπτικά φάσματα για δύο περιπτώσεις (μαύρο) μη φιλτραρισμένο και (κόκκινο) φιλτράροντας την φασματική κορυφή που βρίσκεται σε υψηλότερα μήκη κύματος



Σχήμα 6-6 Το χρονικό προφίλ του παλμού (μαύρο) και η Lorentzian προσαρμογή (κόκκινο) για δύο περιπτώσεις μη φιλτραρισμένο (πάνω) και φιλτράροντας μία από τις δύο κορυφές (κάτω)

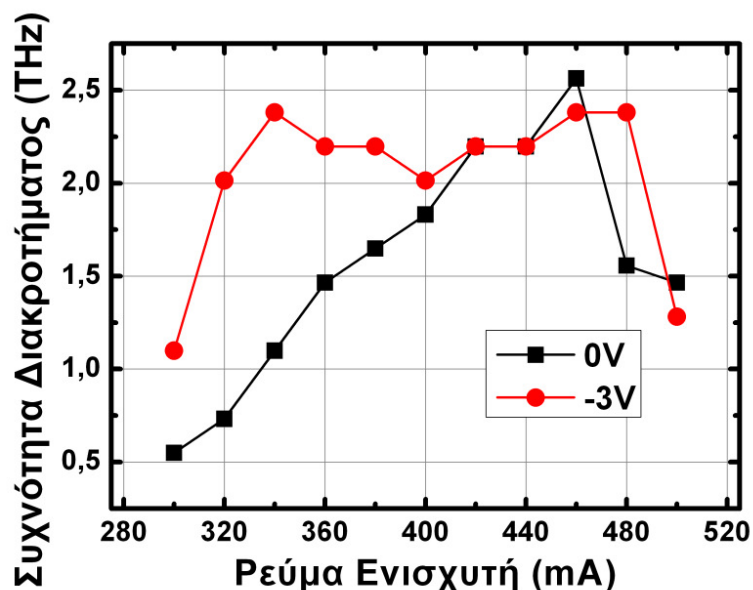
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Η καταγραφή του χρονικού εύρους του σήματος αυτοσυσχέτισης πραγματοποιήθηκε με και χωρίς τη χρήση φίλτρου. Στην περίπτωση ύπαρξης μόνο μίας σειράς παλμών η οπτική εξασθένιση θα μείωνε την ένταση του ανακτώμενου σήματος αλλά δεν θα προκαλούσε καμία μεταβολή στο χρονικό του προφίλ. Αντίθετα στην περίπτωση ύπαρξης περισσότερων σειρών παλμών το οπτικό σήμα θα παρουσίαζε μεταβολή στο εύρος του παλμού. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.6 ο μη φιλτραρισμένος παλμός είχε εύρος 24ps ενώ μετά την οπτική εξασθένιση μειώθηκε στα 17ps. Η μείωση της χρονικής διάρκειας σε συνδυασμό με την ύπαρξη διπλής κορυφής τόσο στο οπτικό όσο και στο ηλεκτρικό φάσμα του λέιζερ, αποδεικνύει την ύπαρξη δύο ανεξάρτητων τρένων παλμών, οι οποίοι προκύπτουν από διαφορετικές φασματικές περιοχές.

Η σημαντικότητα της συγκεκριμένης περιοχής λειτουργίας καταδεικνύεται από την απαίτηση αρκετών ιατρικών εφαρμογών για ταυτόχρονους παλμούς από διαφορετικά μήκη κύματος [11]. Μέχρι τώρα σε αυτές τις εφαρμογές γίνεται χρήση δύο ή περισσότερων πηγών λέιζερ, με άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση της πολυπλοκότητας της διάταξης τροφοδοσίας και ελέγχου. Η ύπαρξη του παρόντος φαινομένου και ο καθορισμός των δομικών χαρακτηριστικών που επιτρέπουν την ύπαρξη του, μπορεί να οδηγήσουν στη δημιουργία νέων πολύ-φασματικών πηγών εκπομπής με χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας και πιο απλά σχήματα τροφοδοσίας και ελέγχου.

Επιπροσθέτως η ύπαρξη δύο ταυτόχρονων μηκών κύματος εκπομπής, σε συνδυασμό με τη δυνατότητα αλλαγής της μεταξύ τους φασματικής απόστασης με τις συνθήκες πόλωσης, επιτρέπει την χρήση τέτοιων διατάξεων σε νέες εφαρμογές όπως είναι η κατασκευή πηγών στη φασματική περιοχή των THz. Πιο συγκεκριμένα εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο της φωτο-μίξης (photomixing) δύο οπτικών πηγών σε ένα φωτο-αγωγό (photoconductor), μπορεί να επιτευχθεί η παραγωγή ενός σήματος με συχνότητα η οποία αποτελεί την διαφορά των αρχικών συχνοτήτων [12]-[14]. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορά συχνοτήτων μεταξύ των δύο φασματικών περιοχών, η οποία κυμαίνεται από 1-14nm είναι δυνατή η παραγωγή παλμών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε ένα αρκετά διαφορετικό φασματικό παράθυρο. Μέσω κατάλληλου σχεδιασμού μιας κεραίας με δυνατότητα εκπομπής στο THz, ώστε να κυματοδηγηθεί κατάλληλα το παραγόμενο σήμα, αυτή η πηγή θα μπορούσε να βρει ένα μεγάλο πεδίο εφαρμογής, κυρίως στον χώρο της ιατρικής τομογραφίας και γενικότερα της βιο-ιατρικής.

Στο σχήμα 6.7 παρουσιάζεται η θεωρητικά υπολογισμένη συχνότητα του διακροτήματος βάσει της πειραματικής διαφοράς μήκους κύματος των δύο φασματικών περιοχών ως προς το ρεύμα του ενισχυτή, για δύο διαφορετικές τιμές τάσης στον απορροφητή (0V, -3V). Η υπολογισμένη συχνότητα κυμαίνεται από 500GHz μέχρι 2.6THz και αντιστοιχεί σε φασματική απόσταση από 3-14nm. Δυστυχώς δεν μπόρεσε να γίνει πειραματική μέτρηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας με τον εξοπλισμό που διέθετε το εργαστήριο, και ως εκ τούτου δεν μπόρεσε να μετρηθεί η ισχύς του παραγόμενου σήματος, παρόλα αυτά μελλοντική δραστηριότητα περιλαμβάνει την ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν το εύρος της φασματικής απόστασης των κορυφών και πειραματική διερεύνηση των παραγόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.



Σχήμα 6-7 Θεωρητικά υπολογισμένη συχνότητα του διακροτήματος βάση της πειραματικής φασματικής απόστασης των δύο κορυφών.

6.3 Περιορισμός του εύρους παλμού λόγω ύπαρξης διπλής φασματικής εκπομπής από το GS.

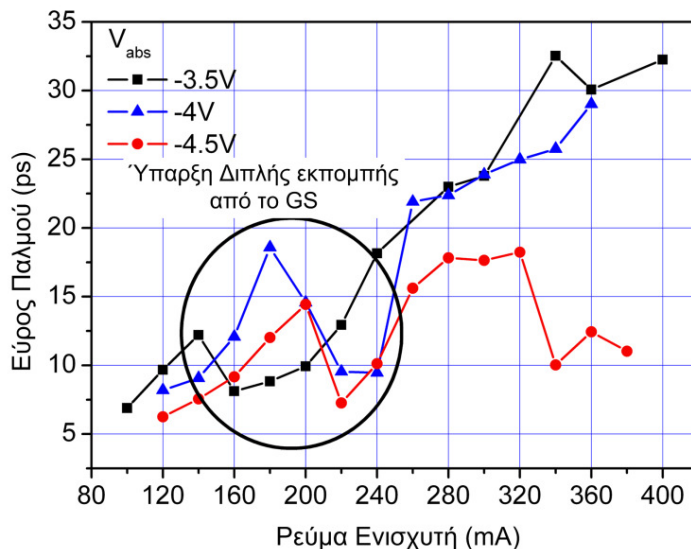
Τα δύο μεγέθη που καθορίζουν την επίδοση του λέιζερ, όταν αυτό χρησιμοποιείται για βιο-ιατρικές εφαρμογές είναι η μέση ισχύς και η ισχύς κορυφής, για αυτό το λόγο ως ποσότητα για τον χαρακτηρισμό της επίδοσης του λέιζερ χρησιμοποιείται το γινόμενο των δύο τιμών $P_{av} \cdot P_{peak}$. Η βέλτιστη συνθήκη λειτουργίας περιλαμβάνει πολύ στενούς παλμούς υπό την παρουσία μεγάλης οπτικής ισχύος ώστε να μεγιστοποιηθεί το γινόμενο. Παρόλα αυτά όπως δείχτηκε στο 4^ο κεφάλαιο κάτι τέτοιο δεν είναι εύκολα πραγματοποιήσιμο μια και η αύξηση του ρεύματος επάγει δύο ανταγωνιστικά φαινόμενα – την αύξηση της μέσης ισχύος και την ταυτόχρονη διεύρυνση του χρονικού προφίλ του παλμού που συνεπάγεται με μείωση της ισχύς κορυφής.

Στην περίπτωση των συσκευών που είχαν την ιδιότητα να εκπέμπουν δύο μήκη κύματος στο GS όταν μετρήθηκε το εύρος των παλμών για διαφορετικές συνθήκες πόλωσης, αντί της μονότονης αύξησης του εύρους του παλμού με το ρεύμα παρατηρήθηκε μια περιοχή λειτουργίας που συνέπιπτε με την ύπαρξη δύο κορυφών στο οπτικό φάσμα, και περιλάμβανε την έντονη μείωση του εύρους του παλμού με την αύξηση του ρεύματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτό το φαινόμενο δεν συνέπιπτε με περιοχές που υπήρχαν δύο τρένα παλμών από το GS και ως εκ τούτου δεν σχετίζεται με το φαινόμενο που περιγράφηκε στην παράγραφο 6.2. Η ύπαρξη παλμού από μία μόνο φασματική περιοχή επιβεβαιώθηκε από την μελέτη του ηλεκτρικού φάσματος, το οποίο παρουσίαζε μόνο μια κορυφή στο ρυθμό επανάληψης. Η μια κορυφή επανάληψης σηματοδοτούσε ότι μόνο μία φασματική ομάδα τρόπων βρισκόταν σε κατάσταση εγκλειδωσης ενώ η άλλη βρισκόταν σε συνεχή λειτουργία (CW).

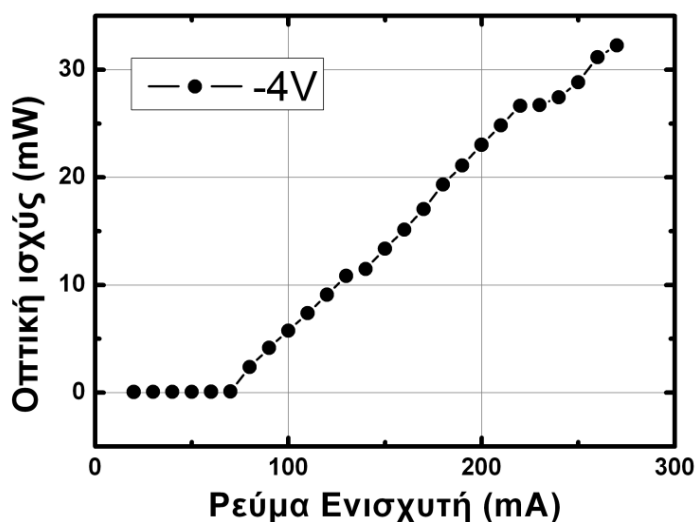
Στο σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η εξέλιξη του εύρους ως προς το ρεύμα του ενισχυτή και για διάφορες τάσεις στον απορροφητή για μία διάταξη με μήκος 4mm, 5 στρώματα κβαντικών σημείων και πλάτος του κυματοδηγού ίσο με 6μm. Για μικρές τιμές ανάστροφης τάσης (-3V με -4.5V) και για τιμές ρεύματος από 160mA μέχρι 240mA, η διάταξη παρουσίαζε διπλή εκπομπή από το GS. Οι συγκεκριμένες συνθήκες πόλωσης

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

διασφάλιζαν ότι δεν υπήρχε έναυση εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES, που θα οδηγούσε σε καταστολή του φαινομένου. Σε αυτό το εύρος τιμών πόλωσης η χρονική διάρκεια του παλμού μειώθηκε απότομα από τα 18ps στα 9ps. Με ταυτόχρονη αύξηση του ρεύματος κατά 60mA και με ταυτόχρονη αύξηση της ισχύος όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.9. Το συνδυαστικό αποτέλεσμα και των δύο παραγόντων ήταν η ταυτόχρονη αύξηση της μέσης ισχύος και της ισχύος κορυφής.



Σχήμα 6-8 Εύρος παλμού συναρτήσει ρεύματος ενισχυτή για διάφορες τιμές ανάστροφης τάσης, για μια διάταξη με πλάτος κυματοδηγού 6μm. Σε μαύρο κύκλο σημειώνεται η περιοχή ύπαρξης διπλής κορυφής

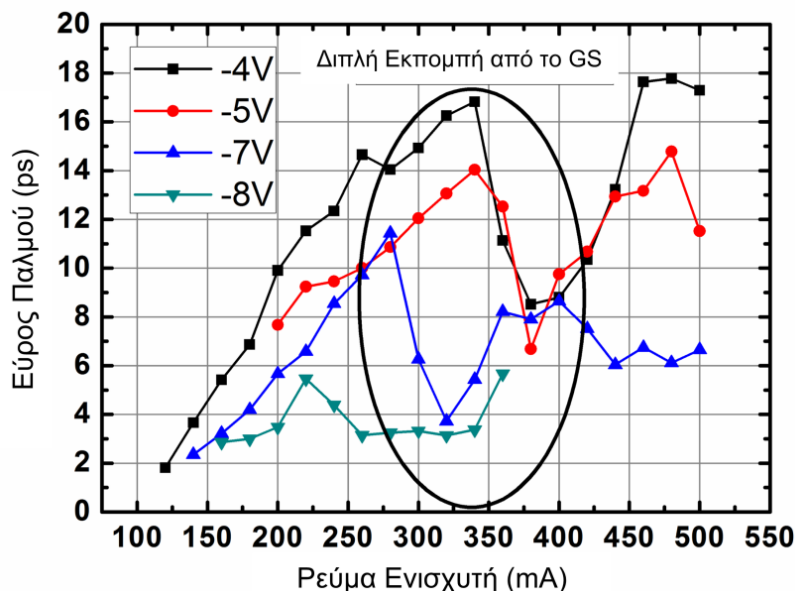


Σχήμα 6-9 Καμπύλη οπτικής ισχύος – έντασης ρεύματος για ανάστροφη τάση -4V και για τη διάταξη του σχήματος 6.8.

Το ίδιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και σε μια διάταξη με παρόμοια χαρακτηριστικά με την προηγούμενη εκτός από το πλάτος του κυματοδηγού που ήταν 4μm. Στη συγκεκριμένη διάταξη η διπλή εκπομπή και ως εκ τούτου και ο περιορισμός του εύρους του παλμού παρατηρήθηκε για μεγαλύτερο εύρος τιμών ρεύματος και ανάστροφης τάσης λόγω της απουσίας εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES. Επιπλέον στα διαγράμματα απουσιάζει η καμπύλη για ανάστροφη τάση -6V επειδή για την συγκεκριμένη τιμή δεν

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

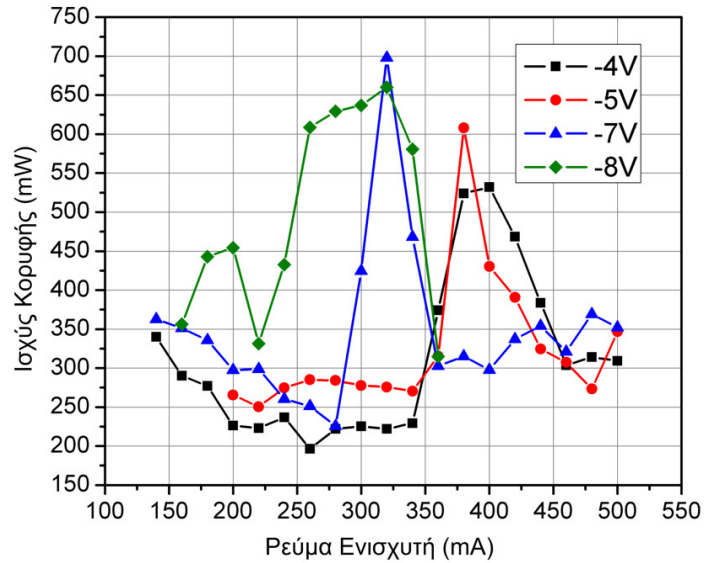
μπόρεσε να καταγραφούν ευδιάκριτοι παλμοί και παρουσιάστηκαν αστάθειες. Στο σχήμα 6.10 παρουσιάζεται η διακύμανση του εύρους του παλμού με την αύξηση του ρεύματος του ενισχυτή, η οποία ακολουθεί την ίδια τάση που παρουσίασε και η διάταξη με πλάτος 6μm. Στη συγκεκριμένη διάταξη η μέγιστη μείωση του εύρους του παλμού παρατηρήθηκε για ανάστροφη τάση ίση με -4V και μεταβολή του ρεύματος του ενισχυτή από 340mA σε 380mA και ήταν της τάξης των 9ps.



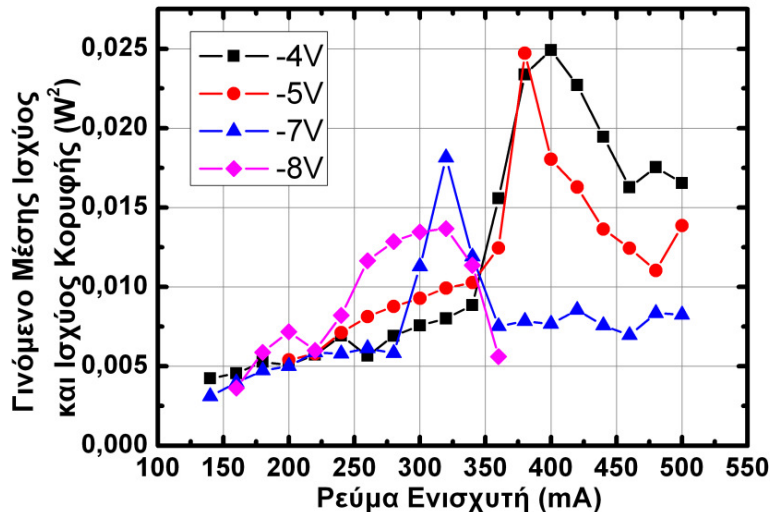
Σχήμα 6-10 Εύρος παλμού συναρτήσει ρεύματος ενισχυτή για διάφορες τιμές ανάστροφης τάσης, για μια διάταξη με πλάτος κυματοδηγού 4μm. Σε μαύρο κύκλο σημειώνεται η περιοχή ύπαρξης διπλής κορυφής.

Στο σχήμα 6.11 παρουσιάζεται η μεταβολή της ισχύος κορυφής συναρτήσει του ρεύματος ενισχυτή για την διάταξη του σχήματος 6.10. Παρόλο που δεν παρουσιάζει μονότονη συμπεριφορά (σε αντιστοιχία με το σχήμα 6.9) λόγω του ραγδαίου περιορισμού της χρονικής διάρκειας του παλμού παρατηρούνται τοπικά μέγιστα σε όλο το εύρος της ύπαρξης διπλής εκπομπής που μεταβάλουν απότομα την ισχύ κορυφής και βελτιστοποιούν το γινόμενο $P_{average} \cdot P_{peak}$. Παραδείγματος χάρι για ανάστροφη τάση -7V και για μεταβολή του ρεύματος 40mA (από 280mA σε 320mA), το εύρος μεταβάλλεται από 11ps στα 3.7ps, η ισχύς κορυφής παρουσιάζει μεταβολή της τάξης του 320% από 220mW σε 700mW, ενώ το γινόμενο $P_{average} \cdot P_{peak}$ μεταβλήθηκε από $0,0056 W^2$ σε $0,0181W^2$ (σχήμα 6.12).

Το αίτιο της συγκεκριμένης συμπεριφοράς βρέθηκε κατόπιν συσχέτισης των περιοχών που επιδείκνυαν μείωση του εύρους παλμού με τα αντίστοιχα οπτικά φάσματα. Γενικά η λειτουργία των συγκεκριμένων διατάξεων μπορούσε να χωριστεί σε τρεις βασικές περιοχές λειτουργίας. Στην πρώτη περιοχή (σχήμα 6.13 A) το οπτικό φάσμα παρουσίαζε μία μόνο κορυφή, η αύξηση της πυκνότητας ρεύματος στο τμήμα ενίσχυσης προκάλεσε διεύρυνση του οπτικού φάσματος λόγω της διεύρυνσης της απολαβής. Οι επιπλέον διαμήκεις τρόποι εγγενώς είχαν διαφορετική φάση με αποτέλεσμα να μην μπορεί να επιτευχθεί με αποτελεσματικό τρόπο η εγκλειδωση όλων των τρόπων. Οι επιπλέον τρόποι δημιούργησαν φαινόμενα ανταγωνισμού και να συνεισέφεραν όχι στην βελτιστοποίηση του παλμού αλλά στην αύξηση του θορύβου φάσης. Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται από την μονότονη αύξηση του εύρους του παλμού με το ρεύμα και από το γεγονός ότι οι παλμοί δεν ήταν περιορισμένης μετατροπής (transform limited) και το TBWP ήταν 2.38.



Σχήμα 6-11 Ισχύ κορυφής συναρτήσει ρεύματος ενισχυτή για διάφορες τιμές ανάστροφης τάσης, για μια διάταξη με πλάτος κυματοδηγού 4μm.



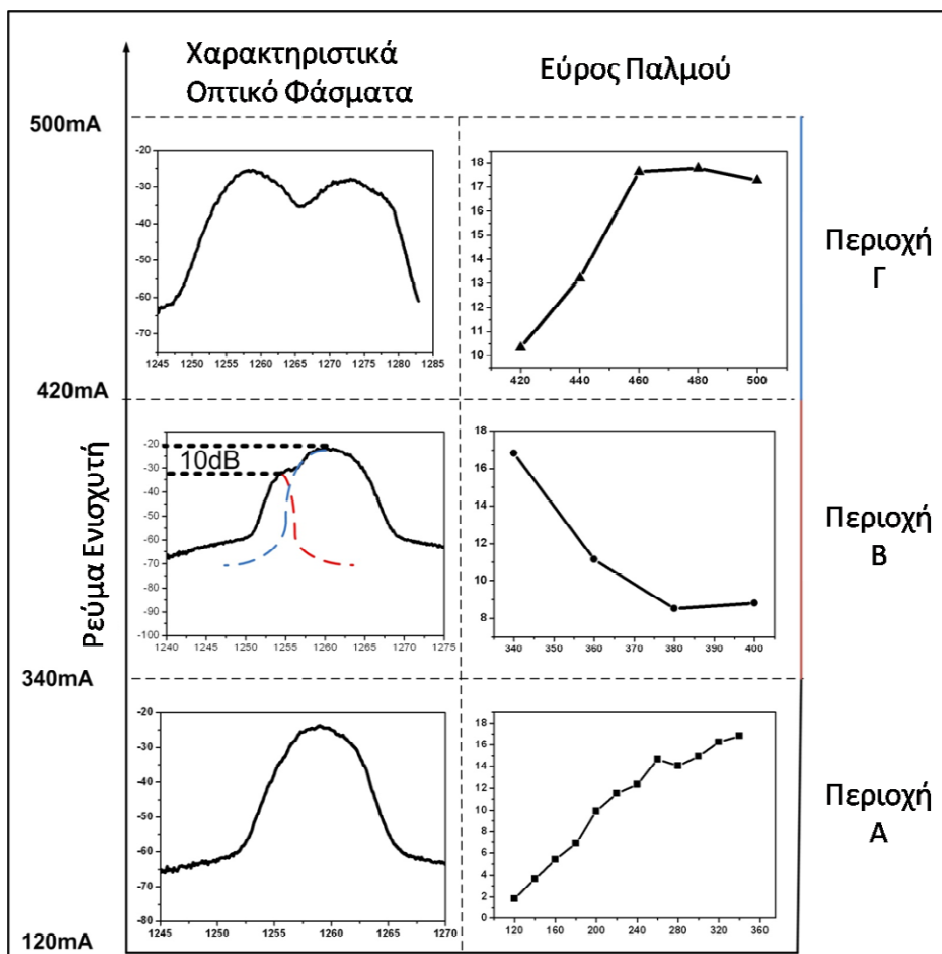
Σχήμα 6-12 Γινόμενο μέσης ισχύος και ισχύος κορυφής συναρτήσει ρεύματος ενισχυτή για διάφορες τιμές ανάστροφης τάσης, για μια διάταξη με πλάτος κυματοδηγού 4μm.

Στη δεύτερη περιοχή (σχήμα 6.13 Β) αρχίζει να γίνεται ισχυρό το φαινόμενο της διπλής εκπομπής. Σε αυτή τη περίπτωση οι διαμήκης τρόποι χωρίζονται σε δύο ομάδες με διαφορετικές φάσεις μεταξύ τους, οι οποίες δεν έχουν την ίδια ισχύ. Οι παλμοί που εκπέμπονται από τη διάταξη δημιουργούνται από την εγκλειδωση της πιο ισχυρής ομάδα τρόπων, που λόγω του διαχωρισμού του φάσματος έχουν συνολικά μικρότερο φασματικό εύρος. Ο μικρότερος αριθμός τρόπων που συνεισφέρουν στη δημιουργία του παλμού σε συνδυασμό με την αρκετά μικρότερη (>10dB) ισχύ της ανταγωνιστικής ομάδας τρόπων βελτιώνουν την ποιότητα της εγκλειδωσης και έχουν σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία στενότερων παλμών.

Στην τρίτη περιοχή (σχήμα 6.13 Γ) οι δύο κορυφές συνεχίζουν να υφίστανται όμως σε αυτή την περίπτωση οι δύο ομάδες τρόπων έχουν παρόμοια ισχύ. Το αποτέλεσμα αυτού είναι τα φαινόμενα ανταγωνισμού μεταξύ των δύο διαφορετικών ομάδων τρόπων

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

να ενισχύονται σημαντικά με συνέπεια την δημιουργία ασταθιών ισχύος και τη παραγωγή παλμών με μεγαλύτερο εύρος.



Σχήμα 6-13 Χαρακτηριστικά οπτικά φάσματα από κάθε περιοχή λειτουργίας και η αντίστοιχη εξέλιξη του εύρους των παλμών

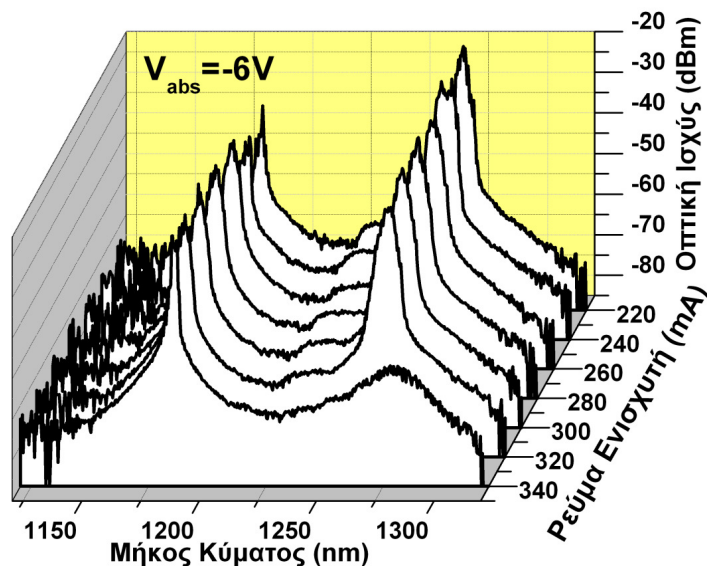
6.4 Διπλή εκπομπή από το ES

Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους οι διατάξεις των 5 κβαντικών στρωμάτων με μήκος μεγαλύτερο των 4mm επέτρεψαν την εμφάνιση ισχυρών φαινομένων κορεσμού στο GS, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διπλής εκπομπής από το συγκεκριμένο μήκος κύματος. Παρόλα αυτά κατά τον πειραματικό χαρακτηρισμό των διατάξεων εντοπίστηκαν λέιζερ, με διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, τα οποία σε αντίθεση με τις υπόλοιπες διατάξεις επέτρεπαν την εμφάνιση εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES για χαμηλές συνθήκες πόλωσης, με αποτέλεσμα να δοθεί η ευκαιρία πειραματικής διερεύνησης της συμπεριφοράς του ES, υπό συνθήκες ισχυρής πόλωσης.

Πιο αναλυτικά διατάξεις με 5 στρώματα κβαντικών σημείων και μήκος 2mm, παρουσίασαν μειούμενο κατώφλι εκπομπής του ES με την αύξηση της ανάστροφης τάσης. Στην περίπτωση που ο απορροφητής είχε πολωθεί με τάση μεγαλύτερη των -6V, η έναυση της εξαναγκασμένης εκπομπής πραγματοποιούνταν από το GS και το ES ταυτόχρονα. Όπως φαίνεται στο σχήμα 6.14 για ρεύμα άντλησης από 220mA μέχρι 320mA οι δύο φασματικές περιοχές συνυπάρχουν. Στην περίπτωση που το ρεύμα άντλησης αυξηθεί περαιτέρω παρουσιάζεται ισχυροποίηση της εκπομπής από το ES και πλήρη καταστολή του GS. Αυτό το φαινόμενο σχετίζεται με την αύξηση του ρυθμού

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

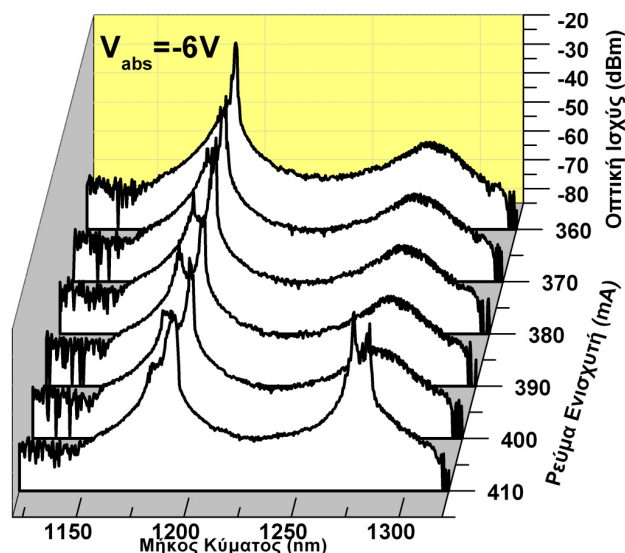
εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES με αποτέλεσμα την μείωση του αριθμού φορέων που αποδιεγείρονται στην ενεργειακή ζώνη του GS (σχήμα 6.14). Σε αυτή τη περιοχή λειτουργίας αν η ηλεκτρική άντληση αυξηθεί περαιτέρω ($I > 340\text{mA}$) η απολαβή στην περιοχή του ES ενισχύεται με αποτέλεσμα την ταυτόχρονη ενίσχυση φαινομένων κορεσμού και κατ' επέκταση φαινομένων δημιουργίας φασματικών οπών.



Σχήμα 6-14 Οπτικά φάσματα για το λέιζερ 5 κβαντικών στρωμάτων και μήκους 2mm.

Η ενίσχυση μη γραμμικών φαινομένων στην περίπτωση της φασματικής περιοχής του ES υποβοηθά με τη σειρά της το φαινόμενο της διπλής εκπομπής, σε πλήρη αντιστοιχία με την περίπτωση του GS. Στο σχήμα 6.15 παρουσιάζεται η εξέλιξη του οπτικού φάσματος για την προαναφερθείσα περιοχή. Η περαιτέρω αύξηση του ρεύματος προκαλεί διπλή εκπομπή από το ES. Η φασματική απόσταση των δύο κορυφών αυξάνεται, με την αύξηση του ρεύματος και κυμαίνεται από 8 έως 12nm. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή που προκύπτει όταν το ρεύμα άντλησης ξεπεράσει την τιμή των 410mA. Σε αυτή τη περιοχή υποβοηθάται η επανέναυση του GS με άμεσο αποτέλεσμα την μείωση της απολαβής στο ES και την παύση των φαινομένων διπλής εκπομπής από το ES. Αυτό το γεγονός έχει μεγάλη σημασία μια και καταδεικνύει την κοινή προέλευση του μηχανισμού δημιουργίας των διπλών κορυφών είτε βρίσκονται στο GS είτε στο ES.

Κατά την πειραματική διερεύνηση δεν κατέσκει δυνατός ο εντοπισμός φαινομένων αντίστοιχων με αυτά που παρουσιάστηκαν για το GS. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία εντοπισμού περιοχής, στην οποία να παρατηρηθεί σταθερή εγκλειδωση τρόπων. Παρόλα αυτά η μελλοντική διερεύνηση του συγκεκριμένου φαινομένου μπορεί να επιτρέψει την εκμετάλλευση του για την βελτιστοποίηση του χρονικού εύρους των παλμών του ES. Πιο συγκεκριμένα όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η φασματική περιοχή του ES λόγω χαμηλότερου παράγοντα διεύρυνσης της οπτικής γραμμής (παράγοντας-α) και διαφορετικών συνθηκών πόλωσης, μπορεί εν δυνάμει να παράγει παλμούς με καλύτερα χρονικά χαρακτηριστικά. Αυτό το γεγονός σε συνδυασμό με τα φαινόμενα που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους μπορεί να αποτελέσουν μια νέα περιοχή ερευνητικού ενδιαφέροντος που θα επιτρέψει την άμεση παραγωγή οπτικών παλμών της τάξης των fs χωρίς τη χρήση επιπλέον διατάξεων.



Σχήμα 6-15 Οπτικά φάσματα για τη διάταξη των 5 στρωμάτων κβαντικών σημείων και του μήκους 2mm, όπου είναι εμφανής η διπλή εκπομπή από το ES.

6.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε η πειραματική διερεύνηση μιας νέας περιοχής λειτουργίας, η οποία επιτρέπει την ύπαρξη διπλής εκπομπής από το GS. Η ύπαρξη δύο φασματικών περιοχών εκπομπής επέτρεψε την διερεύνηση νέων συνθηκών εγκλειδωσης οι οποίες περιλαμβάνουν την ταυτόχρονη παραγωγή παλμών και από τις δύο περιοχές και την μείωση του χρονικού εύρους των παλμών λόγω φαινομένων περιορισμού του αριθμού διαμηκών τρόπων. Το πρώτο φαινόμενο σε συνδυασμό με την δυνατότητα μεταβολής της φασματικής απόστασης των δύο κορυφών με τις συνθήκες πόλωσης αποτελεί πιθανή μελλοντική λύση για την αποδοτική παραγωγή ηλεκτρομαγνητικών παλμών στην περιοχή των THz. Το δεύτερο φαινόμενο μπορεί να επιτρέψει την ταυτόχρονη αύξηση της μέσης ισχύος και της ισχύος κορυφής, καθιστώντας τα λέιζερ κβαντικών τελειών εξαιρετικούς υποψηφίους για μια σειρά εφαρμογών που έχουν αυξημένες απαιτήσεις όσο αναφορά το γινόμενο μέσης και ισχύος κορυφής. Τέλος παρουσιάστηκαν αποτελέσματα που σχετίζονται με την ύπαρξη διπλής εκπομπής από τη φασματική περιοχή του ES. Αν και το γενεσιουργό αίτιο του φαινομένου είναι ίδιο με αυτό της περιοχής του GS, οι συνθήκες πόλωσης στις οποίες κατέσται παρατηρήσιμο δεν επέτρεψαν την σταθερή εγκλειδωσης τρόπων. Αποτέλεσμα αυτού ήταν να μην μπορεί να παρατηρηθούν τα προαναφερθέντα φαινόμενα που μελετήθηκαν στην περίπτωση του GS. Παρόλα αυτά η ύπαρξη διπλής εκπομπής στο ES αποτελεί έναυσμα για τη μελλοντική μελέτη του συγκεκριμένου φαινομένου και σε αυτή τη φασματική περιοχή.

7. ΕΞΑΓΩΓΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΤΙΚΩΝ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΓΚΛΕΙΔΩΣΗΣ ΤΩΝ ΤΡΟΠΩΝ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΤΕΥΞΗ ΠΟΛΥΦΑΣΜΑΤΙΚΗΣ ΕΚΠΟΜΠΗΣ

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής δόθηκε η δυνατότητα πειραματικού χαρακτηρισμού μιας σειράς διατάξεων που παρουσίαζαν διαφοροποιήσεις σε βασικές κατασκευαστικές παραμέτρους. Οι διαφοροποιήσεις περιλάμβαναν το συνολικό μήκος των λείζερ, το πλάτος του κυματοδηγού, τον αριθμό των στρωμάτων κβαντικών τελειών και του ποσοστού μήκους του απορροφητή/ενισχυτή. Χρησιμοποιώντας αυτές τις παραμέτρους ως ελεύθερες μεταβλητές εντοπίστηκε ο ρόλος που διαδραματίζει κάθε μια στην ποιότητα της εγκλείδωσης των τρόπων, καθώς και ο κατάλληλος συνδυασμός παραμέτρων ώστε να επιτευχθεί πολύ φασματική εκπομπή και μεγιστοποίηση της ισχύος κορυφής.

7.1 Εισαγωγή

Η επίδραση διαφόρων κατασκευαστικών παραμέτρων όπως είναι το ποσοστό απορροφητή/ενισχυτή, το μήκος της διάταξης, ή ο αριθμός στρωμάτων κβαντικών τελειών αποτέλεσαν στο παρελθόν πεδίο έρευνας, ώστε να εντοπιστούν οι βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας, είτε η διάταξη βρισκόταν σε συνεχή λειτουργία, είτε εξέπεμπε οπτικούς παλμούς. Πιο ειδικά, η πλειοψηφία τέτοιων ερευνών επικεντρώθηκε σε διατάξεις οι οποίες βρισκόνταν σε συνεχή λειτουργία και σκοπός τους ήταν η αύξηση της διαθέσιμης απολαβής μέσω της αύξησης του όγκου της διάταξης είτε μέσω της αύξησης των κβαντικών στρωμάτων [1]-[4]. Στην περίπτωση που η διάταξη βρίσκεται σε παλμική λειτουργία, αν και υπάρχει πλούσια βιβλιογραφία για την επίδραση των συνθηκών πόλωσης στην ποιότητα της εγκλείδωσης των τρόπων [5]-[6], παρουσιάζεται μια έλλειψη αναλυτικών μελετών που να συσχετίζουν τους κατασκευαστικούς παράγοντες με τα χρονικά χαρακτηριστικά των παραγόμενων παλμών. Η μόνη μελέτη που έχει δημοσιευτεί πάνω σε αυτό το θέμα πραγματεύεται την επίδραση του ποσοστού μήκους απορροφητή/ενισχυτή, ως παράγοντα βελτιστοποίησης της παλμικής λειτουργίας [7]. Επιπροσθέτως, όπως καταδείχτηκε στα προηγούμενα κεφάλαια το βασικό πλεονέκτημα των λείζερ κβαντικών τελειών είναι η δυνατότητα επίτευξης πολύφασματικής εκπομπής χωρίς τη χρήση εξαιρετικά ισχυρών συνθηκών ηλεκτρικής άντλησης [8]-[12]. Σε αυτό τον τομέα παρατηρείται επίσης έλλειψη αναλυτικών μελετών που αποσαφηνίζουν το ρόλο κάθε παραμέτρου στην ύπαρξη πολλαπλής εκπομπής, ενώ οι λίγες απόπειρες που έχουν δημοσιευτεί πραγματεύονται μόνο την εξάρτηση εμφάνισης εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES με το μήκος του λείζερ [13].

Λαμβάνοντας υπόψη μας το γεγονός ότι τα πορίσματα μιας τέτοιας μελέτης θα μπορούσαν να εντοπίσουν τον ακριβή ρόλο κάθε παραμέτρου και να βοηθήσουν στη δημιουργία νέων σχεδιαστικών κανόνων για τις επόμενες γενιές διατάξεων. Πραγματοποιήθηκε αναλυτικός χαρακτηρισμός μιας σειράς από διατάξεις λείζερ κβαντικών τελειών, οι οποίες βρισκόντουσαν σε παλμική λειτουργία και παρουσίαζαν μεταβολές σε κατασκευαστικά χαρακτηριστικά. Οι διατάξεις οι οποίες μελετήθηκαν έχουν αναπτυχθεί με τη ίδια κατασκευαστική διεργασία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 4, ενώ τα βασικά δομικά χαρακτηριστικά στα οποία διέφεραν ήταν το συνολικό μήκος της κοιλότητας, το οποίο και κυμαινόταν από 2mm μέχρι 8mm, το πλάτος του κυματοδηγού το οποίο είχε δύο διαφορετικές τιμές 4mm και 6mm, ο αριθμός των στρωμάτων κβαντικών τελειών, οποίος κυμαινόταν από 5 μέχρι 15, και τέλος το ποσοστό απορροφητή/ενισχυτή το οποίο εξαρτιόταν από το συνολικό μήκος. Πιο συγκεκριμένα οι διατάξεις 2mm και 4mm διέθεταν απορροφητές που καταλάμβαναν το 15% του συνολικού μήκους της διάταξης, ενώ οι κοιλότητες με μήκος 8mm είχαν

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

μειωμένο ποσοστό ίσο με 11%. Στο πίνακα 6.1 παρουσιάζονται τα διαφορετικά είδη διατάξεων οι οποίες χαρακτηρίστηκαν πειραματικά. Για την πραγματοποίηση όλων των μετρήσεων που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκε η ίδια πειραματική διάταξη που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.

Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι για να μειωθεί η πιθανότητα στατιστικού σφάλματος και να καταστεί δυνατή η δημιουργία κατασκευαστικών οδηγιών, ήταν απαραίτητη η ύπαρξη αρκετών διατάξεων ώστε να αυξηθεί το στατιστικό δείγμα. Για την επίτευξη αυτού όλες οι μετρήσεις που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο έχουν διασταυρωθεί με αντίστοιχες μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ταυτόχρονα στο πανεπιστήμιο του Dundee στη Σκωτία, στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος FAST-DOT, στο οποίο μετείχε το εργαστήριο οπτικών επικοινωνιών του πανεπιστημίου Αθηνών.

Πίνακας 7-1 Τα διαφορετικά είδη διατάξεων που μετρήθηκαν πειραματικά.

Μήκος	Στρώματα	5		10		15	
2mm		4μm	6μm	X	6μm	4μm	6μm
4mm		4μm	6μm	X	6μm	X	6μm
8mm		X	6μm	X	6μm	X	6μm

7.2 Πειραματικός Χαρακτηρισμός των διατάξεων

Η πειραματικές μετρήσεις περιλάμβαναν μέτρηση την μέσης ισχύος εκπομπής, μέτρηση του χρονικού εύρους του παλμού, υπολογισμό της ισχύος κορυφής και τέλος καταγραφή των οπτικών και ηλεκτρικών φασμάτων για τον εντοπισμό πολύ-φασματικής εκπομπής αλλά και παλμικής λειτουργίας από διαφορετικά μήκη κύματος.

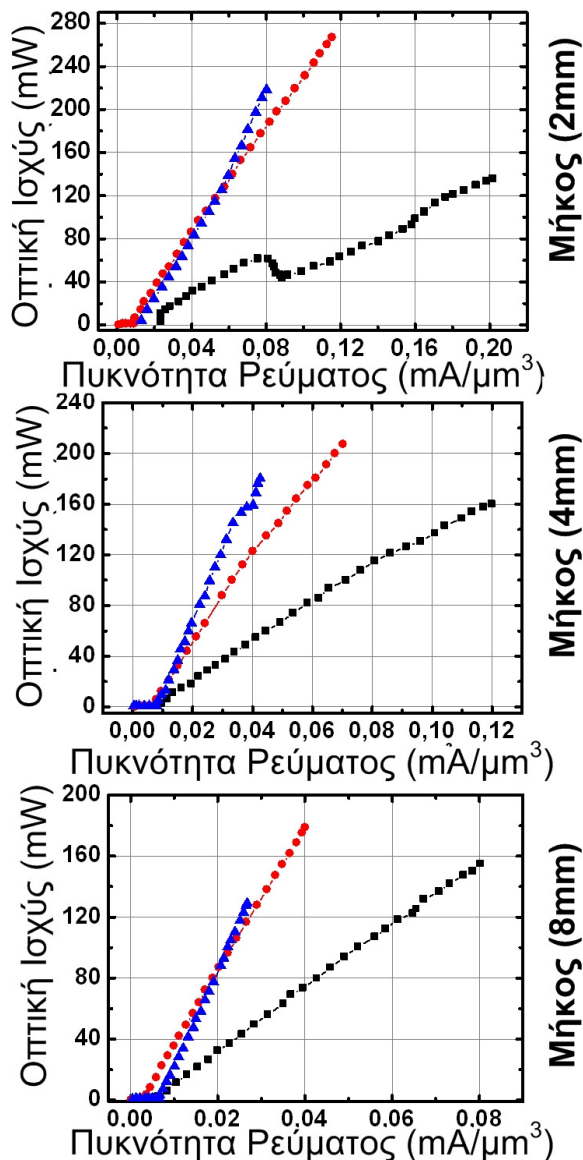
7.2.1 Χαρακτηρισμός παραμέτρων που επηρεάζουν την εκπεμπόμενη ισχύ

Ο πρώτος βασικός χαρακτηρισμός που πραγματοποιήθηκε σχετιζόταν με τον χαρακτηρισμό της μέσης εκπεμπόμενης ισχύος, για δύο διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας, συνεχή και παλμική. Στην πρώτη περίπτωση μέσω μιας πηγής ρεύματος χαμηλού θορύβου όλα τα τμήματα της διάταξης πολώθηκαν ορθά, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίστηκε η ομογενής έγχυση ρεύματος σε όλο το μήκος της διάταξης. Στο σχήμα 7.1 παρουσιάζονται οι καμπύλες οπτικής έντασης (mW) προς την πυκνότητα ρεύματος (μm^3) για διατάξεις μεταβλητού μήκους και αριθμού κβαντικών στρωμάτων. Στον άξονα x προτιμήθηκε η χρήση της πυκνότητας ρεύματος (ρεύμα προς το συνολικό όγκο της διάταξης) ώστε να απαλειφθεί η εξάρτηση των χωρικών διαστάσεων και να τονιστεί ο ρόλος των στρωμάτων κβαντικών τελειών.

Μεταβάλλοντας των αριθμό των κβαντικών στρωμάτων από 5 σε 15 ανεξάρτητα του μήκους, παρατηρήθηκε για όλες τις διατάξεις αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση των στρωμάτων από 5 σε 10 προκάλεσε αύξηση της κλίσης της καμπύλης, της τάξης του 0.1W/A (από 0.4W/A σε 0.5W/A). Όταν ο αριθμός των στρωμάτων αυξήθηκε από 10 σε 15 τα οφέλη όσο αναφορά την εκπεμπόμενη ισχύ ήταν λιγότερο εμφανή μια και παρατηρήθηκε μικρή αύξηση της κλίσης, που στην καλύτερη περίπτωση (μήκος 4mm) έφτανε τα 0.04W/A. Η αύξηση του συνολικού μήκους της διάταξης ανεξαρτήτως του αριθμού των στρωμάτων κβαντικών σημείων επέφερε γραμμική αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος λόγω αύξησης της ενεργού περιοχής. Στο σχήμα 7.2 παρουσιάζεται η αύξηση της οπτικής ισχύος με το μήκος για την ίδια

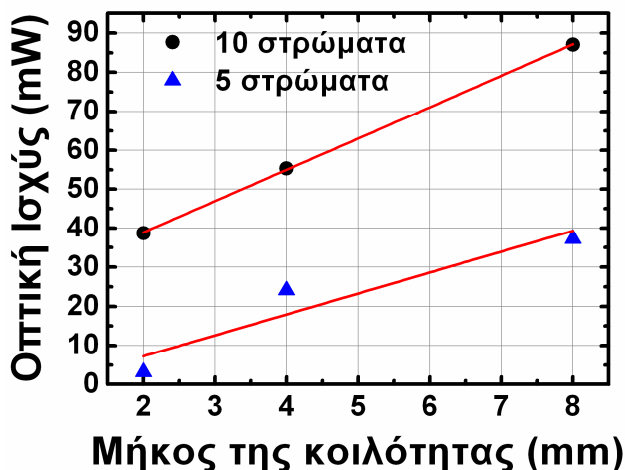
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

πυκνότητα ρεύματος ($0.02\mu\text{m}^3$) για 5 και 10 κβαντικά στρώματα. Η μεταβολή του πλάτους του κυματοδηγού (ridge) του λέιζερ παρουσίασε δύο διακριτές περιπτώσεις. Στην περίπτωση που ο αριθμός κβαντικών στρωμάτων ήταν ίσος με πέντε η μεταβολή του πλάτους δεν προκάλεσε σημαντική μεταβολή. Παρόλα αυτά στην περίπτωση των 15 στρωμάτων η μείωση του πλάτους συνοδεύτηκε από μείωση της οπτικής απόδοσης της διάταξης, και μικρή μεταβολή του ρεύματος κατωφλίου (7.3).

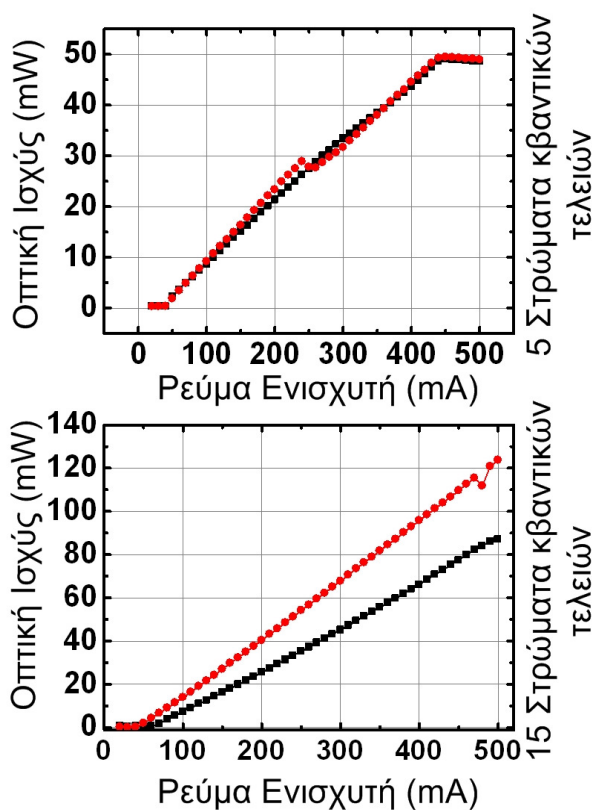


Σχήμα 7-1 Οπτική ισχύς προς την πυκνότητα ρεύματος για διατάξεις με κυμαινόμενο μήκος και αριθμό κβαντικών στρωμάτων (5 στρώματα: μαύρο-τετράγωνο, 10 στρώματα: κόκκινος-κύκλος, 15 στρώματα: μπλε-τρίγωνο)

Συνολικά η μεγαλύτερη τιμή ισχύος που παρατηρήθηκε για συνεχή λειτουργία ήταν 266mW και μετρήθηκε για μία διάταξη 10 στρωμάτων και μήκους 2mm όταν το ρεύμα πόλωσης ήταν 500mA (μέγιστη επιτρεπτή τιμή). Το γεγονός ότι η μικρότερη χωρικά διάταξη παρουσίασε την υψηλότερη τιμή οπτικής ισχύος δεν έρχεται σε αντίθεση με τις προηγούμενες παραγράφους, μια και ο μικρός όγκος επέτρεψε την εφαρμογή υψηλότερης πυκνότητας ρεύματος.

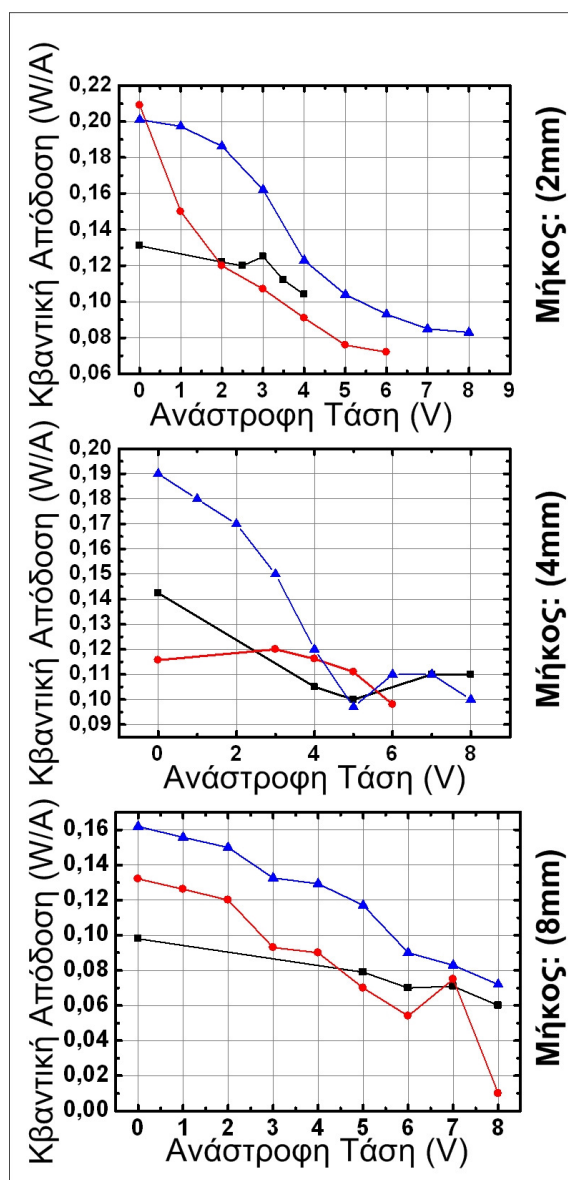


Σχήμα 7-2 Οπτική ισχύς συναρτήσει του μήκους της κοιλότητας του λέιζερ για δύο περιπτώσεις 5 και 10 κβαντικών στρωμάτων.



Σχήμα 7-3 Οπτική ισχύς προς το ρεύμα του ενισχυτή για δύο διαφορετικά πλάτη κυματοδηγών (μαύρο-τετράγωνο:4μm και κόκκινος-κύκλος:6μm) και δύο περιπτώσεις: 5 και 15 στρώματα κβαντικών τελειών.

Οι παραπάνω μετρήσεις κατέδειξαν ότι η αύξηση του αριθμού των κβαντικών στρωμάτων της διάταξης, και κατ' επέκταση της πυκνότητας των τελειών, δεν συνεπάγεται μονότονη και γραμμική αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος. Αυτή η παρατήρηση οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η απλοποιημένη προσέγγιση, η οποία θεωρούσε την αύξηση του αριθμού των κβαντικών στρωμάτων μονόδρομο για την αύξηση της κβαντικής απόδοσης των διατάξεων, δεν είναι επαρκής για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας.



Σχήμα 7-4 Εξωτερική κβαντική απόδοση για διατάξεις με κυμαινόμενο μήκος και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών (5 στρώματα: μαύρο-τετράγωνο, 10 στρώματα: κόκκινος-κύκλος, 15 στρώματα: μπλε-τρίγωνο)

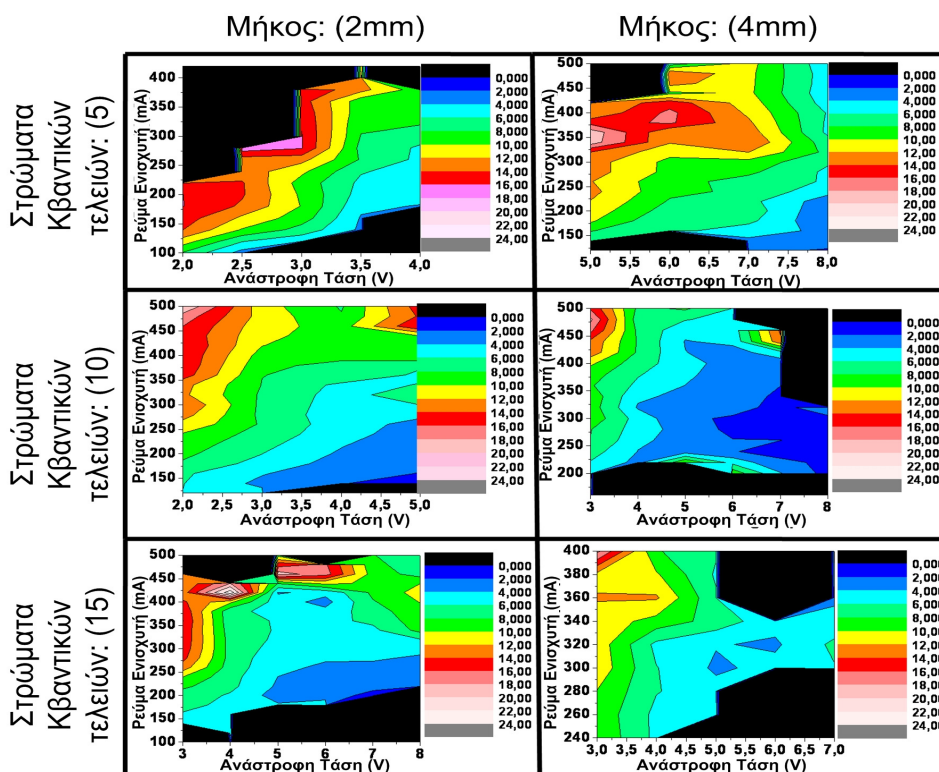
Για την μέτρηση της εκπεμπόμενης ισχύος σε συνθήκες παλμικής λειτουργίας, χρησιμοποιήθηκαν δύο προσεγγίσεις ανάλογα με το μήκος της διάταξης. Στην περίπτωση διατάξεων με μήκος 2mm και 4mm, ο κατασκευαστής επέβαλε τη χρήση του 15% του συνολικού μήκους ως κορεσμένο απορροφητή, και κατά συνεπεία αυτό το τμήμα πολώθηκε ανάστροφα μέσω πηγής σταθερής τάσης. Όσο αφορά τις διατάξεις 8mm η κατασκευαστική προδιαγραφή ήταν το ποσοστό του απορροφητή να αποτελεί το 11% του συνολικού μήκους (κεφάλαιο 4). Σε αυτή την περιοχή λειτουργίας παρατηρήθηκαν οι ίδιες τάσεις σε σχέση με την περίπτωση συνεχούς λειτουργίας, δηλαδή η αύξηση των κβαντικών στρωμάτων και του μήκους επέφερε αύξηση της μέσης εκπεμπόμενης ισχύος. Παρόλα αυτά στην περίπτωση της παλμικής λειτουργίας η ύπαρξη κορεσμένου απορροφητή επέφερε μείωση της διαθέσιμης οπτικής ισχύος, λόγω των αυξημένων μη κορεσμένων απωλειών καθώς και αύξηση του ρεύματος κατωφλίου των διατάξεων.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

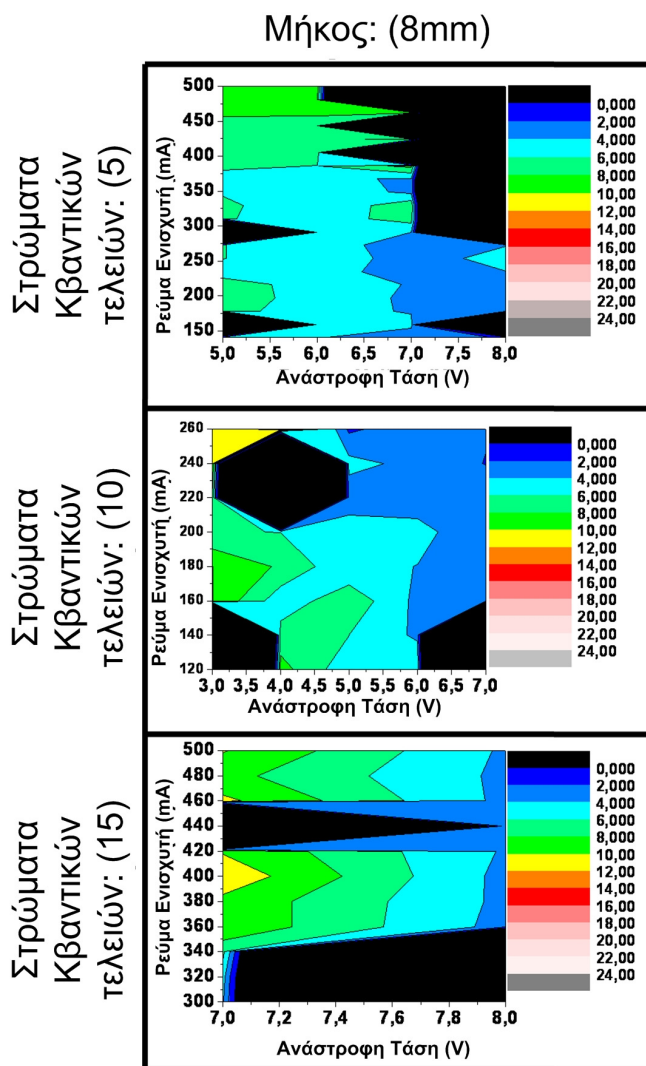
Οι μη κορεσμένες απώλειες του τμήματος απορρόφησης δεν ήταν ανεξάρτητες των συνθηκών πόλωσης. Πιο συγκεκριμένα η αύξηση της ανάστροφης τάσης, προκάλεσε αύξηση των μη κορεσμένων απωλειών λόγω φαινομένου Stark [14]. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η αύξηση του ρεύματος κατωφλίου καθώς και η μείωση της κβαντικής απόδοσης των διατάξεων με την αύξηση της ανάστροφης τάσης (σχήμα 7.6). Η υψηλότερη μεταβολή της κβαντικής απόδοσης ήταν της τάξης του -0.12W/A και παρουσιάστηκε για μεταβολή της τάσης από 0V σε -8V σε μια διάταξη 10 στρωμάτων με μήκος 4mm. Επιπλέον αξίζει να σημειωθεί ότι η επίδραση του κορεσμένου απορροφητή δεν ήταν όμοια για όλες τις διατάξεις. Όπως φαίνεται στο σχήμα 7.4 τη μεγαλύτερη επίδραση στην ισχύ παρουσίασε ο απορροφητής των 15 κβαντικών σημείων ενώ αντίθετα στις διατάξεις με 5 κβαντικά στρώματα η επίδραση του κορεσμένου απορροφητή ήταν περιορισμένη.

7.2.2 Χρονικό εύρος παλμού

Στα σχήματα 7.5 και 7.6 παρουσιάζεται η εξέλιξη του χρονικού εύρους των παλμών ως προς τις συνθήκες πόλωσης για όλες τις διατάξεις. Η χρωματική κλίμακα στα διαγράμματα είναι κοινή ώστε να επιτευχθεί η εύκολη σύγκριση μεταξύ των διατάξεων, ενώ με μαύρο χρώμα παρουσιάζονται περιοχές που είτε δεν καταγράφηκε παλμική λειτουργία (CW) είτε οι παραγόμενοι παλμοί ήταν εξαιρετικά ασταθής παρουσιάζοντας έντονα φαινόμενα υπερ-διαμόρφωσης του πλάτους (Q switching instabilities).



Σχήμα 7-5 Χρωματική αναπαράσταση του χρονικού εύρους σε ps των παραγόμενων παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 2mm και 4mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5,10 και 15.



Σχήμα 7-6 Χρωματική αναπαράσταση του χρονικού εύρους των παραγόμενων παλμών σε ps προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 8mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5,10 και 15.

Η επίδραση των συνθηκών πόλωσης στην ποιότητα των παραγόμενων παλμών για όλες τις διατάξεις παρουσίασε τις ίδιες τάσεις που παρουσιάστηκαν αναλυτικά στα κεφάλαια 3 και 4. Η αύξηση του ρεύματος ενίσχυσης συνέβαλε στην αύξηση του εύρους του παλμού λόγω φαινομένων κορεσμού της απολαβής και αυτοδιαμόρφωσης της φάσης [15], ενώ αντίθετα η αύξηση της ανάστροφης τάσης του απορροφητή μέσω της εκθετικής μείωσης του χρόνου σάρωσης των φωτο-παραγόμενων φορέων προκάλεσε σημαντική μείωση στο εύρος των παλμών [16]-[17]. Ο παλμός με τα καλύτερα χρονικά χαρακτηριστικά καταγράφηκε για μία διάταξη με μήκος 4mm και 10 στρώματα κβαντικών τελειών. Το χρονικό του εύρος, θεωρώντας gaussian κατανομή, υπολογίστηκε σε 1.3ps. Για την επίτευξη τόσο χαμηλού χρονικού εύρους χρησιμοποιήθηκε ισχυρή ανάστροφη τάση στο τμήμα απορρόφησης (-8V), ενώ το ρεύμα του τμήματος ενίσχυσης ήταν οριακά πάνω από το κατώφλι ίσο με 220mA. Το χρονικό εύρος σε συνδυασμό με το αντίστοιχο εύρος του οπτικού φάσματος σε αυτές τις συνθήκες (6nm), επέτρεψε τον υπολογισμό του γινόμενο χρόνου οπτικού εύρους (time

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

bandwidth product – TBWP), το οποίο ήταν 1.42. Αυτή η τιμή συνεπάγεται ότι οι παλμοί δεν ήταν περιορισμένης μετατροπής (transform limited).

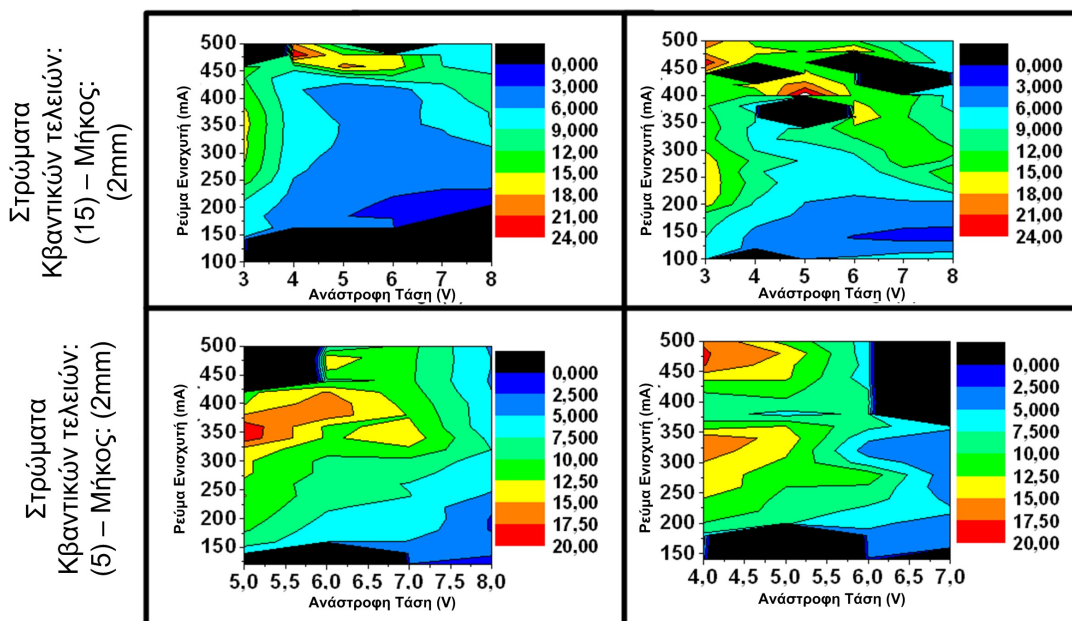
Σε επίπεδο δομικών παραμέτρων πρώτα μελετήθηκε η επίδραση του αριθμού των κβαντικών στρωμάτων, στο εύρος των παλμών ανεξαρτήτως μήκους και πλάτους. Για όλες τις διατάξεις παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των κβαντικών στρωμάτων επέφερε βελτίωση τόσο στο εύρος των παλμών όσο και στο εύρος των συνθηκών πόλωσης, που μπορούσε να επιτευχθεί σταθερή παλμική λειτουργία. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της αύξησης των στρωμάτων από 5 σε 10, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και στα σχήματα 7.5-7.6, η βελτίωση της λειτουργίας είναι έντονη. Πιο συγκεκριμένα αν θεωρήσουμε τις περιοχές που έχουν χρωματική απόχρωση μπλε ή ανοιχτό μπλε και ισοδυναμούν με εύρη παλμών μικρότερα των 4ps, μπορεί να παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση των 5 στρωμάτων απουσιάζουν τελείως ή στην καλύτερη περίπτωση (4mm) εμφανίζονται για περιορισμένο εύρος συνθηκών πόλωσης (τάση από -7V μέχρι -8V και ρεύμα από 100mA μέχρι 200mA). Τουναντίον στην περίπτωση των διατάξεων με 10 στρώματα τέτοιας ποιότητας παλμοί παράγονται για ένα μεγάλο εύρος συνθηκών (-4V - -8V και 200mA – 450mA). Στην περίπτωση της αύξησης των στρωμάτων από 10 σε 15 δεν προκλήθηκε σημαντική βελτίωση στις επιδόσεις των διατάξεων, ενώ σε πολλές περιπτώσεις παρουσιάστηκε ακόμα και περιορισμός των επιδόσεων της διάταξης.

Στην περίπτωση που η ελεύθερη παράμετρος ήταν το συνολικό μήκος των διατάξεων, απευθείας σύγκριση των επιδόσεων μπορούσε να πραγματοποιηθεί μόνο μεταξύ των διατάξεων με 2mm και 4mm μήκος, μια στις δύο αυτές δομές το ποσοστό απορροφητή/ενισχυτή παρέμεινε σταθερό και ίσο με 15%. Για αυτές τις διατάξεις η αύξηση του μήκους βελτίωσε σημαντικά την ποιότητα της εγκλειδωσης, επιτρέποντας την παραγωγή στενών παλμών (<4ps) για μεγαλύτερο εύρος συνθηκών πόλωσης. Στην περίπτωση των διατάξεων με μήκος 8mm, καταγράφηκαν εξαιρετικά στενοί παλμοί, ενώ επιπροσθέτως η εγκλειδωση των τρόπων επιτεύχθηκε για μεγαλύτερο εύρος τιμών πόλωσης. Αν και οι επιδόσεις αυτών των διατάξεων δε μπορούν να συγκριθούν απευθείας με τις υπόλοιπες διατάξεις, λόγω μικρότερου ποσοστού απορροφητή/ενισχυτή, η συμπεριφορά τους αναδεικνύει ότι η αύξηση του μήκους των διατάξεων πιθανώς να διαδραματίζει θετικό ρόλο στην παθητική εγκλειδωση υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Επιπλέον η παρατηρούμενη μείωση στο εύρος των παλμών για τις διατάξεις 8mm, μπορεί να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι το μήκος του λείζερ επιδρά πιο έντονα στη δυναμική των παλμών από ότι η μικρή μεταβολή στο ποσοστό απορροφητή/ενισχυτή.

Στην περίπτωση μελέτης της επίδρασης του πλάτους της κοιλότητας στο χρονικό προφίλ των παραγόμενων παλμών, δεν μπόρεσε να εξαχθεί ενιαίο συμπέρασμα για όλες τις διατάξεις. Η μεταβολή του πλάτους από 6μm σε 4μm είχε διαφορετικές συνέπειες για διατάξεις, οι οποίες είχαν διαφορετικό αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών. Συγκεκριμένα από τις διαθέσιμες διατάξεις δύο διαφορετικές περιπτώσεις εξάχθηκαν. Στην πρώτη περίπτωση η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για διατάξεις οι οποίες είχαν 15 στρώματα κβαντικών σημείων και μήκος 4mm, ενώ η δεύτερη περιλάμβανε διατάξεις 5 στρωμάτων και μήκους 2mm. Στο σχήμα 7.7 (πάνω) παρουσιάζεται η μεταβολή του εύρους των παλμών για την πρώτη περίπτωση. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί η μείωση του πλάτους του κυματοδηγού επέφερε έντονη αύξηση του χρονικού εύρους των παλμών και περιορισμό των περιοχών που μπορούσε να επιτευχθεί ποιοτική εγκλειδωση τρόπων με χρονικά εύρη παλμών μικρότερα των 4ps. Στο σχήμα 7.7 (κάτω) παρουσιάζεται η μεταβολή του εύρους για την δεύτερη περίπτωση. Σε αντίθεση με τις διατάξεις 15 κβαντικών στρωμάτων, οι διατάξεις 5

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

στρωμάτων επέδειξαν μεγάλη ανοχή στη μεταβολή του πλάτους του κυματοδηγού και δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αυξομειώσεις στη χρονική διάρκεια των παλμών.

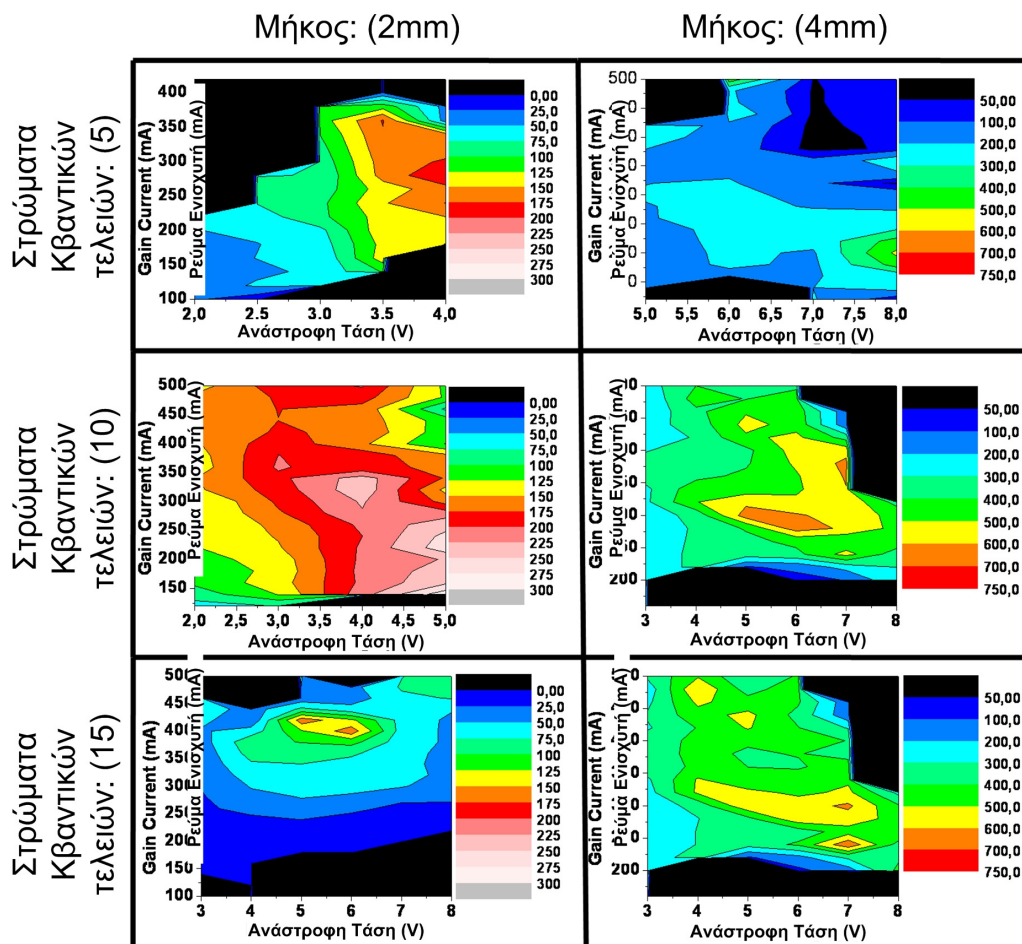


Σχήμα 7-7 Χρωματική αναπαράσταση του χρονικού εύρους των παραγόμενων παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 2mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 15 (πάνω), για διατάξεις με μήκος 4mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5 (κάτω)

7.2.3 Ισχύ κορυφής

Η εξάρτηση της ισχύος κορυφής από τις συνθήκες πόλωσης δεν παρουσιάζει μονότονη συμπεριφορά εξαιτίας του γεγονότος ότι εξαρτάται τόσο από το χρονικό εύρος των παλμών, όσο και από την μέση ισχύ εκπομπής, καθώς επίσης σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και ο ρυθμός επανάληψης. Όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4 και παρουσιάστηκε και στα σχήματα 7.1 μέχρι 7.7 αυτού του κεφαλαίου, αυτές οι παράμετροι δεν μεγιστοποιούνται στις ίδιες συνθήκες πόλωσης. Στα σχήματα 7.8 – 7.12 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ισχύος κορυφής συναρτήσει του ρεύματος και της ανάστροφης τάσης για τις διατάξεις που παρουσιάστηκαν στα σχήματα 7.5 μέχρι και 7.7 αντίστοιχα. Η χρωματική απεικόνιση των διαγραμμάτων έχει κρατηθεί σταθερή για κάθε μήκος έτσι ώστε να μπορεί να πραγματοποιηθεί απευθείας σύγκρισή των αποτελεσμάτων για διαφορετικό αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών.

Χρησιμοποιώντας το μήκος της διάταξης ως ελεύθερη παράμετρο, παρατηρήθηκε ότι η αύξηση του μήκους της διάταξης προκάλεσε σημαντική αύξηση της ισχύος κορυφής, λόγω του μικρότερου εύρους των παλμών, της ισχυρότερης μέσης ισχύος καθώς και του μικρού ρυθμού επανάληψης, ο οποίος στην περίπτωση των διατάξεων με μήκος 8mm ήταν 5GHz. Η μεγαλύτερη τιμή ισχύος κορυφής παρατηρήθηκε για μια διάταξη μήκους 8mm, 10 κβαντικών στρωμάτων και πλάτους 6μm και ήταν 1.8W. Οι συνθήκες πόλωσης που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη αυτής της υψηλής τιμής ισχύος ήταν -5V στο τμήμα απορρόφησης, και 260mA στο τμήμα ενίσχυσης.

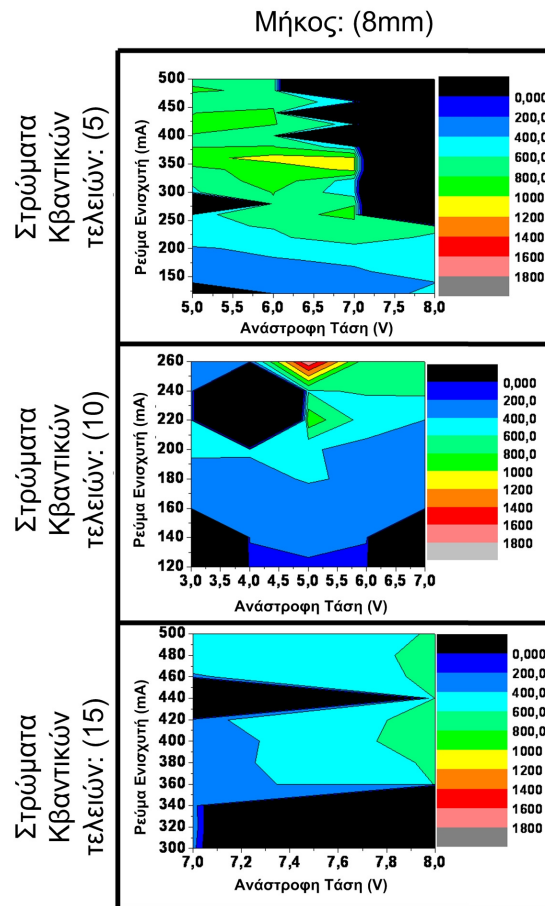


Σχήμα 7-8 Χρωματική αναπαράσταση της ισχύος κορυφής των παραγόμενων παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 2mm και 4mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5,10 και 15.

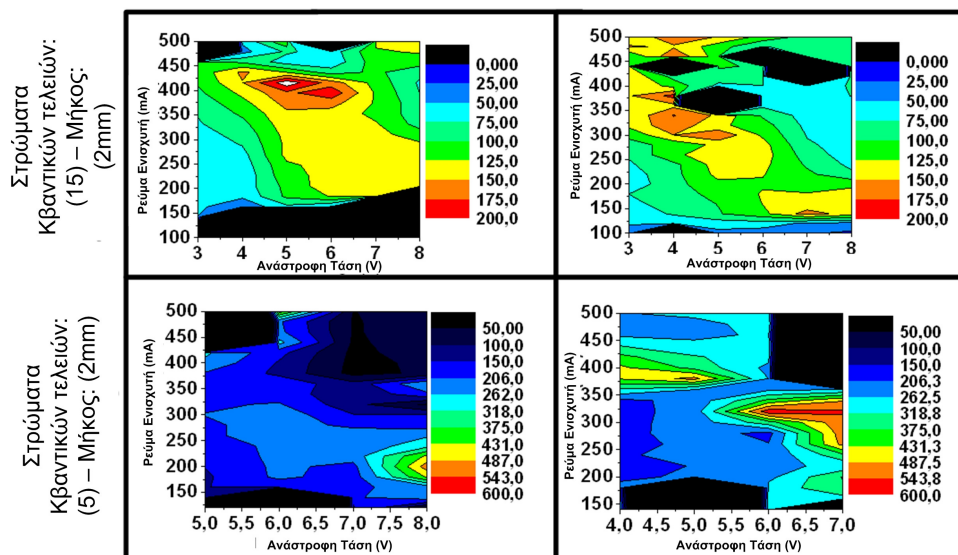
Στην περίπτωση που η σύγκριση των διατάξεων πραγματοποιηθεί ως προς τον αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών παρατηρήθηκαν οι ίδιες τάσεις που παρουσιάστηκαν για τη διακύμανση του εύρους των παλμών. Πιο συγκεκριμένα με την αύξηση των στρωμάτων από 5 σε 10 παρατηρήθηκε σημαντική βελτίωση της ισχύος, η οποία οφειλόταν στην ταυτόχρονη βελτίωση της μέσης ισχύος αλλά και του εύρους των παλμών. Στην περίπτωση της αλλαγής των στρωμάτων από 10 σε 15, δεν παρουσιάστηκε περαιτέρω βελτίωση της ισχύος κορυφής, λόγω του γεγονότος ότι η περιορισμένη αύξηση της μέσης ισχύος αντισταθμίστηκε από την διαπλάτυνση των παραγόμενων παλμών.

Όπως παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους (σχήμα 7.7) η μεταβολή του πλάτους του κυματοδηγού είχε διαφορετικό αντίκτυπο σε διατάξεις με διαφορετικό αριθμό κβαντικών στρωμάτων. Σε πλήρη αντιστοιχία με αυτή τη συμπεριφορά, κατά τον υπολογισμό της ισχύος κορυφής προς τις συνθήκες πόλωσης (σχήμα 7.10) παρατηρήθηκαν δύο διακριτές συμπεριφορές. Στην περίπτωση των διατάξεων με 5 στρώματα κβαντικών τελειών, η σχετική σταθερότητα τόσο του χρονικού εύρους των παλμών αλλά και της μέσης εκπεμπόμενης ισχύος με τη μεταβολή του πλάτους, επέτρεψε την περιορισμένη αυξομείωση της ισχύος κορυφής για όλο το εύρος των τιμών πόλωσης. Αντίθετα οι διατάξεις οι οποίες διέθεταν 15 στρώματα τελειών ως ενεργό υλικό, λόγω του συνδυαστικού αποτελέσματος της μείωσης της μέσης ισχύος

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές και της ταυτόχρονης αύξησης του χρονικού προφίλ των παλμών, παρουσίασαν περιορισμό της ισχύος κορυφής.



Σχήμα 7-9 Χρωματική αναπαράσταση της ισχύος κορυφής των παραγόμενων παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 8mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5,10 και 15.



Σχήμα 7-10 Χρωματική αναπαράσταση του χρονικού εύρους των παραγόμενων παλμών προς τις συνθήκες πόλωσης, για διατάξεις με μήκος 2mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 15 (πάνω), για διατάξεις με μήκος 4mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών 5 (κάτω)

7.2.4 Δυνατότητα πολύ-φασματικής εκπομπής

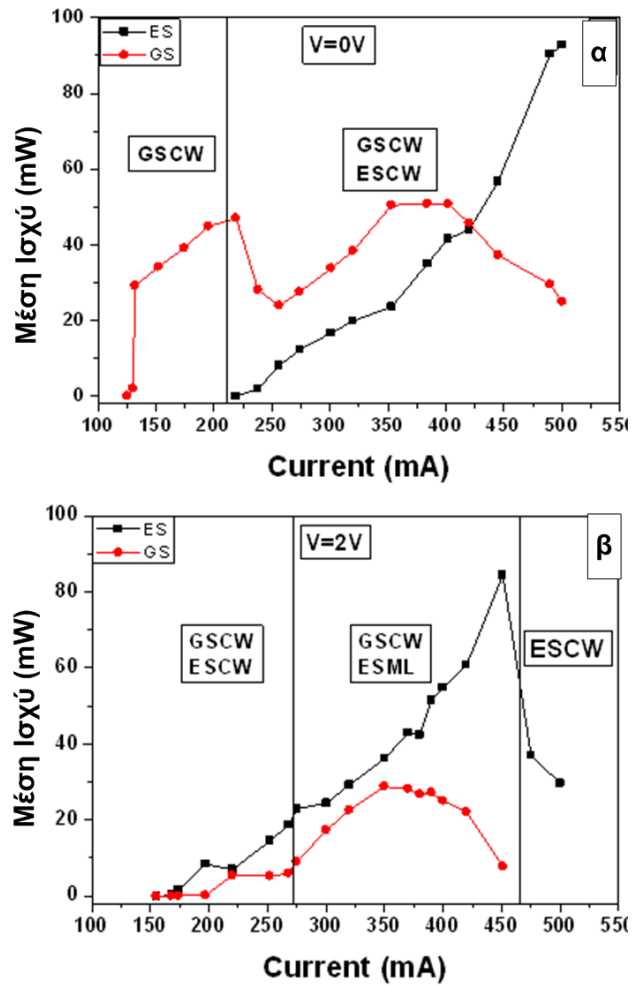
Στα προηγούμενα κεφάλαια παρουσιάστηκαν οι πολύ-φασματικές δυνατότητες των διατάξεων κβαντικών τελειών, είτε αυτές προερχόταν από αποδιεγέρσεις στο ES (κεφάλαιο 5) είτε οφειλόταν σε φαινόμενα κορεσμού της απολαβής στο GS (κεφάλαιο 6). Επιπλέον παρουσιάστηκαν στα αντίστοιχα κεφάλαια τα βασικά πλεονεκτήματα που παρέχει η ύπαρξη πολλών μηκών κύματος εκπομπής, σε συνδυασμό με τις πιθανές εφαρμογές στις οποίες τέτοιες διατάξεις θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν. Παρόλα αυτά κατά τον χαρακτηρισμό των διαθέσιμων λέιζερ παρατηρήθηκε ότι μόνο οι διατάξεις, οι οποίες παρουσίαζαν συγκεκριμένα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά επέτρεπαν την πολύ-φασματική εκπομπή. Ο εντοπισμός αυτών των κατασκευαστικών παραμέτρων έχει εξαιρετικό ενδιαφέρον, μια και θα επιτρέψει την καλύτερη κατανόηση του φυσικού μηχανισμού που είναι υπεύθυνος για αυτά τα φαινόμενα ενώ επιπροσθέτως, θα παρέχει χρήσιμα συμπεράσματα για την παραγωγή διατάξεων, οι οποίες θα είναι βελτιστοποιημένες να εκπέμπουν από πολλά μήκη κύματος ταυτόχρονα.

7.2.4.1 Εκπομπή από το ES

Στις διατάξεις που παρουσίασαν δυνατότητα εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES, χρησιμοποιήθηκαν συγκεκριμένες συνθήκες πόλωσης για να επιτευχθεί αυτή η περιοχή λειτουργίας. Συγκεκριμένα τόσο το ρεύμα του ενισχυτή όσο και η ανάστροφη πόλωση που είχε εφαρμοστεί στον απορροφητή έπρεπε να έχουν τιμές μεγαλύτερες των 400mA και -6V αντίστοιχα. Αυτές οι συνθήκες λειτουργίας οδήγησαν, όπως αναφέρθηκε και στα κεφάλαια 3 και 5, σε γρήγορο κορεσμό τους φορείς του GS με αποτέλεσμα τη συγκέντρωση φορέων σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες (ES) και την δυνατότητα ακτινοβολικών επανασυνδέσεων με μικρότερο μήκος κύματος.

Όσο αναφορά τις κατασκευαστικές παραμέτρους και την επίδραση τους στην πολύ-φασματική εκπομπή παρατηρήθηκε έντονη εξάρτηση από το μήκος της διάταξης [13] αλλά και από τον αριθμό κβαντικών στρωμάτων. Συγκεκριμένα εκπομπή από το ES παρατηρήθηκε μόνο σε διατάξεις οι οποίες είχαν μήκος μικρότερο των 4mm και αριθμό στρωμάτων κβαντικών τελειών ίσο με πέντε. Οι διατάξεις με 2mm μήκος παρόλο που επέτρεψαν την εμφάνιση εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES, δεν επέτρεψαν την ενδεδειγμένη καταγραφή των χρονικών χαρακτηριστικών των παλμών για ένα ευρύ φάσμα τιμών πόλωσης. Με σκοπό την περαιτέρω ανάδειξη του ρόλου του μήκους στην εγκλειδωση των τρόπων του ES, αλλά και για την καλύτερη χαρτογράφηση της περιοχής λειτουργίας, χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη με ακόμα μικρότερο μήκος ίσο με 1.3mm η οποία όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.11 επέτρεψε την ταυτόχρονη εκπομπή GS/ES για μικρή τιμή ανάστροφης πόλωσης στον απορροφητή (-2V).

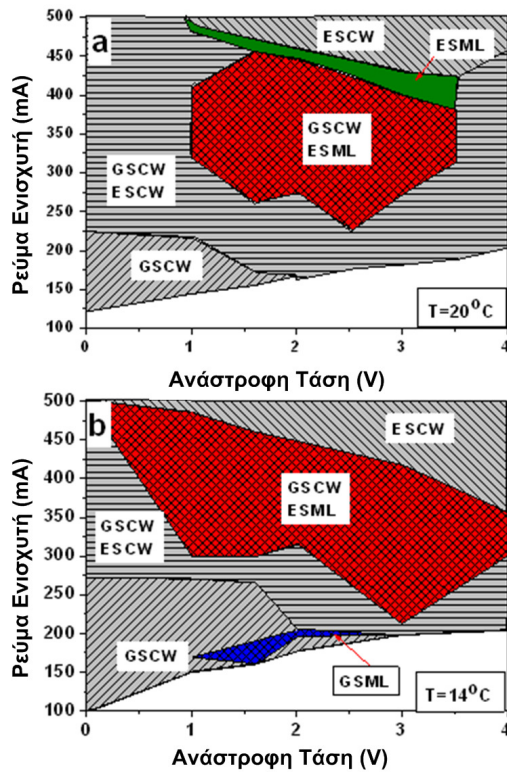
Ο ταχύτατος κορεσμός των φορέων του GS λόγω του μειωμένου μήκους επέτρεψε την μελέτη της παλμικής λειτουργίας του ES χωρίς την ύπαρξη παλμικής εκπομπής από το GS. Πιο συγκεκριμένα για θερμοκρασία λειτουργίας 20°C, παρατηρήθηκε εγκλειδωση τρόπων μόνο από το ES, ενώ όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.12 η μείωση της θερμοκρασίας επέτρεψε τόσο την διεύρυνση των τιμών πόλωσης που πραγματοποιείτο εγκλειδωση από το ES όσο και την εμφάνιση μιας έστω και εξαιρετικά περιορισμένης περιοχής που μπόρεσε να καταγραφούν παλμοί από τη φασματική περιοχή του GS. Με τους όρους GS/ES CW εννοείται συνεχής λειτουργία από το GS ή το ES αντίστοιχα, ενώ με τον όρο GS/ES ML εννοείται παλμική συμπεριφορά από τις αντίστοιχες φασματικές περιοχές. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί η μείωση της θερμοκρασίας ενισχύει την ύπαρξη παλμικής εκπομπής από το ES, ενώ ταυτόχρονα προκαλεί αύξηση της οπτικής ισχύος στο GS [18].



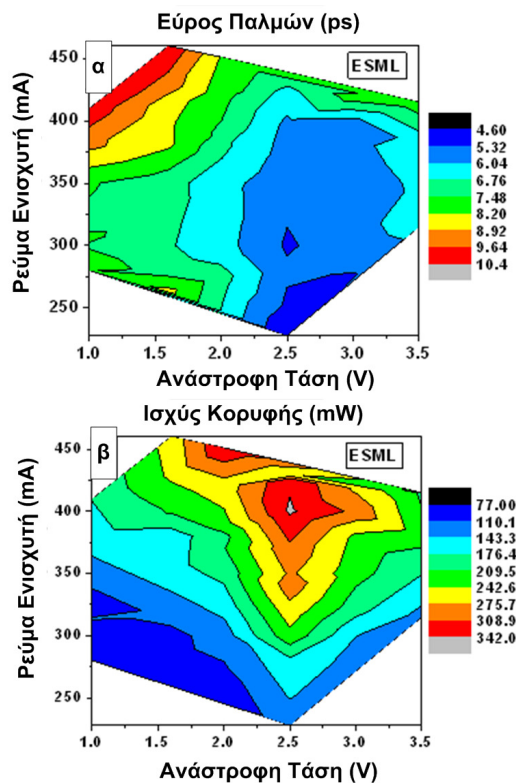
Σχήμα 7-11 Μέση ισχύ για την διάταξη με μήκος 1.3mm, ως προς το ρεύμα άντλησης για δύο διαφορετικές συνθήκες 0V(α) και -2V(β).

Τα φασματικά χαρακτηριστικά των παλμών καθώς και η αντίστοιχη ισχύς κορυφής, που καταγράφηκαν για το εν λόγω λέιζερ παρουσιάζονται στο σχήμα 7.13. Το βέλτιστο χρονικό εύρος που καταγράφηκε από τη συγκεκριμένη διάταξη ήταν 4.6ps και επετεύχθη όταν το ρεύμα άντλησης ήταν κοντά στο κατώφλι έναυσης του λέιζερ. Τέλος η ισχύς κορυφής ελαφρώς ήταν αυξημένη σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές ισχύος που καταγράφηκαν για τις διατάξεις των προηγούμενων παραγράφων. Αίτιο αυτού του φαινομένου ήταν η αυξημένη πυκνότητα ρεύματος λόγω μικρού όγκου της διάταξης, και κατ' επέκταση η ενίσχυση της μέσης ισχύος από το ES.

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 7-12 Χαρτογράφηση των περιοχών λειτουργίας της διάταξης προς τις συνθήκες πόλωσης, για δύο θερμοκρασίες λειτουργίας 20oC (πάνω) και 14oC (κάτω).



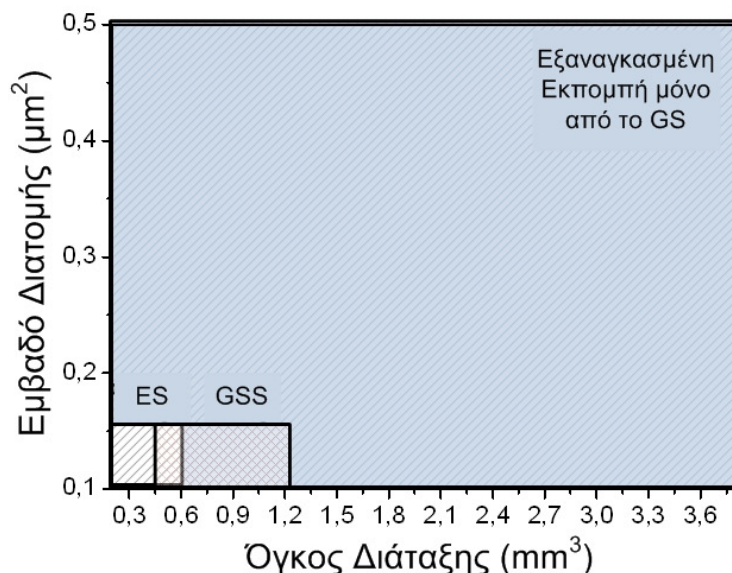
Σχήμα 7-13 Χρωματική αναπαράσταση ως προς τις συνθήκες πόλωσης του χρονικού εύρους των παλμών (α) και της ισχύος κορυφής (β)

7.2.4.2 Διπλή εκπομπή από το GS

Η δεύτερη περιοχή πολύ φασματικής εκπομπής αφορά την διπλή εκπομπή από το GS. Η επίτευξη αυτής της περιοχής λειτουργίας πραγματοποιήθηκε για τιμές πόλωσης χαμηλότερες από αυτές που απαιτήθηκαν για την εμφάνιση εκπομπής από το ES. Επιπλέον στις περισσότερες διατάξεις το φαινόμενο της διπλής εκπομπής από το GS προηγούταν της εμφάνισης εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES. Η σειρά εμφάνισης των δύο περιοχών λειτουργίας συσχετίζεται με το γενεσιουργό αίτιο του κάθε φαινομένου. Πιο συγκεκριμένα όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 6, η δημιουργία διπλής εκπομπής από το GS σχετίζεται με την ενίσχυση φαινομένων κορεσμού της απολαβής της συγκεκριμένης ενεργειακής ζώνης. Λαμβάνοντας υπόψη μας ότι η επίτευξη εκπομπής από το ES σχετίζεται και αυτή με τη σειρά της με τον κορεσμό των φορέων του GS, είναι απολύτως αναμενόμενο το ένα φαινόμενο να προηγείται του άλλου.

Όσο αναφορά την επίδραση των κατασκευαστικών παραμέτρων, το φαινόμενο της διπλής εκπομπής από το GS παρατηρήθηκε μόνο σε διατάξεις με 5 στρώματα κβαντικών τελειών. Επιπροσθέτως, σε αντίθεση με την εμφάνιση εκπομπής από το ES η διπλή εκπομπή από το GS καταγράφηκε μόνο για διατάξεις με μήκος μεγαλύτερο των 2mm (4mm – 8mm). Λαμβάνοντας υπόψη ότι και τα δύο φαινόμενα σχετίζονται με τον κορεσμό φορέων της ενεργειακής ζώνης του GS, ενώ η εμφάνιση του ES ενισχύεται σημαντικά από την μείωση του μήκους κάποιοι βασικοί κανόνες μπορεί να εξαχθούν για την ενίσχυση της διπλής εκπομπής από το GS. Όσο αναφορά τον αριθμό των στρωμάτων κβαντικών τελειών, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μείωση τους προκαλεί μείωση της ενεργού περιοχής, σημαντική αύξηση της πυκνότητας ρεύματος και κατ' επέκταση ταχύ κορεσμό των φορέων. Η ρόλος του μήκους στην επίτευξη διπλής εκπομπής από το GS είναι διπλός. Μειώνοντας το μήκος της διάταξης προκαλείται μείωση του όγκου της διάταξης με αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας ρεύματος, ενώ ταυτόχρονα όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους υποβοηθάται η έναυση του ES. Συνεπώς οι διατάξεις με μήκος μικρότερο των 2mm έχουν αυξημένη πυκνότητα ρεύματος που βοηθά τον γρήγορο κορεσμό των φορέων αλλά ταυτόχρονα υποβαθμίζουν το φαινόμενο λόγω ενίσχυσης του ES. Στην περίπτωση που το μήκος είναι μεγαλύτερο των 4mm επιτυγχάνεται κορεσμός του GS αλλά λόγω απουσίας εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES (ή εμφάνιση της σε πολύ υψηλές συνθήκες άντλησης) το φαινόμενο της διπλής εκπομπής από το GS είναι εξαιρετικά ισχυρό.

Συμπερασματικά στο σχήμα 7.14 παρουσιάζονται τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά για τα οποία παρατηρήθηκε διπλή εκπομπή ή από το GS ή από το GS/ES. Όπως μπορεί να εξαχθεί από το σχήμα πολύ φασματική εκπομπή παρατηρείται μόνο όταν το εμβαδό διατομής του κυματοδηγού (πλάτος κυματοδηγού · ύψος κβαντικών τελειών) είναι μικρότερο από $0.15\mu\text{m}^2$ (5 στρώματα κβαντικών τελειών), ενώ όσο αναφορά το συνολικό όγκο (κυρίως το μήκος της διάταξης) για μικρές τιμές ($<0.4\mu\text{m}^3$) κυριαρχεί η εξαναγκασμένη εκπομπή από το ES, για εύρος όγκου μεταξύ των 0.5 και $0.6\mu\text{m}^3$ παρατηρούνται και τα δύο φαινόμενα, ενώ τέλος όταν ο όγκος ξεπεράσει τα $0.6\mu\text{m}^3$ η εκπομπή από το ES καταστέλλεται και το φαινόμενο της διπλής εκπομπής από το GS ενισχύεται σημαντικά.



Σχήμα 7-14 Περιοχές λειτουργίας προς τον όγκο και τη διατομή του κυματοδηγού

7.3 Προσομοίωση και εξαγωγή συμπερασμάτων

7.3.1 Προσομοιώσεις

Η εξάρτηση όλων των παραμέτρων που εξετάστηκαν στις προηγούμενες παραγράφους από τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των διατάξεων βασίζονται σε δύο βασικά φαινόμενα, τη δυναμική κορεσμού του τμήματος ενίσχυσης ή του τμήματος απορρόφησης και τις κυματοδηγικές ιδιότητες κάθε διάταξης.

$$\frac{E_{sat,g}}{E_{sat,abs}} = \frac{hvA/G_g}{hvA/G_a} \quad (7.1)$$

Η συνήθης διαδικασία για τον έλεγχο της ποιότητας της εγκλειδωσης των τρόπων, βασίζεται στην σχέση 7.1, η οποία παρουσιάστηκε και στο κεφάλαιο 2. Παρόλα αυτά οι εκτενείς παραδοχές που χρησιμοποιούνται οδηγούν σε αδυναμία χρήσης της σχέσης 7.1 για την θεωρητική εξήγηση πειραματικών αποτελεσμάτων, τα οποία έχουν αποκτηθεί μέσω της μέτρησης δομών με μεταβλητό αριθμό κβαντικών στρωμάτων ή μεταβλητές διαστάσεις. Συνεπώς για την ορθή κατανόηση της πειραματικής συμπεριφοράς χρησιμοποιήθηκε μια διαφορετική προσέγγιση, η οποία βασίζεται στο [19]. Στη συγκεκριμένη προσέγγιση αγνοείται το είδος του υλικού (κβαντικές τελείες, φρέατα κλπ) και η διαδικασία της εγκλειδωσης αντιμετωπίζεται ως μία διακύμανση της μέσης απολαβής εντός της κοιλότητας, η οποία έχει χαρακτηριστική συχνότητα που επιβάλλεται από το ενεργό μήκος της διάταξης (ρυθμός επανάληψης παλμών). Η βασική σχέση για τη μοντελοποίηση της απολαβής δίνεται από την σχέση 7.2, όπου G_g και G_a είναι η διαφορική απολαβή και απορρόφηση αντίστοιχα, L_g και L_a το μήκος του ενισχυτικού τμήματος και του τμήματος απορρόφησης, g_0 και a_0 είναι η απολαβή και οι μη κορεσμένες απώλειες του τμήματος απορρόφησης, ω είναι η κυκλική συχνότητα ταλάντωσης της κοιλότητας, s είναι το πλάτος της ταλάντωσης το οποίο συσχετίζεται με την πυκνότητα φωτονίων, ενώ τέλος οι όροι T_g και T_a αντιστοιχούν στους χαρακτηριστικούς χρόνους του ενισχυτή και του απορροφητή και οι αναλυτικές τους σχέσεις δίνονται από τις εξισώσεις 7.3 και 7.4 αντίστοιχα.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

$$g_{net} = \left\{ \frac{-G_g g_0 L_g}{j\omega + 1/T_g} - \frac{-G_a a_0 L_a}{j\omega + 1/T_a} \right\} \cdot \frac{se^{j\omega t}}{L} \quad (7.2)$$

$$1/T_g = 1/\tau_g + G_g S_0 \quad (7.3)$$

$$1/T_a = 1/\tau_a + G_a S_0 \quad (7.4)$$

Όπου τ_g είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος αυθόρμητης εκπομπής, ενώ το γινόμενο $G_g S_0$ αντιπροσωπεύει τον ρυθμό εξαναγκασμένης εκπομπής. Τα αντίστοιχα μεγέθη του απορροφητή είναι το τ_a και $G_a S_0$ τα οποία εκφράζουν τον ρυθμό απορρόφησης. Το πρώτο πηλίκο εντός της αγκύλης στην σχέση 7.2 αντιπροσωπεύει την διαμόρφωση του τμήματος ενίσχυσης ενώ αντίστοιχα το δεύτερο μέλος εκφράζει την διαμόρφωση των απωλειών της κοιλότητας. Το πλάτος της ταλάντωσης s εκφράζει το βάθος της διαμόρφωσης (modulation depth), και θεωρείται ότι είναι 100% όποτε $s=S_0/2$, όπου S_0 είναι η πυκνότητα φωτονίων εντός της κοιλότητας και δίνεται από την σχέση 7.5

$$S_0 = \frac{1}{a_m u_g h\nu} \cdot \frac{\Gamma \cdot P}{WdL} \quad (7.5)$$

Όπου a_m είναι οι απώλειες από τις ανακλαστικές επιφάνειες της κοιλότητας, u_g είναι η ταχύτητα ομάδος, το γινόμενο $h \cdot \nu$ εκφράζει την ενέργεια του φωτονίου, το Γ είναι ο συντελεστής περιορισμού του οπτικού τρόπου εντός της δομής, P είναι η οπτική ισχύς, ενώ τέλος με τους όρους W , d , L εννοούνται οι χωρικές διαστάσεις της διάταξης.

Χρησιμοποιώντας αυτές τις σχέσεις μπορεί να παραχθούν οι αναγκαίες συνθήκες για την επίτευξη σταθερής παλμικής λειτουργίας. Η πρώτη απαίτηση είναι ο ρυθμός επανάληψης να είναι σημαντικά μεγαλύτερος από το ρυθμό εξαναγκασμένης εκπομπής. Αυτό το κριτήριο προκύπτει, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 2, λόγω της απαίτησης τόσο οι απώλειες όσο και η απολαβή να έχουν αποκατασταθεί στις αρχικές τους τιμές πριν επιστρέψει ο οπτικός παλμός. Μια βασική προϋπόθεση για την επίτευξη παλμικής λειτουργίας είναι το πραγματικό τμήμα της εξίσωσης 7.2 να είναι μεγαλύτερο από τις απώλειες διάδοσης του κυματοδηγού (α_i). Αυτή η απαίτηση παρουσιάζεται από την ανισότητα 7.6, η οποία μπορεί να μετασχηματιστεί στην ανισότητα 7.7

$$\left(-G_g^2 g_0 \frac{L_g}{L} + G_a^2 a_0 \frac{L_a}{L} \right) \cdot \frac{S_0^2}{2\omega^2} > \alpha_i \quad (7.6)$$

$$\left(\frac{da_0}{dn} \right)^2 a_0 \frac{L_a}{L} - \left(\frac{dg_0}{dn} \right)^2 g_0 \frac{L_g}{L} > \frac{\alpha_i}{2} \left(a_m u_g \frac{Wd}{\Gamma \cdot P} h\nu \right)^2 \quad (7.7)$$

Λαμβάνοντας υπόψη μας ότι υπό συνθήκες ισχυρής άντλησης του τμήματος ενίσχυσης, παρατηρείται αναστροφή των πληθυσμών η διαφορική απολαβή μειώνεται σημαντικά, με αποτέλεσμα να μπορεί να θεωρηθεί ότι $\left(\frac{da_0}{dn} \right) \gg \left(\frac{dg_0}{dn} \right)$. Επιπροσθέτως η διαφορική

απορρόφηση μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται με την διαφορική απολαβή κοντά στο κατώφλι λειτουργίας, δηλαδή όταν η απολαβή του συστήματος είναι $g=0$, συνεπώς $\frac{da_0}{dn} \approx \frac{dg_0}{dn} \Big|_{g=0}$. Τέλος επειδή η διαφορική απολαβή είναι εξαιρετικά δύσκολο να

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

υπολογιστεί πειραματικά, μπορεί να αντικατασταθεί από την διαφορική απολαβή ως προς την πυκνότητα ρεύματος μέσω της σχέσης 7.8

$$\frac{\partial g}{\partial N} = \frac{\partial g}{\partial J} \frac{eN_i h \nu}{\eta_i \tau} \quad (7.8)$$

όπου N_i είναι η πυκνότητα ρεύματος ανά στρώμα κβαντικών τελειών, η_i είναι η απόδοση έγχυσης (injection efficiency), και τ είναι ο χρόνος ζωής φωτονίων.

Συνέπεια αυτών των παραδοχών είναι η περαιτέρω απλοποίηση της σχέσης 7.7, και η δημιουργία της τελικής σχέσης 7.9. Για την επίτευξη ποιοτικής παλμικής λειτουργίας θα πρέπει η σχέση 7.9 να ισχύει ισχυρά για όλες τις συνθήκες πόλωσης.

$$\left(\frac{dg_0}{dn} \Big|_{g=0} \right)^2 \frac{a_0}{a_i} > \frac{L}{2L_a} \left(n_i \tau \frac{a_m W u_g}{\Gamma \cdot P} \frac{h\nu}{q} \right)^2 \quad (7.9)$$

Για την αξιολόγηση του κάθε τμήματος της ανισότητας και κατ' επέκταση του ελέγχου της ποιότητας της παλμικής λειτουργίας, απαιτείται ο προσδιορισμός των παραμέτρων της ανισότητας 7.9. Για αυτό το σκοπό πραγματοποιήθηκαν δύο είδη προσομοιώσεων, η πρώτη είναι κυματοδηγικής φύσεως και χρησιμοποιεί τη δυσδιάστατη μέθοδο διάδοσης δέσμης (2D- beam propagation method), ενώ η δεύτερη βασίζεται σε ένα μοντέλο διάδοσης (travelling wave model) [20]. Στις παρακάτω παραγράφους περιγράφεται η κάθε τεχνική αλλά και πραγματοποιείται ο υπολογισμός των απαιτούμενων παραμέτρων.

Όσο αναφορά τις κυματοδηγικές ιδιότητες κάθε κοιλότητας, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει ο παράγοντας περιορισμού του οπτικού τρόπου (confinement factor), ο οποίος στην περίπτωση παθητικών κυματοδηγών ορίζεται ως ο λόγος του ποσοστού του οπτικού πεδίου που κυματοδηγείται εντός των χωρικών διαστάσεων της δομής προς το συνολικό πεδίο. Στην περίπτωση που η δομή είναι ενεργή ο συντελεστής περιορισμού ορίζεται ως ο λόγος της απολαβής του οπτικού τρόπου προς τη συνολική απολαβή του λέιζερ και δίνεται από τον τύπο 7.10, όπου $g(x)$ είναι η απολαβή και $E(x)$ το συνολικό οπτικό πεδίο.

$$\Gamma = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} g(x) |E(x)|^2 dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} |E(x)|^2 dx} \quad (7.10)$$

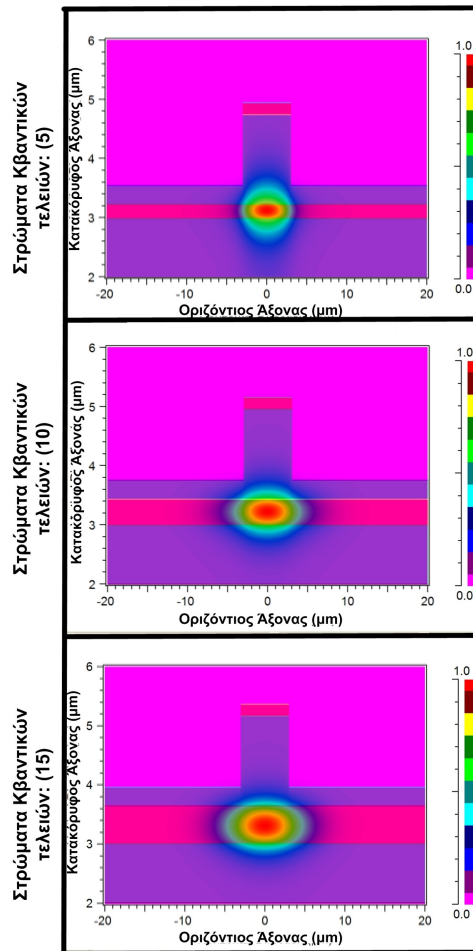
Ο συγκεκριμένος παράγοντας επηρεάζει τόσο τις ενεργές απώλειες διάδοσης εντός της κοιλότητας όσο και την ενέργεια κορεσμού κάθε τμήματος. Πιο αναλυτικά στην περίπτωση των ενεργών απωλειών ο παράγοντας περιορισμού καθορίζει το ποσοστό του οπτικού τρόπου το οποίο θα κυματοδηγείται εντός της ενεργού περιοχής, που στην περίπτωση των λέιζερ κβαντικών τελειών καθορίζεται από τον αριθμό κβαντικών στρωμάτων. Λαμβάνοντας υπόψη μας ότι η ενεργός περιοχή κυματοδηγησης δεν περιέχει προσμίξεις και ως εκ τούτου παρουσιάζει χαμηλές απώλειες διάδοσης σε αντίθεση με τα υπερκείμενα και υποκείμενα στρώματα που έχουν υποστεί ιοντική εμφύτευση και έχουν μεγάλο συντελεστή απορρόφησης, ο συντελεστής περιορισμού καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις ενεργές απώλειες της διάταξης.

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

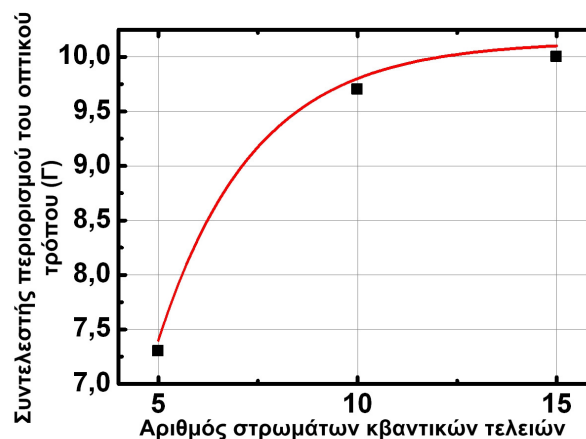
Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι κυματοδηγικές ιδιότητες και πιο συγκεκριμένα ο παράγοντας περιορισμού καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τόσο την εκπεμπόμενη ισχύ όσο και τα χρονικά χαρακτηριστικά των παλμών πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις με σκοπό τον υπολογισμό του παράγοντα Γ για όλες τις διαθέσιμες δομές λείζερ. Για την πραγματοποίηση των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε ένα εμπορικό πρόγραμμα με την ονομασία R-soft. Το συγκεκριμένο πακέτο προσομοιώσεων χρησιμοποιεί μεθόδους δισδιάστατης και τρισδιάστατης διάδοσης δέσμης, με σκοπό τον ακριβή υπολογισμό κυματοδηγικών χαρακτηριστικών πολύπλοκων δομών, οι οποίες αποτελούν προϊόν πολλαπλής επιταξίας διαφορετικών στρωμάτων. Τα κυματοδηγικά που μπορούν να υπολογιστούν είναι οι απώλειες της δομής, ο ενεργός δείκτης διάθλασης, ο παράγοντας περιορισμού του πεδίου κ.α. Η μέθοδος η οποία ακολουθήθηκε βασίζεται στην μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (finite difference) για την επίλυση της απλοποιημένης παραβολικής εξίσωσης Helmholtz, χρησιμοποιώντας αρκετές παραδοχές ώστε να μειωθεί σημαντικά η χρονική πολυπλοκότητα της ανάλυσης.

Στο σχήμα 6.14 παρουσιάζονται τρεις δομές λείζερ και οι αντίστοιχοι οπτικοί τρόποι που υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας την μέθοδο BPM και οι οποίες διαφέρουν ως προς τον αριθμό των κβαντικών στρωμάτων. Χρησιμοποιώντας τις χωρικές διαστάσεις του υπολογιζόμενου τρόπου σε συνδυασμό με τις συνολικές διαστάσεις της δομής, μπορεί να υπολογιστεί ο συντελεστής περιορισμού του οπτικού τρόπου, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 6.15. Οι δομές οι οποίες διέθεταν 5 στρώματα κβαντικών τελειών παρουσίασαν το χαμηλότερο συντελεστή Γ ίσο με 7.3%, η αύξηση του αριθμού των στρωμάτων σε 10 επέφερε σημαντική βελτίωση του περιορισμού του τρόπου (9.7%) ενώ αντίθετα από το αναμενόμενο η περαιτέρω αύξηση των στρωμάτων σε 15 επέφερε αμελητέα μεταβολή στο Γ ίση με 0.3% (10%). Εν γένει η αύξηση των αριθμών των στρωμάτων στη περιοχή κυματοδήγησης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του μεγέθους του κυματοδηγού και ως συνέπεια την γραμμική αύξηση του Γ . Παρόλο που στην περίπτωση των 5 και 10 στρωμάτων επιβεβαιώνεται αυτή η εξάρτηση, στην περίπτωση των 15 ο συντελεστής περιορισμού παραμένει σχεδόν αμετάβλητος. Για να εξηγηθεί αυτή η συμπεριφορά πρέπει να ληφθούν υπόψη και άλλα χαρακτηριστικά της δομής όπως το βάθος της εγχάραξης. Στις διατάξεις που μελετήθηκαν το βάθος της εγχάραξης ήταν 1.4 μm , με αποτέλεσμα στην περίπτωση των 10 και 15 στρωμάτων η κυματοδήγηση του οπτικού τρόπου να γίνεται αρκετά κοντά στην διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ GaAs ($n=3.5$) και αέρα ($n=1$). Αυτό το γεγονός είχε ως αποτέλεσμα την διαμόρφωση του δείκτη διάθλασης όχι μόνο από τον αριθμό των στρωμάτων αλλά και από τη διαφορά δεικτών διάθλασης που επέβαλε η διαχωριστική επιφάνεια. Συνεπώς στην περίπτωση της μεταβολής των στρωμάτων από 10 σε 15 ο συντελεστής Γ επηρεάζεται πιο έντονα από τη μεταβολή του δείκτη διάθλασης παρά από τον αριθμό στρωμάτων για αυτό και η περαιτέρω αύξηση τους δεν μπορεί να προσφέρει σημαντικά οφέλη.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 7-15 Το προφίλ του δείκτη διάθλασης της δομής σε συνδυασμό με τον βασικό τρόπο κυματοδότησης για 3 δομές (5, 10, 15 στρωμάτων κβαντικών τελειών)



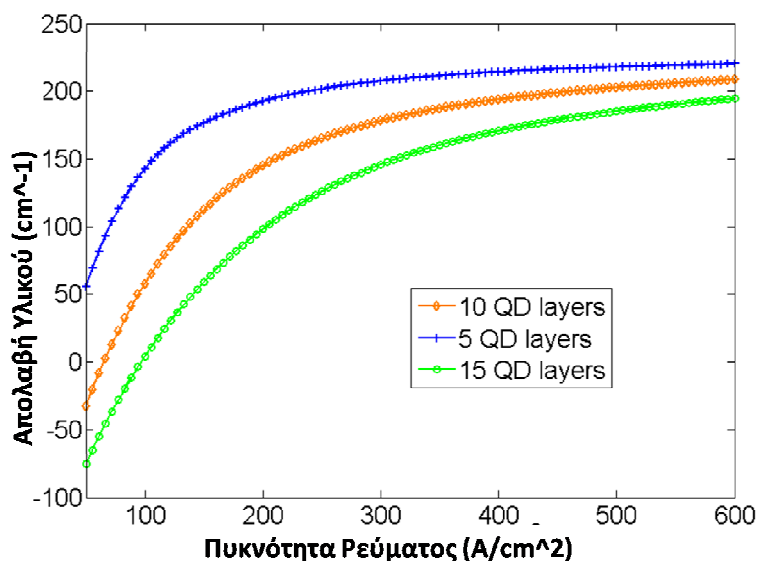
Σχήμα 7-16 Συντελεστής περιορισμού του οπτικού τρόπου προς τον αριθμό των στρωμάτων κβαντικών σημείων για διατάξεις με πλάτος κυματοδηγού 6μm

Χρησιμοποιώντας την ίδια μεθοδολογία με πριν υπολογίστηκε ο συντελεστής Γ για τις δομές του σχήματος (7.3), οι οποίες παρουσίαζαν διαφοροποιήσεις ως προς το πλάτος του κυματοδηγού. Για τις διατάξεις με 5 στρώματα κβαντικών σημείων η μεταβολή του

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

πλάτους δεν επέφερε σημαντικές μεταβολές στο Γ (από 7.3% σε 6.97%) ενώ αντίθετα στην περίπτωση που το λέιζερ διέθετε 15 στρώματα κβαντικών στρωμάτων η μείωση του πλάτους από 6μm σε 4μm επέφερε σημαντική μείωση του Γ από 10% σε 7.6%. Η εξήγηση για αυτή τη διαφοροποίηση προέρχεται και πάλι από την ακριβή θέση της περιοχής κυματοδήγησης ως προς το βάθος εγχάραξης και την απότομη μεταβολή του δείκτη διάθλασης που αυτό επιφέρει. Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση των 5 στρωμάτων η κυματοδήγηση πραγματοποιείται μακριά από τον ραχιαίο κυματοδηγό (ridge waveguide) με αποτέλεσμα η μεταβολή του πλάτους να μην προκαλεί μεταβολές στον περιορισμό του τρόπου. Στην περίπτωση των 15 στρωμάτων κβαντικών τελειών η κυματοδήγηση επιτυγχάνεται πολύ πιο κοντά στην επιφάνεια του ραχιαίου κυματοδηγού με αποτέλεσμα η μεταβολή του πλάτους να μεταβάλει σημαντικά της συνοριακές συνθήκες κυματοδήγησης μέσω της αλλαγής του δείκτη διάθλασης.

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις ρυθμών που αναπτύχθηκαν για το μοντέλο διάδοσης (travelling wave model) [20] πραγματοποιήθηκε προσαρμογή των πειραματικών αποτελεσμάτων με τις παραμέτρους του μοντέλου. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τον προσδιορισμό των τιμών για τις απώλειες διάδοσης του κυματοδηγού ($\alpha_i=1.5\text{cm}^{-1}$), τις μη κορεσμένες απώλειες του απορροφητή οι οποίες κυμαίνονταν ανάλογα με τον αριθμό των στρωμάτων κβαντικών τελειών από $40,15\text{cm}^{-1}$ για τις διατάξεις με 5 στρώματα κβαντικών τελειών, σε 53.15cm^{-1} για τα 10 στρώματα και τέλος σε 55 για τα 15 στρώματα. Επιπλέον υπολογίστηκε η απολαβή του υλικού (modal gain) για τρεις διαφορετικές δομές, οι οποίες διέφεραν ως προς τον αριθμό των κβαντικών στρωμάτων. Στο σχήμα 7.16 παρουσιάζεται η απολαβή των τρόπων για τις τρεις δομές.



Σχήμα 7-17 Απολαβή συναρτήσει της πυκνότητας ρεύματος για τρεις διαφορετικές δομές (γραμμή 5 στρώματα κβαντικών στρωμάτων, ρόμβος 10 στρώματα, κύκλος 15 στρώματα)

Χρησιμοποιώντας αυτές τις καμπύλες υπολογίστηκε μέσω διαφορίσης η διαφορική απολαβή όταν η πυκνότητα ρεύματος ήταν μηδενική. Για τις διατάξεις με στρώματα κβαντικών τελειών η διαφορική απολαβή ήταν 0,172, η τιμή της αυξήθηκε στην περίπτωση των 10 στρωμάτων στα 0.179, ενώ τέλος στην περίπτωση των 15 στρωμάτων η τιμή της διαφορικής απολαβής μειώθηκε στο 0.126. Έχοντας υπολογίσει το συντελεστή περιορισμού του οπτικού τρόπου αναμενόταν ότι η αύξηση των κβαντικών στρωμάτων από 10 σε 15, δεν θα προκαλούσε σημαντική αλλαγή στη διαφορική απολαβή. Παρόλα αυτά λαμβάνοντας υπόψη μας τη σχέση 7.8, η αλλαγή

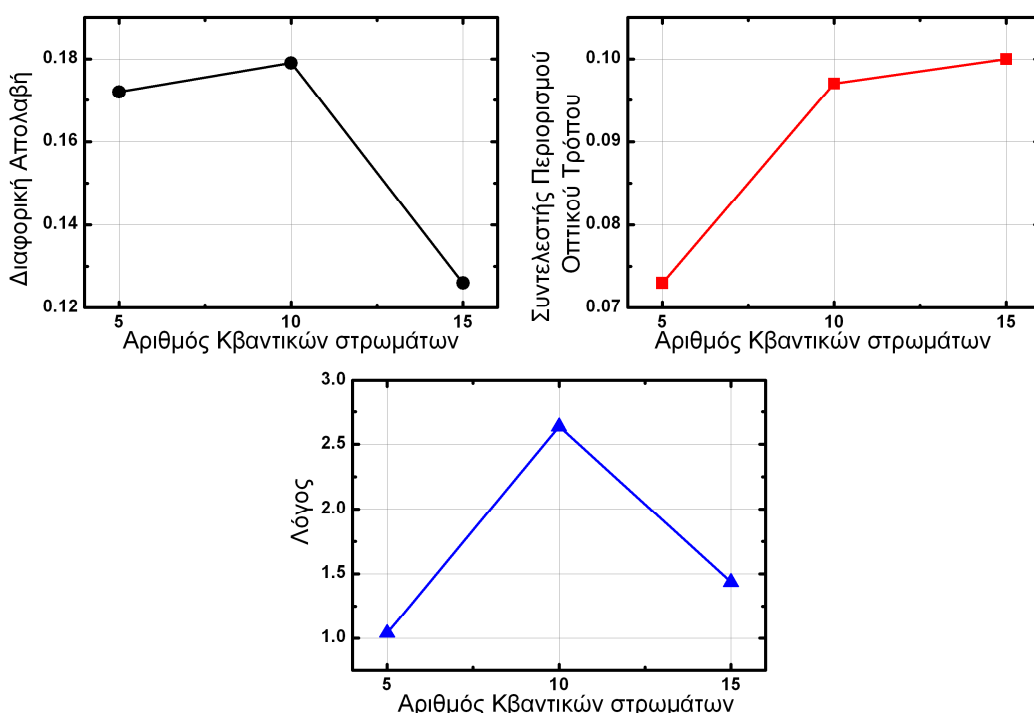
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

στην πυκνότητας ρεύματος ανά στρώμα κβαντικών τελειών, θα μπορούσε να επηρεάσει σημαντικά τη διαφορική απολαβή και να προκαλέσει αυτή τη μείωση.

7.3.2 Εξαγωγή συμπερασμάτων

7.3.2.1 Χρονικό εύρος των παλμών

Μετά τον υπολογισμό όλων των απαιτούμενων παραμέτρων μπόρεσε να πραγματοποιηθεί αξιολόγηση της ισχύος της μαθηματικής σχέσης 7.9 για όλες τις διατάξεις που είχαν πειραματικά χαρακτηριστεί. Η οπτική ισχύς τέθηκε ίση με 30mW για όλες τις διατάξεις ώστε να μην υπάρχει εξάρτηση της ανισότητας από αυτό τον παράγοντα. Στο σχήμα 7.18 παρουσιάζεται η μεταβολή της διαφορικής απολαβής (μαύρο), ο συντελεστής οπτικού περιορισμού (κόκκινο), και το πηλίκο των δύο τμημάτων της ανισότητας (μπλε) προς το διαφορετικό αριθμό κβαντικών τελειών. Η μελέτη του λόγου των δύο τμημάτων της ανισότητας προσφέρει μια θεωρητική εξήγηση για την πειραματική συμπεριφορά των διατάξεων όσο αναφορά την ποιότητα της εγκλειδωσης των τρόπων.



Σχήμα 7-18 Υπολογισμός των δύο τμημάτων της ανισότητας 7.9 για τις τιμές της προσομοίωσης

Πιο συγκεκριμένα, στην περίπτωση των διατάξεων με 5 στρώματα κβαντικών τελειών η ανισότητα ισχύει οριακά (1.047). Αυτό το γεγονός οφείλεται τόσο στην μικρή τιμή του συντελεστή περιορισμού (Γ) όσο και στην σχετικά μικρή τιμή της διαφορικής απολαβής. Η δυσκολία επίτευξης σταθερής παλμικής λειτουργίας κοντά στο κατώφλι, καθώς και η μη ποιοτική εγκλειδωση που παρατηρήθηκε για υψηλότερες τιμές ρεύματος σε αυτές τις διατάξεις, μπορούν να αποδοθούν σε αυτές τις δύο παραμέτρους. Αντίθετα, στην περίπτωση των 10 στρωμάτων, τόσο η αύξηση του συντελεστή περιορισμού όσο και η αύξηση της διαφορικής απολαβής, επέτρεψε την διατήρηση της ισχύος της σχέσης 7.9 για όλο το εύρος των διαθέσιμων τιμών πόλωσης. Τέλος στην περίπτωση των 15 στρωμάτων η μείωση της απολαβής σε συνδυασμό με τον σχετικά σταθερό συντελεστή περιορισμού προκάλεσε την μείωση της ισχύος της σχέσης 7.9 σε σύγκριση με την περίπτωση των διατάξεων οι οποίες διέθεταν 10 στρώματα κβαντικών τελειών.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Στην περίπτωση μεταβολής του πλάτους της διάταξης παρατηρήθηκαν δύο διακριτές συμπεριφορές. Στην πρώτη περίπτωση, που ο αριθμός των κβαντικών στρωμάτων ήταν 5, δεν παρατηρήθηκε σημαντική αλλαγή στον συντελεστή Γ , με αποτέλεσμα να μην παρουσιαστεί και σημαντική αλλαγή στην ισχύ της σχέσης 7.9. Αυτό το γεγονός εξηγεί τα παρεμφερή αποτελέσματα των δύο διατάξεων. Σε αντιδιαστολή στην περίπτωση των διατάξεων με 15 στρώματα η μεταβολή του πλάτους από 6μm σε 4μm προκάλεσε πτώση του συντελεστή Γ και κατ' επέκταση σημαντική αύξηση του δεξιού τμήματος της ανισότητας. Ο περιορισμός των επιδόσεων της στενότερης διάταξης μπορεί συνεπώς να αποδοθεί ευθέως σε αυτό το γεγονός.

Όσο αναφορά το μήκος του λέιζερ μπορούν να εξαχθούν τα παρακάτω συμπεράσματα. Το μεγάλο φασματικό περιεχόμενο των παλμών είναι εξαιρετικά ευαίσθητο σε φαινόμενα χρωματικής διασποράς, η οποία εξαρτάται από το συνολικό μήκος του τμήματος ενίσχυσης της διάταξης. Αντίθετα ο κορεσμένος απορροφητής λόγω ανώμαλης ταχύτητας ομάδας επιτρέπει την αντιστάθμιση της χρωματικής διασποράς. Λαμβάνοντας υπόψη μας ότι η αύξηση του μήκους στις διατάξεις συνοδευόταν από ίση επιμήκυνση και των δύο τμημάτων (ενισχυτή - απορροφητή), μπορεί με ασφάλεια να θεωρηθεί ότι η αύξηση του μήκους δεν επηρέασε σημαντικά τη συνολική χρωματική διασπορά του λέιζερ. Επιπροσθέτως η αύξηση του συνολικού μήκους της κοιλότητας του λέιζερ προκαλεί μείωση της φασματικής απόστασης των διαμηκών τρόπων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, μεγαλύτερος αριθμός τρόπων να βρίσκονται εντός του φασματικού εύρους της απολαβής και ως εκ τούτου να μπορούν να κλειδώσουν στη ίδια φάση. Επιπλέον τα τμήματα απορρόφησης δεν είχαν τοποθετηθεί σειριακά ακριβώς το μετά το πλήρως ανακλαστικό κάτοπτρο, αλλά αντίθετα βρίσκονταν τοποθετημένα σε όλο το μήκος της κοιλότητας (σχήμα 4.1). Αποτέλεσμα αυτής της τοπολογίας ήταν η αντιστάθμιση της διασποράς και η επαναφορά του σχήματος του οπτικού παλμού να πραγματοποιείται καθόλο το μήκος της διάδοσης. Αν και στη γενική περίπτωση η αύξηση του μήκους της διάταξης επιφέρει μείωση της ποιότητας της παλμικής λειτουργίας, υπό τις συγκεκριμένες αυστηρές προϋποθέσεις η αύξηση του μήκους υποβοηθά την αποδοτικότερη εγκλειδωση, όπως αποδεικνύουν και οι μετρήσεις εύρους. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των διατάξεων με μήκος 8mm, το τμήμα απορρόφησης καταλάμβανε μικρότερο τμήμα του συνολικού μήκους. Παρόλα αυτά όπως αποδεικνύει η πειραματική διερεύνηση τα χρονικά χαρακτηριστικά των παλμών βελτιώθηκαν σε σχέση με τις μικρότερες κοιλότητες. Λαμβάνοντας υπόψη ότι πέραν της διαφορετικής αναλογίας απορροφητή/ενισχυτή οι διατάξεις 8mm ήταν πανομοιότυπες με τις μικρότερες, τότε η βελτιωμένη απόδοση μπορεί να αποδοθεί μόνο στην αυξημένη σημαντικότητα της μείωσης της φασματικής απόστασης των διαμηκών τρόπων του λέιζερ.

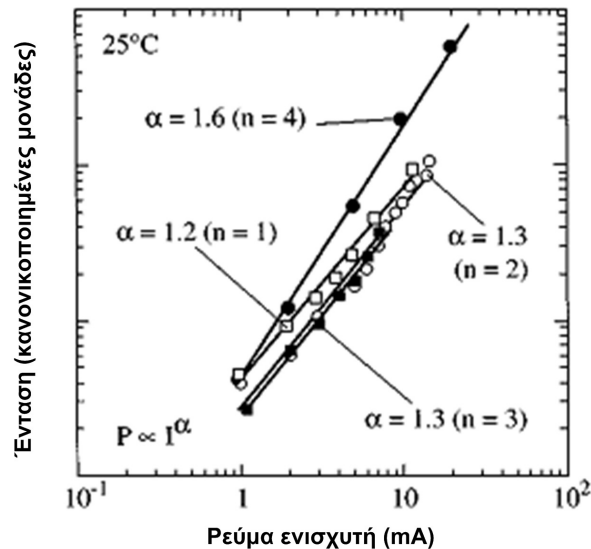
7.3.2.2 Μέση ισχύς

Η μεταβολή του συντελεστή περιορισμού όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, μεταβάλλει το ποσοστό του οπτικού τρόπου που κυματοδηγείται εντός των στρωμάτων κβαντικών τελειών. Συνεπώς η αύξηση του σηματοδοτεί μείωση του ποσοστού του οπτικού πεδίου που αλληλοεπιδρά με τις ισχυρά ντοπαρισμένες περιοχές της δομής, οι οποίες παρουσιάζουν αυξημένες απώλειες λόγω ενισχυμένης απορρόφησης [3]. Η ταυτόχρονη μελέτη των σχημάτων 7.3 και 7.15 Επιβεβαιώνει την άμεση εξάρτηση των δύο παραμέτρων.

Αξίζει ακόμα να αναφερθεί ότι στην περίπτωση των διατάξεων με 15 στρώματα κβαντικών τελειών, η μειωμένη ισχύς μπορεί να οφείλεται όχι μόνο στην αλλαγή των κυματοδηγικών χαρακτηριστικών αλλά και στο γεγονός ότι η αύξηση των στρωμάτων

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

προκαλεί αυξημένες απώλειες διάδοσης (σχήμα 7.18). Αυτή η αύξηση των απωλειών οφείλεται στην αύξηση της χωρικής διασποράς των τελειών, οι οποίες δημιουργούνται στα επόμενα στάδια της επιταξίας. Η χωρική διασπορά με τη σειρά της προκαλεί ενίσχυση των μη-ακτινοβολικών επανασυνδέσεων [1]-[3].



Σχήμα7-19 Η οπτική ένταση προς το ρεύμα ενισχυτή για διαφορετικό αριθμό στρωμάτων κβαντικών σημείων (n) και οι υπολογιζόμενες απώλειες διάδοσης (α) [2]

7.4 Συμπεράσματα

Συμπερασματικά σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκαν πειραματικά αποτελέσματα που περιλάμβαναν διατάξεις, οι οποίες διέφεραν σε βασικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά όπως είναι το μήκος της κοιλότητας, το πλάτος του κυματοδηγού, ο αριθμός κβαντικών στρωμάτων και το ποσοστό απορροφητή/ενισχυτή που χρησιμοποιήθηκε εντός της κοιλότητας. Οι διαφορές που παρουσίαζαν οι διατάξεις επέτρεψαν την εξαγωγή συμπερασμάτων για τη συνεισφορά κάθε παραμέτρου στις επιδόσεις της διάταξης. Για την επίτευξη του καθορισμού του ρόλου κάθε κατασκευαστικής παραμέτρου στις επιδόσεις του συστήματος πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις βασισμένες στη μέθοδο δισδιάστατης διάδοσης δέσμης (2D-beam propagation method), οι οποίες κατέδειξαν έντονη συσχέτιση μεταξύ των κυματοδηγικών χαρακτηριστικών της διάταξης και των επιδόσεων του λέιζερ. Πιο συγκεκριμένα ο παράγοντας που εντοπίστηκε να διαδραματίζει μείζονα ρόλο στις επιδόσεις των διατάξεων ήταν ο συντελεστής περιορισμού του οπτικού τρόπου (optical mode confinement factor). Μέσω του παράγοντα Γ μεταβαλλόταν οι ενέργειες κορεσμού τόσο του απορροφητή όσο και του ενισχυτή καθώς και οι ενεργές απώλειες της διάταξης.

8. Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΠΤΙΚΗΣ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΕ ΣΥΝΕΧΗ ΚΑΙ ΠΑΛΜΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η πειραματική διερεύνηση της ανοχής των λέιζερ κβαντικών τελειών στην ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης. Η ανάλυση περιλάμβανε την μελέτη των επιπτώσεων της οπτικής ανατροφοδότησης τόσο όταν οι διατάξεις βρίσκονταν σε κατάσταση συνεχούς λειτουργίας όσο και σε παθητική εγκλείδωση των τρόπων. Ειδικά στην περίπτωση της παλμικής λειτουργίας το ερευνητικό ενδιαφέρον εστιάστηκε στον εντοπισμό των μέγιστων επιπέδων οπτικής ανατροφοδότησης που μπορούν να εφαρμοστούν χωρίς να διαταραχθούν τα χρονικά και θορυβικά χαρακτηριστικά των παλμών. Επιπλέον στα πλαίσια αυτού του κεφαλαίου παρουσιάζονται για πρώτη φορά αποτελέσματα για την σταθερότητα της παλμικής λειτουργίας σε καθεστώς ανατροφοδότησης και για τις δύο διαθέσιμες φασματικές περιοχές εκπομπής (GS/ES). Η συγκεκριμένη ανάλυση αναδεικνύει τη διαφορετικότητα της δυναμικής συμπεριφοράς της κάθε φασματικής περιοχής, ενώ επιτρέπει την δημιουργία κατασκευαστικών οδηγιών, για τα μέγιστα επίπεδα οπτικής απομόνωσης που απαιτούνται στην πολύ φασματικής παλμικής λειτουργίας.

8.1 Εισαγωγή

Με τον όρο οπτική ανατροφοδότηση εννοείται ότι τμήμα της οπτικής ισχύος που εκπέμπεται από το λέιζερ επιστρέφει έχοντας αποκτήσει μια τυχαία διαφορά φάσης (λόγω διάδοσης) πίσω στην ενεργό περιοχή. Στην πράξη, η οπτική ανατροφοδότηση εισέρχεται στην λειτουργία των συσκευών, είτε λόγω τυχαίων ανακλάσεων (residual reflectivities) λόγω κακής κατασκευής των αντανάκλαστικών επιφανειών, είτε εσκεμμένα με τη χρήση κατόπτρων στην έξοδο του λέιζερ. Γενικά η επίδραση αυτού του φαινομένου σε ένα λέιζερ δεν είναι αμφιμονοσήμαντη. Ανάλογα με τα εγγενή δυναμικά χαρακτηριστικά του λέιζερ αλλά και με την ισχύ της ανατροφοδότησης, το φαινόμενο μπορεί να προκαλέσει είτε βελτίωση των φασματικών χαρακτηριστικών της διάταξης, είτε να οδηγήσει το λέιζερ σε υποβάθμιση της λειτουργίας του. Πιο αναλυτικά όταν η ισχύς του ανακλώμενου πεδίου είναι περιορισμένη, μπορεί να προκληθεί περιορισμός του φασματικού εύρους της γραμμής εκπομπής (linewidth) [1]-[3]. Στην περίπτωση που το ποσοστό ανατροφοδότησης αυξηθεί σημαντικά τότε παρουσιάζονται δυναμικές αστάθειες στη λειτουργία του λέιζερ, οι οποίες μπορούν να περιλαμβάνουν διεύρυνση της φασματικής γραμμής[4]-[6], είτε ακόμα και κατάρρευση της συνθήκης συμφωνίας, με αποτέλεσμα την εκπομπή οπτικού σήματος με χαοτικά χαρακτηριστικά [7]-[10].

Στη παγκόσμια βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα μελετών που αφορούν την επίπτωση της οπτικής ανάδρασης στις συνθήκες λειτουργίας διαφόρων τύπων λέιζερ (ημιαγωγικά, αερίου, στερεάς κατάστασης κλπ). Σε αυτές τις μελέτες αναδείχθηκαν τα όρια ανοχής καθώς και οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευαισθησία των λέιζερ στην ύπαρξη ανακλάσεων. Όσο αναφορά τα ημιαγωγικά λέιζερ τα οποία αποτελούν και την ευρύτερη θεματική ενότητα της παρούσας διατριβής, υπάρχουν αρκετές αναφορές, οι οποίες επικεντρώνονται κυρίως στην επίδραση της οπτικής ανάδρασης όταν οι διατάξεις βρίσκονταν σε συνεχή λειτουργία [11]-[12]. Παρόλα αυτά όπως παρουσιάστηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η παρουσία παλμικής λειτουργίας, επιβάλλει μια ευαίσθητη ισορροπία στη δυναμική ισορροπία του συστήματος, η οποία μπορεί να διαταραχθεί πιο έντονα από την παρουσία οπτικής ανατροφοδότησης [13]. Ειδικότερα για διατάξεις κβαντικού φρέατος έχουν παρουσιαστεί τόσο θεωρητικές [14] όσο και πειραματικές μελέτες [13], οι οποίες επικεντρώθηκαν στην επίδραση των ανακλάσεων στην επίτευξη αλλά και στην ποιότητα της παλμικής λειτουργίας. Αν και τα πορίσματα αυτών των μελετών έχουν γενική φύση και θα μπορούσαν να ισχύουν για όλα τα ημιαγωγικά λέιζερ,

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

ασχέτως της δομής του ενεργού τους υλικού. Παρόλα αυτά η ιδιαιτερότητα των λέιζερ κβαντικών τελειών και τα μοναδικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν, επιβάλλουν την επανεξέταση αυτών των πορισμάτων και την ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης της οπτικής ανατροφοδότησης στα χρονικά χαρακτηριστικά των παλμών.

Λόγω της ιδιαιτερότητας των λέιζερ κβαντικών τελειών, από τα πρώτα κιάλας χρόνια ανάπτυξης τους, πραγματοποιήθηκαν προσπάθειες για την διερεύνηση της ανοχής αυτών των διατάξεων σε φαινόμενα ανατροφοδότησης. Αυτές οι μελέτες κυρίως αφορούσαν διατάξεις σε συνεχή λειτουργία [15]-[16], και ανέδειξαν ότι η διακριτή φύση των ενεργειακών καταστάσεων τελειών και ο τρισδιάστατος χωρικός περιορισμός των ηλεκτρικών φορέων επέτρεψαν την έντονη αύξηση της ανοχής των λέιζερ στην επίδραση ασταθειών που οφείλονταν στην οπτική ανατροφοδότηση. Όσο αναφορά την παλμική λειτουργία υπάρχει μικρός αριθμός δημοσιεύσεων όποιος επίσης αναδεικνύει τα πλεονεκτήματα των κβαντικών τελειών [17]-[18].

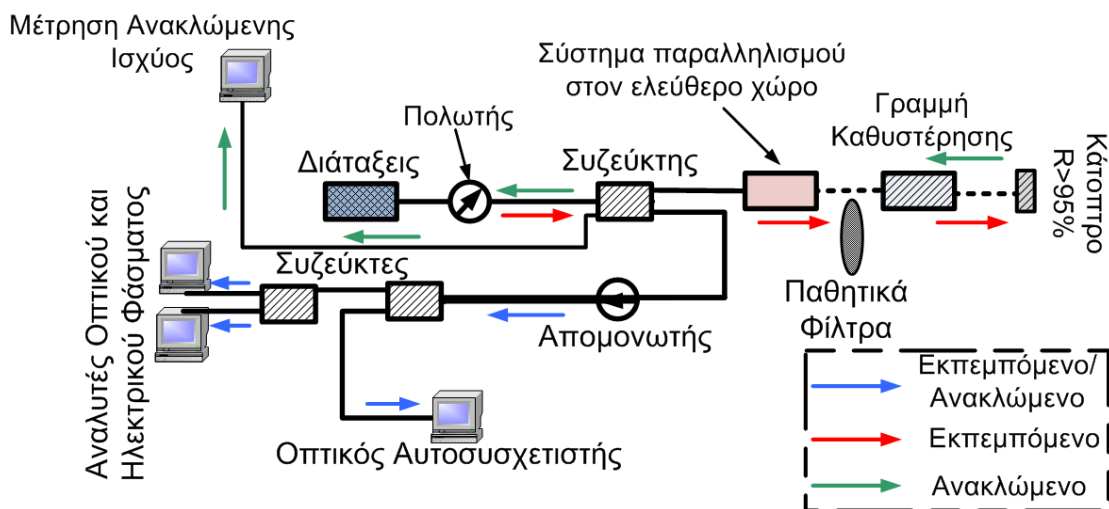
Όπως παρουσιάστηκε ενδελεχώς στα προηγούμενα κεφάλαια, μια από τις βασικότερες ιδιαιτερότητες αυτών των λέιζερ είναι η επίτευξη πολυφασματικής εκπομπής, με σχετικά ήπιες συνθήκες άντλησης. Παρόλη τη σπουδαιότητα και χρηστικότητα αυτής της περιοχής λειτουργίας, δεν υπάρχει καμία θεωρητική ή πειραματική μελέτη που να μελετά τη δυναμική συμπεριφορά καθώς και την ευαισθησία του συστήματος στην παρουσία οπτικής ανατροφοδότησης. Βασικός λόγος για αυτή την έλλειψη από την βιβλιογραφία είναι πιθανώς η δυσκολία επίτευξης σταθερής εγκλειδωσης τρόπων και από τις δύο φασματικές περιοχές καθώς και το γεγονός ότι μόλις πρόσφατα αποσαφηνίστηκαν οι συνθήκες που επιτρέπουν αυτή την περιοχή λειτουργίας [19]-[20]. Λαμβάνοντας υπόψη μας τα δεδομένα της βιβλιογραφίας πάνω σε αυτό το θέμα σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι από τη μία μεριά η επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων που σχετίζονται με την επίδραση της ανάδρασης στη συνεχή και παλμική λειτουργία των διατάξεων. Ενώ παράλληλα δόθηκε ιδιαίτερο βάρος στην διερεύνηση της δυναμικής συμπεριφοράς του συστήματος, υπό το καθεστώς ανατροφοδότησης, στην παλμική συμπεριφορά και των δύο φασματικών περιοχών (GS/ES).

8.2 Πειραματική Διάταξη

Η πειραματική διάταξη που περιγράφηκε στο 4^ο κεφάλαιο και χρησιμοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό των διατάξεων δεν ήταν επαρκής για την εφαρμογή οπτικής ανατροφοδότησης. Συνεπώς πραγματοποιήθηκαν οι απαιτούμενες τροποποιήσεις ώστε να καταστεί εφικτή η επαναδρομολόγηση τμήματος της εκπεμπόμενης ισχύος στην ενεργό περιοχή του λέιζερ. Στο σχήμα 8.1 παρουσιάζεται σχηματική αναπαράσταση της πειραματικής διάταξης. Πιο αναλυτικά, μετά την αδιαβατικά εκλεπτυσμένη ίνα αφαιρέθηκε ο οπτικός απομονωτής, ώστε να επιτραπεί στην ανακλώμενη οπτική ισχύ να επιστρέψει στο λέιζερ. Κατόπιν, τοποθετήθηκε οπτικός συζεύκτης (90/10), ο οποίος είχε δύο εξόδους. Το 90% της οπτικής ισχύος δρομολογήθηκε σε ένα σύστημα ελεύθερου χώρου το οποίο λάμβανε την οπτική ακτινοβολία μέσω μιας ίνας και κατόπιν την παραλλήλιζε (collimation) και την άφηνε να διαδοθεί στον ελεύθερο χώρο (σχήμα 8.1). Στην άλλη μεριά της διάταξης υπήρχε ο αντίστοιχος μηχανισμός ο οποίος επανασυγκέντρωνε την δέσμη και την δρομολογούσε πάλι σε μια οπτική ίνα. Χάρης στο τμήμα διάδοσης στον ελεύθερο χώρο, μπόρεσαν να τοποθετηθούν απορροφητικά φίλτρα ουδέτερης πυκνότητας (neutral density), ώστε να μεταβληθεί κατά το δοκούν το ποσοστό της οπτικής ισχύος που θα επανασυγκεντρωνόταν στην ίνα. Η έξοδος του συστήματος συνδέθηκε με ένα σύστημα ελεγχόμενης χρονικής καθυστέρησης με ελάχιστο βήμα καθυστέρησης τα 4ps, ακολουθούμενο από ένα κάτοπτρο με ανακλαστικότητα της τάξης του 95%. Το κάτοπτρο ανακλούσε την προσπίπτουσα οπτική ακτινοβολία, ενώ μέσω του συστήματος ελεγχόμενης καθυστέρησης μπορούσε να ελεγχθεί με ακρίβεια η φάση του πεδίου που επέστρεφε πίσω στο λέιζερ. Η άλλη

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

έξοδος του συζεύκτη (10%) οδηγούνται σε ένα οπτικό απομονωτή και ακολουθούσαν όλα τα μετρητικά όργανα. Ο ρόλος του απομονωτή ήταν να διασφαλίσει ότι δεν θα υπάρχουν ανακλάσεις από τα μετρητικά όργανα πίσω στο λέιζερ. Αποτέλεσμα αυτού είναι όλες οι ανακλάσεις που παρουσιάζονται στη διάταξη να προέρχονται αποκλειστικά από το τμήμα χρονικής καθυστέρησης και να είναι απόλυτα ελεγχόμενες.



Σχήμα 8-1 Διαγραμματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης για την μέτρηση της επίδρασης της οπτικής ανάδρασης.

Το ποσοστό της οπτικής ανατροφοδότησης ορίστηκε ως το πηλίκο της επαναδρομολογούμενης οπτικής ισχύος προς την συνολική εκπεμπόμενη ισχύ, συμπεριλαμβανομένου και του συντελεστή σύζευξης ίνας-διάταξης. Για την πειραματική μέτρηση αυτού του ποσοστού χρησιμοποιήθηκε η εναπομένουσα θύρα του αρχικού συζεύκτη, στην οποία τοποθετήθηκε μία φωτοδίοδος, η οποία κατέγραφε την ένταση του ανακλώμενου πεδίου (σχήμα 8.1). Παρόλη τη χρήση απομονωτή, υπήρχαν κάποιες μικρές ανεπιθύμητες ανακλάσεις από τα μετρητικά όργανα και τους συζεύκτες που προηγούνταν, οι οποίες μετρήθηκαν χάρη στη φωτοδίοδο και ήταν της τάξης των -56dB. Αυτό το επίπεδο οπτικής ανατροφοδότησης είναι εξαιρετικά μικρό οπότε μπορεί να θεωρηθεί με ασφάλεια αμελητέο. Για την μελέτη της επίδρασης της οπτικής ανάδρασης καταγράφηκε το οπτικό και ηλεκτρικό φάσμα του λέιζερ καθώς και το χρονικό προφίλ των οπτικών παλμών (όταν το λέιζερ ήταν σε παλμική λειτουργία), με χρήση των οργάνων που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4.

Σύμφωνα με την προαναφερθείσα πειραματική διάταξη, μπορούν να θεωρηθούν δύο κοιλότητες: η πρώτη αποτελείται από το ίδιο το λέιζερ (εσωτερική κοιλότητα), και η δεύτερη (εξωτερική κοιλότητα) οριζόταν από τον πρώτο συζεύκτη και έφτανε μέχρι το κάτοπτρο (σχήμα 8.1). Το συνολικό μήκος της εξωτερικής κοιλότητας ήταν 20m και δεν μπορούσε να μειωθεί λόγω της χρήσης οπτικών ινών για την υλοποίηση της. Το αυξημένο μήκος της διάταξης σε συνδυασμό με το μεγάλο εύρος ζώνης του οπτικού φάσματος (>5nm) διασφάλισε ότι το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας ήταν μεγαλύτερο του μήκους συμφωνίας (coherence length). Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η φάση του ανακλώμενου πεδίου να είναι ασυσχέτιστη με τη φάση του πεδίου εντός της κοιλότητας και κατ' επέκταση το ακριβές μήκος της εξωτερικής κοιλότητας να μην διαδραματίζει σημαντικό ρόλο. Αυτή η παρατήρηση σχετίζεται με την δυναμική συμπεριφορά λέιζερ σε συνεχή λειτουργία και δεν ισχύει στην περίπτωση ύπαρξης παλμών όπως θα δειχτεί στις επόμενες παραγράφους.

8.3 Συνεχής Λειτουργία

Στο πρώτο τμήμα της πειραματικής διερεύνησης πραγματοποιήθηκε μελέτη της επίδρασης διαφορετικών ποσοστών οπτικής ανατροφοδότησης σε διατάξεις οι οποίες

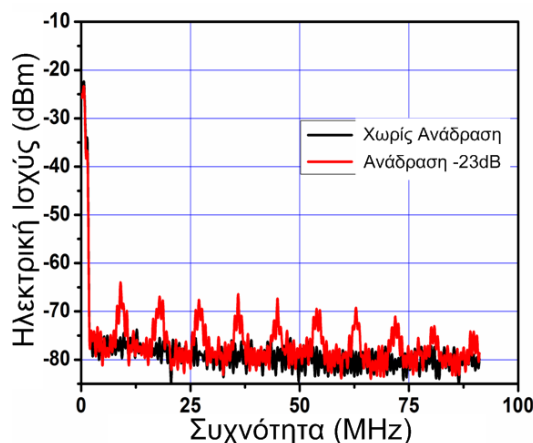
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

βρισκόντουσαν σε συνεχή λειτουργία. Για την επίτευξη συνεχούς λειτουργίας όλα τα τμήματα του λέιζερ πολώθηκαν ορθά και εφαρμόστηκε ομογενής έγχυση ρεύματος. Το ποσοστό οπτικής ανάδρασης το οποίο εφαρμόστηκε στις μετρήσεις κυμαινόταν από -56dB (εναπομένουσα ανακλαστικότητα του συζεύκτη) μέχρι -20dB, η οποία ήταν η μέγιστη δυνατή οπτική ανάδραση που μπορούσε να επιτευχθεί με την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη. Ο βασικός λόγος για την επίτευξη μικρού ποσοστού ανάδρασης εντοπίστηκε στη χρήση αδιαβατικά εκλεπτυσμένης οπτικής ίνας για τη συλλογή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας, μέσω της οποίας επιτυγχανόταν μικρό ποσοστό οπτικής σύζευξης. Οι διατάξεις οι οποίες μελετήθηκαν είχαν μήκος 2mm, πλάτος 6mm, ενώ ο αριθμός των στρωμάτων κβαντικών τελειών κυμαινόταν από 10 έως 15. Η απουσία παλμικής λειτουργίας περιόρισε το πλήθος των πειραματικών μετρήσεων, μόνο στην καταγραφή του οπτικού και ηλεκτρικού φάσματος της διάταξης. Σκοπός αυτών των μετρήσεων ήταν ο εντοπισμός του ποσοστού ανάδρασης, το οποίο θα επέφερε κατάρρευση συμφωνίας στη διάταξη. Λόγω του μεγάλου εύρους ζώνης του οπτικού φάσματος των λέιζερ δεν έγινε προσπάθεια καταγραφής της πιθανής αυξομείωσης του οπτικού εύρους γραμμής.

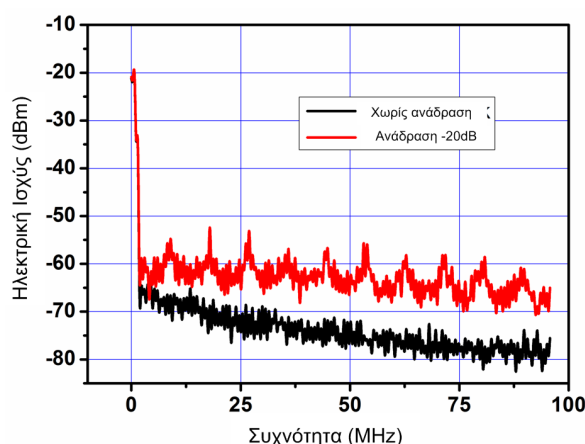
Στο σχήμα 8.2 παρουσιάζεται το ηλεκτρικό φάσμα για μια διάταξη 15 κβαντικών στρωμάτων και για δύο διακριτές περιπτώσεις με μαύρο παρουσιάζεται το φάσμα χωρίς οπτική ανάδραση, ενώ με κόκκινο παρουσιάζεται το φάσμα υπό την παρουσία της μέγιστης δυνατής ανατροφοδότησης (-20dB). Στην δεύτερη περίπτωση υπήρχαν περιοδικές κορυφές με ισχύ 15dB πάνω από το επίπεδο του θορύβου και με περίοδο που επιβαλλόταν από το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας. Στην μελέτη του ηλεκτρικού φάσματος δεν παρατηρήθηκε αύξηση του θορύβου, η οποία σχετίζεται με φαινόμενα κατάρρευσης συμφωνίας, ούτε και παρατηρήθηκε οποιαδήποτε διεύρυνση του οπτικού φάσματος.

Η δεύτερη διάταξη που μελετήθηκε ήταν παρόμοια με την προηγούμενη με τη διαφορά ότι είχε 10 στρώματα κβαντικών τελειών. Η μελέτη του ηλεκτρικού φάσματος αυτής της διάταξης για δύο περιπτώσεις, χωρίς ανατροφοδότηση και με τη μέγιστη δυνατή ανατροφοδότηση (-20dB) παρουσιάζεται στο σχήμα 8.3. Όπως είναι εμφανές η ύπαρξη ανατροφοδότησης και σε αυτή τη διάταξη προκαλεί την εμφάνιση συντονισμών, των οποίων η φασματική απόσταση είναι ίδια με αυτήν που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη διάταξη. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι η απόσταση των συντονισμών καθορίζεται από το συνολικό μήκος της κοιλότητας, και όχι από κάποια άλλη κατασκευαστική παράμετρο της διάταξης. Παρόλα αυτά το ηλεκτρικό φάσμα της διάταξης των 10 στρωμάτων παρουσιάζει κάποιες εγγενείς διαφοροποιήσεις σε σχέση με αυτό της διάταξης των 15 στρωμάτων. Η πρώτη βασική διαφοροποίηση είναι η αύξηση του θορύβου ακόμα και στην περίπτωση μη χρήσης ανατροφοδότησης, ενώ η δεύτερη διαφοροποίηση έγκειται στο γεγονός ότι η ύπαρξη ανατροφοδότησης της τάξης των -23dB σε αυτή την περίπτωση προκαλεί σημαντική αύξηση του θορύβου κατά 10dB.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

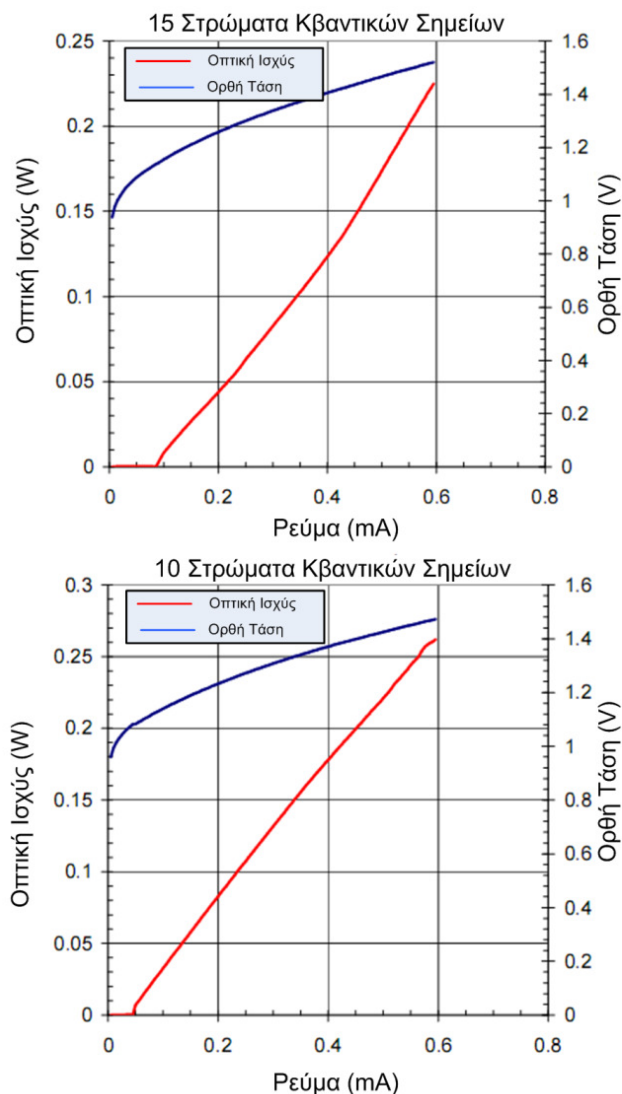


Σχήμα 8-2 Το ηλεκτρικό φάσμα για μια διάταξη 15 κβαντικών στρωμάτων, 2mm μήκος και 6μm πλάτος, για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις: (μαύρο) χωρίς την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης και (κόκκινο) με τη μέγιστη δυνατή ανατροφοδότηση -23dB.



Σχήμα 8-3 Το ηλεκτρικό φάσμα για μια διάταξη 10 κβαντικών στρωμάτων, 2mm μήκος και 6μm πλάτος, για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις (μαύρο) χωρίς την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης και (κόκκινο) με τη μέγιστη δυνατή ανατροφοδότηση -23dB. Εκπομπή μόνο από το GS

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το ποσοστό ανάδρασης καθώς και το ακριβές μήκος της κοιλότητας έχει παραμείνει αμετάβλητο κατά την μέτρηση και των δύο διατάξεων, το αίτιο για την διαφοροποίηση της απόκρισης έγκειται στα δυναμικά χαρακτηριστικά των δύο λέιζερ. Πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 7 αναφέρθηκε ότι η αύξηση του αριθμού των στρωμάτων κβαντικών τελειών επιφέρει αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος λόγω αύξησης του συντελεστή περιορισμού του οπτικού τρόπου, καθώς και μείωση της διαφορικής απολαβής. Αποτέλεσμα αυτών των διακυμάνσεων είναι η διαφοροποίηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κάθε διάταξης, με άμεση συνέπεια τη μεταβολή της ανοχής στην ύπαρξη ανατροφοδότησης. Η εγγενής αύξηση του θορύβου στο ηλεκτρικό φάσμα της διάταξης με τα 10 στρώματα κβαντικών τελειών, οφείλεται στα υψηλότερα επίπεδα παραγόμενης οπτικής ισχύος. Πιο συγκεκριμένα παρόλο που η διάταξη των 10 στρωμάτων παρουσιάζει χαμηλότερη οπτική απόδοση, ο μειωμένος όγκος (μικρότερο ύψος) επιτρέπει τη σημαντική αύξηση της πυκνότητας ρεύματος. Αποτέλεσμα αυτού είναι η αύξηση του εγγενούς θορύβου του λέιζερ. Για την επιβεβαίωση του συγκεκριμένου ισχυρισμού παρατίθεται στο σχήμα 8.4 η καμπύλες οπτικής έντασης ρεύματος και για τις δύο διατάξεις.



Σχήμα 8-4 Καμπύλες οπτικής έντασης (κόκκινο) – τάσης (μπλε) ως προς το ρεύμα για τις δύο διατάξεις

Αντίστοιχα επίπεδα οπτικής ανατροφοδότησης έχουν εφαρμοστεί σε μια πλειάδα λέιζερ κβαντικών φρεάτων, επιφέροντας αποτελέσματα που κυμαίνονται από την πλήρη αναισθησία της διάταξης [1]-[3] έως την κατάρρευση συμφωνίας και την παραγωγή οπτικών χασοκίων φερουσών [7]-[10]. Κατ' επέκταση δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί άμεση σύγκριση των δύο ειδών διατάξεων, μια και η επίδραση της οπτικής ανατροφοδότησης σχετίζεται άμεσα με δυναμικά χαρακτηριστικά των διατάξεων όπως είναι η διαφορική απολαβή, ο κορεσμός της απολαβής, ο συντελεστής διεύρυνσης της οπτικής γραμμής (παράγοντας α) [21]. Για να μπορούσε να πραγματοποιηθεί απευθείας σύγκριση των δύο ειδών διατάξεων θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν πανομοιότυπα λέιζερ, όπου θα διαφέρουν μόνο ως προς το ενεργό υλικό, ή εναλλακτικά πολύ μεγαλύτερο ποσοστό οπτικής ανατροφοδότησης, η οποία θα εξασφάλιζε ότι οποιαδήποτε διάταξη κβαντικού φρεάτος θα βρισκόταν σε ασταθή περιοχή λειτουργίας.

8.4 Παλμική λειτουργία

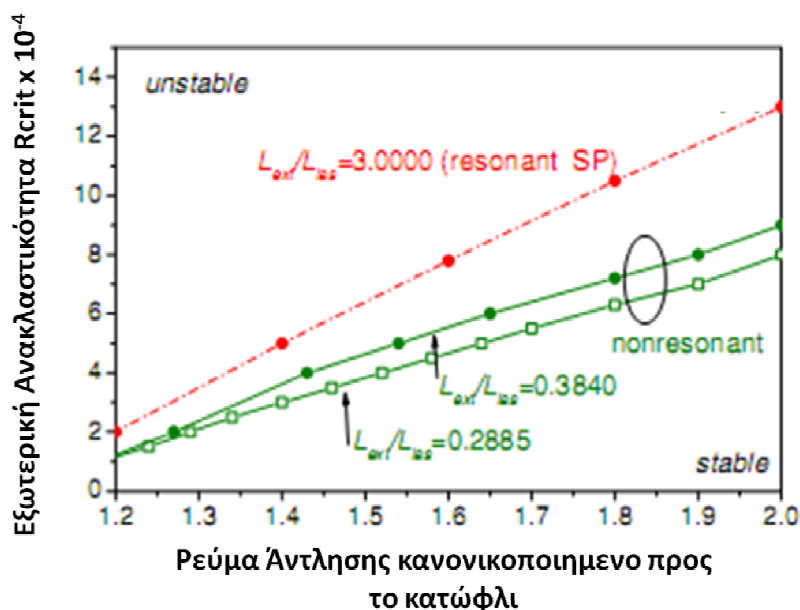
8.4.1 Παλμική συμπεριφορά από τη φασματική περιοχή του GS

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο τα επίπεδα οπτικής ανατροφοδότησης δεν ήταν αρκετά για την σύγκριση των αποτελεσμάτων των λέιζερ κβαντικών τελειών με αντίστοιχα λέιζερ κβαντικών φρεάτων. Παρόλα αυτά όταν οι διατάξεις βρίσκονται σε παλμική λειτουργία λόγω παθητικής εγκλειδωσης των τρόπων,

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

επιβάλλεται μια ευαίσθητη δυναμική ισορροπία μεταξύ της απολαβής και των απωλειών. Η ύπαρξη καθυστερημένων παλμών μέσω του τμήματος ανάκλασης μπορούν να διαταράξουν αυτή την ισορροπία προκαλώντας ακόμα και παύση της εγκλειδωσης τρόπων [13]. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, στην περίπτωση παλμικής λειτουργίας θέτονται άλλες απαιτήσεις για τα ανεκτά επίπεδα οπτικής ανάδρασης αλλά και για το ακριβές μήκος της εξωτερικής κοιλότητας.

Πιο συγκεκριμένα, θεωρητικές μελέτες που αφορούσαν παλμικά λέιζερ κβαντικού φρέατος κατέδειξαν ότι, ανάλογα με την χρονική στιγμή που επανέρχεται στην κοιλότητα ο ανακλώμενος παλμός, υπάρχουν τρεις διακριτές περιπτώσεις [13]. Στην πρώτη, το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας είναι ακριβές ακέραιο πολλαπλάσιο της εσωτερικής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο ανακλώμενος παλμός όταν επιστρέψει στην ενεργό περιοχή να συμπίπτει με το χρονικό παράθυρο γένεσης του νέου παλμού. Αυτό το γεγονός με τη σειρά του υποβοηθά τον κορεσμό του απορροφητή με συνέπεια ακόμα και τη βελτίωση των χρονικών χαρακτηριστικών των παλμών, ανάλογα με την ένταση της οπτικής ανάδρασης. Στην δεύτερη περίπτωση, το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας είναι περίπου ίσο με το μήκος της εσωτερικής, με αποτέλεσμα ο εισερχόμενος παλμός να διαταράσσει το παράθυρο απολαβής και να αυξάνει το χρόνο που ο απορροφητής παραμένει σε κατάσταση χαμηλών απωλειών. Άμεση συνέπεια αυτού είναι η χρονική διεύρυνση των παλμών ή ακόμα και η πλήρης παύση της παλμικής λειτουργίας. Στην τρίτη περίπτωση, το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας είναι ασυσχέτιστο με το μήκος της εσωτερικής, με αποτέλεσμα την παρουσία επιπλέον παλμών (satellite pulses). Ανάλογα με την ισχύ της ανάδρασης οι νέοι παλμοί είτε έχουν πολύ μικρή ισχύ με αποτέλεσμα να αφήνουν ανεπηρέαστη την παλμική λειτουργία της διάταξης, είτε στην περίπτωση που η ισχύς αυξηθεί σημαντικά τότε εμφανίζονται φαινόμενα ανταγωνισμού μεταξύ των παλμών, με συνέπεια ακόμα και την παύση της παλμικής λειτουργίας. Στο σχήμα 8.5 παρουσιάζονται οι τρεις χαρακτηριστικές περιπτώσεις για μια διάταξη κβαντικού φρέατος με μήκος 2mm [13], ως προς το ρεύμα άντλησης (κανονικοποιημένο προς το ρεύμα κατωφλίου) και την εξωτερική ανακλαστικότητα, η οποία ισοδυναμώς αναπαριστά την ισχύ της ανατροφοδότησης. Οι περιοχές του σχήματος που βρίσκονται πάνω από τις καμπύλες ισοδυναμούν με ασταθείς περιοχές λειτουργίας ενώ αντίθετα οι περιοχές κάτω από τις καμπύλες ισοδυναμούν με περιοχές σταθερής παλμικής λειτουργίας.



Σχήμα 8-5 Περιοχές λειτουργίας (σταθερή – ασταθής) συναρτήσεως του ρεύματος άντλησης και της εξωτερικής ανακλαστικότητας [13].

Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στο σχήμα 8.5 στην περίπτωση που το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της εσωτερικής (κόκκινη καμπύλη), παρουσιάζεται μεγαλύτερη ανοχή στην ανατροφοδότηση, με αποτέλεσμα να απαιτούνται ισχυρότερα ποσοστά ανακλαστικότητας για την κατάρρευση της παλμικής λειτουργίας. Οι υπόλοιπες καμπύλες παρουσιάζουν μειωμένη κλίση (πράσινες) και αντιστοιχούν σε μήκη εξωτερικής κοιλότητας τα οποία είναι σχεδόν ακέραια πολλαπλάσια της εσωτερικής. Παρατηρείται ότι για αυτές τις περιπτώσεις όσο το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας τείνει να γίνει ακέραιο πολλαπλάσιο της εσωτερικής τόσο βελτιώνεται η σταθερότητα του συστήματος. Επιπροσθέτως αξίζει να σημειωθεί ότι όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση της συνεχούς λειτουργίας, η ανοχή του συστήματος δεν εξαρτάται μόνο από την ισχύ της οπτικής ανατροφοδότησης, αλλά είναι στενά συνδεδεμένη με τη δυναμική συμπεριφορά της διάταξης και τις συνθήκες πόλωσης. Από το σχήμα 8.5 μπορεί να παρατηρηθεί ότι όσο αυξάνεται το ρεύμα άντλησης τόσο αυξάνει το επίπεδο ανάδρασης, που είναι ικανό να αποσταθεροποιήσει την παλμική λειτουργία.

Για την καλύτερη κατανόηση αυτού του φαινομένου έγινε χρήση διαφορετικών εξισώσεων ρυθμών, οι οποίες περιλάμβαναν όρους για το οπτικό πεδίο, το οποίο έχει υποστεί ανάκλαση λόγω μίας εξωτερικής κοιλότητας (εξισώσεις 8.1 – 8.3). Χωρίς την απώλεια της γενικότητας ως ενεργό υλικό δεν θεωρήθηκαν κβαντικές τελείες αλλά ένα απλό ομογενές μέσω. Πιο αναλυτικά η εξίσωση 8.1 περιγράφει τη μεταβολή του οπτικού πεδίου συναρτήσει του χρόνου, η εξίσωση 8.2 αναφέρεται στην μεταβολή των ηλεκτρικών φορέων του υλικού, ενώ τέλος η εξίσωση 8.3 περιγράφει την εξάρτηση της φάσης του οπτικού πεδίου [22].

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{G_{no} \cdot \Delta N}{1 + \varepsilon \cdot |E(t)|^2} - \Gamma_{\varepsilon} \right) \cdot E(t) + E I(t) \cos \Delta l(t) \quad (8.1)$$

$$\frac{dN}{dt} = J - \gamma_n N - \frac{G_{no} \cdot \Delta N}{1 + \varepsilon \cdot |E(t)|^2} \cdot |E(t)|^2 \quad (8.2)$$

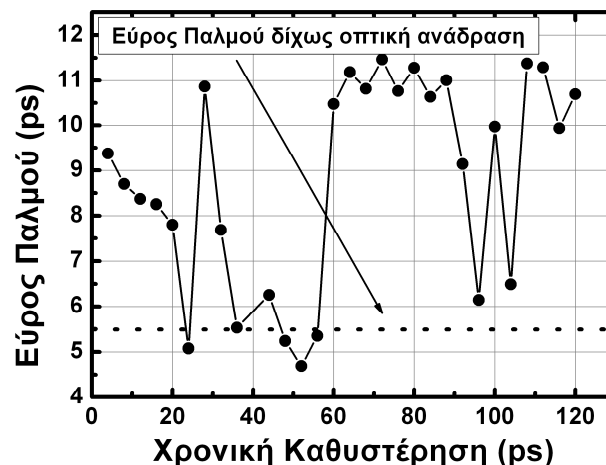
$$\frac{d\phi}{dt} = -\frac{1}{2} a_o \cdot G_{no} \cdot \Delta N(t) - \frac{E_1(t)}{E(t)} \cdot \sin \Delta_1(t) \quad (8.3)$$

Με τους όρους $E(t)$ ορίζεται το ηλεκτρικό πεδίο, $E_1(t)$ είναι το πεδίο που προέρχεται από την ανάκλαση, J είναι η πυκνότητα του εγχεόμενου ρεύματος, G_{no} είναι ο παράγοντας κορεσμού της απολαβής και το a είναι ο παράγοντας αύξησης του εύρους γραμμής (linewidth enhancement factor). Οι παραπάνω εξισώσεις καταδεικνύουν ότι η εξέλιξη του ηλεκτρικού πεδίου με το χρόνο εξαρτάται τόσο από την ένταση της ανακλώμενης ισχύος ($E_1(t)$) όσο και από την αλλαγή των φορέων, η οποία με τη σειρά της εξαρτάται από το ρεύμα έγχυσης. Συνέπεια αυτής της διπλής εξάρτησης είναι ότι για υψηλές τιμές ρεύματος, η επίδραση του συντελεστή οπτικής ανάδρασης γίνεται μικρότερη, με αποτέλεσμα να μειώνεται και ο ρόλος της χρονικής καθυστέρησης στη λειτουργία της διάταξης.

Στη συνέχεια, τα συμπεράσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω για την επίδραση του συνολικού μήκους της κοιλότητας και του ποσοστού ανάδρασης στην δυναμική συμπεριφορά του λέιζερ εφαρμόστηκαν στην περίπτωση χρήσης λέιζερ κβαντικών τελειών. Πιο αναλυτικά χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη 10 στρωμάτων κβαντικών τελειών, με συνολικό μήκος της εσωτερικής κοιλότητας 4mm και πλάτος κυματοδηγού ίσο με 6μm. Η συγκεκριμένη διάταξη επέτρεπε εκπομπή μόνο από τη φασματική περιοχή του GS ακόμα και για ισχυρές τιμές ηλεκτρικής άντλησης. Στο σχήμα 8.6 παρουσιάζεται η διακύμανση του χρονικού εύρους των παλμών προς τη χρονική καθυστέρηση που εισήχθηκε μέσω του συστήματος μεταβλητής καθυστέρησης. Η τάση στον κορεσμένο

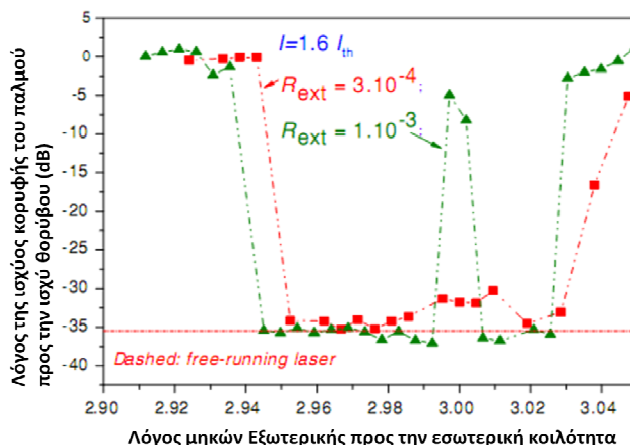
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

απορροφητή τέθηκε ίση με $-6V$, ενώ το ρεύμα του τμήματος ενίσχυσης ήταν ίσο με $200mA$, ώστε να διασφαλιστεί ότι η διάταξη βρισκόταν σε παλμική λειτουργία. Η ισχύς της οπτικής ανάδρασης παρέμεινε σταθερή καθόλη τη διάρκεια της μέτρησης και υπολογίστηκε στα $-23dB$. Σκοπός της συγκεκριμένης μέτρησης ήταν η καταγραφή και των τριών περιοχών λειτουργίας που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Στο σχήμα 8.6 παρουσιάζεται η διακύμανση του χρονικού εύρους των παλμών προς τη μεταβολή του της χρονικής καθυστέρησης. Δυστυχώς στο σχήμα 8.6 παρουσιάζεται μόνο μια περίοδος μια και το εύρος της χρονικής καθυστέρησης ήταν $120ps$ ενώ ο χαρακτηριστικός χρόνος της κοιλότητας ήταν $100ps$. Το εύρος του παλμού που μετρήθηκε χωρίς οπτική ανάδραση ήταν $\approx 5.5ps$ ενώ υπό το καθεστώς ανατροφοδότησης παρουσιάστηκε διακύμανση από $4.5ps$ μέχρι $12ps$. Στο σχήμα 8.7 παρουσιάζεται η αντίστοιχη εξάρτηση για ένα λέιζερ κβαντικού φρέατος [13]. Στο συγκεκριμένο σχήμα δεν υπολογίζεται το εύρος του παλμού αλλά μια ισοδύναμη ποσότητα που περιγράφει και αυτή την ποιότητα της παλμικής συμπεριφοράς. Πιο ειδικά παρουσιάζεται ο λόγος της ισχύος κορυφής του παλμού προς το επίπεδο θορύβου συναρτήσει της απόστασης της εξωτερικής κοιλότητας. Από τη συνδυαστική μελέτη των δύο διαγραμμάτων μπορεί να επιβεβαιωθεί η περιοδική συμπεριφορά της ποιότητας της εγκλειδωσης συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης. Επιπροσθέτως αξίζει να σημειωθεί ότι και στις δύο περιπτώσεις για το συγκεκριμένο ποσοστό οπτικής ανατροφοδότησης παρατηρείται βελτίωση της παλμικής λειτουργίας. Η χρονική καθυστέρηση κατά την οποία παρουσιάζεται αυτό το φαινόμενο συμπίπτει με την πρώτη περιοχή λειτουργίας, δηλαδή την χρήση εξωτερικής κοιλότητας με μήκος ίσο με το ακέραιο πολλαπλάσιο της εσωτερικής.

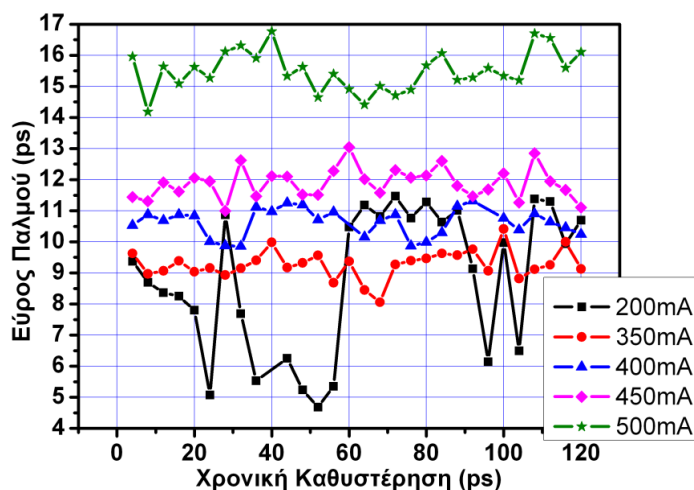


Σχήμα 8-6 Εύρος παλμού συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης για ρεύμα $200mA$ στο τμήμα ενίσχυσης, με διακεκομμένη γραμμή η τιμή χωρίς οπτική ανάδραση

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 8-7 Μεταβολή του λόγου ισχύος κορυφής προς την ισχύ θορύβου συναρτήσει του λόγου μηκών της εσωτερικής προς εξωτερική κοιλότητα, για τρία διαφορετικά επίπεδα ισχύος ανατροφοδότησης [13].



Σχήμα 8-8 Εύρος παλμού συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης για ανάστροφη τάση -6V και για διάφορα ρεύματα. Η διάταξη είχε 5 στρώματα κβαντικών σημείων, 4mm μήκος και 6μm πλάτος κυματοδηγού

Στο σχήμα 8.8 παρουσιάζεται το εύρος του παλμού συναρτήσει της χρονικής καθυστέρησης για περισσότερες τιμές ρεύματος, που κυμαίνονται από 200mA μέχρι 500mA. Αυτό που μπορεί να παρατηρηθεί είναι ότι για μικρές τιμές ρεύματος στον ενισχυτή, η επίδραση της χρονικής καθυστέρησης είναι έντονη και οι διακυμάνσεις στο εύρος του παλμού εξαρτώνται από τη σχετική θέση (χρονική καθυστέρηση) του ανακλώμενου παλμού ως προς το παράθυρο μείωσης των απωλειών της κοιλότητας. Όταν η τιμή της ηλεκτρικής άντλησης ξεπεράσει τα 350mA, η χρονική καθυστέρηση δεν έχει σημαντική επίδραση στο εύρος του παλμού. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να αποδοθεί στην αύξηση του ρεύματος και κατ' επέκταση στη μείωση της επίδρασης του ανακλώμενου πεδίου, σύμφωνα με τις εξισώσεις 8.1 – 8.3. Επιπλέον η αύξηση του ρεύματος άντλησης επέφερε αύξηση του χρονικού εύρους των παλμών λόγω φαινομένων αυτοδιαμόρφωσης παρόλη την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης.

8.4.2 Παλμική συμπεριφορά από δύο φασματικές περιοχές (GS/ES)

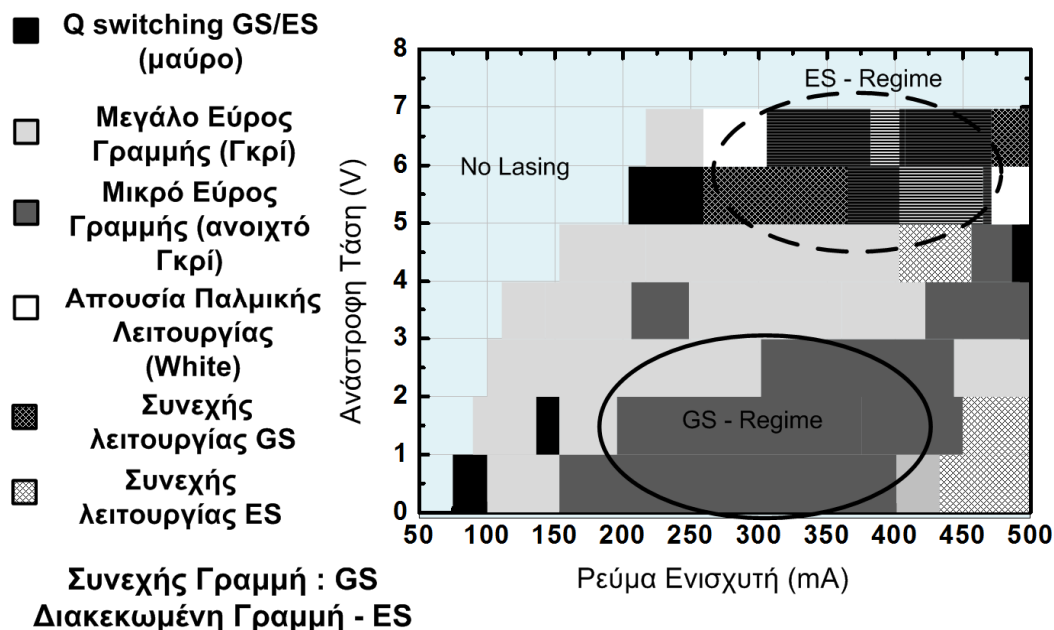
Ένας από τους σκοπούς του παρόντος κεφαλαίου είναι η διερεύνηση της ανοχής των διαφορετικών μηκών κύματος (GS/ES) στην ύπαρξη οπτικής ανάδρασης. Βασικός λόγος πίσω από αυτή τη διερεύνηση ήταν οι εγγενείς διαφοροποιήσεις που παρουσιάστηκαν στις δύο φασματικές περιοχές, όπως ο διαφορετικός συντελεστής διεύρυνσης της οπτικής γραμμής [23], ο διαφορετικός δείκτης διάθλασης, καθώς και η

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

διαφορετική δυναμική συμπεριφορά των ηλεκτρικών φορέων της κάθε ζώνης. Οι συνέπειες αυτής της διαφοροποίησης έγιναν εμφανείς στα προηγούμενα κεφάλαια, όπου μελετήθηκε η παθητική εγκλειδωση τρόπων τόσο από το GS όσο και από το ES. Επιπροσθέτως η υψηλή χρηστικότητα που παρουσιάζει η διπλή εκπομπή από λέιζερ κβαντικών σημείων, σε συνδυασμό με τις ανάγκες για υψηλού βαθμού ολοκλήρωσης καθιστά ακόμη πιο επιτακτική την ανάγκη για διερεύνηση της ανοχής του κάθε μήκους κύματος στην ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης.

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διερεύνησης χρησιμοποιήθηκε διαφορετικό σύνολο συσκευών από αυτές που παρουσιάστηκαν στην παράγραφο 8.4.1. Η χρήση άλλου συνόλου διατάξεων κυρίως οφείλεται στην αδυναμία αυτών των διατάξεων να παρουσιάσουν πολυφασματική εγκλειδωση. Επιπροσθέτως οι μετρήσεις που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και αφορούσαν μόνο τη φασματική περιοχή του GS χρειάστηκε να επαναληφτούν. Σκοπός αυτής της επανάληψης ήταν η δυνατότητα για άμεση σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων από τις δύο φασματικές περιοχές, μιας και όλες οι μετρήσεις θα προέρχονταν από την ίδια διάταξη. Οι διατάξεις οι οποίες επιλέχτηκαν είχαν 5 στρώματα κβαντικών τελειών, 2mm μήκος, πλάτος που κυμαινόταν από 4μm έως 6μm. Μεταβάλλοντας το ρεύμα του ενισχυτή καθώς και την ανάστροφη τάση χαρτογραφήθηκαν όλες οι περιοχές λειτουργίας της διάταξης, χρησιμοποιώντας ως κριτήριο για την ποιότητα της εγκλειδωσης των τρόπων το εύρος του ηλεκτρικού φάσματος(σχήμα 8.9). Όσον αφορά την επίδραση των συνθηκών πόλωσης στην ποιότητα της παλμικής λειτουργίας, η διάταξη επέδειξε τυπική συμπεριφορά σύμφωνα με τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο 4^ο κεφάλαιο. Ειδικότερα η αύξηση του ρεύματος άντλησης ή μείωση της ανάστροφης τάσης στον απορροφητή προκάλεσε την αύξηση του φασματικού εύρους της κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος, το οποίο συνεπάγεται και αύξηση του χρονικού εύρους των παλμών και από τις δύο φασματικές περιοχές.

Κατά τη διαδικασία χαρτογράφησης παρατηρήθηκε ότι στις περιοχές που οι συνθήκες πόλωσης οδηγούσαν τη διάταξη στα όρια της εξαναγκασμένης εκπομπής, καταγράφηκαν αστάθειες ισχύος όπως η υπερδιαμόρφωση του πλάτους των παλμών (Κεφάλαιο 5). Για την μελέτη της επίδρασης της οπτικής ανάδρασης και στα δύο μήκη κύματος αποφεύχθηκαν αυτές οι περιοχές, ώστε να διαχωριστούν οι εγγενείς αστάθειες της διάταξης (λόγω ταλάντωσης των φορέων) από τις αστάθειες που σχετίζονταν με την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης. Οι περιοχές λειτουργίας που τελικά επιλέχθηκαν για την μελέτη της οπτικής ανάδρασης παρουσιάζονται με μαύρο κύκλο στο σχήμα 8.9 και αποτελούν περιοχές σταθερής παλμικής λειτουργίας και για τα δύο μήκη κύματος. Η φασματική απόσταση μεταξύ των δύο ζωνών μετρήθηκε ίση με 65nm.



Σχήμα 8-9 Χαρτογράφηση των περιοχών λειτουργίας. Σε συνεχή μαύρο κύκλο βρίσκεται η περιοχή που παρουσιάστηκε μόνο εκπομπή από το GS και με διακεκομμένο κύκλο η περιοχή που υπήρχε εκπομπή μόνο από το ES.

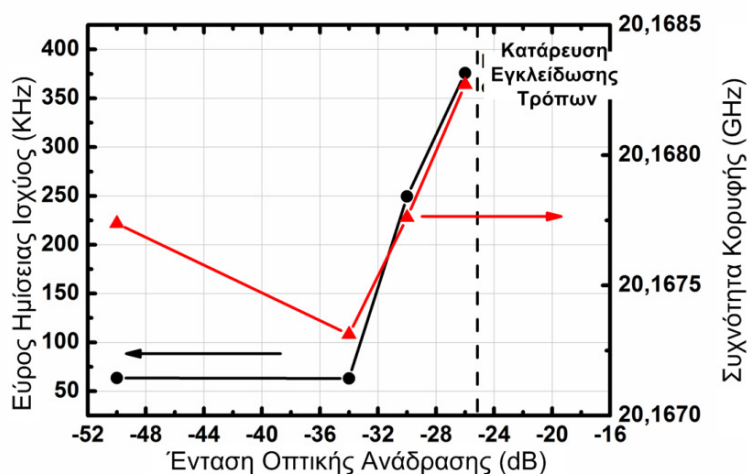
Η εξάρτηση της ποιότητας της εγκλειδωσης των τρόπων από το ακριβές μήκος της εξωτερικής κοιλότητας, λήφθηκε υπόψη και σε αυτή την περίπτωση. Πιο συγκεκριμένα και για τις δύο φασματικές περιοχές αλλά και για όλες τις μετρήσεις το μήκος της εξωτερικής κοιλότητας μεταβλήθηκε ώστε το εύρος του ηλεκτρικού φάσματος να είναι όσο το δυνατό μικρότερο. Με αυτή τη μεθοδολογία η διακύμανση του εύρους του ηλεκτρικού φάσματος εξαρτιόταν μόνο από την ισχύ της ανατροφοδότησης και τη δυναμική συμπεριφορά της διάταξης. Η επίδραση της ισχύος της οπτικής ανάδρασης ήταν σταθερή σε όλο το εύρος τιμών πόλωσης για τη φασματική περιοχή του GS. Αυτό το γεγονός οφείλεται στο ότι η περιοχή που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη του GS είναι σχετικά περιορισμένη με αποτέλεσμα οι τιμές του ρεύματος άντλησης να μην έχουν μεγάλο εύρος διακύμανσης. Χαρακτηριστικά στο σχήμα 8.10 παρουσιάζεται η εξέλιξη του εύρους ημίσειας ισχύος της κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος (κόκκινη), καθώς και η κεντρική συχνότητα κορυφής (μαύρο) συναρτήσει της οπτικής ανατροφοδότησης. Το ρεύμα στο τμήμα ενίσχυσης ήταν 340mA και η ανάστροφη πόλωση στον απορροφητή ήταν μηδενική.

Με την αύξηση της οπτικής ανάδρασης παρατηρείται αύξηση του εύρους της κορυφής, σε συνδυασμό με μια ολίσθηση της κεντρικής συχνότητας προς μεγαλύτερες τιμές. Η ολίσθηση της κεντρικής συχνότητας μπορεί να συσχετιστεί με δύο φαινόμενα: το πρώτο σχετίζεται με την ύπαρξη διαμηκών τρόπων λόγω της εξωτερικής κοιλότητας, των οποίων η φασματική απόσταση καθώς και η συχνότητα καθορίζεται από το συνολικό μήκος της διάταξης. Στη γενική περίπτωση οι συντονισμοί της εξωτερικής κοιλότητας δεν συμπίπτουν με τους συντονισμούς του λέιζερ, με αποτέλεσμα η κεντρική συχνότητα του φάσματος να καθορίζεται από την αλληλεπίδραση και των δύο. Το δεύτερο φαινόμενο έχει να κάνει με μια μικρή αύξηση στον ενεργό δείκτη διάθλασης (effective refractive index) λόγω ύπαρξης περισσότερης οπτικής ισχύος μέσα στην ενεργό κοιλότητα. Αυτή η αύξηση στο δείκτη διάθλασης επάγει, με τη σειρά της, μια αλλαγή στο ενεργό μήκος της κοιλότητας και ως εκ τούτου προκαλεί μια μεταβολή στο ρυθμό επανάληψης των οπτικών παλμών.

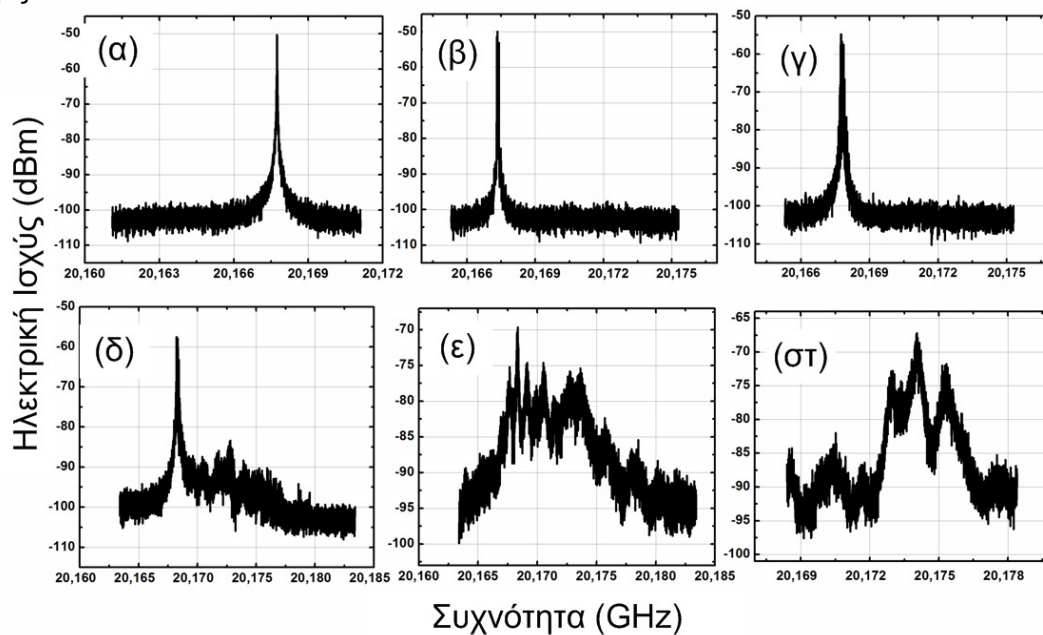
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Η διεύρυνση της κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος σχετίζεται άμεσα με την μη σύμφωνη αλληλεπίδραση των παλμών εντός της κοιλότητας και των παλμών που προέρχονται από ανάκλαση. Αξίζει να σημειωθεί ότι, για τιμές οπτικής ανάδρασης μεγαλύτερες των -26dB, παρατηρήθηκε διακοπή της παλμικής λειτουργίας. Όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 8.11, η κορυφή του ηλεκτρικού φάσματος, ενώ στην περίπτωση απουσίας οπτικής ανατροφοδότησης είχε εύρος της τάξης των 50KHz και απέχει από το επίπεδο θορύβου τουλάχιστον 50dB, όταν εφαρμόστηκε οπτική ανάδραση με ισχύ ίση με -23dB, η κορυφή διαπλάτνεται στα 15MHz, ενώ η απόσταση της απέχει από το επίπεδο θορύβου 20dB. Η απότομη αύξηση του εύρους, σε συνδυασμό με την μείωση του λόγου σήματος προς θόρυβο, καταδεικνύει την παύση της διαδικασίας εγκλειδωσης τρόπων. Αυτή η ισχυρή διεύρυνση της οπτικής γραμμής δεν μπορεί να συσχετιστεί με φαινόμενα κατάρρευσης της συμφωνίας της διάταξης, διότι το ηλεκτρικό φάσμα αν και έχει αποκτήσει περίπλοκη δομή συνεχίζει να παρουσιάζει διακριτές κορυφές, σε αντίθεση με τα τυπικά ηλεκτρικά φάσματα που καταγράφονται σε συνθήκες κατάρρευσης της συμφωνίας. Τέτοια φάσματα παρουσιάζουν σημαντική αύξηση του εύρους χαμηλών συχνοτήτων και απουσία διακριτών κορυφών [7]-[10].

Στην περίπτωση που η διάταξη εξέπεμπε από το ES (σχήμα 8.10 – διακεκομμένος κύκλος), επιλέχτηκε μια περιοχή λειτουργίας όπου δεν υπήρχε ταυτόχρονη εκπομπή από το GS, ώστε να αποφευχθούν αστάθειες που σχετίζονται με την αποδιέγερση φορέων ανάμεσα στις δύο ενεργειακές ζώνες. Όπως είναι εμφανές, για την επίτευξη εκπομπής από το ES, η διάταξη πολώθηκε σε υψηλό ρεύμα άντλησης (>400mA) ενώ η τάση στον απορροφητή αυξήθηκε σε τιμές μεγαλύτερες των -6V.



Σχήμα 8-10 Εύρος γραμμής του ηλεκτρικού φάσματος (μαύρο) και κεντρική συχνότητα κορυφής (κόκκινο) ως προς το ποσοστό οπτικής ανάδρασης για μηδενική τάση στον απορροφητή και ρεύμα 300mA στο τμήμα ενίσχυσης.

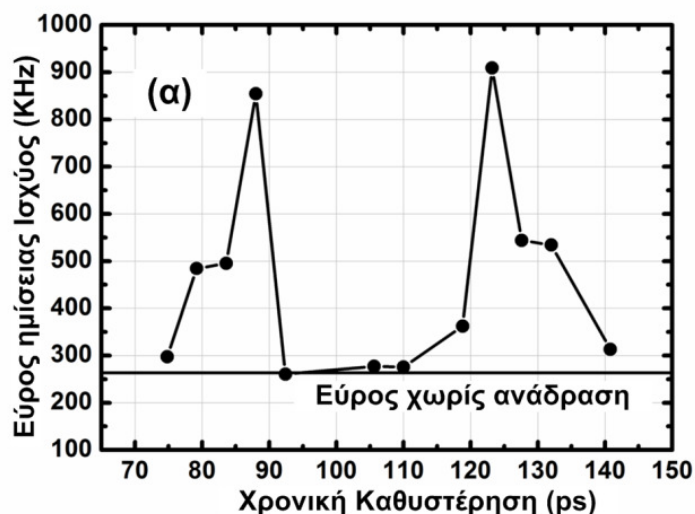


Σχήμα 8-11 Χαρακτηριστικά ηλεκτρικά φάσματα για έξι περιπτώσεις στις οποίες μεταβάλλεται το ποσοστό οπτικής ανάδρασης

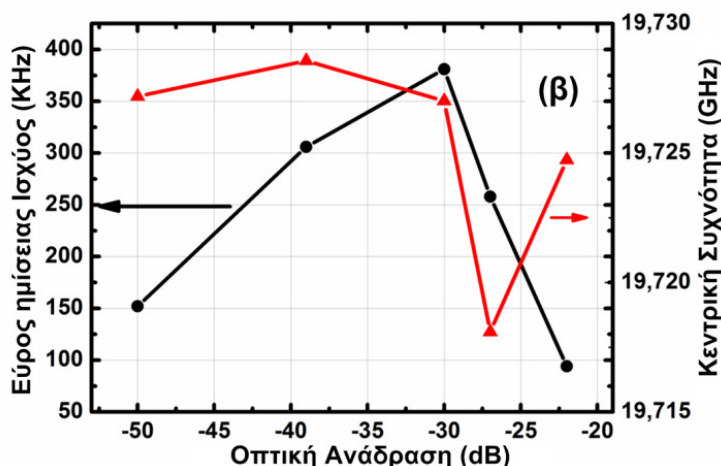
Η διερεύνηση της επίδρασης της οπτικής ανατροφοδότησης και σε αυτή τη ζώνη εκπομπής περιελάμβανε την ίδια διαδικασία που ακολουθήθηκε και για το GS. Πιο αναλυτικά, καταγράφηκε το εύρος ημίσειας ισχύος της κορυφής στην περίπτωση που δεν υπήρχε οπτική ανατροφοδότηση και υπολογίστηκε, κατόπιν προσαρμογής Lorentzian, ότι ήταν 150KHz. Στη συνέχεια, για σταθερή τιμή οπτικής ανάδρασης ίση με -27dB, ρεύμα ενίσχυσης ίσο με 420mA και ανάστροφη τάση ίση με -6V, η χρονική καθυστέρηση που επέβαλε η εξωτερική κοιλότητα στον ανακλώμενο παλμό μεταβλήθηκε. Σκοπός αυτής της διαδικασίας ήταν η επιβεβαίωση ότι η χρονική καθυστέρηση έχει το ίδιο αποτέλεσμα στους παλμούς που εκπέμπονται από το ES όπως και το GS. Όπως φαίνεται στο σχήμα 8.12, το εύρος ημίσειας ισχύος της ηλεκτρικής κορυφής έχει περιοδική συμπεριφορά με τη χρονική καθυστέρηση, με περίοδο που συμπίπτει με τον χαρακτηριστικό χρόνο της κοιλότητας ($\approx 50ps$). Στην συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω του γεγονότος ότι η κοιλότητα ήταν μικρότερη (2mm) από τη διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις της παραγράφου 8.4.1 η μεταβολή της χρονικής καθυστέρησης ήταν επαρκής για την καταγραφή μιας πλήρους περιόδου. Το εύρος της ημίσειας ισχύος κυμαινόταν από 150KHz μέχρι 900KHz, επιβεβαιώνοντας ότι η ακριβής χρονική στιγμή που ο ανακλώμενος παλμός επανεισάγεται στην κοιλότητα έχει μεγάλη σημασία για την σταθερότητα της παλμικής λειτουργίας και για αυτή τη φασματική περιοχή.

Για την διερεύνηση της ανοχής του ES σε φαινόμενα οπτικής ανάδρασης ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία με το GS, δηλαδή για κάθε επίπεδο ανάδρασης βελτιστοποιήθηκε η χρονική καθυστέρηση, ώστε η κορυφή του ηλεκτρικού φάσματος να έχει όσο το δυνατό μικρότερο εύρος. Στο σχήμα 8.13 παρουσιάζεται η εξέλιξη του εύρους ως προς το επίπεδο οπτικής ανάδρασης, το οποίο και κυμαινόταν από -50dB μέχρι -20dB. Η πρώτη παρατήρηση σχετίζεται με το ότι για τα ίδια επίπεδα οπτικής ανάδρασης δεν παρατηρείται παύση της παλμικής λειτουργίας, τουναντίον το εύρος της κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος περιορίζεται με την αύξηση του επιπέδου οπτικής ανάδρασης για τιμές μεγαλύτερες των -30dB από 381KHz σε 94KHz, υπονοώντας και βελτίωση των εκπεμπόμενων παλμών ως προς τα χρονικά τους χαρακτηριστικά. Η δεύτερη περιοχή λειτουργίας που παρουσιάζει ενδιαφέρον παρατηρείται για μικρές τιμές οπτικής ανάδρασης ($< -30dB$), όπου το εύρος γραμμής αυξάνεται με την αύξηση της οπτικής

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές ανάδρασης. Αυτή η συμπεριφορά πιστοποιεί ότι η διάταξη παρουσιάζει διαφορετική δυναμική συμπεριφορά σε αυτό το μήκος κύματος.

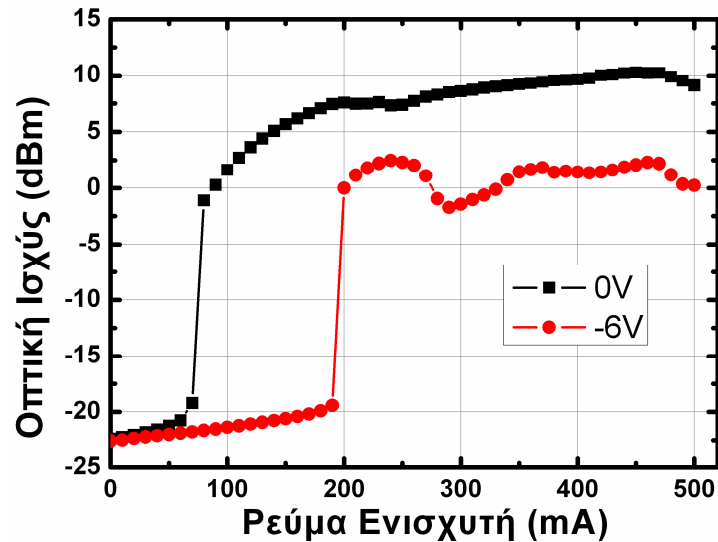


Σχήμα 8-12 Η εξέλιξη του εύρους ημίσειας ισχύος της κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος προς την χρονική καθυστέρηση για ρεύμα 420mA, $V_{abs}=-6V$ και ισχύ οπτικής ανάδρασης ίση με -27dB



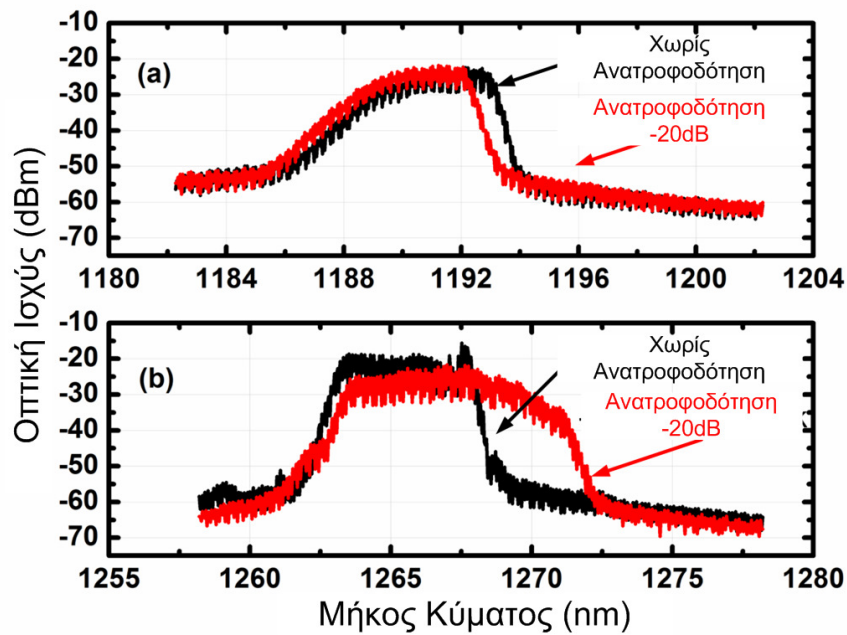
Σχήμα 8-13 Η εξέλιξη του εύρους ημίσειας ισχύος και της κεντρικής συχνότητας συναρτήσει της οπτικής ανάδρασης.

Οι συνθήκες πόλωσης που επέτρεπαν την ύπαρξη εξαναγκασμένης εκπομπής μόνο από το ES, περιελάμβαναν, όπως αναφέρθηκε, υψηλές τιμές ανάστροφης πόλωσης (>-6V). Αποτέλεσμα αυτού ήταν οι μη κορεσμένες απώλειες να είναι πολύ πιο ισχυρές σε σχέση με τη περιοχή λειτουργίας του GS. Επιπλέον, το ρεύμα του τμήματος ενίσχυσης, ως ποσοστό προς το ρεύμα κατωφλίου, ήταν πολύ μικρότερο στην περίπτωση της εκπομπής από το ES ($I_{ES}=1.8 I_{thES}$ -κατώφλι για το ES, σε σύγκριση με $I_{GS}=4I_{thGS}$ -κατώφλι για το GS). Οι συγκεκριμένες συνθήκες πόλωσης είχαν σαν αποτέλεσμα, στην περιοχή λειτουργίας του ES η εκπεμπόμενη ισχύ να είναι κατά πολύ μικρότερη από ότι στην αντίστοιχη περίπτωση του GS (σχήμα 8.14) και ως εκ τούτου, η πυκνότητα φωτονίων να είναι πολύ μικρότερη. Όπως αναφέρεται στο [17], η ύπαρξη μειωμένης πυκνότητας φωτονίων αυξάνει την ευαισθησία της διάταξης στην οπτική ανάδραση. Λαμβάνοντας υπόψη μας αυτό το γεγονός, αναμενόταν το ES να επιδείκνυε υψηλότερη ευαισθησία λόγω μικρότερη πυκνότητας φωτονίων αλλά και ασθενότερης ηλεκτρικής άντλησης. Παρόλα αυτά, παρουσιάζει αυξημένη ανοχή (μη ύπαρξη κατάρρευσης της παλμικής λειτουργίας) υπονοώντας ότι η δυναμική συμπεριφορά της συγκεκριμένης ενεργειακής ζώνης είναι διαφορετική από αυτή του GS.



Σχήμα 8-14 Καμπύλες οπτικής έντασης προς το ρεύμα ενισχυτή για 0V τάση στον απορροφητή (μαύρο) και -6V (κόκκινο)

Σημαντικό ρόλο στην εξήγηση αυτής της διαφοροποίησης μεταξύ των δύο φασματικών εκπομπών διαδραματίζει ο παράγοντας α . Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 ο παράγοντας α συνδέει την διαφορική απολαβή με τη μεταβολή του δείκτη διάθλασης. Συνεπώς διατάξεις που παρουσιάζουν αυξημένο παράγοντα α είναι πιο επιρρεπείς στην ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης. Η επίδραση της αποσυσχετισμένης φάσης του ανακλώμενου πεδίου στους φορείς της κοιλότητας είναι ισχυρότερη με αποτέλεσμα να διαταράσσει σημαντικά την δυναμική ισορροπία του λέιζερ. Λαμβάνοντας υπόψη μας ότι, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [21], υπάρχει διαφοροποίηση στον παράγοντα- α κάθε φασματικής ζώνης, θεωρήθηκε ότι αυτός είναι ο πιο πιθανός μηχανισμός που διαφοροποιεί την ανοχή του GS και του ES στην ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης. Τα οπτικά φάσματα που παρουσιάζονται στο σχήμα 8.15 α και β αποδεικνύουν αυτή ακριβώς την εξάρτηση. Με μαύρο χρώμα παρουσιάζεται το οπτικό φάσμα σε συνθήκες οπτικής απομόνωσης, ενώ με κόκκινο παρουσιάζεται η περίπτωση όπου υπάρχει ανατροφοδότηση της τάξης των -20dB. Στο σχήμα α παρουσιάζεται η περίπτωση του ES: η ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης δεν επάγει αύξηση του οπτικού εύρους, ενώ παράλληλα προκαλεί μια ολίσθηση της κεντρικής γραμμής εκπομπής προς μικρότερα μήκη κύματος (blue-shift). Αυτή η συμπεριφορά σχετίζεται με την ύπαρξη μικρού παράγοντα α με αρνητικό πρόσημο. Στην άλλη περίπτωση (β), η ύπαρξη ανάδρασης στο GS επάγει ραγδαία αύξηση του οπτικού εύρους σε συνδυασμό με ολίσθηση της κεντρικής συχνότητας προς μεγαλύτερα μήκη κύματος (red-shift), γεγονός που σχετίζεται με μεγάλη θετική τιμή του παράγοντα α .



Σχήμα 8-15 Οπτικά φάσματα χωρίς την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης (μαύρο) και με ανατροφοδότηση της τάξης των -20dB (κόκκινο) για δύο περιπτώσεις α) GS και β) ES.

8.5 Συμπεράσματα

Εν κατακλείδι, παρατηρήθηκε ευαισθησία των παραγόμενων παλμών, και από τις δύο φασματικές περιοχές, στην επαγόμενη χρονική καθυστέρηση. Παρατηρήθηκε περιοδική διακύμανση του χρονικού εύρους του παλμού (ή του εύρους της κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος), με περίοδο που συνέπιπτε με τον χαρακτηριστικό χρόνο της κοιλότητας του λέιζερ. Στη συνέχεια, βελτιστοποιώντας τη χρονική καθυστέρηση ώστε να επιτευχθεί η στενότερη δυνατή κορυφή του ηλεκτρικού φάσματος, μελετήθηκε η ανοχή της κάθε φασματικής περιοχής σε διάφορα επίπεδα οπτικής ανάδρασης (από -56dB μέχρι -20dB). Αυτό που έγινε εμφανές ήταν ότι η κάθε φασματική περιοχή παρουσίαζε διαφορετική συμπεριφορά στην ύπαρξη οπτικής ανάδρασης, κάτι το οποίο σχετίζεται με τα διαφορετικά δυναμικά χαρακτηριστικά της κάθε ζώνης και, πιο συγκεκριμένα, με την διαφοροποίηση του παράγοντα διεύρυνσης της οπτικής γραμμής (linewidth enhancement factor).

9. ΠΑΛΜΙΚΗ ΚΑΙ ΧΑΟΤΙΚΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΧΩΡΙΣ ΤΗΝ ΥΠΑΡΞΗ ΑΝΑΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΗΣ ΣΕ ΛΕΙΖΕΡ ΚΒΑΝΤΙΚΩΝ ΤΕΛΕΙΩΝ ΠΟΛΛΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο νέες περιοχές λειτουργίας, οι οποίες περιλαμβάνουν, παλμική λειτουργία χωρίς τη χρήση κορεσμένου απορροφητή και χαοτική εκπομπή χωρίς τη χρήση οπτικής ή ηλεκτρικής ανατροφοδότησης. Για την επίτευξη αυτών των περιοχών λειτουργίας χρησιμοποιήθηκε ορθή μη ομογενής άντληση ρεύματος στα δύο τμήματα του λέιζερ. Η ανεξάρτητη μεταβολή των δύο ρευμάτων άντλησης οδήγησε πρώτα τη διάταξη σε παλμική λειτουργία χαμηλού ρυθμού ($\approx 1\text{GHz}$), η οποία οφειλόταν στην ταυτόχρονη ύπαρξη εξαναγκασμένης εκπομπής από το GS και το ES. Η περαιτέρω αύξηση της ηλεκτρικής άντλησης οδήγησε τη διάταξη σε παλμική λειτουργία με αυξημένο ρυθμό της τάξης των 10GHz . Αυτή η περιοχή λειτουργίας επίσης δεν βασιζόταν στην ύπαρξη κορεσμένου απορροφητή ή εξωτερικής διαμόρφωσης, αλλά σχετιζόταν επίσης με τη δυναμική ταλάντωση των φορέων του συστήματος. Τέλος στην περίπτωση χρήσης ισχυρά ανομοιόμορφης ηλεκτρικής άντλησης τα λέιζερ οδηγήθηκαν σε χαοτική λειτουργία, παρουσιάζοντας στην έξοδο κυματομορφές υψηλής πολυπλοκότητας. Αυτή η περιοχή λειτουργίας παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον μια και μπορεί να επιτρέψει τη χρησιμοποίηση λέιζερ κβαντικών τελειών χωρίς την χρήση περίπλοκων συστημάτων ανατροφοδότησης σε εφαρμογές ασφαλών επικοινωνιών, όπως είναι η χαοτική κρυπτογραφία.

9.1 Εισαγωγή

Ο μεγάλος αριθμός των εφαρμογών των λέιζερ κβαντικών τελειών, τόσο στις τηλεπικοινωνίες, όσο και στην βιο-ιατρική, έδωσε ώθηση στην διεξοδική μελέτη όλων των παραγόντων που μπορούν να αποσταθεροποιήσουν την λειτουργία τους, είτε αυτά βρίσκονται σε κατάσταση συνεχούς ή παλμικής λειτουργίας. Στα προηγούμενα κεφάλαια μελετήθηκαν οι συνθήκες πόλωσης αλλά και οι κατασκευαστικοί παράμετροι που μπορούν να επηρεάσουν ή και να διακόψουν την παλμική λειτουργία. Ειδικότερα στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα όρια ανοχής και οι επαγόμενες αστάθειες, λόγω ύπαρξης οπτικής ανατροφοδότησης [1]-[7].

Παρόλο αυτά υπάρχουν αναφορές στη βιβλιογραφία για αστάθειες στη λειτουργία των λέιζερ που δεν σχετίζονται με φαινόμενα ανάδρασης, αλλά αποδίδονται στη δυναμική των φορέων του ενεργού υλικού. Οι συγκεκριμένες μελέτες αφορούν λέιζερ κβαντικού φρέατος με κατανεμημένη ανάκλαση (Distributed FeedBack - DFB), τα οποία αποτελούνται από πολλά τμήματα, στα οποία υπάρχει η δυνατότητα ανεξάρτητης πόλωσης τους [8]-[12]. Η ύπαρξη τέτοιων δυναμικών συμπεριφορών σε λέιζερ κβαντικού φρέατος, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τα προς μελέτη λέιζερ είχαν επίσης τη δυνατότητα ανεξάρτητης πόλωσης κάθε τμήματος, έδωσε την αφορμή για τη μελέτη παρόμοιων συμπεριφορών σε λέιζερ κβαντικών τελειών.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την καταγραφή της δυναμικής λειτουργίας των διατάξεων είναι παρόμοια με την πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε στο κεφάλαιο 4. Η μόνη προσθήκη ήταν η χρήση παλμογράφου πραγματικού χρόνου, με εύρος ζώνης 12GHz και δυνατότητα λήψης 40GS/s . Ο παλμογράφος οδηγούταν από φωτοδίοδο με εύρος ζώνης επίσης 12GHz και παρείχε τη δυνατότητα καταγραφής των διακυμάνσεων της οπτικής έντασης της εξόδου του λέιζερ. Οι διατάξεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν είχαν 2mm μήκος, ενώ το πλάτος και ο αριθμός στρωμάτων κβαντικών τελειών κυμαινόταν από $4\mu\text{m}$ έως $6\mu\text{m}$ και από 5 έως 10, αντίστοιχα. Όλες οι διατάξεις αποτελούνταν από δύο τμήματα, στα οποία υπήρχε

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

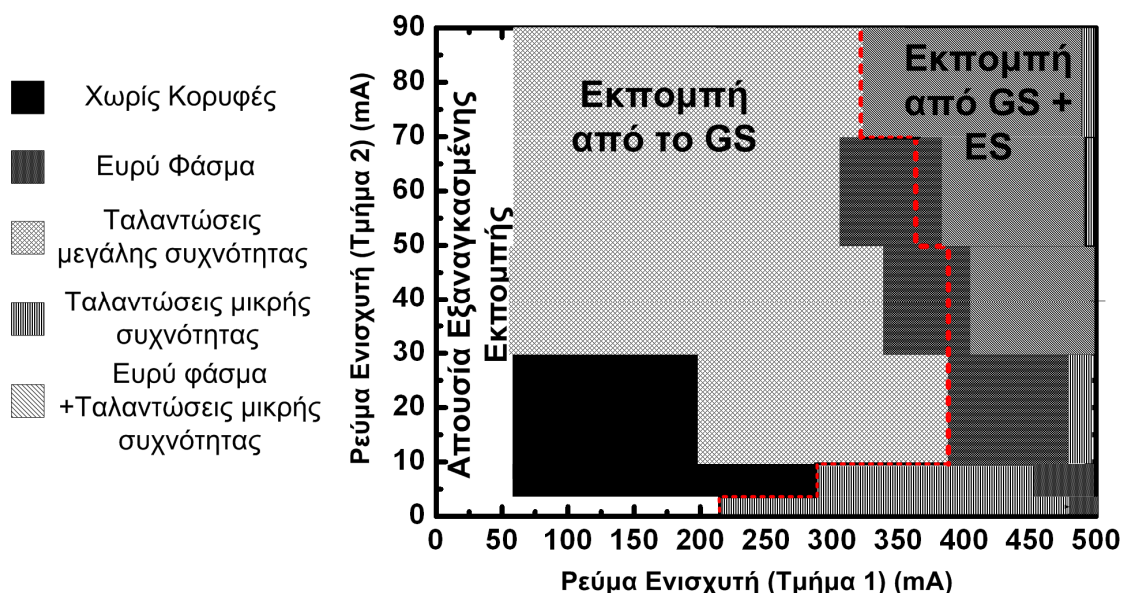
δυνατότητα μέσω διαφορετικών ηλεκτροδίων να πολωθούν ανεξάρτητα. Το πρώτο τμήμα καταλάμβανε το 85% του συνολικού μήκους του λέιζερ (τμήμα 1) ενώ το δεύτερο τμήμα καταλάμβανε το υπόλοιπο 15% (τμήμα 2). Η ανεξάρτητη πόλωση των τμημάτων πραγματοποιήθηκε με χρήση δύο ανεξάρτητων πηγών ρεύματος.

9.2 Χαρακτηριστική λειτουργία υπό συνθήκες μη ομογενούς έγχυσης ρεύματος

Το πρώτο βήμα στο χαρακτηρισμό των διατάξεων περιελάμβανε την ανεξάρτητη σάρωση των ρευμάτων των δύο τμημάτων και την ταυτόχρονη καταγραφή του ηλεκτρικού φάσματος του λέιζερ. Στο σχήμα 9.1 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική χαρτογράφηση των περιοχών λειτουργίας ως προς τις διαφορετικές τιμές ρεύματος για μια διάταξη 5 στρωμάτων κβαντικών σημείων, μήκους 2mm και πλάτους 4μm. Τέσσερις διαφορετικές περιοχές λειτουργίας μπορούν να προσδιοριστούν.

9.2.1 Παλμική συμπεριφορά λόγω ταυτόχρονης ύπαρξης εξαναγκασμένης εκπομπής από το GS και το ES

Η πρώτη περιοχή λειτουργίας επιτεύχθηκε όταν το ρεύμα του δεύτερου τμήματος ήταν μικρότερο από 2mA, ενώ το ρεύμα του πρώτου τμήματος κυμαινόταν από 200mA, όπου και ήταν το κατώφλι έναυσης της εξαναγκασμένης εκπομπής μέχρι και τα 500mA, όπου ήταν η μέγιστη



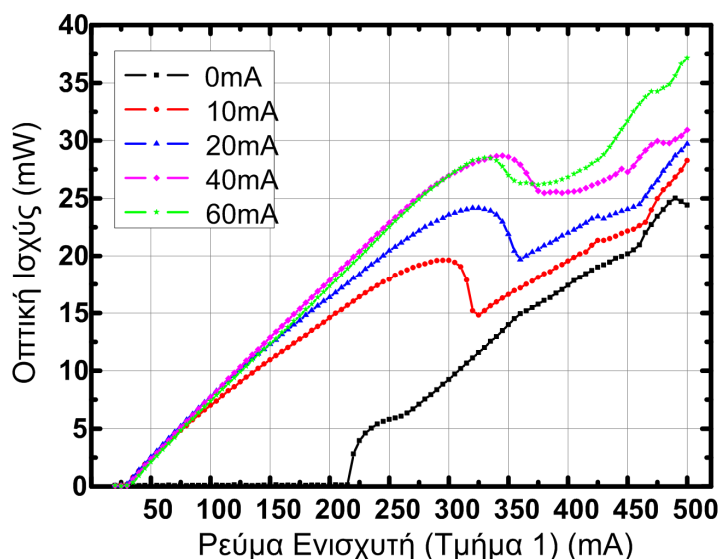
Σχήμα 9-1 Χαρτογράφηση του ηλεκτρικού φάσματος ως προς το ρεύμα και των δύο τμημάτων για ένα λέιζερ 5 στρωμάτων κβαντικών σημείων 2mm μήκος, 4μm πλάτος.

επιτρεπτή έγχυση ρεύματος σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Χαρακτηριστικό αυτής της περιοχής λειτουργίας ήταν ότι, όταν το ρεύμα άντλησης οδηγούσε τη διάταξη στο κατώφλι της εξαναγκασμένης εκπομπής παρατηρήθηκε ταυτόχρονη εκπομπή και από τις δύο ενεργειακές ζώνες (GS/ES), η οποία διατηρήθηκε για όλη τη περιοχή λειτουργίας. Η ταυτόχρονη ύπαρξη δύο φασματικών περιοχών εκπομπής από το κατώφλι λειτουργίας μπορεί να αποδοθεί στο μικρό ρεύμα έγχυσης που χρησιμοποιήθηκε στο τμήμα 2 (15% του μήκους). Η μικρή πυκνότητα ρεύματος οδήγησε το τμήμα 2 σε λειτουργία απορρόφησης – κάτω από το επίπεδο της διαφάνειας- επάγοντας υψηλές απώλειες στην φασματική περιοχή του GS. Οι αυξημένες απώλειες είχαν σαν αποτέλεσμα τον κορεσμό των φορέων στη ενεργειακή ζώνη του GS πριν ακόμα την έναυση του λέιζερ. Αυτό το γεγονός οδήγησε με τη σειρά του στη συσσώρευση φορέων στην ενεργειακή ζώνη του ES, με αποτέλεσμα τη

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

δημιουργία ακτινοβολικών επανασυνδέσεων από το συγκεκριμένο μήκος κύματος και την ταυτόχρονη εκπομπή και από τις δύο περιοχές.

Η λειτουργία του τμήματος 2 ως απορροφητής επιβεβαιώνεται και από τη μελέτη των καμπυλών της οπτικής έντασης προς το ρεύμα του πρώτου τμήματος, για διάφορες τιμές ρεύματος του τμήματος 2. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 9.2, η αύξηση του ρεύματος του τμήματος 2 πέραν των 2mA προκαλεί απότομη πτώση του ρεύματος κατωφλίου ίση με 160mA (το τμήμα 2 περνά το σημείο διαφάνειας), ενώ η περαιτέρω αύξηση του ρεύματος του τμήματος 2 δεν επάγει σημαντικές διαφοροποιήσεις στο κατώφλι του λέιζερ. Για μεγαλύτερες τιμές ρεύματος στο τμήμα 2 παρατηρήθηκε αύξηση της κλίσης των καμπυλών που προερχόταν επίσης από την μείωση των μη κορεσμένων απωλειών. Επιπλέον, κατά τη χάραξη των καμπυλών παρατηρήθηκε η ύπαρξη αλλαγών στην κλίση της καμπύλης, που συνεπάγονταν αλλαγή στην εξωτερική κβαντική απόδοση (external quantum efficient). Η πρώτη αλλαγή σημειώθηκε όταν η διάταξη εισερχόταν στην τρίτη περιοχή λειτουργίας και θα αναλυθεί στις επόμενες παραγράφους, ενώ η δεύτερη, η οποία σημειώθηκε σε υψηλές τιμές ρεύματος του πρώτου τμήματος, παρουσιάστηκε στην έναυση του ES και συσχετίζεται άμεσα με την έναυση ακτινοβολικών αυτοδιεγέρσεων από την ενεργειακή στάθμη του ES [13].



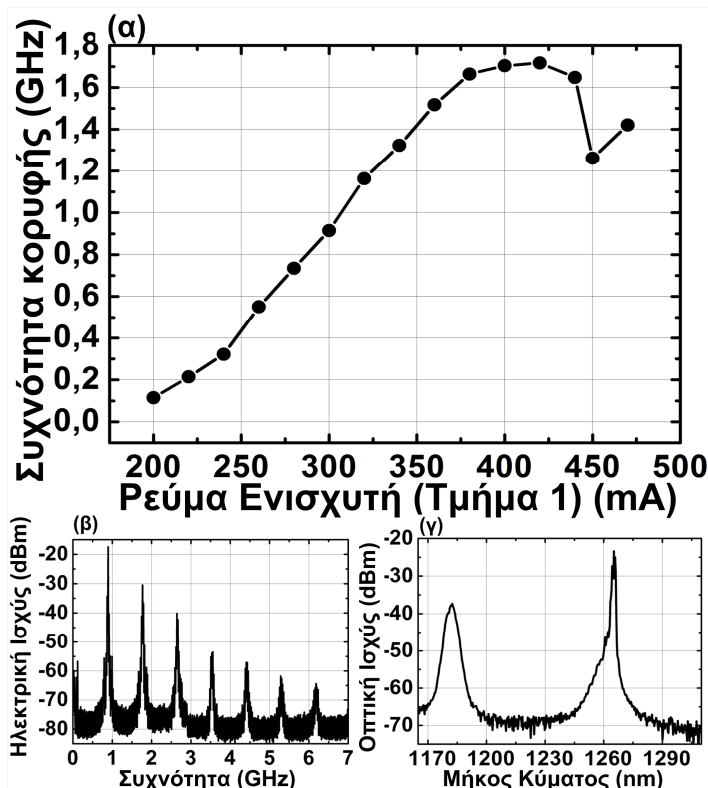
Σχήμα 9-2 Καμπύλες οπτικής ισχύος ως προς το ρεύμα του τμήματος 1, για διάφορες τιμές του τμήματος 2

Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρόλο που το τμήμα 2 αυξάνει τις απώλειες της κοιλότητας, αυτή η περιοχή λειτουργίας δεν είναι ταυτόσημη με την περίπτωση που το τμήμα 2 πολώνεται ανάστροφα (βλέπε κεφάλαιο 3). Βασική αιτία για αυτήν τη διαφοροποίηση είναι η απουσία ανάστροφου ηλεκτρικού πεδίου στην δίοδο του τμήματος 2, το οποίο θα απομάκρυνε ταχύτατα από την ενεργό περιοχή τους παραγόμενους από το οπτικό πεδίο φορείς, με αποτέλεσμα τη μείωση του χαρακτηριστικού χρόνου αποκατάστασης των φορέων [14]-[15] και την δημιουργία παλμών με περιορισμένο χρονικό εύρος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο απορροφητής έχει μεγάλο χρόνο ζωής φορέων, με αποτέλεσμα να παρατηρούνται κορυφές στο ηλεκτρικό φάσμα που συμπίπτουν με το χαρακτηριστικό χρόνο της κοιλότητας για το GS και το ES (20.1GHz και 19.7GHz αντίστοιχα) αλλά έχουν μεγάλο εύρος ημίσειας ισχύος, κάτι το οποίο συνεπάγεται ασταθή εγκλειδωση τρόπων.

Το ηλεκτρικό φάσμα του λέιζερ στη συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας παρουσίασε, εκτός των κορυφών που αντιστοιχούσαν στους χαρακτηριστικούς χρόνους της κοιλότητας για το GS και το ES (20.1GHz και 19.7GHz αντίστοιχα), και άλλες

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

φασματικές κορυφές. Η διαφορά συχνότητας μεταξύ αυτών των κορυφών και των θεμελιωδών κυμαινόταν από 170MHz μέχρι 1.7GHz, ανάλογα με την τιμή ρεύματος του πρώτου τμήματος (9.3α). Όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 9.3β, η διαφορά αυτών των χαρακτηριστικών κορυφών καθώς και υψηλότερης τάξης αρμονικές ήταν εμφανείς και στις χαμηλές συχνότητες του ηλεκτρικού φάσματος.



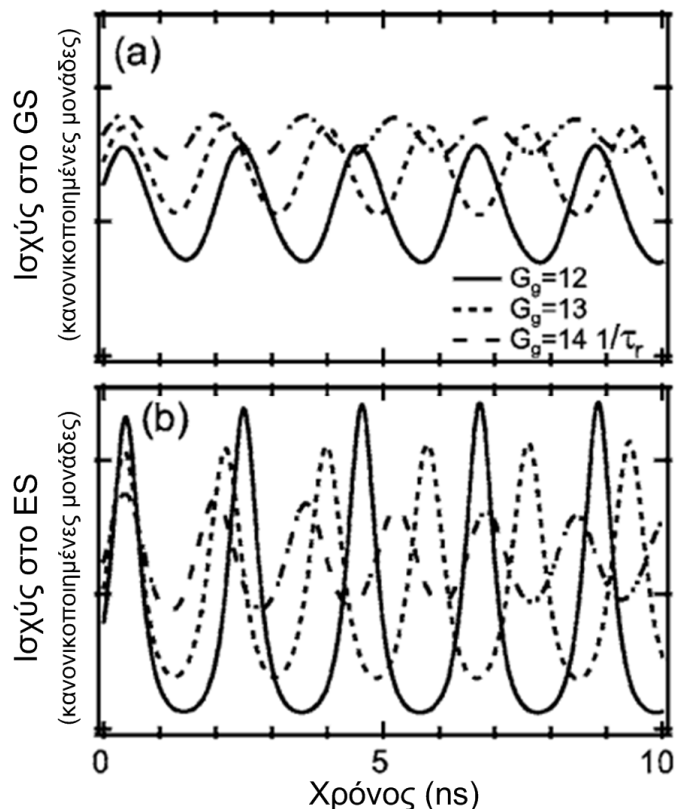
Σχήμα 9-3(α) μεταβολή της συχνότητας του ηλεκτρικού φάσματος προς το ρεύμα του πρώτου τμήματος για τη πρώτη περιοχή λειτουργίας. (β) Χαρακτηριστικό δείγμα του ηλεκτρικού φάσματος. (γ) Χαρακτηριστικό οπτικό φάσμα της περιοχής λειτουργίας.

Η συγκεκριμένη εικόνα του ηλεκτρικού φάσματος οδηγούσε στο συμπέρασμα ότι το λέιζερ βρισκόταν σε ατελή - παλμική λειτουργία (λόγω μεγάλου εύρους των κορυφών που αντιστοιχούσαν στη συχνότητα επανάληψης) με έντονες διακυμάνσεις του πλάτους των παλμών λόγω Q-switching (ύπαρξη κορυφών – δορυφόρων στο φάσμα). Αυτό το φαινόμενο παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 και έχει επισημανθεί και στη βιβλιογραφία για αντίστοιχα λέιζερ, τα οποία λειτουργούσαν παλμικά [16]-[18] λόγω εγκλειδωσης τρόπων και οφείλεται στην ταυτόχρονη ύπαρξη εκπομπής και από τις δύο δυνατές φασματικές περιοχές.

Πιο συγκεκριμένα, λόγω απουσίας ισχυρού ανάστροφου πεδίου στη μία δίοδο, που θα μπορούσε να απομακρύνει τους παραγόμενους ηλεκτρικούς φορείς, δημιουργείται η δυνατότητα οι φορείς που βρίσκονται στην ενεργειακή ζώνη του ES να αποδιεγείρονται πάλι πίσω στο GS και το αντίστροφο. Αποτέλεσμα αυτών των αποδιεγέρσεων είναι η ταλάντωση του αριθμού φορέων σε κάθε ζώνη, με αποτέλεσμα την δημιουργία διαμόρφωσης του πλάτους των παραγόμενων παλμών, όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4. Στη συγκεκριμένη μελέτη παρουσιάστηκαν και θεωρητικά αποτελέσματα βασισμένα σε εξισώσεις φορέων για την περιγραφή του ενεργού υλικού [19] και σε διαφορικές εξισώσεις καθυστέρησης για την προσομοίωση της παλμικής λειτουργίας, τα οποία επιβεβαίωσαν την ύπαρξη παλμικής λειτουργίας λόγω ταλάντωσης των φορέων σε κάθε στάθμη. Στο σχήμα 9.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για το GS και το ES ταυτόχρονα, ενώ η διάταξη η οποία θεωρήθηκε, είχε 5 στρώματα κβαντικών σημείων και 2mm μήκος.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Αυτό το συμπέρασμα επιβεβαιώνεται επίσης και από το γεγονός ότι σε λέιζερ εγκλειδωσης τρόπων, το φαινόμενο της διαμόρφωσης του πλάτους των παλμών συμπίπτει με χρήση χαμηλών τιμών τάσης στο τμήμα απορρόφησης και ως εκ τούτου, με ανεπαρκή απομάκρυνση των παραγόμενων από το οπτικό πεδίο, ηλεκτρικών φορέων.



Σχήμα 9-4 Οπτική ισχύς (α) στο GS και β) στο ES, συναρτήσει του χρόνου

9.2.2 Παλμική συμπεριφορά λόγω διαφορετικών προφίλ της απολαβής

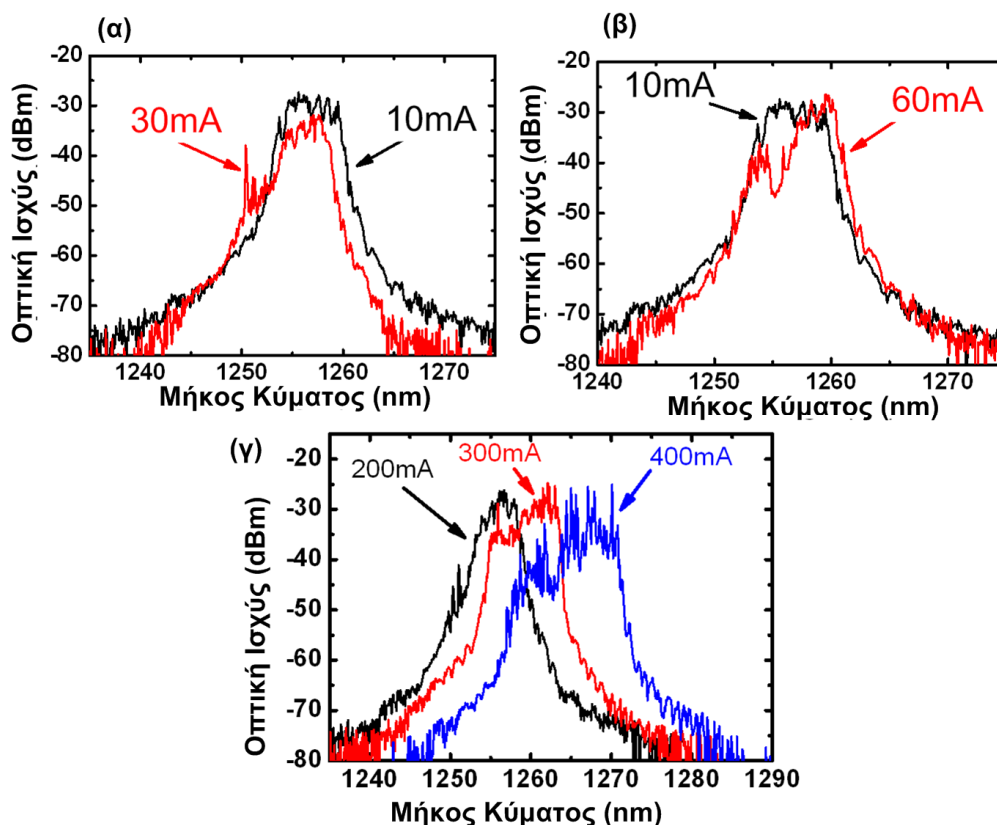
Η δεύτερη περιοχή λειτουργίας παρατηρήθηκε για το μεγαλύτερο εύρος τιμών ρεύματος και παρουσιάζεται στο σχήμα 9.1 με ανοιχτό γκρι. Το ρεύμα του τμήματος 2 είχε πολωθεί πέρα των 2mA και ως εκ τούτου λειτουργούσε πάνω ή κοντά στο σημείο διαφάνειας, ενώ οι τιμές ρεύματος του τμήματος 1 κυμαίνονταν από 34mA (το οποίο ήταν και το νέο σημείο κατωφλίου σύμφωνα με το σχήμα 8.2) έως 350mA-400mA ανάλογα με το ρεύμα του τμήματος 2. Σε αυτές τις συνθήκες πόλωσης, το τμήμα 2 παρουσίαζε χαμηλότερες μη κορεσμένες απώλειες σε σχέση με την πρώτη περιοχή λειτουργίας, με διπλό αποτέλεσμα. Πρώτον παρατηρήθηκε απότομη μείωση του ρεύματος κατωφλίου και δεύτερον, η εμφάνιση εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES πραγματοποιήθηκε για υψηλές τιμές ρεύματος και όχι κοντά στο κατώφλι έναυσης. Το τελευταίο αποδίδεται στην μείωση των απωλειών στο GS με αποτέλεσμα τον κορεσμό των φορέων του GS σε αρκετά υψηλότερα ρεύματα, όπως μπορεί να παρατηρηθεί και από τις καμπύλες οπτικής έντασης – ρεύματος (σχήμα 9.2).

Η μελέτη του ηλεκτρικού φάσματος της συγκεκριμένης περιοχής λειτουργίας αποκάλυψε την ύπαρξη ισχυρών ταλαντώσεων με συχνότητα που κυμαίνονταν από 11.5GHz μέχρι 3.5GHz, ανάλογα με τις τιμές ρευμάτων που εγχεόντουσαν σε κάθε τμήμα της διάταξης. Η απουσία ταυτόχρονης εκπομπής από το GS και το ES επιβεβαίωσε ότι το γενεσιουργό αίτιο των ταλαντώσεων σε αυτή τη περιοχή δεν σχετιζόταν με ταλαντώσεις φορέων μεταξύ των δύο ενεργειακών σταθμών (GS/ES), ούτε συσχετιζόταν με φαινόμενα εγκλειδωσης τρόπων, μια και δεν υπήρχε κορεσμένος απορροφητής (και τα

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

δύο τμήματα ήταν πάνω από τη διαφάνεια). Αλλά και οι συχνότητες των ταλαντώσεων δεν συσχετιζόντουσαν με καμία δυνατή οπτική διαδρομή εντός της κοιλότητας.

Βασικός λόγος για την ύπαρξη των ταλαντώσεων ήταν η ύπαρξη διαφορετικού φασματικού προφίλ της απολαβής του κάθε τμήματος. Αυτή η διαφοροποίηση στην απολαβή του κάθε τμήματος σχετιζόταν με την διαφορετική πυκνότητα ρεύματος του κάθε τμήματος. Για να αποδειχτεί αυτή η σχέση μελετήθηκαν τα οπτικά φάσματα για διαφορετικές συνθήκες ρεύματος. Τα σχήματα 9.5 α και β παρουσιάζουν αυτήν ακριβώς την εξάρτηση. Στην περίπτωση που το ρεύμα του τμήματος 1 παραμένει σταθερό, ίσο με 200mA και το ρεύμα του τμήματος 2 μεταβάλλεται από 10mA μέχρι 40mA, τότε η αύξηση του ρεύματος προκαλεί μια ολίσθηση του φάσματος προς χαμηλότερα μήκη κύματος (blue-shift) (σχήμα 9.5 α). Η αντίστροφη συμπεριφορά παρουσιάζεται (red-shift) όταν το ρεύμα του τμήματος 2 υπερβεί τα 40mA και αυξηθεί μέχρι τα 60mA (σχήμα 9.5β). Η ολίσθηση του φάσματος με την μεταβολή του ρεύματος μπορεί να αποδοθεί σε δύο φαινόμενα, τα οποία έχουν παρατηρηθεί σε ημιαγωγικά λέιζερ κβαντικού φρέατος. Το φαινόμενο Kerr είναι υπεύθυνο για την ολίσθηση του φάσματος προς μικρότερα μήκη κύματος (blue-shift) και βασίζεται στην μείωση του δείκτη διάθλασης λόγω αύξησης των φορέων [20]. Εν αντιθέσει με τα προηγούμενα, η ολίσθηση του φάσματος σε μεγαλύτερα μήκη κύματος οφείλεται σε θερμικά φαινόμενα εντός της ενεργού περιοχής, τα οποία γίνονται εξαιρετικά ισχυρά (ισχυρότερα του φαινομένου Kerr) όταν αυξηθεί η πυκνότητα ρεύματος [21].



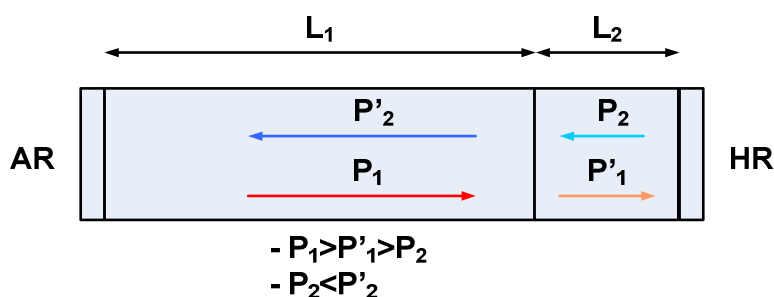
Σχήμα 9-5 α) Οπτικά φάσματα για σταθερό ρεύμα $I=200\text{mA}$ στο πρώτο τμήμα και για μεταβολή του ρεύματος του τμήματος 2 από 10mA σε 30mA. β) Οπτικά φάσματα για σταθερό ρεύμα $I=200\text{mA}$ στο πρώτο τμήμα και για μεταβολή του ρεύματος του τμήματος 2 από 10mA σε 60mA. γ) Οπτικά φάσματα για σταθερό ρεύμα $I=30\text{mA}$ στο δεύτερο τμήμα και για μεταβολή του ρεύματος του τμήματος 1 από 200mA σε 400mA.

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, διατηρώντας το ρεύμα του τμήματος 1 σταθερό, και ως εκ τούτου μη μεταβάλλοντας το προφίλ της απολαβής του, παρατηρούμε ότι το συνολικό φάσμα αλλάζει με το ρεύμα του τμήματος 2. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

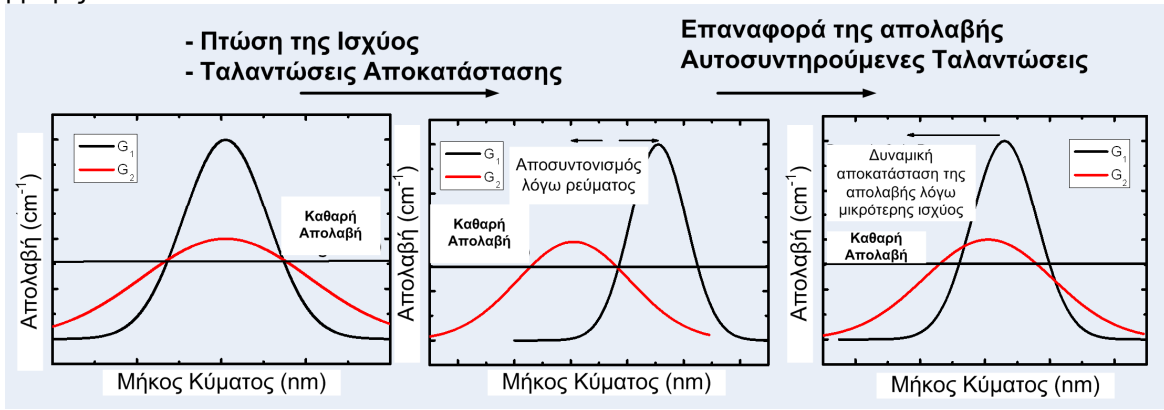
μία ουρά της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από το τμήμα 1 συναντά υψηλές απώλειες στο τμήμα 2 ενώ η άλλη ουρά συναντά ενίσχυση (αποσυντονισμός των δύο απολαβών). Η παραπάνω παρατήρηση επιβεβαιώνει την ύπαρξη δύο διαφορετικών προφίλ απολαβής. Εκτελώντας την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή διατηρώντας το ρεύμα του τμήματος 2 σταθερό ($I=30\text{mA}$) και μεταβάλλοντας το ρεύμα του τμήματος 1, παρατηρείται μια συνολική ολίσθηση του φάσματος προς μεγαλύτερα μήκη κύματος (σχήμα 9.5 γ). Πιθανό αίτιο αυτού είναι ότι από τα 200mA και μετά, τα θερμικά φαινόμενα είναι ισχυρότερα από ότι το φαινόμενο Kerr για το πρώτο τμήμα.

Η προαναφερθείσα συμπεριφορά μπόρεσε να δώσει εξήγηση στην ύπαρξη παλμικής συμπεριφοράς στη δεύτερη περιοχή λειτουργίας. Πιο αναλυτικά, το λέιζερ αποτελείται από μία ενιαία κοιλότητα με χαρακτηριστικό χρόνο που ισοδυναμεί με ένα ρυθμό ταλάντωσης της τάξης των 20GHz. Παρόλα αυτά, όπως επισημάνθηκε παραπάνω, οι κοιλότητα διαθέτει δύο ανεξάρτητα προφίλ απολαβής με διαφορετικό κεντρικό μήκος κύματος καθώς και διαφορετικό επίπεδο απολαβής, λόγω διαφορετικών συνθηκών ηλεκτρικής άντλησης. Το σύνολο σχεδόν της ισχύος που παράγεται εντός της κοιλότητας μπορεί να αποδοθεί στο τμήμα 1, μια και αυτό διαθέτει μεγαλύτερο μήκος και ισχυρότερη άντληση. Για το τμήμα 2 από την άλλη, λόγω μικρού μήκους και λαμβάνοντας υπόψη μας ότι ενεργές περιοχές περιορισμένου μήκους (μικρότερο από 0.5mm) έχουν την τάση να εκπέμπουν πρώτα στο ES λόγω κορεσμού του GS, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το δεύτερο τμήμα, το οποίο βρίσκεται τοποθετημένο αμέσως πριν την επιφάνεια υψηλής ανάκλασης, επιφέρει μείωση της οπτικής ακτινοβολίας η οποία εισέρχεται στο δεύτερο τμήμα. Κατά τη διαδικασία της λειτουργίας, η οπτική ακτινοβολία αφού παραχθεί (από το τμήμα 1) και διαδοθεί στο τμήμα 2 (απώλειες, λόγω αποσυντονισμού των απολαβών) επιστρέφει στο πρώτο τμήμα με μειωμένη ένταση. Αυτό το γεγονός διαταράσσει την ισορροπία μεταξύ των ηλεκτρικών και οπτικών φορέων με αποτέλεσμα να αναγκάσει την διάταξη να εκτελέσει ταλαντώσεις αποκατάστασης (relaxation oscillations), ώστε η ισχύς να σταθεροποιηθεί σε μια νέα τιμή λειτουργίας. Αν ληφθεί υπόψη μας μόνο αυτό το γεγονός, η παλμική συμπεριφορά δεν θα μπορούσε να διατηρηθεί και η διάταξη μετά από κάποιες ταλαντώσεις θα σταθεροποιούσε την λειτουργία της. Στη περίπτωση που παρουσιάζεται εδώ, ένα ακόμα φαινόμενο συνυπάρχει και επιτρέπει την διατήρηση των ταλαντώσεων. Η μειωμένη ισχύς που εισέρχεται στο πρώτο τμήμα, εκτός από το να διαταράξει την ισορροπία των φορέων, προκαλεί και αύξηση του δείκτη διάθλασης με αποτέλεσμα να ωθεί το φάσμα της απολαβής σε τιμές πιο κοντά προς το φάσμα απολαβής του δεύτερου τμήματος. Αυτό το γεγονός μειώνει τη φασματική απόσταση μεταξύ των δύο απολαβών, με αποτέλεσμα να τείνει να εξαφανίσει και το αρχικό αίτιο των ταλαντώσεων που είναι η διαφορά απολαβής. Άμεση συνέπεια αυτού είναι η επαναφορά της ισχύος στα αρχικά επίπεδα με αποτέλεσμα την εκ νέου εκκίνηση του φαινομένου. Στα σχήματα 9.6 και 9.7 απεικονίζεται διαγραμματικά η δομή της κοιλότητας και η στατική και δυναμική ολίσθηση των προφίλ των δύο απολαβών.



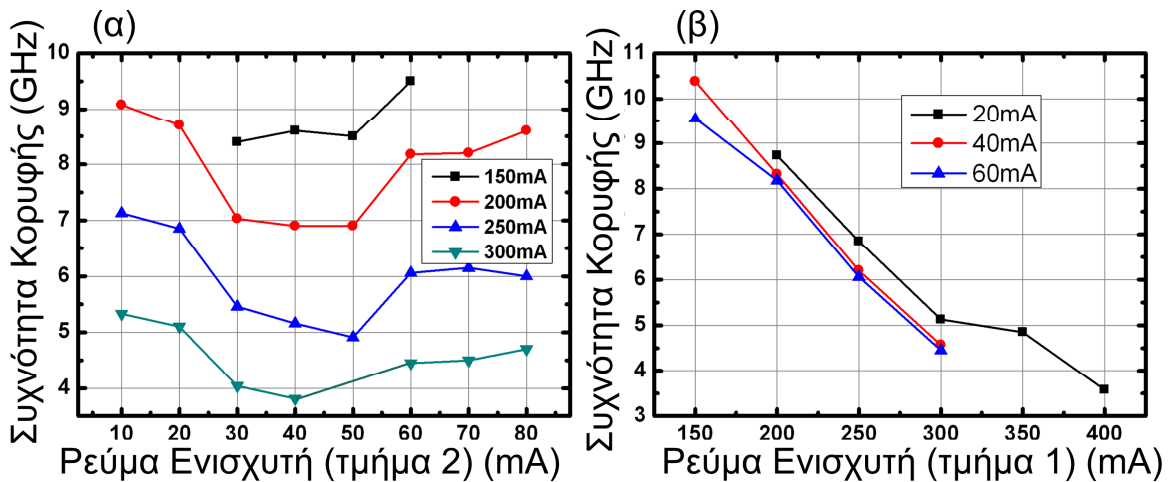
Σχήμα 9-6 Διαγραμματική απεικόνιση της κοιλότητας καθώς και της οπτικής ισχύος

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 9-7 Σχηματική αναπαράσταση της δημιουργίας της παλμικής συμπεριφοράς. Η απολαβή του κάθε τμήματος έχει προσομοιωθεί ως μια Gaussian κατανομή.

Οι χαρακτηριστικοί χρόνοι που σχετίζονται με την ταλάντωση παρουσιάζονται στο σχήμα 9.8, για δύο περιπτώσεις: με σταθερό ρεύμα στο τμήμα 1 και μεταβάλλοντας το ρεύμα του τμήματος 2 (σχήμα 9.8α), και σταθερό ρεύμα στο τμήμα 2 και αυξάνοντας το ρεύμα του τμήματος 1 (σχήμα 9.8 β). Αν η εξέλιξη της συχνότητας της κεντρικής κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος συγκριθεί με την εξέλιξη του οπτικού φάσματος στις ίδιες συνθήκες πόλωσης, θα παρατηρηθεί το εξής φαινόμενο: στην περίπτωση που αυξάνεται ο αποσυντονισμός των δύο απολαβών η συχνότητα των παλμών μειώνεται, ενώ η ακριβώς αντίστροφη συμπεριφορά παρατηρείται όταν μειώνεται η φασματική απόσταση των δύο απολαβών. Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι όσο πιο απομακρυσμένες φασματικά είναι οι δύο απολαβές, τόσο πιο πολύς χρόνος (αριθμός ταλαντώσεων εντός της κοιλότητας) χρειάζεται ώστε η μειωμένη ισχύς να μειώσει τη φασματική απόσταση των δύο προφίλ των απολαβών.



Σχήμα 9-8 α) Συχνότητα κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος ως προς το ρεύμα του τμήματος 2, για διάφορες τιμές ρεύματος του τμήματος 1 β) Συχνότητα κορυφής του ηλεκτρικού φάσματος ως προς το ρεύμα του τμήματος 1, για διάφορες τιμές ρεύματος του τμήματος 2.

9.3 Εισαγωγή στην έννοια του Χάους

Η θεωρία του χάους έχει ένα τεράστιο πεδίο εφαρμογής που εκτείνεται από τον τομέα των μαθηματικών και της φυσικής μέχρι τον τομέα της βιολογίας και των οικονομικών, ενώ έχει επιφέρει μεγάλες αλλαγές στο πώς η σύγχρονη επιστήμη αντιμετωπίζει τα συστήματα υψηλής πολυπλοκότητας. Το χάος ορίζεται ως είναι μια μη-περιοδική, μεγάλης χρονικής κλίμακας συμπεριφορά σε ένα ντετερμινιστικό σύστημα το οποίο έχει έντονη εξάρτηση από τις αρχικές συνθήκες. Πιο αναλυτικά, με τον όρο 'μη – περιοδική, μεγάλης χρονικής κλίμακας' εννοείται ότι η απεικόνιση της φάσης ενός σήματος δεν

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

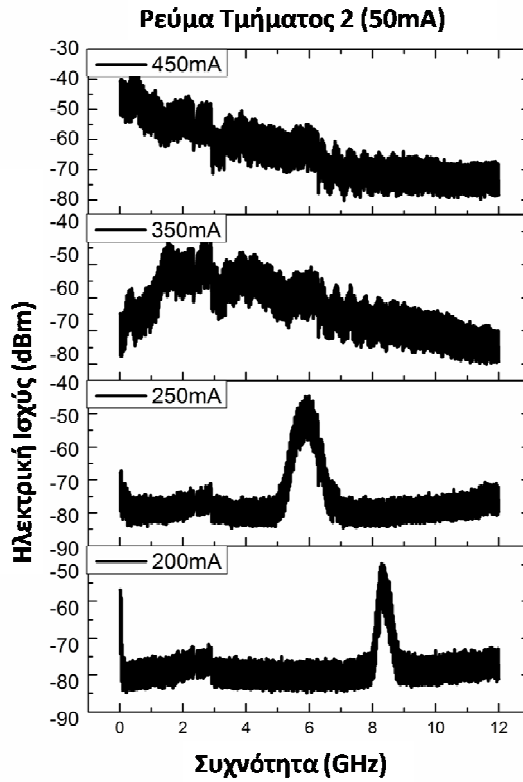
αποκαθίσταται σε ένα σταθερό σημείο ή σε μία περιοδική ή ημιπεριοδική τροχιά μετά από ένα χρονικό όριο, το οποίο και τείνει στο άπειρο. Ο όρος 'ντετερμινιστικό' αναφέρεται σε ένα σύστημα το οποίο δεν έχει στοχαστικές παραμέτρους. Η χαοτική συμπεριφορά ενός τέτοιου συστήματος δεν βασίζεται στο θόρυβο αλλά σε εγγενή, μη γραμμική διαδικασία. Τέλος, η ευαισθησία στις αρχικές συνθήκες αναφέρεται στο γεγονός ότι καταστάσεις, οι οποίες έχουν προέλθει από παρόμοιες αλλά όχι πανομοιότυπες συνθήκες, θα παράγουν εξόδους οι οποίες θα αποκλίνουν εκθετικά η μία από την άλλη.

Στην περίπτωση των ημιαγωγικών λείζερ, η παραγωγή οπτικής ισχύος, της οποίας το πλάτος και η φάση ταλαντώνονται με χαοτικό τρόπο, έχει πολύ μεγάλη πρακτική σημασία για συστήματα τηλεπικοινωνιών. Η χαοτική κρυπτογραφία [22]-[24], καθώς και η παραγωγή τυχαίων αριθμών μέσω της δειγματοληψίας ενός χαοτικού σήματος [25] είναι ένα υποσύνολο μόνο των μελλοντικών εφαρμογών που θα βασίζονται σε χαοτικά οπτικά φέροντα. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 8, ο πλέον διαδεδομένος τρόπος οδήγησης ενός ημιαγωγικού λείζερ σε χαοτική λειτουργία είναι η επαναδρομολόγηση τμήματος της εκπεμπόμενης οπτικής ισχύος πίσω στην ενεργό κοιλότητα, αφού το ανακλώμενο σήμα έχει διαδοθεί πρώτα σε μια νέα οπτική διαδρομή με μήκος μεγαλύτερο του μήκους συμφωνίας της διάταξης. Για την επίτευξη αυτού του φαινομένου, εκτός της ενεργού περιοχής στη διάταξη, θα πρέπει να ενσωματωθούν η οπτική διαδρομή μέσω ειδικών κυματοδηγών καθώς και κατάλληλα διαμορφωμένοι απορροφητές (VOA), οι οποίοι ρυθμίζουν το ποσοστό της ανακλώμενης οπτικής ισχύος, ενώ για να λειτουργήσουν χρειάζονται ανεξάρτητη τροφοδοσία.

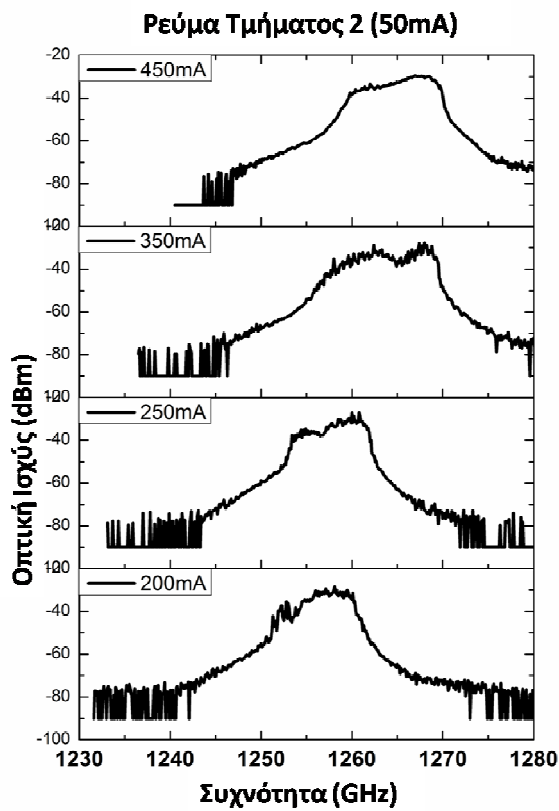
9.3.1 Χαοτική συμπεριφορά λόγω διαφορετικών προφίλ της απολαβής

Στη παρούσα παράγραφο περιγράφεται η δυνατότητα παραγωγής χαοτικού φέροντος από μια διάταξη κβαντικών τελειών χωρίς τη χρήση οπτικής ανάδρασης και ως εκ τούτου χωρίς την χρήση όλων των επιπλέον συστημάτων που απαιτούνται για την επίτευξη χαοτικής λειτουργίας σε κοινά ημιαγωγικά λείζερ. Πιο συγκεκριμένα, η τρίτη περιοχή λειτουργίας, που παρουσιάζεται στο σχήμα 9.1 με σκούρο γκρι, παρατηρήθηκε για τιμές ρεύματος στο τμήμα 1 μεγαλύτερες από 350mA με 400mA, ανάλογα με το ρεύμα του τμήματος 2. Σε αυτή τη περιοχή ρευμάτων παρατηρήθηκε διεύρυνση του οπτικού φάσματος (17nm σε εύρος -20dB) καθώς και μια απότομη αύξηση του επιπέδου θορύβου στο ηλεκτρικό φάσμα, η οποία συνοδευόταν από την απουσία κάποιας κορυφής, αλλά περιελάμβανε μια διαπλάτυνση του εύρους του ηλεκτρικού φάσματος που έφτανε τα 8.5GHz. Στο σχήμα 9.9 παρουσιάζεται η εξέλιξη του ηλεκτρικού φάσματος με την αύξηση του ρεύματος του πρώτου τμήματος, το οποίο προκάλεσε μετάβαση από τη δεύτερη περιοχή λειτουργίας (παλμική περιοχή) στην τρίτη. Στο σχήμα 9.10 παρουσιάζεται η εξέλιξη του οπτικού φάσματος, στην οποία είναι εμφανής η ολίσθηση της κορυφής προς υψηλότερα μήκη κύματος και η αύξηση του εύρους με την αύξηση του ρεύματος.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές



Σχήμα 9-9 Εξέλιξη του ηλεκτρικού φάσματος συναρτήσει του ρεύματος του τμήματος 1 (200mA-450mA), για ρεύμα στο τμήμα 2 ίσο με 50mA



Σχήμα 9-10 Εξέλιξη του οπτικού φάσματος συναρτήσει του ρεύματος του τμήματος 1 (200mA-450mA), για ρεύμα στο τμήμα 2 ίσο με 50mA

Η εμφάνιση αυτής της περιοχής λειτουργίας συνέπιπτε με την έναυση εξαναγκασμένης λειτουργίας από το ES. Το γεγονός ότι παρόμοιες συμπεριφορές έχουν παρατηρηθεί στο παρελθόν και σε λέιζερ κβαντικών φρεάτων με κατανεμημένο φράγμα περίθλασης, στα οποία δεν υπήρχε η δυνατότητα πολυφασματικής εκπομπής λόγω έλλειψης πολλαπλών ενεργειακών σταθμών, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το γεγονός της έναυσης του ES δεν σχετίζεται άμεσα με αυτή την περιοχή λειτουργίας. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει αναφερθεί, πριν την έναυση εξαναγκασμένης εκπομπής από το ES έχει προηγηθεί κορεσμός της ενεργειακής στάθμης του GS και η πιθανότητα κατάληψης έχει γίνει περίπου ίση με τη μονάδα. Σε αυτή την περίπτωση, στην ενεργειακή ζώνη του GS υπάρχει έντονη αύξηση των μη-γραμμικών φαινομένων, όπως είναι η θέρμανση φορέων (carrier heating), η δημιουργία ελεύθερων οπών (spectral hole burning) κλπ.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συνθήκες πόλωσης όπου το φαινόμενο αυτό είναι εμφανές περιλαμβάνουν υψηλή διαφορά πυκνότητας ρεύματος μεταξύ των δύο τμημάτων, με αποτέλεσμα ο χρόνος που απαιτείται (αριθμός ταλαντώσεων εντός της κοιλότητας) ώστε να συντηρηθεί ισορροπία μεταξύ των οπτικών και ηλεκτρικών φορέων αυξάνει σε τέτοιο βαθμό, που δεν μπορεί να προκληθεί αποκατάσταση (steady state). Αποτέλεσμα αυτού είναι η διαρκής ταλάντωση των φορέων εντός της κοιλότητας με τυχαίο τρόπο, η οποία οδηγεί τη διάταξη σε κατάρρευση συμφωνίας και την εκπομπή οπτικής ισχύος, με έντονες και τυχαίες διακυμάνσεις. Η έλλειψη ισορροπίας μεταξύ των φορέων αποτελεί και τον βασικό μηχανισμό παραγωγής χαοτικών φερουσών, στην περίπτωση χρήσης οπτικής ή ηλεκτρικής ανατροφοδότησης. Η βασική διαφορά με την περίπτωση που παρουσιάζεται εδώ είναι η απουσία ανάδρασης και ως εκ τούτου η απουσία αναγκαιότητας χρήσης περίπλοκων δομών εντός της διάταξης ή ακριβών και δύσχρηστων διατάξεων τροφοδοσίας.

9.3.2 Μέτρηση της πολυπλοκότητας

Οι πειραματικές μετρήσεις δεν μπορούν παρά να παράγουν ενδείξεις ύπαρξης χαοτικής λειτουργίας (θορυβικό και μεγάλο εύρος ζώνης ηλεκτρικό φάσμα). Ο μόνος τρόπος να εντοπιστεί η πολυπλοκότητα και οι αστάθειες που περιέχονται σε τέτοια οπτικά σήματα είναι η μαθηματική ανάλυση χρονοσειρών του λέιζερ. Οι χρονοσειρές, όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, καταγράφηκαν με τη χρήση φωτοδιόδου με μέγιστο εύρος ζώνης τα 12GHz και ηλεκτρικού παλμογράφου πραγματικού χρόνου με δυνατότητα καταγραφής 40Gs/s. Πιο αναλυτικά, η μαθηματική ανάλυση περιελάμβανε τη μέτρηση της διάστασης συσχέτισης (correlation dimension- D_2). Αυτό το μέγεθος αποτελεί μια ποσοτικοποίηση της γεωμετρικής κλιμάκωσης και πολυπλοκότητας της χρονοσειράς. Μια σειρά από μεθόδους έχουν χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η πολυπλοκότητα περιέργων ατράκτων, ιδιαίτερα σε θεωρητικές μελέτες. Παρόλα αυτά, στην περίπτωση χρονοσειρών που έχουν προέλθει από πειραματικές μετρήσεις, η πιο αποτελεσματική ανάλυση είναι η διάσταση αυτοσυσχέτισης. Ο υπολογισμός της συγκεκριμένης παραμέτρου προκύπτει από το ολοκλήρωμα-άθροισμα $C(r)$, το οποίο είναι η πιθανότητα δύο τυχαία επιλεγμένων σημείων του ατράκτορα να απέχουν απόσταση μικρότερη από r (σχέση 9.1) [26]

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{d \log C(r)}{d \log r} \quad (9.1)$$

Το άθροισμα αυτοσυσχέτισης $C_m(r)$ δίδεται για κάθε διάσταση m από τη σχέση 9.2, όπου $\Theta()$ είναι η συνάρτηση Heavside. Για πειραματικές χρονοσειρές πεπερασμένης χρονικής διάρκειας, ο χαοτικός ατράκτορας ανακατασκευάζεται χρησιμοποιώντας μεταβλητές χρονικές καθυστερήσεις, ενώ κατόπιν υπολογίζεται η διάσταση από τη σχέση 8.1 και 8.2. Η τιμή του D_2 εξαρτάται από την χρονική καθυστέρηση αλλά και από τη διάσταση m , στην οποία ανακατασκευάζεται ο ατράκτορας. Η διάσταση του D_2

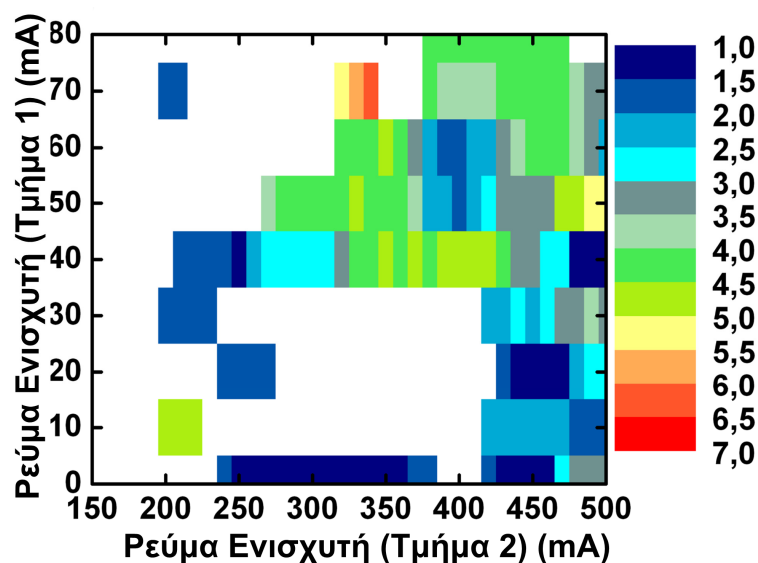
Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

υπολογίζεται εξετάζοντας το γραμμικό τμήμα της καμπύλης του $C_m(r)$ ως προς το λογάριθμο της απόστασης ($\log(r)$) αυξάνοντας το m , μέχρι η καμπύλη να φτάσει σε μια σταθερή τιμή (plateau). Ακολουθώντας αυτήν την προσέγγιση, η τιμή του m παρέχει ένα άνω όριο της πραγματικής τιμής του D_2 .

$$C_m(r) = \frac{2}{N(N-1)} \sum_{j=1}^N \sum_{i=j+1}^N \Theta(r-r_{ij}) \quad (9.2)$$

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης υπολογίστηκε για χρονοσειρές η οποίες συλλέχθηκαν υπό διάφορες συνθήκες πόλωσης της διάταξης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 9.11, χωρίς τη χρήση τεχνικών φιλτραρίσματος του θορύβου. Ένα από τα βασικά προβλήματα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ο υπολογισμός του D_2 σε σήματα που, είτε είναι εξαιρετικά θορυβώδη, είτε έχουν πολύ υψηλή διάσταση. Αυτή η δυσκολία σχετίζεται με το μεγάλο αριθμό ελευθερίας η που ενυπάρχει σε τέτοιου είδους σήματα. Στα πλαίσια της παρούσας ανάλυσης, οι δυνατές τιμές που μπορούσε να λάβει το D_2 κυμαίνονταν από 1 μέχρι 7. Παρόλα αυτά, για τιμές μεγαλύτερες του 5, οι υπολογισμοί περιλαμβάνουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας, διότι για τον ακριβή προσδιορισμό τους απαιτούνταν μεγαλύτερος αριθμός πειραματικών σημείων, τα οποία θα είχαν μικρότερη χρονική απόσταση μεταξύ τους (γρηγορότερη δειγματοληψία).

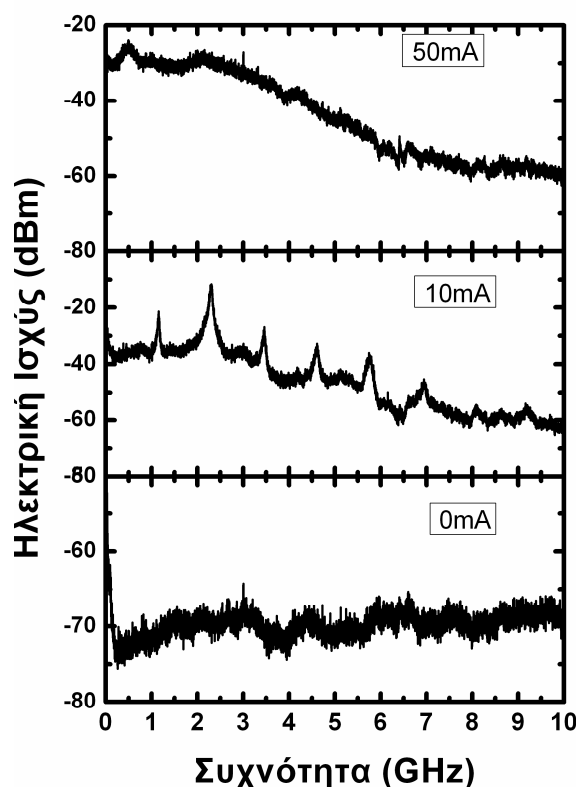
Πιο αναλυτικά, στο σχήμα 9.11, στις περιπτώσεις που η τιμή του D_2 ήταν 1, το σήμα περιελάμβανε ισχυρές περιοδικότητες, ενώ η φασική απεικόνιση του σήματος παρουσίαζε περιορισμένους κυκλικούς ατράκτορες. Στην περίπτωση ύπαρξης κορυφών στο ηλεκτρικό φάσμα με διευρυμένο εύρος ζώνης (8.10), η τιμή του D_2 αυξανόταν λόγω ύπαρξης θορύβου περίπου στο 1.8, ανάλογα με την ισχύ του θορύβου. Οι περιοχές λειτουργίας παρουσίαζαν ασθενείς περιοδικότητες και ευρύ ηλεκτρικό φάσμα, η τιμή του D_2 αυξήθηκε περαιτέρω (τιμές από 4-7), το οποίο σημαίνει ότι οι συγκεκριμένες χρονοσειρές παρουσιάζουν σημαντική πολυπλοκότητα, κάτι το οποίο συσχετίζεται με φαινόμενα κατάρρευσης συμφωνίας. Τιμές μεγαλύτερες από 7 θεωρούνται απροσδιόριστες για τους λόγους που αναφέρθηκαν πιο πάνω, με αποτέλεσμα να μην αναπαριστώνται στο διάγραμμα 9.11. Σε αυτές τις περιοχές, είτε τα σήματα παρουσίαζαν πολυπλοκότητα, η οποία δεν μπορούσε να μετρηθεί με τη συγκεκριμένη μέθοδο, ή το επίπεδο του θορύβου ήταν τόσο ισχυρό, ώστε να μην μπορεί να γίνει επαρκής υπολογισμός των δυναμικών.



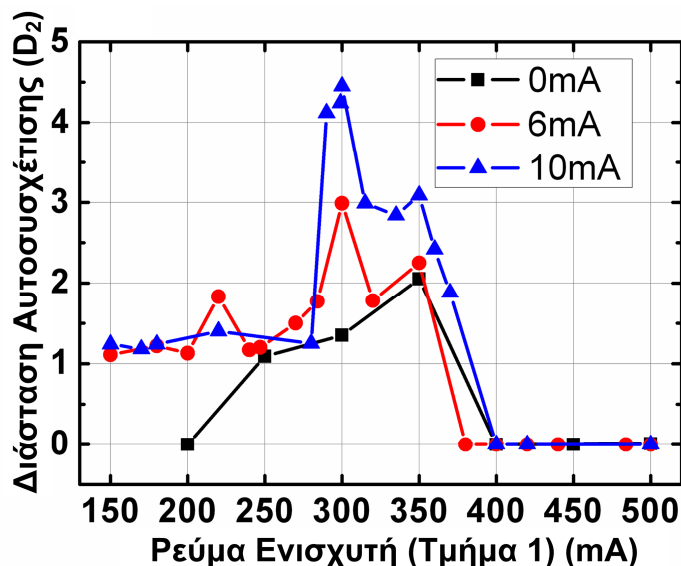
Σχήμα 9-11 Χαρτογράφηση της διάστασης αυτοσυσχετισμού συναρτήσεϊ των ρευμάτων των δύο τμημάτων.

9.3.3 Πειραματική Επαλήθευση

Λόγω του μεγάλου ενδιαφέροντος που παρουσίασε η συγκεκριμένη διάταξη και για επιβεβαίωση ότι η χασοτική συμπεριφορά δεν οφειλόταν σε κάποιο κατασκευαστικό σφάλμα, χαρακτηρίστηκε ακόμα μία διάταξη, η οποία προερχόταν από διαφορετικό τμήμα του δισκίου κατασκευής (wafer), ενώ είχε τα ίδια χαρακτηριστικά με την προαναφερθείσα διάταξη. Η νέα διάταξη παρουσίασε τις ίδιες περιοχές λειτουργίας με τη μόνη διαφορά ότι η εναλλαγή των περιοχών λειτουργίας, αν και ακολουθούσε την ίδια τάση, επιτυγχανόταν για ελαφρώς διαφορετικά ρεύματα έγχυσης. Ο βασικός λόγος αυτής της μικρής διακύμανσης οφειλόταν στο μικρότερο πάχος του κυματοδηγού (4 μ m), το οποίο και άλλαζε τις γραμμικές απώλειες εντός της κοιλότητας (κεφάλαιο 7). Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι για τη νέα συσκευή, όταν οι συνθήκες πόλωσης την οδηγούσαν στην τρίτη περιοχή λειτουργίας, τα ηλεκτρικά φάσματα είχαν μεγαλύτερο εύρος ζώνης, το οποίο και έφτανε τα 10GHz. Αν και η ανάλυση των κατασκευαστικών παραμέτρων που επιτρέπουν ή ενισχύουν αυτήν την περιοχή λειτουργίας ξεφεύγουν από τα όρια της παρούσας διατριβής, ένας από τους βασικούς μελλοντικούς στόχους είναι η πλήρης χαρτογράφηση των κατασκευαστικών παραμέτρων που επιδρούν σε αυτή τη συμπεριφορά. Στο σχήμα 9.12 παραθέτονται κάποια χαρακτηριστικά ηλεκτρικά φάσματα που παρουσιάζουν την παλμική συμπεριφορά της διάταξης αλλά και την περιοχή που παρουσιάζει ηλεκτρικό φάσμα με μεγάλο εύρος ζώνης. Τέλος, σε αναλογία με το σχήμα 9.11, στο σχήμα 9.13 παρουσιάζεται η διάσταση αυτοσυσχέτισης για διάφορες τιμές ρεύματος σε κάθε τμήμα.



Σχήμα 9-12 Ηλεκτρικά φάσματα για τη νέα διάταξη. Το ρεύμα του τμήματος 1 είναι ίσο 298mA ενώ το ρεύμα του τμήματος κυμαίνεται από 0 μέχρι 50mA



Σχήμα 9-13 Χαρτογράφηση της διάστασης αυτοσυσχέτισης συναρτήσεως των ρευμάτων των δύο τμημάτων.

9.4 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια του παρόντος κεφαλαίου μελετήθηκε η επίδραση των διαφορετικών συνθηκών ορθής πόλωσης σε μια διάταξη λέιζερ κβαντικών τελειών δύο τμημάτων. Οι διαφορετικές τιμές ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε τμήμα επέτρεψαν την μελέτη τριών διαφορετικών περιοχών λειτουργίας, όπως χαμηλής και υψηλής συχνότητας ταλαντώσεις, οι οποίες δεν σχετίζονται με φαινόμενα εγκλειδωσης τρόπων και μια περιοχή λειτουργίας η οποία παρουσίαζε ισχυρές αστάθειες χωρίς την ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης. Η πειραματική διερεύνηση των φαινομένων αποκάλυψε ότι το γενεσιουργό αίτιο και των τριών φαινομένων σχετίζεται με την περίπλοκη αλληλεπίδραση των φορέων σε υλικά κβαντικών τελειών.

Ιδιαίτερα έμφαση δόθηκε στην τρίτη περιοχή λειτουργίας η οποία παρουσίαζε έντονη ενίσχυση του θορύβου του ηλεκτρικού φάσματος χωρίς την παρουσία ευδιάκριτων κορυφών και την ταυτόχρονη διαπλάτυνση του οπτικού φάσματος. Για την πιστοποίηση της φύσης του φαινομένου πάρθηκαν πειραματικές χρονοσειρές, οι οποίες αναλύθηκαν ως προς την πολυπλοκότητα τους. Η μελέτη της πολυπλοκότητας της εξόδου της διάταξης αποκάλυψε την δυνατότητα παραγωγής χαοτικών χρονοσειρών απευθείας από τις διατάξεις, χωρίς τη χρήση ειδικών διατάξεων οπτικής ανατροφοδότησης, επιτρέποντας έτσι, τη χρήση λέιζερ κβαντικών τελειών σε εφαρμογές χαοτικής κρυπτογραφίας.

10. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ

Σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων από το σύνολο της διδακτορικής αυτής διατριβής αλλά και η ανάδειξη των μελλοντικών δραστηριοτήτων, οι οποίες αποτελούν φυσική συνέχεια αυτής της μελέτης.

10.1 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας διδακτορικής διατριβής παρουσιάστηκε μια μελέτη των διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών για την παραγωγή εξαιρετικά στενών οπτικών παλμών, απευθείας από ημιαγωγικές διατάξεις. Η διδακτορική διατριβή περιλάμβανε μια αρχική θεωρητική μελέτη για τις διαφοροποιήσεις των υλικών κβαντικών τελειών σε σχέση με τα κλασικά υλικά κβαντικού φρέατος. Σε αυτό το τμήμα παρουσιάστηκαν τα πλεονεκτήματα του τρισδιάστατου περιορισμού που προσφέρουν οι κβαντικές τελείες όσο αναφορά το χαμηλό θόρυβο, το μικρό παράγοντα διεύρυνσης της γραμμής, την θερμοκρασιακή ανοχή καθώς και τον εξαιρετικά μικρό χρόνο ζωής φορέων που είναι αποτέλεσμα της εξιτονικής φύσης του υλικού. Στη συνέχεια επικεντρωθήκαμε στα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν τα ημιαγωγικά λέιζερ κβαντικών τελειών όταν αυτά χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη παλμικής συμπεριφοράς. Πιο συγκεκριμένα αφού παρουσιάστηκαν όλες οι τεχνικές που επιτρέπουν την παλμική λειτουργία, δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην τεχνική παθητικής εγκλείδωσης των τρόπων, μια και αυτή επιλέχτηκε ως η πιο αποδοτική για την επίτευξη οπτικών παλμών χωρίς περίπλοκα σχέδια τροφοδοσίας και ελέγχου της διάταξης.

Κατόπιν παρουσιάστηκε ένα μοντέλο προσομοιώσεων βασισμένο σε πολύ-πλυθισμιακές εξισώσεις φορέων, το οποίο περιλάμβανε όλες τις διαθέσιμες ενεργειακές ζώνες του υλικού, ώστε να μοντελοποιήσει τη δυναμική συμπεριφορά των φορέων. Χρησιμοποιώντας αυτή τη προσέγγιση προσομοιώθηκαν δομές οι οποίες βρίσκονταν σε συνεχή λειτουργία και αποσαφηνίστηκαν οι συνθήκες οι οποίες απαιτούνται για την επίτευξη διπλής εκπομπής από το GS και το ES. Πιο συγκεκριμένα καταδείχτηκε η απαίτηση για υψηλές τιμές ρεύματος άντλησης και ο κορεσμός των φορέων στο GS, επιβεβαιώνοντας έτσι τις θεωρητικές προβλέψεις που είχαν παρουσιαστεί στα πρώτα κεφάλαια. Στη συνέχεια στο μοντέλο ενσωματώθηκαν δύο διαφορετικά τμήματα (ενισχυτής και απορροφητής) και χρησιμοποιήθηκε διαφορική εξίσωση καθυστέρησης για την επίλυση του οπτικού πεδίου εντός της διάταξης. Με αυτή τη προσέγγιση επιτεύχθηκε παλμική λειτουργία μέσω παθητικής εγκλείδωσης και αποδείχτηκε ο ρόλος τόσο του ρεύματος άντλησης όσο και της ανάστροφης τάσης στην ποιότητα των οπτικών παλμών. Αυτή η μελέτη αποτέλεσε αφορμή για την πειραματική διερεύνηση η οποία ακολούθησε στα επόμενα κεφάλαια.

Το πρώτο τμήμα της πειραματικής διερεύνησης πραγματοποιήθηκε αναλυτικός χαρακτηρισμός των διαθέσιμων διατάξεων, ως προς το οπτικό και ηλεκτρικό φάσμα ενώ με χρήση οπτικού αυτοσυσχετιστή καταγράφηκε το χρονικό εύρος των παραγόμενων παλμών. Αξιοποιώντας αυτές τις μετρήσεις εξήχθησαν συμπεράσματα για την εξέλιξη του χρονικού εύρους του παλμού και της ισχύος κορυφής, συναρτήσει των συνθηκών πόλωσης (ρεύμα άντλησης και ανάστροφη τάση). Πιο συγκεκριμένα επιβεβαιώθηκαν τόσο οι θεωρητικές προβλέψεις του 2^{ου} κεφαλαίου όσο και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που παρουσιάστηκαν στο 3^ο κεφάλαιο. Η αύξηση του ρεύματος ενίσχυσε φαινόμενα αυτοδιαμόρφωσης της φάσης και αύξησε σημαντικά τον παράγοντα διεύρυνσης της οπτικής γραμμής με αποτέλεσμα να ενισχυθούν τα μη γραμμικά φαινόμενα που διαταράσσουν τόσο το σχήμα όσο και το εύρος των παλμών. Επιπλέον η αύξηση της τάσης προκάλεσε μείωση του χρονικού εύρους αλλά και της εκπεμπόμενης ισχύος λόγω της μείωσης των χαρακτηριστικών χρόνων του απορροφητή και λόγω της αύξησης των μη κορεσμένων απωλειών αντίστοιχα.

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

Στη συνέχεια έγινε προσπάθεια πειραματικής επιβεβαίωσης των αποτελεσμάτων προσομοίωσης που σχετίζονταν με την ύπαρξη ταυτόχρονης εγκλειδωσης τόσο από το GS όσο και από το ES. Η πειραματική διερεύνηση απέδειξε αυτή τη δυνατότητα και επέτρεψε την χαρτογράφηση περιοχών που επιτρέπουν τη διπλή εγκλειδωση, καθώς και αποδείχτηκε ότι η αναλογία ισχύος μεταξύ των δύο φασματικών περιοχών διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην επίτευξη σταθερής πολυφασματικής εγκλειδωσης. Στη διαδικασία της διερεύνησης ερευνήθηκαν άλλα δύο φαινόμενα τα οποία δεν είχαν προβλεφθεί από το θεωρητικό μοντέλο. Το πρώτο φαινόμενο σχετίζεται με τον περιορισμό του χρονικού εύρους των παλμών οι οποίοι παράγονται από το ES όταν υπάρχει ταυτόχρονη συνεχή εκπομπή από το GS. Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με την αλλαγή του παράγοντα διεύρυνσης της οπτικής γραμμής (παράγοντας – α) της διάταξης, λόγω της αποδιέγερση φορέων από την φασματική περιοχή του GS. Το δεύτερο φαινόμενο σχετίζεται με την ύπαρξη ασταθειών της έντασης της οπτικής εξόδου, οι οποίες σχετίζονται με την ταλάντωση των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων μεταξύ των διαφορετικών σταθμών. Αυτό το φαινόμενο αποτελεί μείζον πρόβλημα μια και περιορίζει σημαντικά το εύρος της περιοχής, όπου μπορεί να επιτευχθεί διπλή εγκλειδωση.

Στη συνέχεια της διδακτορικής διατριβής ακολουθούν πειραματικά ευρήματα τα οποία δεν είχαν παρουσιαστεί κατά την διαδικασία της προσομοίωσης εξαιτίας του γεγονότος ότι οι μικροσκοπικοί μηχανισμοί, οι οποίοι ήταν υπεύθυνοι για αυτή τη συμπεριφορά δεν είχαν ενσωματωθεί στο μοντέλο. Πιο συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 6 αναλύεται το φαινόμενο ύπαρξης διπλής εκπομπής από το GS, το οποίο οφείλεται σε ισχυρή καταστολή της απολαβής λόγω μη γραμμικών φαινομένων όπως είναι η δημιουργία φασματικών οπών. Εκμεταλλευόμενοι αυτό το φαινόμενο ανεπτύχθησαν δύο εφαρμογές οι οποίες περιλαμβάνουν χρήση ταυτόχρονης εγκλειδωσης από τα δύο μήκη κύματος του GS και η πιθανή αξιοποίηση των παλμών για την παραγωγή πηγής στην περιοχή των THz μέσω μίξης των δύο σημάτων. Επιπλέον παρατηρήθηκε σημαντική μείωση του χρονικού εύρους των παλμών υπό την παρουσία διπλής εκπομπής από το GS. Το αίτιο του φαινομένου βρίσκεται στον περιορισμό των οπτικών τρόπων που βρίσκονται πάνω από το κατώφλι εξαναγκασμένης λειτουργίας με αποτέλεσμα την μείωση φαινομένων ανταγωνισμού αλλά και μείωση του θορύβου φάσης των παλμών. Η συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας μπορεί να εκμεταλλευτεί ώστε να επιτευχθεί ταυτόχρονη μείωση του εύρους του παλμού και αύξηση της μέσης ισχύος εκπομπής (μείωση του εύρους υπό το καθεστώς ισχυρής ηλεκτρικής άντλησης) με αποτέλεσμα την αύξηση της ισχύος κορυφής των παλμών.

Τα θεωρητικά αποτελέσματα των προηγούμενων κεφαλαίων, σε συνδυασμό με τον χαρακτηρισμό ενός μεγάλου συνόλου διατάξεων οι οποίες διέθεταν διαφορετικά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, όπως αριθμό κβαντικών στρωμάτων, μήκος, πλάτος κυματοδηγού και λόγο μήκους απορροφητή προς ενισχυτή κατέστη δυνατός ο εντοπισμός των βέλτιστων κατασκευαστικών παραμέτρων για την επίτευξη διαφορετικών συνθηκών λειτουργίας. Για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων πραγματοποιήθηκαν κυματοδηγικές προσομοιώσεις του υλικού που αποσαφήνισαν ότι βασικό ρόλο στην βελτίωση των επιδόσεων διαδραματίζει η αύξηση του χωρικού περιορισμού του οπτικού πεδίου.

Τέλος στα δύο τελευταία κεφάλαια αυτής της διδακτορικής διατριβής αναλύονται πιθανές αστάθειες λειτουργίας που προέρχονται είτε από την ύπαρξη οπτικής ανάδρασης είτε λόγω ανομοιομορφής έγχυσης ρεύματος στα διαφορετικά τμήματα του λέιζερ. Η παραπάνω ανάλυση αποκάλυψε ότι η κάθε φασματική περιοχή παρουσιάζει διαφορετικές ανοχές στην ύπαρξη οπτικής ανατροφοδότησης, επιβάλλοντας με αυτό τον τρόπο διαφορετικές απαιτήσεις απομόνωσης για το κάθε μήκος κύματος. Οι

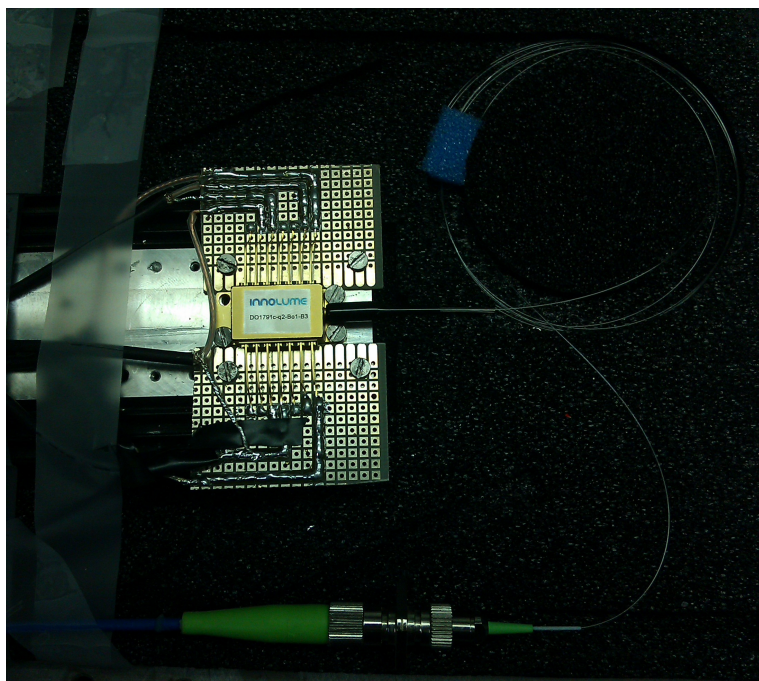
Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

αστάθειες που προέρχονται από την ανομοιόμορφη έγχυση σχετίζονται με τη δυναμική συμπεριφορά των φορέων σε υλικά κβαντικών τελειών και επιτρέπουν την παραγωγή οπτικής εξόδου, η οποία παρουσιάζει υψηλή πολυπλοκότητα. Αυτό το γεγονός επιτρέπει την χρήση των λέιζερ κβαντικών τελειών ως γεννήτριες χαοτικών φερουσών, οι οποίες είναι απαραίτητες για συστήματα επικοινωνιών που βασίζονται στην χαοτική κρυπτογραφία.

10.2 Μελλοντικές δραστηριότητες

10.2.1 Μελέτη ολοκληρωμένων διατάξεων και ενισχυτών

Η συστηματική μελέτη και πειραματική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής έδωσε τη δυνατότητα να εντοπιστούν οι βέλτιστες κατασκευαστικές παράμετροι τόσο για την επίτευξη πολύ φασματικής εκπομπής όσο και για την παραγωγή εξαιρετικά στενών οπτικών παλμών. Χρησιμοποιώντας τα πειραματικά αποτελέσματα επιλέχθηκαν διατάξεις, οι οποίες στάλθηκαν στον κατασκευαστή για να πακεταριστούν. Η διαδικασία του πακεταρίσματος (packaging) απλοποίησε εξαιρετικά τον απαιτούμενο εξοπλισμό για τη μέτρηση των διατάξεων καθώς και επέτρεψε την συλλογή εξαιρετικά μεγάλου ποσοστού της παραγόμενης οπτικής ισχύος μέσω της χρήσης ειδικής αδιαβατικής ίνας, η οποία τοποθετήθηκε απευθείας από τον κατασκευαστή. Επιπλέον εκτός από διατάξεις λέιζερ πακεταρίστηκε και ένας οπτικός ενισχυτής κατασκευασμένος επίσης από υλικό κβαντικών τελειών με σκοπό την ενίσχυση των παλμών αλλά και τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς του ενισχυτή όταν καλείται να ενισχύσει εξαιρετικά στενούς οπτικούς παλμούς. Στο σχήμα 10.1 παρουσιάζεται ένα πακεταρισμένο λέιζερ

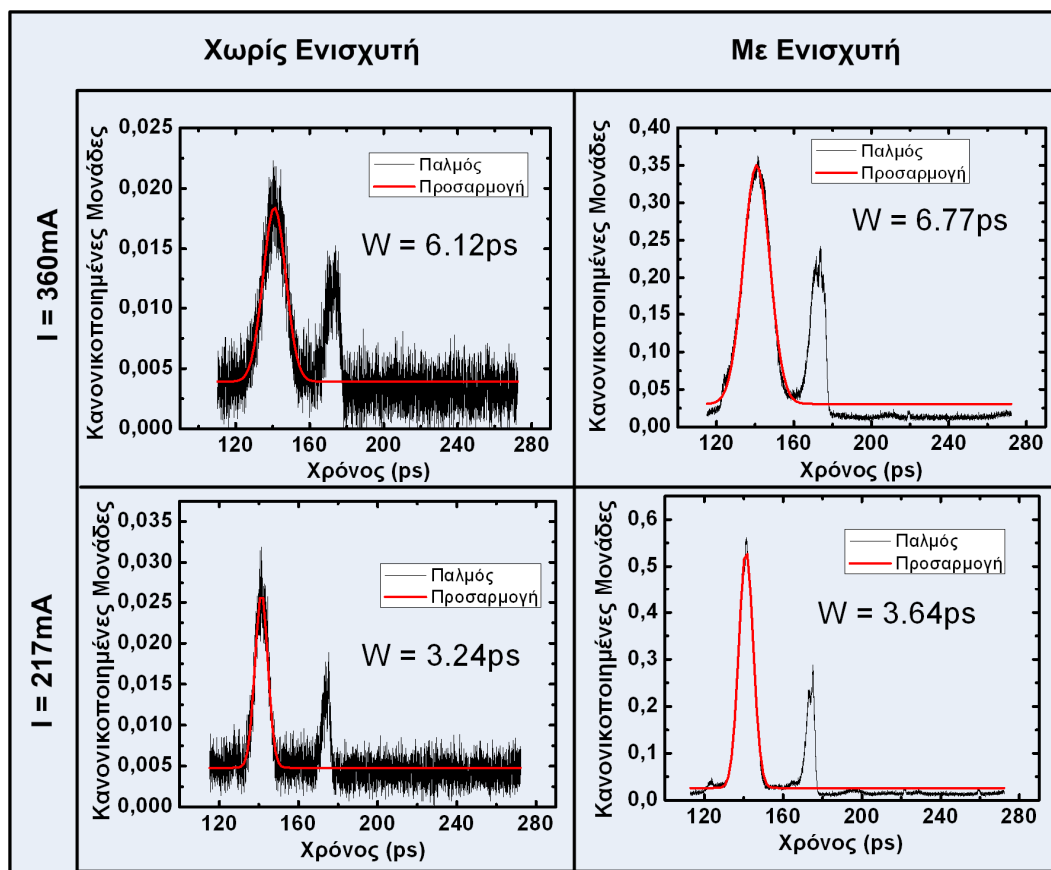


Εικόνα 0-1 Πακεταρισμένο λέιζερ κβαντικών τελειών με 5 στρώματα κβαντικών τελειών και μήκος 2mm

Οι νέες συσκευές μέσω της σταθερότητας που επιτρέπουν αλλά και μέσω της χρήσης του οπτικού ενισχυτή θα δώσουν την δυνατότητα μελέτης νέων περιοχών λειτουργίας όπως είναι η διπλή εγκλείδωση από το GS/ES, με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι προηγουμένως λόγω της σημαντικά αυξημένης οπτικής ισχύος. Επιπλέον ήδη έχει ξεκινήσει μια πειραματική προσπάθεια μελέτης των δυναμικών χαρακτηριστικών του οπτικού ενισχυτή και της επίδρασης του στους οπτικούς παλμούς. Στο σχήμα 10.2

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

παρουσιάζονται κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα ενίσχυσης παλμών μέσω του πακεταρισμένου οπτικού ενισχυτή μήκους 6mm και 10 στρωμάτων κβαντικών τελειών.



Σχήμα 0-1 Οπτικοί παλμοί με και χωρίς ενίσχυση για δύο διαφορετικές τιμές ρεύματος άντλησης.

10.2.2 Μελέτη της οπτικής ανάδρασης για την επίτευξη σταθερής πολύ φασματικής εγκλείδωσης

Στο κεφάλαιο 7 μελετήθηκε η επίδραση της οπτικής ανάδρασης για την περιοχή παλμικής λειτουργίας του GS και ανεξάρτητα για το ES. Οι περιοχές που τα δύο μήκη κύματος συνυπήρχαν αποφεύχθηκαν για την απομόνωση των ενδογενών ασταθειών του συστήματος από αστάθειες που σχετίζονται με την οπτική ανάδραση. Παρόλα αυτά η διαφορετική συμπεριφορά της κάθε φασματικής περιοχής στην οπτική ανατροφοδότηση γεννά ελπίδες ότι η ταυτόχρονη χρήση οπτικής ανατροφοδότησης και στα δύο μήκη κύματος μπορεί να σταθεροποιήσει τη λειτουργία και να μειώσει φαινόμενα όπως η υπερδιαμόρφωση του πλάτους των παλμών, τα οποία είναι εξαιρετικά ισχυρά όταν υπάρχει ταυτόχρονη εκπομπή και από τα δύο μήκη κύματος.

Οι πακεταρισμένες διατάξεις μέσω του σταθερού συντελεστή σύζευξης που προσφέρουν θα επιτρέψουν τον ενδεδειγμένο έλεγχο αυτών των περιοχών και τη διαλεύκανση της παραπάνω υπόθεσης.

10.2.3 Ταυτόχρονη ενίσχυση παλμών και από τα δύο μήκη κύματος

Μια σημαντική παράμετρος η οποία θα διερευνηθεί στο άμεσο μέλλον είναι η ταυτόχρονη ενίσχυση παλμών και από τα δύο μήκη κύματος με χρήση ενός μόνο οπτικού ενισχυτή ο οποίος θα παρέχει απολαβή και στις δύο φασματικές περιοχές. Η παραπάνω τεχνική θα επιτρέψει την απλοποίηση της τεχνικής ενίσχυσης των παλμών και θα επιτρέψει την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης τέτοιων διατάξεων. Επιπλέον η συγκεκριμένη πειραματική μέτρηση θα αποτελέσει εξαιρετικά ενδιαφέρον

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

πεδίο μια και η δυναμική συμπεριφορά του ενισχυτή αναμένεται να είναι αρκετά διαφορετική υπό την παρουσία δύο ανεξάρτητων παλμο-σειρών.

10.2.4 Μελέτη πηγών ενός φωτονίου βασισμένες σε διατάξεις που περιέχουν μόνο μια κβαντική τελεία

Τα τελευταία χρόνια έχει δοθεί μεγάλο βάρος σε οπτικές πηγές. Οι οποίες μπορούν να παράγουν ένα μόνο φωτόνιο ή πιο συγκεκριμένα ένα ζεύγος συζευγμένων φωτονίων (entangled photons) [1]-[5]. Τα συζευγμένα φωτόνια είναι μια ειδική περίπτωση οπτικών φορέων που έχουν συγκεκριμένη πολωτική κατάσταση την οποία και διατηρούν ανεξάρτητα από τις συνθήκες διάδοσης. Κάνοντας χρήση αυτών των οπτικών φορέων μπορούν να κατασκευαστούν κβαντικοί υπολογιστές [6], συστήματα επικοινωνιών υψηλής ασφάλειας, τα οποία βασίζονται σε διαμοιρασμό κβαντικού κλειδιού [7]-[9], είτε να εφαρμοστούν σε εφαρμογές κβαντικής τηλεμεταφοράς [10]-[11].

Μεμονωμένες κβαντικές τελείες όταν ενσωματώνονται σε μικρο κοιλότητες (micro pillars – photonic crystals) έχουν τη δυνατότητα μέσω εξιτονικών και διεξιτονικών αποδιεγέρσεων να παράγουν συζευγμένα ζεύγη φωτονίων με απόδοση που αγγίζει το 79%. Έχοντας αποκτήσει αρκετή εμπειρία με τα υλικά κβαντικών τελειών τόσο σε θεωρητικό όσο και σε πειραματικό επίπεδο, ένα από τα μεσοπρόθεσμα σχέδια είναι η ενασχόληση με αυτό το πεδίο εφαρμογής και η εξεύρεση λύσεων τόσο σε σχεδιαστικό επίπεδο (νέες δομές και κοιλότητες) όσο και σε πειραματικό επίπεδο (μέτρηση και χαρακτηρισμός πηγών).

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

- [1] T. Jennewein, C. Simon, G. Weihs, H. Weinfurter, and A. Zeilinger, *Phys. Rev. Lett.* 84, 4729–4732 (2000)
- [2] G. Brassard, N. Lütkenhaus, T. Mor, and B. C. Sanders *Phys. Rev. Lett.* 85, 1330–1333 (2000)
- [3] Hoi-Kwan Lau and Hoi-Kwong Lo *Phys. Rev. A* 83, 012322 (2011)
- [4] Y. Eto, Y. Zhang, and T. Hirano *Optics Express*, Vol. 19, Issue 2, pp. 1360-1366 (2011)
- [5] E. Saglamyurek, N. Sinclair, J. Jin, J. A. Slater, D. Oblak, F. Bussi eres, M. George, R. Ricken, W. Sohler and W. Tittel, *Nature* 469, pp. 512 (2011)
- [6] P. Walther, K. J. Resch, T. Rudolph, E. Schenck, H. Weinfurter, V. Vedral, M. Aspelmeyer A. Zeilinger, *Nature* Vol. 434 pp. 167 (2005)
- [7] A. Einstein, *Annalen der Physik* 17: 132–148 (1905).
- [8] http://nobelprize.org/nobel_prizes/chemistry/laureates/1999/index.htm
- [9] http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/index.htm
- [10] T. F. Carruthers and I. N. Duling III, *Optics Letters*, Vol. 21, Issue 23, pp. 1927-1929 (1996)
- [11] T. Morioka, K. Mori, M. Saruwatari, *IEEE Electron. Lett.* Vol.29, No. 10, pp.862 (1993)
- [12] E. Yoshida, M. Nakazawa, *IEEE Electron. Lett.* Vol.32, No. 15, pp.1370 (1996)
- [13] H. Kurita, I. Ogura, H. Yokoyama, *IEICE on Electronics* Vol. E81-C, No.2 pp.129 (1998)
- [14] Y. Ueno, S. Nakamura, and K. Tajima *JOSA B*, Vol. 19, Issue 11, pp. 2573-2589 (2002)
- [15] T. Marioka, *J. Optical and Fiber Communication Rep.* Vol.4, pp.14 (2007)
- [16] H. Chaouch, E. Parsons, A. Tervonen, M. Mattila, W. Weiershausen, T. von Lerber, S. Honkanen, J.-Y. Yang, A.E. Willner and F. K uppers, *Optics Communication*, Vol. 284, No. 10, pp.2576, (2011)
- [17] A.M. Kaplan, G.P. Agrawal, D.N. Maywar, *IEEE Photon. Technol. Lett.* Vol.23, No. 17, pp. 405 (2011)
- [18] J.A. Valdamis and G. Mourou, *IEEE J. Quantum. Electron.* Vol. 22, pp. 69, (1986)
- [19] P.W. Juodawilkis, J.C. Twichell, G.E. Betts, J.J. Hargreaves, R.D. Younger, J.L. Wesserman, F.J. O’Donnel, K.G. Ray, R.C. Williamson, *IEEE trans. Microwave Theory, Tech.* Vol. 49, pp. 1840, (2001)
- [20] P.J. Delfyett, C. DePriest, T.Yilmaz, *IEEE circuits and devices*, Vol. 18, pp. 28 (2002)
- [21] R. Ludwig, A. Ehrhardt, W. Pieper, E. Jahn, N. Agrawal, H.J. Ehrke, L. Kuller, H.G. Weber. *IEEE IEEE Electron Lett.* Vol. 32, No.4 pp.327 (1996)
- [22] K. Smith, J.K. Lucek, *IEEE Electron. Lett.* Vol. 28, No. 19, pp.1814 (1992)
- [23] M.C. Silva, A. Lagrost, L. Bramerie, M. Gay, P. Besnard, M. Joindot, J.C. Simon, A. Shen, G.H. Duan. *IEEE J. Lightwave Technol.* Vol.29, No.4, pp.609 (2011)
- [24] X. Tang, S.H. Chung, J. C. Cartledge, A. Shen, A. Akrou, and G.H. Duan, *Optics Express*, Vol. 18, Issue 9, pp. 9378-9383 (2010)
- [25] X. Tang, S.H. Chung, A.S. Karar, J.C. Cartledge, A. Shen, G.H. Duan, *IEEE J. Lightwave Technol.* Vol.29, No.1, pp.31 (2011)
- [26] S. Nolte, M.E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha, New York:Marcel Dekker Inc. pp.359 (2003)
- [27] M. Niemz, “*Laser Tissue Interaction: Fundamentals and Applications*” Berlin: Springer Verlag (1996)
- [28] J.G. Fujimoto, M. Brezinski, W. Drexler, I. Hartl, F. Kartner, X. Li, U. Morgner, “*Optical Coherence tomography*”, *Ultra fast lasers – Technology and applications* New York:Marcel Dekker Inc. pp.712 (2003)
- [29] R. Ell, U. Morgner, F. X. Cartner, J.G. Fujimoto, E.P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, T. Schudi, M.J. Lederer, A. Boiko, B.L. Davies, *Opt. Lett.* Vol. 26, pp.373 (2001)
- [30] E. Innerhofer, T. Sudmeyer, F. Brunner, R. Haring, A. Aschwanden, R. Paschotta, C. Honninger, M. Kumkar, U. Keller, *Opt. Lett.* Vol. 28, pp.367 (2003)

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

- [31] M. Suzuki, H. Tanaka, N. Edagawa, K. Utaka, Y. Matsushima, IEEE J. Lightwave Technol. Vol. 11, No. 3, pp.468 (1993)
- [32] Y. Liu, J.G. Zhang, G. Chen, W. Zhao and J. Bai, Journal of Optics Vol. 12 No. 9 (2010)
- [33] S. G. Li, Q. Gong, Y. F. Lao, H. D. Yang, S. Gao, P. Chen, Y. G. Zhang, S. L. Feng, and H. L. Wang, Appl. Phys. Lett. 95, 251111 (2009).
- [34] K. Kim, S. Lee, P.J. Delfyett, Opt. Express Vol. 13 pp.4600, (2005)
- [35] N.G. Basov, O.N. Krokhin, Y.M. Popov Soviet Physics JETP, Vol. 12, pp. 1033 (1961)
- [36] Z.I. Alferov, Reviews of Modern Physics, Vol. 73, pp. 767 (2001)
- [37] V. M. Ustinov, A.E. Zhukov, A.Y. Egorov and N.A. Maleev, Quantum Dot Lasers. New York: Oxford University Press (2003)
- [38] L. Goldstein, F. Glas, J.Y. Marzin, M.N. Charasse, G.L. Roux, Appl. Phys. Lett. Vol. 47, pp.1099 (1985)
- [39] J. Tersoff, C. Teichert and M. G. Lagally, Phys. Rev. Lett. 76, 1675–1678 (1996)
- [40] I. Mukhametzhonov, Z. Wei, R. Heitz, and A. Madhukar, Appl. Phys. Lett. 75, 85 (1999)
- [41] J. Tatebayashi, M. Nishioka, T. Someya, and Y. Arakawa Appl. Phys. Lett. 77, 3382 (2000)
- [42] K. Akahane, N. Ohtani, Y. Okada and M. Kawabe, Journal of Crystal Growth Vol. 245, No.1 , pp. 31 (2002)
- [43] J. Bloch, J. Shah, L. N. Pfeiffer, K. W. West, and S. N. G. Chu, Appl. Phys. Lett. 77, 2545 (2000)
- [44] L.F.Lester, A.Stintz, H.Li, T.C.Newell, E.A.Pease, B.A.Fuchs, and K.J.Malloy, IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 11, No. 8, pp.931 (1999)
- [45] K. Mukai, Y. Nakata, K. Otsubo, M. Sugawara, N. Yokoyama, and H. Shikawa, IEEE J. Quantum Electron. Vol.36, No. 4, pp.472, (2000)
- [46] J. Tersoff, C. Teichert and M. G. Lagally, Phys. Rev. Lett. Vol. 76, No.10, pp.1675 (1996)
- [47] H. Ishikawa, H. Shoji, Y. Nakata, K. Mukai, M. Sugawara, M. Egawa, N. Otsuka, Y. Sugiyama, T. Futatsugi, and N. Yokoyama, J.Vac.Sci.Technol.A16 2 (1998)
- [48] G.S. Solomon, J.A. Trezza, A.F. Marshall, and J.S. Harris, Phys. Rev. Lett. Vol. 76, No. 6, pp. 952 (1996)
- [49] J. Liu, Z. Lu, S. Raymond, P.J. Poole, P.J. Barios, G. Pakulski, D. Poitras, G. Xiao, Z. Zhang, IEEE Electron Lett. Vol. 43, pp.458, (2007)
- [50] Z. Alferov, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. Vol. 6, No.6 pp. 832 (2000)
- [51] C. Mesaritis, A. Argiris, C. Simos, H. Simos, A. Kapsalis, I. Krestnikov, D. Syvridis, Appl. Phys. Lett. 98, 051104 (2011)
- [52] G.A Keeler, B.E. Nelson, D. Agrawal, C. Debaes, N.C. Helman, A. Bhatnagar, D.A.B. Miller, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. Vol. 9, pp.477, (2003)
- [53] F. Camacho, E.A. Avrutin, P. Cusumano, A.S. Helmy, A.C. Bryce and J.H. Marsh, IEEE Photon. Technol. Lett. Vol.9, pp. 1208 (1997)
- [54] A F Fercher, W Drexler, C.K. Hitzenberger and T. Lasser, Reports on Progress in Physics Vol. 66 No. 2 pp.239 (2003)
- [55] A. Kovsh, I. Krestnikov, D. Livshits, S. Mikhrin, J. Weimert, A. Zhukov, Opt. Lett. Vol. 32, pp. 793 (2007)
- [56] X. Wang, Y. Pang, G. Ku, X. Xie, G. Stoica and L.V. Wang, Nature Biotechnology Vol. 21 pp.803 (2003)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

- [1] P. Vasil'ev, "Ultra fast diode Lasers: Fundamentals and Applications" Boston: Artech House (1995)

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

- [2] A. Shen, F. Dijk, J. Renaudier, G.H. Duan, F. Lelarge, F. Pommereau, F. Poingt, L. Gouezigou, O. Le Gouezigou, Semiconductor Laser Conference, 2006. Conference Digest. 2006 IEEE 20th International pp.153 (2006)
- [3] C. Xing, E.A Avrutin, Appl. Phys. Lett. Vol. 97, No. 10 pp.104301 (2005)
- [4] M.T. Choi, J.M. Kim, L.Wangkuen, P.J. Delfyett, Appl. Phys. Lett. Vol.88 No. 13 pp.131106 (2006)
- [5] K. Sato, I. Kotaka, Y. Kondo, M. Yamamoto, Appl. Phys. Lett. Vol. 69, No. 18 pp.2626 (1996)
- [6] M. V. Gorbunkov, A. V. Konyashkin, P. V. Kostyukov, V. B. Morozov, A. N. Olenin, V. A. Rusov, L. S. Telegin, V. G. Tunkin, Y. V. Shabalin and D. V. Yakovlev, Quantum Electron. Vol. 35, No. 1 (2005)
- [7] M.G. Thompson, C. Marinelli, K.T. Tan, K.A. Williams, R.V. Penty, I.H. White, I.N. Kaiander, R.L. Sellin, D. Bimberg, D.J. Kang, M.G. Blamire, F. Visinka, S. Jochum, S. Hansmann, IEEE Electron. Lett. Vol.39, No. 15 pp.1121 (2003)
- [8] A.G. Weber, M. Schell, G. Fischbeck, D. Bimberg, IEEE J. Quant. Electron. Vol. 28, No. 10, pp. 2220 (1992)
- [9] G. Fiol, D. Arsenijević, D. Bimberg, A. G. Vladimirov, M. Wolfrum, E. A. Viktorov, and Paul Mandel, Appl. Phys. Lett. Vol. 96, 011104 (2010)
- [10] E.U. Rafailov; S.J. White; A.A. Lagatsky; A. Miller; W. Sibbett; D.A. Livshits; A.E. Zhukov; V.M. Ustinov, IEEE Phton. Technol. Lett. Vol. 16, No. 11 pp.2439 (2004)
- [11] Z. Zhang, K. Torizuka, T. Itatani, K. Kobayashi, T. Sugaya, and T. Nakagawa, Optics Letters, Vol. 22, Issue 13, pp. 1006-1008 (1997)
- [12] R. Ludwig, A. Ehrhardt, IEEE Electron. Lett. Vol. 31, No. 14, pp.1165 (1995)
- [13] P.J. Delfyett, H. Shi, S. Gee, C.P.J. Barty, G. Alphonse, J. Connolly, IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. Vol. 4, pp. 216 (1998)
- [14] S. Gee, A. Alphonse, J.C. Connolly, C. Barty, P.J. Delfyett, IEEE J. Quantum Electron. Vol. 36, pp.1035 (2000)
- [15] P.J. Delfyett, M. E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Sucha, Ultrafast Lasers – Technology and Applications New-York: Marcel Dekker pp.219-321 (2003)
- [16] G. Duan, P. Gallion, and G. Debarge, Optics Letters, Vol. 12, Issue 10, pp. 800-802 (1987)
- [17] T. L. Koch and R. A. Linke, Appl. Phys. Lett. 48, 613 (1986)
- [18] T. J. Karte, Y. I. Chai, C. N. Morgan, I. H. White, T.F. Krauss, J. Lightwave Technol. Vol. 22, pp.514 (2004)
- [19] M.J. Strain, M. Sorel, IEEE J. Quantum. Electron. Vol. 46, No.5, pp.774 (2010)
- [20] Kyoung Chan Kim, Il Ki Han, Jung Il Lee and Tae Geun Kim, Nanotechnology 21 134010 (2010)
- [21] P.J. Delfyett, et al, "Recent advances in stabilized ultrafast modelocked semiconductor diode lasers for high speed information based applications" The 19th Annual Meeting of the IEEE Lasers and Electro-optic Society, Technical Digest, 791, Montreal Canada, 2006.
- [22] K. Mukai, et al, "Phonon bottleneck in self-formed InxGa1-xAs/GaAs quantum dots by electroluminescence" Phys. Rev. B. Vol. 54, pp.5243 (1996)
- [23] P. Borri, et al, "Ultrafast carrier dynamics in InGaAs quantum dot materials and devices", J. Opt. A. Vol.8, pp. 33, (2006)
- [24] E. U. Ravailov et al, "Fast quantum dot saturable absorber for passive mode-locking of solid-state lasers", IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 16, pp.2439 (2004)
- [25] P. Borri, et al, "Spectral Hole Burning and carrier heating dynamics in InGaAs quantum dot amplifiers", IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. Vol. 6, pp. 544, (2000)
- [26] D.B. Mallins et al, "Ultrafast electroabsorption dynamics in InAs quantum dot saturable absorber at 1.3μm", Appl. Phys. Lett. Vol.89, pp.17111 (2006)
- [27] M.G. Thompson et al, "Properties of InGaAs quantum dot saturable absorbers in monolithic mode-locked lasers" IEEE 19th International Semiconductor Laser Conference, pp.52, Matsue Shi, Japan (2004)

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

- [28] M.G. Thompson et al, "Subpicosecond high-power mode locking using flared waveguide monolithic quantum dot laser", Appl. Phys. Lett. Vol.88, pp. 133119, (2006)
- [29] V.M Ustinov, et al, "Quantum Dot Lasers", New York: Oxford University Press, 2003
- [30] S.S. Mikhlin et al, "High power temperature-insensitive 1.3 μ m InAs/InGaAs/GaAs quantum dot lasers", Semiconductor Sci. Tech. Vol. 20, pp. 340 (2005)
- [31] E.U. Rafailov, et al, "Stable Modelocked Operation from a Quantum-Dot Laser in a Broad Temperature Range" Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Baltimore, Maryland (2005)
- [32] S.A. Moore, et al, "Reduced surface sidewall recombination and diffusion in quantum dot lasers", IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 18, pp.1861, (2006)
- [33] D. Ouyang, et al, "High performance narrow stripe quantum-dot lasers with etch waveguide" Semiconductor Sci. Tech. Vol. 18, pp.53 (2003)
- [34] D. Ouyang, et al, "Impact of the mesa etching profiles on the spectral hole burning effects in quantum dot lasers" Semiconductor Sci. Tech. Vol. 19, pp.43 (2004)
- [35] M. Kuntz, et al, "Direct modulation and mode locking of 1.3 μ m quantum dot lasers", New J. Phys. Vol. 6 pp. 181 (2004)
- [36] C. Ribbat, et al, "Complete suppression of filamentation and superior beam quality in quantum dot lasers", Appl. Phys. Lett. Vol. 82, pp. 952, (2003)
- [37] E. Gehrig, et al, "Dynamic Filamentation and beam quality of quantum-dot lasers", Appl. Phys. Lett. Vol.84, pp. 1650 (2004)
- [38] M. Grundmann, et al, "Progress in quantum dot lasers:1100nm 1300nm, and high power applications" Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 39, pp.2341 (2000)
- [39] T.W. Berg, et al, "Quantum dot amplifiers with high output power and low noise" Appl. Phys. Lett. Vol. 82, pp.3083 (2003)
- [40] L. Zhang, et al, "Low timing jitter, 5GHz optical pulses from a monolithic two-section passively mode locked 1250/1310nm quantum dot lasers for high speed optical interconnects" Optical Fiber Communication Conference, Technical Digest OWM4, Anaheim USA (2005)
- [41] T.C. Newell et al, "Gain and Linewidth enhancement factor in InAs quantum-dot laser diodes" IEEE Photon. Technol. Lett. Vol. 11, pp. 1527 (1999)
- [42] A.A. Ukhanov et al, "Comparison of the carrier induced refractive index, gain and linewidth enhancement factor in quantum dot and quantum well lasers", Appl. Phys. Lett. Vol. 84, pp.1058 (2004)
- [43] B. Dagens, et al, "Giant linewidth enhancement factor and purely frequency modulated emission from quantum dot lasers" IEEE Electron. Lett. Vol. 41, pp.323 (2005)
- [44] X.D. Huang, et al, "Passive mode-locking in 1.3 μ m two section InAs quantum dot lasers", Appl. Phys. Lett. Vol.78, pp.2825 (2001)
- [45] M.G. Thompson, et al, "10 GHz hybrid mode locking of monolithic InGaAs quantum dot lasers", IEEE Electron. Lett. Vol.39, pp. 2341 (2003)
- [46] E.U. Rafailov, et al, "High power ultra short pulses output from a mode-locked two section quantum dot laser" Conference on Lasers and Electro-optics/International Quantum electronics conference, Technical digest CPDB5, post-deadline, pp. 1031, San Fransisco (2004)
- [47] E.U. Rafailov, et al, "High power picosecond and femtosecond pulse generation from a two section mode-locked quantum-dot laser" Appl. Phys. Lett. Vol. 87, pp.81107 (2005)
- [48] M. Laemmlin et al, "Distortion free optical amplification of 20-80GHz modelocked laser pulses at 1.3 μ m using quantum dots" IEEE Electron. Lett. Vol. 42, pp. 697 (2006)
- [49] F. Lelarge, et al, "Recent advances on InAs/InP quantum dash based, semiconductor lasers and optical amplifiers operating at 1.55 μ m", IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron. Vol. 13, pp.111 (2007)
- [50] Z.G. Lu et al, "Ultra-high repetition rate InAs/InP quantum dot mode-locked lasers", Optics Communications Vol.284, No.9 (2010)
- [51] J. Renaudier, "45GHz self-pulsation with narrow linewidth in quantum dot Fabry-Perot semiconductor lasers at 1.5 μ m" IEEE Electron. Lett. Vol.41 pp.1007 (2005)

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

[52] C. Gosset, et al, "Subpicosecond pulse generation at 134GHz using a quantum-dash-based Fabry-Perot laser emitting at 1.56 μm " Appl. Phys. Lett. Vol.88, pp.241105 (2006)

[53] A. Akrouf, et al, "Low phase noise all-optical oscillator using quantum dash modelocked lasers" IEEE Electron. Lett. Vol. 46, No.1 pp.73 (2010)

[54] J. Liu, et al, "Dual wavelength 92.5GHz self mode-locked InP-based quantum laser" Opt. Lett. Vol.33, No.15, pp.1302 (2008)

[55] J.A Lott, et al, "InAs-InGaAs quantum dot VCSEL on GaAs substrate emitting at 1,3 μm " IEEE electron. Lett. Vol.36, No. 16, pp. 1364 (2000)

[56] Y. Barbarin "Scaling high-power ultra fast VCSELs into the femtosecond regime" Photonics West 2011

[57] W.T. Wittwer et al, "Timing jitter characterization of a SESAM quantum dot mode locked VCSEL" Photonics West 2011

[58] D. J. H. C. Maas, et al, "Vertical integration of ultrafast semiconductor lasers," Appl. Phys. B 88, 493-497 (2007).

[59] V. J. Wittwer, et al, "Modelocked Integrated External-Cavity Surface Emitting Laser (MIXSEL) generates 660 mW average power in 23-ps pulses at 3 GHz repetition rate," ASSP Conference 2010 (2010).

[60] A.-R. Bellancourt, et al, "Modelocked Integrated External-Cavity Surface Emitting Laser (MIXSEL)," IET Optoelectronics Vol. 3, pp. 61-72 (2009).

[61] M.T. Choi, et al, "Ultralow noise optical pulse generation in an actively mode-locked quantum dot laser", Appl. Phys. Lett. Vol.88, pp.131106 (2006)

[62] A.R. Rae et al, "Absorber length optimization for sub-picosecond pulse generation in passively mode-locked 1.3 μm quantum dot laser" Semiconductor Lasers and Laser Dynamics II, Proc. SPIE, 61841F, pp.1841 (2006)

[63] M.G. Thompson, et al, "Monolithic hybrid and passive mode-locked 40GHz quantum dot laser diodes", 32nd European Conference on Optical Communication, Technical Digest, We4.6.3, Nise France (2006)

[64] H. Schmeckebier, et al, "Complete pulse characterization of quantum dot mode-locked lasers suitable for optical communication up to 160 Gbit/s" Optics Express, Vol.18, No.4, pp.3415 (2010)

[65] A.P. Rae, et al, "Harmonic mode locking of a quantum dot laser diode", The 19th Annual meeting of the IEEE Lasers and Electro-optic society, Technical Digest ThR5, pp.874, Montreal Canada (2006)

[66] C. G. Leburn, N. K. Metzger, A. A. Lagatsky, C. T. Brown, W. Sibbett, M. Lumb, E. Clarke, and R. Murray, in Advanced Solid-State Photonics, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, Washington, D.C., 2009).

[67] A. Markus, J. X. Chen, C. Paranthoën, A. Fiore, C. Platz, and O. Gauthier-Lafaye "Simultaneous two-state lasing in quantum-dot lasers", Appl. Phys. Lett. 82, 1818 (2003)

[68] C. Mesaritis, et al, "Pulse Width Narrowing due to dual ground state emission from a quantum dot passively mode locked laser", Appl. Phys. Lett. 96, 211110 (2010)

[69] M.A. Cataluna, et al, "Dual-wavelength mode-locked quantum-dot laser, via ground and excited state transitions: experimental and theoretical investigation" Optics Express, Vol. 18, No. 12, pp.12832 (2010)

[70] M. A. Cataluna, et al "New mode-locking regime in a quantum-dot laser: enhancement by simultaneous cw excited-state emission" CLEO 2006, Paper CThH3, Long Beach, USA (2006).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

[1] H. Haug Phys. Rev. 184, 338–348 (1969)

[2] M. Ahmed, M. Yamada, M. Saito, IEEE J. Quant. Electron. Vol. 37, pp. 1600 (2001)

[3] J. Tersoff, C. Teichert and M. G. Lagally, Phys. Rev. Lett. Vol. 76, pp. 1675–1678 (1996)

[4] M. Sugawara, N. Hatori, H. Ebe, M. Ishida, Y. Arakawa, T. Akiyama, K. Otsubo, Y. Nakata, J. Appl. Phys. Vol. 97, 043523 pp.1-8, (2005)

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

- [5] M. Sugawara, T. Akiyama, N. Hatori, Y. Nakata, H. Ebe, H. Ishikawa, Meas. Sci. Technol. Vol. 13, pp. 1683 (2002)
- [6] A. Bilenca, G. Eisenstein, IEEE J. Quant. Electron. Vol. 40, pp.690 (2004)
- [7] K. Veselinov, F. Grillot, M. Gioaninni, I. Montrosset, E. Homeyer, R. Piron, J. Even, A. Bakiarski, S. Loualiche, Optical and Quantum Electronics, Vol. 40 pp. 227 (2008)
- [8] T.W. Berg, S. Bischoff, I. Magnusdottir and J. Mork, IEEE Photon. Technol. Lett. Vol.13 pp.541 (2001)
- [9] M. Sugawara, K. Mukai, Y. Nakata, H. Ishikawa, Phys. Rev. B Vol. 61, pp. 7595 (2000)
- [10] M.A Cataluna, D. Nikitichev, S. Mikroulis, H. Simos, C. Simos, C. Mesaritakis, D. Syvridis, I. Krestnikov, D. Livshits, E.U. Rafailov, Optics Express, Vol. 18 Issue 12, pp.12832-12838 (2010)
- [11] A.G. Vladimirov, D. Turaev, and G. Kozyreff, Optics Letters, Vol. 29, Issue 11, pp. 1221-1223 (2004)
- [12] U. Bandelow, M. Radziunas, A. Vladimirov, B. Hüttl and R. Kaiser, Optics and Quantum Electronics, Vol. 38, No.4-6, pp. 495-512 (2006)
- [13] H. Su, L.F. Lester, Appl. Phys. Vol.38 pp.2112 (2005)
- [14] K. Takada, Y. Tanaka, T. Matsumoto, M. Ekawa, H.Z. Song, Y. Nakata, M. Yamaguchi, K. Nishi, T. Yamamoto, M. Sugawara, Y. Arakawa, IEEE Electron. Lett. Vol.47, No. 3, pp. 206, (2011)
- [15] C. Henry, IEEE J. Quant. Electron. Vol. 18, No. 2, pp. 259 (1982)
- [16] M. Grundmann, IEEE Electron. Lett. Vol.36, No. 22, pp. 1851 (2000)
- [17] D. B. Malins, A. Gomez-Iglesias, S. J. White, W. Sibbett, A. Miller, and E. U. Rafailov, Appl. Phys. Lett. Vol. 89, No. 17, September 2006
- [18] M.G. Thompson, A.R. Rae, M. Xia, R.V. Penty, I.H. White, IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron. Vol. 15, No. 3 (2009)
- [19] K. Sala et al. IEEE J. Quantum Electron. 16 (9), 990 (1980)
- [20] S. G. Li, Q. Gong, Y. F. Lao, H. D. Yang, S. Gao, P. Chen, Y. G. Zhang, S. L. Feng, and H. L. Wang, Appl. Phys. Lett. 95, 251111 (2009).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

- [1] B. M. van Oerle and G. J. Ernst, Appl. Opt. 35 (25), 5177 (1996)
- [2] K. Sala et al. IEEE J. Quantum Electron. 16 (9), 990 (1980)
- [3] M. A. Arbore, A. Galvanauskas and D. Harter, M. H. Chou and M. M. Fejer, Vol. 22, No. 17 / OPTICS LETTERS (1997)
- [4] K. Sala, G. Kenney-Wallace, G. Hall, IEEE J. Quant. Electron. Vol. 16, No. 19, pp. 990 (1980)
- [5] C. Henry, IEEE J. Quant. Electron. Vol. 18, No. 2, pp. 259 (1982)
- [6] M. Grundmann, IEEE Electron. Lett. Vol.36, No. 22, pp. 1851 (2000)
- [7] F. Kefelian, S. O'Donoghue, M.T. Todaro, J.G. McInerney, G. Huyet, IEEE Photon. Technol. Lett. Vol.20 No. 16, pp.1405 (2008)
- [8] L. A. Jiang, M. E. Grein, E.P. Ippen, C. McNeilage, J. Searls, and H. Yokoyama, Optics Letters, Vol. 27, Issue 1, pp. 49-51 (2002)
- [9] C.-Y. Lin, F. Grillot, N. A. Naderi, Y. Li, and L. F. Lester, Appl. Phys. Lett. 96, 051118 (2010)
- [10] P. Bhattacharya, D. Klotzkin, O. Qasaimeh, W. Zhou, S. Krishna, D. Zhu, IEEE Select. Topics Quant. Electron. Vol. 6 No. 3 pp.426 (2000)
- [11] S. Weisser, I. Esquivias, P.J. Tasker, J.D. Ralston, J. Rosenzweig, IEEE Phot. Technol. Lett. Vol.6 No. 7 pp. 782 (1994)
- [12] C.M. Miller, IEEE LTS, Vol. 2, No. 2 pp. 44 (2002)
- [13] C. Masoller, IEEE J. Quant, Electron. Vol. 33, No. 5, pp.767 (1997)
- [14] Y.F. Chen, J.L. Lee, H.D. Hsieh, S.W. Tsai, IEEE J. Quant. Electron. Vol. 38, No.3, pp.312 (2002)

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

- [15] P. Myslinski, J. Chrostowski, J. A. K. Koningstein, and J. R. Simpson, *Applied Optics*, Vol. 32, Issue 3, pp. 286-290 (1993)
- [16] L. A. Zenteno, H. Po, and N. M. Cho, *Optics Letters*, Vol. 15, Issue 2, pp. 115-117 (1990)
- [17] A.G. Vladimirov, U. Bandelow, G. Fiol, D. Arsenijević, M. Kleinert, D. Bimberg, A. Pimenov, and D. Rachinskii, *JOSA B*, Vol. 27, Issue 10, pp. 2102-2109 (2010)
- [18] S. Raymond, S. Fafard, P. J. Poole, A. Wojs, P. Hawrylak, and S. Charbonneau, D. Leonard, R. Leon, P. M. Petroff, and J. L. Merz *Phys. Rev. B* 54, 11548–11554 (1996)
- [19] M. Sugawara, K. Mukai, Y. Nakata, and H. Ishikawa, *Phys. Rev. B* 61, 7595–7603 (2000)
- [20] T. Ko, D. Adler, J. Fujimoto, D. Mamedov, V. Prokhorov, V. Shidlovski, and S. Yakubovich, *Optics Express*, Vol. 12, Issue 10, pp. 2112-2119 (2004)
- [21] Y. Wang, Y. Zhao, J.S. Nelson, Z. Chen, and R.S. Windeler, *Optics Letters*, Vol. 28, Issue 3, pp. 182-184 (2003)
- [22] B. Bouma, G. J. Tearney, S. A. Boppart, M. R. Hee, M. E. Brezinski, and J. G. Fujimoto, *Optics Letters*, Vol. 20, Issue 13, pp. 1486-1488 (1995)
- [23] S. Kray, F. Spöler, T. Hellerer, and H. Kurz, *Optics Express*, Vol. 18, Issue 10, pp. 9976-9990 (2010)
- [24] D. B. Malins, A. Gomez-Iglesias, S. J. White, W. Sibbett, A. Miller, and E. U. Rafailov “Ultrafast electroabsorption dynamics in an InAs quantum dot saturable absorber” *Appl. Phys. Lett.* Vol. 89, No. 17, September 2006
- [25] M.G. Thompson, Y. Marinelli, C. Chu, Y. Sellin, R.L. Penty, R.V.; White, L.H. Van Der Poel, M. Birkedal, D. Hvam, J. Ustinov, V.M. Lammlin, M. Bimberg, *Semiconductor Laser Conference, 2004. Conference Digest. 2004 IEEE 19th International* pp.53-54, September 2004
- [26] I.H. White, R.V Penty, R.E. Epworth, *IEEE Electron. Lett.* Vol. 24, No. 6 pp. 340 (1988)
- [27] P. Bhattacharya, D.Klotzim, O. Qasaimeh, W. Zhou, S. Krishna, D. Zhu, *IEEE Sel. J. Quant. Electron.* Vol. 6, No. 3, pp. 426 (2000)
- [28] C. Mesaritakis, C. Simos, H. Simos, S. Mikroulis, I. Krestnikov, and D. Syvridis, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 96, 211110 (2010)
- [29] D.I Nikitichev, Y.Ding, Y, M. Ruiz, M. Calligaro, N. Michel, M. Krakowski, I. Krestnikov, D. Livshits, M.A. Cataluna, E.U. Rafailov, *APPLIED PHYSICS B: LASERS AND OPTICS* DOI. 10.1007/s00340-010-4290-5 (2010)
- [30] M.G. Thompson, A.R. Rae, Mo Xia, R.V. Penty, I.H. White, *IEEE Select. J. Quant. Electron.* Vol. 15, No.3, pp. 661 (2009)
- [31] M. G. Thompson, A. Rae, R. L. Sellin, C. Marinelli, R. V. Penty, I. H. White, A. R. Kovsh, S. S. Mikhrin, D. A. Livshits, and I. L. Krestnikov, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 88, 133119, (2006)
- [32] M. Krakowski, S.C. Auzanneau, F. Berlie, M. Calligaro, Y. Robert, O. Parillaud, M. Lecomte, *IEEE Electron. Lett.* Vol. 39, No. 15, pp.1122, (2003)
- [33] R. Pagano, J. O'Callaghan, J.P. Reithmaier, S. Deubert, A. Forchel, J. Mukherjee, J.G. McInerney and B. Corbett, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 6 012010 (2009)
- [34] L. Borruel, H. Odriozola, J.M.G. Tijero, I. Esquivias, S. Sujecki and E.C. Larkins, *OPTICAL AND QUANTUM ELECTRONICS*, Vol. 40, No. 2-4, pp.175-189 (2007)
- [35] B. Sumpf, R. Hülsewede, G. Erbert, C. Dzionk, J. Fricke, A. Knauer, W. Pittroff, P. Ressel, J. Sebastian and G. Tränkle, *OPTICAL AND QUANTUM ELECTRONICS* Vol. 35, No. 4-5, pp. 521-532 (2003)
- [36] S.C Auzanneau, M. Calligaro, M. Krakowski, F. Klopff, S. Deubert, J. P. Reithmaier, and A. Forchel, *Appl. Phys. Lett.* Vol.84 2238 (2004)
- [37] F. Causa, D. Masanotti, *IEEE Phot. Technol. Lett.* Vol.16, No.9 pp.2000 (2004)
- [38] S. Breuer, M. Rossetti, W. Elsässer, L. Drzewietzki, P. Bardella, I. Montrosset, M. Krakowski, and M. Hopkinson, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 97, 071118 (2010)
- [39] C. Mesaritakis, A. Argyris, C. Simos, H. Simos, A. Kapsalis, I. Krestnikov, and D. Syvridis *Appl. Phys. Lett.* 98, 051104 (2011)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

- [1] C. G. Leburn, N. K. Metzger, A. A. Lagatsky, C. T. Brown, W. Sibbett, M. Lumb, E. Clarke, and R. Murray, in *Advanced Solid-State Photonics*, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, Washington, D.C., 2009).
- [2] A. Markus, J. X. Chen, C. Paranthoën, A. Fiore, C. Platz, and O. Gauthier-Lafaye “Simultaneous two-state lasing in quantum-dot lasers”, *Appl. Phys. Lett.* 82, 1818 (2003)
- [3] M. A. Cataluna, W. Sibbet, D. A. Livshits, J. Weimert, A. R. Kovsh, and E. U. Rafailov, “Stable mode locking via ground or excited state transitions in a two section quantum dot laser” *Appl. Phys. Lett.* 89, 081124 (2006).
- [4] Jimyung Kim, Myoung-Taek Choi, and Peter J. Delfyett , “Pulse generation and compression via ground and excited state from a grating coupled passively mode-locked quantum dot two section diode laser”, *Appl. Phys. Lett.* 89, 261106 (2006)
- [5] M. A. Cataluna, A. D. McRobbie, W. Sibbett, D. A. Livshits, A. R. Kovsh, and E. U. Rafailov “New mode-locking regime in a quantum-dot laser: enhancement by simultaneous cw excited-state emission” *CLEO 2006, Paper CThH3, Long Beach, USA (2006).*
- [6] A. Markus, J. X. Chen, C. Paranthoën, A. Fiore, C. Platz, and O. Gauthier-Lafaye, “Simultaneous two-state lasing in quantum dot lasers” *Appl. Phys. Lett.* Vol.88 No. 12 pp1818 January 2003
- [7] J. M. Evans, D. E. Spence, D. Burns, and W. Sibbett, *Optics Letters*, Vol. 18, Issue 13, pp. 1074-1076 (1993)
- [8] Zhiyi Wei, Yohei Kobayashi, Zhigang Zhang, and Kenji Torizuka, *Optics Letters*, Vol. 26, Issue 22, pp. 1806-1808 (2001)
- [9] J.B. Schlager, S. Kawanishi, M. Saruwatari, *IEEE Electron. Lett.* Vol. 27, No. 12, pp.2072 (1991)
- [10] Hiroaki Yoshioka, Shinki Nakamura, Takayo Ogawa, and Satoshi Wada, *Optics Express*, Vol. 18, Issue 2, pp. 1479-1486 (2010)
- [11] Yung-Fu Chen, Jian-Lung Lee, Hung-Dau Hsieh, Sheng-Wei Tsai, *IEEE J. Quant. Electron.* Vol. 38, No.3, pp.312 (2002)
- [12] P. Myslinski, J. Chrostowski, J. A. K. Koningstein, and J. R. Simpson, *Applied Optics*, Vol. 32, Issue 3, pp. 286-290 (1993)
- [13] L. A. Zenteno, H. Po, and N. M. Cho, *Optics Letters*, Vol. 15, Issue 2, pp. 115-117 (1990)
- [14] Andrei G. Vladimirov, Uwe Bandelow, Gerrit Fiol, Dejan Arsenijević, Moritz Kleinert, Dieter Bimberg, Alexander Pimenov, and Dmitrii Rachinskii, *JOSA B*, Vol. 27, Issue 10, pp. 2102-2109 (2010)
- [15] Yung-Fu Chen, S. W. Tsai, and S. C. Wang, *Optics Letters*, Vol. 25, Issue 19, pp. 1442-1444 (2000)
- [16] Jimyung Kim, Myoung-Taek Choi, and Peter J. Delfyett , “Pulse generation and compression via ground and excited state from a grating coupled passively mode-locked quantum dot two section diode laser”, *Appl. Phys. Lett.* 89, 261106 (2006)
- [17] M. A. Cataluna, A. D. McRobbie, W. Sibbett, D. A. Livshits, A. R. Kovsh, and E. U. Rafailov “New mode-locking regime in a quantum-dot laser: enhancement by simultaneous cw excited-state emission” *CLEO 2006, Paper CThH3, Long Beach, USA (2006).*
- [18] M. Rossetti, P. Bardella, and I. Montrosset, "Time-domain travelling-wave model for quantum dot passively mode-locked lasers," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 47, no. 2, pp. 139-150, Feb. 2011.
- [19] Kyoung Chan Kim, Il Ki Han, Jung Il Lee and Tae Geun Kim, *Nanotechnology* 21 134010 (2010)
- [20] A.A. Ukhonov, A. Stintz, P.G Eliseev, K.J. Malloy, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 84, No. 7 pp. 1058 (2004)
- [21] J. Muszalski, J Houlihan, G. Huyet, B. Corbett, *IEEE Electron. Lett.* Vol. 40, No. 7, pp.428 (2004)
- [22] C. Masoller, *IEEE J. Quant. Electron.* Vol. 33, No. 5, pp.767 (1997)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

- [1] C. G. Leburn, N. K. Metzger, A. A. Lagatsky, C. T. Brown, W. Sibbett, M. Lumb, E. Clarke, and R. Murray, in *Advanced Solid-State Photonics*, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, Washington, D.C., 2009).
- [2] A. Markus, J. X. Chen, C. Paranthoën, A. Fiore, C. Platz, and O. Gauthier-Lafaye “Simultaneous two-state lasing in quantum-dot lasers”, *Appl. Phys. Lett.* 82, 1818 (2003)
- [3] M. A. Cataluna, W. Sibbet, D. A. Livshits, J. Weimert, A. R. Kovsh, and E. U. Rafailov, “Stable mode locking via ground or excited state transitions in a two section quantum dot laser” *Appl. Phys. Lett.* 89, 081124 (2006).
- [4] Jimyung Kim, Myoung-Taek Choi, and Peter J. Delfyett , “Pulse generation and compression via ground and excited state from a grating coupled passively mode-locked quantum dot two section diode laser”, *Appl. Phys. Lett.* 89, 261106 (2006)
- [5] M. A. Cataluna, A. D. McRobbie, W. Sibbett, D. A. Livshits, A. R. Kovsh, and E. U. Rafailov “New mode-locking regime in a quantum-dot laser: enhancement by simultaneous cw excited-state emission” *CLEO 2006*, Paper CThH3, Long Beach, USA (2006).
- [6] M. Sugawara, N. Hatori, H. Ebe, M. Ishida, Y. Arakawa, T. Akiyama, K. Otsubo, and Y. Nakata. *J. Appl. Phys.*, 97, 043523(1–8) (2005)
- [7] J. Liu, Z. Lu, S. Raymond, P.J. Poole, P.J. Barios, D. Poitras, *Opt. Lett.*, 33, 1702 (2008)
- [8] T. Takahara, K. Takeda, *Phys. Rev. B* Vol.46 No. 23 (1992)
- [9] G. P Agrawal, *J. Apl. Phys.* Vol. 63, No. 4 (1988)
- [10] M. Rossetti, P. Bardella, and I. Montrosset, "Time-domain travelling-wave model for quantum dot passively mode-locked lasers," *Quantum Electronics*, IEEE Journal of, vol. 47, no. 2, pp. 139-150, Feb. 2011.
- [11] H. S. Djie, B. S. Ooi, X.-M. Fang, Y. Wu, J. M. Fastenau, W. K. Liu, and M. Hopkinson “Room temperature broadband emission of an InGaAs/GaAs quantum dot lasers” *Optics Letters* Vol.32 No. 1, pp. 44-46 (2007)
- [12] M. Alouini, M. Brunel, F. Bretenaker, M. Vallet, A. Le Floch, *Photn. Technol. Lett*, Vol. 10, No.11, pp. 1554-1556 (1998)
- [13] S. Osborne, S. O'Brien, E.P. O'Reilly, P.G. Huggard, B.N. Ellison, *Electron. Lett.* Vol. 44, No. 4, pp.296-297 (2008)
- [14] M. Tani, O. Morikawa, S. Matsuura and M. Hangyoet, *Semicond. Sci. Technol.* 20 S151 (2005)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

- [1] L.F. Lester, A. Stinz, H. Li, T.C. Newel, E.A. Pease, B.A. Fuchs, K.J. Malloy “Optical characteristics of 1.24μm InAs Quantum dot laser diodes” *IEEE Photon. Technol. Lett.* Vol.11 No. 8 pp. 931 August 1999
- [2] M.K. Zundel, P. Specht, K. Eberl, N.Y. Phillipp, and F. Phillipp “Structural and optical properties of vertically aligned InP Quantum dots” *Appl. Phys. Lett.* Vol. 71. No. 20 pp.2972 November 1997
- [3] H.Ishikawa,H.Shoji,Y.Nakata,K.Mukai,M.Sugawara,M.Egawa,N.Otsu, Y.Sugiyama,T.Futatsugi,andN.Yokoyama “Self-organized quantum dots and quantum dot lasers”, *J.Vac.Sci.Technol.*Vol.16, No.2, Mar/Apr1998
- [4] G.S.Solomon,J.A.Trezza, A.F.Marshall,and J.S.Harris. “Vertically Aligned and electronically coupled growth induced InAs islands in GaAs” *Physical Review Letters* Vol. 76 No. 6, pp. 952 February 1996.
- [5] Xiaodong Huang, A. Stintz, Hua Li, L. F. Lester, Julian Cheng, and K. J. Malloy “Passive mode locking in 1.3μm two-section InAs quantum dot lasers” *Appl. Phys. Lett.* Vol.78, pp. 2825 (2001)
- [6] E.U. Rafailov; S.J. White; A.A. Lagatsky; A. Miller; W. Sibbett; D.A. Livshits; A.E. Zhukov; V.M. Ustinov; “Fast quantum dot saturable absorber for passive mode locking of solid state lasers” *IEEE Photo. Technol. Lett.* Vol.16 No. 11 pp.1041 November 2004
- [7] Y.-C. Xin,Y. Li, Vassilios Kovanis, A. L. Gray, L. Zhang and L. F. Lester “ Reconfigurable quantum dot monolithic multi-section passive mode locked lasers’ *Optics express*, Vol. 15, No. 12, pp.7623 June 2007

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλειδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

[8] C. G. Leburn, N. K. Metzger, A. A. Lagatsky, C. T. Brown, W. Sibbett, M. Lumb, E. Clarke, and R. Murray, in *Advanced Solid-State Photonics*, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, Washington, D.C., 2009).

[9] A. Markus, J. X. Chen, C. Paranthoën, A. Fiore, C. Platz, and O. Gauthier-Lafaye “Simultaneous two-state lasing in quantum-dot lasers”, *Appl. Phys. Lett.* 82, 1818 (2003)

[10] M. A. Cataluna, W. Sibbet, D. A. Livshits, J. Weimert, A. R. Kovsh, and E. U. Rafailov, “Stable mode locking via ground or excited state transitions in a two section quantum dot laser” *Appl. Phys. Lett.* 89, 081124 (2006).

[11] Jimyung Kim, Myoung-Taek Choi, and Peter J. Delfyett , “Pulse generation and compression via ground and excited state from a grating coupled passively mode-locked quantum dot two section diode laser”, *Appl. Phys. Lett.* 89, 261106 (2006)

[12] M. A. Cataluna, A. D. McRobbie, W. Sibbett, D. A. Livshits, A. R. Kovsh, and E. U. Rafailov “New mode-locking regime in a quantum-dot laser: enhancement by simultaneous cw excited-state emission” *CLEO 2006*, Paper CThH3, Long Beach, USA (2006).

[13] A. Markus, J. X. Chen, C. Paranthoën, A. Fiore, C. Platz, and O. Gauthier-Lafaye, “Simultaneous two-state lasing in quantum dot lasers” *Appl. Phys. Lett.* Vol.88 No. 12 pp1818 January 2003

[14] Shu-Shen Li and Jian-Bai Xia, *J. Appl. Phys.* 88, 7171 (2000)

[15] S. G. Li, Q. Gong, Y. F. Lao, H. D. Yang, S. Gao, P. Chen, Y. G. Zhang, S. L. Feng, and H. L. Wang, *Appl. Phys. Lett.* 95, 251111 (2009).

[16] D. B. Malins, A. Gomez-Iglesias, S. J. White, W. Sibbett, A. Miller, and E. U. Rafailov “Ultrafast electroabsorption dynamics in an InAs quantum dot saturable absorber” *Appl. Phys. Lett.* Vol. 89, No. 17, September 2006

[17] Thompson, M.G. Marinelli, C. Chu, Y. Sellin, R.L. Penty, R.V.; White, L.H. Van Der Poel, M. Birkedal, D. Hvam, J. Ustinov, V.M. Lammlin, M. Bimberg, D.; “Properties of InGaAs quantum dot saturable absorbers in monolithic mode-locked lasers” *Semiconductor Laser Conference, 2004. Conference Digest. 2004 IEEE 19th International* pp.53-54, September 2004

[18] J. Chen, W. J. Fan, Y. Ding, Q. Xu, X. W. Zhang, D. W. Xu, S. F. Yoon, and D. H. Zhang, “Nanostructure model and optical properties of InAs/GaAs quantum dot in vertical surface emitting lasers” *Opto-Electronics Review* (in press 2011)

[19] C.-Y. Lin, Y.-C. Xin, Y. Li, F. L. Chiragh and L. F. Lester, “Cavity design and characteristics of monolithic long-wavelength InAs/InP quantum dash passively mode locked lasers” *Optics Express* Vol. 17 No. 22 pp19739 October 2009

[20] M. Rossetti, P. Bardella, and I. Montrosset, "Time-domain travelling-wave model for quantum dot passively mode-locked lasers," *Quantum Electronics, IEEE Journal of*, vol. 47, no. 2, pp. 139-150, Feb. 2011.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

[1] E.Patzak, H. Olesen, A. Sugimura, S. Saito, T. Mukai, *IEEE Electron. Lett.* Vol. 19, No. 22, pp. 938 (1983)

[2] B. Dahmani, L. Hollberg, and R. Drullinger, *Optics Letters*, Vol. 12, Issue 11, pp. 876-878 (1987)

[3] N. Schunk, K. Petermann, *IEEE J. Quant. Electron.* Vol. 24, No. 7, pp. 1247 (1988)

[4] R. Tkach, A. Chraplyvy, *IEEE J. Lightwave Technol.* Vol. 4, No. 11, pp. 1655 (1986)

[5] R.O. Miles, A. Dandridge, A.B. Tveten, H.F. Taylor, T.G. Giallorenzi, *Appl. Phys. Lett.* Vol.37, No. 11, pp. 990 (1980)

[6] Hui Su and Luke F Lester 2005 *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38 2112

[7] D. Lenstra, B. Verbeek, A. Den Boef, *IEEE J. Quant. Electron.* Vol. 21, No. 6, pp. 674 (1985)

[8] T. Sano, *Physical Review A.* Vol. 50, No. 3, pp.2719 (1994)

[9] H. Li, J. Ye, J.G. McInerney, J.G., *IEEE J. Quant. Electron.* Vol. 29, No. 9, pp. 2421 (1993)

[10] C.H.L Quay, I.Z. Maxwell, J.A. Hudgings, *J. Appl. Phys.* Vol. 90, No. 12, pp. 5856 (2001)

Μελέτη διατάξεων λέιζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

- [11] O. Carroll, I. Driscoll, S. P. Hegarty, G. Huyet, J. Houlihan, E. A. Viktorov, P. Mandel, 14, 22, Optics Express 10831 (2006)
- [12] H.Su, L.Zhang, A.L.Gray, R.Wang, T.C.Newell, K.J.Malloy, and L.F.Lester, IEEE Photon. Technol. Lett. 15, 11, 1504-1506 (2003)
- [13] E. A. Avrutin, S. Xibin, and B. M. Russel, Opt. Quantum Electron. 40, 1175 (2008).
- [14] M. Passerini, G. Giuliani, and M. Sorel, IEEE Photonics Technol. Lett. 17, 965 (2005).
- [15] O. Carroll, I. Driscoll, S. P. Hegarty, G. Huyet, J. Houlihan, E. A. Viktorov, and P. Mandel, Opt. Express 14, 10831 (2006).
- [16] H. Su, L. Zhang, A. L. Gray, R. Wang, T. C. Newell, K. J. Malloy, and L. F. Lester, IEEE Photonics Technol. Lett. 15, 1504 (2003).
- [17] F. Grillot, C. Y. Lin, N. A. Naderi, M. Pochet, and L. F. Lester, Appl. Phys. Lett. 94, 153503 (2009).
- [18] C. Y. Lin, F. Grillot, N. A. Naderi, Y. Li, and L. F. Lester, Appl. Phys. Lett. 96, 051118 (2010).
- [19] Cataluna, Maria Ana; Nikitichev, Daniil I; Mikroulis, Spiros; Simos, Hercules; Simos, Christos; Mesaritakis, Charis; Syvridis, Dimitris; Krestnikov, Igor; Livshits, Daniil; Rafailov, Edik U, Optics Express, Vol. 18 Issue 12, pp.12832-12838 (2010)
- [20] Charis Mesaritakis, Christos Simos, Hercules Simos, Alexandros Kapsalis, Dimitris Syvridis, Daniil I. Nikitichev, Ying Ding, Maria Ana Cataluna, Edik U. Rafailov, Mattia Rossetti, Paolo Bardella, Ivo Montrosset, Igor Krestnikov, IEEE J. Quant. Electron submitted for publication.
- [21] C. Masoller, IEEE J. Quant. Electron. Vol. 33, No. 5, pp.767 (1997)
- [22] H. Haug Phys. Rev. 184, 338–348 (1969)
- [23] A. A. Ukhanov, A. Stintz, P. G. Eliseev, and K. J. Malloy, Appl. Phys. Lett. 84, 1058 (2004).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9

- [1] R. Tkach, A. Chraplyvy, IEEE J. Lightwave Technol. Vol. 4, No. 11, pp. 1655 (1986)
- [2] R.O. Miles, A. Dandridge, A.B. Tveten, H.F. Taylor, T.G. Giallorenzi, Appl. Phys. Lett. Vol.37, No. 11, pp. 990 (1980)
- [3] Hui Su and Luke F Lester 2005 J. Phys. D: Appl. Phys. 38 2112
- [4] D. Lenstra, B. Verbeek, A. Den Boef, IEEE J. Quant. Electron. Vol. 21, No. 6, pp. 674 (1985)
- [5] T. Sano, Physical Review A. Vol. 50, No. 3, pp.2719 (1994)
- [6] H. Li, J. Ye, J.G McInerney, J.G, IEEE J. Quant. Electron. Vol. 29, No. 9, pp. 2421 (1993)
- [7] C.H.L Quay, I.Z. Maxwell, J.A. Hudgings, J. Appl. Phys. Vol. 90, No. 12, pp. 5856 (2001)
- [8] G. Phan, G.H. Duan, IEEE J. Quant. Electron. Vol.36 No. 6 pp. 1000 (1998)
- [9] D.J. Channin, G.H. Olsen, M. Ettenberg IEEE J. Quant. Electron. Vol.17 No. 2 pp. 207 (1981)
- [10] U. Bandelow, H.J. Wunsche, B. Satorius, M. Mohrle, IEEE J. Quant. Electron. Vol.3 No. 2 pp. 270 (1997)
- [11] H. Wenzel, U. Bandelow, H.J. Wunsche, J. Rehberg IEEE J. Quant. Electron. Vol.32 No. 1 pp. 69 (1996)
- [12] H.F. Liu, T. Kamiya, J. Japane. Appl. Phys. Vol. 28, No. 9, pp. 1600 (1989)
- [13] Y.J. Kim, Y.K. Joshi, A.G. Fedorov, J. Appl. Phys. Vol. 107, 073104 (2010)
- [14] T.Vallaitis, C. Koos, R. Bonk, W. Freude, M. Loemmlin, C. Meuer, D. Bimberg, J. Lenthold, Optics Express Vol.16 No. 1 pp.170 (2008)
- [15] Daniel R. Matthews, Gareth T. Edwards, Huw D. Summers, Peter M. Smowton, Proceedings of SPIE Vol. 5365 (SPIE, Bellingham, WA, 2004) doi: 10.1117/12.528789
- [16] M.J.R. Heck, E.A.J.M Bente, B. Smalbrugge, Y.S. Oei, M.K. Smit, S. Anoutathanasarn, R. Notzel, Optics Express Vol.15, No. 25, pp. 16292 (2007)

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές

- [17] H. Xiaodong, A. Stintz, L. Hua, L.F. Lester, J. Cheng, K.J. Malloy *Lasers and Electro-Optics*, 2001. CLEO '01. Technical Digest. Summaries of papers presented at the Conference pp.359 (2001)
- [18] F. Kefelion, S. O'Donoghue, M.T. Torado, J. McLnerney, G. Huyet, *Optics Express* Vol. 17, No. 8, pp.6258 (2009)
- [19] A. Markus, M. Rossetti, V. Calligari, D. Chek-Ai-Kar, J. X. Chen, and A. Fiore, *J. Appl. Phys.* 100, 113104 (2006)
- [20] I.H. White, R.V. Pentz, R.E. Epworth, *IEEE Electron. Lett.* Vol. 24, No. 6 pp. 340 (1988)
- [21] P. Bhattacharya, D. Klotz, O. Qasaimeh, W. Zhou, S. Krishna, D. Zhu, *IEEE Sel. J. Quant. Electron.* Vol. 6, No. 3, pp. 426 (2000)
- [22] A. Argyris, E. Grivas, M. Hamacher, A. Bogris and D. Syvridis, *Optics Express*, vol. 18, pp.5188-5198 (March 2010)
- [23] A. Argyris, M. Hamacher, K.E. Chlouverakis, A. Bogris, D. Syvridis, *Physical Review Letters*, vol. 100, 194101 (May 2008)
- [24] Ohtsubo, J. *IEEE J. Quant. Electron.* Vol. 38 No. 9 pp. 1141 (2002)
- [25] A. Argyris, S. Deligiannidis, E. Pikasis, A. Bogris and D. Syvridis, , *Optics Express*, , Vol. 18, Issue 18, pp. 18763-18768 (2010)
- [26] P. Grassberger, I. Procaccia, *Phys. Rev. Lett.* 50, 346 (1983)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

- [1] D. Englund, D. Fattal, E. Waks, G. Solomon, B. Zhang, T. Nakaoka, Y. Arakawa, Y. Yamamoto, and J. Vučković, *Phys. Rev. Lett.* Vol. 95 013904 (2005)
- [2] J. Claudon, J. Bleuse, N. S. Malik, M. Bazin, P. Jaffrennou, N. Gregersen, C. Sauvan, P. Lalanne and J.-M. Gerard. *Nature* 10.1038 (2010)
- [3] M. Nomura, N. Kumagai, S. Iwamoto, Y. Ota and Y. Arakawa, *Nature Phys.* Vol. 6 pp. 227 10.1038 (2010)
- [4] E. Moreau, I. Robert, J. M. Gerard, I. Abram, L. Manin, and V. Thierry-Mieg, *Appl. Phys. Lett.* Vol. 78 No. 18 pp.2865 (2001)
- [5] N. Gregersen, T. Roland Nielsen, J. Mørk, J. Claudon, and J. M. Gérard, *Optics express* Vol. 18, No. 20, (2010)
- [6] P. Walther, K. J. Resch, T. Rudolph, E. Schenck, H. Weinfurter, V. Vedral, M. Aspelmeyer A. Zeilinger, *Nature* Vol. 434 pp. 167 (2005)
- [7] Thomas Jennewein, Christoph Simon, Gregor Weihs, Harald Weinfurter, and Anton Zeilinger, *Phys. Rev. Lett.* 84, 4729–4732 (2000)
- [8] Gilles Brassard, Norbert Lütkenhaus, Tal Mor, and Barry C. Sanders *Phys. Rev. Lett.* 85, 1330–1333 (2000)
- [9] Hoi-Kwan Lau and Hoi-Kwong Lo *Phys. Rev. A* 83, 012322 (2011)
- [10] Yujiro Eto, Yun Zhang, and Takuya Hirano *Optics Express*, Vol. 19, Issue 2, pp. 1360-1366 (2011)
- [11] Erhan Saglamyurek, Neil Sinclair, Jeongwan Jin, Joshua A. Slater, Daniel Oblak, Félix Bussi eres, Mathew George, Raimund Ricken, Wolfgang Sohler and Wolfgang Tittel, *Nature* 469, pp. 512 (2011)

ΕΡΓΑΣΙΕΣ

- [1] C. Mesaritakis, C. Simos, H. Simos, S. Mikroulis, I. Krestnikov, and D. Syvridis "Pulse width narrowing due to dual ground state emission in quantum dot passively mode locked lasers" **AIP Applied Physics Letters**, **96**, 211110 (2010)
- [2] C. Mesaritakis, C. Simos, H. Simos, S. Mikroulis, I. Krestnikov, E. Roditi, and D. Syvridis "Effect of optical feedback to the ground and excited state emission of a passively mode locked quantum dot laser" **AIP Applied Physics Letters** **97**, 061114 (2010)
- [3] C. Mesaritakis, A. Argyris, C. Simos, H. Simos, A. Kapsalis, I. Krestnikov, and D. Syvridis "Chaotic emission and tunable self-sustained pulsations in a two-section Fabry–Perot quantum dot laser" **AIP Applied Physics Letters** **98**, 051104 (2011)
- [4] M.A. Cataluna, D.I. Nikitichev, S. Mikroulis, H. Simos, C. Simos, C. Mesaritakis, D. Syvridis, I. Krestnikov, D. Livshits, E.U. Rafailov, "Dual-wavelength mode-locked quantum-dot laser, via ground and excited state transitions: experimental and theoretical investigation, **Optics Express**, Vol. **18** Issue 12, pp.12832-12838 (2010)
- [5] C. Mesaritakis, C. Simos, H. Simos, A. Kapsalis, D. Syvridis, D. I. Nikitichev, Y. Ding, M. A. Cataluna, E. U. Rafailov, M. Rossetti, P. Bardella, I. Montrosset, I. Krestnikov, "Structural Characteristics on the Performance of Quantum-Dot Passively Mode-Locked Lasers" **IEEE Journal of Quantum Electronics**, submitted for publication.
- [6] C. Mesaritakis, H. Simos, C. Simos, I. Krestnikov, D. Syvridis, "Tunable Dual-Wavelength Pulse Generation from a Passively Mode Locked Quantum Dot Laser" submitted for publication **AIP Applied Physics Letters**
- [7] C. Mesaritakis, H. Simos, A. Kapsalis, D. Syvridis, "Optical Microring-Based Interrogation Method for Phase Detecting Elements" **IEEE Journal of Sensors**, Vol. **9**, Issue 12, pp.2016 (2009)
- [8] C. Mesaritakis, A. Argyris, E. Grivas, A. Kapsalis, D. Syvridis, "Adaptive Interrogation for Fast Optical Sensing Based on Cascaded Micro-Ring Resonators" **IEEE Journal of Sensors**, Vol. **11**, Issue 7, pp.1595 (2011)
- [9] C. Mesaritakis, H. Simos, A. Kapsalis, D. Syvridis "Micro Ring biochemical Sensor based on Fano Resonances and Nanoslot waveguides" **EOS Annual Meeting France 2008**
- [10] H. Simos, C. Mesaritakis, D. Alexandropoulos, D. Syvridis, "Dynamic Analysis of Crosstalk Performance in Microring-Based Add/Drop Filters" **IEEE Journal of Lightwave Technology**, Vol. **27**, Issue. 12, pp. 2027 (2009)
- [11] H. Simos, C. Mesaritakis, D. Alexandropoulos, D. Syvridis, "Intraband Crosstalk Properties of Add–Drop Filters Based on Active Microring Resonators" **IEEE Photonics Technology Letters**, Vol. **19**, Issue. 20 pp. 1041(2007)
-

BIBΛΙΑ

C. Mesaritakis, D. Syvridis "Spectral Splitting Effects and their Influence to the Performance of Quantum Dot Mode locked Lasers" **Springer Lecture Notes "Quantum Dots"**.

Μελέτη διατάξεων λείζερ κβαντικών τελειών, εγκλείδωσης τρόπων για τηλεπικοινωνιακές και βιο-ιατρικές εφαρμογές