ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών
ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΡΑΔΙΟΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΙΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λεπτά υμένια διοξειδίου του βαναδίου $V0_2$ ως οπτικά φίλτρα στην περιοχή των Ασύρματων Οπτικών Επικοινωνιών: Θεωρητική και Πειραματική Διερεύνηση

ΜΑΝΟΥΣΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ
2016108

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ
Ε. ΝΙΣΤΑΖΑΚΗΣ, ΑΝ.ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ,ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
Ε. ΣΥΣΚΑΚΗΣ, ΕΠ.ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ
Ε. ΡΟΔΙΤΗ, ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
Α. ΤΖΑΝΑΚΑΚΗ, ΕΠ.ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ, ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
Ε. ΝΙΣΤΑΖΑΚΗΣ, ΑΝ.ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ,ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΙΟΥΝΙΟΣ 2018

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Ραδιοηλεκτρολογία & Ηλεκτρονική» σε συνεργασία με τον επιβλέποντα Αν. Καθ. Νισταζάκη Έκτορα του τομέα Ηλεκτρονικής Φυσικής και τον επιβλέποντα Επ. Καθ. Συσκάκη Εμμανουήλ του τομέα Φυσικής Στερεάς Κατάστασης.

Καταρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τους επιβλέποντες μου για την δυνατότητα συνεργασίας τους προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διπλωματική μου εργασία. Συγκεκριμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν. Καθ. Νισταζάκη Έκτορα για την καθοδήγηση και την βοήθεια που μου προσέφερε στην κατανόηση της εφαρμογής και στην σύνδεση των πειραματικών αποτελεσμάτων με αυτήν. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επ. Καθ. Συσκάκη Εμμανουήλ για την διάθεση των γνώσεων και της εμπειρίας του στο πειραματικό μέρος της εργασίας μου καθώς και στην ευκαιρία που μου έδωσε να το εκπονήσω στο εργαστήριο του. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Επ. Καθ. Τζανακάκη Άννα και την Επ. Καθ. Ροδίτη Ευγενία ως μέλη της συμβουλευτικής επιτροπή μου.

Στην συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν. Καθ. Γαρδέλη Σπυρίδων για την πολύτιμη βοήθεια του στην πραγματοποίηση των οπτικών μετρήσεων στο εργαστήριο του. Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Στασινάκη Αργύρη για την άμεση ανταπόκριση του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε κατά την διάρκεια διεξαγωγής της σύνδεσης των πειραματικών αποτελεσμάτων με την εφαρμογή. Επιπλέον, ευχαριστώ τον συνάδελφο Παπαμιχάλη Ειρηναίο για την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε στο πρώτο πειραματικό στάδιο της εργασίας. Ευχαριστώ επίσης τον Υπ. Δ. Γεωργαλά Κωνσταντίνο, για το ενδιαφέρον του και την βοήθεια που μου προσέφερε κατά την πειραματική διαδικασία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, τους/τις φίλους/ες μου καθώς και όποιον με τον τρόπο του συνέβαλλε στην επιτυχή εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Abbreviations

VLC	Visible Light Communications
VO_2	Vanadium dioxide
MIT	Metal-Insulator-Transition
SNR	Signal-to-noise-ratio
V_2O_5	Vanadium pentoxide
PVD	Physical Vapor Deposition
LEDs	Light-emitting diodes
GPS	Global Positioning System
PLC	Power Line Communication
HB-LEDs	High-Brightness Light-emitting diodes
IEC	International Electrotechnical Commission
PoE	Power over Ethernet
Li-Fi	Light Fidelity
HetNets	Heterogeneous network
Wi-Fi	Wireless Fidelity
RF	Radio Frequency
LoS	Line of Sight
PDU	Power Distribution Unit
IP	Internet Protocol
BER	Bit Error Rate
ISI	Inter Symbol Interference
TCP	Transmission Control Protocol
MAC	Media access control
RSU	Remote Switching Units
IR	Infrared radiation
OOK	On-off keying
ISO	International Organization for Standardization
OSI	Open Systems Interconnection model
IR	Infrared radiation
AWGN	Additive White Gaussian Noise
RGB LED	Red Green Blue LED
BER	Bit Error Rate
UDP	User Datagram Protocol
MST	Metal Semiconductor Transition
NiCr-Const	Nickel Chromium Constant
Al_2O^2	Aluminum oxide
CS	Current Source
DMM	Digital Multimeter
PD	Photodiodes

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ……7
1 Θεωρητικό υπόβαθρο……8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ……8
1.1 Πλεονεκτήματα χρήσης των VLC συστημάτων οπτικών επικοινωνιών……9
1.2 Συγκρίσεις των VLC συστημάτων με άλλες μορφές επικοινωνίας……10
1.2.1 Σύγκριση των VLC συστημάτων με επικοινωνίες υπερύθρων IR ……10
1.2.2 Σύγκριση της επικοινωνίας VLC με την επικοινωνία ραδιοσυχνοτήτων (Rasio Frequency – RF)……11
1.2.3 Σύγκριση VLC με μικροκυψέλες και ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous networks – HetNets)……11
1.3 Εφαρμογές VLC ……12
1.4 Αρχιτεκτονική των VLC επικοινωνιών……14
1.5 Το οπτικό ασύρματο κανάλι……16
1.6 Λειτουργικές απαιτήσεις……16
1.7 Προβλήματα και μέθοδοι επίλυσης VLC επικοινωνιών……17
1.7.1 Αντιστάθμιση επίδρασης του θορύβου……17
1.8 Κατάλληλα φίλτρα στον δέκτη……18
1.8.1 Ιδιότητες διοξειδίου του βαναδίου VO_2 και χρήση του ως ένα οπτικό φίλτρο……19
1.9 Υπολογισμός λειτουργίας οπτικού φίλτρου……20
1.10 Κώδικας λειτουργίας οπτικού φίλτρου σε περιβάλλον Matlab……23
2 Πειραματική διαδικασία……27
2.1 Παρασκευή δειγμάτων……27
2.1.1 Παρασκευή δειγμάτων λεπτών υμενιών (films) V_2O_5 με την μέθοδο εναπόθεσης ατμού (PVD)……27
2.1.2 Παρασκευή δειγμάτων λεπτών υμενιών (films) VO_2 με αναγωγή των δειγμάτων V_2O_5 με θέρμανση σε ειδικό κλίβανο……30
2.2 Περιθλασίμετρο σκόνης Siemens D5000……34
2.3 Μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης……35
2.3.1 Περιγραφή διάταξης μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης……35
2.3.2 Δημιουργία επαφών τάσης-ρεύματος……37
2.3.3 Τοποθέτηση και συνδεσμολογία δειγμάτων……38
2.3.4 Προετοιμασία για τη μέτρηση-μετρητική διαδικασία……39
2.4 Οπτικές μετρήσεις……40
2.4.1 Πειραματική διάταξη των οπτικών μετρήσεων……41
2.4.2 Μετρήσεις οπτικής απορρόφησης σε μήκος κύματος λ=1550nm στην περιοχή T= 300 - 380 K……42
2.4.3 Μετρήσεις της οπτικής απορρόφησης συναρτήσει του μήκους κύματος στην περιοχή 400-1000 nm σε T= 300 K και σε T= 370 K……43
2.5 Συνοπτικός Πίνακας δειγμάτων ……44

3 Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων……..……47
3.1 Φασική εξέλιξη των υμενίων……47
3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων του διοξειδίου του βαναδίου VO_2 σε μονοκρυσταλλικά υποστρώματα……47
3.2.1 Αποτελέσματα μετρήσεων του διοξειδίου του βαναδίου VO_2 σε υποστρώματα Al_2O_3……..47
3.2.1.A1 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDRN18AL……..47
3.2.1.A2 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDRN25AL……..51
3.2.1.B Σύγκριση των δειγμάτων MDRN25AL, MDRN18AL……53
3.2.2 Αποτελέσματα μετρήσεων διοξειδίου του βαναδίου VO2 σε υποστρώματα quartz……53
3.2.2.A1 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDRN18Q……..53
3.2.2.A2 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDRN20Q……55
3.2.2.B Σύγκριση των δειγμάτων MDRN18Q, MDRN20Q……57
3.3 Αποτελέσματα μετρήσεων διοξειδίου του βαναδίου VO_2 σε άμορφα υποστρώματα (γυαλιά)……..58
3.3.A1 Επίδραση των συνθηκών φυσικής εναπόθεσης ατμού στα δείγματα MDRN23g2, MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1……58
3.3.B1 Σύγκριση των δειγμάτων MDRN23g2, MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1……63
3.3.A2 Επίδραση των συνθηκών θερμικής επεξεργασίας στα δείγματα MDRN22g1, MDRN23g2……64
3.3.B2 Σύγκριση των δειγμάτων MDRN22g1, MDRN23g2……66
3.3.A3 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDRN21g……67
3.3.A4 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDArHg13118……..70
3.3.B3 Σύγκριση της οπτικής διαπερατότητας των MDRN18AL, MDRN23g5, MDRN21g ως προς το μήκος κύματος λ……..72
3.4 Εκτίμηση του πάχους των υμενίων VO_2……72
4 Παρουσίαση αποτελεσμάτων εφαρμογής των λεπτών υμενίων VO_2 ως οπτικά φίλτρα σε ένα σύστημα VLC……..……73
4.1 Υπολογισμός του SNR ενός VLC συστήματος με την χρήση λεπτών υμενίων VO_2 ως οπτικά φίλτρα……..……73
Σύνοψη……79
ΑΝΑΦΟΡΕΣ……81

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών (Visible Light Communications - VLC) προσελκύουν έρευνα και εμπορικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω των αξιοσημείωτων χαρακτηριστικών τους, όπως το υψηλό ποσοστό δεδομένων, το χαμηλό κόστος εγκατάστασης και λειτουργίας και το γεγονός ότι είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Ο πομπός σε τέτοια συστήματα μπορεί να είναι μία δίοδος εκπομπής φωτός (Light-Emitting Diode – LED) που προσφέρει πλεονεκτικές ιδιότητες όπως η φωτεινότητα, η εξαιρετικά υψηλή μετάδοση δεδομένων και η μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ οι φωτοδίοδοι χρησιμοποιούνται ως δέκτες. Επομένως, τα συστήματα χρησιμοποιούνται ήδη για εφαρμογές δικτύων επικοινωνίας τεχνολογίας 5G. Ωστόσο, η απόδοση των συστημάτων (VLC) μειώνεται λόγω του θορύβου του περιβάλλοντος που προκαλείται κυρίως από την ακτινοβολία του ηλιακού φωτός. Προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος του ηλιακού φωτός, στην εργασία αυτή μελετάται η εφαρμογή ενός οπτικού φίλτρου διοξειδίου του βαναδίου (Vanadium dioxide - VO_2) μπροστά από τον δέκτη με σκοπό την βελτίωση του Signal-to-Noise Ratio – SNR του συστήματος (Visible Light Communications – VLC). Η μετάβαση μετάλλου μονωτή (Metal-Insulator-Transition - MIT) του διοξειδίου του βαναδίου (Vanadium dioxide - VO_2) σε θερμοκρασία 340 K συνοδεύεται από μεγάλη μεταβολή της ηλεκτρικής του αντίστασης αλλά και της οπτικής του διαπερατότητας σε συνδυασμό με την πολύ γρήγορη αλλαγή φάσης της δομής. Η οπτική διαπερατότητα του διοξειδίου του βαναδίου (Vanadium dioxide - VO_2) φαίνεται να μειώνεται μετά την μετάβαση μετάλλου μονωτή σε ένα εύρος μηκών κύματος ορατού και υπερύθρου με μέγιστη οπτική διαπερατότητα στα 650 - 700nm δίνοντας έτσι την δυνατότητα χρήσης του διοξειδίου του βαναδίου (Vanadium dioxide - VO_2) ως οπτικό φίλτρο.

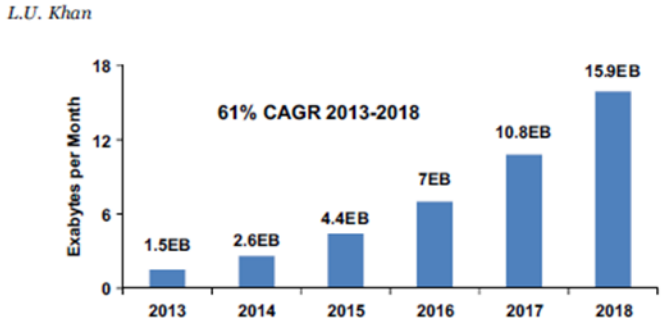
Συγκεκριμένα, παρασκευάστηκαν λεπτά υμένια πεντοξειδίου του βαναδίου (Vanadium- pentoxide - V_2O_5) με την μέθοδο της φυσικής εναπόθεσης ατμού (Physical Vapor Deposition – PVD), όπου ανάχθηκαν σε λεπτά υμένια (VO_2). Έγινε χαρακτηρισμός των δειγμάτων με μετρήσεις περιθλασιμετρίας ακτίνων X και μετρήθηκε η ηλεκτρική τους αντίσταση ως προς τη θερμοκρασία αλλά και η οπτική τους διαπερατότητα ως προς το μήκος κύματος και ως προς την θερμοκρασία. Στην συνέχεια, μελετήθηκε η απόδοση, βελτίωση του SNR ενός συστήματος (VLC) με την εφαρμογή των πειραματικών αποτελεσμάτων των λεπτών υμενίων διοξειδίου του βαναδίου (VO_2) ως οπτικά φίλτρα μπροστά από τον δέκτη, για να μειωθεί ο θόρυβος του ηλιακού φωτός. Τα ληφθέντα αποτελέσματα απεικονίζονται μέσω κατάλληλων τρισδιάστατων σχημάτων.

Κεφάλαιο 1

Θεωρητικό υπόβαθρο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εποχή της τεχνολογίας, της πληροφορίας και των επικοινωνιών υπάρχει πρωτοφανής απαίτηση για ψηφιοποίηση και αυτοματισμό. Σύμφωνα με την CISCO, η κινητικότητα των δεδομένων κινητής τηλεφωνίας αναμένεται ότι έχει αυξηθεί κατά 11 φορές το 2018 σε σύγκριση με το 2013, όπως φαίνεται στο Σχ.1.1. Οι πληροφορίες πολυμέσων αναμένεται να είναι διαθέσιμες σε κάθε μέρος και κάθε στιγμή και τα ασύρματα δίκτυα αποτελούν το κλειδί για την επίτευξη αυτών των στόχων. Το εύρος ζώνης των ραδιοσυχνοτήτων επιτρέπει τυχαία χωρική κάλυψη, γεγονός που είναι περιοριστικό για τις επικοινωνίες. Οι θεμελιώδεις προκλήσεις προκύπτουν λόγω ύπαρξης περιορισμών στις συμβατικές ασύρματες τεχνολογίες ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency - RF), οι οποίες είναι όλο και λιγότερο ικανές να ανταποκριθούν στις κλιμακούμενες απαιτήσεις. Ως αποτέλεσμα, εναλλακτικοί ασύρματοι τρόποι διάδοσης πρέπει να ερευνηθούν ως συμπληρωματική τεχνολογία. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει δοθεί σε ερευνητικά προγράμματα που αφορούν στις υψηλές συχνότητες φερόντων, συμπεριλαμβανομένων των millimeter wave (mm wave) και του φάσματος του ορατού φωτός στην επερχόμενη πέμπτη γενιά ασύρματων δικτύων (5G).



Σχήμα 1.1. Παγκόσμια κινητικότητα δεδομένων κινητής τηλεφωνίας [1]

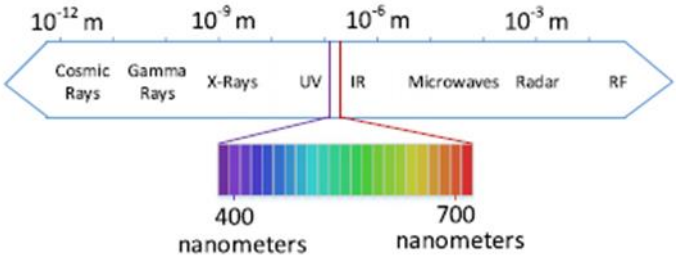
Ιστορικά, στα τέλη του 19ου αιώνα, ο Alexander Graham Bell εφηύρε το φωτο-τηλέφωνο μεταδίδοντας φωνητικά σήματα χρησιμοποιώντας διαμορφωμένο ηλιακό φως. Σχεδόν έναν αιώνα αργότερα, το τεχνητό φως από λαμπτήρες φθορισμού αποδείχθηκε ότι υποστηρίζει με επιτυχία επικοινωνίες χαμηλού ρυθμού δεδομένων. Αυτά τα πειράματα ενέπνευσαν τη χρήση του σύγχρονου τρόπου επικοινωνίας με ορατό φως (VLC) με διόδους εκπομπής φωτός (Light-emitting diodes - LEDs).

Η πρωτοποριακή εφαρμογή των VLC χρησιμοποιώντας (LEDs) για τον διπλό σκοπό του εσωτερικού φωτισμού και των επικοινωνιών πραγματοποιήθηκε από το εργαστήριο Nakagawa στις αρχές της δεκαετίας του 2000. Ακολούθως, έχουν πραγματοποιηθεί τεράστιες ερευνητικές προσπάθειες για τη βελτίωση της απόδοσης σε επίπεδο σύνδεσης μεταξύ μίας μονάδας διόδων (LEDs) και ενός μόνο δέκτη, εστιάζοντας στα στοιχεία των

(LEDs) αλλά και γενικότερα στους πομποδέκτες VLC, όπου έχουν επιτευχθεί στόχοι πολλαπλών Gbps. Αυτά τα επιτεύγματα σε επίπεδο σύνδεσης, έθεσαν τη βάση για τη διεύρυνση του πεδίου εφαρμογής της έρευνας VLC, πέρα από τις εφαρμογές σημείου προς σημείο, αλλά και σε εφαρμογές με επίκεντρο τη δικτύωση με VLC, όπου προτείνονται πολλά υποσχόμενα πρωτόκολλα, αρχιτεκτονικές και λύσεις διαστρωματικών επιπέδων. Επιπλέον, το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (Global Positioning System-GPS) με βάση τα συστήματα των (LEDs) έχει προσελκύσει ερευνητικό ενδιαφέρον, με ακρίβεια μικρότερη της τάξεων των εκατοστών και ικανότητα τρισδιάστατου εντοπισμού θέσης. Εκτός από την κύρια έρευνα στον εντοπισμό θέσης, τις επικοινωνίες και τη δικτύωση, η VLC μπορεί επίσης να προσφέρει καινοτόμες λύσεις για διάφορες περιπτώσεις χρήσης, συμπεριλαμβανομένων των οχημάτων, συσκευής σε συσκευή (device to device) και των υποβρύχιων εφαρμογών. [2]

1.1 Πλεονεκτήματα χρήσης των VLC συστημάτων οπτικών επικοινωνιών

Η τεχνολογία οπτικών επικοινωνιών (VLC), χρησιμοποιεί διόδους εκπομπής φωτός (LEDs) που εκπέμπουν φως σε μήκη κύματος φάσματος 380 nm - 700 nm (Σχ.1.2).



Σχήμα 1.2 Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και περιοχή ορατου φωτός [2].

Τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών (VLC), χρησιμοποιώντας διόδους εκπομπής φωτός (LEDs) προσφέρουν την δυνατότητα ενός συμπληρωματικού συστήματος. Οι κύριοι λόγοι είναι οι εξής:

•Το εύρος ζώνης τους είναι απεριόριστο. Ετσι, η πιθανή χωρητικότητα δεδομένων των VLC είναι χιλιάδες φορές μεγαλύτερη από το τμήμα ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency RF) του φάσματος.

•Είναι δύσκολο να εγκατασταθούν νέα καλώδια στον εξοπλισμό φωτισμού οροφής, για τις VLC επικοινωνίες εσωτερικού χώρου. Οι επικοινωνίες ισχύος (Power Line Communication - PLC), επιτρέπουν τη χρήση ηλεκτρικών καλωδίων για επικοινωνία. Επιτρέπουν επίσης, τη χρήση των πριζών εξόδου για χρήση ως θύρες, μειώνοντας την ανάγκη εγκατάστασης νέων καλωδίων επικοινωνίας για τα συστήματα οπτικών επικοινωνιών (VLC), τα οποία είναι δύσκολο να εγκατασταθούν στον ήδη υπάρχοντα εξοπλισμό. Οι προδιαγραφές (PLC) ενοποιήθηκαν σε δύο πρότυπα: IEEE 1901 και ITU-T G.9960/61 το 2009 και το 2010, αντίστοιχα. Δεδομένου ότι τα πρότυπα για το (VLC) και το (PLC) είναι πλήρη, υπάρχει ισχυρό κίνητρο για τη διερεύνηση της ενσωμάτωσης αυτών των τεχνολογιών. Έτσι, οι υπάρχουσες υποδομές ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εγκατάσταση των (VLC) συστημάτων.

•Οι πομποδέκτες είναι οικονομικοί και δεν υπάρχει ανάγκη αγοράς ακριβών μονάδων ραδιοσυχνοτήτων (radio frequency-RF).
•Τα κύματα φωτός δεν διεισδύουν σε αδιαφανή αντικείμενα, συνεπώς από αυτά δεν μπορούν να υποκλαπούν πληροφορίες. Επομένως, με τα συστήματα (VLC) μεγιστοποιείται η ασφάλεια.
•Οι ορατού φωτός ακτινοβολίες, περιορισμένης έντασης δεν είναι επιβλαβείς για την υγεία. Έτσι, τα συστήματα αυτά προβλέπεται να χρησιμοποιηθούν σε νοσοκομεία και ιδιωτικά σπίτια. Επιπλέον, δεν υπάρχει παρεμβολή με συστήματα ραδιοσυχνοτήτων RF κι έτσι ευνοείται η χρήση τους σε αεροπλάνα.
•Οι λευκές ή έγχρωμες δίοδοι εκπομπής (LEDs) προβλέπεται να αντικαταστήσουν τις υψηλά ενεργειακές λάμπες φωτός σε ιδιωτικούς, επιχειρησιακούς χώρους και σε οδούς. Επίσης, αναμένεται να χρησιμοποιούνται ευρέως σε ειδικά φωτισμένους χώρους όπως μουσεία και περιοχές με μεγαλύτερες απαιτήσεις φωτισμού όπως σε εξωτερικούς χώρους, τρένα ή αεροπλάνα. Το κόστος τους καθίσταται μικρότερο. Οι δίοδοι (LEDs) που χρησιμοποιούνται στις οπτικές επικοινωνίες (VLC) είναι συσκευές υψηλής απόδοσης. Χρησιμοποιούν τουλάχιστον 75% λιγότερη ενέργεια και έχουν διάρκεια ζωής 25 φορές μεγαλύτερη, από αυτή του συμβατικού φωτισμού πυρακτώσεως. Σύμφωνα με εκτιμήσεις, η ευρεία χρήση των διόδων (LEDs) έως το 2027 μπορεί να εξοικονομήσει περίπου 348 TerraWatt/ώρα ηλεκτρικής ενέργειας. Πρόκειται για ένα τεράστιο ποσό ενέργειας, που ισοδυναμεί με ετήσια ηλεκτρική παραγωγή, αντίστοιχη με αυτή 44 μεγάλων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι παρέχεται η δυνατότητα για ταυτόχρονη χρήση των διόδων (LEDs) για φωτισμό και επικοινωνία. Η ιδέα της ταυτόχρονης χρήσης των διόδων (LEDs) για φωτισμό και επικοινωνία, που ονομάζεται ilight, επανεμφανίστηκε μέσω των λευκών και έγχρωμων διόδων (LEDs) που παρέχουν ένα σημαντικό εύρος ζώνης διαμόρφωσης γύρω στα 20MHz.

Όλα αυτά τα οφέλη ευνοούν την χρήση υψηλής φωτεινότητας (High-Brightness Light-emitting diodes - HB-LEDs) ως επικοινωνιακές συσκευές. Πρόσφατοι κανονισμοί υγείας περιορίζουν την απεριόριστη ισχύ όσον αφορά τα επίπεδα φωτισμού. Τα VLC συστήματα έχουν πλεονεκτήματα, που γίνονται πιο εμφανή όταν συνδυάζονται με εναλλακτικές τεχνολογίες επικοινωνίας. [3]

1.2 Συγκρίσεις των VLC συστημάτων με άλλες μορφές επικοινωνίας

1.2.1 Σύγκριση των VLC συστημάτων με επικοινωνίες υπερύθρων IR

Τα VLC συστήματα έχουν δύο σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των IR. Το ένα αφορά σε θέματα ασφάλειας και το άλλο αφορά στην ευκολία ανάπτυξης. Οι περισσότερες από τις διόδους εκπομπής υπερύθρων, χρησιμοποιούν την περιοχή μήκους κύματος 800-960 nm. Η ακτινοβολία αυτών των μηκών κύματος, είναι επικίνδυνη σε περίπτωση άμεσης επαφής με τους οφθαλμούς (κίνδυνος αθερμικού αμφιβληστροειδούς, θερμική βλάβη του κερατοειδούς, καταρράκτης). Ως εκ τούτου, η ισχύς μετάδοσης για τις υπέρυθρες συσκευές περιορίζεται από τα πρότυπα ασφαλείας (βάσει της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Επιτροπής (International Electrotechnical Commission - IEC), γεγονός που δεν συμβαίνει

για τα συστήματα VLC που χρησιμοποιούν το ορατό φάσμα. Οι πομποί VLC είναι άμεσα διαθέσιμοι, λόγω χρήσης LEDs. Επιπλέον, τεχνολογίες όπως οι PLC, επιτρέπουν τη χρήση της υπάρχουσας υποδομής φωτισμού ως back-haul, σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Για νέες εγκαταστάσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν νέες τεχνολογίες όπως η Power over Ethernet (PoE). Τέλος, συγκρίνοντας με την επικοινωνία υπερύθρων, οι επικοινωνίες VLC εσωτερικού χώρου μπορούν να χρησιμοποιήσουν υψηλότερη ισχύ ακτινοβολίας με υψηλότερη ποιότητα υπηρεσιών δεδομένου ότι το φως είναι ορατού φάσματος.

1.2.2 Σύγκριση της επικοινωνίας VLC με την επικοινωνία ραδιοσυχνοτήτων (Radio Frequency – RF)

Παρόλο που οι επικοινωνίες RF και VLC χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητικά κύματα, έχουν πολύ διαφορετικές εγγενείς ιδιότητες. Το ορατό φως δεν παρεμβαίνει στις ηλεκτρονικές συσκευές, όπως κάνουν τα κύματα ραδιοσυχνοτήτων RF. Επομένως, η VLC μπορεί να είναι πιο κατάλληλη για εφαρμογές όπου χρησιμοποιούνται ευαίσθητες ηλεκτρονικές συσκευές, όπως σε Νοσοκομεία, χημικά εργοστάσια και αεροπλάνα. Πρόσφατες μελέτες δείχνουν ότι περισσότερο από το 70% της ασύρματης κίνησης προέρχεται από εσωτερικούς χώρους. Παρόλο που τα κύματα RF διεισδύουν στους τοίχους, η διάδοση του σήματος υποβαθμίζεται. Αφενός, η εξασθενημένη διάδοση περιορίζει τη ροή δεδομένων των χρηστών. Αφετέρου, εφόσον η μετάδοση δεν περιορίζεται αυστηρά στον επιδιωκόμενο χώρο, η ασφάλεια των συνδέσμων μπορεί να διακυβευτεί από την υποκλοπή κακόβουλων χρηστών. Η VLC παρέχει τις απαντήσεις και στα δύο προβλήματα. Δεδομένου ότι τα περισσότερα εσωτερικά περιβάλλοντα φωτίζονται, η VLC μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη κάλυψη. Δεδομένου ότι το ορατό φως δεν μπορεί να διεισδύσει στους τοίχους, οι σύνδεσμοι μπορούν να παραμείνουν ασφαλείς.

Παρόλα αυτά, τα συστήματα VLC μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συμπληρωματικά των RF και όχι ως ανταγωνιστικός τρόπος επικοινωνίας. Για παράδειγμα, σε ένα ασύρματο τοπικό δίκτυο που χρειάζεται να καλύψει μία μεγάλη περιοχή, όπου οι χρήστες μπορούν να περιφέρονται ελεύθερα εντός και εκτός ενός κτηρίου, παραμένοντας συνδεδεμένοι όλες τις ώρες, η RF επικοινωνία είναι η καλύτερη επιλογή. Εάν ένα τοπικό δίκτυο απαιτείται για να καλύψει μία σχετικά μικρή περιοχή, η υπηρεσία παρέχεται τοπικά σε ένα δωμάτιο, με υψηλές ταχύτητες διάδοσης (πχ για τηλεδιάσκεψη, ψηφιακή τηλεόραση), τότε πρέπει να χρησιμοποιηθεί η οπτική μετάδοση με σχεδόν απεριόριστο εύρος ζώνης. Ταυτόχρονα το φάσμα των RF μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλες εφαρμογές. [4]

1.2.3 Σύγκριση VLC με μικροκυψέλες και ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous networks – HetNets)

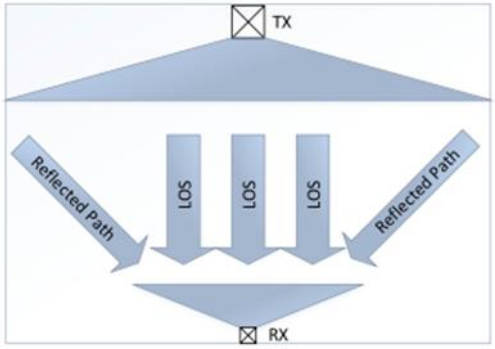
Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων υφίσταται χωρική επαναχρησιμοποίηση για την μεγαλύτερη δυνατή αύξηση της απόδοσης φάσματος. Νέες προσεγγίσεις όπως οι μικροκυψέλες και τα ετερογενή δίκτυα (Heterogeneous network – HetNets), θεωρούνται το μέλλον των κινητών επικοινωνιών. Ένα HetNet είναι ένα ετερογενές δίκτυο που

υποστηρίζει 3G ή 4G τεχνολογίες επικοινωνίας, back-haul και μικρότερης εμβέλειας επικοινωνίες, όπως το Wi-Fi τοπικού δικτύου. Λόγω της μείωσης του μεγέθους των κυψελών, μέχρι το 2007, η φασματική απόδοση του συστήματος αυξήθηκε κατά ένα παράγοντα 2700, σε σύγκριση με 50 χρόνια νωρίτερα. Λόγω της υψηλής κατευθυντικότητας και του ευκολότερου περιορισμού του ορατού φωτός, είναι δυνατή η χρήση μικρότερων κυψελών VLC (attocells), που παρέχουν εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη αύξηση χωρητικότητας. Ένα αποδοτικό HetNet, θα πρέπει να χρησιμοποιεί τον καταλληλότερο σύνδεσμο για κάθε συγκεκριμένη εργασία, π.χ. συνδέσεις οπτικών ινών για σύνδεση υψηλής ταχύτητας backhaul. Οι συνδέσεις RF υποστηρίζουν την κινητικότητα, παρέχουν ευρεία κάλυψη και οι VLC μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν απαιτούνται υψηλά ποσοστά δεδομένων και ασφαλής επικοινωνία. Προς αυτή την κατύθυνση, η VLC εξελίσσεται προς ένα νέο πρότυπο που ονομάζεται Li-Fi (Light Fidelity) για να συμπληρώσει τα ασύρματα δίκτυα Wi-Fi (Wireless Fidelity). [3]

1.2 Εφαρμογές VLC

Εσωτερικού χώρου

Η VLC απαιτεί υψηλές τιμές απόδοσης SNR, για εφαρμογές υψηλού ρυθμού δεδομένων. Συνεπώς, απαιτούνται διαδρομές απευθείας διάδοσης LOS για το μεγαλύτερο μέρος των εφαρμογών. Ως εκ τούτου, η μοντελοποίηση καναλιών VLC, θεωρεί άμεση LOS και διάδοση από την πρώτη ανάκλαση όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3. Σε αρχικές μελέτες επικοινωνίας εσωτερικού χώρου (indoor VLC), θεωρούνταν μοντέλα καναλιών βασισμένα στο μοντέλο έντασης Lambertian, που αναπτύχθηκε για επικοινωνίες (Infrared radiation - IR). Ωστόσο, τα IR μοντέλα καναλιών επικοινωνίας δεν λαμβάνουν υπόψη την εξάρτηση από το μήκος κύματος στις ανακλάσεις, λόγω του στενού εύρους των πηγών φωτός IR. Από μελέτες έχει αποδειχθεί όμως ότι υπάρχει εξάρτηση των ανακλάσεων στο ορατό φάσμα από το μήκος κύματος. Με αυτό το σκοπό, προτείνεται ένα μοντέλο καναλιού όπου μοντελοποιείται η φασματική ανακλαστικότητα στο ορατό φάσμα, για την εκτίμηση πιο ρεαλιστικών χαρακτηριστικών καναλιών, για λευκές λυχνίες LED φωσφόρου. Ως εκ τούτου, η ανάπτυξη ρεαλιστικών μοντέλων καναλιών για άλλα είδη LED είναι σημαντική ανοιχτή έρευνα, δεδομένου ότι η φασματική κατανομή ισχύος των (Red Green Blue LED - RGB LED) διαφέρει σε σύγκριση με τις λευκές λυχνίες LED.



Σχήμα 1.3. VLC διαδρομές διάδοσης φωτός [2].

Ένα άλλο σημαντικό ζήτημα στη μοντελοποίηση καναλιών είναι το μοντέλο του θορύβου στο σύστημα. Η πιο σημαντική πηγή του θορύβου σε συστήματα VLC είναι ο θόρυβος βολής (shot noise) (σ^2_{shot}) που προκαλείται από το φως του περιβάλλοντος. Ο θόρυβος βολής στη VLC παρουσιάζει κατανομή λευκού θορύβου. Απουσία θορύβου περιβάλλοντος, η βασική πηγή θορύβου είναι ο θερμικός θόρυβος στον δέκτη (thermal noise) ($\sigma^2_{thermal}$). Τελικά, ο θόρυβος μαζί με τις παρεμβολές στις VLC επικοινωνίες μπορεί να δοθεί ως:

$$N = \sigma^2_{shot} + \sigma^2_{thermal} + \gamma^2 P^2_{rISI} \quad (1)$$

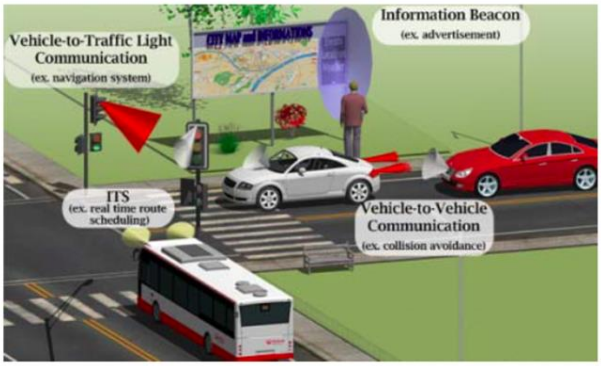
όπου γ είναι η απόκριση του ανιχνευτή και το P_{rISI} είναι η ισχύς του (Inter Symbol Interference – ISI). Χρήσει υψηλών δεδομένων το σύστημα VLC επικεντρώνεται σε εσωτερικές εφαρμογές, γιατί θα υπάρξει σημαντικός θόρυβος βολής στο εξωτερικό περιβάλλον, λόγω ηλιακού φωτός.[3]

Εξωτερικού χώρου

Οι εφαρμογές VLC εξωτερικού χώρου, αφορούν τη χρήση λαμπτήρων στο οδικό δίκτυο, για την εκπομπή δεδομένων και τις εφαρμογές επικοινωνίας από οχήμα σε όχημα. Για τη μετάδοση δεδομένων με χρήση λαμπτήρων οδικού δικτύου, ισχύουν τα ίδια όπως στη μοντελοποίηση καναλιού εσωτερικού χώρου VLC, αλλά η συνιστώσα ανακλώμενου σήματος έχει σημαντικά χαμηλότερη επίδραση στις εξωτερικές εφαρμογές λόγω μεγαλύτερων αποστάσεων. Για εφαρμογές VLC από οχήμα σε οχήμα, φώτα αυτοκινήτων (φρένα και προβολείς) ή φανάρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εκπομπή πληροφοριών και κάμερες υψηλής ταχύτητας που χρησιμοποιούνται ως δέκτες. Ωστόσο, δεν υπάρχει θεωρητικό κανάλι για εφαρμογές VLC οχημάτων που να εξετάζει την ταχύτητα των οχημάτων και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες όπως η βροχή, το χιόνι και η ομίχλη. Επιπλέον, οι υπαίθριες εφαρμογές έχουν σημαντικό θόρυβο βολής από τον ήλιο κατά τη διάρκεια της ημέρας. Ως εκ τούτου, η αξιοπιστία αυτών των συνδέσεων ανάλογα με τη στιγμή της ημέρας και τις εκάστοτε ατμοσφαιρικές συνθήκες, είναι σημαντικός τομέας για περαιτέρω διερεύνηση. [3]

Τα VLC συστήματα εξωτερικού χώρου είναι πολύ σημαντικά [5]. Παραδείγματα χρήσης τους είναι τα έξυπνα συστήματα μετακίνησης (Intelligent Transportation System - ITS), οι

εφαρμογές ασφαλούς οδήγησης κλπ. Η μετάδοση διαφορετικών πληροφοριών κυκλοφορίας (Σχ. 1.4) από LED πλησιέστερου οχήματος σε συνδυασμό με σύστημα δέκτη VLC, μπορεί να μειώσει τα οδηγικά ατυχήματα. Επιπλέον, τέτοιες πληροφορίες θα συμβάλλουν στη ρύθμιση ομαλής ροής των οχημάτων. Ένα οπτικό σήμα κίνησης, μπορεί να αναμεταδώσει ακουστική πληροφορία κίνησης, βοηθώντας τους πεζούς ή ανθρώπους με αναπηρία να είναι ενήμεροι για την κίνηση. Άλλη εφαρμογή μπορεί να είναι η επικοινωνία μεταξύ των οχημάτων χρησιμοποιώντας φώτα πρόσθια, πίσω ή πλαϊνά, ή φώτα ένδειξης παρκαρίσματος (Σχ. 1.4).



Σχήμα 1.4. VLC εφαρμογές εξωτερικού χώρου [5]

Σε χώρους στάθμευσης, τα συστήματα στάθμευσης LED μπορούν να μεταδίδουν τον αριθμό διαθέσιμων θέσεων σε κάθε πύλη εισόδου και σε όχημα που φτάνει στο χώρο στάθμευσης. Τα συστήματα VLC έχουν σημαντική εφαρμογή στην αεροπορία, όπου χρησιμοποιείται εκατοντάδες χιλιόμετρα φυσικό σύρμα και θα μπορούσε να αντικατασταθεί.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται συστήματα ιεραρχικής μετάδοσης και είναι απαραίτητη η λήψη δεδομένων υψηλής προτεραιότητας. Έχει προταθεί η παράλληλη επικοινωνία στις VLC [6]. Προτείνεται ένα σύστημα που να χρησιμοποιεί κάμερα υψηλής ταχύτητας. Στο σύστημα αυτό, η λήψη δεδομένων γίνεται από τον πομπό με την υψηλής ταχύτητας κάμερα.

1.3 Αρχιτεκτονική των VLC επικοινωνιών

Στο σχήμα 1.5, παρουσιάζεται μια πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική για το μοντέλο αναφοράς επικοινωνίας VLC [7]. Η αρχιτεκτονική πρωτοκόλλου αναφοράς, ακολουθεί το μοντέλο αναφοράς (International Organization for Standardization) / (Open Systems Interconnection model) ISO/OSI.

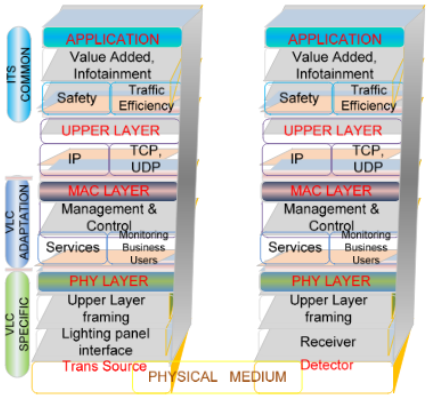
Η αρχιτεκτονική των VLC μπορεί να χωριστεί σε τρία κύρια μέρη:

i) Το VLC specific: φυσικό επίπεδο διάδοσης, διεπαφή πίνακα φωτισμού, δέκτη και διόρθωση σφάλματος, πλαισίωση του ανώτερου στρώματος.

ii) Το επίπεδο προσαρμογής VLC: έλεγχο και διαχείριση στρώματος MAC (media access control), υπηρεσίες και παρακολούθηση.

iii) Το ανώτερο στρώμα (Transmission Control Protocol – TCP), (Internet Protocol - IP) και τις εφαρμογές.

Κάθε στρώμα είναι υπεύθυνο για την εκτέλεση συγκεκριμένων εργασιών και για να προσφέρει υπηρεσίες στα υψηλότερα επίπεδα.
i) Το φυσικό επίπεδο ορίζει τις ηλεκτρικές και φυσικές προδιαγραφές των συσκευών. Οι λειτουργίες και οι υπηρεσίες αυτού του στρώματος είναι η δημιουργία και ο τερματισμός μιας σύνδεσης σε ένα μέσο επικοινωνίας. Το φυσικό επίπεδο μπορεί να χωριστεί σε δύο υποστρώματα:
•Το κατώτερο στρώμα, περιλαμβάνει πηγή φωτός και panel φωτισμού. Το μέσο επικοινωνίας (φως) παρέχει (line of sight – LoS) επικοινωνία στο ορατό φάσμα.
•Το ανώτερο στρώμα είναι υπεύθυνο για την δημιουργία πλαισίων, τη διαμόρφωση και τη διαχείριση σφαλμάτων. Η γραμμή κωδικοποίησης όπως οι 4B5B, 4B6B, NRZ, Manchester μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με το δεδομένα που πρέπει να μεταδοθούν.



Σχ.1.5 Αρχιτεκτονική VLC Μοντέλου Αναφοράς [7].

ii)Το υπο-στρώμα πρωτοκόλλου επικοινωνίας δεδομένων (Media access control – MAC), παρέχει διευθυνσιοδότηση και μηχανισμούς ελέγχου καναλιών πρόσβασης, που καθιστούν δυνατή τη σύνδεση πολλών τερματικών. Το στρώμα MAC διαχειρίζεται όλη την πρόσβαση στο φυσικό κανάλι ορατού φωτός και υποστηρίζει διαφορετικές εφαρμογές. Πρέπει να υποστηρίξει: ορατότητα, φωτισμό, ρύθμιση φωτεινότητας, ασφάλεια και άλλα σχετικά θέματα. Πρέπει να υποστηρίζονται διαφορετικοί τρόποι μετάδοσης δεδομένων, όπως: η μονότροπη μετάδοση, (μονάδα δεδομένων μονού πακέτου (power distribution unit - PDU), τρόπος μετάδοσης σε ριπές, μετάδοση με πακέτα (μονάδα πολλαπλών δεδομένων).

Το υποσύστημα MAC αληλεπιδρά με το ανώτερο στρώμα μέσω διαδικασιών ελέγχου και σηματοδοσίας δεδομένων. Το υποσύστημα MAC εκτελεί διάφορες λειτουργίες, συμπεριλαμβανομένης της ταξινόμησης και της διανομής ελέγχου και πακέτων δρομολόγησης, με σκοπό τη διασύνδεση με το ανώτερο στρώμα. Το υποσύστημα MAC πρέπει να παρέχει διαχείριση και επικύρωση πλαισίων, που να αφορούν τον τρόπο εκπομπής.

Ένα υποσυστήμα μπορεί να προσφέρει υπηρεσίες κατ᾽ απαίτηση. Για το σκοπό αυτό, το στρώμα παρακολουθεί και αλληλεπιδρά με το περιβάλλον και με τις μονάδες RSU (remote switching units). Το επιχειρηματικό επίπεδο συλλέγει, επεξεργάζεται και

αποθηκεύει πληροφορίες από πολλές διαφορετικές πηγές. Επιπλέον, πρέπει να παρέχει κατάλληλους μηχανισμούς ασφάλειας.
iii) Το ανώτερο στρώμα περιλαμβάνει TCP/UDP/άλλα, πρωτόκολλο διαδικτύου (Internet Protocol - IP) και την εφαρμογή. Τα TCP και IP πρωτόκολλα προσφέρουν ένα στρώμα που ενοποιεί διάφορες φυσικές τεχνολογίες επικοινωνίας και διάφορες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά περιβάλλοντα. Ένα στρώμα εγκατάστασης, χρησιμοποιείται για υποστήριξη επικοινωνίας, εφαρμογών, υπηρεσίες κλπ. Επιπλέον, ένα επίπεδο εφαρμογών, χρησιμοποιείται για την παροχή σχετικής ασφάλειας και πρόσθετων εφαρμογών. Ένα επίπεδο ασφαλείας παρακολουθεί, ταυτοποιεί άλλες υπηρεσίες και εφαρμογές, ενώ το επίπεδο διαχείρισης και ελέγχου, είναι απαραίτητο για το μοντέλο αναφοράς, ώστε να παρέχεται κατάλληλος έλεγχος και λειτουργία διαφόρων υποσυστημάτων.[7]

1.4 Το οπτικό ασύρματο κανάλι

Στο σύστημα επικοινωνίας ορατού φωτός, η τεχνική διαμόρφωσης/ αποδιαμόρφωσης είναι διαμόρφωση έντασης και άμεσης ανίχνευσης. Το μοντέλο οπτικού ασύρματου καναλιού εμφανίζεται στην εξίσωση (2). Η μεταφερόμενη κυματομορφή X(t) είναι η στιγμιαία οπτική ισχύς του πομπού. Η λαμβανόμενη κυματομορφή Y(t) είναι το στιγμιαίο ρεύμα στον ανιχνευτή, το οποίο είναι ανάλογο με την λαμβανόμενη στιγμιαία ισχύ. Μπορεί να θεωρηθεί ότι ο θόρυβος είναι πρόσθετικος λευκός Γκαουσιανός θόρυβος (Additive white Gaussian noise - AWGN).

$$Y(t) = RX(t) \otimes h(t) + N(t) \qquad (2)$$

όπου R η απόκριση ανιχνευτή (A/W), h(t) η κρουστική απόκριση, N(t) αντιπροσωπεύει το AWGN, και το σύμβολο $\otimes$ σημαίνει συνέλιξη. Επειδή η είσοδος καναλιού X(t) αντιπροσωπεύει την στιγμιαία οπτική ισχύ, η είσοδος του καναλιού πρέπει να είναι μη αρνητική:

$$X(t) \geq 0 \qquad (3)$$

και η μέση οπτική ισχύς P_t δίνεται από:

$$Pt = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} X(t) dt \qquad (4)$$

Η μέση ληφθείσα οπτική ισχύς είναι:

$$P_r = H(0) P_t \qquad (5)$$

όπου H(0) είναι το κέρδος DC του καναλιού. [3, 5]

1.5 Λειτουργικές απαιτήσεις

Η ατμοσφαιρική απόσβεση των οπτικών σημάτων και οι απρόβλεπτες καιρικές συνθήκες περιορίζουν την απόσταση και επηρεάζουν την διαθεσιμότητα του δικτύου. Επιπλέον, ο υψηλός θόρυβος περιβάλλοντος υποβαθμίζει το λόγο SNR στα VLC συστήματα, καθιστώντας δύσκολη την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων σε μακρινές αποστάσεις.

Η αποτυχία απευθείας διάδοσης Line-of-Sight (LOS) ειναι πολύ συχνή κατά τη διάδοση δεδομένων στο οδικό δίκτυο, λόγω του εκπεμπόμενου φωτός μεταξύ σηματοδότη κυκλοφορίας και οχήματος, είτε μεταξύ εκπεμπόμενου φωτός μεταξύ των οχημάτων. Για την αντιμετώπιση αυτού, το μπροστινό όχημα μπορεί να αναμεταδίδει τις πληροφορίες στο όχημα πίσω, μέσω του σηματοδότη. Είναι επίσης πιθανό να διατηρηθεί η απευθείας διάδοση LOS τοποθετώντας επιπλέον σηματοδότες στα δεξιά του δρόμου, τα οποία επίσης ελέγχονται κεντρικά. Αυτή η ρύθμιση παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες εκπομπής στον δέκτη και στα δύο ρεύματα κυκλοφορίας, βελτιώνοντας την ισχύ του σήματος. Στο VLC σύστημα η λαμβανόμενη ισχύς είναι ένας άλλος παράγοντας επιρροής στην απόδοση. Προϋπόθεση χρήσης των LEDs σε εξωτερικό περιβάλλον, είναι η αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων.

Οι δυσκολίες της μετάδοσης πληροφορίας μέσω VLC συστήματος στην περίπτωση μεγάλων αποστάσεων αφορούν στην περιορισμένη επιφάνεια του δέκτη (περιορισμός φωτεινότητας, ισχύος, απόδοσης φωτεινότητας) και τις παραμέτρους που αφορούν το κανάλι. Για αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων, ένα σύστημα επικοινωνίας πρέπει να υποστηρίξει ρυθμό εσφαλμένων bit, (Bit Error Rate – BER)$<10^{-6}$ [3].

1.7 Προβλήματα και μέθοδοι επίλυσης VLC επικοινωνιών

1.7.1 Αντιστάθμιση επίδρασης του θορύβου

Εκτός από τον περιορισμό που επιβάλλεται από τις οπτοηλεκτρονικές συσκευές (όπως τις διόδους LED) και τις φωτοδιόδους (photodiodes - PD), η εφαρμογή ενός VLC συστήματος επηρεάζεται έντονα από πολλαπλές πηγές θορύβου είτε φυσικές (όπως το φως του ήλιου, φεγγαριού), είτε τεχνητές (όπως τα φώτα των οδών και των δρόμων, τα φώτα των οχημάτων κ.α). Φυσικές και τεχνητές πηγές φωτός παράγουν συγκεκριμένη ποσότητα πυκνότητας οπτικής ισχύος υποβάθρου ή ακτινοβολίας που υποβαθμίζει την απόδοση του οπτικού δέκτη.

Οι επιδράσεις της ακτινοβολίας υποβάθρου εκδηλώνονται σε δύο διαφορετικές μορφές: ως θόρυβος βολής που εισάγεται στην φωτοδίοδο του δέκτη, από μία σταθερή ακτινοβολία υποβάθρου και ως παρεμβολή που εισάγεται από μεταβολές στον χρόνο της ίδιας ακτινοβολίας. Ο θόρυβος έιναι ανάλογος με την ποσότητα του φωτός που φτάνει στον ανιχνευτή, δηλαδή είναι μία συνάρτηση της μέσης οπτικής ισχύος.

Ο θόρυβος που προκύπτει από το ηλιακό φως μπορεί να θεωρηθεί σταθερός με χαμηλής έντασης μεταβολές στον χρόνο. Ο τεχνητός θόρυβος περιβάλλοντος προέρχεται από πολλαπλές πηγές: φθορίζουσες λάμπες, λάμπες πυρακτώσεως που λειτουργούν με την βοήθεια συμβατικών πηνίων και φθορίζουσες λάμπες που λειτουργούν με

ηλεκτρονικά πηνία. Φυσικά αυτές αναφέρονται ως σταθερός θόρυβος και μπορεί να θεωρηθεί Gaussian και σχεδόν λευκός. Η χρήση οπτικών φίλτρων, μειώνει τον θόρυβο που προέρχεται από το φως περιβάλλοντος. Η σταθερή ακτινοβολία περιβάλλοντος που παράγεται από φυσικό και τεχνητό φως συνήθως χαρακτηρίζεται από ένα συνεχές ρεύμα που εισάγεται από την φωτοδίοδο του δέκτη οι οποία είναι ευθέως ανάλογη με το ρεύμα.

Αυτό το ρεύμα αναφέρεται ως ρεύμα θορύβου υποβάθρου. Το παρεμβαλλόμενο σήμα που παράχθηκε από λάμπες πυρακτώσεως είναι τέλεια ημιτονοειδές, με μία συχνότητα των 100Hz. Επιπλέον, μόνο η πρώτη αρμονική (πάνω από 2KHz) φέρει μία σημαντική ποσότητα ενέργειας και για συχνότητες >800Hz όλα τα στοιχεία είναι 60dB κάτω από το θεμελιώδες. Έτσι με τη χρήση ηλεκτρικά υψιπερατού φίλτρου αυτή η παρεμβολή μπορεί να εξαλειφθεί χωρίς μεγάλο υποβιβασμό σήματος.

Για φθορίζουσες λάμπες συμβατικών πηνίων που οδηγούνται με ισχύ 50 ή 60 Hz, εισάγονται παρεβολές στις αρμονικές πάνω από 50KHz. Αυτό μπορεί να εξαλειφθεί με προσεκτική επιλογή συγκεκριμένου τύπου διαμόρφωσης, έτσι ώστε να επιβεβαιωθεί ότι δεν υπάρχουν συνιστώσες χαμηλών συχνοτήτων ή επίσης να εξαλειφθεί μέσω ενός ηλεκτρικά υψιπερατού φίλτρου. Για λάμπες φθορισμού, ηλεκτρονικών πηνίων, η διαμόρφωση συχνότητας των πηνίων είναι 35KHz. Έτσι, εισάγονται αρμονικές παρεμβολών που επεκτείνονται πάνω από 1MHz. Αυτό δεν μπορεί να φιλτραριστεί εύκολα. Σε περίπτωση επικάλυψης παρεμβολών του φάσματος σήματος, χρειάζεται να αναπτυχθούν εξειδικευμένοι αλγόριθμοι επεξεργασίας ψηφιακού σήματος. Παρότι φαίνεται ότι η επίδραση του τεχνητού και του φυσικού φωτός μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με την χρήση κατάλληλα ηλεκτρικών ή έγχρωμων φίλτρων, οι τεχνικές διαμόρφωσης δυσκολεύονται να επιτύχουν αυτό το στόχο.[1]

Επομένως, η απόδοση των συστημάτων μειώνεται λόγω του θορύβου που εισέρχεται στην είσοδο του δέκτη και χειροτερεύει ο λόγος σήματος προς θόρυβο (SNR) του οπτικού συνδέσμου, [8], [9]. Ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο που αυξάνει το θόρυβο ενός συστήματος VLC είναι ο οπτικός θόρυβος υποβάθρου, με την κύρια πηγή να είναι η ακτινοβολία του ήλιου που είναι δύσκολο να αποφευχθεί. Στα χαμηλής εντάσεως φώτα από το περιβάλλον, το λαμβανόμενο σήμα μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μια διαδικασία Poisson, με ρυθμό $\lambda_r(t) = \lambda_s(t) + \lambda_n(t)$, όπου το λ_s και το λ_n είναι ανάλογα της οπτικής ισχύος του λαμβανόμενου σήματος και της ισχύος του περιβάλλοντος φωτός.

Η παραπάνω παραδοχή δεν ισχύει για τα συστήματα VLC σε εξωτερικό περιβάλλον, λόγω παρουσίας υψηλού θορύβου περιβάλλοντος. Το λ_n είναι συνήθως πολύ υψηλό, συνεπώς ο θόρυβος βολής της φωτοδιόδου μπορεί να μοντελοποιηθεί ως προσθετικός λευκός Gaussian θόρυβος. Με περισσότερη ακρίβεια, ο θόρυβος μπορεί να μοντελοποιηθεί, θεωρώντας διαφορετικές πηγές φωτός. Επομένως, Lambertian πομπός μπορεί να υποτεθεί.

1.8 Κατάλληλα φίλτρα στον δέκτη

Το πρόβλημα του θορύβου από το φως του ήλιου ή τις άλλες τεχνητές πηγές φωτός μπορεί να λυθεί αλγοριθμικά ή και τεχνητά. Ένας τεχνητός τρόπος είναι η τοποθέτηση ενός κατάλληλου φίλτρου στον δέκτη. Γνωρίζοντας ότι η απόδοση SNR στον δέκτη

μπορεί να υπολογιστεί από τον θόρυβο βολής και τον θερμικό θόρυβο του κυκλώματος του ανιχνευτή και κάνοντας τις κατάλληλες αντικαταστάσεις, λαμβάνεται η έμμεση εξάρτηση του SNR από τα όρια λ_1, λ_2 ενός επιθυμητού ζωνοπερατού φίλτρου στο δέκτη. Άρα, ένα φίλτρο με κατάλληλα όρια φάσματος ισχύος του θορύβου που περικλείει, μπορεί να δώσει σήμα μεγαλύτερης ακρίβειας απαλλαγμένο από κάποιο ποσό θορύβου και άρα να μεγαλώσει ο λόγος σήματος προς θόρυβο στον δέκτη.

1.8.1 Ιδιότητες διοξειδίου του βαναδίου VO_2 και χρήση του ως ένα οπτικό φίλτρο

Σε αυτή την εργασία εστιάζοντας στο φυσικό επίπεδο, η τεχνική για τη μείωση της επίδρασης του θορύβου υποβάθρου είναι η εφαρμογή ενός οπτικού φίλτρου VO_2 στη φωτοδίοδο του δέκτη προκειμένου να μειωθεί η ληφθείσα περιοχή μήκους κύματος που δεν χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων. Η βελτίωση της απόδοσης SNR του φίλτρου οπτικής ζώνης VO_2 που εφαρμόζεται στον δέκτη ενός συστήματος VLC εκτιμάται από θεωρητικούς υπολογισμούς βασισμένους σε πειραματικά αποτελέσματα. Το οπτικό φίλτρο VO_2 αποτελείται από ένα λεπτό υμένιο διοξειδίου του βαναδίου πάνω σε διαφανές υπόστρωμα. Λειτουργεί με την ανάκλαση ανεπιθύμητων μηκών κύματος που οφείλεται στην μετάβαση μετάλλου μονωτή (MIT) του υλικού που συνοδεύεται από μεταβολή της δομής του VO_2, δηλαδή αλλαγή του πλέγματος του VO_2 από τετραγωνικό σε μονοκλινές.

Η μετάβαση μετάλλου-μονωτή (MIT) ή μετάλλου-ημιαγωγού (MST) του VO_2 ονομάζεται η μεταβολή της θερμοκρασιακής εξάρτησης της ηλεκτρικής αντίστασης μιας στερεάς ουσίας από μεταλλική ($d\rho/dT>0$) σε ημιαγώγιμη ($d\rho/dT<0$) και αντίστροφα, μεταβαλλόμενης μιας εξωτερικής παραμέτρου. Η παράμετρος αυτή ονομάζεται “παράμετρος ελέγχου” της μετάβασης. Η πλέον συνήθης παράμετρος ελέγχου μιας MIT είναι η θερμοκρασία. Έχουν βρεθεί όμως μεταβάσεις MIT με παράμετρο ελέγχου το μαγνητικό πεδίο (B), την εξωτερική πίεση (P), το ηλεκτρικό πεδίο (E) ή την χημική σύσταση μιας ένωσης (X). [10, 11, 12].

Σε σύγκριση με τα διχρωϊκά φίλτρα, το VO_2 είναι ένα μόνο στρώμα και αυτό κάνει την κατασκευή του φίλτρου VO_2 απλούστερη και οικονομικά βιώσιμη. Ένα φίλτρο παρεμβολής ή διχρωϊκό φίλτρο είναι ένα οπτικό φίλτρο που αντανακλά μία ή περισσότερες φασματικές ζώνες ή γραμμές και μεταδίδει άλλες, ενώ διατηρεί σχεδόν μηδενικό συντελεστή απορρόφησης για όλα τα μήκη κύματος ενδιαφέροντος. Ένα φίλτρο παρεμβολής μπορεί να είναι υψιπερατό, χαμηλοπερατό ή ζωνοπερατό φίλτρο. Αποτελείται από πολλαπλά λεπτά στρώματα διηλεκτρικού υλικού με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης ενώ είναι επιλεκτικό ως προς το μήκος κύματος, λόγω των επιδράσεων παρεμβολής που συμβαίνουν μεταξύ των προσπίπτοντων και των ανακλώμενων κυμάτων στα όρια των λεπτών μεμβρανών. Επομένως, με βάση τα παραπάνω το VO_2 συστήνεται ως ένα πιο απλό στην κατασκευή και την λειτουργία του οπτικό φίλτρο.

1.9 Υπολογισμός λειτουργίας οπτικού φίλτρου [13]

Αρχικά κανείς μπορεί να υποθέσει ότι η πηγή φωτός ενός συστήματος είναι μία λευκή πηγή LED RGB, ενώ μόνο το κόκκινο χρώμα χρησιμοποιείται για τη μετάδοση δεδομένων. Η φωτοδίοδος του δέκτη υποτίθεται ότι είναι σε θέση να λαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος. Επίσης μπορεί να υποτεθεί ότι η σειρά εκπομπής κάθε πομπού είναι Lambertian, m, και καθορίζεται ως [9],[14],[15]:

$$m = -\frac{ln2}{\ln[\cos(\varphi_s)]} \qquad (6)$$

όπου ϕ_s είναι η γωνία μισής ισχύος. Επιπλέον, σε μια άμεση οπτική ζεύξη, το κέρδος DC του καναλιού δίνεται ως [9],[14],[15]:

$$H_0 = A\frac{m+1}{2\pi d^2} cos^m(\varphi) T_s(\psi)\cos(\psi)\, g(\psi) \quad for\ 0 \le \psi \le \psi_c \qquad (7)$$

όπου A είναι η φυσική περιοχή της φωτοδιόδου του ανιχνευτή, d είναι η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη, ϕ και ψ είναι η γωνία πρόσπτωσης και η κανονικοποιημένη ακτινοβολία αντίστοιχα. Το Ts (ψ) είναι το κέρδος του οπτικού φίλτρου διοξειδίου του βαναδίου (Vanadium dioxide - VO_2) ενώ το ψ_c αντιπροσωπεύει το πλάτος του οπτικού πεδίου (FOV) στη φωτοδίοδο του δέκτη. Η παράμετρος g(ψ) είναι το κέρδος ενός οπτικού συμπυκνωτή και ορίζεται ως [9],[14],[15]:

$$g(\psi) = \frac{v^2}{sin^2(\psi)} \quad for\ 0 \le \psi \le \psi_c \qquad (8)$$

όπου ν αντιπροσωπεύει τον δείκτη διάθλασης. Και τα H_0 και g(ψ) είναι 0 όταν ψ≥ψc. Υποθέτοντας ότι η οπτική ισχύς του πομπού είναι P_t, η ισχύς στον δέκτη είναι [9],[14],[15]:

$$Pr = Pt\ A\frac{m+1}{2\pi d^2}\ cos^m(\varphi) T_s(\psi)\cos(\psi)\, g(\psi) \qquad (9)$$

όπου $T_s(\psi)$ το κέρδος του οπτικού φίλτρου VO_2 ενώ το Ψ_c αντιπροσωπεύει το πλάτος του οπτικού πεδίου (FOV) στη φωτοδίοδο του δέκτη. Η παράμετρος g (ψ) είναι το κέρδος ενός οπτικού συμπυκνωτή και ορίζεται ως η ποιότητα της μετάδοσης δεδομένων στο σχήμα διαμόρφωσης OOK, μέσω της εκτίμησης της αναλογίας σήματος προς θόρυβο, και δίνεται ως, [8], [9]:

$$SNR = \frac{\gamma^2 P_r^2}{\sigma_{total}^2} \qquad (10)$$

Όπου γ αντιπροσωπεύει την απόκριση της φωτοδιόδου, P_r είναι η ληφθείσα ισχύς που υπολογίζεται από το (4) και σ^2 είναι η συνολική διακύμανση του θορύβου που δίνεται από, [8], [9]:

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{thermal}^2 + \sigma_{shot}^2 \quad (11)$$

Όπου $\sigma_{thermal}$ και $\sigma_{\sigma hot}$ είναι οι διακυμάνσεις των θερμικών θορύβων και των θορύβων βολής αντίστοιχα.

Σε ένα σύστημα VLC, ο θερμικός θόρυβος είναι ο ηλεκτρονικός θόρυβος που παράγεται από την θερμική ανάδευση των φορέων φορτίου εντός ενός αγωγού. Ο θερμικός θόρυβος προκύπτει από τις θερμικές διακυμάνσεις στην ηλεκτρονιακή πυκνότητα ενός αγωγού.
Από την άλλη, ο θόρυβος βολής προκαλείται από το φως του περιβάλλοντος. Η θερμική διακύμανση υπολογίζεται ως [8], [9]:

$$\sigma_{thermal}^2 = 8\pi nkT_k AB^2 \left[\frac{I_2}{G} + \frac{2\pi \Gamma nAI_3 B}{g_m}\right] \quad (12)$$

όπου το k είναι η σταθερά του Boltzmann, G είναι το κέρδος τάσης ανοικτού βρόχου, T_k είναι η απόλυτη θερμοκρασία, A είναι η φυσική περιοχή του δέκτη, I_2 και I_3 είναι οι συντελεστές εύρους ζώνης θορύβου, n είναι η χωρητικότητα του φωτοανιχνευτή ανά μονάδα επιφάνειας, g_m είναι η διαπερατότητα και B είναι το εύρος ζώνης θορύβου.
Επιπλέον, η διακύμανση της λήψης δίνεται ως, [8], [9]:

$$\sigma_{shot}^2 = 2q\gamma P_r B + 2q\gamma P_{bg} I_2 B \quad (13)$$

όπου q είναι το ηλεκτρονιακό φορτίο και το P_{bg} είναι η ισχύς θορύβου υποβάθρου.
Υποθέτοντας ότι η τιμή του P_{bg} εξαρτάται από το θόρυβο του ηλιακού φωτός που λαμβάνεται από τη φωτοδίοδο του δέκτη, η μαθηματική έκφραση δίνεται ως [16]:

$$P_{bg} = r_{coe} E_{det} T_0 A\nu^2 \quad (14)$$

όπου T_0 είναι ο μέγιστος συντελεστής μετάδοσης φίλτρου και r_{coe} είναι ο συντελεστής ανάκλασης. Για την επικοινωνία downlink, η πλευρά λήψης, η οποία είναι στην εξωτερική πλευρά του χώρου, βρίσκεται υπό άμεση έκθεση στο ηλιακό φως και έτσι το r_{coe} γίνεται ίσο με ένα. Για την επικοινωνία uplink, οι λαμπτήρες που βλέπουν προς το έδαφος επηρεάζονται από την αντανάκλαση του ηλιακού φωτός που ανακλάται από την επιφάνεια του δαπέδου και έτσι το r_{coe} γίνεται ίσο με 0.1. Το E_{det} είναι η ακτινοβολία που λαμβάνεται εντός της φασματικής περιοχής του δέκτη σε W / m^2 και υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση [16]:

$$E_{det} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{S_{peak} W(\lambda, T_B)}{\max[W(\lambda, T_B)]} d\lambda \quad (15)$$

όπου λ_1 και λ_2 είναι το χαμηλότερο και το υψηλότερο φασματικό όριο μήκους κύματος του θορύβου της ηλιακής ακτινοβολίας και $W(\lambda, T_B)$ είναι η φασματική ακτινοβολία του μοντέλου ενός μέλανος σώματος [16]:

$$W(\lambda, T_B) = \frac{2\pi h_p c^2}{\lambda^5}\left(\frac{1}{e^{h_p c / \lambda k T_B} - 1}\right) \quad (16)$$

όπου h_p είναι η σταθερά του Planck, c είναι η ταχύτητα του φωτός στο κενό και T_B είναι η μέση θερμοκρασία επιφάνειας του Ήλιου σε βαθμούς Kelvin. Η φασματική ακτινοβολία του Ήλιου μετρούμενη έξω από την ατμόσφαιρα της γης μοιάζει πολύ με αυτήν ενός μέλανος σώμα 6000K, [17]. Προκειμένου να υπολογιστεί το ολοκλήρωμα της εξίσωσης (10), χρησιμοποιείται η γνωστή μέθοδος Monte Carlo. Επιπλέον, Speak είναι το μέγιστο του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας, σε W / m^2 / μm, η οποία προσδιορίζεται ως [18]:

$$S_{peak} = 0.0001 E_{global}^2 + 1.5768\, E_{global} \quad (17)$$

με το E_{global} να είναι η συνολική ηλιακή ακτινοβολία που πέφτει στην Γη. Όσο οι πληροφορίες του συστήματος μεταδίδονται με το κόκκινο φως της λυχνίας LED RGB, το ζωνοπερατό φίλτρο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του θορύβου υποβάθρου που λαμβάνεται από υψηλότερα και χαμηλότερα μήκη κύματος.

Το οπτικό φίλτρο που μελετάται στην εργασία αυτή, βασίζεται στην επιστήμη των υλικών συμπυκνωμένης ύλης. Ειδικότερα, το διοξείδιο του βαναδίου, δηλ. το VO_2, είναι ένα κατάλληλο υλικό για τη μείωση του θορύβου του ηλιακού φωτός, [19], [20]. Παρουσιάζει μετάβαση ημιαγωγού σε μέταλλο όταν θερμαίνεται πάνω από 68 °C, γνωστή ως κρίσιμη θερμοκρασία, Tc. Η μετάβαση συνοδεύεται από δραματική αλλαγή των ηλεκτρικών και οπτικών ιδιοτήτων. Όσον αφορά τα φάσματα οπτικής διαπερατότητας που μετρώνται στους 20 °C και στους 90 °C για τα λεπτά υμένια VO_2, φαίνεται ότι η ορατή οπτική μετάδοση παραμένει στο 50% - 60% - με μέγιστη οπτική διαπερατότητα στα 700nm - στην περιοχή θερμοκρασίας από 20 °C έως 90 °C, [19], [20]. Από την άλλη πλευρά, στην περιοχή εγγύς υπερύθρου η οπτική μετάδοση στους 20°C είναι σημαντικά υψηλότερη από αυτή που μετράται στους 90 °C. Εάν τα λεπτά υμένια VO_2 θερμαίνονται στους 70°C, το φιλτράρισμα είναι πιο αποτελεσματικό, καθώς η μεταλλική φάση του VO_2 συνοδεύεται από χαμηλή οπτική διαπερατότητα στην υπέρυθρη περιοχή, με αποτέλεσμα τη μείωση του θορύβου υποβάθρου τόσο στην ορατή όσο και στην υπέρυθρη περιοχή [19], [20]. Τα λεπτά υμένια VO_2 μπορούν να παρασκευαστούν με μια ποικιλία τεχνικών χαμηλού κόστους. Ως εκ τούτου, οι οπτικές ιδιότητες των λεπτών υμενίων VO_2 σε υποστρώματα γυαλιού υποδηλώνουν ένα αποτελεσματικό οπτικό φίλτρο στον δέκτη για ένα σύστημα επικοινωνίας.

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σχετικά με την ισχύ που λαμβάνεται και το SNR υπό την επίδραση θορύβου υποβάθρου ηλιακού φωτός ενός συστήματος VLC με λευκό LED RGB σε ένα δωμάτιο με διαστάσεις x = 20m, y = 20m και z = 3m. Γίνεται η υπόθεση ότι

τα δεδομένα μεταδίδονται με το κόκκινο φως της λυχνίας LED, έτσι ώστε να χρησιμοποιείται ένα φίλτρο οπτικής ζώνης VO_2 προκειμένου να μειωθεί η επίδραση του θορύβου υποβάθρου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται χρησιμοποιώντας κατάλληλα τρισδιάστατα γραφήματα. Υποτίθεται ότι η μετάδοση πραγματοποιείται μόνο σε οπτική επαφή (LoS). Η λυχνία LED ακολουθεί την εκπομπή Lambertian ενώ η οπτική ισχύς μετάδοσης P_t = 20W και η γωνία μισής ισχύος είναι ϕ_s = 35°C. Από την άλλη πλευρά, η φωτοδίοδος έχει 70°C οπτικού πεδίου FOV ενώ η φυσική περιοχή του δέκτη είναι 1cm^2 και ο δείκτης διάθλασης του φακού είναι ν= 1.5 και g(χ) = 1.5. Η απόδοση SNR υπολογίζεται με βάση την εξίσωση (10) όταν υπολογίζεται η συνολική διακύμανση του θερμικού θορύβου και του θορύβου με βάση τις εξισώσεις (12) - (13). Για την εκτίμηση των θερμικών διακυμάνσεων, η σταθερά του Boltzmann είναι k = 1.3806488 × 10-23 J / K, η απόλυτη θερμοκρασία του χώρου θεωρείται ότι είναι T_k = 297K (23.85^{o}C), η χωρητικότητα του φωτοανιχνευτή, n = 1.12μm^{-2}, ο συντελεστής εύρους ζώνης θορύβου είναι I2 = 0.562 και I3 = 0.0868, το εύρος ζώνης θορύβου είναι B = 175MHz, το κέρδος τάσης ανοικτού βρόχου G = 10, ο συντελεστής θορύβου καναλιού είναι Γ = 1.5 και g_m = 30ms.

1.10 Κώδικας λειτουργίας οπτικού φίλτρου σε περιβάλλον Matlab

Ο κώδικας που γράφτηκε σε περιβάλλον Matlab, φαίνεται αναλυτικά παρακάτω. Αρχικά δίνεται η σταθερά του Planck h_p, η ταχύτητα του φωτός στο κενό c, η σταθερά του Boltzman και η μέση θερμοκρασία επιφάνειας του Ήλιου T_B (σε Kelvin) η οποία μοιάζει με αυτήν ενός μέλανος σώματος (6000K). Επιπλέον, δίνεται ένας πίνακας μηκών κύματος της ηλιακής φασματικής ακτινοβολίας μεταξύ 300 και 1700nm.

Στην συνέχεια με δεδομένες τις παραπάνω τιμές των φυσικών μεγεθών, υπολογίζεται η φασματική ακτινοβολία του ήλιου (για τον πίνακα μηκών κύματος) με βάση το μοντέλο της ακτινοβολίας ενός μέλανος σώματος (εξ. 16) και καταγράφεται η μέγιστη τιμή αυτής. Μετά, υπολογίζεται το μέγιστο του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας δεδομένης της συνολικής ακτινοβολίας που πέφτει στην Γη από τον Ήλιο (εξ. 17). Ορίζονται τα φασματικά όρια μηκών κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας λ_1 και λ_2 ως το χαμηλότερο και το υψηλότερο φασματικό όριο μήκους κύματος του θορύβου της ηλιακής ακτινοβολίας. Στην συνέχεια, δημιουργούνται ψευδοτυχαίοι αριθμοί μηκών κύματος στον άξονα x και ψευδοτυχαίοι αριθμοί υπολογισμού της φασματικής ακτινοβολίας στον άξονα y. Σκοπός της δημιουργίας ψευδοτυχαίων αριθμών είναι να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος Monte Carlo για τον υπολογισμό της φασματικής ακτινοβολίας του μοντέλου ενός μέλανος σώματος (εξ. 15). Έτσι, υπολογίζεται το ολοκλήρωμα (εμβαδόν) της φασματικής ακτινοβολίας του Ήλιου που λαμβάνει ο δέκτης (εξ. 15).

Έχοντας ως δεδομένα τον μέγιστο συντελεστή διάδοσης φίλτρου T_0, τον συντελεστή ανάκλασης r_{coe} και την διατομή της φωτοδιόδου, υπολογίζεται η ισχύς θορύβου που φτάνει στον δέκτη για uplink και downlink επικοινωνίες αντίστοιχα.

Έχοντας κανείς υπολογίσει την ισχύ θορύβου που φτάνει στον δέκτη, και με δεδομένες τις τιμές του δεύτερου όρου της εξ. 13 υπολογίζει τον δεύτερο όρο του θορύβου βολής. Για τον υπολογισμό του πρώτου όρου του θορύβου βολής, υπολογίζεται η ισχύς του

οπτικού σήματος που λαμβάνεται στον δέκτη (εξ. 9). Για να υπολογιστεί η ισχύς του οπτικού σήματος που λαμβάνεται στον δέκτη χρειάζεται να υπολογιστεί η οπτική ισχύς του πομπού, δεδομένης της απόστασης μεταξύ πομπού και δέκτη. Οι διαστάσεις του χώρου για τον οποίο υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ πομπού και δέκτη είναι 20m, 20m, 3m. Έτσι υπολογίζεται, ο δεύτερος όρος του θορύβου βολής και τελικά ο συνολικός θόρυβος βολής.

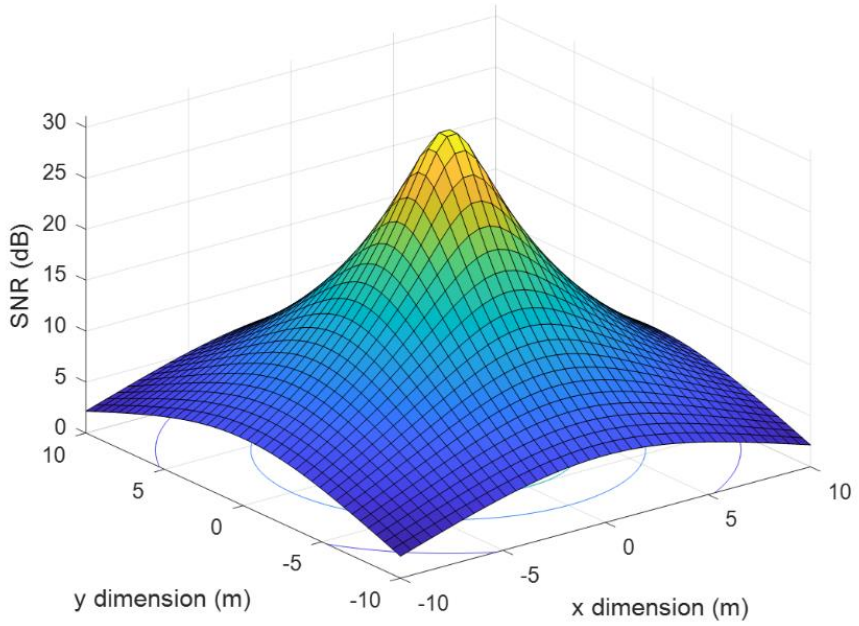
Στην συνέχεια, υπολογίζεται ο θερμικός θόρυβος με δεδομένες τις τιμές της εξίσωσης 12. Από την εξ.11 υπολογίζεται ο συνολικός θόρυβος ως το άθροισμα του θερμικού θορύβου και του θορύβου βολής. Τέλος, υπολογίζεται και σχεδιάζεται η αναλογία σήματος προς θόρυβο (SNR), δηλαδή η απόδοση ενός συστήματος VLC, με την χρήση και χωρίς την χρήση οπτικού φίλτρου VO_2 (εξ.10).

```
% Spectral Irradiance
clear all;
clc;
hp=6.62607004*10^-34; %Planck's constant
c=3*10^8; %Speed of light
k=1.38064852*10^-23; %Boltzmann's constant
Tb=6000; %Temperature in Kelvin
wl=[300:10:1700]*10^(-9); %wavelength
% W
aux1=2*3.14159*hp*c^2./(wl.^5); %auxiliary1 for W
aux2=exp(hp.*c./(wl.*k.*Tb)); %auxiliary2 for W
W=aux1.*(1./(aux2-1));
mW=max(W);
Eglobal=1*10^9; %globar spectral irradiance in W*m^-2 * m^-1
Speak=0.0001*Eglobal^2 + 1.5768*Eglobal;
lmin=500*10^(-9); %minimum wavelength
lmax=1200*10^(-9); %maximum wavelength
n=100000; %number of repeats
randomx=lmin+(lmax-lmin)*rand(1,n); %random for x axis
randomy=max(W)*rand(1,n); %random for y axis
% Monte Carlo Method for integral
hit=0;
for i=1:n
  a1=2*3.14159*hp*c^2./(randomx(i).^5);
  a2=exp(hp.*c./(randomx(i).*k.*Tb));
  Wr=a1.*(1./(a2-1));
  if randomy(i)<Wr
    hit=hit+1;
  end
end
W_mc=hit/n*(lmax-lmin)*max(W) %Monte Carlo Result
% Receiver backround noise power
A=0.8e-2;  %area
n=1.5; %refractive index
T0=1;     %peak filter transmission coefficient
rcoeu=0.1; %reflection coefficient for uplink
rcoed=1;%reflection coefficient for downlink
Edet=(W_mc/mW)*Speak;  %spectral range of the receiver
```

```
Pbgu=rcoeu.*Edet.*T0.*A.*n^2; % Receiver backround noise power for uplink
Pbgd=rcoed.*Edet.*T0.*A.*n^2; % Receiver backround noise power for downlink
% shot noise variance 2
q=1.6e-19;%electronic charge
g=0.53; %Photodetector responsivity
I2=0.562;%noise bandwidth factor for a rectangular transmitter pulse shape
B=175e6;    %noise bandwidth
s2shot2u=2*q.*g.*Pbgu.*I2.*B; %shot noise for uplink
s2shot2d=2*q.*g.*Pbgd.*I2.*B; %shot noise for downlink
% Received optical signal power
q=1.6e-19;%electronic charge
g=0.53; %Photodetector responsivity
B=175e6;    %noise bandwidth
I2=0.562;%noise bandwidth factor for a rectangular transmitter pulse shape
P_total=20;
theta = 90;
ml=-log(2)/log(cosd(theta));
Adet=0.8e-2;
Ts=1;
index=1.5;
FOV=80;
G_Con=(index^2)/(sind(FOV).^2);
%----------------------------------
lx=20; ly=20; lz=3;
h=1.5;
[XT]=meshgrid([0 0]);
Nx=lx*2; Ny=ly*2;
x=linspace(-lx/2,lx/2,Nx);
y=linspace(-ly/2,ly/2,Ny);
[XR,YR]=meshgrid(x,y);
d=sqrt((XR-XT(1,1)).^2+(YR-XT(1,1)).^2+(h)^2);
%-------------------------------------
cosphi_A1=h./d;
receiver_angle=acosd(cosphi_A1);
H_A1=(ml+1)*Adet.*cosphi_A1.^(ml+1)./(2*pi.*d.^2);
P_rec_A1=P_total.*H_A1.*Ts.*G_Con;
% shot noise variance 1
q=1.6e-19;%electronic charge
g=0.53; %Photodetector responsivity
B=175e6;    %noise bandwidth
s2shot1=2*q*g*B*P_rec_A1;
% shot noise variance
S2shotu= s2shot1+ s2shot2u;
S2shotd= s2shot1+ s2shot2d;
%thermal noise variance
Tk=300; %absolute temperature
A=0.8e-2;  %area
B=175e6;    %noise bandwidth
h=112e-8;%fixed capacitance of a photodetector per unit area
G=10; %FET channel noise factor
k=1.38e-23;  % Boltzmann's constant
Ga=1.5; %open-loop voltage gain
I3=0.0868; %noise bandwidth factor for a full raised cosine equalized pulse shape
```

```
gm=30e-3; %FET transconductance
s2th1=(8*3.14159*k*Tk*h*A*I2*B^2)./G; %first term of thermal noise
s2th2=(16*3.14159^2*k.*Tk.*Ga.*h^2.*A^2.*I3.*B^3)./gm; %second term of thermal noise
s2th=s2th1+s2th2; %thermal noise
%SNR
SNR=P_rec_A1./(S2shotd);
max12=max(max(10.*log10(SNR)))
min12=min(min(10.*log10(SNR)))
for z1=1:40
  m_30_0(z1)=10.*log10(SNR(21,z1))+0.5;
  m_30_5(z1)=10.*log10(SNR(30,z1))+0.5;
end
% figure(1)
% surfc(x,y,10.*log10(SNR));
```

Στο Σχ. 1.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της απόδοσης SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα οπτικών επικοινωνιών VLC χωρίς τη χρήση φίλτρου για ένα εύρος μηκών κύματος μεταξύ 300nm και 1500nm που θεωρείται ότι λαμβάνει ο δέκτης.



Σχ.1.6: Αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC χωρίς τη χρήση φίλτρου για μήκος κύματος μεταξύ 300nm και 1500nm. Το μέγιστο SNR στο κέντρο του δωματίου φτάνει τα 31dB, ενώ η ελάχιστη τιμή στις γωνίες είναι 2.1dB.

Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιασθεί η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε για την παρασκευή οπτικών φίλτρων διοξειδίου του βαναδίου VO_2 με τις καλύτερες δυνατές συνθήκες. Σκοπός είναι να γίνουν κατά το μέγιστο δυνατό εκμεταλλεύσιμες οι οπτικές ιδιότητες αυτού του υλικού που καθίστανται ικανές για την χρήση αυτού του υλικού ως ένα ζωνοπερατό οπτικό φίλτρο. Έτσι αναμένεται να εξαλειφθεί όσο το δυνατό περισσότερος οπτικός θόρυβος και να βελτιωθεί η απόδοση SNR ενός συστήματος VLC.

Κεφάλαιο 2

Πειραματική διαδικασία

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται τα βήματα της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να διερευνηθούν πειραματικά οι ιδιότητες του διοξειδίου του βαναδίου VO_2 για την χρήση του ως ένα οπτικό φίλτρο στις ασύρματες οπτικές επικοινωνίες.

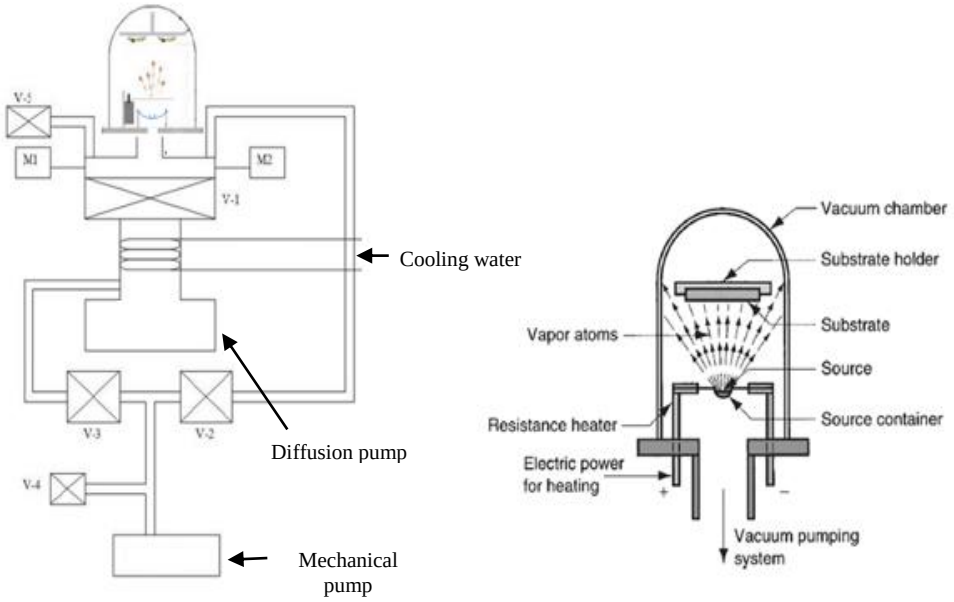
2.1 Παρασκευή δειγμάτων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρασκευάστηκαν δείγματα λεπτών υμενίων (films) V_2O_5 με την μέθοδο εναπόθεσης ατμού (physical vapor deposition-PVD) που στην συνέχεια ανάχθηκαν σε δείγματα λεπτών υμενίων (films) VO_2 με θέρμανση σε ειδικό κλίβανο υπό συνθήκες κενού με ροή ατμοσφαιρικού αέρα, αργού υδρογόνου, αζώτου.

2.1.1 Παρασκευή δειγμάτων λεπτών υμενιών (films) V_2O_5 με την μέθοδο εναπόθεσης ατμού (PVD)

Η μέθοδος εναπόθεσης ατμού είναι μία ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος εναπόθεσης λεπτών υμενίων που βασίζεται σε φυσικές διεργασίες που πραγματοποιούνται σε συνθήκες υψηλού κενού. Με την μέθοδο αυτή εναποτίθενται λεπτά υμένια με πάχη μεταξύ μερικών νανομέτρων και χιλιάδων νανομέτρων [18]. Όσον αφορά στην φυσική διαδικασία εναπόθεσης, το πρόδρομο υλικό αρχικά βρίσκεται σε στερεά μορφή σε συνθήκες υψηλού κενού [21]. Με την εφαρμογή τάσης, το πρόδρομο υλικό θερμαίνεται, υγροποιείται, εξατμίζεται και συμπυκνώνεται στην επιφάνεια του υποστρώματος υπό μορφή λεπτού υμενίου [22, 23, 24].

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή λεπτών υμενιών (films) V_2O_5 φαίνεται στο σχήμα 2.1 a. Η διάταξη αποτελείται από έναν γυάλινο θόλο (Σχ. 2.1 b) εντός του οποίου πραγματοποιείται η διαδικασία εναπόθεσης του υλικού. Επιπλέον, η διάταξη περιλαμβάνει μια μηχανική αντλία μέσω της οποίας δημιουργείται προκαταρκτικό κενό ($P=10^{-2}$ mbar) το οποίο μετράται με M1 μετρητικό Pirani. Για την επίτευξη υψηλού κενού της τάξης 10^{-6} mbar συνδέεται μία αντλία διαχύσεως με την μηχανική αντλία. Το κενό αυτό μετράται με M2 μετρητικό Penning. Επιπλέον, η πειραματική διάταξη αποτελείται από πέντε βαλβίδες. Η βαλβίδα V-4 χρησιμοποιείται για εξαέρωση της μηχανικής αντλίας και η βαλβίδα V-5 χρησιμοποιείται για εξαέρωση του γυάλινου θόλου. Η βαλβίδα V-2 χρησιμοποιείται για την επίτευξη προκαταρκτικού κενού από την μηχανική αντλία, η βαλβίδα V-3 για την επίτευξη υψηλού κενού από την αντλία διαχύσεως ενώ η βαλβίδα V-1 χρησιμοποιείται για την σύνδεση του γυάλινου θαλάμου με την αντλία διαχύσεως.



Σχ.2.1: α) Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή των λεπτών υμενίων V_2O_5 με την μέθοδο της φυσικής εναπόθεσης ατμού (physical vapor deposition-PVD) [26] b) Γυάλινος θάλαμος

Αρχικά γίνεται εξαέρωση της μηχανικής αντλίας μέσω της βαλβίδας V-4. Στην συνέχεια, ενεργοπείται η μηχανική αντλία όντας όλες οι άλλες βαλβίδες κλειστές. Ανοίγει η βαλβίδα V-2 και το μετρητικό Pirani για την μέτρηση προκαταρκτικού κενού. Αφού η πίεση φτάσει κάτω από 10^{-2} mbar κλείνει η V-2 κι ενεργοποιείται η αντλία διαχύσεως. Ανοίγει η βρύση για να ψύχεται η αντλία διαχύσεως και ταυτόχρονα ανοίγει η V-3 και η V-1 για την σύνδεση της αντλίας διαχύσεως με τον γυάλινο θόλο. Ανοίγει και το μετρητικό Penning για την μέτρηση του υψηλού κενού. Όταν φτάσει το κενό σε $P=3\cdot10^{-5}$ mbar έχει επιτευχθεί το υψηλό κενό που απαιτείται έτσι ώστε να μην υπάρχουν κρούσεις των προς εναπόθεση σωματιδίων με το εναπομένον αέριο από την πηγή προς το υπόστρωμα. Στο στάδιο αυτό, μπορεί να γίνει η θέρμανση του ελάσματος, με την σύνδεση των άκρων του ελάσματος με δύο ηλεκτρόδια που συνδέονται με τροφοδοτικό τάσης. Το έλασμα είναι παραμορφωμένο στο κέντρο του, έτσι ώστε το υλικό που τοποθετείται να συγκεντρώνεται γύρω από αυτό το σημείο και να μην εξαπλώνεται στα άκρα του ελάσματος κατά την θερμική εξάχνωση, προκειμένου να αποφευχθεί τυχόν βραχυκύκλωμα. Η τάση του υλικού να εξαπλώνεται στα άκρα του ελάσματος οφείλεται σε επιφανειακά φαινόμενα. Οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων του V_2O_5 είναι ασθενέστερες από τις δυνάμεις συνάφειας μεταξύ του V_2O_5 και του σκαφιδίου. Έτσι, το υγρό V_2O_5 τείνει συνεχώς να αυξήσει την επιφάνεια του με αποτέλεσμα να επικαλύπτει τα ηλεκτρόδια προκαλώντας βραχυκύκλωμα. Στο σημείο αυτό, ελέγχεται η καταλληλότητα διαφόρων εστιών θέρμανσης ως προς την αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες και ως προς την χημική τους αδράνεια [26].

Όσον αφορά τις εστίες θέρμανσης είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη δύο προβλήματα που προκύπτουν, προκειμένου να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους. Ένα εξ αυτών όπως προαναφέρθηκε αφορά στην μικρή επιφανειακή τάση του V_2O_5 που τείνει συνεχώς να αυξήσει την επιφάνεια του με αποτέλεσμα να επικαλύπτει τα ηλεκτρόδια και σε συνδυασμό με την αρκετά καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα του V_2O_5 προκαλείται βραχυκύκλωμα. Ακόμα ένα πρόβλημα που δημιουργείται είναι ότι λόγω της υψηλής χημικής δραστικότητας του V_2O_5, προκαλείται αντίδραση με την εστία θέρμανσης [27].

Έτσι, χρησιμοποιήθηκαν ως εστίες θέρμανσης σκαφίδια γραφίτη σε διαφορετικά μεγέθη των οποίων η θέρμανση απαιτούσε εφαρμογή υψηλών τάσεων με αποτέλεσμα την ανακρυστάλλωση των σκαφιδίων και την θραύση τους. Εφόσον τα σκαφίδια γραφίτη δεν τέθηκαν κατάλληλα ως εστίες θέρμανσης, χρησιμοποιήθηκαν ελάσματα μετάλλων όπως το βολφράμιο, το ταντάλιο, η πλατίνα και το μολυβδένιο. Και τα τέσσερα αυτά ελάσματα παρουσίασαν υψηλό σημείο τήξης με αποτέλεσμα να ανακρυσταλλώνονται και να θραύουν καθώς και ένα μερος του V_2O_5 να επικάθεται πάνω στα υλικά. Συγκεκριμένα, το ταντάλιο παρουσίαζε αυξημένη σκληρότητα μετά το πέρας της θέρμανσης καθιστώντας το εξαιρετικά εύθραυστο. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε έλασμα τιτανίου το οποίο δεν απαιτούσε εφαρμογή υψηλών τάσεων και δεν αντιδρούσε χημικά με το υλικό. Μετά την παραπάνω διερεύνηση των εστιών θέρμανσης, το έλασμα τιτανίου αναδείχθηκε ως ένα εύκολα διαχειρίσιμο και κατάλληλο υλικό για την διαδικασία της θερμικής εξάχνωσης.

Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται τα σκαφίδια και τα ελάσματα που χρησιμοποιήθηκαν.

Σχ.2.2 : Σκαφίδια (από αριστερά στα δεξιά: γραφίτης, γραφίτης, γραφίτης σχήματος Τ, γραφίτης με στρώμα μίκας) και σύρματος καντάλ.

Σχ.2.3: Ελάσματα διαφόρων γεωμετριών (από αριστερά στα δεξιά: σπειροειδές βολφράμιο, ταντάλιο, μολυβδένιο, σπειροειδές βολφράμιο, πλατίνα, τιτάνιο, τιτάνιο).

Για την παρασκευή των λεπτών υμενίων V_2O_5 χρησιμοποιήθηκαν παστίλιες από συμπιεσμένη σκόνη V_2O_5. Η σκόνη τοποθετήθηκε σε μεταλλικό καλούπι και συμπιέστηκε με πρέσα λαδιού. Στη συνέχεια η παστίλια τεμαχίστηκε σε μικρά κομμάτια έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν στο κέντρο του ελάσματος για την διαδικασία της θερμικής εξάχνωσης.

Πάνω από το έλασμα και σε απόσταση 7cm τοποθετήθηκαν υποστρώματα siliconized (glass) κυκλικού σχήματος, διαμέτρων 10, 12, 19, 22mm, quartz διαμέτρου 14mm και

μονοκρυσταλλικού Al_2O_3 διαμέτρου 13mm. Η επιλογή των υποστρωμάτων έγινε με κριτήριο την υψηλή διαφάνεια τους ως προς τα μήκη κύματος του ορατού και του υπερύθρου. Τα υποστρώματα είναι στερεωμένα σε μάσκες αλουμινίου κυκλικού σχήματος ~2mm μικρότερης διαμέτρου από την διάμετρο του υποστρώματος. Οι μάσκες είναι επίσης στερεωμένες σε μια βάση που τοποθετείται στο κατάλληλο υψος από το έλασμα έτσι ώστε η στερεά γωνία των ατμών που εξαχνώνονται να καλύπτει την επιφάνεια των υποστρωμάτων. Ο αριθμός των υποστρωμάτων που χρησιμοποιούνται εξαρτάται από το μήκος της διαμέτρου τους. Έτσι τα υποστρώματα διαμέτρου 19, 22 mm τοποθετούνταν ένα ανά εναπόθεση ενώ τα υποστρώματα 10mm και 12mm τοποθετούνταν 6 ανά εναπόθεση ή 4 ανά εναπόθεση αντίστοιχα.

Τα υποστρώματα πριν στερεωθούν για εναπόθεση, υπόκεινται σε χημικό καθαρισμό. Τοποθετούνται για 15 sec σε τριχλωροαιθυλένιο (Trychlorathylene) έτσι ώστε να εξαλειφθεί το λίπος και ο άργιλος που πιθανότατα έχει επικαθίσει πάνω τους. Στη συνέχεια, τοποθετούνται σε ακετόνη (acetone) στον υπέρηχο για 2 min και στην συνέχεια σε προπανόλη (propanol) στον υπέρηχο για 2 min για αποτελεσματικότερο χημικό καθαρισμό.

Αφού πραγματοποιείται η επιλογή, ο καθαρισμός και η στερέωση των υποστρωμάτων στην μάσκα αλουμινίου, η μάσκα στερεώνεται στη βάση σε κατάλληλο ύψος. Στην συνέχεια ζυγίζεται η παστίλια V_2O_5 και τοποθετείται στο κέντρο του παραμορφωμένου ελάσματος. Εφόσον επιτευχθεί υψηλό κενό, θερμαίνεται το έλασμα μέσω του τροφοδοτικού σε κατάλληλη τάση προκειμένου να πραγματοποιηθεί η θερμική εξάχνωση του υλικού. Οι ατμοί του υλικού κατευθύνονται στα υποστρώματα όπου συμπυκνώνονται σε ομοιόμορφα λεπτά υμένια. Το πάχος του εναποτιθέμενου υλικού εξαρτάται από την διάρκεια της εναπόθεσης. Αφού πραγματοποιηθεί η εναπόθεση, μηδενίζεται η τάση του τροφοδοτικού και τα ηλεκτρόδια, το έλασμα επανέρχονται μετά από ορισμένα λεπτά σε θερμοκρασία δωματίου. Ο θάλαμος τότε απομονώνεται από το σύστημα των αντλιών με το κλείσιμο της βαλβίδας V-1 και γίνεται εξαέρωση στο εσωτερικό του μέσω της βαλβίδας V-5. Απομακρύνεται ο γυάλινος θόλος και τα δείγματα είναι έτοιμα προς χρήση.

Τα υμένια V_2O_5 της εργασίας αυτής παρασκευάστηκαν με διπλή πραγματοποίηση της διαδικασίας της φυσικής εναπόθεσης ατμού έτσι ώστε το πάχος τους να είναι ικανό να μετρηθεί από την διακριτική ικανότητα του περιθλασιμέτρου σκόνης Siemens D5000.

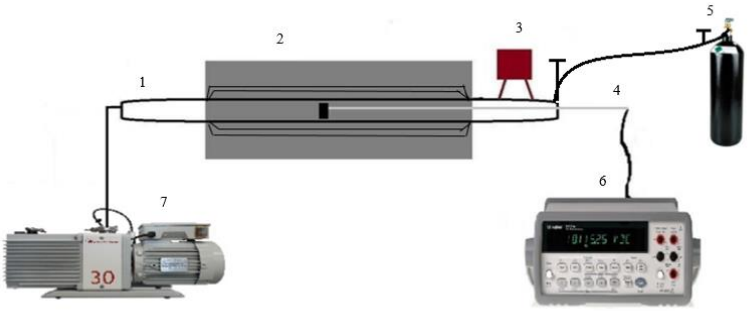
2.1.2 Παρασκευή δειγμάτων λεπτών υμενιών (films) VO_2 με αναγωγή των δειγμάτων V_2O_5 με θέρμανση σε ειδικό κλίβανο

Για την παρασκευή δειγμάτων λεπτών υμενίων (films) VO_2 πραγματοποιήθηκε θερμική επεξεργασία (αναγωγή) των δειγμάτων λεπτών υμενιών (films) V_2O_5 σε ειδικό κλίβανο σε συνθήκες κενού [28]. Με την θέρμανση ενός δείγματος V_2O_5 σε συνθήκες κενού αναμένεται η αντίδραση:

$$2V_2O_5 \rightarrow 4VO_2 + O_2 \qquad (18)$$

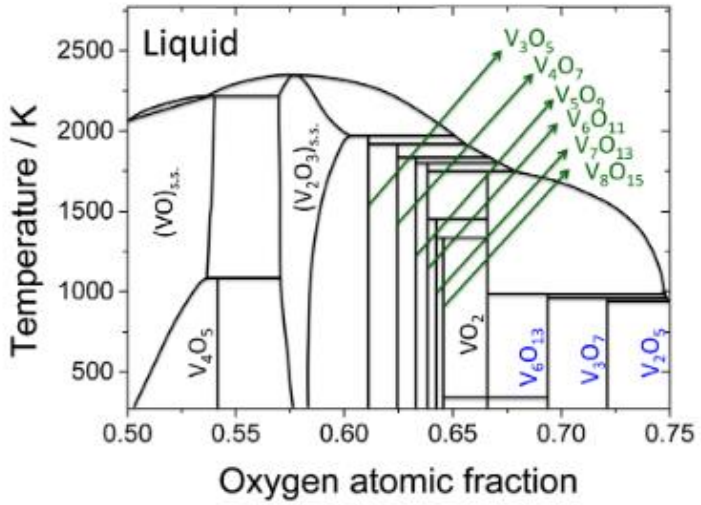
Ο ειδικός κλίβανος αποτελείται έναν ημιαγώγιμο κυλινδρικό σωλήνα καρβιδίου του πυριτίου SiC που αποτελεί το θερμοστοιχείο με αντίσταση R=0.9 Ω. Περικλείεται από έναν κυλινδρικό σωλήνα από οξείδιο του αλουμινίου Al_2O_3 που είναι καλός αγωγός της θερμότητας και μονώνει το σύστημα από το εξωτερικό περιβάλλον. Στα άκρα του ημιαγώγιμου σωλήνα είναι συνδεδεμένα ηλεκτρόδια από τροφοδοτικό τάσης έτσι ώστε να ελέγχεται ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας. Μέσα στον ημιαγώγιμο σωλήνα υπάρχει ένας σωλήνας quartz που αντέχει σε υψηλές θερμοκρασίες. Ακριβώς στο κέντρο του σωλήνα quartz υπάρχει θερμοστοιχείο Nickel Chromium Constant (NiCr-Const) τοποθετημένο σε λεπτό συμπαγή σωλήνα οξειδίου του αλουμινίου (Aluminum oxide Al_2O_3). Με το θερμοστοιχείο μετράται η θερμοκρασία και με έναν αισθητήρα Pirani στα άκρα του σωλήνα quartz μετράται η πίεση στο εσωτερικό του. Ο σωλήνας quartz είναι συνδεδεμένος με μηχανική αντλία που δημιουργεί προκαταρκτικό κενό στο εσωτερικό του σωλήνα.

Σε αρχικές θερμάνσεις που πραγματοποιήθηκαν σε υψηλό κενό $3\cdot10^{-2}$ mbar, παρατηρήθηκε υπεραναγωγή των δειγμάτων V_2O_5 σε V_2O_3 ακόμα κι αν ο χρόνος σταθερής θερμοκρασίας ήταν μικρός, της τάξης της μισής ώρας. Επομένως, έχοντας ήδη πραγματοποιήσει πολλές αναγωγές αυτής της πίεσης σε διαφορετικούς χρόνους όπου τα δείγματα υπερανάγονταν, πραγματοποιήθηκαν προσπάθειες επιβράδυνσης της αναγωγής των δειγμάτων με ροή ατμοσφαιρικού αέρα και στην συνέχεια με την χρήση αερίων όπως αργό υδρογόνο και άζωτο. Η ροή αυτών των αερίων και του ατμοσφαιρικού αέρα πραγματοποιήθηκε μέσω μιας βαλβίδας στα άκρα του σωλήνα quartz που συνδεόταν με το αέριο ή με τον ατμοσφαιρικό αέρα. Σε συδυασμό με την πίεση του προκαταρκτικού κενού κανείς μπορούσε να αυξήσει την πίεση στην επιθυμητή τιμή και να την κρατήσει σταθερή. Με την ροή του ατμοσφαιρικού αέρα με $P=2\cdot10^{-2}$ mbar και χρόνους θέρμανσης t=1-2 hours και T= 480°C τα αποτελέσματα βελτιώθηκαν αρχικά αλλά δεν ήταν επαναλήψιμα. Επομένως, χρησιμοποιήθηκαν στην συνέχεια το αργό υδρογόνο και το άζωτο ως αναγωγικά μέσα. Με αυτά τα αέρια τα δείγματα V_2O_5 ανάχθηκαν σε VO_2 ύστερα από τον έλεγχο διαφορετικών χρόνων θέρμανσης. Τα δείγματα λεπτών υμενίων V_2O_5 τοποθετούνταν σε σκαφίδια quartz σχήματος βάρκας στο κέντρο του ειδικού κλιβάνου. Οι συνθήκες υπό τις οποίες τα δείγματα θερμάνθηκαν μεταβλήθηκαν μεταξύ 440°C - 500°C και ο χρόνος θέρμανσης από 1 μέχρι 4 ώρες. Η θέρμανση των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες κενού $3\cdot10^{-2}$ mbar, με ροή ατμοσφαιρικου αέρα $P= 2\cdot10^{-2}$ mbar, αργού υδρογόνου $P=2\cdot10^{-2}$ mbar, $P=5\cdot10^{-2}$ mbar, $P=4\cdot10^{-1}$ mbar και με ροή αζώτου $P=4\cdot10^{-1}$ mbar.



Σχ. 2.4: Διάταξη κλίβανου:(1) σωλήνας quartz, (2) ο κλίβανος, (3) μετρητής πίεσης P, (4) θερμοστοιχείο NiCr-Ni, (5) σωλήνας αερίου αργού υδρογόνου ή αζώτου (6) βολτόμετρο, (7) μηχανική αντλία.

Στο σχ. 2.5 απεικονίζεται το διάγραμμα φάσης οξειδίου του βαναδίου (Vanadium oxide - VO). Κατά την θερμική επεξεργασία των υμενίων V_2O_5, πολλές ενδιάμεσες φάσης του βαναδίου πραγματοποιούνται μέχρι να επιτευχθεί η φάση του VO_2 (Σχ. 2.6). Οι διαφορετικές ατμόσφαιρες (ατμοσφαιρικός αέρας, άζωτο, αργό υδρογόνο) που χρησιμοποιούνται κατά την διάρκεια της αναγωγής επηρεάζουν τα βημάτα της θερμικής επεξεργασίας και συγκεκριμένα την θερμοκρασία που είναι αναγκαία για την αναγωγή του V_2O_5 σε VO_2. Επιπλέον, οι διαφορετικές ατμόσφαιρες επηρεάζουν την μικροδομή των υμενίων [29]. Προκειμένου να προσδιοριστούν οι καταλληλότερες συνθήκες για την δημιουργία της φάσης του VO_2 χρειάζεται να δοκιμασθούν διαφορετικές ατμόσφαιρες και συνθήκες θερμοκρασίας, πίεσης και χρόνου.

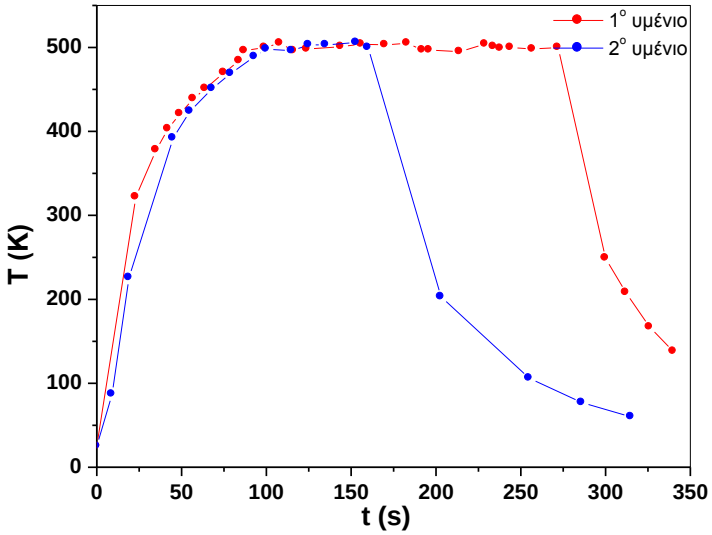


Σχ. 2.5: Διάγραμμα φάσης οξειδίου του βαναδίου (Vanadium oxide - VO) [29].

Στο σχ. 2.6 απεικονίζεται ένα ενδεικτικό διάγραμμα κατανόησης της θερμικής επεξεργασίας δύο υμενίων V_2O_5. Η θερμική τους επεξεργασία περιγράφεται από τον χρόνο θέρμανσης, τον χρόνο της θερμικής ισορροπίας, και τον χρόνο εφησύχασης. Ο χρόνος θέρμανσης είναι 85 min από 28 °C – 500 °C και για τα δύο υμένια, ο χρόνος θερμικής ισορροπίας είναι 185 min (1° υμένιο) και 60 min (2° υμένιο) με σταθερή T=500

°C και ο χρόνος εφησύχασης είναι 68 min μέχρι την θερμοκρασία 138°C (1ο υμένιο) και 155 min μέχρι τους 60°C (2ο υμένιο). Ο συνολικός χρόνος θερμικής επεξεργασίας των εν λόγω υμενίων είναι 350 min ≈ 5.5-6 hours (1ο υμένιο) μέχρι να φτάσει στην θερμοκρασία 138 °C και 5 hours (2ο υμένιο) μέχρι να φτάσει στην θερμοκρασία 60°C.
Το 1ο υμένιο V_20_5 έχει αναχθεί σε VO_2 σε συνθήκες κενού με ροή αζώτου $P=4\cdot10^{-1}$ mbar ενώ το 2ο υμένιο έχει αναχθεί σε V_2O_3 σε υψηλό κενό $3\cdot10^{-2}$ mbar.

Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι οτι ο χρόνος θέρμανσης σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία είναι ίδιος κατά την θερμική επεξεργασία όσες φορές και αν επαναληφθεί το πείραμα, δεδομένου ότι η ισχύς που υποβάλλεται στον ειδικό κλίβανο είναι η ίδια. Στην θερμική επεξεργασία των υμενίων V_20_5 η ροή του αζώτου ή αργού υδρογόνου ή ατμοσφαιρικού αέρα είναι πολύ χαμηλή κι επομένως δεν επηρεάζει τον χρόνο θέρμανσης, ο οποίος εξαρτάται μόνο από την υποβληθείσα ισχύ. Επιπλέον ο χρόνος εφησύχασης μέχρι την θερμοκρασία δωματίου είναι όμοιος για κάθε θερμική επεξεργασία, όπως αναμένεται.



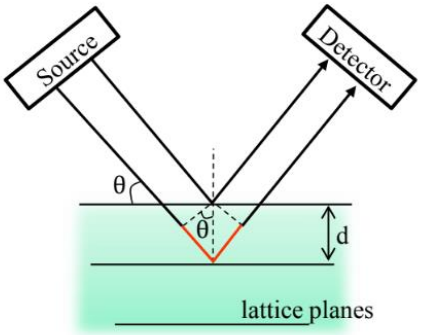
Σχ. 2.6: Διάγραμμα θερμικής επεξεργασίας υμενίων V_2O_5 για την αναγωγή τους σε VO_2.

Στο σχ. 2.7 φαίνεται ένα δείγμα πριν και μετά την θερμική επεξεργασία του. Το δείγμα από V_2O_5 ανάχθηκε σε VO_2.

Σχ.2.7: Λεπτό υμένιο V_2O_5 πριν την αναγωγή και λεπτό υμένιο VO_2 μετά την αναγωγή.

2.2 Περιθλασίμετρο σκόνης Siemens D5000

Στην εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ για τον έλεγχο της παρασκευής της φάσης του βαναδίου που στοχεύει η εργασία, δηλαδή του VO_2. Οι μετρήσεις περιθλασιμετρίας πραγματοποιούνται για την διερεύνηση της φυσικής σύστασης και των κρυσταλλικών παραμέτρων των δειγμάτων.



Σχ. 2.8: Περίθλαση ακτίνων Χ [30].

Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση των δειγμάτων είναι η Siemens D5000, βασιζόμενη στη γεωμετρία Bragg-Brentano και αποτελείται από τα εξής τμήματα: i) γεννήτρια παραγωγής ακτίνων Χ (λυχνία Cu), ii) γωνιόμετρο (για τον προσδιορισμό των γωνιών της σκεδαζόμενης δέσμης (απαριθμητής - ηλεκτρονικό σύστημα-ηλεκτρονικός υπολογιστής) και iii) σύστημα συλλογής και καταγραφής της σκεδαζόμενης δέσμης.

Η δέσμη μετά την έξοδο της από τη γεννήτρια ακτίνων Χ περνά από ένα σύστημα παράλληλων μεταλλικών πλακών-διαφραγμάτων ώστε να ευθυγραμμιστεί και εν συνεχεία περνά από μια σχισμή μείωσης της απόκλισης της δέσμης. Η σκεδαζόμενη από το δείγμα δέσμη περνά από μια σχισμή σκέδασης, η οποία μειώνει τη σκέδαση από άλλες αιτίες (αέρας, φθορισμός, κ.α.), καθώς επίσης και από ένα σύστημα μεταλλικών παράλληλων πλακών όπου ευθυγραμμίζεται. Μετά, περνά από μια σχισμή, η οποία παρέχει τη δυνατότητα επιλογής του επιθυμητού κάθε φορά εύρους της εισερχόμενης στο καταμετρητή δέσμης. Τέλος, η δέσμη περνά από ένα μονοχρωμάτορα (κρύσταλλος γραφίτη) για την αποκοπή της ακτινοβολίας CuK και εισέρχεται στον απαριθμητή σπινθήρων [31]-[33].

Στο περιθλασίμετρο γεωμετρίας Bragg-Brentano το δείγμα, το οποίο τοποθετείται στο κέντρο του γωνιομετρικού κυκλικού δίσκου και ο απαριθμητής περιστρέφονται ταυτόχρονα με λόγο ταχυτήτων 1:2. Το περιθλασίγραμμα είναι το διάγραμμα της έντασης της σκεδαζόμενης δέσμης σαν συνάρτηση της γωνίας σκέδασης θ. Τα μέγιστα έντασης ονομάζονται ανακλάσεις Bragg.

Όταν μία δέσμη ακτίνων Χ εισχωρήσει σε ένα στερεό υλικό τότε η δέσμη θα σκεδαστεί προς όλες τις διευθύνσεις από τα ηλεκτρόνια που αντιστοιχούν στα άτομα που βρίσκονται περιοδικά διατεταγμένα στην πορεία της. Τα άτομα είναι διατεταγμένα σε οικογένειες παράλληλων κρυσταλλογραφικών επιπέδων (hkl), απόστασης dhkl μεταξύ τους. Ενισχυτική συμβολή συμβαίνει όταν οι γωνίες πρόσπτωσης και περίθλασης θ, είναι

ίσες και η διαφορά δρόμου των δεσμών που σκεδάζονται είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, δηλαδή ικανοποιείται η σχέση Bragg:

$$2d_{hkl}sin\theta_B = n\lambda \quad (19)$$

όπου λ το μήκος κύματος της ακτινοβολίας, d_{hkl} η απόσταση δύο διαδοχικών πλεγματικών επιπέδων hkl και θ η γωνία πρόσπτωσης. Επειδή $\theta_{πρόσπτωσης} = \theta_{ανάκλασης}$ χρησιμοποιείται ο όρος «ανάκλαση» Bragg [33].

Τα δείγματα που χρησιμοποιούνται στις μετρήσεις περιθλασιμετρίας μπορούν να τοποθετηθούν μαζί με το υπόστρωμα στο οποίο έχουν αναπτυχθεί σε γυαλί με τη χρήση ταινίας διπλής όψης και στερεώνονται στον δειγματοφορέα της συσκευής. Με αυτόν τον τρόπο το δείγμα δεν αλλοιώνεται και υπάρχει η δυνατότητα για επιπλέον μετρήσεις στο δείγμα όπως ηλεκτρικής αντίστασης. Ωστόσο, η εμφάνιση επιπλέον κορυφών στο περιθλασίγραμμα που οφείλονται στο υπόστρωμα δυσχεραίνουν την περαιτέρω ανάλυση. Ο ρυθμός λήψης μετρήσεων επιλέχθηκε να είναι 3°C/2 sec.

2.3 Μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης [31]

Στην συνέχεια, στα δείγματα που είχαν χαρακτηριστεί με την μέθοδο της περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ και είχε εντοπισθεί η φάση του διοξειδίου του βαναδίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της ηλεκτρικής αντίστασης στο εύρος θερμοκρασιών 295-355 K. Σκοπός είναι να προσδιορισθούν τα χαρακτηριστικά της T_{MIT} (μεταβολή της ηλεκτρική τους αντίστασης) ώστε σε επόμενο βήμα να επιλεγούν τα δείγματα με την μεγαλύτερη μείωση αυτής για να μετρηθεί η οπτική τους διαπερατότητα.

2.3.1 Περιγραφή διάταξης μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης

Η διάταξη μέτρησης της αντίστασης αποτελείται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, έναν κρυοστάτη, μία πηγή ρεύματος (225 current source, Keithley), έναν εναλλάκτη πολικότητας και ένα βολτόμετρο (2000 multimetre, Keithley) (Σχ.2.6).

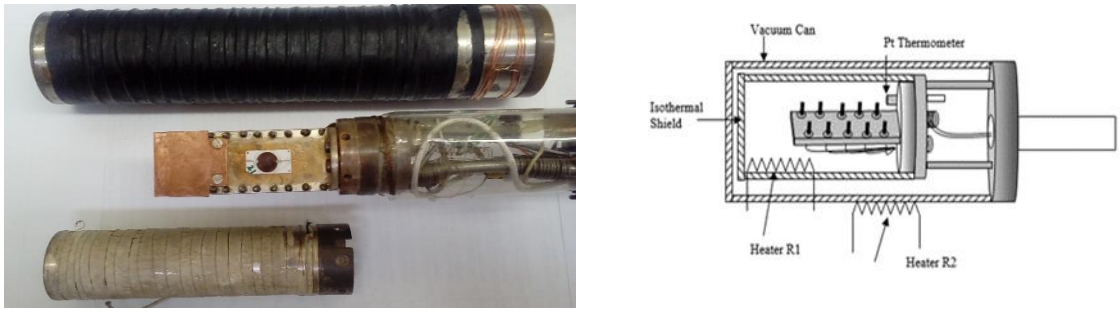
Ο κρυοστάτης χρησιμοποιείται για μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης των δειγμάτων για την περιοχή θερμοκρασιών 295-355 K. Με την πηγή ρεύματος (225 current source, Keithley) καθορίζεται η ένταση του ρεύματος που περνά από τα δείγματα. Συγκεκριμένα, οι τιμές ρεύματος που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα ήταν από 100 μA μέχρι 0.5 mA. Ο εναλλάκτης πολικότητας χρησιμοποιείται για την αντιστροφή της πολικότητας του dc-ρεύματος. Το βολτόμετρο χρησιμοποιείται για να μετρηθούν όλες οι τάσεις ώστε να γίνουν οι υπολογισμοί των αντιστάσεων και της θερμοκρασίας από τον υπολογιστή. Το πρόγραμμα που χρησιμοποιείται για την λήψη των δεδομένων από το βολτόμετρο, και για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας των δειγμάτων ονομάζεται Metro 2002.

Ο κρυοστάτης αποτελείται από έναν δειγματοφορέα, μία αντίσταση πλατίνας, ένα κυλινδρικό ατσάλινο κέλυφος, ένα δεύτερο εξωτερικό μεταλλικό κέλυφος, ένα μεταλλικό σωλήνα, ένα μανόμετρο και μία βαλβίδα ασφαλείας.

Στον δειγματοφορέα (Σχ. 2.10) που είναι κατασκευασμένος από χαλκό (Cu) και έχει 10 κατάλληλους ακροδέκτες μπορούν να τοποθετηθούν 2 δείγματα των 10mm, 12mm,

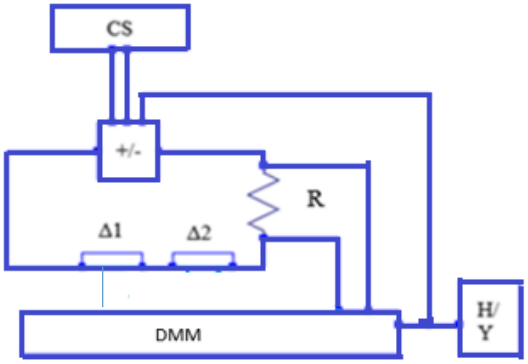
14mm ή 1 δείγμα των 19mm, 22mm. Στο εσωτερικό μέρος του, είναι τοποθετημένη μία αντίσταση πλατίνας που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θερμοκρασίας, με καμπύλη βαθμονόμησης R=f(T), με R την αντίσταση πλατίνας. Ο δειγματοφορέας σφραγίζεται εσωτερικά με ένα κυλινδρικό ατσάλινο κέλυφος περιτυλιγμένο με αντίσταση κοσταντάνης. Χρησιμοποιείται για την επίτευξη θέρμανσης μόνο του εσωτερικού μέρους του δειγματοφορέα όταν βυθίζεται σε υγρό άζωτο. Επιπλέον, τοποθετείται ένα δεύτερο εξωτερικό μεταλλικό κέλυφος στον κρυοστάτη με βίδες και στο ενδιάμεσο μια λεπτή λωρίδα από ίνδιο. Το εξωτερικό κέλυφος είναι τυλιγμένο με αντίσταση κοσταντάνης, που συνδέεται με εξωτερικό τροφοδοτικό, με την οποία μπορούν να επιτευχθούν θερμοκρασίες υψηλότερες από 300 K και χρησιμοποιείται στην διαδικασία της θέρμανσης, ενώ το ίνδιο χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η στεγανότητα. Παράλληλα, ο δειγματοφορέας ενώνεται με την έξοδο μέσω ενός μεταλλικού σωλήνα, μεγάλου ύψους, και μικρής διατομής εντός του οποίου διέρχονται τα σύρματα. Για να μετρηθεί η πίεση στο εσωτερικό του δειγματοφορέα που βρίσκονται τα δείγματα χρησιμοποιείται ένα μανόμετρο και μία βαλβίδα ασφαλείας η οποία προφυλάσσει την συσκευή όταν ενδεχόμενα η πίεση στο εσωτερικό του κρυοστάτη αυξηθεί.

Για την μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης των δειγμάτων σε χαμηλές θερμοκρασίες ο κρυοστάτης τοποθετείται σε ένα θερμομονωτικό δοχείο με υγρό άζωτο. Το θερμομονωτικό δοχείο χρειάζεται να γεμίσει 2-3 φορές με άζωτο ώστε η θερμοκρασία στο χώρο των δειγμάτων να μειωθεί σε T=77 K και στη συνέχεια αφήνεται να επανέλθει σε θερμοκρασία δωματίου.



Σχ. 2.9: Δειγματοφορέας: (Απεικόνιση της σύνδεσης δειγμάτων – ακροδεκτών)

Στο σχ.2.10 απεικονίζεται το ηλεκτρικό κύκλωμα μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης, που περιλαμβάνει δύο δείγματα Δ1, Δ2 συνδεδεμένα σε σειρά, έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, μία αντίσταση R=1000 Ω ή 100 Ω, μία πηγή ρεύματος (current source - CS), έναν εναλλάκτη πολικότητας και το ψηφιακό πολυβολτόμετρο (Digital Multimeter - DMM). Η εξωτερική αντίσταση R είναι ανεξάρτητη από την θερμοκρασία του δείγματος και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της τιμής του ρεύματος I με την εφαρμογή τάσης από τον νόμο του Ωμ (Ohm).

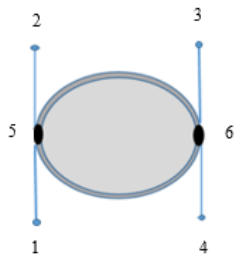


Σχ. 2.10: Ηλεκτρικό κύκλωμα μέτρησης ηλεκτρικής αντίστασης.

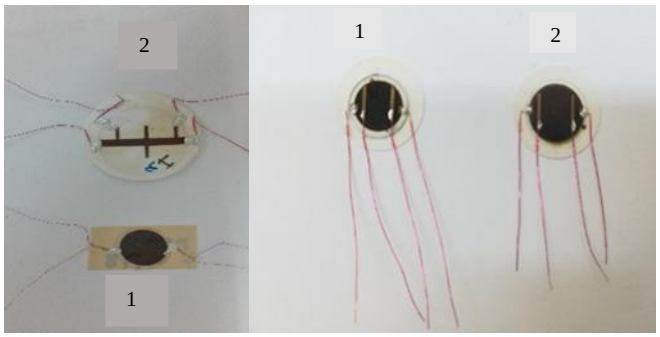
2.3.2 Δημιουργία επαφών τάσης - ρεύματος

Για την μέτρηση της αντίστασης δημιουργήθηκαν 2 επαφές αντί για 4 επαφές έτσι ώστε να αποφευχθεί η χρήση ασημόκολλας πάνω στο υμένιο που επηρεάζει τις μετρήσεις της οπτικής απορόφησης. Η συνολική αντίσταση που μετράται είναι: $R = R_{\upsilon\mu} + R_{\sigma\upsilon\rho} + R_{\varepsilon\pi}$, με $R_{\upsilon\mu}$ η αντίσταση υμενίου, $R_{\sigma\upsilon\rho}$ η αντίσταση των συρμάτων χαλκού και $R_{\varepsilon\pi}$ η αντίσταση επαφής των συρμάτων χαλκού με το υμένιο. Οι αντιστάσεις των υμενίων είναι της τάξης των 10^6 Ω ενώ οι αντιστάσεις των συρμάτων είναι πολύ μικρές (της τάξης των mΩ) και επομένως δεν λαμβάνονται υπόψη. Η αντίσταση επαφής μειώνεται με την χρήση αργίλου. Για να ελεγχθεί η αντίσταση επαφής πραγματοποιήθηκε μέτρηση ηλεκτρικής αντίστασης σε ένα δείγμα με 4 επαφές (Σχ. 2.12 a2, Σχ. 2.12 b1) και στο ίδιο δείγμα με 2 επαφές και τα αποτελέσματα ήταν συγκρίσιμα ($R = R_{\upsilon\mu}$). Επιπλέον, ακόμα κι αν υπάρχει αντίσταση επαφής τα χαρακτηριστικά της μετάβασης δεν επηρεάζονται δεδομένου ότι το μέγεθος που διαφέρει είναι η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης κατά την μετάβαση η οποία πραγματοποιείται σε μικρή θερμοκρασιακή περιοχή. Συνεπώς, τα δείγματα μετρώνται με δύο επαφές τάσης στα άκρα τους όπως φαίνεται στο Σχ.2.12 a1.

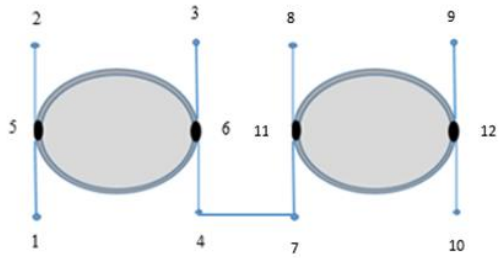
Σε κάθε κατηγορία δειγμάτων χρησιμοποιείται διαφορετικός τρόπος και διαφορετικά υλικά για την δημιουργία των επαφών ανάλογα με τις ιδιότητες τους. Στα δείγματα VO_2, οι επαφές των συρμάτων με το δείγμα μπορούν να επιτευχθούν επαλείφοντας τα δύο άκρα του δείγματος και προς το εσωτερικό του δείγματος σε δύο σημεία όπως φαίνεται στο Σχ. 2.11, (5,6) ενώ οι επαφές τάσης και ρεύματος μπορούν να επιτευχθούν με αγώγιμα σύρματα χαλκού στις επαφές (1,4) και (2,3) αντίστοιχα. Τα σύρματα στερεώνονται στη βάση (οξείδιο του αλουμινίου, quartz) με την χρήση οργανικής κόλλας ενώ στην συνέχεια τοποθετείται ασημόκολλα στις επαφές που εξασφαλίζει την αγώγιμη σύνδεση.



Σχήμα 2.11: Δείγμα με δύο επαφές τάσης (5,6) και σύρματα στις επαφές τάσης (2, 3) και ρεύματος (1, 4). Με γκρι σκούρο χρώμα είναι το υπόστρωμα γυαλιού ή quartz ή οξειδίου του αλουμινίου και με γκρι ανοικτό το VO_2.



Σχήμα 2.12: a1) Δείγμα με δύο επαφές τάσης, a2,b1,b2) Δείγματα με τέσσερις επαφές τάσης.



Σχήμα 2.13: Σύνδεση σε σειρά δύο δειγμάτων (1,4,7,10: επαφές ρεύματος και 2,3,8,9: επαφές τάσης). Δείγματα δύο επαφών.

2.3.3 Τοποθέτηση και συνδεσμολογία δειγμάτων

Η επιφάνεια του δειγματοφορέα επαλείφεται με ειδικό λίπος (high vacuum grease) με σκοπό την σταθερότερη στήριξη των δειγμάτων, καθώς και την θερμική σύνδεση τους με την επιφάνεια του δειγματοφορέα. Για να εξασφαλιστούν οι σωστές ενδείξεις του θερμομέτρου, είναι αναγκαία η προσεκτική θερμική σύνδεση των δειγμάτων με τον δειγματοφορέα. Τοποθετούνται όλα τα δείγματα και συνδέονται οι επαφές τάσης και ρεύματος με τους αντίστοιχους ακροδέκτες του δειγματοφορέα. Τοποθετείται ασημόκολλα σε όλες τις συνδέσεις καθώς και σε όλες τις επαφές που ενδεχόμενα χρειάζονται βελτίωση, έτσι όλες οι επαφές καθίστανται αγώγιμες. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραπάνω διαδικασία είναι πολύ σημαντική και απαιτεί μεγάλο βαθμό προσοχής,

αφού π.χ. στην περίπτωση που η ασημόκολλα κυλήσει στον δειγματοφορέα θα προκαλέσει βραχυκύκλωμα.

2.3.4 Προετοιμασία για τη μέτρηση-μετρητική διαδικασία

Πριν την τοποθέτηση του εξωτερικού κέλυφους για το κλείσιμο του δειγματοφορέα, και την έναρξη οποιασδήποτε μέτρησης πραγματοποιούνται οι απαραίτητες συνδέσεις των συσκευών.

Ακολουθούν δοκιμαστικές μετρήσεις, για να διαπιστωθεί εάν η συσκευή και οι συνδέσεις λειτουργούν ικανοποιητικά, ενώ παράλληλα υπάρχει η δυνατότητα γραφικής απεικόνισης των διαθέσιμων δεδομένων. Στην περίπτωση που έχουμε δύο δείγματα επιλέγονται τα ακόλουθα μεγέθη για να εμφανίζονται στην οθόνη:

V_{1+}, V_{2+}, V_{1-}, V_{2-}, Οι τιμές των τάσεων των δύο δειγμάτων κατά την θετική (+) και αρνητική (-) φορά του ρεύματος

V_{th1} V_{th2}: Η τάση στα άκρα του θερμομέτρου

I- : Η τιμή του ρεύματος που διαρρέει τα δείγματα

R_1; R_2: Η τιμή της ηλεκτρικής αντίστασης των δειγμάτων

T: Η θερμοκρασία στην οποία βρίσκονται τα δείγματα

Αξίζει να σημειωθεί ότι καθώς το ρεύμα διαρρέει κάθε δείγμα που είναι συνδεδεμένο σε σειρά με τα υπόλοιπα (επομένως όλα τα δείγματα διαρρέονται από ρεύμα της ίδιας έντασης), το βολτόμετρο μετράει διαδοχικά την τάση στα άκρα τους (V_{1+}, V_{2+}). Το ρεύμα αντιστρέφεται αυτόματα και το βολτόμετρο μετρά ξανά τις τάσεις (V_{1-}, V_{2-}). Η τιμή της ζητούμενης τάσης V είναι το ήμισυ της διαφοράς των δύο τάσεων V_+ και V_- που αντιστοιχούν στις δύο φορές του ρεύματος. Άρα από το νόμο του Ohm (R=V/I) υπολογίζεται η τιμή της αντίστασης κάθε δείγματος.

Ο λόγος που πραγματοποιείται η αντιστροφή ρεύματος που διαρρέει τα δείγματα είναι για να αποφευχθεί ο παράγοντας της θερμοηλεκτρικής τάσης. Αν σε μια αγώγιμη ράβδο η κατανομή της θερμοκρασίας δεν είναι ομοιογενής, τότε εμφανίζεται ένα θερμοηλεκτρικό πεδίο που εισάγει την έννοια της θερμοτάσης. Η θερμοτάση εξαρτάται από το υλικό και από την διαφορά θερμοκρασίας στα άκρα της ράβδου. Το ηλεκτρικό πεδίο έχει την ακόλουθη μορφή:

$$E = Q \cdot \nabla T \qquad (20)$$

όπου Q καλείται θερμοηλεκτρική ισχύς. Συνεπώς κατά την μια φορά η τάση που μετριέται είναι $V_+ = V_o + V_T$ όπου V_o η τάση χωρίς βαθμίδα θερμοκρασίας, ενώ κατά την αντίθετη φορά είναι $V_- = -V_o + V_T$. Άρα αφού $V = (V_+ - V_-)/2$ η V_T απαλείφεται και έτσι δεν υπεισέρχεται στις μετρήσεις. Αναφέρεται ότι για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων τα μεγέθη που χρειάζονται είναι οι αντιστάσεις R_1,R_2 και η θερμοκρασία T. Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται μέσω του προγράμματος Microcal Origin.

Το τελευταίο στάδιο είναι η σωστή τοποθέτηση του κυλινδρικού κελύφους. Στην άκρη του κελύφους είναι τοποθετημένο ίνδιο (μαλακό μέταλλο), έτσι όταν το κέλυφος βιδωθεί το ίνδιο παραμορφώνεται κατάλληλα και επιφέρει την απαιτούμενη στεγανότητα στο εσωτερικό του. Αυτό είναι απαραίτητο ώστε όταν η συσκευή

τοποθετηθεί στο υγρό άζωτο, αυτό να μην μπορεί να εισχωρήσει στο εσωτερικό του κελύφους.

Πειραματικά δεδομένα λαμβάνονται κυρίως κατά την θέρμανση. Η διαδικασία της θέρμανσης πετυχαίνεται μέσω των αντιστάσεων που βρίσκονται ενσωματωμένες στο κέλυφος του κρυοστάτη. Χρειάζονται μερικές ώρες για την θέρμανση στην επιθυμητή θερμοκρασία γύρω σε T=350 K. Σε αυτή την περίπτωση, στη επεξεργασία χρησιμοποιούνται όλα τα πειραματικά σημεία που λαμβάνονται τόσο κατά την θέρμανση στους 350 K όσο και μέχρι η θερμοκρασία να φθάσει ξανά σε θερμοκρασία δωματίου. Στον υπολογιστή, με την βοήθεια του οποίου γίνεται λήψη των πειραματικών δεδομένων, έχει εγκατασταθεί το πρόγραμμα METRO 2000. Το πρόγραμμα έχει την δυνατότητα υπολογισμού όλων των επιθυμητών μεγεθών που χρειάζονται από το πείραμα και καθορισμού του χρονικού διαστήματος (25 sec) μεταξύ δυο πειραματικών σημείων χάρις την αυτόματη μέτρηση (Auto timer), ενώ παράλληλα αποθηκεύονται τα δεδομένα.

2.4 Οπτικές μετρήσεις

Σε αυτό το πειραματικό στάδιο πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις οπτικής διαπερατότητας έτσι ώστε να ελεγχθούν τα χαρακτηριστικά της MIT των υμενίων VO_2 σε σταθερό μήκος κύματος και σε σταθερή θερμοκρασία. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της οπτικής διαπερατότητας σε λ=1550 nm στην περιοχή θερμοκρασιών T=300-380 K. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις οπτικής διαπερατότητας σε ένα εύρος μηκών κύματος μεταξύ 400-1000nm σε θερμοκρασία δωματίου και σε θερμοκρασία $T=370K>T_{MIT}$.

Όσον αφορά την οπτική διαπερατότητα, περιγράφεται από τον νόμο του Lambert σύμφωνα με τον οποίο, όταν μια μονοχρωματική ακτινοβολία (ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος) διέρχεται μέσω ενός υμενίου το οποίο απορροφά, η ισχύς της μειώνεται διαδοχικά εξαιτίας της απορρόφησής της. Η ισχύς της διερχόμενης ακτινοβολίας (I) είναι μικρότερη από αυτή της προσπίπτουσας (I_o). Επομένως ο νόμος του Lambert περιγράφεται από την σχέση: $I = Io \cdot e^{-ad}$ (21) όπου a ο συντελεστής απορρόφησης του υμενίου. Η οπτική διαπερατότητα προκύπτει ως εξής: $\frac{I}{Io} = e^{-ad} => \tau = 1 - ad\ (\gamma\iota\alpha\ d \ll)$ (22) [31].

Δηλαδή, για πολύ μικρό πάχος η οπτική διαπερατότητα του υμενίου είναι μεγάλη, ενώ για μεγαλύτερο πάχος η οπτική διαπερατότητα μειώνεται.

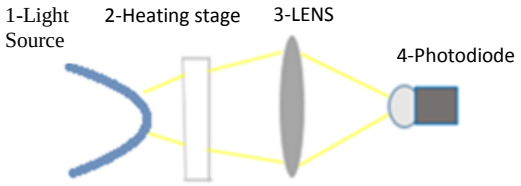
Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν η οπτική διαπεραότητα υπολογίζεται ως εξής:

$$\tau = \frac{I}{Io} \times 100\% = \frac{I_{film+sub} - I_{dark}}{I_{sub} - I_{dark}} \times 100\% \qquad (23)$$

Όπου $I_{film+sub}$ είναι η ένταση της ακτινοβολίας που διέρχεται από το υμένιο VO_2 (λαμβάνοντας υπόψη το υπόστρωμα), I_{dark} είναι η ένταση της ακτινοβολίας του υποβάθρου και I_{sub} είναι η ένταση ακτινοβολίας του υποστρώματος.

2.4.1 Πειραματική διάταξη των οπτικών μετρήσεων

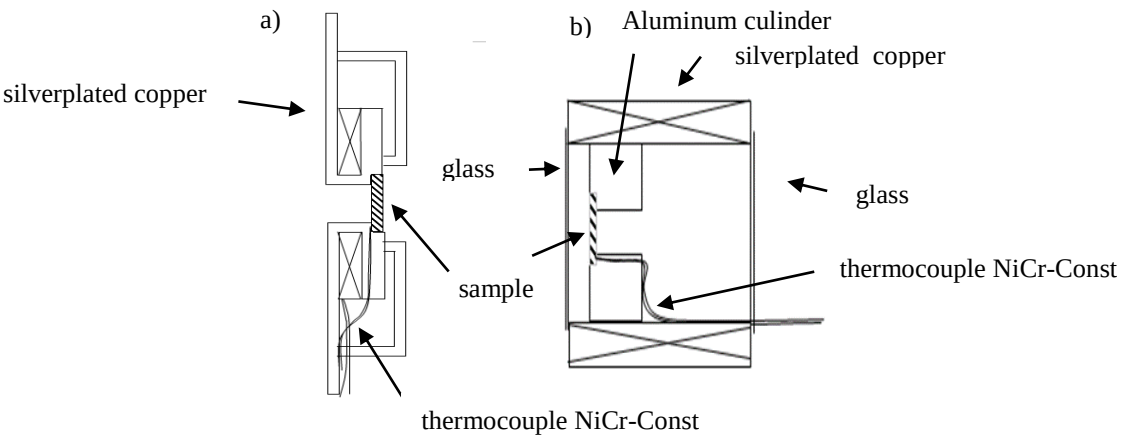
Στο σχ. 2.10 απεικονίζεται η διάταξη των οπτικών μετρήσεων που αποτελείται από μία πηγή (LED/λάμπα xenon), τον δειγματοφορέα θέρμανσης (heating stage), τον φακό εστίασης (LENS) και την φωτοδίοδο (πυριτίου- Si/ Ίνδιου-Γάλιου-Αρσενικού InGaAs).
Η απόσταση της πηγής από τον δειγματοφορέα θέρμανσης είναι 1.5cm, του δειγματοφορέα θέρμανσης από τον φακό εστίασης έιναι 2 cm και του φακού εστίασης από τον φωτοανιχνευτή είναι 5 cm.



Σχ.2.14 : Light Source (LED, λάμπα xenon) (1) – Heating stage (Δειγματοφορέας θέρμανσης) (2) –Lens (Φακός εστίασης) (3)- Photodiode (Φωτοδίοδος) (4).

Για τις οπτικές μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δύο δειγματοφορείς θέρμανσης. Ο πρώτος δειγματοφορέας θέρμανσης (Σχ. 2.15 a) αποτελείται από έναν συμπαγή κυλινδρικό δίσκο από επασημωμένο χαλκό εντός του οποίου βρίσκεται ένας μικρότερος, συμπαγής κυλινδρικός δίσκος επασημωμένου χαλκού τυλιγμένος περιμετρικά με κοσταντάνη 60 Ω αντίστασης, στα άκρα του οποίου είναι συνδεδεμένο ένα θερμοζεύγος NiCr-Const για την μέτρηση της θερμοκρασίας των δειγμάτων μέγιστης διαμέτρου 14 mm (Σχ. 2.15 a). Κατά τις μετρήσεις διαπιστώθηκε ότι η θερμοκρασία στην περιφέρεια του υμενίου διαφέρει από την θερμοκρασία στο κέντρο του. Αυτή η διαφορά αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας (Σχ.2.16 b).

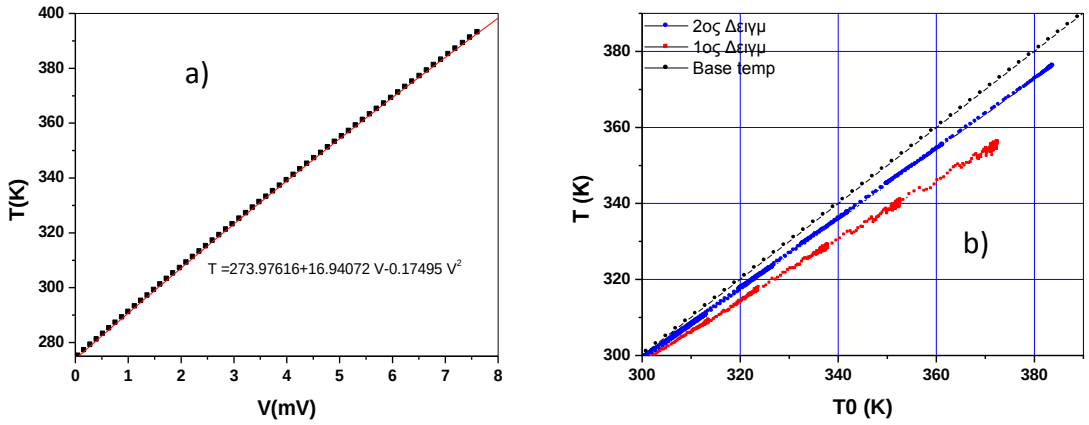
Ο δεύτερος δειγματοφορέας θέρμανσης (Σχ. 2.15 b) αποτελείται από έναν κύλινδρο από επασημωμένο χαλκό που είναι περιτυλιγμένος με κοσταντάνη αντίστασης 150Ω στον οποίο περιέχεται ένας μικρότερος συμπαγής κύλινδρος αλουμινίου με μέγιστη διάμετρο 14 mm για την στήριξη των δειγμάτων. Στον κύλινδρο αυτόν συνδέεται ένα θερμοζεύγος NiCr-Const. Ο εξωτερικός κύλινδρος σφραγίζεται δεξιά και αριστερά με γυαλιά, εγκλωβίζοντας τον αέρα που βρίσκεται στο εσωτερικό του, για να επιτευχθούν ισόθερμες συνθήκες. Με την χρήση αυτού του δειγματοφορέα η διαφορά της θερμοκρασίας μειώθηκε όπως φαίνεται από το Σχ. 2.16 b απ' όπου φαίνεται ότι η μέγιστη θερμοκρασιακή διαφορά μειώθηκε σε 5K.



Σχ.2.15 : a) 1ος Δειγματοφορέας θέρμανσης, b) 2ος Δειγματοφορέας θέρμανσης

Η καμπύλη βαθμονόμησης του θερμοζεύγους NiCr-Const (Σχ.2.16 a), με την οποία προσδιορίζεται η θερμοκρασία του δείγματος είναι: T=273.97616+16.94072 V-0.17495 V^2, V:[mV].

Στο σχ. 2.16 b απεικονίζεται η καμπύλη της μετρούμενης θερμοκρασίας στο κέντρο ενός υποστρώματος quartz T (1ος δειγματοφορέα θέρμανσης - κόκκινη καμπύλη), η αντίστοιχη καμπύλη του 2ου δειγματοφορέα θέρμανσης T (μπλε καμπύλη) και η καμπύλη της θερμοκρασίας που δείχνει το θερμόμετρο στα άκρα του quartz T_0. Όπως φαίνεται από το Σχ.2.16 b η θερμοκρασιακή διαφορά του κέντρου του υποστρώματος quartz σε σχέση με τα άκρα του είναι μικρότερη για τον 2ο δειγματοφορέα θέρμανσης.

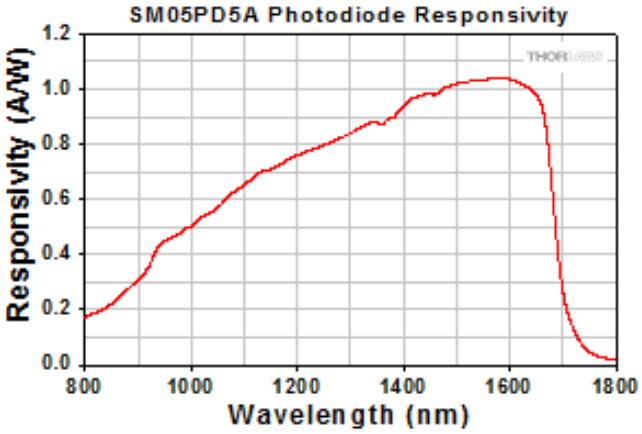


Σχ.2.16: a)Καμπύλη βαθμονόμησης του θερμοζεύγους NiCr-Const, b) Καμπύλες 1ου και 2ου δειγματοφορέα.

2.4.2 Μετρήσεις οπτικής απορρόφησης σε μήκος κύματος λ=1550nm στην περιοχή T= 300 - 380 K

Η πειραματική διάταξη (Σχ.2.14) που χρησιμοποιήθηκε για αυτές τις μετρήσεις αποτελείται από τα εξής στοιχεία: μία πηγή LED (1550 nm), τον δειγματοφορέα θέρμανσης, έναν φακό εστίασης, μία φωτοδίοδο (Indium gallium arsenide - InGaAs).

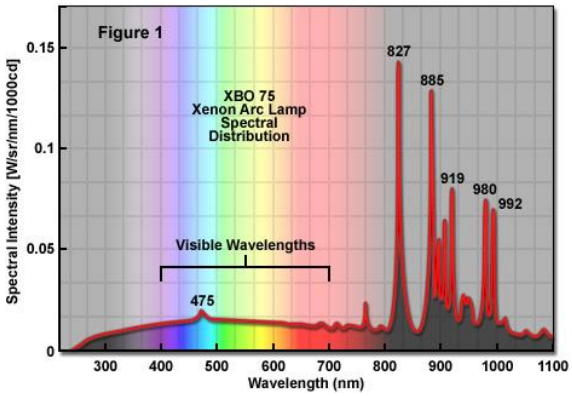
Κατά την διαδικασία του πειράματος η δέσμη από την πηγή LED (λ=1550nm) διαπερνά το δείγμα, εστιάζεται από τον φακό εστίασης και ανιχνεύεται από την φωτοδίοδο Ίνδιου-Γάλιου-Αρσενικού InGaAs. Η απόκριση της φωτοδιόδου αυτής φαίνεται στο σχ.2.17, (μέγιστη απόκριση στα 1550nm). Για την μεταβολή της θερμοκρασίας του υμενίου χρησιμοποιείται πηγή μεταβλητής τάσης.



Σχ.2.17: Φασματική απόκριση της φωτοδιόδου InGaAs [35].

2.4.3 Μετρήσεις της οπτικής απορρόφησης συναρτήσει του μήκους κύματος στην περιοχή 400-1000 nm σε T= 300 K και σε T= 370 K

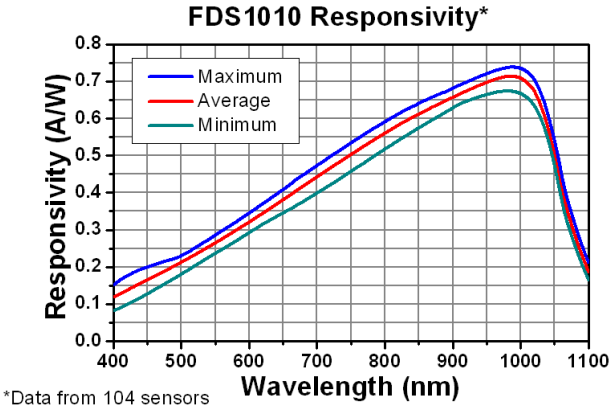
Η πειραματική διάταξη (Σχ.2.14) που χρησιμοποιήθηκε για αυτές τις μετρήσεις αποτελείται από τα εξής στοιχεία: μία λάμπα xenon, έναν μονοχρωμάτορα, μία ίριδα, τον δειγματοφορέα θέρμανσης, έναν φακό εστίασης, μια φωτοδίοδο (πυριτίου – Si), και ένα φίλτρο μήκους κύματος 500nm.
Στο Σχ.2.18 απεικονίζεται το φάσμα εκπομπής της λάμπας xenon. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα εμφανίζονται ορισμένες κορυφές πάνω από τα 800nm που στις μετρήσεις λαμβάνονται υπόψη και εξαλείφονται.



Σχ.2.18: Φάσμα ακτινοβολίας της λάμπας xenon [36].

Η δέσμη εκπέμπεται παράλληλα διαπερνώντας το σφαιρικό κάτοπτρο της λάμπας xenon και αναλύεται σε διάφορες μονοχρωματικές περιοχές μέσω ενός μονοχρωμάτορα. Ρυθμίζεται η διάμετρος της μέσω της ίριδας, εστιάζεται μέσω ενός

φακού εστίασης και ανιχνεύεται από την φωτοδίοδο (Silicon – Si). Η απόκριση της φωτοδιόδου Si φαίνεται στο σχ.2.16 (μέγιστη απόκριση στα 1000nm). Για λ>500nm χρησιμοποιείται φίλτρο μήκους κύματος 500nm πριν την φωτοδίοδο, για να "κοπούν" οι διπλές αρμονικές των μηκών κύματος λ<500nm.



Σχ.2.19: Φασματική απόκριση της φωτοδιόδου πυριτίου Si [37].

2.5 Συνοπτικός Πίνακας δειγμάτων

Συγκεντρωτικά, η πειραματική διερεύνηση των λεπτών Υμενίων Διοξειδίου του Βαναδίου $V0_2$ ως οπτικών φίλτρων στην περιοχή των Ασύρματων Οπτικών Επικοινωνιών πραγματοποιήθηκε με τα εξής βήματα:

1) Παρασκευή του διοξειδίου του βαναδίου $V0_2$ με φυσική εναπόθεση ατμού PVD και θερμική επεξεργασία (αναγωγή) των δειγμάτων.
2) Περιθλασιμετρία ακτίνων X
3) Ηλεκτρικές μετρήσεις
4) Οπτικές μετρήσεις

Παρακάτω παρουσιάζονται τα δείγματα που η θερμική επεξεργασία τους πραγματοποιήθηκε με ροή ατμοσφαιρικού αέρα (μπλε), αερίου αργού υδρογόνου (πορτοκαλί) και αζώτου (πράσινο). Η ονοματολογία των δειγμάτων ακολουθείται από τα δυο αρχικά γράμματα του ονοματεπώνυμου μου MD, τα επόμενα δύο γράμματα με τον τρόπο αναγωγής (π.χ. ροή ατμοσφαιρικού αέρα - NR, ροή αργού υδρογόνου - ArR, ροή αζώτου – RN), τα επόμενα δύο γράμματα με τον αριθμό της αναγωγής (που καθορίζεται από συγκεκριμένες συνθήκες:T,t,P) και τα τελευταία γράμματα με τον τύπο του υποστρώματος (γυαλί:g ή G, quartz:q ή Q, μονοκρυσταλλικό οξείδιο του αλουμινίου Al_2O_3:AL ή al). Σε όποιο δείγμα υπάρχει στην ονοματολογία του το γράμμα "H" σημαίνει ότι έχει θερμανθεί μετά την εναπόθεσή του στους 500˚C.

Τα δείγματα τα οποία επιλέχθηκαν για ηλεκτρικές μετρήσεις φαίνονται στην στήλη R(T) και η επιλογή τους έγινε με κριτήριο το περιθλασίγραμμα τους να δείχνει τη φάση του διοξειδίου του βαναδίου VO_2. Ενώ τα δείγματα για τα οποία πραγματοποιήθηκαν οπτικές μετρήσεις είναι αντιπροσωπευτικά ενός συνόλου δειγμάτων με μετάβαση στις ηλεκτρικές μετρήσεις μεγαλύτερη σε τάξη μεγέθους από άλλα δείγματα (επισκιασμένα,

πλάγια γράμματα) με μέγιστη διάμετρο 14 mm. Στο επόμενο κεφάλαιο θα παρουσιασθούν μόνο τα δείγματα για τα οποία έχουν πραγματοποιηθεί και οπτικές μετρήσεις.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ		ΦΥΣΙΚΗ ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΤΜΟΥ		ΑΝΑΓΩΓΗ				ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ	
ΔΕΙΓΜΑΤΑ	ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ(mm)	t1 (min)	t 2(min)		P(mbar)	T(˚C)	time(hour)	R(T)	ΤΑΞΗ. ΜΕΤΑΒΑΣΗΣ
MDNRG1	10	10	10	A11 (ATM) 15/12	2	480	1	NAI	~1.5-2
MDNRG2	12	10	10					NAI	~1.5-2
MDNRQ1	big broken	10	10					NAI	1+
MDNRA12q1	14	10	10	A12(ATM) 20/12	2	480	2	NAI	1.5
MDNRA12q2	14	10	10					NAI	1.5
MDNRA12q3	14	10	10					NAI	1.5
MDNRA12Q	big broken	10	10	A10(H. V) 8/12	5 10^-2	440	0,5		
		10	10	A12(ATM) 20/12	2	480	2		
MDArHg13118	12	10	10		4 10^-1	480	2	NAI	2+
MDArHg2	12	10	10		4 10^-1	480	2	NAI	2
MDArR14g1	12	10	10	ArR14(Ar-H) 10/01	4 10^-1	480-500	4	NAI	1.5*
MDArR14g2	12	10	10					NAI	~2*
MDArR14g3	12	10	10					NAI	1.5*
MDArR15al1	13	10	10	ArR15(Ar-H) 21/1	4 10^-1	500	2,5		
MDArR15al2	13	10	10						
MDArR15al3	13	10	10						
MDArR15g1	12	10	10						
MDArR15q3	14	10	10						
MDRN16g1	12	30	30	N 24/01	4 10^-1	450-460	2	NAI	1
MDRN16g2	12	30	30					NAI	1
MDRN16g3	12	30	30					NAI	1
MDRN17gbig	19	20	20	N 26/01	4 10^-1	500	3	NAI	1.5-2
MDRN17g1	12	20	20					NAI	1,5
MDRN17g2	12	20	20					NAI	1,5
MDRN17g3b	10	20	20						
MDRN18gb1	19	20	20	N 29/01	4 10^-1	500	3	NAI	2
MDRN18gb2	19	20	20					NAI	2
MDRN18Q	14	20	20					NAI	4
MDRN18al	13	30	30					NAI	2
MDRN19gbig	19	>20	>20	N 1/02	4 10^-1	500	4		
MDRN19q1	14	>20	>20						
MDRN19q2	14	>20	>20						
MDRN19q3	Τετράγωνο	>20	>20						
MDRN20gbig	19	>20	>20	N 2/02	4 10^-1	500	3,5		
MDRN20g1	10	>20	>20						
MDRN20g2	10	>20	>20						
MDRN20g3	10	>20	>20						
MDRN20Q1	14	20	50					NAI	2
MDRN21gb1	19	20	20	N 5/02	4 10^-1	500	2,5		
MDRN21gb2	19	20	20						
MDRN21g	10	20	20					NAI	2*
MDRN21q	Τετραγωνο	20	20					NAI	2,5
MDRN22gbig	19	paxy x3		N 6/02	4 10^-1	500	2h+45min	NAI	
MDRN22g1	10	20(2*10)	20(2*10)					NAI	2
MDRN22g2	10	20(2*10)	20(2*10)					NAI	2
MDRN22g3	10	20(2*10)	20(2*10)						
MDRN23g1	10	20(2*10)	20(2*10)	N 7/02	4 10^-1	500	3	NAI	2
MDRN23g2	10	20(2*10)	20(2*10)					NAI	2
MDRN23g3	10	20(2*10)	20(2*10)					NAI	~2
MDRN23g4	10	10	10					NAI	2,5
MDRN23g5	10	10	10					NAI	~2.5

MDRN23g6	10	10	10					NAI	2
MDRN24gb1	19	10	10	N 13/03	4 10^-1	500	3	NAI	1,5
MDRN24gb2	22	10	10+20(3η)					NAI	1,5
MDRN24gb3	22	20	20					NAI	1,5
MDRN25g1	10	10	10	N 14/03	4 10^-1	500	3	NAI	2+
MDRN25al	13	30	30					NAI	2,5
MDRN25gb1	22	20	20					NAI	
MDRN25gb2	22	20	20					NAI	
MDRN26gb1	22	20	20	N 19/03	4 10^-1	500	3,5	NAI	2.5-3
MDRN26gb2	22	20	20					NAI	1,5
MDRN26gb3	19	20	20						1,5
MDRN27gb1	22	20	20	N 20/03	4 10^-1	500	3,5	NAI	3
MDRN27gb2	22	20	20					NAI	3
MDRN27al	13	30	30					NAI	2*
MDRN27g	10	10	10						1*
MDRN28gb1	22	20	20	N 21/03	4 10^-1	500	2,5	NAI	
MDRN28gb2	22	20	20					NAI	1+
MDRN28al	13	30	30					NAI	2*
MDRN28g	10	10	10					NAI	1,5
MDRN29gb1	22	20	20	N 22/03	4 10^-1	500	2,5		
MDRN29gb2	22	20	20						
MDRN29gb3	22	20	20						
MDRN30gb1	22	20	20	N 26/03	4 10^-1	500	3h:15min		
MDRN30gb2	22	20	20						
MDRN30gb3	22	20	20						
MDRN31gb1	22	20	20	N 27/03	4 10^-1	500	3h:45min		
MDRN31gb2	22	20	20						
MDRN31gb3	22	20	20						
MDRN32gb1	22	20	20	N 28/03	4 10^-1	500	3h:45min		
MDRN32gb2	22	20	20						
MDRN32gb3	22	40	20						
MDRN33gb1	22	40	20	N 29/03	4 10^-1	500	4		
MDRN33gb2	22	40	20						
MDRN33gb3	22	20	20						
MDRN34gb1	22	20	20	N 30/03	4 10^-1	500	3,5	NAI	2
MDRN34gb2	22	20	20					NAI	2.5
MDRN34gb3	22	20	20					NAI	2

Κεφάλαιο 3

Παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων

3.1 Φασική εξέλιξη των υμενίων

Μετά την εναπόθεση πραγματοποιήθηκε περιθλασιμετρία ακτίνων Χ σε επιλεγμένα υμένια σε διαφορετικά υποστρώματα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα σε καμία περίπτωση δεν παρατηρήθηκαν κορυφές Bragg, υποδηλώνοντας ότι τα υμένια V_2O_5 βρίσκονται σε άμορφη κατάσταση, ανεξαρτήτως υποστρώματος. Μετά από θέρμανση των υμενίων σε T=370-500°C, t=1h, στα περιθλασιγράμματα διαπιστώθηκε η ύπαρξη κορυφών Bragg που μπορούν να αποδοθούν σε πολυκρυσταλλικό α - V_2O_5. Επιπλέον, σε ορισμένα περιθλασιγράμματα παρατηρήθηκε κορυφή σε γωνία 2θ=12.8°. Η κορυφή αυτή αποδίδεται στην πολυμορφική ένωση β- V_2O_5 [38] και η ύπαρξή της διαπιστώθηκε και στα περιθλασιγράμματα υμενίων μετά την αναγωγή τους σε VO_2(M). Σε αντίθεση, σε περιθλασιγράμματα υμενίων που υποβλήθηκαν σε απευθείας αναγωγή, δηλαδή χωρίς ενδιάμεση κρυστάλλωση, η κορυφή αυτή δεν παρατηρήθηκε συστηματικά. Για τον λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμο η αναγωγή των υμενίων να πραγματοποιείται χωρίς ενδιάμεση θέρμανση.

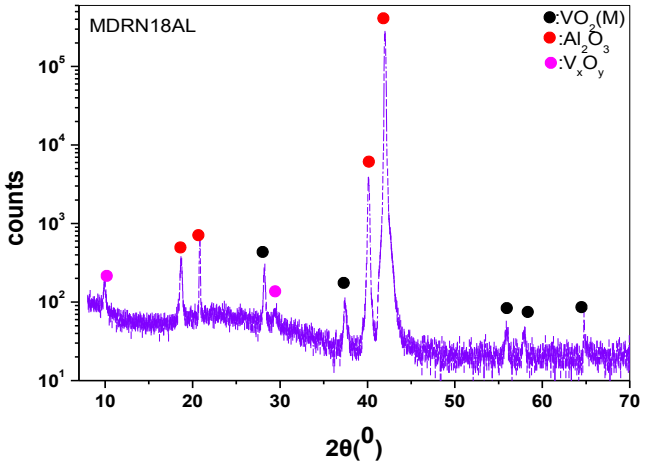
3.2 Αποτελέσματα μετρήσεων ηλεκτρικής αντίστασης και οπτικής διαπερατότητας υμενίων διοξειδίου του βαναδίου (VO_2) σε μονοκρυσταλλικά υποστρώματα

3.2.1 Αποτελέσματα μετρήσεων του διοξειδίου του βαναδίου VO_2 σε υποστρώματα Al_2O_3

Τα υμένια MDRN18AL, MDRN25AL εναποτέθηκαν με PVD όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.1.1 σε δίσκο μονοκρυσταλλικού οξειδίου του αλουμινίου Al_2O_3 13mm διαμέτρου και πάχους 0.5mm. Η θερμική επεξεργασία της αναγωγής των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες ροής αζώτου πίεσης $P=4\cdot10^{-1}$ mbar, χρόνου t=3h, θερμοκρασίας T=500°C.

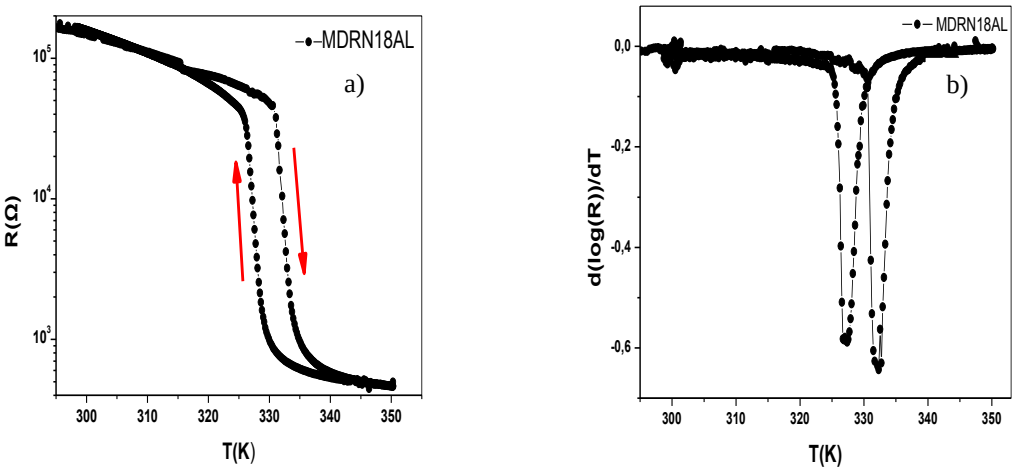
3.2.1.A1 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDRN18AL

Στο Σχ.3.1 φαίνεται το περιθλασίγραμμα ακτίνων Χ στην περιοχή 2θ=8°-70°. Διακρίνονται οι κορυφές του VO_2(M) στις γωνίες 28.1°, 37.5°, 55.5°, 57.5°, 64.5° καθώς και οι κορυφές του Al_2O_3 στις 18.7°, 20.9°, 40.1° και 42.4° . Οι ασθενείς κορυφές στις γωνίες 2θ=9.5° και 29.1° αν και παραμένουν αταυτοποίητες πιθανότατα οφείλονται σε κρυσταλλικό οξείδιο του βαναδίου.



Σχ.3.1 Περιθλασίγραμμα ακτίνων Χ λεπτού υμενίου MDRN18AL.

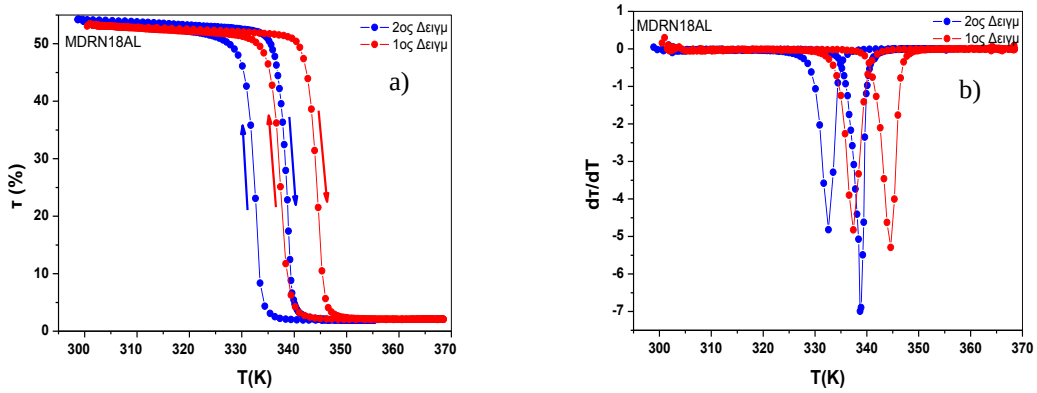
Στο Σχ. 3.2.α φαίνεται η εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) του δείγματος από την θερμοκρασία στην περιοχή θερμοκρασιών 295-355 K. Διακρίνεται απότομη μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης κατά 2 τάξεις μεγέθους περίπου σε T=332.1 K κατά την θέρμανση του δείγματος, και αντίστοιχη αύξηση σε θερμοκρασία T=327.3 K κατά την ψύξη του. Η μεταβολή της αντίστασης αποδίδεται στην μετάβαση μετάλου μονωτή (MIT). Η θερμοκρασιακή εξάρτηση της R(T) τόσο στην περιοχή $T<T_{MIT}$ όσο και στην περιοχή $T>T_{MIT}$ παραμένει ημιαγώγιμη. Η παρουσία του βρόγχου υστέρησης είναι αναμενόμενη δεδομένου ότι η MIT συνοδεύεται από δομική μετάβαση R↔M η οποία είναι 1ης τάξης [39]. Στο Σχ. 3.2.b απεικονίζεται η παράγωγος dlogR(T)/dT σαν συνάρτηση της θερμοκρασίας. Τα πειραματικά δεδομένα μπορούν να προσομοιωθούν ικανοποιητικά με γκαουσιανές. Η θερμοκρασία που αντιστοιχεί στο κέντρο της γκαουσιανής ορίζεται ως η T_{MIT}. Το πλάτος του βρόγχου υστέρησης (η θερμοκρασιακή διαφορά των κέντρων των γκαουσιανών) είναι 4.7 K, ενώ το πλάτος της μετάβασης (πλάτος γκαουσιανής) είναι 2.5 K τόσο κατά την θέρμανση όσο και κατά την ψύξη όπως φαίνεται στο Πίνακα 3.1.



Σχήμα 3.2: a) Εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία στην περιοχή της MIT. b) Η παράγωγος του λογαρίθμου της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η μέτρηση της οπτικής διαπερατότητας του υμενίου MDRN18AL πραγματοποιήθηκε με λ=1550 nm σε ένα εύρος θερμοκρασιών 295-370 K όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.5.1 με δύο δειγματοφορείς θέρμανσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα στο σχ.3.3, τα οποία ελήφθησαν χρησιμοποιώντας τον 1^{ο} δειγματοφορέα, η οπτική διαπερατότητα μειώνεται απότομα κατά 51.5% σε T=344.6 K κατά την θέρμανση του δείγματος, και αυξάνεται απότομα κατά το ίδιο ποσοστό σε T=337.5 K κατά την ψύξη του. Ο βρόγχος υστέρησης έχει πλάτος 6.8 K ενώ το πλάτος της μετάβασης τόσο κατά την θέρμανση όσο κατά την ψύξη είναι συγκρίσιμα με τιμές 2.7 K και 2.8 K, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές περιλαμβάνονται στον Πίνακα 3.1.

Στο Σχ. 3.3 a,b απεικονίζονται επιπλέον τα αποτελέσματα που ελήφθησαν χρησιμοποιώντας τον 2^{ο} δειγματοφορέα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, η μεταβολή της οπτικής διαπερατότητας που συνοδεύει την MIT είναι ταυτόσημη (51.5%) με αυτήν του 1^{ου} δειγματοφορέα, πραγματοποιείται όμως σε T=338.8 K κατά την θέρμανση, και σε T=332.8 K κατά την ψύξη του δείγματος. Ο βρόγχος υστέρησης έχει πλάτος 6 K ενώ το πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση (1.6 K) είναι αισθητά μικρότερο από το πλάτος κατά την ψύξη (2.7 K).

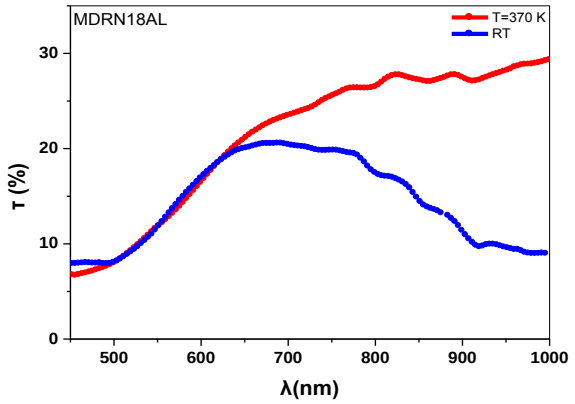


Σχήμα 3.3: a) Εξάρτηση της οπτικής διαπερατότητας υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία (κόκκινο σύμβολο-δεύτερος δειγματοφορέας, μπλε σύμβολο-πρώτος δειγματοφορέας) b) Η παράγωγος της οπτικής διαπερατότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του δείγματος.

MDRN18AL	R(T)	τ(T) 1ος Δειγματοφορέας Θέρμανσης	τ(T) 2ος Δειγματοφορέας Θέρμανσης
$T_{MITθ}$ (K)	332.1	344.6	338.8
$T_{MITψ}$ (K)	327.3	337.5	332.8
$w_θ$ (K)	2.5	2.7	1.6
$w_ψ$ (K)	2.5	2.8	2.7
w_{MIT}	4.7	6.8	6.0

Πίνακας 3.1: Θερμοκρασίες $T_{MITθ}$, $T_{MITψ}$, πλάτη $w_θ$ και $w_ψ$, και πλάτος βρόγχου w_{MIT}.

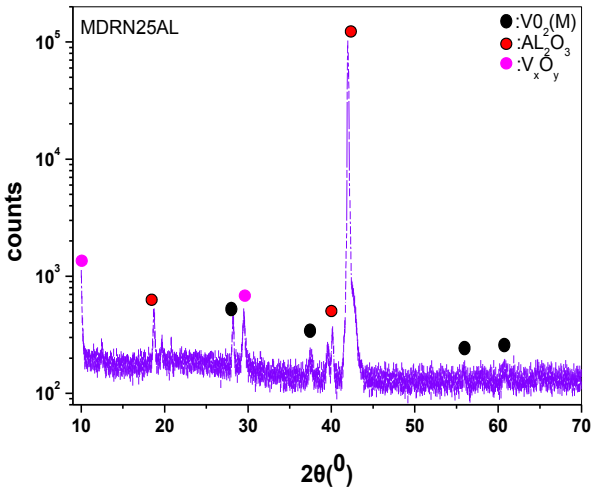
Στο σχ. 3.4 απεικονίζεται η εξάρτηση της οπτικής διαπερατότητας του υμενίου MDRN18AL σε συνάρτηση με το μήκος κύματος στην περιοχή 450 – 1000 nm που πραγματοποιήθηκε σε θερμοκρασία δωματίου (πριν την μετάβαση) και σε T=370 K (μετά την μετάβαση). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, το υμένιο έχει μέγιστη οπτική διαπερατότητα 27.5% σε λ= 800 - 850 nm πριν την μετάβαση, και 20.5% σε λ= 670-700 nm μετά την μετάβαση. Η οπτική διαπερατότητα σε λ= 670 - 700 nm είναι 22.5% πριν την μετάβαση. Επιπλέον, μετά την μετάβαση, το υμένιο έχει ελάχιστο οπτικής διαπερατότητας 8% με όρια μηκών κύματος 500 nm και 1000 nm. Σε παρόμοιες μελέτες [40] η οπτική διαπερατότητα, για πάχη υμενίων VO_2 210nm που έχουν εναποτεθεί με εναπόθεση με παλμούς λέιζερ είναι 20% στην ημιαγώγιμη κατάσταση και 13% στην μεταλλική κατάσταση. Φαίνεται ότι οι τιμές της οπτικής διαπερατότητας είναι συγκρίσιμες με τα αποτελέσματα της εργασίας αυτής με μια διαφορά στο ποσοστό της οπτικής διαπερατότητας στην μεταλλική κατάσταση.



Σχήμα 3.4: α) Εξάρτηση της οπτικής διαπερατότητας του υμενίου VO_2 σε συνάρτηση με το μήκος κύματος σε θερμοκρασία δωματίου (κόκκινη καμπύλη) και σε T=370K (μπλέ καμπύλη).

3.2.1.A2 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDRN25AL

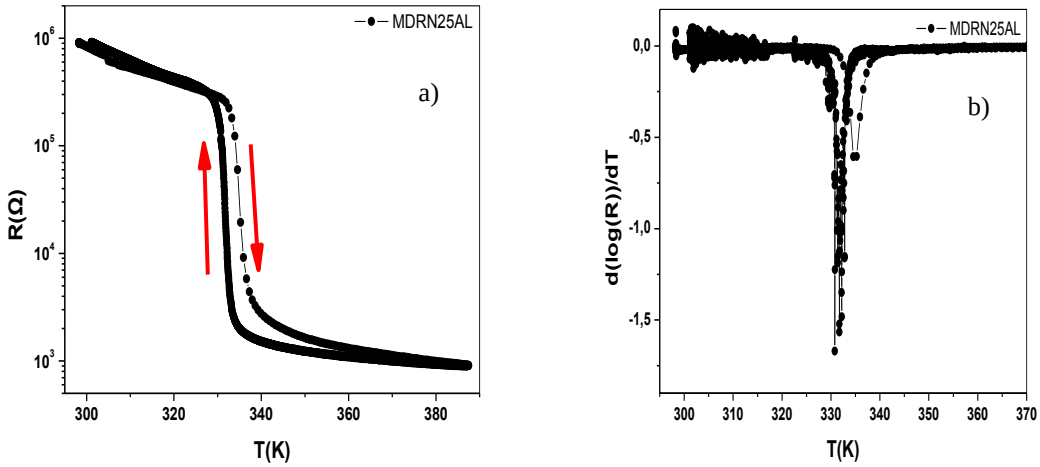
Και σε αυτό το περιθλασίγραμμα ακτίνων X στην περιοχή 2θ=8°-70° διακρίνονται οι κορυφές του VO_2(M) στις γωνίες 27.9°, 37.5°, 55.5°καθώς και οι κορυφές του Al_2O_3 18.7°, 40.2°, 60.5° όπως φαίνεται στο Σχ.3.5. Οι ασθενείς κορυφές στις γωνίες 2θ=10.09°και 29.4° αν και παραμένουν αταυτοποίητες πιθανότατα οφείλονται σε κρυσταλλικό οξείδιο του βαναδίου όπως και στο δείγμα MDRN18AL.



Σχ. 3.5: Περιθλασίγραμμα ακτίνων X λεπτού υμενίου MDRN25AL.

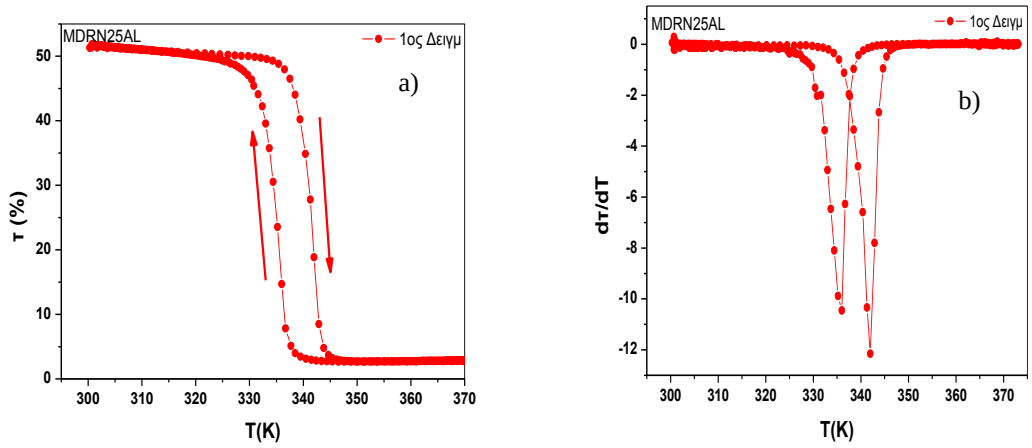
Στο Σχ. 3.6 a φαίνεται η εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) του δείγματος από την θερμοκρασία στην περιοχή θερμοκρασιών 300-385 K. Διακρίνεται απότομη μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης 2.5 τάξεις μεγέθους σε T=335 K κατά την διαδικασία της θέρμανσης του δείγματος, και αντίστοιχη αύξηση σε θερμοκρασία T=331.9 K κατά την διαδικασία της ψύξης του. Όπως έχει προαναφερθεί, η μεταβολή της αντίστασης αποδίδεται στην μετάβαση μετάλου μονωτή (MIT) όπου η θερμοκρασιακή εξάρτηση της

R(T) τόσο στην περιοχή $T<T_{MIT}$ όσο και στην περιοχή $T>T_{MIT}$ παραμένει ημιαγώγιμη. Το πλάτος του βρόγχου υστέρησης είναι 3.1 K σημαντικά μικρότερο από το πλάτος του βρόγχου υστέρησης που φαίνεται στο σχ.3.2. Το πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση (2.9 K) είναι μεγαλύτερο από το πλάτος μετάβασης κατά την ψύξη (2 K) όπως φαίνεται και από τις τιμές στον Πίνακα 3.2.



Σχήμα 3.6: a) Εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία στην περιοχή της MIT. b) Η παράγωγος του λογαρίθμου της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στο σχ. 3.7 a,b απεικονίζεται η μέτρηση της οπτικής διαπερατότητας του MDRN25AL που πραγματοποιήθηκε σε ένα εύρος θερμοκρασιών 295-370 K με τον 1ο δειγματοφορέα θέρμανσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η οπτική διαπερατότητα υφίσταται απότομη μείωση κατά 48% σε T= 342.1 K κατά την θέρμανση του δείγματος, και απότομη ισόποση αύξηση σε T= 335.9 K κατά την ψύξη του. Ο βρόγχος υστέρησης έχει πλάτος 6.7 K ενώ το πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση είναι μικρότερο (3.1 K) από το πλάτος μετάβασης κατά την ψύξη (4 K).



Σχήμα 3.7: a) Εξάρτηση της οπτικής διαπερατότητας υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία (κόκκινο σύμβολο-δεύτερος δειγματοφορέας) b) Η παράγωγος της οπτικής διαπερατότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του δείγματος.

MDRN25AL	R(T)	τ(T) 1ος Δειγματοφορέας Θέρμασης
$T_{MIT\theta}$ (K)	335.0	342.1
$T_{MIT\psi}$ (K)	331.9	335.9
w_θ (K)	2.9	3.1
w_ψ (K)	2.0	4.0
w_{MIT}	3.1	6.7

Πίνακας 3.2: Θερμοκρασίες $T_{MIT\vartheta}$, $T_{MIT\psi}$, πλάτη w_ϑ και w_ψ, και πλάτος βρόγχου w_{MIT}.

3.2.1.Β Σύγκριση των δειγμάτων MDRN25AL, MDRN18AL

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τα υμένια MDRN18AL και MDRN25AL διαπιστώνεται ότι κατά τη μετάβαση MIT η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης είναι 2 και 2.5 τάξεις μεγέθους αντίστοιχα. Οι τιμές της T_{MIT} για τα δύο δείγματα είναι παραπλήσιες (332-335 K κατά την θέρμανση και 331.9 - 327.3 K κατά την ψύξη) ενώ το πλάτος του βρόγχου υστέρησης κυμαίνεται μεταξύ 3 και 4.5 K.

Όσον αφορά στις μετρήσεις της οπτικής διαπερατότητας παρατηρήθηκε μείωση της οπτικής διαπερατότητας κατά ≈50% και στα δύο δείγματα. Ωστόσο, το πλάτος των βρόγχων υστέρησης είναι ≈6-7K και αν και δεν φαίνεται να εξαρτάται σημαντικά από τα χαρακτηριστικά του δειγματοφορέα θέρμανσης, είναι σημαντικά υψηλότερο από το αντίστοιχο της ηλεκτρικής μέτρησης.

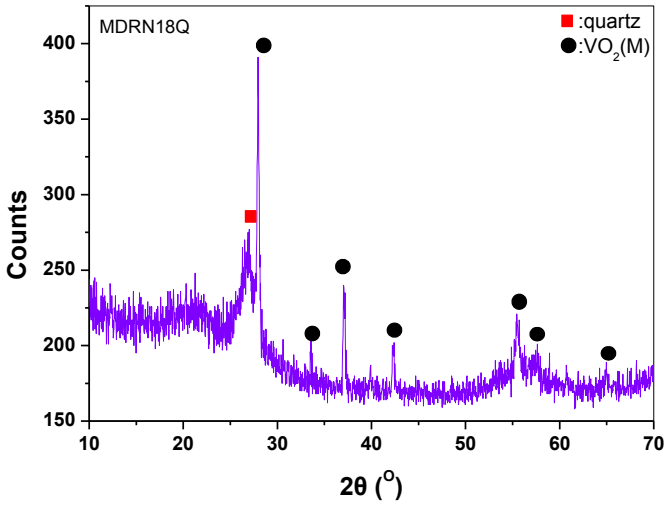
Η μικρότερη διαφορά των τιμών της MIT όπως προσδιορίστηκαν από τις ηλεκτρικές - οπτικές μετρήσεις είναι ≈6 K. Αυτό είναι αναμενόμενο εξαιτίας μεγαλύτερης ομοιογένειας της θερμοκρασιακής κατανομής που επιτυγχάνεται με την χρήση του 2ου δειγματοφορέα.

3.2.2 Αποτελέσματα μετρήσεων διοξειδίου του βαναδίου VO_2 σε υποστρώματα quartz

Τα υμένια MDRN18Q, MDRN20Q εναποτέθηκαν με PVD όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.1.1 σε δισκία quartz 14 mm διαμέτρου και 0.2 mm πάχους. Τα δισκία quartz δεν έχουν λείες επιφάνειες. Η θερμική επεξεργασία της αναγωγής των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε σε συνθήκες ροής αζώτου πίεσης $P=4\cdot10^{-1}$ mbar, σε θερμοκρασία T=500 °C, για χρόνο t=3 h (MDRN18Q), και t=3.5 h (MDRN20Q).

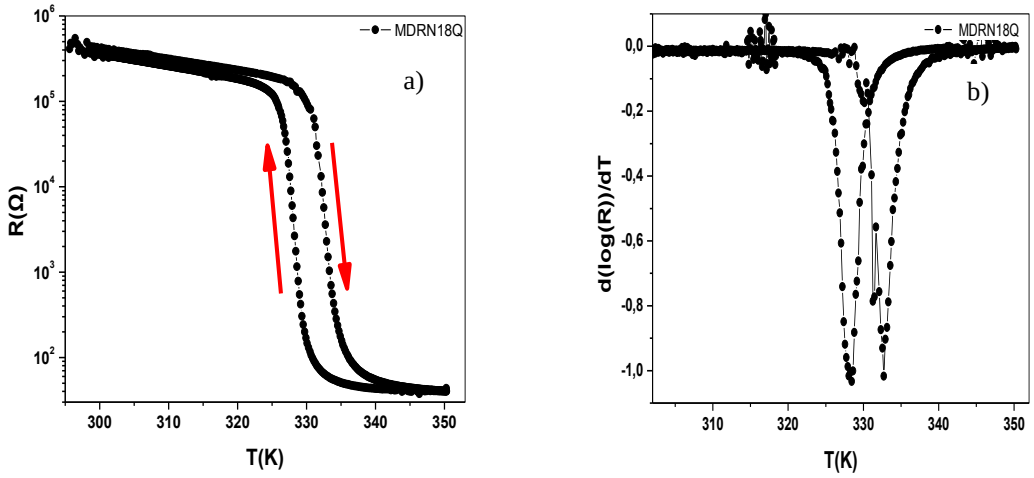
3.2.2.Α1 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDRN18Q

Στο σχ. 3.8 φαίνεται το περιθλασίγραμμα ακτίνων X στην περιοχή 2θ=10°-70° όπου διακρίνονται αρκετά ισχυρές κορυφές που αποδίδονται στο VO_2(M) στις 28.0°, 33.6°, 37.0°, 42.3°, 55.6°, 57.5° και 65.0°. Διακρίνεται επίσης η κεντρική κορυφή του quartz στις 26.8°.



Σχ. 3.8: Περιθλασίγραμμα ακτίνων X λεπτού υμενίου MDRN18Q.

Στο σχ. 3.9. a φαίνεται η εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) του δείγματος από την θερμοκρασία στην περιοχή θερμοκρασιών 300-355 K. Η αντίσταση μεταβάλλεται κατά 4 τάξεις μεγέθους σε θερμοκρασία T=333.4 K κατά την θέρμανση (μείωση αντίστασης) και T=322.6 K κατά την ψύξη (αύξηση αντίστασης). Η μεταβολή της αντίστασης αποδίδεται στην μετάβαση μετάλου μονωτή (MIT). Όπως φαίνεται στο σχ. 3.9. b. το πλάτος του βρόγχου υστέρησης (απόσταση των κέντρων των γκαουσιανών) είναι 4.5 K με συγκρίσιμα πλάτη μετάβασης (3.2 K) κατά την θέρμανση και (3.3 K) κατά την ψύξη.

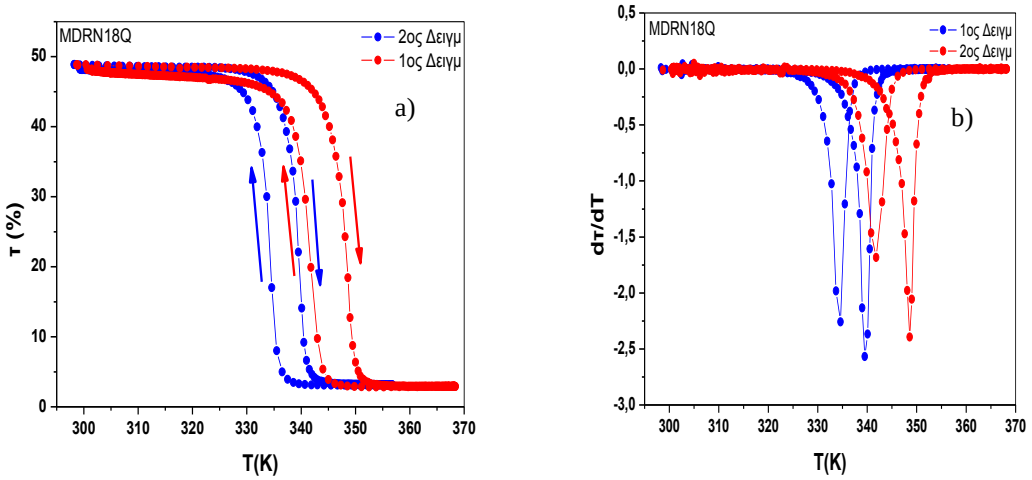


Σχήμα 3.9: a) Εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία στην περιοχή της MIT. b) Η παράγωγος του λογαρίθμου της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στο σχ. 3.10 a απεικονίζεται η μέτρηση της οπτικής διαπερατότητας του MDRN18Q που πραγματοποιήθηκε σε ένας εύρος θερμοκρασιών 295-370 K με δύο δειγματοφορείς θέρμανσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η οπτική διαπερατότητα μειώνεται κατά

45.7% σε T=348.5 K κατά τη θέρμανση του δείγματος και αυξάνεται ισόποσα σε T=333.8 K κατά την ψύξη του. Ο βρόγχος υστέρησης έχει πλάτος 5.3 K ενώ το πλάτος της μετάβασης κατά την θέρμανση (2.2 K) είναι αισθητά μικρότερο από το πλάτος μετάβασης κατά την ψύξη (3.8 K), (σχ. 3.10 b).

Τα αποτελέσματα που ελήφθησαν χρησιμοποιώντας τον 2ο δειγματοφορέα περιλαμβάνονται στο σχ. 3.10 a. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, η μεταβολή της οπτικής διαπερατότητας είναι ταυτόσημη (με αυτή που πρέκυψε από την μέτρηση με το 1ο δειγματοφορέα), πραγματοποιείται όμως σε T=339.5 K κατά την θέρμανση, και σε T=334.5 K κατά την ψύξη του δείγματος. Ο βρόγχος υστέρησης έχει πλάτος 6.8 K ενώ το πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση είναι 2.3 K συγκρίσιμο με το πλάτος μετάβασης κατά την ψύξη (2.6 K) όπως επιπλέον φαίνεται στο σχ.3.10 b.



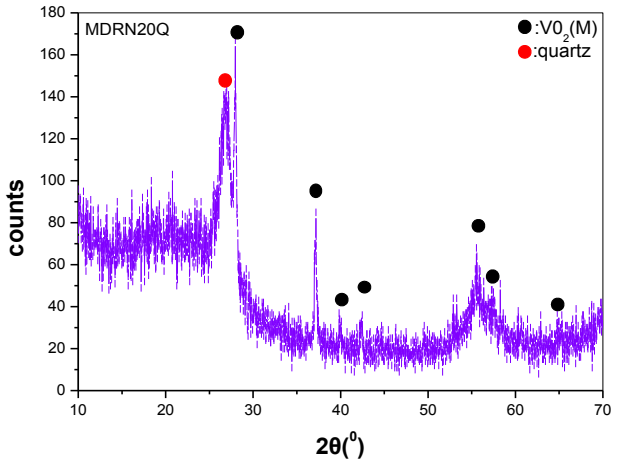
Σχήμα 3.10: a) Εξάρτηση της οπτικής διαπερατότητας υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία (κόκκινο σύμβολο-πρώτος δειγματοφορέας, μπλε σύμβολο-δεύτερος δειγματοφορέας) b) Η παράγωγος της οπτικής διαπερατότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του δείγματος.

MDRN18Q	R(T)	τ(T) 1ος Δειγματοφορέας Θέρμασης	τ(T) 2ος Δειγματοφορέας Θέρμανσης
$T_{MITθ}$ (K)	332.8	348.5	339.5
$T_{MITψ}$ (K)	328.3	341.7	334.5
$w_θ$ (K)	3.2	2.2	2.3
$w_ψ$ (K)	3.3	3.8	2.6
w_{MIT}	4.5	6.8	5.3

Πίνακας 3.3: Θερμοκρασίες $T_{MITθ}$, $T_{MITψ}$, πλάτη $w_θ$ και $w_ψ$, και πλάτος βρόγχου w_{MIT}.

3.2.2.A2 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDRN20Q

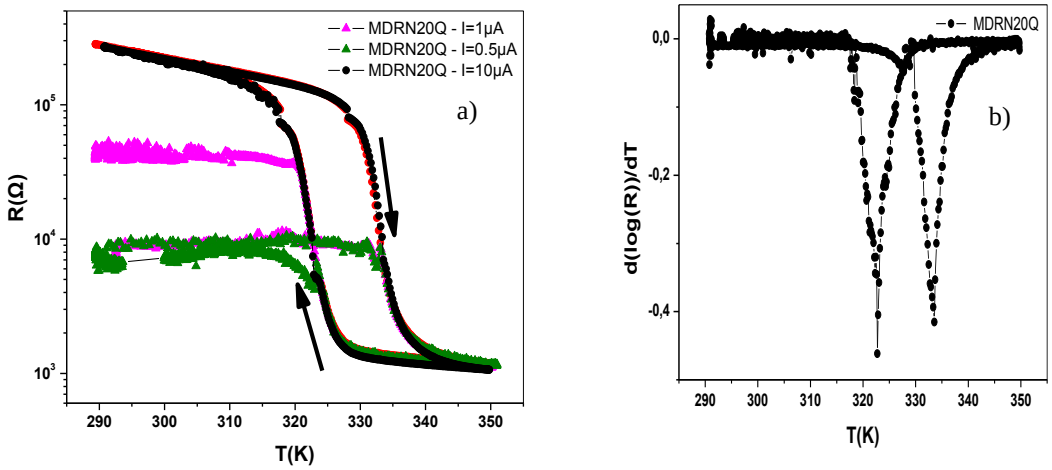
Στο σχ. 3.11 φαίνεται το περιθλασίγραμμα ακτίνων X στην περιοχή 2θ=10°-70° όπου διακρίνονται έντονες οι κορυφές που αποδίδονται στο VO_2(M) όπως και στο MDRN18Q στις 28°, 37.1°, 39.9°, 42.3°, 55.6°, 57.5°, 65.0° και του quartz στις 26.9°.



Σχήμα 3.11 Περιθλασίγραμμα ακτίνων X λεπτού υμενίου MDRN20Q.

Στο σχ. 3.12. a φαίνεται η εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) του δείγματος από την θερμοκρασία σε ένα εύρος θερμοκρασιών 300-355 K. Η αντίσταση μειώνεται κατά 2 τάξεις μεγέθους σε θερμοκρασία T= 333.4 K κατά την θέρμανση, και αυξάνεται κατά το ίδιο μέγεθος σε θερμοκρασία T=322.6 K κατά την ψύξη του (Σχ.3.11 a). Ο βρόγχος υστέρησης έχει πλάτος 11.1 K με ίδιο πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση και κατά την ψύξη (3.1 K) όπως φαίνεται στο σχ. 3.11. b.

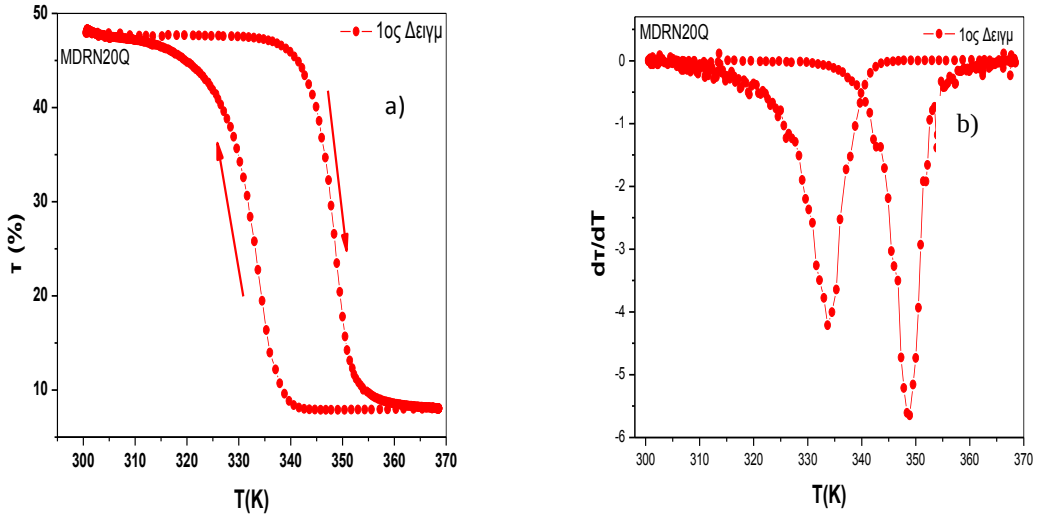
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα στο σχ. 3.12 a η ηλεκτρική αντίσταση του δείγματος στην ημιαγώγιμη περιοχή παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από το ρεύμα μέτρησης. Η μεταβολή αυτή προς το παρόν δεν έχει κατανοηθεί πλήρως και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση που ξεφεύγει από τα πλαίσια της εργασίας αυτής.



Σχήμα 3.12: a) Εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία στην περιοχή της MIT. b) Η παράγωγος του λογαρίθμου της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στο σχ. 3.13 a, b απεικονίζεται η μέτρηση της οπτικής διαπερατότητας του MDRN20Q που πραγματοποιήθηκε σε ένας εύρος θερμοκρασιών 295-370 K με τον 1ο δειγματοφορέα θέρμανσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η διαπερατότητα μειώνεται

κατά 40% σε T=348.5 K κατά την διαδικασία της θέρμανσης του δείγματος, και σε T=333.8 K κατά την διαδικασία της ψύξης του. Ο βρόγχος υστέρησης έχει πλάτος 15.1 K με πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση (5.8 K) μικρότερο από το πλάτος μετάβασης κατά την ψύξη (6.9 K).



Σχήμα 3.13: a) Εξάρτηση της οπτικής διαπερατότητας υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία (κόκκινο σύμβολο-πρώτος δειγματοφορέας) b) Η παράγωγος της οπτικής διαπερατότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του δείγματος.

MDRN20Q	R(T)	τ(T) 1ος Δειγματοφορέας Θέρμασης
$T_{MITθ}$ (K)	333.4	348.5
$T_{MITψ}$ (K)	322.8	333.8
$w_θ$ (K)	3.6	5.8
$w_ψ$ (K)	3.1	6.9
w_{MIT}(K)	11.1	15.1

Πίνακας 3.4: Θερμοκρασίες $T_{MITθ}$, $T_{MITψ}$, πλάτη $w_θ$ και $w_ψ$, και πλάτος βρόγχου w_{MIT}.

3.2.2.Β Σύγκριση των δειγμάτων MDRN18Q, MDRN20Q

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα για τα υμένια MDRN18Q και MDRN20Q διαπιστώνεται ότι κατά τη μετάβαση MIT η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης είναι σημαντικά υψηλότερη (4 τάξεις μεγέθους) για το δείγμα MDRN18Q σε σχέση με το MDRN20Q (2 τάξεις μεγέθους). Οι τιμές της T_{MIT} για τα δύο δείγματα συμπίπτουν (333.0 K) κατά την θέρμανση και διαφέρουν κατά την ψύξη με τιμή 328 K για το δείγμα MDRN18Q και 322.8 K για το δείγμα MDRN20Q. Το πλάτος του βρόγχου υστέρησης των δύο δειγμάτων διαφέρει κατά πολύ, με τιμή 11.1 K για το δείγμα MDRN20Q και 4.5 K για το δείγμα MDRN18Q.

Όσον αφορά στις μετρήσεις της οπτικής απορρόφησης παρατηρήθηκε μείωση της οπτικής διαπερατότητας κατά ≈ 45.7% στο δείγμα MDRN18Q και ≈ 40% στο MDRN20Q. Επιπλέον, το πλάτος των αντίστοιχων βρόγχων υστέρησης είναι ≈ 5-6 K για το δείγμα

MDRN18Q και 15 K για το δείγμα MDRN20Q, σημαντικά μεγαλύτερο από τα αντίστοιχα πλάτη που προέκυψαν από τις ηλεκτρικές μετρήσεις.

Σε παρόμοιες μελέτες [41], φαίνεται να παρουσιάζεται μεγαλύτερος βρόγχος υστέρησης που πιθανότατα αποδίδεται στον διαφορετικό τρόπο εναπόθεσης.

Με βάση τις μεταβολές της ηλεκτρικής αντίστασης και της οπτικής διαπερατότητας κατά την MIT, μπορεί να υποτεθεί ότι το δείγμα MDRN18Q έχει κρυσταλλωθεί με βέλτιστο τρόπο σε σύγκριση με το MDRN20Q, όπως μπορεί να διαπιστωθεί ποιοτικά και από την σύγκριση των αντίστοιχων περιθλασιγραμμάτων. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στον διαφορετικό χρόνο αναγωγής των δειγμάτων.

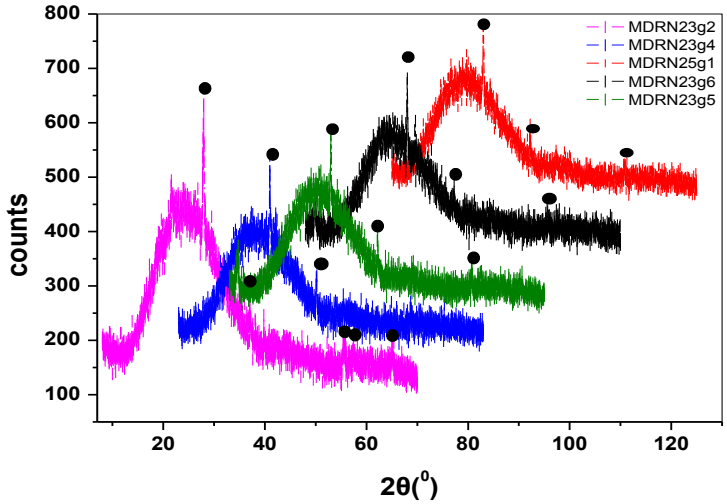
Η διαφορά των τιμών της MIT που προσδιορίστηκαν από τις ηλεκτρικές και τις οπτικές μετρήσεις είναι ≈7 K, δηλαδή συγκρίσιμη με την αντίστοιχη διαφορά για τα δείγματα MDRN18AL, MDRN25AL (ενότητα 3.2.1). Και πάλι είναι αναμενόμενο εξαιτίας μεγαλύτερης ομοιογένειας της θερμοκρασιακής κατανομής που επιτυγχάνεται με την χρήση του 2^{ου} δειγματοφορέα.

3.3 Αποτελέσματα μετρήσεων διοξειδίου του βαναδίου VO_2 σε άμορφα υποστρώματα (γυαλιά)

Τα υμένια MDRN21g, MDRN22g1, MDRN23g2, MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1, εναποτέθηκαν με PVD όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.1.1 σε υποστρώματα γυαλιού διαμέτρου 10mm και πάχους 0.2mm εκτός από το MDArHg13118 που εναποτέθηκε σε γυαλί διαμέτρου 12mm. Τα υμένια MDRN23g2, MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1 υποβλήθηκαν σε θερμική επεξεργασία σε ατμόσφαιρα αζώτου ολικής πίεσης $P=4\cdot10^{-1}$mbar και θερμοκρασίας T=500°C για t=3h. Συγκεκριμένα τα υμένια MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1 εναποτέθηκαν με PVD σε συνολικό χρόνο t=20 min ενώ το MDRN23g2 εναποτέθηκε σε συνολικό χρόνο t=40 min. Τα υμένια MDRN21g και MDRN22g1 εναποτέθηκαν με PVD σε t=20min αλλά σε διαφορετικές τάσεις μεταξύ τους και ανάχθηκαν σε ίδιες συνθήκες αλλά για διαφορετικό χρόνο t=2.5h και t=2.75 h αντίστοιχα. Το δείγμα MDArHg13118 εναποτέθηκε με PVD σε t=20min και ανάχθηκε σε συνθήκες ροής Ar - 4%H_2 πίεσης $P=4\cdot10^{-1}$mbar, θερμοκρασίας T=480°C για t=2h.

3.3.A1 Επίδραση των συνθηκών φυσικής εναπόθεσης ατμού στα δείγματα MDRN23g2, MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1

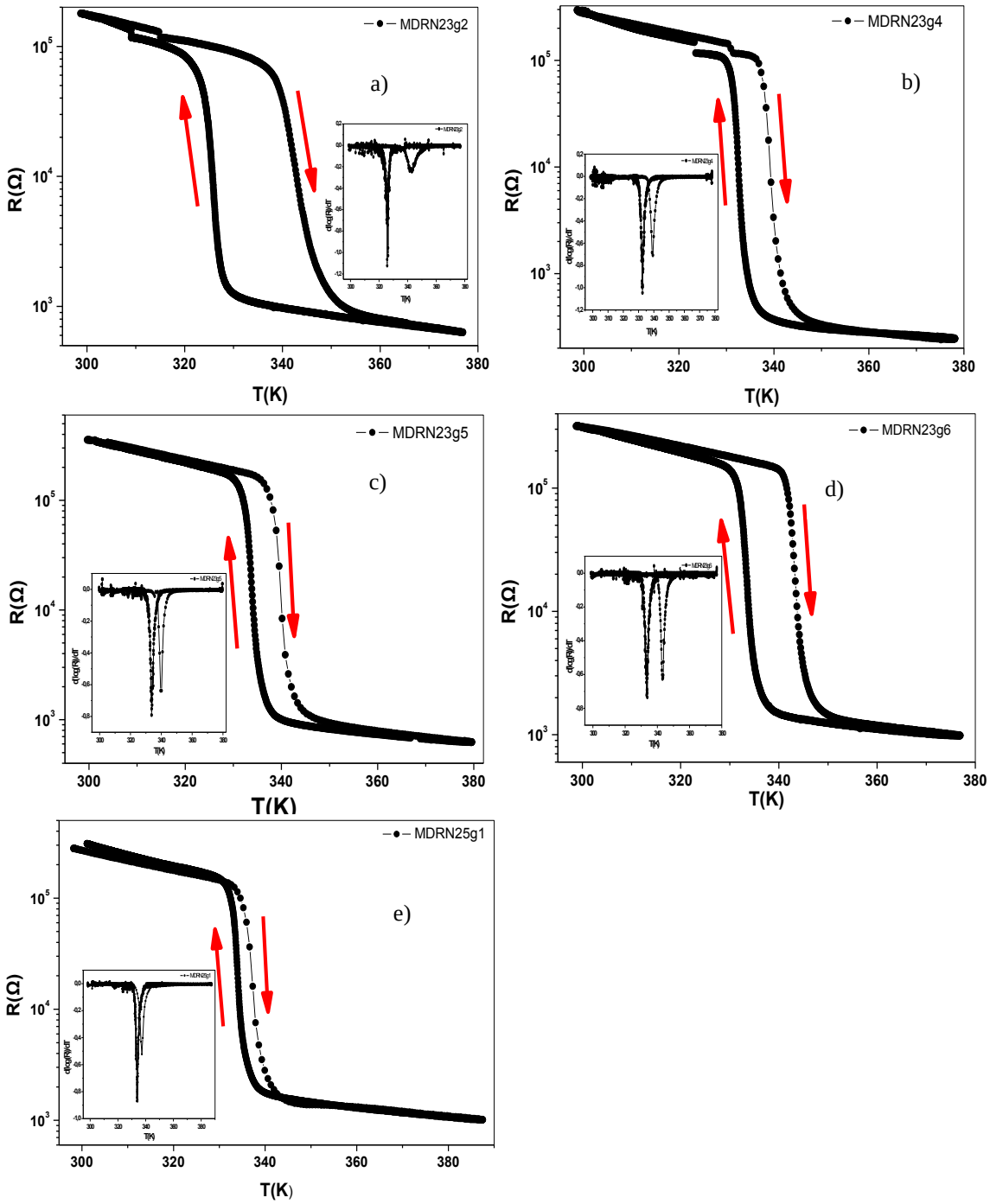
Στο σχ. 3.14 φαίνονται τα περιθλασιγράμματα ακτίνων X των δειγμάτων αυτών στην περιοχή 2θ=10°-70°. Σε όλα τα περιθλασιγράμματα διακρίνονται κορυφές στις 27.9°, 37.2°, 55.7° που αποδίδονται στο VO_2(M). Στο περιθλασίγραμμα του δείγματος MDRN23g2 διακρίνονται επιπλέον ασθενείς κορυφές στις 57.6° και στις 65° οι οποίες αποδίδονται επίσης στο VO_2(M). Η πλατιά αύξηση του υποβάθρου που εκτείνεται σε γωνίες 2θ μεταξύ 10° και 40°, αντανακλά την άμορφη κατάσταση του γυαλιού [42].



3.14: Περιθλασιγράμματα ακτίνων X λεπτών υμενίων MDRN23g2, MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1.

Στο σχ. 3.15 φαίνεται η εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) των δειγμάτων στην περιοχή θερμοκρασιών T=295-380 K. Στο ένθετο του σχήματος απεικονίζεται η αντίστοιχη παράγωγος του λογαρίθμου της αντίστασης των δειγμάτων σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Από αυτήν προσδιορίζονται η θερμοκρασία μετάβασης κατά την θέρμανση ($T_{MIT\theta}$), η θερμοκρασία μεταβάσης κατά την ψύξη ($T_{MIT\psi}$), το πλάτος της μετάβασης κατά την θέρμανση (w_θ), το πλάτος της μετάβασης κατά την ψύξη (w_ψ) και το πλάτος του βρόγχου υστέρησης (w_{MIT}) .Όλα τα παραπάνω μεγέθη βρίσκονται καταγεγραμμένα στον Πίνακα 3.5.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, όλα τα δείγματα έχουν ενιαία συμπεριφορά με 2-2.5 τάξεις μεγέθους μετάβαση και βρόγχους υστέρησης που κλείνουν, γεγονός που υποδηλώνει την αντιστρεψιμότητα της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των δειγμάτων. Συγκεκριμένα η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται κατά 2 τάξεις μεγέθους για τα δείγματα MDRN23g2, MDRN23g6, MDRN23g5, ενώ η ηλεκτρική αντίσταση μεταβάλλεται κατά 2.5 τάξεις μεγέθους για τα δείγματα MDRN23g4, και MDRN23g5. Επιπλέον, όλα τα δείγματα παρουσιάζουν βρόγχους υστέρησης που είναι αναμενόμενοι δεδομένου ότι η MIT συνοδεύεται από δομική μετάβαση R↔M η οποία είναι $1^{ης}$ τάξης. Συγκεκριμένα, το δείγμα MDRN25g1 (Σχ. 3.15 e) έχει βρόγχο υστέρησης με πολύ μικρό πλάτος (3.1 K) σε αντίθεση με το δείγμα MDRN23g2 (Σχ. 3.15 a) που έχει βρόγχο υστέρησης με πολύ μεγάλο πλάτος (17.6 K). Τα δείγματα MDRN23g4 (Σχ. 3.15 b), MDRN23g5 (Σχ. 3.15 c) έχουν βρόγχο υστέρησης με πλάτος (6 K) μικρότερο από το πλάτος του βρόγχου υστέρησης του MDRN23g6 (9 K) (Σχ. 3.15 d). Επιπλέον, σύμφωνα με το σχήμα 3.15 διαπιστώνεται ότι όλα τα δείγματα εμφανίζουν όμοιο πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση και όμοιο πλάτος μετάβασης κατά την ψύξη εκτός από το δείγμα MDRN23g2 που παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση.



Σχήμα 3.15: Εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) υμενίων VO_2 από την θερμοκρασία στην περιοχή της MIT για τα εξής υμένια: α)MDRN23g2, b)MDRN23g4, c)MDRN23g5, d)MDRN23g6, e)MDRN25g1.

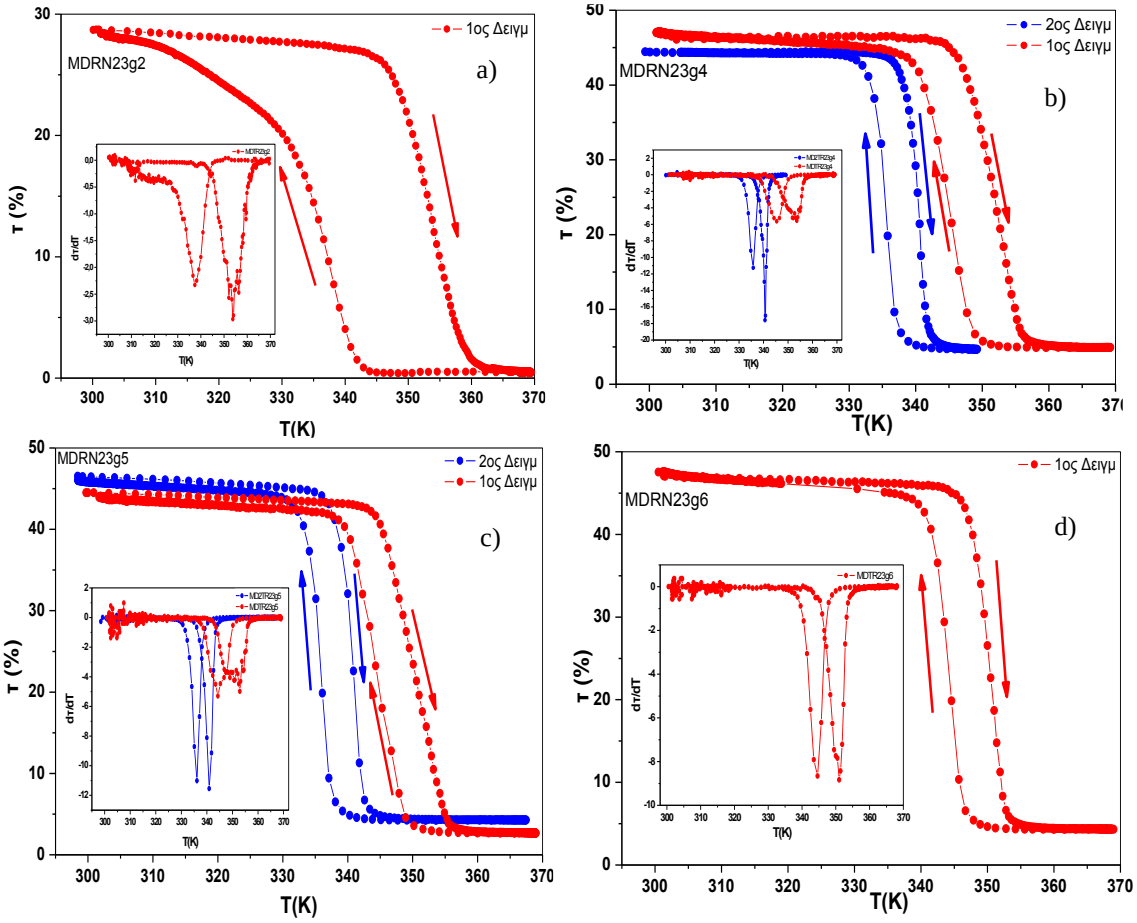
Για όλα τα δείγματα έχει μετρηθεί η οπτική διαπερατότητα για T=295-370 K στον 1ο δειγματοφορέα θέρμανσης όπως φαίνεται στο σχ.3.16. Επιπλέον η οπτική διαπερατότητα των δειγμάτων MDRN23g4, MDRN23g5 έχει μετρηθεί για T=295-370 K στον 2ο δειγματοφορέα θέρμανσης όπως φαίνεται στα σχ.3.16 b, c . Στο ένθετο του σχήματος 3.16 απεικονίζονται τα αποτελέσματα του λογαρίθμου της διαπερατότητας των δειγμάτων για το ίδιο εύρος θερμοκρασιών. Με αυτόν τον τρόπο, προσδιορίζονται

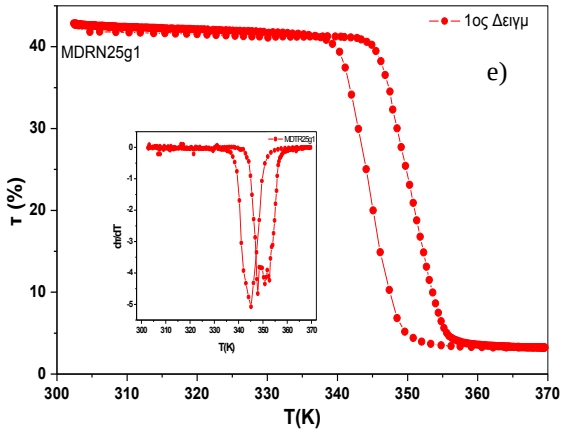
η θερμοκρασία μετάβασης κατά την θέρμανση ($T_{MITθ}$), η θερμοκρασία μεταβάσης κατά την ψύξη ($T_{MITψ}$), το πλάτος της μετάβασης κατά την θέρμανση ($w_θ$), το πλάτος της μετάβασης κατά την ψύξη ($w_ψ$) και το πλάτος του βρόγχου (w_{MIT}) .Όλα τα παραπάνω μεγέθη βρίσκονται καταγεγραμμένα στον Πίνακα 3.5.

Σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, η οπτική διαπερατότητα έχει όμοια συμπεριφορά για τα δείγματα MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1 και είναι ≈40% ενώ διαφέρει για το δείγμα MDRN23g2 που είναι ≈27%. Όλα τα δείγματα εμφανίζουν όμοιο πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση και όμοιο πλάτος μετάβασης κατά την ψύξη εκτός από το δείγμα MDRN23g2 που παρουσιάζει το μεγαλύτερο πλάτος μετάβασης κατά την ψύξη. Αυτή η παρατήρηση έρχεται σε αντίθεση με την συμπεριφορά του ίδιου δείγματος κατά τις ηλεκτρικές μετρήσεις όπου το μεγαλύτερο πλάτος μετάβασης παρατηρήθηκε κατά την θέρμανση του.

Ο βρόγχος υστέρησής των δειγμάτων έχει πλάτος (6-7 K) για τα δείγματα MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1 ενώ το πλάτος του MDRN23g2 είναι 16K.

Επιπλέον, με την μέτρηση των δειγμάτων MDRN23g4, MDRN23g5 με τον 1^{ο} και τον 2^{ο} δειγματοφορέα φαίνεται ότι η $T_{MITθ}$ και η $T_{MITψ}$ μειώνεται κατά 5 K προσεγγίζοντας τις αντίστοιχες θερμοκρασίες μετάβασης των ηλεκτρικών μετρήσεων. Το πλάτος του βρόγχου υστέρησης μειώνεται με την χρήση του 2^{ου} δειγματοφορέα για τα εν λόγω δείγματα εξαιτίας της ομοιομορφότερης θέρμανσης του δείγματος.



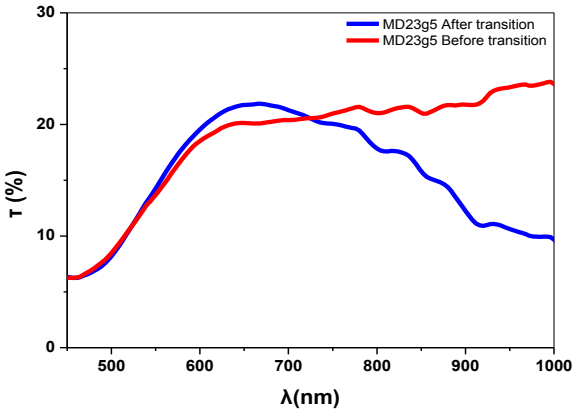


Σχήμα 3.16: Εξάρτηση της οπτικής διαπερατότητας υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία (κόκκινο σύμβολο-πρώτος δειγματοφορέας, μπλε σύμβολο-δεύτερος δειγματοφορέας) για τα εξής υμένια: α)MDRN23g2, b)MDRN23g4, c)MDRN23g5, d)MDRN23g6, e)MDRN25g1.

Δείγματα	*R(T)*					*τ (T) - 1ος δειγματοφορέας*						*τ (T) - 2ος δειγματοφορέας*					
	$T_{MITθ}$ (K)	$T_{MITψ}$ (K)	$w_θ$ (K)	$w_ψ$ (K)	w_{MIT} (K)	$T_{MITθ}$ (K)	$T_{MITψ}$ (K)	$w_θ$ (K)	$w_ψ$ (K)	w_{MIT} (K)	τ (%)	$T_{MITθ}$ (K)	$T_{MITψ}$ (K)	$w_θ$ (K)	$w_ψ$ (K)	w_{MIT} (K)	τ (%)
MDRN23g2	343.1	325.5	6.8	2.3	17.6	353.7	337.3	*17.0*	*34.0*	*16.2*	*27.6*						
MDRN23g4	*339.3*	332.5	2.4	*2.1*	*6.4*	*353.0*	*345.0*	*7.7*	*6.8*	*7.4*	*41.3*	*340.6*	*335.7*	*1.6*	*2.7*	*4.9*	*39.5*
MDRN23g5	*339.3*	333.8	2.5	2.1	*6.1*	350.5	344.3	9.3	*7.5*	*6.2*	*41.1*	*340.8*	*336.1*	*2.4*	*2.8*	*4.9*	*40.6*
MDRN23g6	*343.3*	*333.6*	*2.3*	*2.1*	*9.9*	*351.0*	*344.6*	*4.6*	*4.2*	*5.9*	*42.3*						
MDRN25g1	*337.3*	*333.5*	*2.8*	*2.6*	*3.1*	*350.1*	*345.3*	*8.4*	*7.8*	*5.6*	*39.0*						

Πίνακας 3.5: Θερμοκρασίες $T_{MITθ}$, $T_{MITψ}$, πλάτη $w_θ$ και $w_ψ$, πλάτος βρόγχου w_{MIT} και οπτική διαπερατότητα τ.

Στο σχ. 3.17 απεικονίζονται τα αποτελέσματα μέτρησης της οπτικής διαπερατότητας του MDRN23g5 σε συνάρτηση με το μήκος κύματος σε θερμοκρασία δωματίου και σε T=370K. Σύμφωνα με αποτελέσματα, το μέγιστο της οπτικής διαπερατότητας έχει τιμή 21.7% σε λ=650-680 nm πριν την μετάβαση και 20.1% στο ίδιο φασματικό εύρος μετά την μετάβαση. Επιπλέον, μετά την μετάβαση, το ελάχιστο της οπτική διαπερατότητάς του υμενίου είναι 9% για όρια μηκών κύματος 500, 1000nm.



Σχ. 3.17: α)Η εξάρτηση της διαπερατότητας του δείγματος VO_2 MDRN23g5 με το μήκος κύματος σε θερμοκρασία δωματίου (κόκκινη γραμμή) και σε T=370K (μπλέ γραμμή).

3.3.B1 Σύγκριση των δειγμάτων MDRN23g2, MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1

Συγκρίνοντας τα δείγματα MDRN23g2, MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1 φαίνεται ότι όλα τα δείγματα έχουν όμοια συμπεριφορά στις ηλεκτρικές και στις οπτικές τους μετρήσεις με μικρές διαφοροποιήσεις που στην συνέχεια θα αναλυθούν.

Όσο αφορά στις ηλεκτρικές μετρήσεις, όλα τα δείγματα μεταβάλλουν την ηλεκτρική τους αντίσταση κατά 2 με 2.5 τάξεις μεγέθους τόσο κατά την θέρμανσή τους όσο και κατά την ψύξη τους. Αυτή η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης των δειγμάτων παρουσιάζει κλειστούς βρόγχους, γεγονός που δηλώνει την αντιστρέψιμη συμπεριφορά της κατά την θέρμανση και κατά την ψύξη της. Μεγαλύτερη μεταβολή στην ηλεκτρική αντίσταση έχουν τα δείγματα MDRN23g5, MDRN23g6 με 2.5 τάξεις μεγέθους μεταβολή ενώ τα δείγματα MDRN23g4, MDRN23g2, MDRN25g1 έχουν 2 τάξεις μεγέθους μεταβολή. Τα πλάτη των βρόγχων υστέρησης των MDRN23g4, MDRN23g5, είναι 5-6 K, του MDRN23g6 είναι 9.9 K ,του MDRN25g1 είναι 3.1 K ενώ το MDRN23g2 έχει το μεγαλύτερο πλάτος βρόγχου υστέρησης (17K).

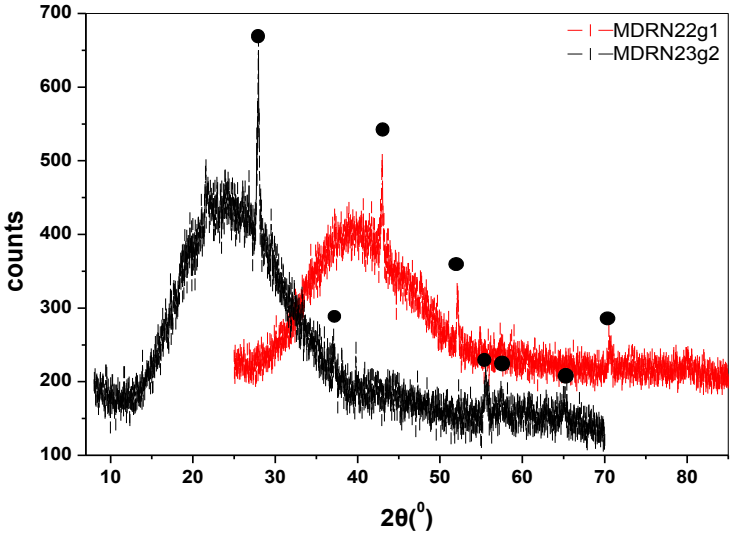
Λαμβάνοντας υπόψη και τις οπτικές μετρήσεις των παραπάνω δειγμάτων διαπιστώνεται ότι η οπτική διαπερατότητα όλων των δειγμάτων παρουσιάζει κλειστούς βρόγχους κατά την θέρμανση και την ψύξη τους. Η οπτική διαπερατότητα των MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1 είναι ≈40% ενώ του MDRN23g2 είναι αρκετά μικρότερη (≈27%). Το πλάτος του βρόγχου υστέρησής, είναι (5-7 K) για τα MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1 ενώ για το MDRN23g2 είναι σημαντικά υψηλότερο (16.2 K).

Επομένως, διαπιστώνεται συνολικά ότι η επίδραση διαφορετικών συνθηκών φυσικής εναπόθεσης ατμού στα παραπάνω δείγματα επιφέρει όμοιες αλλαγές στην ηλεκτρική αντίσταση και στην οπτική διαπερατότητα των δειγμάτων. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκε ότι τα δείγματα MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1 έχουν ενιαία συμπεριφορά ηλεκτρικών και οπτικών ιδιοτήτων σε αντίθεση με αυτή του MDRN23g2. Αυτό πιθανότατα να οφείλεται στον διαφορετικό χρόνο εναπόθεσης των δειγμάτων MDRN23g4, MDRN23g5, MDRN23g6, MDRN25g1 από το δείγμα MDRN23g2.

Όπως αναμένεται, η οπτική διαπερατότητα παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή στην υπέρυθρη περιοχή χωρίς σημαντική μεταβολή στην ορατή περιοχή [43, 44]. Σε παρόμοιες μελέτες, έχει διαπιστωθεί αυτή η θερμοκρασιακή εξάρτηση στην υπέρυθρη περιοχή σε σχέση με την ορατή. Ωστόσο, η τιμή της οπτικής διαπερατότητας των υμενίων αυτών [43] είναι υψηλότερη από την τιμή της οπτικής διαπερατότητας των υμενίων της παρούσας εργασίας 27.5%. Αυτή η διαφορά πιθανότατα οφείλεται στο διαφορετικό τρόπο παρασκευής των υμενίων όπου στην περίπτωση της εργασίας αυτής, η μέθοδος είναι φυσική εναπόθεση ατμών, ενώ στην περίπτωση των V. Melnik et al, ο τρόπος παρασκευής του υλικού είναι DC ιονοβολή.

3.3.A2 Επίδραση των συνθηκών θερμικής επεξεργασίας στα δείγματα MDRN22g1, MDRN23g2

Στο σχ. 3.17 φαίνονται τα περιθλασιγράμματα ακτίνων Χ των δειγμάτων MDRN22g1, MDRN23g2 στην περιοχή 2θ=10°-70°. Σε όλα τα περιθλασιγράμματα διακρίνονται αρκετά ισχυρές κορυφές στις 27.9°, 37.1°, 55.6° που αποδίδονται στο VO_2(M). Στο περιθλασίγραμμα του δείγματος MDRN23g2 διακρίνονται επιπλέον ασθενείς κορυφές στις 57.6° και στις 65° οι οποίες αποδίδονται επίσης στο VO2(M). Η πλατιά αύξηση του υποβάθρου που εκτείνεται σε γωνίες 2θ μεταξύ 10° και 40°, αντανακλά την άμορφη κατάσταση του γυαλιού [42].

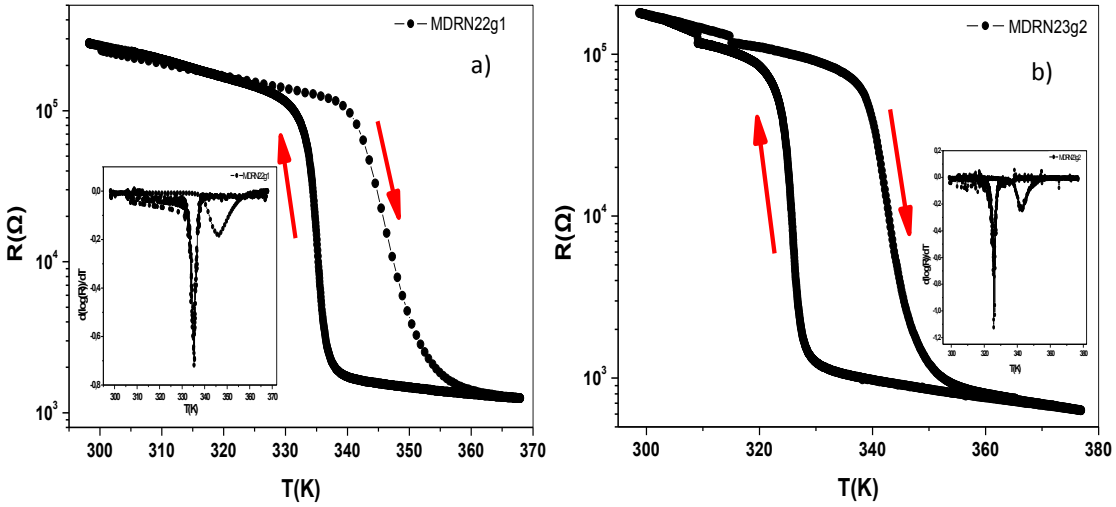


Σχ.3.17 Περιθλασιγράμματα ακτίνων Χ λεπτών υμενίων MDRN23g2, MDRN22g1.

Στο σχ. 3. 18 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της μέτρησης της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) των δειγμάτων MDRN23g2, MDRN22g1 σε συνάρτηση με την θερμοκρασία σε ένα εύρος θερμοκρασιών 285-370 K. Στο ένθετο του σχήματος αυτού, απεικονίζεται η παράγωγος της ηλεκτρικής αντίστασης σε συνάρτηση με την θερμοκρασία.

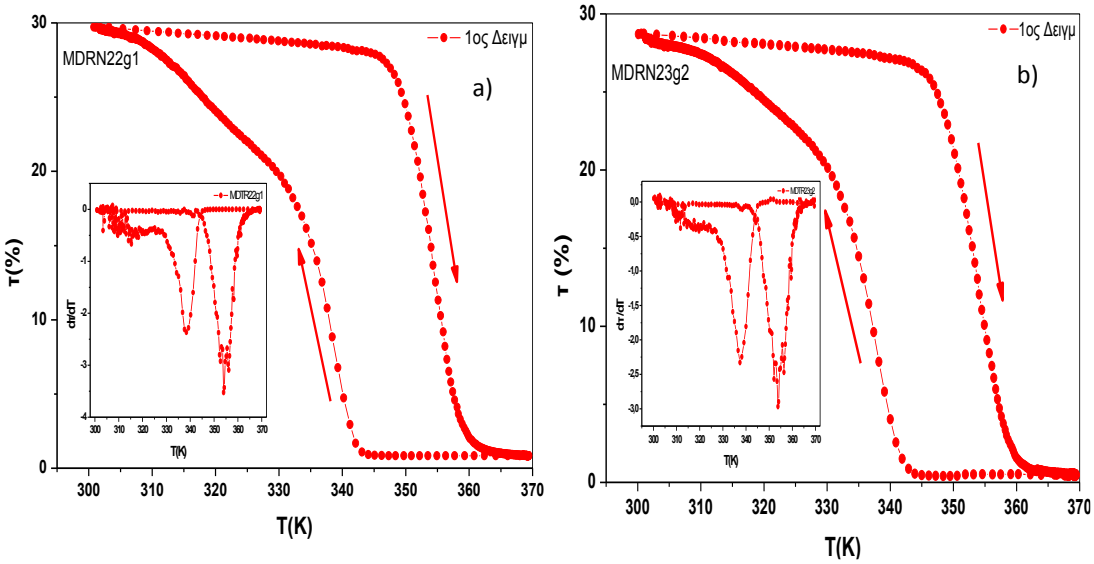
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα η αντίσταση των δειγμάτων μεταβάλλεται κατά 2 τάξεις μεγέθους σε ιδια $T_{MITθ}$=345.7 K κατά την θέρμανση (μείωση αντίστασης) αλλά διαφορετική T_{MIT} κατά την ψύξη (αύξηση αντίστασης) για το δείγμα MDRN23g2 ($T_{MITθ}$=335 K) και για το δείγμα MDRN22g1 ($T_{MITψ}$=325 K). Η μεταβολή της αντίστασης οφείλεται στην μετάβαση μετάλλου μονωτή ενώ ο βρόγχος υστέρησης είναι αναμενόμενος εξαιτίας της δομικής μετάβασης R<->M 1ης τάξης. Το πλάτος του βρόγχου υστέρησης είναι εξίσου μεγάλο και για τα δύο δείγματα (17.6 K για το δείγμα MDRN23g2, και 11.7 K για το δείγμα MDRN22g1). Ωστόσο, το πλάτος του βρόγχου υστέρησης του δείγματος MDRN23g2 παρουσιάζει μια μικρή διαφορά των 6 K με το πλάτος του βρόγχου υστέρησης του δείγματος MDRN22g1, που είναι αναμενόμενο εξαιτίας της διαφορετικής T_{MIT} κατά την ψύξη αυτών.

Οι τιμές των θερμοκρασιών μετάβασης T_{MIT}, των πλατών μετάβασης κατά την θέρμανση και την ψύξη τους, του πλάτους του βρόγχου υστέρησης και της οπτικής διαπερατότητας τ, προσδιορίζονται στον πίνακα 3.6.



Σχ.3.18 : Εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) υμενίων VO_2 από την θερμοκρασία στην περιοχή της MIT για τα εξής υμένια: α)MDRN22g1, b)MDRN23g2.

Στο σχ. 3.31 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της μέτρησης της οπτικής διαπερατότητας του MDRN22g1 και του MDRN23g2 σε T=295-370 K με τον 1° δειγματοφορέα θέρμανσης όπως περιγράφηκε στην ενότητα 2.5.1. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η οπτική διαπερατότητα μειώνεται κατά 28.8% για το δείγμα MDRN22g1 (Σχ. 3.12 a) και κατά 27.6% για το δείγμα MDRN23g2 (Σχ.3.12 b). Και τα δύο δείγματα έχουν μεγάλο βρόγχο υστέρησης με πλάτος (18.5 K) το δείγμα MDRN22g1 και με πλάτος (16.2 K) το δείγμα MDRN23g2. (Σχ.3.12 b). Η θερμοκρασία μετάβασης κατά την θέρμανση (354 K) είναι όμοια με την θερμοκρασία μετάβασης κατά την ψύξη (345 K) και των δύο δειγμάτων. Στο ένθετο του σχήματος 3.31 απεικονίζεται η παράγωγος της οπτικής διαπερατότητας των εν λόγω δειγμάτων, από την οποία προσδιορίζονται οι θερμοκρασίες $T_{MITθ}$, $T_{MITψ}$, τα πλάτη $w_θ$ και $w_ψ$, το πλάτος βρόγχου w_{MIT} και η οπτική διαπερατότητα τ.



Σχ.3.31: Εξάρτηση της οπτικής διαπερατότητας υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία (κόκκινο σύμβολο-πρώτος δειγματοφορέας για τα εξής υμένια: α)MDRN22g1, b)MDRN23g2.

Δείγματα	*R(T)*					*τ (T) - 1ος δειγματοφορέας*					
	$T_{MITθ}$ (K)	$T_{MITψ}$ (K)	$w_θ$ (K)	$w_ψ$ (K)	w_{MIT} (K)	$T_{MITθ}$ (K)	$T_{MITψ}$ (K)	$w_θ$ (K)	$w_ψ$ (K)	w_{MIT} (K)	τ (%)
MDRN23g2	343.1	325.5	1.3	6.8	17.6	353.7	337.3	*9.0*	*8.5*	*16.2*	*27.6*
MDRN22g1	*345.7*	335.4	9.0	*2.4*	*11.7*	*354.2*	*338.3*	*7.0*	*7.6*	*18.5*	*28.8*

Πίνακας 3.6: Θερμοκρασίες $T_{MITθ}$, $T_{MITψ}$, πλάτη $w_θ$ και $w_ψ$, πλάτος βρόγχου w_{MIT} και οπτική διαπερατότητα τ.

3.3.B2 Σύγκριση των δειγμάτων MDRN22g1, MDRN23g2

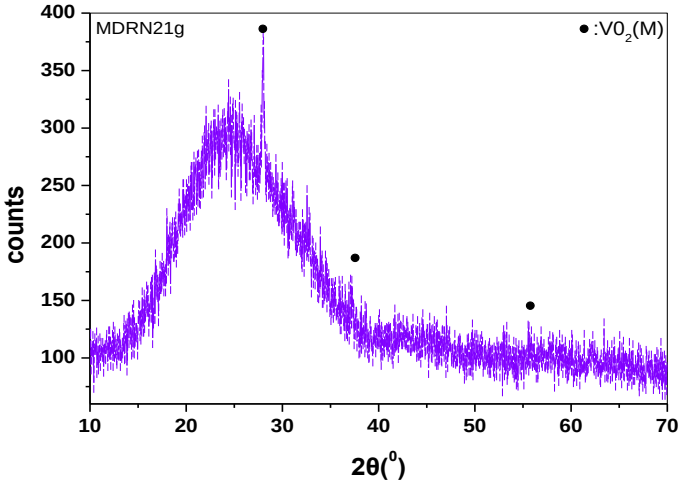
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών μετρήσεων των υμενίων MDRN22g1, MDRN23g2 προκύπτει ότι η T_{MIT} κατά την θέρμανση τους είναι στους 343-345 K και η T_{MIT} κατά την ψύξη τους είναι 335 K για το MDRN22g1 και 325 K για το MDRN23g2. Εξαιτίας της διαφορετικής T_{MIT} των υμενίων κατά την ψύξη τους, προκύπτει ότι το πλάτος του βρόγχου υστέρησης του MDRN22g1 (11.7 K) είναι μικρότερο από το αντίστοιχο πλάτος του MDRN23g2 (17.6 K). Ωστόσο, η αντίσταση των υμενίων στην T_{MIT} τους (κατά την θέρμανση και κατά την ψύξη τους) μεταβάλλεται κατά το ίδιο μέγεθος και για τα δύο υμένια (2 τάξεις μεγέθους).

Όσον αφορά στις οπτικές μετρήσεις τους φαίνεται ότι τα αποτελέσματα είναι όμοια και στα δύο δείγματα με T_{MIT} κατά την θέρμανση τους 354 K και T_{MIT} κατά την ψύξη τους 338 K. Επιπλέον, η οπτική διαπερατότητα τους κυμαίνεται στο 27-28%.

Συνοψίζοντας, διαπιστώνεται ότι η μικρή διαφορά στον χρόνο αναγωγής των υμενίων δεν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στις μεταβολές των ηλεκτρικών και των οπτικών μετρήσεων.

3.3.A3 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDRN21g

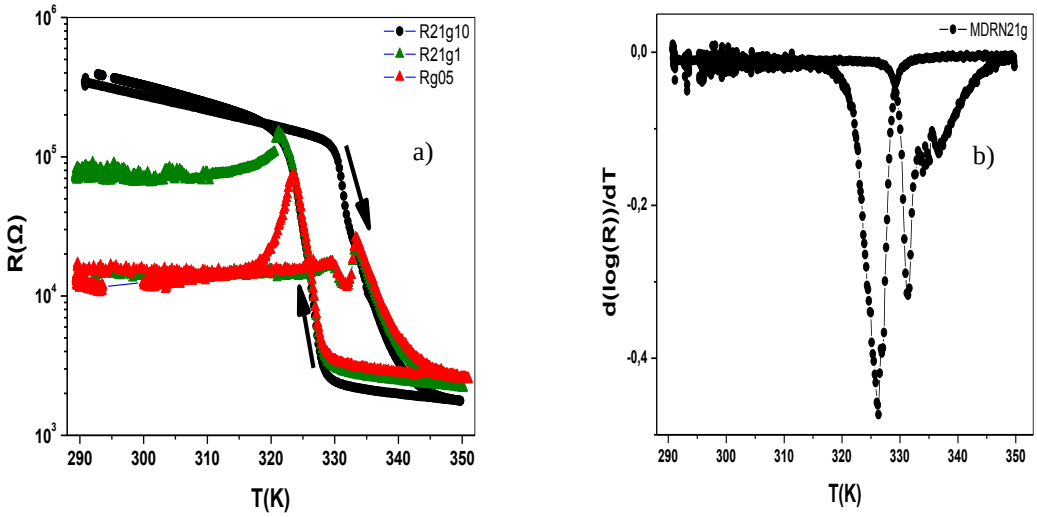
Στο σχ. 3.32 φαίνεται το περιθλασίγραμμα ακτίνων X του MDRN21g στην περιοχή 2θ=8°-70°. Διακρίνονται οι κορυφές που αποδίδονται στο VO_2(M) στις γωνίες 28.1°, 37.5°, 55.5°. Και σε αυτό το περιθλασίγραμμα, Η πλατιά αύξηση του υποβάθρου που εκτείνεται σε γωνίες 2θ μεταξύ 10° και 40°, αντανακλά την άμορφη κατάσταση του γυαλιού [42].



3.32 Περιθλασίγραμμα ακτίνων X του δείγματος MDRN21g.

Στο σχ.3.33 a απεικονίζεται η μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης του υμενίου που πραγματοποιήθηκε σε ένας εύρος θερμοκρασιών 288-355 K σε διάφορα ρεύματα. Διακρίνεται απότομη μείωση της ηλεκτρικής αντίστασης (2 τάξεις μεγέθους) με θερμοκρασία μετάβασης T_{MIT}=340.1 K κατά την θέρμανση του υμενίου, και απότομη αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης (2 τάξεις μεγέθους) σε θερμοκρασία μετάβασης T_{MIT}=333.6 K κατά την ψύξη του (Σχ.3.8 a). Εξαιτίας της δομικής μετάβασης R↔M που είναι 1^{ης} τάξης παρουσιάζεται βρόγχος υστέρησης με πλάτος 6.1 K. Στο σχ. 3.33 b απεικονίζεται ο λογάριθμος της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας και τα πειραματικά αποτελέσματα προσομοιώνονται με γκαουσιανή. Μέσω αυτής προσδιορίζονται οι θερμοκρασίες μετάβασης καθώς και τα πλάτη μετάβασης, οι τιμές των οποίων βρίσκονται καταγεγραμμένες στον Πίνακα 3.11.

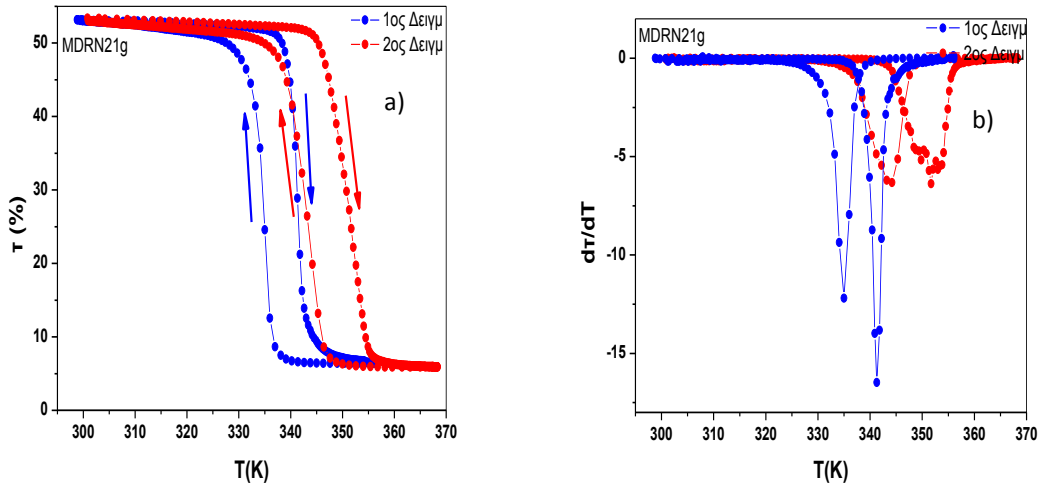
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα στο σχ. 3.33 a η ηλεκτρική αντίσταση του δείγματος στην ημιαγώγιμη περιοχή παρουσιάζει ισχυρή εξάρτηση από το ρεύμα μέτρησης όπως και στο δείγμα MDRN20Q. Όπως έχει προαναφερθεί, η μεταβολή αυτή προς το παρόν δεν έχει κατανοηθεί πλήρως και χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση που ξεφεύγει από τα πλαίσια της εργασίας αυτής.



Σχήμα 3.33: a) a) Εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) υμενίου VO2 από την θερμοκρασία στην περιοχή της MIT. b) Η παράγωγος του λογαρίθμου της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Η μέτρηση της οπτικής διαπερατότητας του υμενίου MDRN21g πραγματοποιήθηκε σε με λ=1550 nm σε ένα εύρος θερμοκρασιών 295-370 K με δύο δειγματοφορείς θέρμανσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η οπτική διαπερατότητα μειώνεται απότομα κατά 46.5% σε T=351.6 K κατά την θέρμανση του δείγματος, και κατά το ίδιο ποσοστό σε T=343.8 K κατά την ψύξη του (Σχ.3.33 a). Ο βρόγχος υστέρησης έχει πλάτος 8.3 K ενώ το πλάτος της μετάβασης τόσο κατά την θέρμανση όσο και κατά την ψύξη είναι συγκρίσιμα με τιμές 7.7 K και 7.1 K, αντίστοιχα.(Σχ.3.12 b).

Στο Σχ. 3.34 a,b απεικονίζονται επιπλέον τα αποτελέσματα που ελήφθησαν χρησιμοποιώντας τον 2ο δειγματοφορέα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα αυτά, η μεταβολή της οπτικής διαπερατότητας που συνοδεύει την MIT είναι ταυτόσημη (46.5%) με αυτήν του 1ου δειγματοφορέα, πραγματοποιείται όμως σε T=341.2 K κατά την θέρμανση, και σε T=335.2 K κατά την ψύξη του δείγματος. Ο βρόγχος υστέρησης έχει πλάτος 6.0 K ενώ το πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση (2.1 K) είναι μικρότερο από το πλάτος κατά την ψύξη (2.9 K).

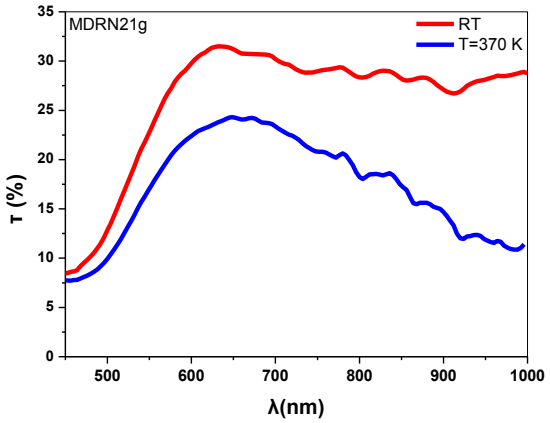


Σχήμα 3.34: a) Εξάρτηση της οπτικής διαπερατότητας υμενίου VO2 από την θερμοκρασία (κόκκινο σύμβολο-δεύτερος δειγματοφορέας, μπλε σύμβολο-πρώτος δειγματοφορέας) b) Η παράγωγος της οπτικής διαπερατότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του δείγματος.

MDRN21g	R(T)	τ(T) 1ος Δειγματοφορέας Θέρμασης	τ(T) 2ος Δειγματοφορέας Θέρμανσης
$T_{MITθ}$ (K)	340.1	351.6	341.2
$T_{MITψ}$ (K)	333.6	343.8	335.2
$w_θ$ (K)	2.7	7.7	2.1
$w_ψ$ (K)	2.3	7.1	2.9
w_{MIT}(K)	6.1	8.3	6.0

Πίνακας 3.11: Θερμοκρασίες $T_{MITθ}$, $T_{MITψ}$, πλάτη $w_θ$ και $w_ψ$, και πλάτος βρόγχου w_{MIT}.

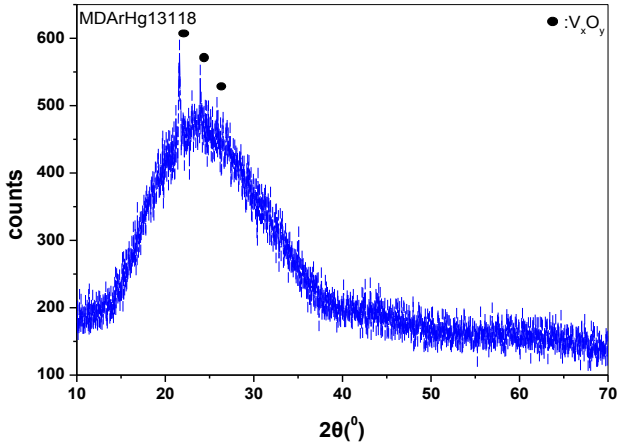
Στο σχ. 3.35 απεικονίζεται η μέτρηση της οπτικής διαπερατότητας του MDRN21g σε συνάρτηση με το μήκος κύματος σε θερμοκρασία δωματίου και σε T=370K. Το μέγιστο της οπτικής διαπερατότητας έχει τιμή 31.2% σε T= 630-650 nm πριν την μετάβαση και τιμή 24.3% σε T= 640-670 nm μετά την μετάβαση. Επιπλέον, μετά την μετάβαση το ελάχιστο της οπτικής διαπερατότητας του δείγματος είναι 10% με όρια μηκών κύματος 500 και 1000nm. Η οπτική διαπερατότητα των υμενίων VO_2 πριν και μετά την θερμοκρασία μετάβασης είναι αρκετά μικρή στην ορατή περιοχή (λ< 700 nm). Ωστόσο, η οπτική διαπερατότητα στην υπέρυθρη περιοχή μειώνεται σημαντικά μετά την θερμοκρασία μετάβασης δείχνοντας ότι το υμένιο γίνεται υψηλά ανακλαστικό πάνω από τα 700nm [40].



Σχ. 3.35: a)Η εξάρτηση της διαπερατότητας του δείγματος VO_2 MDRN21g με το μήκος κύματος σε θερμοκρασία δωματίου (κόκκινη γραμμή) και σε T=370K (μπλέ γραμμή).

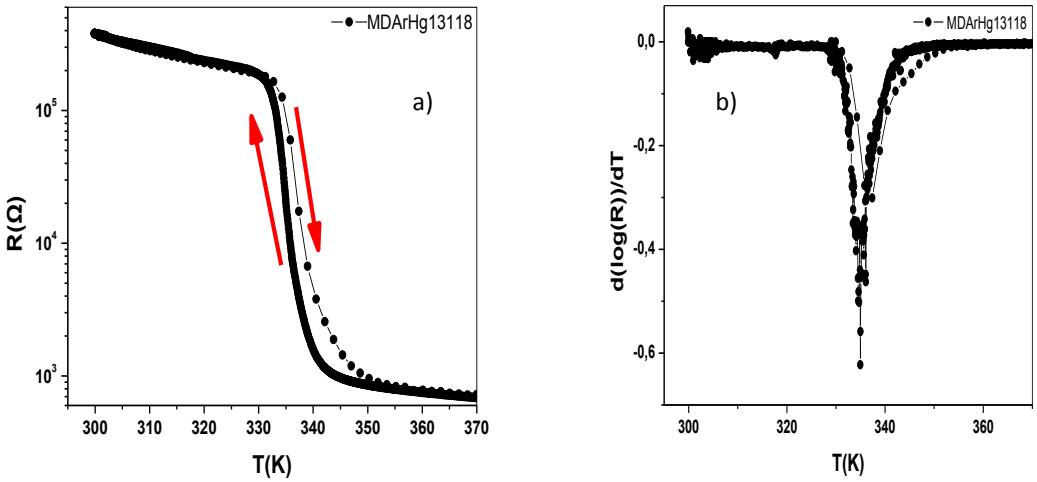
3.3.A4 Πειραματικά αποτελέσματα για το δείγμα MDArHg13118

Στο σχ. 3.36 φαίνεται το περιθλασίγραμμα ακτίνων X του MDArHg13118 στην περιοχή 2θ=10°-70°. Διακρίνονται κορυφές στις γωνίες 21.6°, 24.0° 25.8°, που δεν αποδίδονται στο VO2(M). Η πλατιά αύξηση του υποβάθρου που εκτείνεται σε γωνίες 2θ μεταξύ 10° και 40°, αντανακλά την άμορφη κατάσταση του γυαλιού όπως και στα προηγούμενα υμένια που έχουν εναποτεθεί σε γυαλί [42].



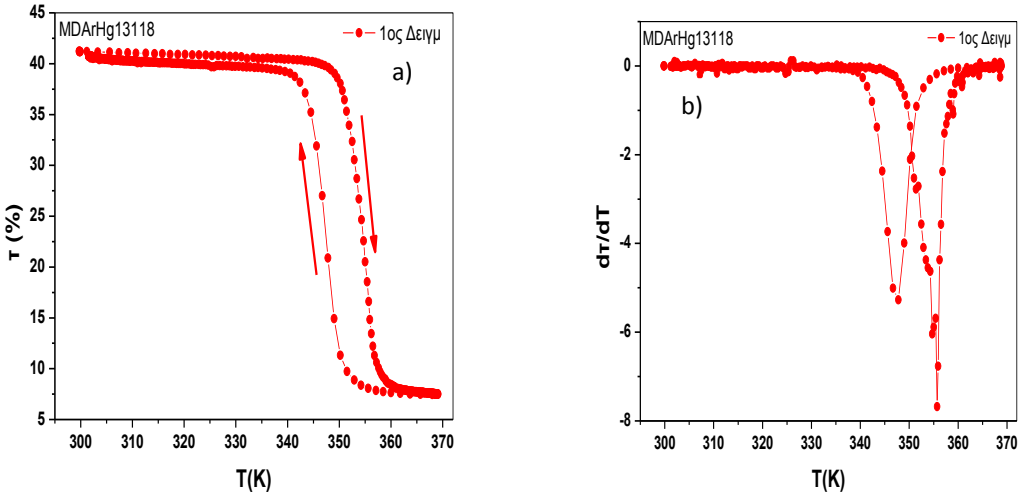
Σχ. 3.36: Περιθλασίγραμμα ακτίνων X για δείγμα MDArHg13118.

Στο σχ. 3.37 a φαίνεται η εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) του δείγματος από την θερμοκρασία στην περιοχή θερμοκρασιών 295-370 K. Η αντίσταση μεταβάλλεται κατά 2.5 τάξεις μεγέθους σε θερμοκρασία T=336.0 K κατά την θέρμανση (μείωση αντίστασης) και T=335.0 K κατά την ψύξη (αύξηση αντίστασης). Η μεταβολή της αντίστασης αποδίδεται στην μετάβαση μετάλου μονωτή (MIT). Όπως φαίνεται στο σχ. 3.9. b. το πλάτος του βρόγχου υστέρησης (απόσταση των κέντρων των γκαουσιανών) είναι 3.5 K με πλάτος μετάβασης (2.7 K) κατά την θέρμανση μικρότερο από το πλάτος μετάβασης (3.1 K) κατά την ψύξη.



Σχήμα 3.37: a) Εξάρτηση της ηλεκτρικής αντίστασης R(T) υμενίου VO_2 από την θερμοκρασία στην περιοχή της MIT. b) Η παράγωγος του λογαρίθμου της αντίστασης συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στο σχ. 3.38 a,b απεικονίζεται η μέτρηση της οπτικής διαπερατότητας του MDArHg13118 που πραγματοποιήθηκε σε ένα εύρος θερμοκρασιών 295-370 K με τον 1ο δειγματοφορέα θέρμανσης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η οπτική διαπερατότητα υφίσταται απότομη μείωση κατά 33.6% σε T=354.2 K κατά την θέρμανση του δείγματος, και απότομη ισόποση αύξηση σε T=347.2 K κατά την ψύξη του. Ο βρόγχος υστέρησης έχει πλάτος 7 K ενώ το πλάτος μετάβασης κατά την θέρμανση είναι μικρότερο (3.2 K) από το πλάτος μετάβασης κατά την ψύξη (5.4 K).



Σχήμα 3.38: a) Εξάρτηση της οπτικής διαπερατότητας υμενίου VO2 από την θερμοκρασία (κόκκινο σύμβολο-πρώτος δειγματοφορέας) b) Η παράγωγος της οπτικής διαπερατότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας του δείγματος.

MDArHg13118	R(T)	τ(T) 1ος Δειγματοφορέας Θέρμασης
$T_{MITθ}$ (K)	336.0	354.2
$T_{MITψ}$ (K)	334.9	347.2
$w_θ$ (K)	3.5	3.2
$w_ψ$ (K)	2.2	5.4
w_{MIT} (K)	2.2	7.0

Πίνακας 3.12: Θερμοκρασίες $T_{MITθ}$, $T_{MITψ}$, πλάτη $w_θ$ και $w_ψ$, και πλάτος βρόγχου w_{MIT}.

3.3. Β3 Σύγκριση της οπτικής διαπερατότητας των MDRN18AL, MDRN23g5, MDRN21g ως προς το μήκος κύματος λ

Συγκρίνοντας τα υμένια αυτά ως προς την οπτική τους διαπερατότητα σε συνάρτηση με το μήκος κύματος προκύπτει ότι τα MDRN18AL και MDRN23g5 έχουν οπτική διαπερατότητα 20-22% σε μήκη κύματος 650-700nm πριν και μετά την μετάβαση. Επιπλέον, η οπτική διαπερατότητα των δείγματων κυμαίνεται στο 8% μετά την μετάβαση με όρια μηκών κύματος 500, 1000nm.

Ωστόσο, το δείγμα MDRN21g διαφέρει λίγο από τα προηγούμενα όσον αφορά στην οπτική του διαπερατότητα πριν την μετάβαση. Το μέγιστο της οπτικής του διαπερατότητας είναι 31% πριν την μετάβαση και 24% μετά την μετάβαση του. Επιπλέον, η οπτική διαπερατότητα αυτού του υμενίου είναι 10% μετά την μετάβαση, με όρια μηκών κύματος 500, 1000nm.

Τα όρια των παραπάνω υμενίων (για T> 340 K) μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως το χαμηλότερο και το υψηλότερο φασματικό όριο μήκους κύματος του θορύβου της ηλιακής ακτινοβολίας όπως έχει περιγραφεί στον κώδικα σε περιβάλλον Matlab. Τα όρια αυτά προσομοιώνονται με τα όρια ενός ζωνοπερατού φίλτρου κι έτσι γίνεται ο υπολογισμός της απόδοσης ενός VLC συστήματος. Τα αποτελέσματα της θεωρητική διερεύνησης της απόδοσης διοξειδίου του βαναδίου (VO_2) ως οπτικό φίλτρο σε συνάρτηση με το μήκος κύματος λ παρουσιάζονται στην επόμενη ενότητα.

3.4 Υπολογισμός του πάχους των υμενίων VO_2

Το πάχος των υμενίων ενδεικτικά θα μπορούσε να εκτιμηθεί από την ηλεκτρική τους αντίσταση:

$R=\rho\frac{l}{S}$ όπου ρ η ειδική αγωγιμότητα του VO_2, l το μήκος του υμενίου αν υποτεθεί ότι έχει εναποτεθεί σε υπόστρωμα σχήματος ορθογωνίου παραλληλογράμμου, y το πλάτος του υμενίου και S η διατομή του (ρ= 0.01 Ω·cm [45], l ≈ 1 cm, y ≈ 1 cm).

Η τιμή της αντίστασης για τα περισσότερα δείγματα είναι της τάξης των $R= 10^6$ Ω.

Με βάση τις παραπάνω τιμές μπορεί να εκτιμηθεί το πάχος του υμενίου ως εξής:

$$\left.\begin{array}{l} S=\rho\cdot\frac{l}{R} \\ S=y\cdot d \end{array}\right\} \quad y\cdot d=\rho\frac{l}{R} \Rightarrow 1\cdot d=0.01\ 10^{-6} \Rightarrow d=0.01\ 10^{-6}\ \text{cm} \Rightarrow d=1\cdot 10^{-8}\ \text{m} \Rightarrow d=10\ \text{nm}.$$

Το πάχος των υμενίων εκτιμάται να είναι της τάξης των 10 nm, ωστόσο η πραγματική του τιμή αναμένεται να είναι μεγαλύτερου πάχους.

Κεφάλαιο 4

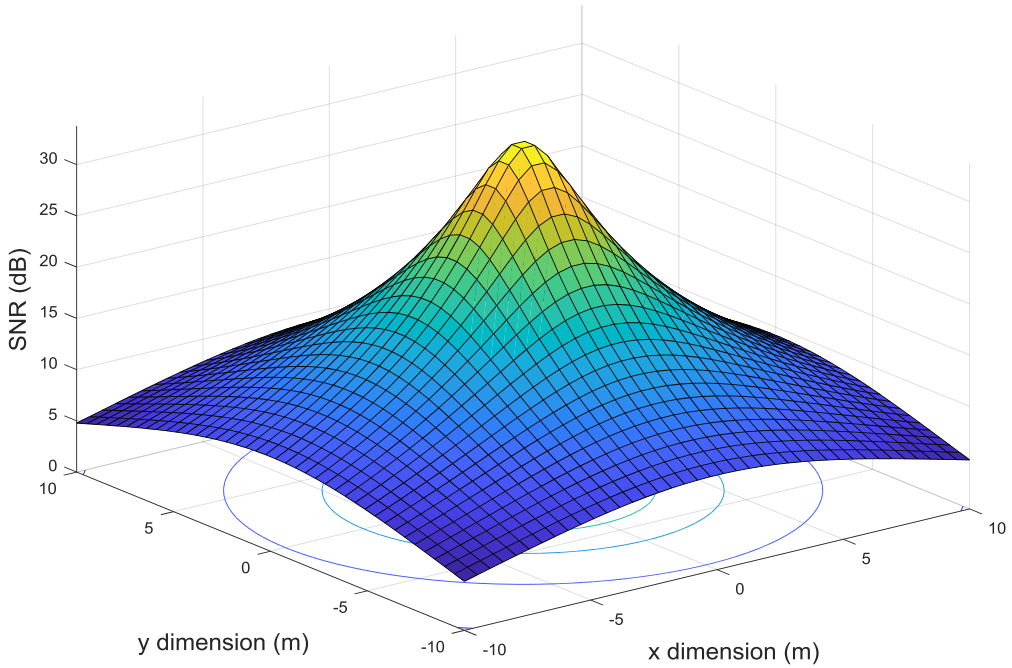
Παρουσίαση αποτελεσμάτων εφαρμογής λεπτών υμενίων VO_2 ως οπτικά φίλτρα σε ένα σύστημα VLC

4.1 Υπολογισμός του SNR ενός VLC συστήματος με την χρήση λεπτών υμενίων VO_2 ως οπτικά φίλτρα

Έχοντας υπολογίσει την οπτική διαπερατότητα ορισμένων αντιπροσωπευτικών υμενίων συναρτήσει του μήκους κύματος, υπολογίζεται η απόδοση του VO_2 ως οπτικό φίλτρο στις οπτικές επικοινωνίες.

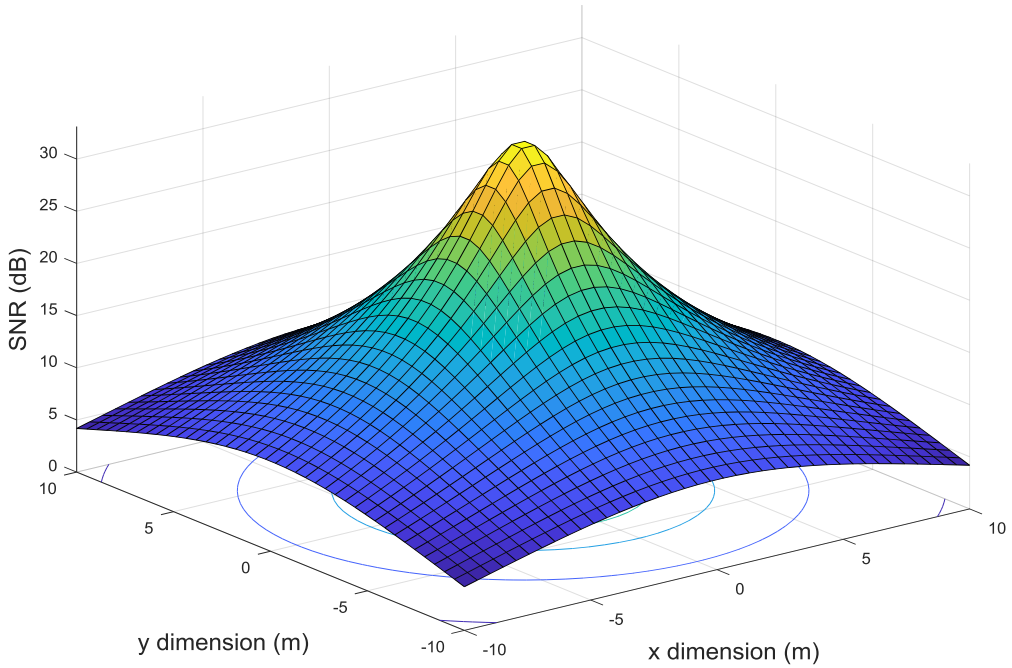
Τα όρια μηκών κύματος που προέκυψαν από τα αποτελέσματα των μετρήσεων με την χαμηλότερη οπτική διαπερότητα είναι [450, 1000nm], [500, 1000nm], [450, 900nm], [500, 900nm]. Γι' αυτά τα μήκη κύματος ο θόρυβος του ηλιακού φωτός έχει διαπερατότητα 8 - 10% χρησιμοποιώντας το VO_2 ως οπτικό φίλτρο μετά την θερμοκρασία μετάβασής του δηλαδή σε T>340 K. Όμως το κεντρικό μήκος κύματος 700nm έχει διαπερατότητα 22-24%. Αυτό το ποσοστό της διαπερατότητας για το συγκεκριμένο μήκος κύματος δεν είναι επιθημητό μιας και χάνεται σημαντικό μέρος του σήματος που «φορτώνεται» η πληροφορία. Επομένως, για την επίτευξη υψηλότερης διαπερατότητας σε αυτό το μήκος κύματος και χαμηλότερης στα υπόλοιπα θα πρέπει να αυξηθεί το φάσμα. Προκειμένου να αυξηθεί το φάσμα και άρα η οπτική διαπερατότητα, το πάχος του υμενίου πρέπει να μειωθεί, σύμφωνα με τον νόμο Lambert.

Στο Σχ. 3.36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC με τη χρήση οπτικού φίλτρου για ένα εύρος μηκών κύματος μεταξύ 500nm και 1000nm. Η μέγιστη τιμή της απόδοσης του συστήματος SNR στο κέντρο του δωματίου φτάνει στα 33.7 dB ενώ η ελάχιστη τιμή της απόδοσης του συστήματος SNR στα άκρα του δωματίου φτάνει στα 4.8 dB.



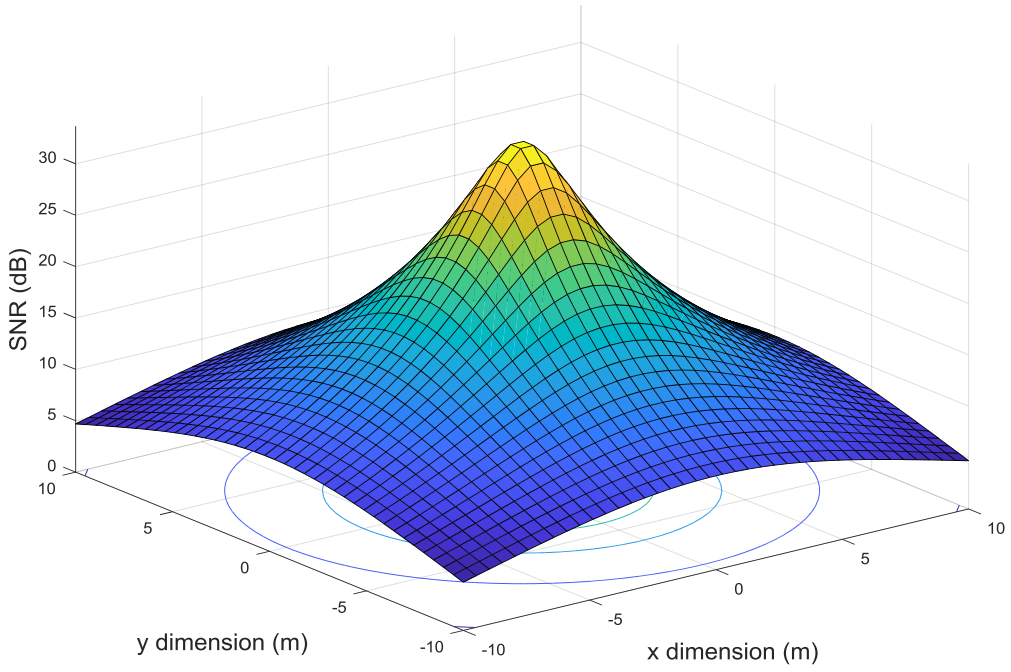
Σχ. 3.36: Αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC με τη χρήση φίλτρου VO_2 για τις φασματικές περιοχές μεταξύ 500nm και 1000nm.

Ομοίως, στο σχήμα 3.37 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC με τη χρήση φίλτρου για ένα εύρος μηκών κύματος μεταξύ 450nm και 1000nm. Η μέγιστη τιμή της απόδοσης του συστήματος SNR στο κέντρο του δωματίου φτάνει στα 33.1 dB ενώ η ελάχιστη τιμή της απόδοσης του συστήματος SNR στα άκρα του δωματίου φτάνει στα 4.2 dB.



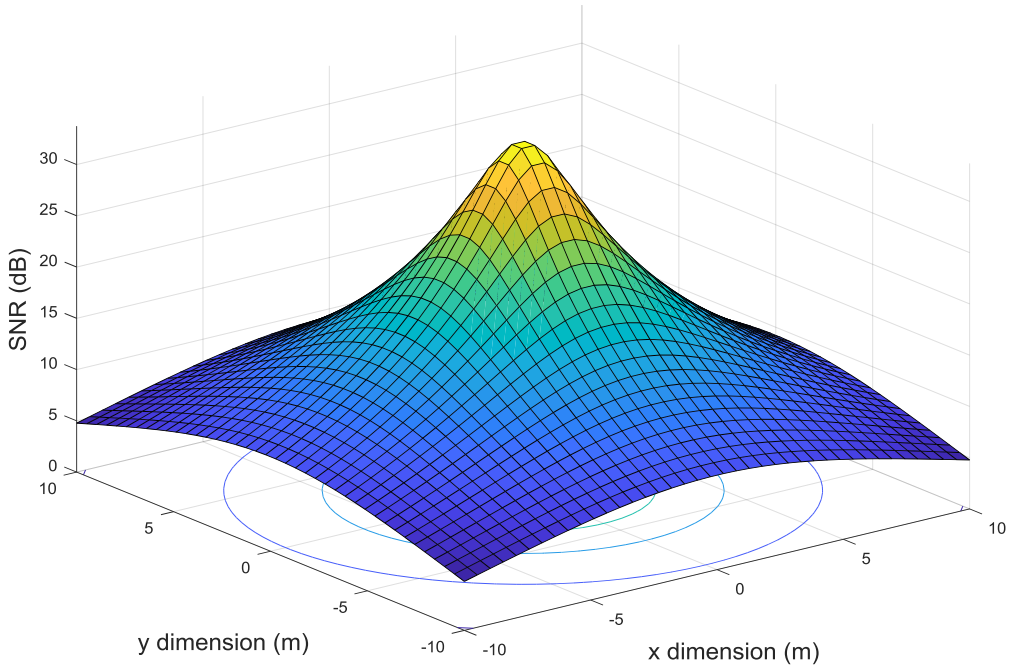
Σχ. 3.37: Αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC με τη χρήση φίλτρου VO_2 για τις φασματικές περιοχές μεταξύ 450nm και 1000nm.

Επιπλέον, στο σχήμα 3.38 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC με τη χρήση φίλτρου για ένα εύρος μηκών κύματος μεταξύ 450nm και 900nm. Η μέγιστη τιμή της απόδοσης του συστήματος SNR στο κέντρο του δωματίου φτάνει στα 33.6 dB ενώ η ελάχιστη τιμή της απόδοσης του συστήματος SNR στα άκρα του δωματίου φτάνει στα 4.7 dB.



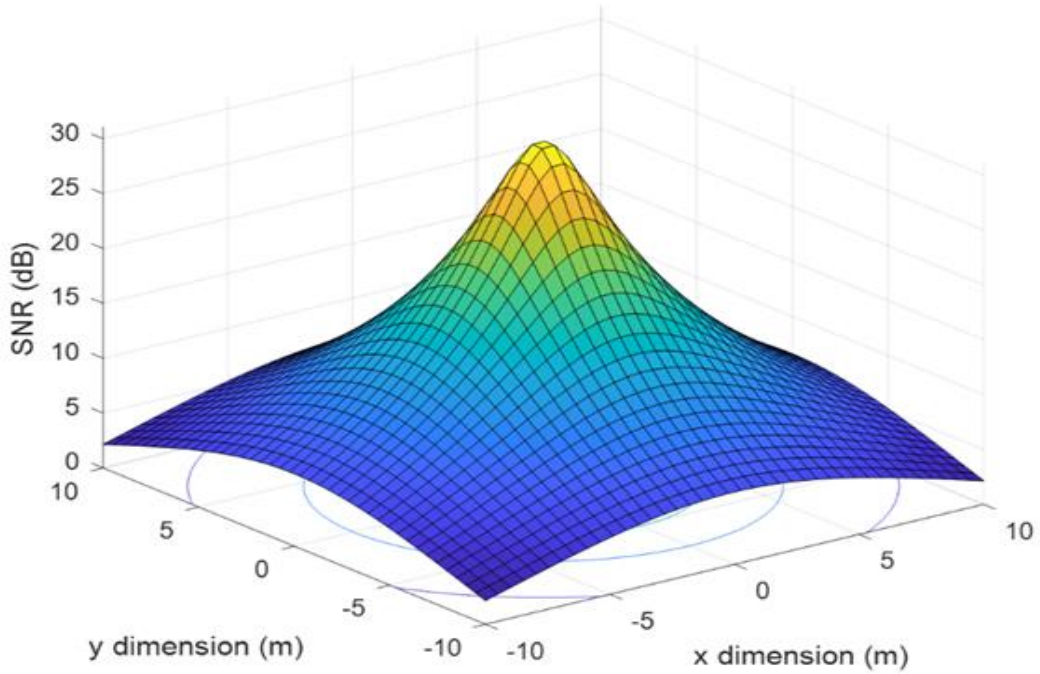
Σχ. 3.38: Αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC με τη χρήση φίλτρου VO_2 για τις φασματικές περιοχές μεταξύ 450nm και 900nm.

Ακόμα, στο σχήμα 3.39 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC με τη χρήση φίλτρου για ένα εύρος μηκών κύματος μεταξύ 500nm και 900nm. Η μέγιστη τιμή της απόδοσης του συστήματος SNR στο κέντρο του δωματίου φτάνει στα 34.3 dB ενώ η ελάχιστη τιμή της απόδοσης του συστήματος SNR στα άκρα του δωματίου φτάνει στα 5.3 dB.



Σχ. 3.39: Αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC με τη χρήση φίλτρου VO_2 στις φασματικές περιοχές μεταξύ 500nm και 900nm.

Στο σχ. 3.40 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC χωρίς την χρήση οπτικού φίλτρου. Η μέγιστη τιμή της απόδοσης του συστήματος SNR στο κέντρο του δωματίου φτάνει στα 31 dB ενώ η ελάχιστη τιμή της απόδοσης του συστήματος SNR στα άκρα του δωματίου φτάνει στα 2.1 dB.



Σχ. 3.40: Αποτελέσματα SNR που ελήφθησαν για ένα σύστημα VLC χωρίς τη χρήση φίλτρου

Σχόλια

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του Πίνακα 4.1 είναι προφανές ότι η απόδοση SNR ενός VLC συστήματος βελτιώνεται κατά 2-3 dB με την χρήση ενός οπτικού φίλτρου VO_2 στο κέντρο και στα άκρα του δωματίου στην περιοχή μηκών κύματος [450 nm-1000 nm].

SNR με την χρήση VO_2 οπτικού φίλτρου			SNR χωρίς την χρήση οπτικού φίλτρου	
Στο κέντρο		Στα άκρα	Στο κέντρο	Στα άκρα
500-1000	33.7	4.8	31.0	2.1
450-1000	33.1	4.2		
450-900	33.6	4.7		
500-900	34.3	5.3		

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα SNR με την χρήση και χωρίς την χρήση ενός οπτικού φίλτρου

Σύνοψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η βελτίωση της απόδοσης ενός συστήματος VLC με την χρήση ενός οπτικού φίλτρου στον δέκτη. Το φίλτρο που προτάθηκε είναι ένα λεπτό υμένιο διοξειδίου του βαναδίου (Vanadium dioxide - VO_2) εξαιτίας των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του στις οπτικές και στις ηλεκτρικές του ιδιότητες. Συγκεκριμένα, το VO_2 παρουσιάζει μετάβαση μετάλλου-μονωτή (**M**etal-**I**nsulator-**T**ransition) T_{MIT}= 340 K που συνοδεύεται από μεγάλη μεταβολή της ηλεκτρικής του αντίστασης αλλά και της οπτικής του διαπερατότητας σε συνδυασμό με την πολύ γρήγορη αλλαγή φάσης της δομής του. Η οπτική διαπερατότητα του VO_2 σε θερμοκρασία T>340 K φαίνεται να μειώνεται σε ένα εύρος μηκών κύματος ορατού και υπερύθρου με μέγιστη οπτική διαπερατότητα στα 650 - 700nm. Έτσι δίνεται η δυνατότητα χρήσης του διοξειδίου του βαναδίου (Vanadium dioxide - VO_2) ως οπτικό φίλτρο. Για τον έλεγχο της λειτουργικότητας ενός φίλτρου VO_2 σε ένα σύστημα VLC πραγματοποιήθηκε πειραματική διερεύνηση και υπολογισμοί εφαρμογής των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Όσον αφορά στους υπολογισμούς, γράφτηκε κώδικας υπολογισμού της ακτινοβολίας του ήλιου (σε περιβάλλον Matlab) που λαμβάνεται εντός της φασματικής περιοχής του δέκτη ως θόρυβος. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τους υπολογισμούς είναι η Monte – Carlo. Το SNR ενός VLC συστήματος υπολογίζεται με την χρήση και χωρίς την χρήση λεπτού υμενίου VO_2 ως οπτικό φίλτρο στον δέκτη ενός VLC συστήματος εσωτερικού χώρου λαμβάνοντας υπόψη τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του.

Όσον αφορά στην πειραματική διερεύνηση, παρασκευάστηκαν δείγματα λεπτών υμενίων (films) V_2O_5 με την μέθοδο εναπόθεσης ατμού (Physical Vapor Deposition - PVD) που στην συνέχεια ανάχθηκαν σε δείγματα λεπτών υμενίων (films) VO_2 με θέρμανση σε ειδικό κλίβανο υπό συνθήκες κενού $3\cdot10^{-2}$ mbar, με ροή ατμοσφαιρικού αέρα P= $2\cdot10^{-2}$ mbar, αργού υδρογόνου P= $4\cdot10^{-1}$ mbar και με ροή αζώτου P= $4\cdot10^{-1}$ mbar. Για τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων, έγιναν μετρήσεις περιθλασιμετρίας ακτίνων X και μετρήσεις ηλεκτρικής αντίστασης στο εύρος θερμοκρασιών 295 - 355 K. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις οπτικής διαπερατότητας σε μήκος κύματος λ= 1550 nm στην περιοχή T= 300 – 380 K και μετρήσεις οπτικής διαπερατότητας στην περιοχή 400 - 1000 nm σε T= 300 K και σε T= 370 K.

Στις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν δείγματα που εναποτέθηκαν σε τρία διαφορετικά υποστρώματα. Τα δύο υποστρώματα είναι μονοκρυσταλλικά (Al_2O_3 και quartz) και το τρίτο υπόστρωμα είναι άμορφο (γυαλί). Τα πειραματικά αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται είναι αντιπροσωπευτικά για δείγματα ενός συνόλου της κάθε κατηγορίας.

Τα υμένια που έχουν εναποτεθεί σε υποστρώματα Al_2O_3 έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία αναγωγής σε συνθήκες ροής αζώτου πίεσης P= $4\cdot10^{-1}$ mbar, χρόνου t= 3 h, θερμοκρασίας T= 500 °C. Η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης των υμενίων αυτών είναι 2 με 2.5 τάξεις μεγέθους και η αντίστοιχη μείωση της οπτικής τους διαπερατότητα παρουσιάζει μείωση 50 % κατά την μετάβαση MIT στα 1550 nm.

Τα υμένια που έχουν εναποτεθεί σε υποστρώματα quartz έχουν υποστεί θερμική επεξεργασία αναγωγής σε συνθήκες ροής αζώτου πίεσης $P=4\cdot10^{-1}$ mbar, T=500 °C, για χρόνο διαφορετικό χρόνο t=3 h και t=3.5 h. Όπως φαίνεται από τα περιθλασιγράμματα ακτίνων X των υμενίων, το υμένιο που ανάχθηκε σε χρόνο t=3 h παρουσιάζει καλύτερη κρυστάλλωση από το υμένιο που ανάχθηκε σε χρόνο t=3.5 h. Επιπρόσθετα, η μεταβολή της ηλεκτρικής αντίστασης για το υμένιο με t=3 h αναγωγή, είναι 4 τάξεις μεγέθους, ενώ για το υμένιο t=3.5 h είναι 2 τάξεις μεγέθους. Η μεταβολή της οπτικής διαπερατότητας για το υμένιο που έχει αναχθεί t=3 h είναι 45.7 % (για λ=1550 nm) ενώ για το υμένιο που έχει αναχθεί t=3.5 h είναι 40% (για λ=1550nm). Επομένως, ο μικρότερος χρόνος αναγωγής (t=3h) του υμενίου είχε ως αποτέλεσμα καλύτερη κρυστάλλωση του υμενίου και μεγαλύτερες μεταβολές στην ηλεκτρική του αντίσταση και στην οπτική του διαπερατότητα.

Για τα υμένια που έχουν εναποτεθεί σε υποστρώματα γυαλιού προκύπτει ότι για ίδιες συνθήκες θερμικής επεξεργασίας $P=4\cdot10^{-1}$ mbar/ T=500°C/ t=3h ο διαφορετικός χρόνος εναπόθεσης διαφοροποιεί τα αποτελέσματα των οπτικών και των ηλεκτρικών τους μετρήσεων. Συγκεκριμένα, ο μεγαλύτερος χρόνος εναπόθεσης των υμενίων κατά 20 min που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του πάχους τους, παρουσιαζει μισή τάξη μεγέθους μικρότερη μεταβολή της ηλεκτρικής τους αντίστασης, μεγαλύτερους βρόγχους υστέρησης και χαμηλότερη μεταβολή της οπτικής τους διαπερατότητας κατά 15%.

Επιπλέον, για ίδιο χρόνο εναπόθεσης των υμενίων σε γυαλιά, ο διαφορετικός χρόνος αναγωγής κατά 15 min δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα τους.

Η παρουσία του βρόγχου υστέρησης είναι αναμενόμενη για όλα τα υμένια δεδομένου ότι η MIT συνοδεύεται από δομική μετάβαση R↔M η οποία είναι 1ης τάξης. Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι το πλάτος των βρόγχων υστέρησης φαίνεται να επηρεάζεται και από το πάχος των υμενίων.

Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις οπτικής διαπερατότητας των υμενίων μεταξύ 0.4 - 1 μm σε T=300 K και σε T=350 K. Από τα πειραματικά δεδομένα διαπιστώθηκε ότι υμένια που έχουν 40 - 50% μεταβολή οπτικής διαπερατότητας στα 1550 nm για T= 300 - 380 K, έχουν 8% οπτική διαπερατότητα (T=350 K) για όρια μηκών κύματος [0.5 μm, 1 μm] και 22% οπτική διαπερατότητα για την περιοχή μηκών κύματος [0.650 μm—0.700 μm] που αποστέλλεται το σήμα. Με βάση αυτά τα πειραματικά αποτελέσματα πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί για την λειτουργικότητα των λεπτών υμενίων VO_2 ως οπτικά φίλτρα και προέκυψε βελτίωση του SNR κατά 2-3 dB. Για να υπάρξει περαιτέρω αύξηση της οπτικής διαπερατότητας των υμενίων VO_2 στην περιοχή μηκών κύματος που αποστέλλεται το σήμα, πρέπει να μειωθεί το πάχος των υμενίων, κάτι το οποίο είναι απολύτως εφικτό.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι το SNR ενός συστήματος Ασύρματων Οπτικών Επικοινωνιών (VLC) στο κέντρο και στα άκρα ενός δωματίου με την χρήση ενός λεπτού υμενίου VO_2 ως οπτικό φίλτρο βελτιώνεται αισθητά. Επομένως, η χρήση ενός λεπτού υμενίου VO_2 ως οπτικό φίλτρο σε ένα συστημα Ασύρματων Οπτικών Επικοινωνιών VLC καθίσταται εξαιρετικά σημαντική.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] Rong Zhang, «Localisation, Communication and Networking with VLC: Challenges and Opportunities»,Cornel University Library, 2017, 1709.01899

[2] Ozgur Ergul, Ergin Dinc, Ozgur B. Akan, Communicate to illuminate: State-of-the-art and research challenges for visible light communications, 2015, Vol: 17, 72-85

[3] Hidemitsu Sugiyama, Shinichiro Haruyama, and Masao Nakagawa, Brightness Control Methods for Illumination and Visible-Light Communication Systems, 2007, IEEE Xplore Digital Library, 9857782

[4] Latif Ullah Khan, Visible light communication: applications, architecture, standardization and research challenges, Digital Communications and Networks, May 2017, Vol: 3, Is: 2, 78-88

[5] Navin Kumar, Nuno Rafael Lourenço, Led- Based Visible Light Communication System: A Brief Survey and Investigation, Journal of Engineering and Applied Sciences, 2010, Vol: 5, Is: 4, 296-307

[6] Iwasaki, S., Wada, M., Endo, T., Fujii, T., and Tanimoto M, Basic Experiments on Parallel Wireless Optical Communication for ITS, 2007, Intelligent Vehicles Symposium, pp. 321-326

[7] Navin Kumar, Visible Light Communication Based Traffic Information Broadcasting Systems, International Journal of Future Computer and Communication, International Journal of Future Computer and Communication, 2014, Vol. 3, No. 1,

[8] M. Syuhaimi, Ab-Rahman, N. I. Shuhaimi, L. Al-Hakim Azizan and M. R. Hassan, “Analytical Study of Signal-to-Noise Ratio for Visible Light Communication by Using Single Source”, Journal of Computer Science 8, ISSN, 2012, 1549-3636.

[9] T. Komine and M. Nakagama, “Fundamental Analysis for Visible-Light Communication System using LED Lights”, IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, Vol: 50, No: 1

[10] Thomas Reeswinkel, Self-lubricious tool coatings for ecological metal cutting, Materials Chemistry

[11] Venkata Raviteja Yarlagadda, PhD Thesis, 2011

[12] A. Zylbersztejn and N. F. Mott, Metal-insulator transition in vanadium dioxide, Phys. Rev. B, 1 June 1975, 11, 4383

[13] D.K. Manousou et al, Estimation of the influence of Vanadium dioxide optical filters at the performance of visible light communication systems, IEEE Xplore Digital Library, May 2018, 10.1109/MOCAST.2018.8376653

[14] Z. Chassemlooy, D. Wu, M. A. Khalighi and X. Tang, “Indoor Non-Directed Optical Wireless Communications – Optimization of the Lambertian Order”, Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations, JECEI, 2013, Vol: 1, No: 1.

[15] Menounou, A.N. Stassinakis, H.E. Nistazakis, A. Tzanakaki, H.G. Sandalidis and G.S. Tombras, "Study and simulation on performance of a VLC communication system", 7th, IC-EPSMSO, July, 2017.

[16] H.C Kim, B.W. Kim and S. Y. Jung, “Performance of a wavelength hopping MC-VPPM scheme for vehicle-to-infrastructure (V2I) VLC”, Photonic Network Communication, Springer, January 2016, Vol: 33, Is: 1, 60–68

[17]H. Chun, C. J. Chiang, A. Monkman, and D. Obrien, “A study of illumination and communication using organic light emitting diodes”, J. Light Technology, 2013, Vol: 31, No: 22, 3511-3517

[18] D. Kaskaoutis, H. Kambezidis, S. Kharol, V. S. Badarinath, K.. “The diffuse-to-global spectral irradiance ratio as a cloud-screening technique for radiometric data”. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008, 70.20081597-1606. 10.1016/j.jastp.2008.04.013.

[19] L. Wangwei, Z. Gaoling, S. Bin, L. Jin, Z. Xinwen, H. Gaorong.. "Preparation and thermochromic properties of sol-gel-derived Zr-doped VO2 films. Surface and Coatings Technology", 2016, 320.10.1016/j.surfcoat.2016.12.070.

[20] J. Du, Y. Gao, H. Luo, Z. Zhang, L. Kang, Z. Chen, "Formation and metal-to-insulator transition properties of VO 2–ZrV 2O 7 composite films by polymer-assisted deposition". Solar Energy Materials and Solar Cells - SOLAR ENERG MATER SOLAR CELLS, 2011, 95. 1604-1609. 10.1016/j.solmat.2011.01.009

[21] Donald M. Mattox, Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing

[22] Dler Jameel, Thin Film Deposition Processes, American Institute of Science, International Journal of Modern Physics and Applications, August 2015
Vol: 1, No: 4, 193-199

[23] https://en.wikipedia.org/wiki/Physical vapor deposition

[24] James E. Morris, PVD lectures, 2012

[25] A.Paone et al, THERMOCHROMIC FILMS OF VO2: W FOR "SMART" SOLAR, ENERGY APPLICATIONS, CISBAT 2009 Proceedings 2-3 September 2009, Lausanne, Switzerland

[26] Al-Kuhaili et al, A study of thin films of V2O5 containing molybdenum from an evaporation boat, Thin Solid Films 460, 2004, Vol:460, Is: 1–2, 30-35

[27] Πτυχιακή Παπαμιχάλη Ειρηναίου (Στάδιο συγγραφής)

[28] Naoufal Bahlawane, Damien Lenoble «Vanadium Oxide Compounds: Structure, Properties, and Growth from the Gas Phase», Chem. Vap. Deposition 2014,20, 299–311

[29] G. Monfort, Reduction of V2O5 thin films deposited by aqueous sol–gel method to VO2(B) and investigation of its photocatalytic activity, Applied Surface Science 322 (2014) 21–27

[30] PHD Thesis, XING ZHONG, 2013

[31] Διπλωματική Αντρέα Θεοδώρου με τίτλο « Παρασκευή λεπτών στρωμάτων/υμενίων οξειδίου του Βαναδίου και ηλεκτρικός χαρακτηρισμός στην περιοχή 80 K ≤ T ≤ 500 K », 10/10/2016

[32] https://en.wikipedia.org/wiki/X-raycrystallography

[33] Ibach Harald, Lut Hans. Κεφάλαιο 3.4

[34] wikilectures/Lambert-Beers_law

[35] https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=SM05PD5A

[36] Education in Microscopy and Digital Imaging, Arc lamps

[37] https://www.thorlabs.de/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=2822

[38] C.W. Zou et al, Temperature sensitive crystallization of V_2O_5: from amorphous film to β-V_2O_5nanorods, CrystEngComm, 2010, 12, 691-693

[39] Bonjgin Simon Mun et al, Nonpercolative metal-insulator transition in VO_2 single crystals Physical Review B 84, 113109 (2011)

[40] Jyrki Lappalainen et al, Microstructure dependent switching properties of VO2 thin films, Science Direct, Sensors and Actuators A 142 (2008) 250–255

[41] F.B.Dejene et al, Electrical, optical and structural properties of pure and gold-coated VO_2 thin films on quartz substrate, Current Applied Physics Volume 10, Issue 2, March 2010, Pages 508-512

[42] Chimie de la Mati`ere Condensee, Optical Switching in VO_2 thin Films, Journal of Sol-Gel Science and Technology 13 (1998), 915–921

[43] V. Melnik et al, Low-temperature method for thermochromic high ordered VO_2 phase formation, Materials Letters 68 (2012) 215-217

[44] Nuru R. Mlyuka et al, Thermochromic VO_2-based multilayer films with enhanced luminous transmittance and solar modulation**,** Applications and materials science (2009), 10.1002/pssa.200881798, 88
[45] M. Gurvitch et al, "VO_2 films with strong semiconductor to metal phase transition prepared by the precursor oxidation process", Journal of Applied Physics 102, 033504, 2007