



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη των οπτοηλεκτρονικών ιδιοτήτων ετεροδομής ZnO πάνω σε
μικροδομημένο Si τύπου p

Νικολαΐδου Κωνσταντίνα
Α.Μ.1110201000119

Επιβλέπων
Σπυρίδων Γαρδέλης, Αναπληρωτής Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Συνεπιβλέπουσα
Δρ. Μαρία Κάνδυλα, Ερευνήτρια, ΕΙΕ

ΑΘΗΝΑ
Σεπτέμβριος 2018

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών του Τμήματος Φυσικής του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, κατά το ακαδημαϊκό έτος [2017-2018], υπό την επίβλεψη του κ. Σπύρου Γαρδέλη και σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Θεωρητικής και Φυσικής Χημείας του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών και το εργαστήριο της Δρ. Μαρίας Κάνδυλα.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Γαρδέλη για την σημαντική και πολύωρη συνεισφορά του, τόσο στη διαδικασία διεξαγωγής των πειραματικών μετρήσεων, όσο και στην επιμέλεια του κειμένου καθώς και την κα. Κάνδυλα για την καθοδήγηση και την παραχώρηση των εγκαταστάσεων του εργαστηρίου της. Το αξιοσημείωτο ενδιαφέρον που επέδειξαν και η βοήθεια και των δύο, ήταν ζωτικής σημασίας για την ολοκλήρωση της παρούσης πτυχιακής εργασίας και έπαιξαν πολύ σημαντικό ρόλο στο ευρύτερο πλαίσιο των προπτυχιακών σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περίληψη.....	5
Εισαγωγή.....	7
Κεφάλαιο 1: Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	11
1.1 Εισαγωγή στις φωτοδιόδους-Η επαφή p-n.....	11
1.2 Φωτοανιχνευτές.....	14
1.3 Ρεύμα σκότους I_{dark} και φωτόρευμα I_L	14
Κεφάλαιο 2: Στοιχεία για τα υπό μελέτη δείγματα.....	17
2.1 Ετεροεπαφές n-ZnO/p-Si και n-ZnO/p-μικροδομημένου Si.....	17
2.2 Μορφολογία δειγμάτων	18
Κεφάλαιο 3: Μετρήσεις I-V.....	21
3.1 Πειραματική διάταξη	21
3.2 Πειραματική διαδικασία και ανάλυση μετρήσεων	23
Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις φωτοαπόκρισης.....	25
4.1 Πειραματική διάταξη	25
4.2 Πειραματική διαδικασία και ανάλυση μετρήσεων	26
Συμπεράσματα.....	30
Βιβλιογραφία.....	31

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μελετήθηκαν οι ηλεκτρικές και οπτοηλεκτρονικές ιδιότητες ετεροεπαφής οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου (Si) και ετεροεπαφής ZnO πάνω σε υπόστρωμα μικροδομημένου πυριτίου. Το κίνητρο για τη μελέτη των διατάξεων αυτών ήταν η ανάγκη για ανάπτυξη φωτοανιχνευτών, κυρίως στην υπεριώδη περιοχή με παράλληλη αύξηση της φωτοαπόκρισης της ετεροδομής μέσω της μικροδόμησης του υποστρώματος πυριτίου.

Το ZnO είναι ένα πολλά υποσχόμενο διαφανές αγωγίμο οξείδιο (TCO) για χρήση σε οπτοηλεκτρονικές διατάξεις όπως είναι οι φωτοανιχνευτές υπεριώδους ακτινοβολίας (UV), οι φωτοдиодοι LEDs, και οι ηλιακές κυψελίδες (solar cells). Αυτό συμβαίνει εξ' αιτίας του μεγάλου ενεργειακού χάσματός του (3.37 eV) και της μεγάλης ενέργειας σύνδεσης εξιτονίου του (60 meV) σε θερμοκρασία δωματίου. Από την άλλη μεριά, το πυρίτιο είναι το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως ή και αποκλειστικά στη βιομηχανία της μικροηλεκτρονικής και νανοηλεκτρονικής και σε πολλές οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές, κυρίως για φωτοανίχνευση και φωτοβολταϊκά.

Στην παρούσα μελέτη αναπτύξαμε μία ετεροεπαφή ZnO/Si και για να αυξήσουμε την απόδοση μιας τέτοιας διάταξης, προχωρήσαμε δημιουργώντας ένα λεπτό υμένιο ZnO πάνω σε μικροδομημένο υπόστρωμα πυριτίου, ώστε να αυξηθεί η απόκριση και η ενεργός περιοχή της ετεροεπαφής σε σύγκριση με το επίπεδο υπόστρωμα πυριτίου. Η μικροδόμηση του πυριτίου έγινε με τη χρήση λέιζερ παλμικής ακτινοβολίας. Το λεπτό υμένιο ZnO, εναποτέθηκε στο υπόστρωμα μέσω της μεθόδου ατομικής εναπόθεσης (ALD) και για τις δύο ετεροεπαφές. Δημιουργήθηκαν μεταλλικές επαφές αλουμινίου (Al) μέσω θερμικής εξάχνωσης σε thermal evaporator. Για τις μεταλλικές επαφές έγινε χρήση μηχανικής μάσκας για το σχηματισμό ηλεκτροδίων και τη σύνδεση της διάταξης σε κύκλωμα. Οι παραπάνω διεργασίες πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο της Δρ. Μαρίας Κάνδουλα στο Ινστιτούτο Θεωρητικής και Φυσικής Χημείας του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών.

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις ηλεκτρικής έντασης ρεύματος (I) για διάφορες τιμές της ηλεκτρικής τάσης (V) έδειξαν ανορθωτική συμπεριφορά διόδου για το επίπεδο δείγμα. Από μετρήσεις φωτορεύματος σε διάφορα μήκη κύματος και οι δύο διατάξεις παρουσίασαν απόκριση σε μεγαλύτερο εύρος μηκών κύματος από μία επαφή p-n πυριτίου, επιβεβαιώνοντας το ρόλο του μεγαλύτερου ενεργειακού χάσματος του ZnO. Πιο συγκεκριμένα, τα αποτελέσματα της φωτοαγωγιμότητας εμφάνισαν τρεις διακριτές περιοχές

λόγω ενεργειακών καταστάσεων που αφορούν το Si, ηλεκτρικές μεταβάσεις εντός του ενεργειακού χάσματος και μεταξύ των ενεργειακών ζωνών του ZnO. Το σημαντικότερο είναι ότι παρατηρείται σημαντική αύξηση της απόκρισης στην περίπτωση της μικροδομημένης διάταξης.

Συμπερασματικά μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν οι οπτοηλεκτρονικές ιδιότητες των δύο διατάξεων και αξιολογήθηκαν ως προς την εν δυνάμει εφαρμογή τους για φωτοανίχνευση. Στην συγκεκριμένη εργασία προσπαθούμε να εξηγήσουμε τις συγκεκριμένες οπτοηλεκτρονικές ιδιότητες.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία, γίνεται μελέτη δύο ημιαγωγικών διατάξεων, μίας ετεροδομής ZnO/Si και μίας ετεροδομής ZnO/μικροδομημένου Si. Πιο συγκεκριμένα, πραγματοποιούνται οπτοηλεκτρονικές μετρήσεις των δειγμάτων με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων που σχετίζονται άμεσα με την ανάπτυξη ανιχνευτών υπεριώδους ακτινοβολίας UV. Ο απώτερος στόχος της μελέτης, είναι η αύξηση της ενεργού επιφάνειας του ώστε να υπάρξει μεγαλύτερη ευαισθησία και αύξηση της απόκρισης. Επομένως, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούν κάποια γενικά στοιχεία για τους φωτοανιχνευτές UV, καθώς και το ρόλο των ημιαγωγών που χρησιμοποιήσαμε.

Τα τελευταία χρόνια μεγάλη προσοχή έχει στραφεί στη φωτοανίχνευση της υπεριώδους ακτινοβολίας UV λόγω ενός ευρέους φάσματος χρήσης της σε πολιτικές και στρατιωτικές εφαρμογές, όπως η ασφαλής διαστημική επικοινωνία, η παρακολούθηση της ρύπανσης, η αποστείρωση του νερού, οι αισθητήρες φωτιάς, η πρόωρη ανίχνευση πυραύλων κ.ά. Για να επιτευχθούν τέτοιες εφαρμογές απαιτούνται ευαίσθητες συσκευές με υψηλή ταχύτητα απόκρισης και αναλογία θορύβου-σήματος. Φωτοανιχνευτές με βάση το πυρίτιο και φωτοπολλαπλασιαστές είναι διαθέσιμοι για ανίχνευση UV σε μεγάλη ποικιλία και μπορούν να είναι ευαίσθητοι στην περιοχή UV με χαμηλό θόρυβο και γρήγορη απόκριση. Ωστόσο, έχουν αρκετούς περιορισμούς όπως ανάγκη για φιλτράρισμα των φωτονίων χαμηλών ενεργειών (ορατό και υπέρυθρο), χαμηλότερη απόδοση (φωτοανιχνευτές με βάση το Si) και ανάγκη για εξαιρετικά υψηλό κενό και υψηλή τάση (φωτοπολλαπλασιαστές). Για να αποφευχθούν τέτοια μειονεκτήματα, ημιαγωγοί με μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα (όπως διαμάντι, SiC, III-νιτρίδια και II-VI υλικά με μεγάλο ενεργειακό χάσμα) χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο στους ανιχνευτές UV. Επιπλέον, τέτοια υλικά έχουν καλύτερη χημική και θερμική σταθερότητα, το οποίο είναι απαραίτητο για συσκευές που λειτουργούν σε αντίξοες συνθήκες.^[1]

Το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) ανήκει στην κατηγορία αυτών των υλικών και μελετάται εκτενώς τα τελευταία χρόνια για τις μοναδικές ιδιότητες του και τις πιθανές εφαρμογές του σε ηλεκτρονικές και οπτοηλεκτρονικές διατάξεις. Το ZnO, είναι ένας σύνθετος ημιαγωγός τύπου n με άμεσο ενεργειακό χάσμα ($E_g = 3.37\text{eV}$). Ανήκει στην ομάδα των II-VI υλικών και είναι ένα διαφανές αγωγίμο οξείδιο (TCO). Τα χαρακτηριστικά του, συμπεριλαμβανομένου του μεγάλου ενεργειακού χάσματος του, όπως η μεγάλη ενέργεια σύνδεσης εξιτονίου (60 meV) στους 300K, το καθιστούν κατάλληλο για οπτοηλεκτρονικές

εφαρμογές. Μπορεί να γίνει ιδιαίτερα αγωγίμο με προσμίξεις, είναι φιλικό προς το περιβάλλον, έχει μεγάλη αντοχή στην ακτινοβολία και υψηλή χημική σταθερότητα, είναι ευπροσάρμοστο και μπορεί να έχει διάφορες μορφές ανάπτυξης σε χαμηλές θερμοκρασίες και με χαμηλό κόστος. Σημαντικά χαρακτηριστικά του ZnO είναι επίσης οι πολικές επιφάνειες, η υψηλή διαπερατότητα και η ισχυρή φωταύγεια σε θερμοκρασία δωματίου.^[2] Το ZnO έχει αποδειχθεί ότι είναι ένα ιδιαίτερα επιθυμητό υλικό για ανάπτυξη φωτοανιχνευτών, ειδικά για ανίχνευση υπεριώδους ακτινοβολίας UV. Η λειτουργικότητα του στην φωτοανίχνευση βασίζεται στην απορρόφηση αερίων που βρίσκονται στην επιφάνεια του ZnO και αλλάζουν την αγωγιμότητα του αντιδρώντας με τις επιφανειακές ατέλειες. Ο βασικός μηχανισμός για την ανίχνευση UV βασίζεται στην απορρόφηση ατμοσφαιρικού O₂ από τις επιφανειακές οπές O^[3]. Η φωτοαπόκριση στην περιοχή UV των υμενίων ZnO παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1940 από τον Mollow. Ωστόσο, η έρευνα για φωτοανιχνευτές που βασίζονται στο ZnO άρχισε να ευδοκιμεί από το 1980 κι έπειτα. Αρχικά οι διατάξεις είχαν απλή δομή και οι ιδιότητές τους δεν ήταν πολύ καλές. Με βελτίωση της κατασκευής των υμενίων ZnO χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνικές παρατηρήθηκαν πιο περίπλοκοι φωτοανιχνευτές (επαφές p-n, p-i-n, Schottky κ.ά) με μεγαλύτερη επίδοση^[1]. Νανοδομές ZnO όπως είναι οι νανοράβδοι (nanorods), τα νανοσύρματα (nanowires), οι νανοκορδέλες (nanoribbons), οι νανοζώνες (nanobelts), οι τετράποδες δομές (tetrapod structures) κ.ά. μπορούν να αναπτυχθούν σε ποικίλες μορφές με διάφορες μεθόδους. Τέτοιες μέθοδοι είναι η τεχνική RF sputtering, η μέθοδος ατομικής εναπόθεσης (ALD), η χημική εναπόθεση ατμών (CVD), η εναπόθεση με παλμικό laser (PLD), η μοριακή επιταξία (MBE), η μέθοδος sol-gel, spray pyrolysis και electrospinning^[4]. Μεγάλη πρόοδος έχει σημειωθεί στην επίτευξη p-τύπου αγωγιμότητας ZnO, ωστόσο λόγω δυσκολίας ανάπτυξης υψηλής ποιότητας p-τύπου υλικού μιας και το ZnO είναι εγγενώς ένας ημιαγωγός τύπου n, αναμένεται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη αποδοτικών ομοεπαφών p-n που βασίζονται στο ZnO. Σαν εναλλακτική προσέγγιση, γίνονται μελέτες πάνω σε p-n ετεροεπαφές, όπως για παράδειγμα n-ZnO νανοράβδοι/p-GaN και n-ZnO/p-Si οι οποίες έχουν ήδη κατασκευαστεί για μελέτη των I-V, της ηλεκτροφωταύγειας αλλά και της φωτοαπόκρισης. Προφανώς οι ετεροδομές n-ZnO/p-Si είναι πολύ πιο αποδοτικές από άποψη κόστους και ευέλικτες για την κατασκευή διατάξεων αλλά και κατάλληλες για την ενσωμάτωση του ZnO με το Si^[5]. Η ανάγκη, λοιπόν, για ανάπτυξη φωτοανιχνευτών που να είναι πιο ευαίσθητοι στην περιοχή UV, μας οδήγησε στην κατασκευή ετεροδομών ZnO πάνω σε Si και σε προσπάθεια αύξησης της ενεργού επιφάνειας της επαφής προκειμένου να δούμε αύξηση της απόκρισης. Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθούν και μερικές πληροφορίες για το Si αλλά και το

μικροδομημένο Si που χρησιμοποιήσαμε.

Το πυρίτιο Si είναι ο πλέον διαδεδομένος ημιαγωγός που χρησιμοποιείται στη μικροηλεκτρονική και στη φωτονική. Μιας και είναι δεύτερο σε αφθονία στη γη, μετά το οξυγόνο, παράγεται σε μεγαλύτερο όγκο με χαμηλότερο κόστος από οποιονδήποτε άλλον ημιαγωγό. Το εύκολα ανπτυσσόμενο οξείδιό του έθεσε το πυρίτιο ως πρώτη επιλογή για τη βιομηχανία ημιαγωγικών διατάξεων. Το πυρίτιο λόγω της ανάπτυξης της τεχνολογίας ολοκλήρωσης του χρησιμοποιείται σχεδόν αποκλειστικά στην τεχνολογία CMOS. Το ενεργειακό του χάσμα είναι 1,07 eV. Έτσι το πυρίτιο πέραν της χρήσης του στην μικροηλεκτρονική, χρησιμοποιείται και ως υλικό για ανίχνευση στο ορατό και στο κοντινό υπεριώδες με σχετικά φτωχότερη φωτοαπόκριση, καθώς και στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών. Ωστόσο, το πυρίτιο παρουσιάζει και κάποιες ελλείψεις. Είναι «κακός» εκπομπός φωτός λόγω του έμμεσου ενεργειακού του χάσματος, επομένως δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υλικό διόδου φωτοεκπομπής (LED) και επιπλέον ως υλικό φωτοβολταϊκού αποτυγχάνει να μετατρέψει αποτελεσματικά το κοντινό υπεριώδες του ηλιακού φάσματος. Ερευνητικές προσπάθειες γίνονται ωστέ να διαχειριστούν σωστά οι ιδιότητες του πυριτίου και να ξεπεραστούν οι ελλείψεις αυτές. Παρά την ύπαρξη άλλων ημιαγωγικών υλικών που μπορούν να ανιχνεύσουν μικρότερα μήκη κύματος, το χαμηλό κόστος του πυριτίου μας οδηγεί σε νέες μορφές και χρήσεις του^[6], αλλά και στην ανάγκη ολοκλήρωσής του με άλλους ημιαγωγούς όπως για παράδειγμα τα μεταλλικά οξείδια.

Η ανάγκη βελτιστοποίησης της φωτοευαισθησίας των ανιχνευτών οδήγησε στη διαχείριση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μέσω της μικροδόμησης του πυριτίου. Η μικροδόμηση έχει σαν αποτέλεσμα: α) την αύξηση της ενεργού επιφάνειας της φωτοδιόδου και β) την ενίσχυση της απορρόφησης.

Ένας τρόπος μικροδόμησης είναι η ακτινοβολία λέιζερ. Από τις αρχές της δεκαετίας του 1970, έρευνες έχουν αναφερθεί σε εμφάνιση αυθόρμητων περιοδικών επιφανειακών κυματισμών μετά από ακτινοβολία λέιζερ^[6-9]. Οι κυματισμοί αυτοί, που αργότερα ονομάστηκαν περιορισμένες επιφανειακές δομές που προκαλούνται από λέιζερ (*Laser Induced Periodic Surface Structures, LIPPS*), είναι μικροί κυματισμοί της επιφάνειας με χωρικές περιόδους που σχετίζονται με το μήκος κύματος του λέιζερ. Μια δεκαετία αργότερα αναφέρθηκε ο σχηματισμός κωνικών μικροδομών με ακτινοβολία λέιζερ^[6]. Τα αποκαλούμενα *sputter-cones* ήταν αρχικά ένα ανεπιθύμητο παραπροϊόν sputtering σε πειράματα εναπόθεσης με παλμικό λέιζερ. Αν και κωνικά, τα *sputter-cones* είναι ακανόνιστα και διάσπαρτα σε όλη την επιφάνεια. Στα μέσα και στα τέλη της δεκαετίας του 1990, μερικές

ερευνητικές ομάδες άρχισαν να εξετάζουν τον σχηματισμό πιο περίπλοκων δομών σε πυρίτιο μετά από ακτινοβολία λέιζερ^[6,9-12]. Άλλες, παρατήρησαν την μοναδική μορφολογία των επιφανειών μετά από ακτινοβολία λέιζερ σε εξαφθοριούχο θείο SF₆ και ξεκίνησαν τις δικές τους εργασίες πάνω στο συγκεκριμένο θέμα^[6,13-16]. Εκτός του σχηματισμού κωνικών μικροδομών, η ακτινοβολία λέιζερ μετατρέπει το γκρί χρώμα της γυαλιστερής επιφάνειας του πυριτίου που μοιάζει με καθρέφτη σε ένα σκούρο, βελούδινο μαύρο. Αυτή η βαθιά μαύρη μικροδομημένη επιφάνεια οδήγησε στην ονομασία **black silicon** (μαύρο πυρίτιο). Η μικροδομημένη επιφάνεια έδειξε ότι οι οπτικές ιδιότητές της τροποποιούνται κατά την ακτινοβολία με λέιζερ. Το μικροδομημένο πυρίτιο έχει πολύ υψηλότερη απορρόφηση σε ολόκληρο το φάσμα, συμπεριλαμβανομένης της απορρόφησης κοντά στα μικρότερα από το ενεργειακό χάσμα μήκη κύματος, στοιχείο πολλά υποσχόμενο για χρήση του ως υπόστρωμα σε οπτοηλεκτρονικές διατάξεις με μεγαλύτερη ευαισθησία^[6,17,18].

Στην παρούσα εργασία μετρήθηκαν και συγκρίθηκαν οι ηλεκτρικές και οπτοηλεκτρονικές ιδιότητες δύο διατάξεων ετεροδομής n-ZnO/Si οι οποίες αναπτύχθηκαν πάνω σε επίπεδο και μικροδομημένο υπόστρωμα Si τύπου p. Στα παρακάτω κεφάλαια θα αναφερθούμε λεπτομερώς στις μετρήσεις αυτές και στην ανάλυση των αποτελεσμάτων. Τέλος θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

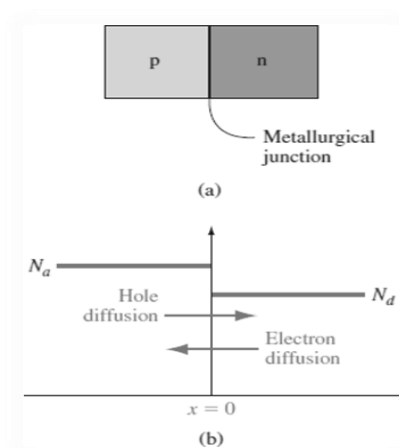
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε κάποιες βασικές πληροφορίες για τις φωτοδιόδους και παραπέμπουμε σε διάφορες αναφορές για περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με την μελέτη των συγκεκριμένων διατάξεων [18-23].

1.1. Εισαγωγή στις φωτοδιόδους - Η επαφή p-n

Πριν συζητήσουμε για την μικροδομημένη δίοδο, θα πρέπει πρώτα να αναφερθούμε στις βασικές αρχές λειτουργίας και στις ιδιότητες μιας φωτοδιόδου. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να γίνει κατανοητή η δομή της φωτοδιόδου και το σημαντικότερο το πώς ανιχνεύει μία φωτοδίοδος το φως.

Υπάρχουν πολλοί τύποι ημιαγωγικών φωτοδιόδων (φωτοδίοδος p-n ή p-i-n, φωτοδίοδος χιονοστιβάδας, Schottky-barrier φωτοδίοδος, ετεροεπαφές φωτοδιόδοι κ.ά). Για τις ανάγκες της εργασίας, θα συζητήσουμε για μία από τις πιο βασικές διατάξεις, την ετεροεπαφή p-n.

Μία επαφή p-n δημιουργείται όταν σε ένα μονοκρυσταλλικό ημιαγωγό, η μία περιοχή του εμπλουτιστεί με προσμίξεις τύπου δότη, για τη δημιουργία της περιοχής τύπου n και η άλλη με προσμίξεις τύπου αποδέκτη, για τη δημιουργία της περιοχής p ή αντίστοιχα φέρνοντας σε επαφή έναν ημιαγωγό τύπου n (n-type) με έναν τύπου p (p-type).

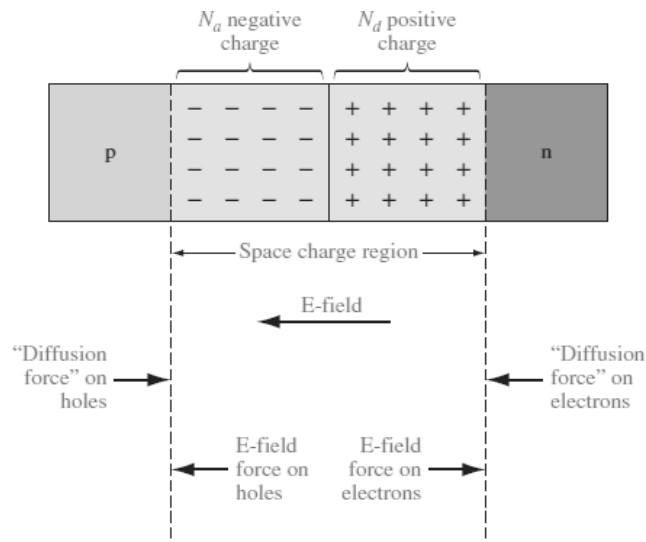


Εικόνα 1.1: (a) Απλοποιημένη γεωμετρία μιας επαφής p-n.

(b) Συγκέντρωση προσμίξεων ιδανικής p-n επαφής.

Στη διεπιφάνεια που χωρίζει τις δύο περιοχές εμφανίζεται απότομη αλλαγή στον τύπο των προσμίξεων όπου υπάρχει πολύ μεγάλη διαβάθμιση στις συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών. Ηλεκτρόνια, που είναι φορείς πλειονότητας της περιοχής n θα αρχίσουν να διαχέονται μέσα στην περιοχή p και αντίστοιχα οπές, που είναι οι φορείς πλειονότητας της περιοχής p, θα αρχίσουν να διαχέονται μέσα στην περιοχή n. Καθώς τα ηλεκτρόνια φεύγουν απ την περιοχή n αφήνουν πίσω τους θετικά φορτισμένα άτομα δοτών. Αντίστοιχα οι οπές που εγκαταλείπουν την περιοχή p αφήνουν πίσω τους αρνητικά φορτισμένα άτομα αποδεκτών. Έτσι δημιουργούνται δύο περιοχές με θετικά και αρνητικά φορτία εκατέρωθεν της διαχωριστικής επιφάνειας οι οποίες αποτελούν την περιοχή φορτίων χώρου (space charge region) ή περιοχή απογύμνωσης (depletion region).

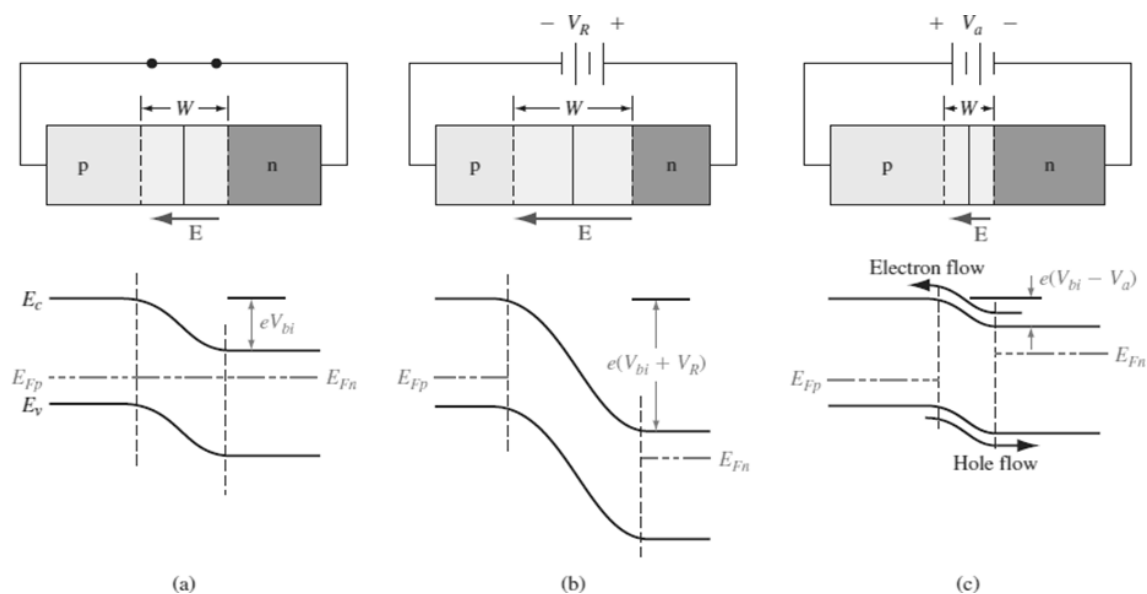
Τα θετικά και αρνητικά φορτία των περιοχών n και p δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή κοντά στην διαχωριστική επιφάνεια με φορά από τα θετικά προς τα αρνητικά φορτία. Στα άκρα της περιοχής φορτίων χώρου θα ασκούνται στα ηλεκτρόνια και στις οπές δυνάμεις διάχυσης (εικόνα 1.2), που είναι αντίθετες από τις δυνάμεις που ασκούνται λόγω του ηλεκτρικού πεδίου στην περιοχή φορτίων χώρου. Στην κατάσταση ισορροπίας οι δύο αυτές δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε τύπο φορέα εξισορροπούνται.



Εικόνα 1.2: Περιοχή φορτίων χώρου, ηλεκτρικό πεδίο, δυνάμεις που ασκούνται στους φορείς.

Εάν θεωρήσουμε ότι στην επαφή δεν εφαρμόζεται καμία τάση τότε βρισκόμαστε σε κατάσταση ισορροπίας και το επίπεδο της ενέργειας Fermi είναι σταθερό στο σύστημα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Οι ζώνες αγωγιμότητας και σθένους θα καμπυλώνονται στην περιοχή φορτίων χώρου εφόσον οι θέσεις τους σε σχέση με το επίπεδο Fermi είναι διαφορετικές στην n και p περιοχή.

Εφαρμόζοντας ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο, δηλαδή εφαρμόζοντας τάση στα άκρα της επαφής, ενισχύεται το εσωτερικό πεδίο, η επαφή δεν βρίσκεται πλέον σε κατάσταση ισορροπίας και η στάθμη της ενέργειας Fermi δεν παραμένει σταθερή στο σύστημα. Εάν εφαρμόσουμε αρνητική τάση, δηλαδή την p μεριά στα αρνητικά και την n μεριά στα αρνητικά λέμε πως έχουμε ανάστροφη πόλωση. Κατά την ανάστροφη πόλωση, το πεδίο ωθεί τα ηλεκτρόνια και τις οπές στα άκρα της επαφής αυξάνοντας έτσι το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης, το εσωτερικό πεδίο και τη διαφορά δυναμικού της επαφής. Από την άλλη μεριά, αν εφαρμόσουμε θετική τάση, δηλαδή την p μεριά στα θετικά και την n στα αρνητικά λέμε πως έχουμε ορθή πόλωση. Σε αυτή την περίπτωση, το εφαρμοζόμενο πεδίο μειώνει το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης μειώνοντας το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο και τη διαφορά δυναμικού κατά μήκος της επαφής. Ηλεκτρόνια εισάγονται από δεξιά και οπές από τα αριστερά (ηλεκτρόνια φεύγουν) δημιουργώντας φορείς που επανασυνδέονται στην επαφή.



Εικόνα 1.3: Σχήμα και ενεργειακό διάγραμμα επαφής p-n σε (a) μηδενική τάση, (b) ανάστροφη πόλωση, (c) ορθή πόλωση.

Βλέπουμε, λοιπόν, ότι μία επαφή p-n επιτρέπει το ρεύμα να ρέει προς μία μόνο κατεύθυνση και αυτή η ανορθωτική συμπεριφορά είναι η χαρακτηριστική συμπεριφορά μίας διόδου. Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μίας διόδου είναι βασική για την λειτουργία των φωτοδίοδων.

1.2. Φωτοανιχνευτές-Φωτοδίοδοι

Οι ημιαγωγικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για ανίχνευση φωτονίων ονομάζονται φωτοανιχνευτές. Οι φωτοανιχνευτές έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν το οπτικό σήμα σε ηλεκτρικό. Όταν παράγεται περίσσεια ηλεκτρονίων και οπών σε έναν ημιαγωγό, αυξάνεται η αγωγιμότητα του υλικού. Αυτή η αλλαγή στην αγωγιμότητα είναι και η βάση του ίσως πιο απλού τύπου ανιχνευτή, του φωτοεκπομπού. Εάν δημιουργηθούν ηλεκτρόνια και οπές μέσα στην περιοχή φορτίων χώρου μίας επαφής p-n, το ηλεκτρικό πεδίο θα τα χωρίσει και θα παραχθεί ρεύμα. Η βάση για διάφορους φωτοανιχνευτές όπως είναι η φωτοδίοδος και το φωτοτρανζίστορ είναι η επαφή p-n.

Μια φωτοδίοδος p-n, είναι ουσιαστικά μία δίοδος p-n, η οποία είναι ειδικά κατασκευασμένη ώστε να επιτρέπει τη διείσδυση του φωτός εντός της επαφής. Οι φωτοδίοδοι p-n και p-i-n έχουν το πλεονέκτημα της γρήγορης ταχύτητας απόκρισης, του χαμηλού σκοτεινού ρεύματος και της λειτουργίας χωρίς εφαρμογή πόλωσης. Ως εκ τούτου, οι φωτοδίοδοι p-n και p-i-n είναι η πλέον κατάλληλη επιλογή για μελλοντικές διαστημικές εφαρμογές^[1].

1.3. Ρεύμα σκότους I_{dark} και Φωτόρευμα I_L

Σε μία ιδανική δίοδο p-n υπάρχουν δύο σημαντικές συνεισφορές στο ρεύμα της επαφής. Προκειται για το παραγόμενο ρεύμα (generation current, I_{gen}) και το ρεύμα επανασύνδεσης (recombination current, I_{rec}). Το παραγόμενο ρεύμα προέρχεται από τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που δημιουργούνται στην περιοχή απογύμνωσης. Εάν δημιουργηθεί ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών στην περιοχή απογύμνωσης, το ισχυρό εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο διαχωρίζει αμέσως το ζεύγος και το ηλεκτρόνιο και η οπή συμβάλλουν στην ροή του ρεύματος κατά μήκος της επαφής. Το παραγόμενο ρεύμα είναι αρνητικό από τον ορισμό του, είναι συνήθως μικρό (<1μΑ) και λέγεται κι αλλιώς ρεύμα κορεσμού ή ρεύμα σκότους. Από εδώ κι έπειτα θα το αποκαλούμε ρεύμα σκότους I_{dark} . Το I_{dark} είναι, ως επί το πλείστον, ανεξάρτητο από το μέγεθος της διαφοράς δυναμικού στην περιοχή απογύμνωσης επειδή

οποιαδήποτε πιθανή διαφορά έχει ως αποτέλεσμα ένα ηλεκτρικό πεδίο για τον διαχωρισμό των παραγόμενων φορέων. Το ρεύμα επανασύνδεσης προέρχεται από τη στατιστική πιθανότητα ότι υπάρχουν ηλεκτρόνια στην n πλευρά και αντίστοιχα οπές στην p πλευρά, που έχουν αρκετή ενέργεια για να ξεπεράσουν το πιθανό φράγμα της επαφής. Τα φορτία που έχουν την κατάλληλη ενέργεια ακολουθούν τη στατιστική Fermi-Dirac κι έτσι το ρεύμα επανασύνδεσης εξαρτάται εκθετικά από την θερμοκρασία και το δυναμικό. Το μέγεθος του δυναμικού εξαρτάται από το δυναμικό επαφής σε θερμική ισορροπία και την εφαρμοζόμενη τάση. Το ρεύμα επανασύνδεσης σύμφωνα με τον ορισμό μας είναι θετικό. Άρα, έχουμε

$$I_{dark} \propto \text{ρυθμός παραγωγής} \quad (\text{σχέση 1.1})$$

$$I_{rec} \propto e^{(V_{applied}-V_{contact})/k_bT} \propto e^{V_{applied}} \quad (\text{σχέση 1.2})$$

$$I_{total} = I_{rec} - I_{dark} \quad (\text{σχέση 1.3})$$

Για μηδενικό πεδίο και θερμική ισορροπία, το ολικό ρεύμα θα πρέπει να είναι μηδέν και το I_{rec} ίσο με το I_{dark} . Εάν λύσουμε τη συνθήκη αυτή και αντικαταστήσουμε την λύση πίσω έχουμε

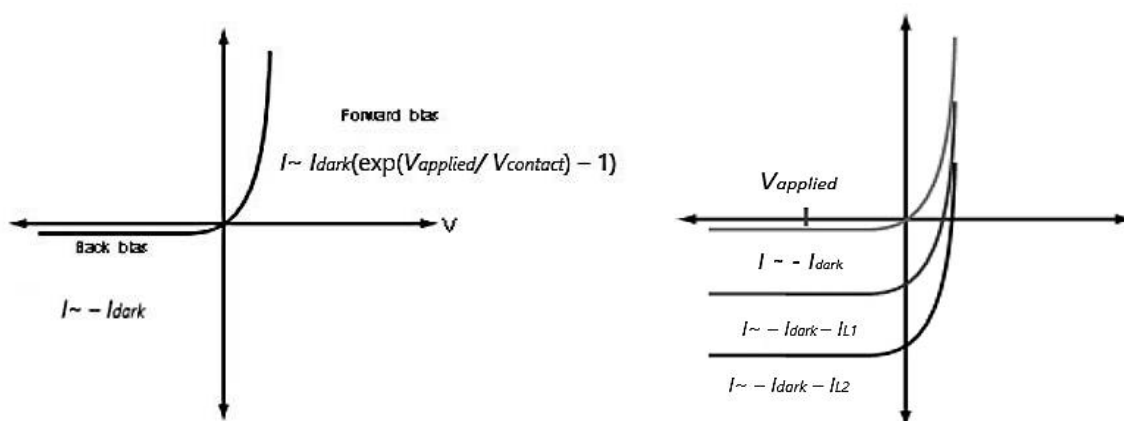
$$I_{total} \propto I_{dark}(e^{V_{applied}} - 1) \quad (\text{σχέση 1.4})$$

Από αυτή την εξίσωση, είναι εύκολο να δούμε την μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος-τάσης (I-V) μιας διόδου. Αν εφαρμόσουμε μια αρνητική τάση (ανάστροφη πόλωση), ο εκθετικός όρος πηγαίνει γρήγορα στο μηδέν και η συνολική ροή ρευματος στην μικρή τιμή $-I_{dark}$. Αν εφαρμόσουμε μια θετική τάση (ορθή πόλωση), το ρεύμα αυξάνεται εκθετικά. Δηλαδή, μια επαφή p-n επιτρέπει μόνο τη ροή του ρεύματος σε μία κατεύθυνση, έχει ανορθωτική συμπεριφορά.

Ας δούμε τώρα τι συμβαίνει αν φωτίσουμε την επαφή. Αν ένα φωτόνιο επαρκούς ενέργειας εισέλθει στην περιοχή απογύμνωσης, απορροφάται και δημιουργεί ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών. Και πάλι το ζεύγος θα χωριστεί αμέσως λόγω του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου και υπάρχει αρνητική συνεισφορά στο ολικό ρεύμα. Η συνεισφορά αυτή είναι το φωτόρευμα (I_L) και είναι ανάλογη του αριθμού των φωτονίων που προσπίπτουν. Επιστρέφουμε στην εξίσωση του ολικού ρεύματος και προσθέτουμε τον όρο του φωτορεύματος.

$$I_{total} \propto I_{dark}(e^{V_{applied}} - 1) - I_L \quad (\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta \ 1.5)$$

Η συνεισφορά του φωτορεύματος κατεβάζει την καμπύλη I-V κατά ποσό ανάλογο της προσπίπτουσας ισχύος. Αυτή είναι η λειτουργία μιας φωτοδιόδου.



Εικόνα 1.4: Αριστερά, η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μιας διόδου p-n. Για θετική τάση το ρεύμα αυξάνεται εκθετικά. Αυτή είναι η κατάσταση ορθής πόλωσης. Για αρνητική εφαρμοζόμενη τάση, το ρεύμα παίρνει μια μικρή αρνητική τιμή πολύ κοντά στο ρεύμα σκότους. Αυτή είναι η κατάσταση ανάστροφης πόλωσης. Δεξιά, φωτίζοντας την επαφή υπάρχει αρνητική συνεισφορά στο ολικό ρεύμα από το παραγόμενο φωτόρευμα. Η συνεισφορά αυτή είναι ανάλογη της ισχύος του προσπίπτοντος φωτός. Η καμπύλη I-V παίφτει, αφού $I_{L2} > I_{L1}$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΔΕΙΓΜΑΤΑ

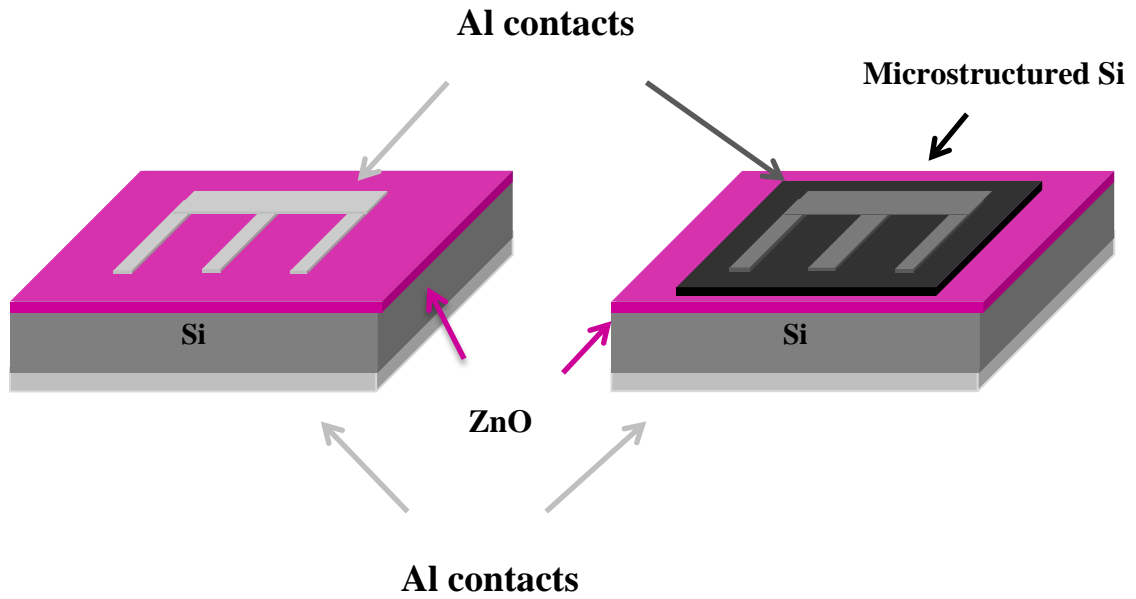
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν στοιχεία που αφορούν τα χαρακτηριστικά, την κατασκευή και τη δομή των υπό μελέτη δειγμάτων, έτσι ώστε να διευκολύνουν την κατανόηση και ανάλυση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

Για τις ανάγκες της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκαν δύο δείγματα από τα ίδια ημιαγώγιμα υλικά, αλλά με διαφορετική δομή. Μία ετεροεπαφή n-type οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) πάνω σε p-type πυρίτιο (Si) και μία ετεροεπαφή n-type οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) πάνω σε p-type μικροδομημένο πυρίτιο (black Si).

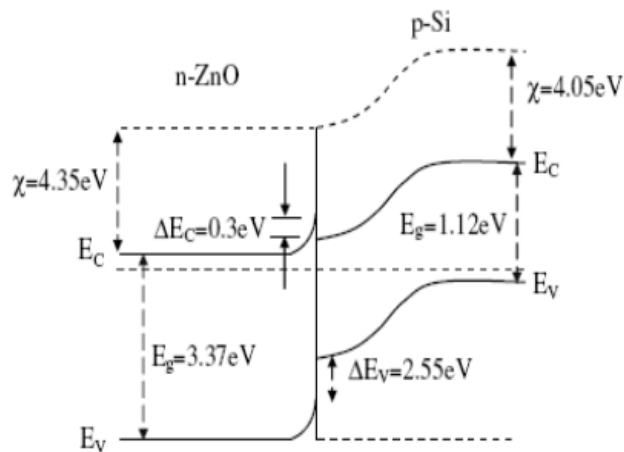
2.1. Ετεροεπαφές n-ZnO/p-Si και n-ZnO/p-μικροδομημένου Si

Η ετεροεπαφή ZnO/Si αποτελείται από λεπτό υμένιο οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) με συμπεριφορά τύπου n, πάνω σε υπόστρωμα μονοκρυσταλλικού πυριτίου p-type. Το λεπτό υμένιο ZnO (80 nm), εναποτέθηκε στο υπόστρωμα μέσω της μεθόδου ατομικής εναπόθεσης (ALD) και για τις δύο ετεροεπαφές. Το μικροδομημένο Si δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας σύστημα laser Nd:YAG με παλμική διάρκεια 7 ns. Το υπόστρωμα πυριτίου τοποθετείται σε θάλαμο κενού που εκκενώνεται από περιστροφική αντλία και γεμίζεται με αέριο SF₆, το οποίο βοηθά στο σχηματισμό μικροακίδων στο πυρίτιο κατά τη διάρκεια της ακτινοβολίας^[17] (εικόνα 2.1). Έπειτα δημιουργήθηκαν μεταλλικές επαφές ημιδιαφανούς και αδιαφανούς αλουμινίου (Al) εκατέρωθεν των δειγμάτων. Αναλυτικότερα, λεπτό αδιαφανές στρώμα Al (160 nm) εναποτέθηκε στην περιοχή p των δειγμάτων, δηλαδή πάνω στο Si, με την μέθοδο θερμικής εξάχνωσης σε θάλαμο κενού. Ακολούθησε ανόπτηση (annealing) σε άζωτο προκειμένου να επιτευχθεί διάχυση ατόμων αλουμινίου μέσα στο πυρίτιο. Τέλος, στην n περιοχή των δειγμάτων (ZnO), δημιουργήθηκε, πάλι μέσω θερμικής εξάχνωσης, κατάλληλη μεταλλική επαφή αδιαφανούς και ημιδιαφανούς Al, χρησιμοποιώντας ειδικά σχεδιασμένα σε σχήμα μικρής χτένας μηχανική μάσκα (σχήμα 2.1), για τη σύνδεση της διάταξης σε κύκλωμα. Στο μικροδομημένο δείγμα η εναπόθεση με μάσκα έγινε πάνω στην περιοχή του ZnO που βρισκόταν μόνο πάνω στο μικροδομημένο Si. Παρακάτω παρουσιάζεται το ενεργειακό διάγραμμα n-ZnO/p-Si, σχήμα που απεικονίζει την μορφή των δειγμάτων και εικόνες SEM (Scanning Electron Microscopy) που μας δείχνουν την μορφή του μικροδομημένου Si.

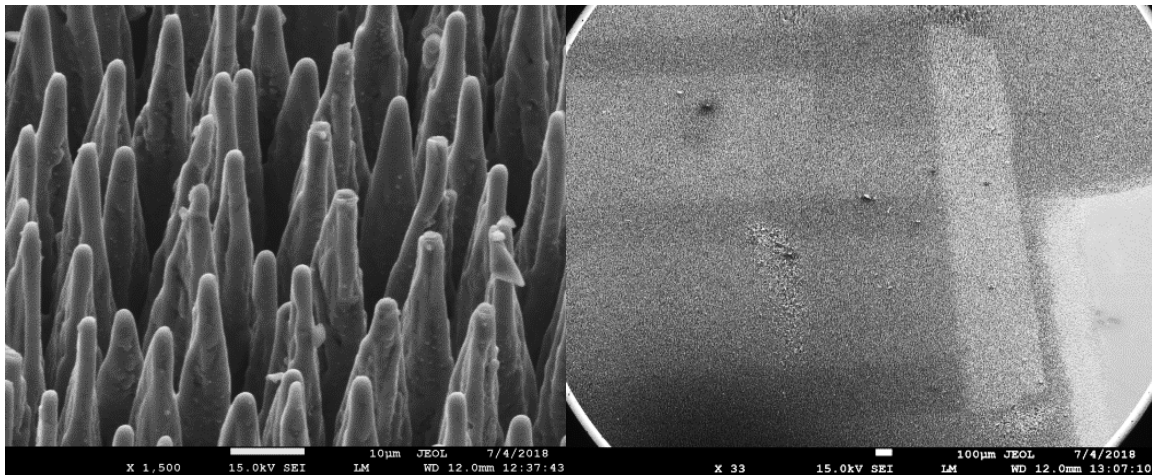
2.2. Μορφολογία δειγμάτων



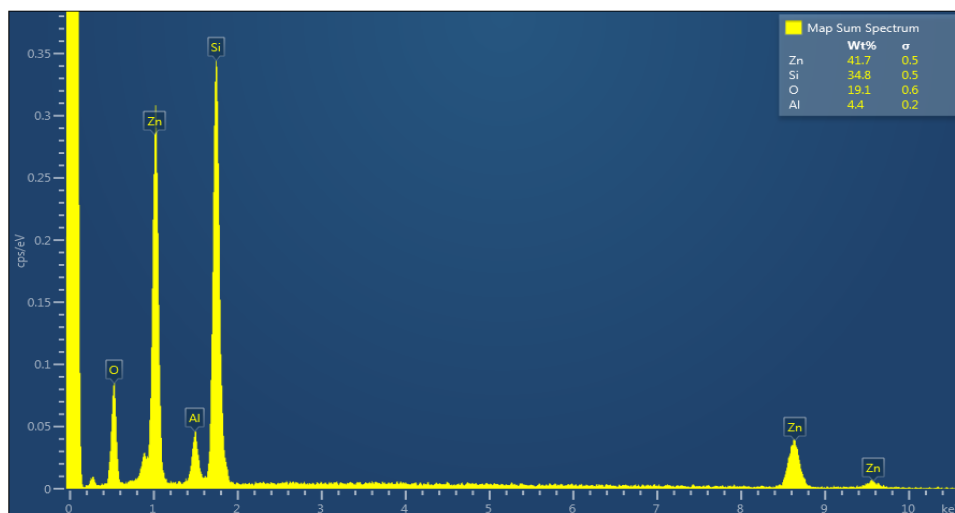
Σχήμα 2.1: Αριστερά το n-ZnO/p-Si και δεξιά το n-ZnO/p-μικροδομημένο Si με τις μεταλλικές τους επαφές. Στο σχήμα βλέπουμε την μορφή της μηχανικής μάσκας σε σχήμα χτενιού.



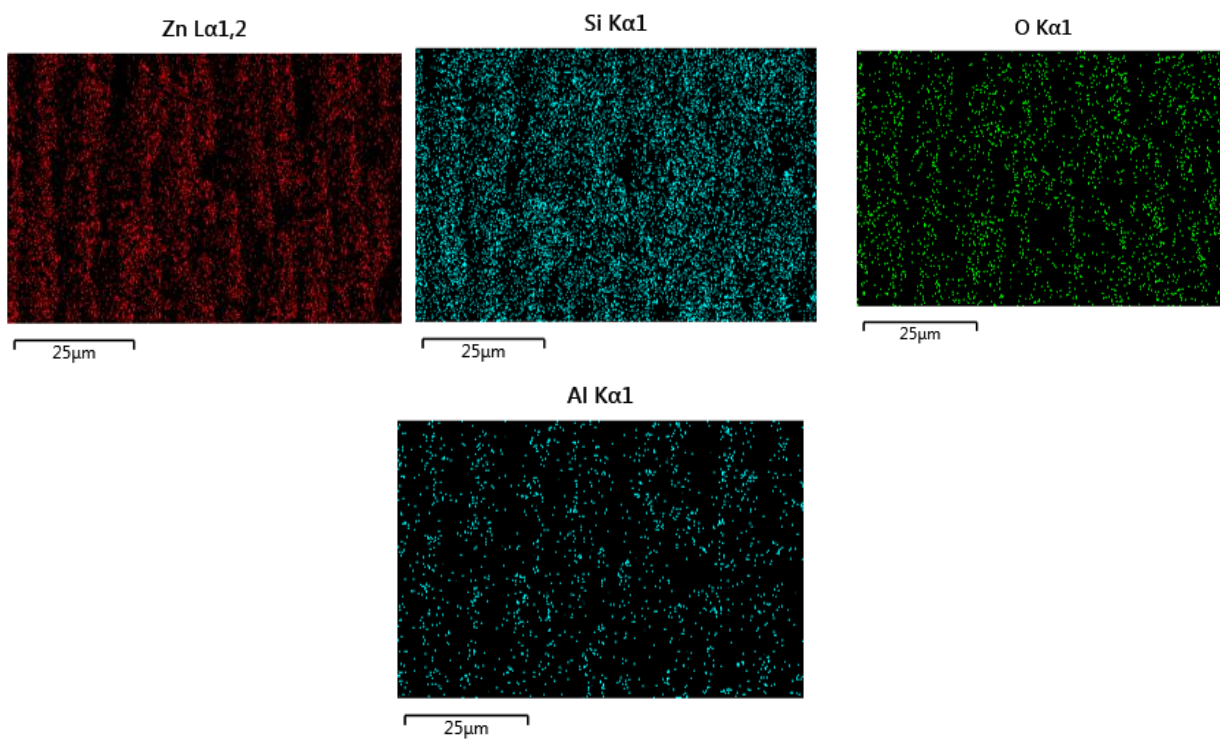
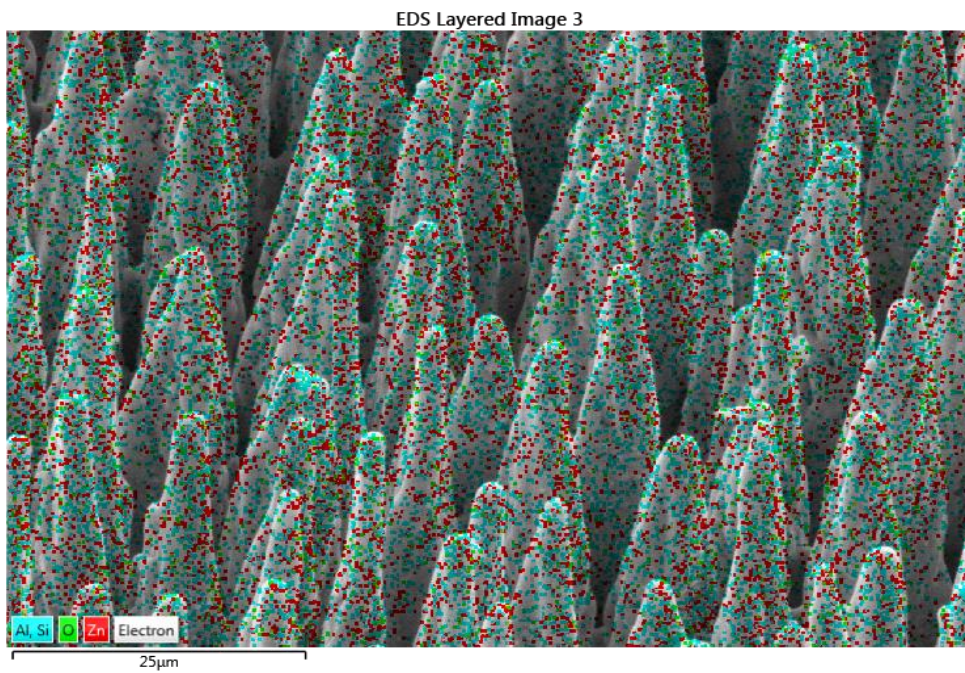
Σχήμα 2.2: Το ενεργειακό διάγραμμα επαφής n-type ZnO/p-type Si.



Εικόνα 2.1: Αριστερά εικόνα SEM της μορφής των ακίδων του μικροδομημένου Si και δεξιά μακρυνή εικόνα SEM όπου φαίνεται ολόκληρη η επαφή Al που έγινε με την μηχανική μάσκα πάνω στην μικροδομημένη περιοχή.



Εικόνα 2.2: Ποιοτικό διάγραμμα EDS στο οποίο βλέπουμε τα στοιχεία των δειγμάτων. Βλέπουμε Si σε μεγαλύτερο ποσοστό και ακολουθούν το Zn, το O και σε μικρότερο ποσοστό το Al.



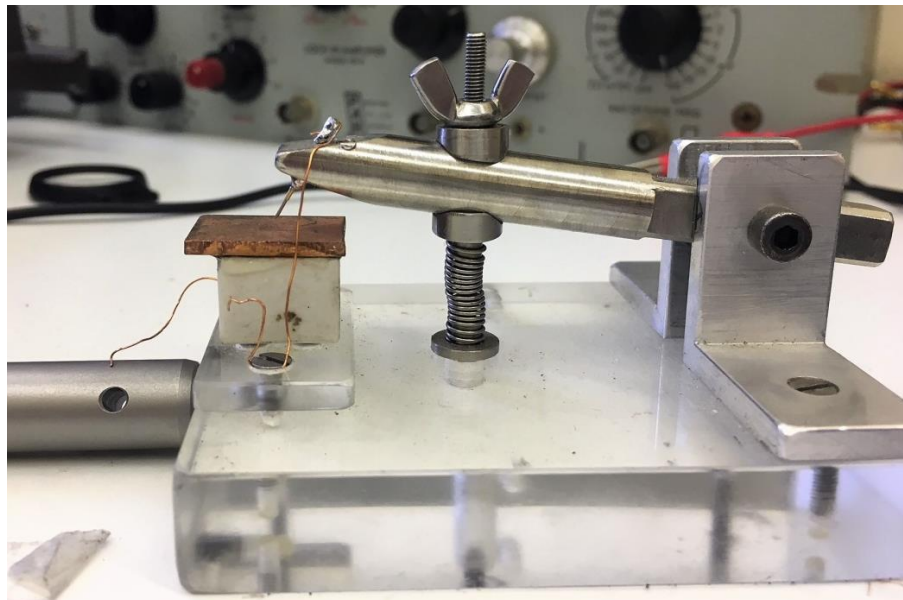
Εικόνα 2.3: Εικόνες EDS της μικροδομής και τα στοιχεία που περιέχει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ I-V

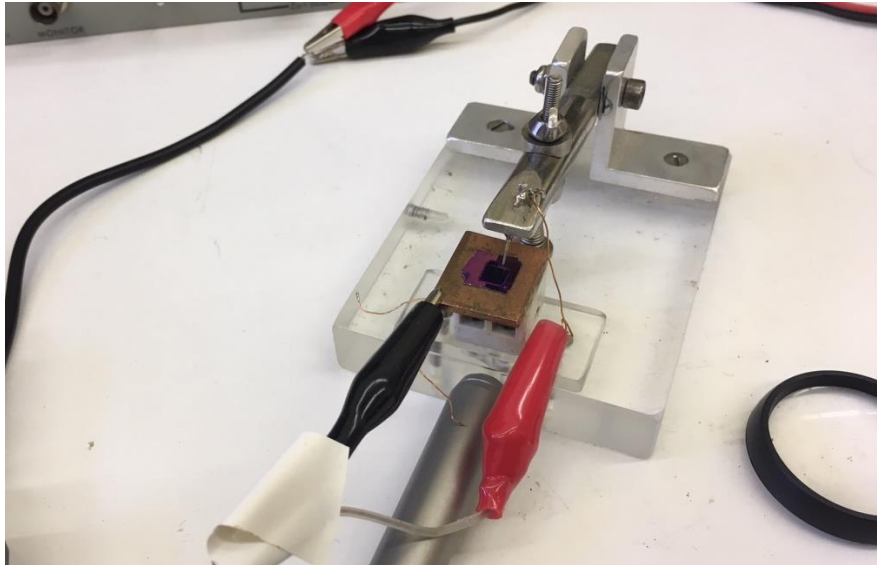
Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο, θα παρουσιάσουμε την πειραματική διάταξη και τη διαδικασία για την πραγματοποίηση μετρήσεων της έντασης I-V σε κατάσταση σκότους και υπό λευκό φωτισμό. Σκοπός είναι μέσα από τα αποτελέσματα να γίνει ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των ετεροεπαφών.

3.1. Πειραματική διάταξη

Για την πραγματοποίηση της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήσαμε κατάλληλα κατασκευασμένη βάση στην οποία τοποθετήθηκαν τα δείγματα. Η p- πλευρά των επαφών ακουμπάει σε μεταλλική βάση και οι επαφές αλουμινίου στην n-πλευρά των επαφών έρχονται σε επαφή με μια ακίδα. Έτσι επιτρέπεται η σύνδεση τους σε κύκλωμα, διαμέσου της βάσης (εικόνα 3.1).



Εικόνα 3.1: Η βάση στην οποία τοποθετείται το δείγμα και μέσω αυτής συνδέεται με το κύκλωμα. Η πάνω επαφή γίνεται μέσω της ακίδας.

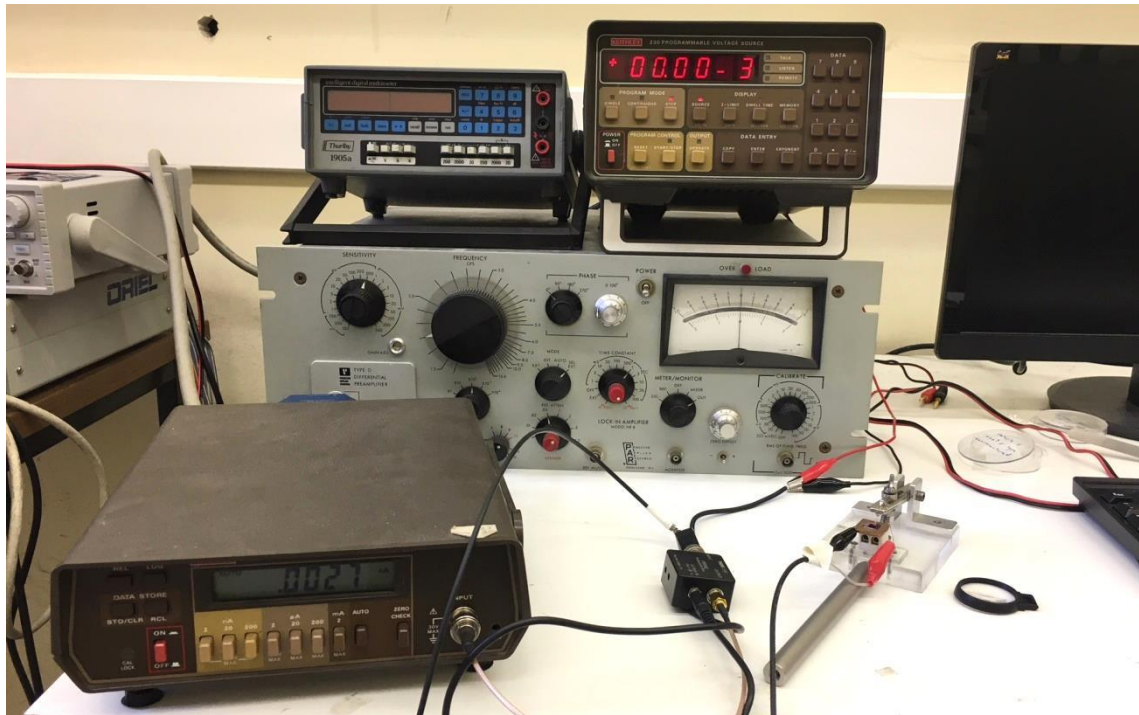


Εικόνα 3.2: Η διάταξη με το δείγμα σε σύνδεση.

Έπειτα, για να πραγματοποιηθεί το επιθυμητό κύκλωμα για τις μετρήσεις I-V, συνδέσαμε πηγή συνεχούς τάσης DC Keithley model 230 στους ακροδέκτες της επαφής. Επίσης, συνδέσαμε σε σειρά στο κύκλωμα αμπερόμετρο Keithley model 485.



Εικόνα 3.3: Αριστερά τροφοδοτικό τάσης Keithley model 230 και δεξιά αμπερόμετρο Keithley model 485.



Εικόνα 3.4: Ολοκληρωμένη διάταξη με αμπερόμετρο, τροφοδοτικό τάσης και βάση με τοποθετημένο το δείγμα.

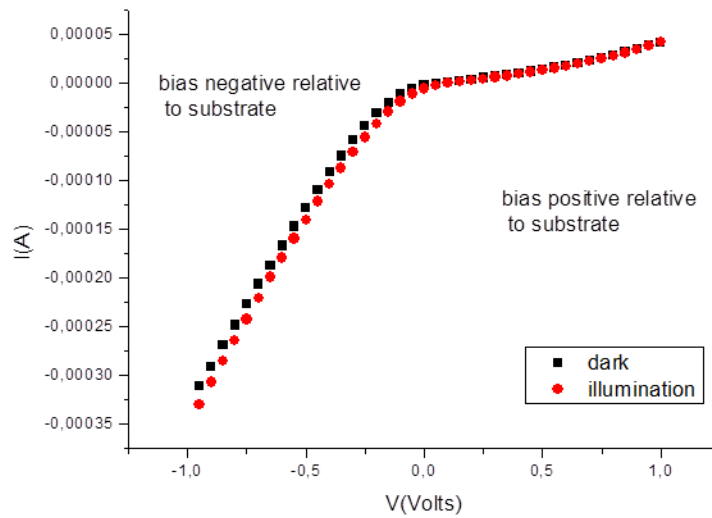
Για να δημιουργήσουμε συνθήκες σκότους χρησιμοποιήσαμε κάλυμμα με το οποίο καλύψαμε το δείγμα.

3.2. Πειραματική διαδικασία και ανάλυση των μετρήσεων

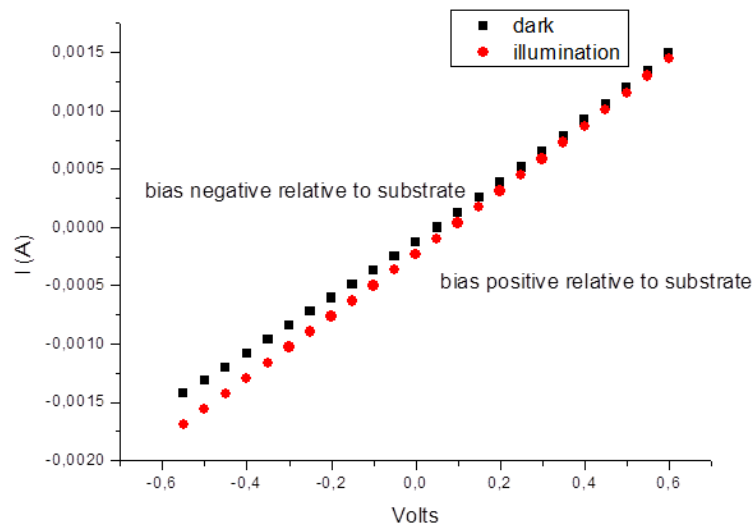
Αξίζει να αναφερθεί ότι κατά τη διαδικασία λήψης των μετρήσεων τα όργανα ήταν συνδεδεμένα με ηλεκτρονικό υπολογιστή και οι εντολές σε αυτά καθώς και η ρύθμιση των παραμέτρων δίνονται μέσω προγράμματος LabVIEW.

Για τις μετρήσεις I-V ορίσαμε εύρος τιμών της τάσης από -1V έως $+1\text{V}$ με βήμα V για το φλάτ δείγμα και από -0.6V έως $+0.6\text{V}$ με βήμα V για το μικροδομημένο δείγμα.

Από τις τιμές της έντασης του ρεύματος (I) που μετρήθηκαν κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα I-V.



Διάγραμμα 3.1: Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V της ετεροεπαφής n-ZnO/p-Si σε κατάσταση σκότους και υπό λευκό φωτισμό, όπως προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις.



Διάγραμμα 3.2: Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V της ετεροεπαφής n-ZnO/μικροδομημένου p-Si σε κατάσταση σκότους και υπό λευκό φωτισμό, όπως προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις.

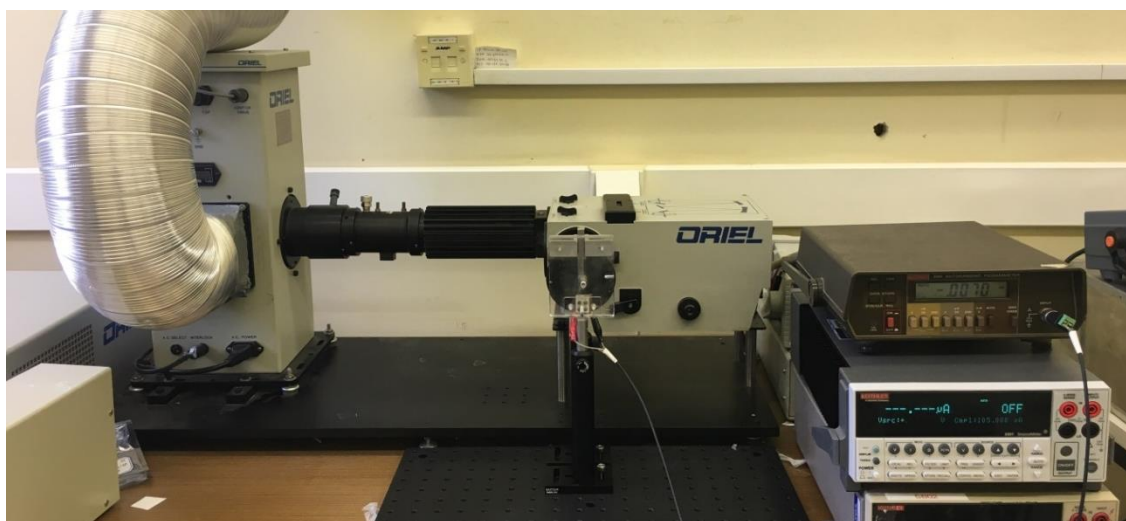
Από τα διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι το επίπεδο δείγμα παρουσιάζει ανορθωτική συμπεριφορά, ενώ το μικροδομημένο δείγμα μη ανορθωτική συμπεριφορά. Ωστόσο, είναι ξεκάθαρο ότι μπορούμε να μετρήσουμε φωτόρευμα κι αυτό θα το δούμε και στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΦΩΤΟΑΠΟΚΡΙΣΗΣ

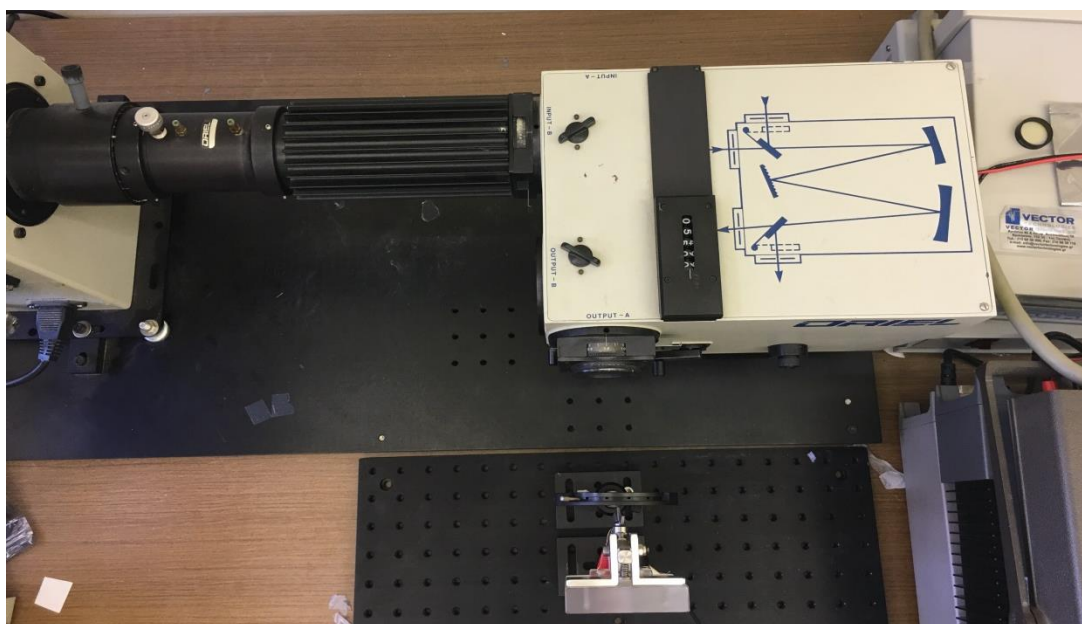
Σε αυτό το κεφάλαιο, γίνεται παρουσίαση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε και της διαδικασίας διεξαγωγής των μετρήσεων της φασματικής απόκρισης του φωτορεύματος των δύο δειγμάτων. Η απόκριση είναι ένας τρόπος ποσοτικοποίησης της ευαισθησίας μιας φωτοδιόδου και είναι η ποσότητα του φωτορεύματος που παράγεται ανά μονάδα ισχύος του προσπίπτοντος φωτός (μονάδες A/W). Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι να γίνει χαρακτηρισμός των δειγμάτων με απώτερο σκοπό τη χρήση τους για φωτοανίχνευση. Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία βασίστηκε στην αναφορά [24].

4.1. Πειραματική διάταξη

Για τη διεξαγωγή του πειράματος, χρησιμοποιήθηκε πικοαμπερόμετρο Keithley model 485 για την καταγραφή των μετρούμενων τιμών του φωτορεύματος. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν στην προαναφερθείσα βάση, η οποία συνδέθηκε κατάλληλα με το υπόλοιπο κύκλωμα. Ως πηγή φωτός χρησιμοποιήθηκε λάμπα Xenon κατάλληλη για τα μήκη κύματος που μας ενδιαφέρουν για το πείραμά μας. Ενώ για την φασματική ανάλυση της λάμπας χρησιμοποιήθηκε μονοχρωμάτορας Oriel. Για τις μετρήσεις της φασματικής απόκρισης του φωτορεύματος, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τη λάμπα Xe εισέρχεται στην είσοδο του μονοχρωμάτορα και η βάση με το δείγμα τοποθετείται σε ειδικό στήριγμα στην έξοδο του μονοχρωμάτορα.



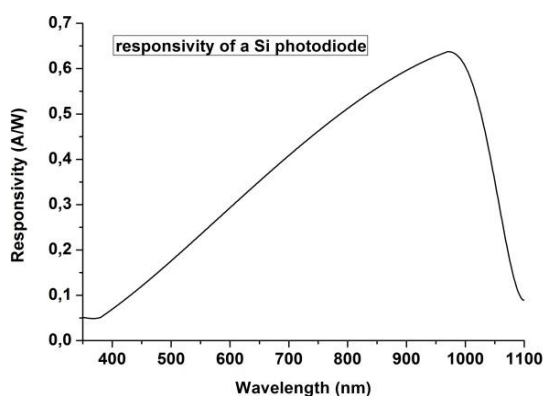
Εικόνα 4.1: Η πειραματική διάταξη με την λάμπα Xe, τον μονοχρωμάτορα Oriel, το πικοαμπερόμετρο και το στήριγμα με τη βάση για τα δείγματα στην έξοδο του μονοχρωμάτορα.



Εικόνα 4.2: Κάτοψη της διάταξης όπου φαίνεται πάνω στον μονοχρωμάτορα σχηματική αναπαράσταση της διαδρομής της ακτινοβολίας με το φράγμα περίθλασης (grating).

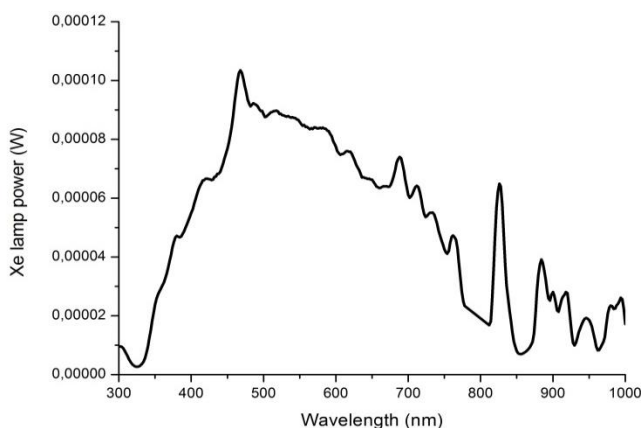
4.2. Πειραματική διαδικασία και ανάλυση μετρήσεων

Για την ανάλυση των δεδομένων που θα προκύψουν, θα χρειαστεί να εξαχθεί η πραγματική ισχύς της λάμπας. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήθηκε φωτοδιόδος πυριτίου (Si) η οποία τοποθετήθηκε μπροστά στην έξοδο του μονοχρωμάτορα. Η απόκριση της φωτοδιόδου ανά μήκος κύματος, είναι γνωστή και δίνεται από τον κατασκευαστή (διάγραμμα 4.1).



Διάγραμμα 4.1: Φωτοαπόκριση της φωτοδιόδου Si.

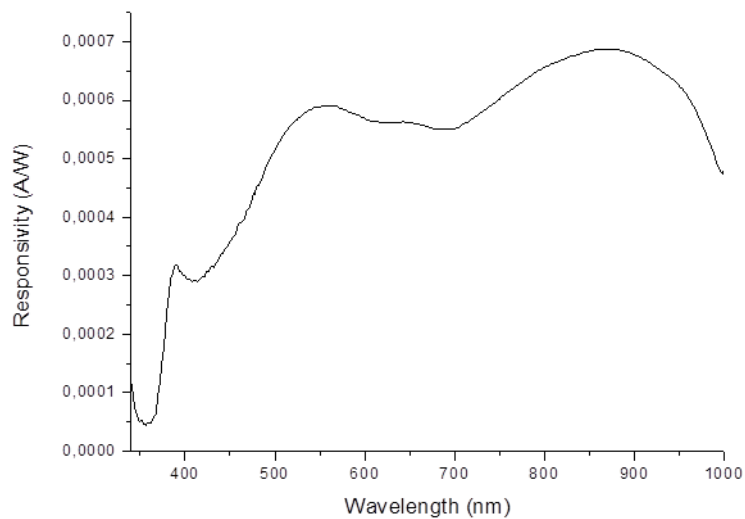
Στη λάμπα δώθηκε ονομαστική ισχύς 800mW και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις έντασης του ρεύματος ανά μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (A ανά nm). Έπειτα, αφαιρέθηκε η τιμή του ρεύματος της φωτοδιόδου υπό σκότος από τη μετρούμενη τιμή του ρεύματος υπό φως. Η τιμή που προέκυψε είναι η τιμή του φωτορεύματος για κάθε μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Προκειμένου να υπολογιστεί η ισχύς της προσπίπτουσας ακτινοβολίας για κάθε μήκος κύματος στην έξοδο του μονοχρωμάτορα διαιρέθηκε το μετρούμενο φωτόρευμα με την φασματική απόκριση της φωτοδιόδου. Η μορφή της φασματικής εξάρτησης της ισχύος στην έξοδο του μονοχρωμάτορα καθορίζεται από την απόκριση του μονοχρωμάτορα. Η διαδικασία αυτή έδωσε το παρακάτω διάγραμμα για την ισχύ της λάμπας στα μήκη κύματος στα οποία διεξήχθει το πείραμά μας (διάγραμμα 4.2).



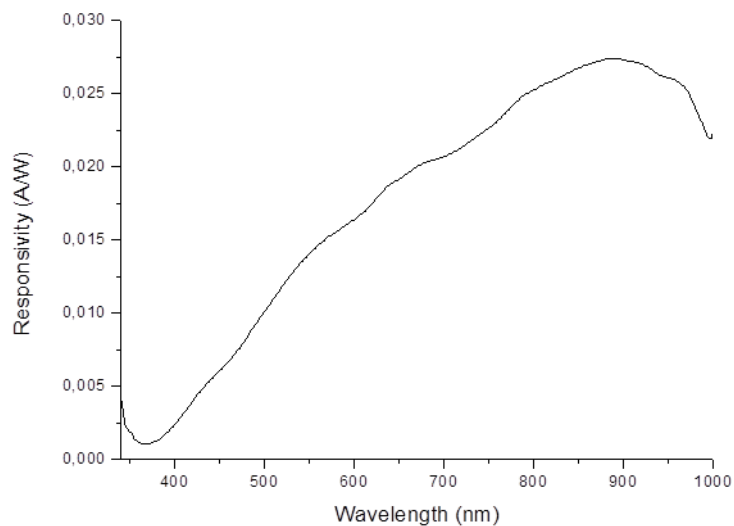
Διάγραμμα 4.2: Φάσμα φωτεινής ισχύος της λάμπας Xe.

Για τις μετρήσεις της φασματικής εξάρτησης του φωτορεύματος, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία που αναφέρθηκε και στην περίπτωση της φωτοδιόδου υπό τις ίδιες συνθήκες φωτισμού. Οι μετρήσεις αυτές (φωτόρευμα συναρτήσει του μήκους κύματος) πραγματοποιούνται και για τα δύο δείγματα. Η διάταξη πραγματοποιείται ακριβώς όπως και προηγουμένως με τα δείγματα να τοποθετούνται στη θέση που ήταν η φωτοδίοδος. Οι μετρήσεις για τις επαφές πραγματοποιήθηκαν σε μηδενική τάση.

Από τις μετρήσεις που συλλέχθηκαν, διαιρώντας τις τιμές του φωτορεύματος με αυτές της ισχύος της λάμπας για τα αντίστοιχα μήκη κύματος, κατασκευάστηκαν τα παρακάτω διαγράμματα (διαγρ. 4.3, 4.4) της φασματικής απόκρισης για κάθε μήκος κύματος.



Διάγραμμα 4.3: Η φασματική απόκριση της επαφής n-ZnO/p-Si.



Διάγραμμα 4.4: Η φασματική απόκριση της επαφής n-ZnO/p-μικροδομημένου Si.

Σύμφωνα με αναφορές, οι φωτοдиодοι n-ZnO/p-Si μπορούν να ανιχνεύσουν φωτόνια στην περιοχή UV στην περιοχή απογύμνωσης του n-ZnO και ταυτόχρονα να ανιχνεύσουν φωτόνια στο ορατό, στην περιοχή απογύμνωσης p-Si. Παρ' όλα αυτά, δείχνουν σχετικά ασθενή απόκριση κοντά στα 380 nm, που είναι το ενεργειακό χάσμα του ZnO. Περαιτέρω, διαπιστώθηκε ότι μια ενδιάμεση μεμβράνη οξειδίου του πυριτίου μπορεί να βελτιώσει την κβαντική απόδοση και την απόκριση μειώνοντας την πυκνότητα καταστάσεων της επιφάνειας και αυξάνοντας το φωτορεύμα^[1,25].

Στο διάγραμμα 4.3 βλέπουμε ότι η φωτοαπόκριση παρουσίασε τρεις διακριτές περιοχές περίπου στα 380 nm, 530 nm και 850 nm. Η περιοχή στα 380 nm αντιστοιχεί σε εξιτονικές μεταβάσεις από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας του ZnO. Η περιοχή με κορυφή στα 530 nm αφορά μεταβάσεις που σχετίζονται με ενεργειακές καταστάσεις εντός του ενεργειακού χάσματος του ZnO. Τέλος η περιοχή με κορυφή στα 850 nm αφορά μεταβάσεις που σχετίζονται με τις ενεργειακές καταστάσεις στις ενεργειακές ζώνες του Si ^[1]. Από την άλλη μεριά, στο διάγραμμα 4.4 που αντιστοιχεί στη φωτοαπόκριση του μικροδομημένου δείγματος, πέρα των αντίστοιχων φασματικών περιοχών που παρατηρούνται κι εδώ, παρατηρούμε επίσης σημαντική αύξηση της απόκρισης και συνεισφορά του Si, η οποία οφείλεται στην μορφή του μικροδομημένου υποστρώματος το οποίο έχει την ικανότητα να εκγλωβίζει το φώς.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα που αφορούν τα δείγματα, αλλά και την εφαρμογή τους σε οπτοηλεκτρονικές διατάξεις.

Μέσω της ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων που λάβαμε για την περίπτωση της ετεροδομής ZnO πάνω σε επίπεδο υπόστρωμα Si, επιβεβαιώσαμε την επιρροή των δύο ημιαγωγικών υλικών (Si και ZnO) από τις μετρήσεις της φασματικής απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίσαμε τρεις διακριτές περιοχές, στα 380 nm, 530 nm και 850 nm πράγμα που αποτελεί ένδειξη της συνεισφοράς του ZnO και του Si στις υπό μελέτη διατάξεις. Αυτό συνεπάγεται τη διεύρυνση της φασματικής περιοχής στην οποία λειτουργεί αποδοτικά η συγκεκριμένη ετεροεπαφή, σε σχέση με τη χρήση μιας ομοεπαφής πχ. πυριτίου. Επίσης το δείγμα έδειξε ανορθωτική συμπεριφορά διόδου, σύμφωνα με τις μετρήσεις της έντασης του ρεύματος συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης (I-V).

Από την άλλη μεριά, το δείγμα ZnO πάνω σε μικροδομημένο υπόστρωμα Si, παρ'όλο που έδειξε μη ανορθωτική συμπεριφορά σύμφωνα με τις μετρήσεις I-V, μπορέσαμε να μετρήσουμε φωτόρευμα. Από τις μετρήσεις φασματικής απόκρισης είναι ξεκάθαρο ότι μέσω της μικροδόμησης αυξήθηκε σημαντικά η φωτοαπόκριση ως αποτέλεσμα του αποτελεσματικού εγκλωβισμού του φωτός από τη μικροδομή πυριτίου και της αύξησης της ενεργού επιφάνειας της φωτοδιόδου. Τα αποτελέσματα αυτά είναι μεγάλης σημασίας για τη βελτίωση της απόδοσης και ευαισθησίας των φωτοανιχνευτών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Kewei Liu, Makoto Sakurai and Masakazu Aono, *Sensors* 10, 8604-8634 (2010).
2. C. Klingshirn, *Phys. Stat. Sol. B* 244 (9) (2007) 3027–3073.
3. E. G. Barbagiovanni, V. Strano, G. Franzò, and S. Mirabella, *Applied Physics Letters* 109, 143104 (2016).
4. R. Ghosh, D. Basak, *Appl. Phys. Lett.* 90 (24) (2007) 243106 (1–3).
5. James E. Carey III, *Femtosecond-laser microstructuring of silicon for novel optoelectronic devices*.
6. Z. Ghousheng, P. M. Fauchet, and A. E. Siegman, *Growth of spontaneous periodic surface structures on solids during laser illumination*, *Phys. Rev. B*, vol. 26, p. 5366, 1982.
7. H. M. van Driel, J. E. Sipe, and J. F. Young, *Laser-induced periodic surface structures on solids: a universal phenomenon*, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, p. 1955, 1982.
8. S. R. Foltyn, *Surface modification of materials by cumulative laser irradiation, in pulsed laser deposition of thin films* (D. B. Chrisey and G. K. Hubler, eds.), New York: Wiley-Interscience, 1994.
9. F. Sanchez, J. L. Morenza, R. Aguiar, J. C. Delgado, and M. Varela, *Whiskerlike structure growth on silicon exposed to ArF excimer laser irradiation*, *Appl. Phys. Lett.* vol. 69, p. 620, 1996.
10. W. Kautek and J. Kruger, *Femtosecond-pulse laser microstructuring of semiconducting materials*, in *Material Science Forum* (D. B. Chrisey and G. K. Hubler, eds.), vol. 173-174, p. 17, Switzerland: Trans Tech Publications Inc., 1995.
11. J. Pedraza, J. D. Fowlkes, and D. H. Lowndes, *Silicon microcolumn arrays grown by nanosecond laser irradiation*, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, p. 2322, 1999.
12. J. Pedraza, J. D. Fowlkes, S. Jesse, C. Mao, and D. H. Lowndes, *Surface microstructuring of silicon by excimer-laser irradiation in reactive atmospheres*, *Appl. Surf. Sci.*, vol. 168, p. 251, 2000.
13. J. D. Fowlkes, A. J. Pedraza, and D. H. Lowndes, *Microstructural evolution of laser exposed silicon targets in SF6 atmospheres*, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, p. 1629, 2000.
14. V. V. Voronov, S. I. Dolgaev, S. V. Lavrishchev, A. A. Lyalin, A. V. Simakin, and G. A. Shafeev, *Formation of conic microstructures upon pulsed laser evaporation of solids*, *Quantum Electron.*, vol. 30, p. 710, 2000.

15. S. I. Dolgaev, S. V. Lavrishev, A. A. Lyalin, A. V. Simakin, V. V. Voronov, and G. A. Shafeev, *Formation of conical microstructures upon laser evaporation of solids*, Appl. Phys. A, vol. 73, p. 177, 2001.
16. Jian Lv, Ting Zhang, Peng Zhang, Yingchun Zhao and Shibin Li, Review Application of Nanostructured Black Silicon, Lv et al. Nanoscale Research Letters (2018).
17. D. G. Georgiadou, M. Ulmeanu, M. Kompitsas, P. Argitis and M. Kandyla, Mater. Res. Express 1, 045902 (2014).
18. Donald A. Neamen, *Semiconductor physics & devices: Basic Principles*, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, 2012.
19. J. Nelson, *The Physics of Solar Cells*, Imperial College Press, London, 2004
20. S. M. Sze, *Semiconductor Devices, Physics and Technology*, Wiley, New York, 1985.
21. Saleh and M. Teich, *Fundamentals of Photonics*. New York: Wiley-Interscience, 1st ed., 1991.
22. N. W. Ashcroft and N. D. Mermin, *Solid State Physics*. New York: Saunders College Publishing, 1st ed., 1976.
23. Yariv, *Optical Electronics*. New York: Holt, Rinehart, and Winston, 3rd ed., 1985.
24. S. Gardelis, , A. G. Nassiopoulou, P. Manousiadis, N. Vouroutzis, and N. Frangis, Appl. Phys. Lett. 103, 241114 (2013).
25. L. C. Chen, N. C. Pan, *Photoresponsivity enhancement of ZnO/Si photodiodes through use of an ultrathin oxide interlayer*. Eur. Phys. J. Appl. Phys. 2008, 44, 43-46.