



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**« ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΕΤΕΡΟΔΙΟΔΩΝ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ
ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ ΣΕ N-ΤΥΠΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΓΙΑ
ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ »**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αχιλλέας Χ. Πεολίδης

Επιβλέπων : Μαρία Ι. Κάνδυλα
Κύρια Ερευνήτρια Ε.Ι.Ε

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**« ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΩΤΟΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΩΝ ΕΤΕΡΟΔΙΟΔΩΝ ΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ
ΨΕΥΔΑΡΓΥΡΟΥ ΣΕ N-ΤΥΠΟΥ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ ΓΙΑ
ΟΠΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ »**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αχιλλέας Χ. Πεολίδης

Επιβλέπων : Μαρία Ι. Κάνδυλα
Κύρια Ερευνήτρια Ε.Ι.Ε

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 29^η Φεβρουαρίου 2024.

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Γεώργιος Παναγόπουλος
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Μανώλης Χουρδάκης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

.....
Αχιλλέας Χ. Πεολίδης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αχιλλέας Πεολίδης, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μελέτη των οπτοηλεκτρονικών χαρακτηριστικών των φωτοανιχνευτικών διατάξεων $n^+ZnO/n-Si$ ($100^\circ C$, $150^\circ C$, $200^\circ C$). Ειδικότερα, ως συνέχεια προηγούμενης έρευνας στο φωτοανιχνευτή $n^+ZnO/n-Si$ $150^\circ C$ σκοπεύει στην διερεύνηση των ιδιοτήτων του σε τρεις νέες διατάξεις. Η πειραματική διαδικασία εκτελέστηκε στο εργαστήριο οπτοηλεκτρονικής του Ινστιτούτου Θεωρητικής και Φυσικής Χημείας (ΙΘΦΧ) του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών (ΕΙΕ) υπό την καθοδήγηση της Δρ. Μαρίας Κάνδυλα. Η εργασία ξεκινά με ανασκόπηση χρήσιμων γνωστικών πεδίων για την κατανόηση των λειτουργικών χαρακτηριστικών των διατάξεων, έπειτα αναλύονται οι διαδικασίες δόμησης και χαρακτηρισμού των φωτοανιχνευτών και τέλος παρουσιάζονται τα πειραματικά δεδομένα και τα τελικά συμπεράσματα.

Κίνητρο της μελέτης αποτελεί η ανάγκη ανάπτυξης φωτοανιχνευτών που συνδυάζουν την ικανότητα ευρυζωνικής φωτοανίχνευσης στο φάσμα υπεριώδους (UV) - ορατής (Vis) - υπέρυθρης (IR) ακτινοβολίας με τη δυνατότητα επιλεκτικής ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας. Επιπρόσθετος στόχος είναι η δόμηση τους με οικονομικά υλικά και μεθόδους και η λειτουργία τους χωρίς εξωτερική τροφοδοσία. Πράγματι, οι ιδιότητες της ευρυζωνικής, επιλεκτικής και αυτόνομης φωτοανίχνευσης βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών ενώ οι φωτοανιχνευτές ημιαγωγών πρωτοστατούν τεχνολογικά. Μεταξύ αυτών ξεχωρίζουν οι διατάξεις επαφών p-n καθώς επωφελούνται από το ενδογενές ηλεκτρικό τους πεδίο. Ιδιαίτερη κατηγορία ανιχνευτών ημιαγωγίων υλικών αποτελούν και οι προς εξέταση διατάξεις. Τέλος, το οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) και το πυρίτιο (Si) συνδυάζουν απορρόφηση στο υπεριώδες, ορατό και υπέρυθρο ενώ βρίσκονται σε αφθονία.

Λεπτά υμένια ZnO εναποτέθηκαν σε υπόστρωμα Si με ατομική εναπόθεση και σε τρεις θερμοκρασίες θαλάμου ($100^\circ C$, $150^\circ C$, $200^\circ C$). Επιπλέον, ZnO εναποτέθηκε σε εργαστηριακό γυαλί ($n^+ZnO/Glass$). Κατόπιν, μεταλλικές επαφές προστέθηκαν με θερμική εξάχνωση. Για τον χαρακτηρισμό του ZnO προσδιορίστηκαν το ενεργειακό του διάκενο και η ειδική του αγωγιμότητα. Έπειτα, μελετήθηκε η ηλεκτρική και η χρονική απόκριση των διατάξεων κατά την ακτινοβόλησή τους με πληθώρα φωτεινών πηγών.

Οι μετρήσεις ρεύματος και τάσης φανέρωσαν τον ανορθωτικό χαρακτήρα της I-V καμπύλης των διατάξεων. Ταυτοχρόνως, έδειξαν την ύπαρξη θετικού φωτορεύματος στην μηδενική και στην ορθή πόλωση κατά την ακτινοβόληση με υπέρυθρη ακτινοβολία. Επιπλέον, οι αντίστοιχες ημιλογαριθμικές καμπύλες φανερώνουν την αλλαγή πολικότητας του φωτορεύματος στη μηδενική πόλωση. Κατ' επέκταση, οι μετρήσεις φωτοτάσης - χρόνου με παλμική ακτινοβολία απέδειξαν την ικανότητα ανίχνευσης παλμοσειρών συχνότητας 4Hz-1kHz. Οι χρόνοι ανόδου και καθόδου των παλμών διερευνήθηκαν επίσης. Συμπερασματικά, μελετήθηκαν και συγκρίθηκαν οι οπτοηλεκτρονικές ιδιότητες των τριών διατάξεων και αξιολογήθηκαν ως προς την εν δυνάμει εφαρμογή τους για φωτοανίχνευση.

Λέξεις κλειδιά

Φωτοανιχνευτής, ZnO, Si, Ευρυζωνική / Φασματό-επιλεκτική / Αυτόνομη φωτοανίχνευση, Ατομική εναπόθεση, Φωτοδίοδος p - n, Επαφή $n^+ - n$, Laser, Οπτοηλεκτρονικός χαρακτηρισμός, Χρονική απόκριση, Φωτοαγωγιμότητα.

Abstract

This thesis aims at investigating the optoelectronic behavior of n^+ -ZnO/n-Si (100°C, 150°C, 200°C) photodetectors. Specifically, based on previous work on the broadband wavelength-selective isotype heterojunction n^+ -ZnO/n-Si photodetector, it extends the research on three new devices. The experimental procedures took place in the optoelectronics laboratory of the Theoretical and Physical Chemistry Institute (TPCI) of the National Hellenic Research Foundation (NHRF) under the supervision of Dr. Maria Kandyla. Furthermore, the thesis begins with a review of the knowledge fields useful in understanding the mechanisms of the devices. In the second part, the development and the characterization procedures of the photodetectors are discussed and in the last chapter, the collected data is presented, and conclusions are drawn.

The motive for studying n^+ -ZnO/n-Si devices is the ever-growing need for dual-function photodetectors, i.e., combining broadband photodetection capability in the ultraviolet (UV) - visible (Vis) - infrared (IR) spectrum with the ability to selectively detect infrared radiation. Additional objectives are fabricating the devices with inexpensive materials and methods and testing their ability to operate without an external power supply. Indeed, the properties of broadband, selective and autonomous photodetection find numerous applications and semiconductor photodetectors lead the way. Among them, devices that make use of the p-n junction stand out as their photodetection capabilities benefit from their intrinsic electric field. Moreover, n^+ -ZnO/n-Si devices are a unique category of semiconductor photodetectors since they operate as majority carrier devices. Finally, the combination of zinc oxide (ZnO) and silicon (Si) is ideal for detecting ultraviolet, visible, and infrared photons and both materials are abundant.

Zinc oxide thin films were deposited on Si substrate by atomic layer deposition at three distinct chamber temperatures (100°C, 150°C, 200°C). Correspondingly, ZnO was deposited on laboratory glass samples (n^+ -ZnO/Glass). Then, metal contacts were fabricated on all samples. Characterization of ZnO revealed its energy band gap and conductivity. In addition, the optoelectronic response, and the time response of the n^+ -ZnO/n-Si devices were studied upon irradiation with a variety of light sources.

The current and voltage measurements revealed the rectifying behavior of the I-V curve of the devices. At the same time, they confirmed the positive photocurrent values when the device is illuminated with IR radiation while zero or forward biased. Moreover, the corresponding semi-logarithmic curves revealed the polarity flipping of the photocurrent during the zero-bias condition. Moving on, transient photovoltage measurements during pulsed light illumination demonstrated their ability to detect pulses of frequencies from 4Hz to 1kHz. Finally, the rise/fall times of the pulses were studied too. In conclusion, the optoelectronic properties of the three devices were investigated and evaluated in terms of their potential applications in photodetection.

Key words

Photodetector, ZnO, Si, Broadband / Spectrum-selective / Autonomous photodetection, Atomic layer deposition, $p - n$ photodiode, $n^+ - n$ isotype heterojunction, Laser, Optoelectronic characterization, Transient response, Photoconductivity

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους όσους συντέλεσαν στην διεκπεραίωση της. Ξεκινώντας, οφείλω να ευχαριστήσω την Δρ. Μαρία Κάνδυλα για την ευκαιρία εκπόνησης της πτυχιακής εργασίας στο εργαστήριο οπτοηλεκτρονικής του Εθνικού Ιδρύματος Ερευνών (Ε.Ι.Ε) καθώς και για την συνεχόμενη καθοδήγηση κατά την παραμονή μου εκεί. Η ολοκλήρωση της εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς τις θεωρητικές γνώσεις και την πειραματική εμπειρία που με μεγάλη υπομονή μου μεταλαμπαδεύσε. Κατόπιν, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή της σχολής ΗΜΜΥ του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (Ε.Μ.Π), Ευάγγελο Χριστοφόρου, για την σύμφωνη απόφαση του στην διεκπεραίωση της πτυχιακής εργασίας στο Ε.Ι.Ε και την συνεχή υποστήριξη του.

Στη συνέχεια, ευχαριστώ εγκάρδια τον συνεργάτη μου καθ' όλη την πειραματική διαδικασία Μιχάλη Τσανάκα, ο οποίος βάση της προηγούμενης εργαστηριακής του εμπειρίας καθώς και με πολύ επιμονή και υπομονή επιμελήθηκε την σωστή διεκπεραίωση των πειραμάτων όπως και την ορθή συλλογή και ανάλυση των αποτελεσμάτων. Κατ' επέκταση, μεγάλη ήταν και η συνεισφορά του υπόλοιπων ερευνητών τόσο στο εργαστήριο της Δρ. Κάνδυλας όσο και στα παραπλήσια εργαστήρια που με μεγάλη χαρά και διάθεση προσέφεραν τις γνώσεις και τις ικανότητες τους όταν χρειάστηκαν.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον ερευνητή Δρ. Γιώργο Μούσδη (Ε.Ι.Ε.) για την βοήθειά του στις μετρήσεις φασματοσκοπίας υπεριώδους-ορατού-εγγύς υπέρυθρου (UV-VIS-NIR spectroscopy), στον ερευνητή Δρ. Δημήτρη Παλλέ (Ε.Ι.Ε) για την βοήθεια του στις μετρήσεις φασματοσκοπίας Raman (Raman spectroscopy), στην μεταδιδακτορική ερευνήτρια Νάγια Ταγιάρα (Ε.Ι.Ε) για την πραγματοποίηση της ανόπτησης των διατάξεων μας, στον διδακτορικό φοιτητή Θεόδωρο Γιαννάκη (Ε.Ι.Ε) για την καθοδήγηση του στη χρήση και ευθυγράμμιση του laser υπέρυθρης ακτινοβολίας όπως και στην διδακτορική φοιτήτρια Αλεξάνδρα Σινάνη (Ε.Ι.Ε) για τις οδηγίες της στη χρήση του chopper.

Τέλος, στέλνω πολλές ευχαριστίες στην οικογένεια μου και στου φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου καθ' όλη την διάρκεια ολοκλήρωσης αυτού του εγχειρήματος.

Αχιλλέας Πεολίδης

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Λέξεις κλειδιά	5
Abstract	7
Key words	7
Ευχαριστίες	9
Περιεχόμενα	11
Θεωρητικό Υπόβαθρο	14
Εισαγωγή	14
Είδη φωτοανιχνευτών	15
Φωτοανίχνευση ευρέως φάσματος, φασματο-επιλεκτική φωτοανίχνευση βάση του μήκους κύματος και φωτοανίχνευση χωρίς εξωτερική τροφοδοσία	17
Το οξείδιο του ψευδαργύρου και το πυρίτιο ως δομικοί λίθοι των σύγχρονων φωτοανιχνευτών	18
Αρχές λειτουργίας της διάταξης $n + \text{-ZnO/n-Si}$	21
Η ετεροεπαφή $p - n$	21
Η φωτοδίοδος $p - n$	24
Η ετεροεπαφή $n + -n$	25
Ο φωτοανιχνευτής $n + \text{-ZnO/n-Si}$	25
Παρόμοιες διατάξεις	31
Ο φωτοανιχνευτής $n\text{-ZnO/p-μικροδομημένο Si}$	31
Ο φωτοανιχνευτής $p\text{-SnS/p-Si}$	33
Μέθοδοι και Διατάξεις	35
Οι διατάξεις $n + \text{ZnO/n-Si}$ (100°C , 150°C , 200°C) και $n + \text{ZnO/Glass}$ (100°C , 150°C , 200°C)	35
Δημιουργία ηλεκτρικών επαφών	36
Θερμική Εξάχνωση	36
Η τεχνική της θερμικής εξάχνωσης	36
Ο θερμικός εξαχνωτής Edwards Coating System E306A	37
Επιλογή των υλικών προς εξάχνωση και των αντίστοιχων φορέων	39
Κατασκευή μασκών	39
Λουτρό υπερήχων	40
Προετοιμασία του θερμικού εξαχνωτή	41
Εναπόθεση επαφών	42
Απενεργοποίηση του θερμικού εξαχνωτή	43

Ανόπτηση	44
Η τεχνική της ανόπτησης	44
Ανόπτηση των δειγμάτων $n + \text{-ZnO/n-Si}$ και $n + \text{-ZnO/Glass}$	45
Χαρακτηρισμός του οξειδίου του ψευδαργύρου	45
Οπτικός χαρακτηρισμός	46
Φασματοφωτομετρία υπεριώδους-ορατού-εγγύς υπέρυθρου (UV-vis-NIR spectrophotometry) ...	46
Μέθοδος Tauc Plot	46
Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός	47
Προσκόλληση ηλεκτροδίων χαλκού	47
Μέθοδος Van der Pauw	47
Οπτοηλεκτρονικός χαρακτηρισμός των φωτοανιχνευτών $n + \text{-ZnO/n-Si}$	49
Εισαγωγή.....	49
Πειραματική διάταξη	49
Χώρος κατασκευής και ηλεκτρικές συνδέσεις.....	49
Μετρητικά όργανα και πειραματικές συνθήκες.....	51
Ακτινοβολήση με μονοχρωματικές πηγές.....	51
Ακτινοβολήση με υπέρυθρη ακτινοβολία.....	52
Λογισμικά συλλογής και επεξεργασίας των μετρήσεων.....	53
Πειραματική διαδικασία	53
Μελέτη της χρονικής απόκρισης των φωτοανιχνευτών $n + \text{-ZnO/n-Si}$	55
Εισαγωγή.....	55
Πειραματική διάταξη	55
Μετατροπή της συνεχούς ακτινοβολίας σε παλμική	55
Μετρητικά όργανα	56
Πειραματική διαδικασία	57
Φασματοσκοπία Raman	58
Η τεχνική της φασματοσκοπίας Raman	58
Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του φασματογράφου.....	59
Φασματοσκοπία Raman στα δείγματα $n + \text{-ZnO/Glass 150}^{\circ}\text{C}$	60
Αποτελέσματα.....	60
Αποτελέσματα οπτικού χαρακτηρισμού	60
Αποτελέσματα ηλεκτρικού χαρακτηρισμού	62
Αποτελέσματα φασματοσκοπίας Raman	63

Αποτελέσματα οπτοηλεκτρικού χαρακτηρισμού.....	64
Ποιοτική ανάλυση αποτελεσμάτων	67
Ποσοτική ανάλυση αποτελεσμάτων	69
Συμπεράσματα οπτοηλεκτρονικού χαρακτηρισμού.....	70
Αποτελέσματα μελέτης χρονικής απόκρισης.....	71
Μελέτη χρονικής απόκρισης της διάταξης $n + \text{ZnO}/n\text{-Si}$ 100°C.....	71
Μελέτη χρονικής απόκρισης της διάταξης $n + \text{ZnO}/n\text{-Si}$ 150°C.....	73
Μελέτη χρονικής απόκρισης της διάταξης $n + \text{ZnO}/n\text{-Si}$ 200°C.....	74
Σχολιασμός αποτελεσμάτων	75
Μελέτη χρόνων ανόδου και καθόδου των παλμών.....	76
Χρόνοι ανόδου-καθόδου συναρτήσει της συχνότητας παλμικής ακτινοβολίας	76
Σχολιασμός αποτελεσμάτων	77
Χρόνοι ανόδου-καθόδου συναρτήσει του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.....	78
Σχολιασμός αποτελεσμάτων	79
Τελικά συμπεράσματα.....	79
Βιβλιογραφία	81

Θεωρητικό Υπόβαθρο

Εισαγωγή

Τα σύγχρονα συστήματα τηλεπικοινωνιών, τα βιομηχανικά ηλεκτρονικά, τα εργαλεία και οι συσκευές ανάλυσης και χαρακτηρισμού, οι ιατρικές και υγειονομικές τεχνολογίες, οι οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές τεχνητής νοημοσύνης και μηχανικής μάθησης, η αυτοκινητοβιομηχανία και τα μέσα μαζικής μεταφοράς χρησιμοποιούν ευρέως φωτοανιχνευτές ή αλλιώς φωτοαισθητήρες για την μετατροπή οπτικών σημάτων σε χρήσιμα ηλεκτρικά σήματα. Τέτοιες συσκευές έχουν την ικανότητα να ανιχνεύουν οπτικούς παλμούς, φως και ακτινοβολία στο ευρύτερο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, ποικίλουν σε τρόπο λειτουργίας και κατασκευής, σε μέγεθος και σε κόστος και επιδεικνύουν ένα πλήθος διαφορετικών ιδιοτήτων και χαρακτηριστικών ανάλογα με την εφαρμογή τους [1].

Στην παρούσα εργασία γίνεται μελέτη τριών ημιαγωγικών φωτοανιχνευτικών διατάξεων που έχουν την μορφή της ισοτυπικής ετεροεπαφής n^+ -ZnO/n-Si. Η μεταξύ τους διαφορά έγκειται στην διαφορετική συγκέντρωση φορέων πλειονότητας η οποία είναι αποτέλεσμα της εναπόθεσης του οξειδίου του ψευδαργύρου (ZnO) πάνω στο υπόστρωμα πυριτίου (Si) σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες: 100°C, 150°C και 200°C. Συνεχίζοντας, στόχος της εργασίας αποτέλεσε πρώτον η επαλήθευση των λειτουργικών ιδιοτήτων των διατάξεων, όπως αυτές προκύπτουν από προηγούμενη μελέτη, και κατά δεύτερον η περαιτέρω μελέτη και σύγκριση των οπτοηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών και των χρονικών τους αποκρίσεων. Για να επιτευχθεί αυτό έγινε κατασκευή εξειδικευμένης πειραματικής διάταξης, χρήση κατάλληλου εργαστηριακού εξοπλισμού και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Κατ' επέκταση, η εργασία χωρίζεται σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται μια θεωρητική ανασκόπηση χρήσιμων γνωσιακών πεδίων για την κατανόηση της δομής, των ιδιοτήτων και των λειτουργικών χαρακτηριστικών των εν λόγω διατάξεων αλλά και παρόμοιων συσκευών. Η ίδια περιλαμβάνει αναφορά στα γενικότερα είδη των φωτοανιχνευτών, επεξήγηση των ιδιοτήτων που φέρουν οι προς εξέταση φωτοανιχνευτές n^+ -ZnO/n-Si, περιγραφή των δομικών τους υλικών και των αρχών λειτουργίας τους και αναφορά σε παρόμοιες διατάξεις. Συνεχίζοντας, στο δεύτερο μέρος, αναλύονται οι πειραματικές διαδικασίες για τον οπτικό και ηλεκτρικό χαρακτηρισμό του οξειδίου του ψευδαργύρου, για την δόμηση των φωτοανιχνευτών και για την διερεύνηση της οπτοηλεκτρονικής τους συμπεριφοράς και της χρονικής τους απόκρισης. Τέλος, στο τρίτο μέρος

της εργασίας παρουσιάζονται και σχολιάζονται συνολικά όλα τα πειραματικά δεδομένα, γίνεται σύγκριση των τριών διατάξεων και παραθέτονται τα τελικά συμπεράσματα.

Είδη φωτοανιχνευτών

Η πρώτη κατηγορία φωτοανιχνευτών που συναντάμε βασίζει την λειτουργία της στο φαινόμενο της φωτοαγωγής (photoconduction). Συγκεκριμένα, κατά τον 19ο αιώνα, ανακαλύφθηκε ότι ορισμένα υλικά, όπως το σελήνιο και το θείο, παρουσίαζαν αλλαγές στην ηλεκτρική τους αγωγιμότητα όταν εκτίθεντο στο φως. Έτσι, προέκυψε μια κατηγορία φωτοανιχνευτών ημιαγωγικών διατάξεων που μεταβάλλουν την αγωγιμότητα τους αναλόγως της ακτινοβολίας που δέχονται. Η μεταβολή οφείλεται στην διέγερση ατόμων του υλικού λόγω απορρόφησης προσπιπτόντων φωτονίων με ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση του ενεργειακού του χάσματος και συνεπώς στη δημιουργία ζευγών ελεύθερων ηλεκτρονίων-οπών. Κατόπιν, αυτοί οι φορείς συλλέγονται από ένα κλειστό κύκλωμα και η κίνηση τους ονομάζεται φωτόρρευμα (photocurrent). Το παραγόμενο φωτόρρευμα προστεθείτε στο ρεύμα πόλωσης της διάταξης και έτσι η αγωγιμότητας της αυξάνεται [2][3]. Οι φωτοανιχνευτές αυτής της κατηγορίας αποτελούνται συνήθως από ένα απλό στρώμα ημιαγωγού και δύο ωμικές επαφές για την εφαρμογή της πόλωσης και την καθοδήγηση των ελεύθερων φορέων. Εντέλει το παραγόμενο ηλεκτρικό σήμα υποδηλώνει ανίχνευση φωτός.

Η δεύτερη κατηγορία φωτοανιχνευτών που συναντάμε δομείται και πάλι από ημιαγωγούς αλλά βασίζεται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο (photovoltaic). Σαφέστερα, αυτή η κατηγορία φωτοανιχνευτών εκμεταλλεύεται το ενδογενές ηλεκτρικό πεδίο μίας επαφής p-n (επαφή ημιαγωγού με ημιαγωγό) ή μιας επαφής τύπου Schottky (επαφή μετάλλου με ημιαγωγό) για την καθοδήγηση και συλλογή και πάλι ελεύθερων φορέων. Σε αυτό το σημείο έγκειται και η διαφορά της σε σχέση με την προηγούμενη κατηγορία όπου για την καθοδήγηση των φορέων ήταν επιτακτική η ύπαρξη εξωτερικής πόλωσης. Στη συνέχεια, το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο αποτελεί αποτέλεσμα της κίνησης φορέων μεταξύ των περιοχών p και n ώστε να επέλθει ισορροπία και οριοθετεί μια ηλεκτρικά φορτισμένη περιοχή στην διεπιφάνεια μεταξύ των δύο υλικών. Κατ' επέκταση, κατά την ακτινοβολή της διάταξης, τα ζεύγη ηλεκτρονίων και οπών που θα δημιουργηθούν εντός αυτής της περιοχής θα οδηγηθούν από το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο δημιουργώντας φωτόρρευμα.

Τρίτον, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (ή φαινόμενο φωτοεκπομπής) αξιοποιήθηκε επίσης για την κατασκευή φωτοανιχνευτών. Σαφέστερα, στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, που διερευνήθηκε από τους Heinrich Hertz, Albert Einstein και Robert A. Millikan, αποκάλυψε πως φωτόνια συγκεκριμένης ενέργειας είναι ικανά να απελευθερώσουν ηλεκτρόνια από τη ζώνη αγωγιμότητας ορισμένων υλικών υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Η διαφορά του φαινομένου σε σύγκριση με το φαινόμενο της φωτοαγωγής και το φωτοβολταϊκό φαινόμενο είναι πως τα ηλεκτρόνια δεν μεταπηδούν απλά σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες εντός του υλικού αλλά αποσχίζονται εντελώς από αυτό. Σε αυτή την κατηγορία υπάγονται οι ανιχνευτές ιονισμού αερίων (gaseous ionization detectors), οι οποίοι ανιχνεύουν την ροή ρεύματος λόγω των ηλεκτρονίων και των ιόντων που παράγονται από τον ιονισμό ενός αερίου, οι φωτοπολλαπλασιαστικοί σωλήνες (photomultiplier tubes) ή φωτοσωλήνες (phototubes), που περιέχουν μια φωτοκάθοδο η οποία εκπέμπει ηλεκτρόνια όταν φωτίζεται και οι ανιχνευτές πλάκας μικροκαναλιού (microchannel plate detectors) που χρησιμοποιούν ένα πορώδες γυάλινο υπόστρωμα ως μηχανισμό πολλαπλασιασμού των ηλεκτρονίων [4].

Τέταρτον, φωτοανιχνευτές που εκμεταλλεύονται το θερμικό φαινόμενο μπορούν να ανιχνεύσουν μια μετρήσιμη αλλαγή στη θερμοκρασία κατά την ακτινοβολήση ενός υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με συνδυασμό δύο διαφορετικών υλικών (μετάλλων, ημιαγωγών ή αμετάλλων) που σχηματίζουν ένα θερμοστοιχείο. Βάση του θερμικού φαινομένου, όταν τα δύο υλικά βρεθούν σε διαφορετικές θερμοκρασίες, ροή ηλεκτρικού ρεύματος εμφανίζεται στο κλειστό κύκλωμα. Εδώ εντάσσονται τα βολόμετρα (bolometers), οι κρυογονικοί ανιχνευτές, οι πυροηλεκτρικοί ανιχνευτές, οι θερμοπυλώνες και τα κύτταρα Golay.

Μια ακόμα κατηγορία φωτοανιχνευτών στηρίζεται στο φαινόμενο της πόλωσης, βάση του οποίου τα φωτόνια είναι ικανά να προκαλέσουν αλλαγές στις καταστάσεις πόλωσης συγκεκριμένων υλικών. Αντιστοίχως, αυτοί οι ανιχνευτές μετρούν τις αλλαγές στην πόλωση χρησιμοποιώντας οπτικά ανισότροπα υλικά και βρίσκουν εφαρμογή συνήθως στην πολωσιμετρία [5].

Έπειτα, η κατηγορία των φωτοχημικών ανιχνευτών λειτουργεί ανιχνεύοντας τις χημικές αλλαγές που προκαλούν τα φωτόνια όταν προσπίπτουν πάνω σε συγκεκριμένο υλικό, δημιουργώντας ένα ανιχνεύσιμο σήμα. Παράδειγμα εδώ αποτελούν οι φωτογραφικές πλάκες

όπου κατά την ακτινοβόληση τους πραγματοποιείται η διάσπαση ενός μορίου αλογονιδίου του αργύρου σε ένα άτομο μεταλλικού αργύρου και ένα άτομο αλογόνου [6].

Φωτοανίχνευση ευρέως φάσματος, φασματο-επιλεκτική φωτοανίχνευση βάση του μήκους κύματος και φωτοανίχνευση χωρίς εξωτερική τροφοδοσία

Οι φωτοανιχνευτές μπορούν να διακριθούν σε ευρυζωνικούς ανιχνευτές (broadband detectors) και σε στενής-ζώνης (narrow-band detectors) ή αλλιώς φασματο-επιλεκτικούς ανιχνευτές βάση του μήκους κύματος (wavelength selective detectors) [7]. Η ικανότητα ευρυζωνικής ανίχνευσης, αναφέρεται στην ιδιότητα του φωτοανιχνευτή να ανιχνεύει αποτελεσματικά ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε ένα ευρύ φάσμα μηκών κύματος, ιδίως από το υπεριώδες (Ultra Violet -UV) έως το υπέρυθρο (Infrared -IR). Η ίδια βρίσκει πολλές ιατρικές εφαρμογές αλλά και ιδιαίτερη χρησιμότητα στα συστήματα βιντεοσκόπησης, στις τεχνολογίες οπτικών επικοινωνιών και στην πολιτική μηχανική. Γενικώς, οι εμπορικοί ευρυζωνικοί φωτοανιχνευτές πυριτίου παρουσιάζουν σχετικά ευρύ φάσμα απόκρισης σε μήκος κύματος από 400-1100 nm, ωστόσο συνήθως υποφέρουν από χαμηλή ανιχνευσιμότητα, ιδίως στην περιοχή της υπεριώδους ακτινοβολίας (UV) [8].

Από την άλλη, η επιλεκτική φωτοανίχνευση αναφέρεται στην ικανότητα ενός φωτοανιχνευτή να ανιχνεύει και να ανταποκρίνεται σε ακτινοβολία ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος ή μιας ζώνης μηκών κύματος εντός του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και αποκτά ένα ολοένα και ευρύτερο φάσμα εφαρμογών τα τελευταία χρόνια. Συγκεκριμένα, η ανίχνευση υπέρυθρης ακτινοβολίας έχει βρει μεγάλο αριθμό εφαρμογών στους κλάδους των στρατιωτικών τεχνολογιών, της πολιτικής προστασίας και της ιατρικής περίθαλψης όπως σε συστήματα ασφαλείας, επιτήρησης, νυχτερινής οράσεως, συναγερμού πυρκαγιών, εξατομικευμένης παρακολούθησης της υγείας ασθενών, βιο-αισθητήρων και όρασης υπολογιστών. Συνήθως, επιλεκτικοί φωτοανιχνευτές κατασκευάζονται με τη χρήση ευρυζωνικών ανιχνευτών σε συνδυασμό με οπτικά φίλτρα. Ωστόσο, επιλεκτική φωτοανίχνευση χωρίς την χρήση φίλτρων έχει επιτευχθεί με χρήση οργανοχαλιδίων (organohalides), οργανικών υλικών, HgSe και PbS κβαντικών τελειών (quantum dots), GaN/InGaN κβαντικών πηγαδιών (quantum wells), συστοιχιών νανοαγωγών (nanowire arrays), πλεγμάτων απορρόφησης συντονισμού (resonant absorption gratings) και με εναπόθεση ημιαγωγών με μεγάλο ενεργειακό χάσμα πάνω σε κατάλληλο ενεργό στρώμα [9][10].

Ταυτοχρόνως, μεγάλες προσπάθειες έχουν καταβληθεί για την έρευνα φωτοανιχνευτικών συσκευών που μπορούν να λειτουργούν χωρίς να απαιτείται παροχή ηλεκτρικής τροφοδοσίας (self-powered photodetectors). Συγκεκριμένα, η ικανότητα αυτόνομης φωτοανίχνευσης από μία ασύρματη διάταξη, με μέγεθος στη τάξη των νανομέτρων, σχεδόν ασήμαντου βάρους και ελάχιστων ενεργειακών απαιτήσεων που θα μπορούσε να ενσωματωθεί στις νανοσυσκευές της επόμενης γενιάς, μελετάται ευρέως [11]. Παραδείγματα εφαρμογών τέτοιων συσκευών αποτελούν η μακροχρόνια και χωρίς επίβλεψη παρακολούθηση των λυμάτων και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης αλλά και εφαρμογές στον τομέα της εξατομικευμένης και φορητής ιατρικής θεραπείας [12].

Η φωτοανιχνευτική διάταξης $n^+ \text{-ZnO/n-Si}$, που αποτελεί το επίκεντρο της εργασίας, συνδυάζει και τις τρεις λειτουργικές ιδιότητες που συνοψίστηκαν παραπάνω ενώ ταυτοχρόνως φέρει μικρό κόστος κατασκευής και μπορεί, να ενσωματωθεί εύκολα σε φωτονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, μιας και αναπτύσσεται σε wafer πυριτίου. Σαφέστερα, ανάλογα με την τάση πόλωσης, η διάταξη μπορεί να λειτουργήσει ως ευρυζωνικός ανιχνευτής, ανιχνεύοντας το φάσμα ακτινοβολίας από το υπεριώδες έως του υπέρυθρο, χωρίς την χρήση επιπρόσθετων οπτικών φίλτρων, ή ως φασματο-επιλεκτικός ανιχνευτής αμιγώς υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η ικανότητα διάκρισης μεταξύ της υπέρυθρης και μη ακτινοβολίας είναι εφικτή σε συνθήκες μηδενικής πόλωσης με έλεγχο της πολικότητας του παραγόμενου φωτορεύματος και επεκτείνεται και στην συνθήκη ορθής πόλωσης. Το σύνολο των παραπάνω ιδιοτήτων επιτυγχάνεται από την επιλογή των κατάλληλων υλικών (οξείδιο του ψευδαργύρου -ZnO σε υπόστρωμα πυριτίου -Si) και την μορφολογία της επαφής ως μια ισοτυπική n-n ετεροεπαφή. Κλείνοντας, στην επόμενη παράγραφο γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση των δύο δομικών υλικών της διάταξης προτού αναλυθούν οι λειτουργικές αρχές που αιτιολογούν το χαρακτηριστικά της.

Το οξείδιο του ψευδαργύρου και το πυρίτιο ως δομικοί λίθοι των σύγχρονων φωτοανιχνευτών

Η έρευνα για φωτοανιχνευτές που βασίζονται στο οξείδιο του ψευδαργύρου (ZnO) άρχισε να ευδοκιμεί από το 1980 ως μια εναλλακτική προσέγγιση για ανίχνευση υπεριώδους (UV) ακτινοβολίας έναντι των φωτοανιχνευτών με βάση το πυρίτιο και των φωτοπολλαπλασιαστών. Οι τελευταίοι παρουσίαζαν αρκετούς περιορισμούς όπως ανάγκη για φιλτράρισμα των φωτονίων

χαμηλών ενεργειών (ορατό και υπέρυθρο), χαμηλή απόδοση (κυρίως στους φωτοανιχνευτές με βάση το Si) και ανάγκη για εξαιρετικά υψηλό κενό και υψηλή τάση (φωτοπολλαπλασιαστές). Προς αποφυγή τέτοιων μειονεκτημάτων, ημιαγωγοί με μεγαλύτερο ενεργειακό χάσμα (όπως διαμάντι, SiC, III-νιτρίδια και II-VI υλικά με μεγάλο ενεργειακό χάσμα) εντάχθηκαν στο ερευνητικό πεδίο των ανιχνευτών UV. Επιπλέον, η καλύτερη χημική και θερμική σταθερότητα αυτών των υλικών τα καθιστά ιδανικά για συσκευές που λειτουργούν σε αντίξοες συνθήκες.

Το ZnO ανήκει στην ομάδα των II-VI υλικών και είναι ένα διαφανές αγώγιμο οξειδίο (TCO). Ταυτοχρόνως, αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο υλικό για οπτοηλεκτρονικές και διαφανείς ηλεκτρονικές εφαρμογές όπως είναι οι φωτοανιχνευτές κυρίως UV αλλά και ορατής ακτινοβολίας, οι φωτοдиодοι LEDs, και οι ηλιακές κυψελίδες (solar cells). Αυτό οφείλεται πρώτον, στο σχετικά μεγάλο και άμεσο ενεργειακό του χάσμα (3.37 eV σε θερμοκρασία δωματίου), δεύτερων στη μεγάλη ενέργεια σύνδεσης εξιτονίων (60 meV σε θερμοκρασία δωματίου) και τρίτων στην υψηλή διαπερατότητα (>80%) στην φασματική περιοχή του ορατού [13]. Επιπρόσθετες ιδιότητες του οξειδίου αποτελούν η ικανότητα να γίνει ιδιαίτερα αγώγιμο με προσμίξεις, ο φιλικός προς το περιβάλλον χαρακτήρας, η μεγάλη αντοχή στην ακτινοβολία, η υψηλή χημική σταθερότητα, οι πολικές του επιφάνειες και η ισχυρή φωταύγεια σε θερμοκρασία δωματίου [14].

Ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του ZnO είναι η ενδογενής αγωγιμότητα τύπου n λόγω ατελειών του κρυσταλλικού του πλέγματος, όπως κενές θέσεις οξυγόνου ή ενδιάμεσα προϊόντα ψευδαργύρου. Αυτό παραμένει και το κύριο μειονέκτημα του υλικού για τις οπτοηλεκτρονικές εφαρμογές που βασίζονται σε ομοιοεπαφές p-n (επαφές μεταξύ ίδιων υλικών). Ως εκ τούτου, οι οπτοηλεκτρονικές διατάξεις ZnO παίρνουν τη μορφή ετεροεπαφών (επαφές μεταξύ διαφορετικών υλικών) με άλλους ημιαγωγούς τύπου p. Παραδείγματα αποτελούν οι διατάξεις n-ZnO νανοράβδοι/p-GaN και n-ZnO/p-Si οι οποίες έχουν ήδη κατασκευαστεί και μελετηθεί ως προς τις οπτοηλεκτρικές τους ιδιότητες. Προφανώς, οι διατάξεις που αξιοποιούν πυρίτιο (Si) είναι λιγότερο κοστοβόρες και πιο ευέλικτες στην κατασκευή μιας και επιτρέπουν την άμεση ενσωμάτωση του ZnO πάνω σε wafers Si [15]. Πράγματι, ποικιλία φωτοανιχνευτών ZnO/p-Si με υψηλή απόκριση στην υπεριώδη-ορατή φασματική περιοχή έχουν αναπτυχθεί [16][17][18][19][20]. Μάλιστα, φωτοανιχνευτές n-ZnO/p-Si έχουν δείξει ικανότητα επιλεκτικής

ανίχνευσης μεταξύ της ορατής και UV ακτινοβολίας ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τάση πόλωσης [21].

Τέλος, το ZnO αποτελεί το δεύτερο πιο άφθονο οξείδιο μετάλλου μετά τον σίδηρο και είναι ασφαλές και εύκολο στην παρασκευή [22]. Ακόμα, πληθώρα νανοδομών ZnO μπορούν να αναπτυχθούν με μεθόδους μικρού κόστους επιτρέποντας παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Τέτοιες δομές είναι οι νανοράβδοι (nanorods), τα νανοσύρματα (nanowires), οι νανοκορδέλες (nanoribbons), οι νανοζώνες (nanobelts), οι τετράποδες δομές (tetrapod structures) κ.ά. ενώ στις μεθόδους ανάπτυξης περιλαμβάνονται η τεχνική RF sputtering, η μέθοδος ατομικής εναπόθεσης (ALD), η χημική εναπόθεση ατμών (CVD), η εναπόθεση με παλμικό laser (PLD), η μοριακή επιταξία (MBE) και οι μέθοδοι sol-gel, spray pyrolysis και electrospinning [23].

Από την άλλη, το πυρίτιο Si είναι ο πλέον διαδεδομένος ημιαγωγός που χρησιμοποιείται στη μικροηλεκτρονική και στη φωτονική. Βρίσκεται σε αφθονία στη γη, παράγεται σε μεγαλύτερο όγκο με χαμηλότερο κόστος από οποιονδήποτε άλλον ημιαγωγό και πρωτοστατεί στην τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων CMOS. Παράλληλα, το ενεργειακό του χάσμα είναι 1.07 eV σε θερμοκρασία δωματίου και έτσι πέραν της χρήσης του στην μικροηλεκτρονική, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως υλικό για ανίχνευση στο ορατό και στο κοντινό υπεριώδες (NIR: 780 nm – 1000 nm). Επιπλέον, λόγω της εξαιρετικής ποιότητας των κρυστάλλων και των ανεπτυγμένων διαδικασιών παθητικοποίησης του Si, οι φωτοανιχνευτές με βάση το Si μπορούν να επιτύχουν πολύ χαμηλά ρεύματα διαρροής. Ωστόσο, το θεωρητικό μήκος κύματος αποκοπής των φωτοανιχνευτών με βάση το Si είναι περίπου 1100 nm με αποτέλεσμα να τους καθιστά μη ιδανικούς για εφαρμογές ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας με μεγαλύτερα μήκη κύματος.

Βέβαια, έρευνα πάνω στην επέκταση του φάσματος απορρόφησης του Si έχει αποδείξει πως αυτό είναι εφικτό με την εισαγωγή μεγάλων ποσοτήτων προσμίξεων (hyperdoped Si) [24], ενώ υψηλότερη απορρόφηση σε ολόκληρο το φάσμα του Si έχει επιτευχθεί με τεχνικές όπως η μικροδόμηση με λέιζερ της επιφάνειας του [13].

Εν κατακλείδι, ο συνδυασμός των δύο υλικών επιτρέπει την κατασκευή φωτοανιχνευτών ZnO/Si, οι οποίοι έως τώρα εμφανίζονταν κυρίως με την μορφή p-n επαφών (πχ. n-ZnO/p-Si [13]). Πάραυτα, η φωτοανιχνευτική διάταξη που εξετάζεται στην παρούσα εργασία βασίζεται σε μια ιδιαίτερη κλάση ετεροεπαφών φορέων πλειονότητας, την $n^+ - n$ επαφή, στην οποία, όπως θα δούμε παρακάτω, αποδίδονται οι ιδιαίτερες φωτοανιχνευτικές της ιδιότητες.

Αρχές λειτουργίας της διάταξης $n^+ - \text{ZnO}/n - \text{Si}$

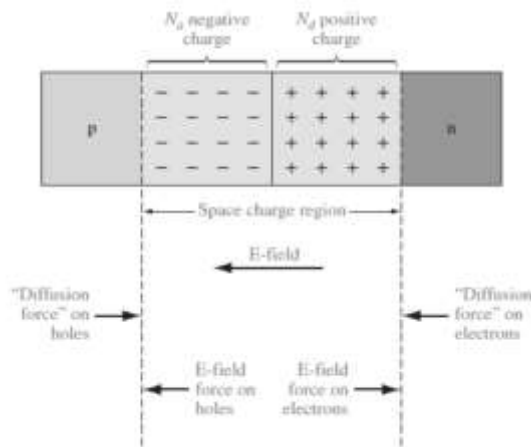
Η ετεροεπαφή $p - n$

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η λειτουργία της $n^+ - n$ ετεροεπαφής $n^+ - \text{ZnO}/n - \text{Si}$, κρίνεται σημαντικό να αναφερθούμε σύντομα στην λειτουργία της γνωστής $p - n$ ετεροεπαφής. Η $p - n$ επαφή αποτελείται από μια περιοχή μονοκρυσταλλικού ημιαγωγού που έχει εμπλουτιστεί με προσμίξεις τύπου δότη (n-type) και εφάπτεται σε μια παρόμοια περιοχή που έχει εμπλουτιστεί με προσμίξεις τύπου αποδέκτη (p-type). Στη διεπιφάνεια που χωρίζει τις δύο περιοχές, ηλεκτρόνια, οι φορείς πλειονότητας της περιοχής n, θα αρχίσουν να διαχέονται μέσα στην περιοχή p. Αντίστοιχα, οπές, οι φορείς πλειονότητας της περιοχής p, θα αρχίσουν να διαχέονται μέσα στην περιοχή n. Ως επακόλουθο, τα ηλεκτρόνια αφήνουν πίσω τους θετικά φορτισμένα άτομα δοτών και οι οπές αρνητικά φορτισμένα άτομα δοτών. Αυτό συντελεί στη δημιουργία δύο περιοχών με θετικά και αρνητικά φορτία εκατέρωθεν της διαχωριστικής επιφάνειας οι οποίες μαζί αποτελούν την περιοχή φορτίων χώρου (space charge region). Η περιοχή των θετικών φορτίων ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης (depletion region) ενώ η περιοχή των αρνητικών φορτίων περιοχή συσσώρευσης (accumulation region). Εντέλει, η κίνηση των φορέων λόγω της διάχυσης δημιουργεί μια ροή ρεύματος από την περιοχή p στην περιοχή n που ονομάζεται ρεύμα διάχυσης (diffusion current) και έχει θετικό πρόσημο.

Ταυτόχρονα, τα εκτεθειμένα θετικά και αρνητικά φορτία των δοτών των περιοχών n και p δημιουργούν ένα ηλεκτρικό πεδίο κοντά στην διαχωριστική επιφάνεια. Οι ελκτικές και απωστικές δυνάμεις του πεδίου από την μία επιβραδύνουν την διάχυση των φορέων πλειονότητας και από την άλλη βοηθούν την κίνηση των φορέων μειονότητας που κυκλοφορούν ελεύθεροι στις δύο περιοχές. Συγκεκριμένα, οπές, οι φορείς μειονότητας της περιοχής n, έλκονται προς την περιοχή p. Αντίστοιχα, ηλεκτρόνια, οι φορείς μειονότητας της περιοχής p, έλκονται προς την περιοχή n. Ουσιαστικά, πρόκειται για την αντίθετη κίνηση φορέων από αυτή που προκαλεί το φαινόμενο της διάχυσης και το αντίρροπο ρεύμα που δημιουργείται (από την περιοχή n στην περιοχή p) λέγεται ρεύμα ολίσθησης (drift current) και έχει αρνητικό πρόσημο.

Εν κατακλείδι, τα δύο φαινόμενα είναι αντικρουόμενα με την διάχυση να υπερισχύει κατά τη δημιουργία της επαφής και με την πάροδο του χρόνου να εξασθενεί ενώ η κίνηση φορτίων λόγω του πεδίου είναι αρχικά μειωμένη και με την εμφάνιση του ηλεκτρικού πεδίου ακολουθεί αυξητική πορεία. Έτσι, με την πάροδο του χρόνου, η κίνηση φορέων πλειονότητας λόγω της

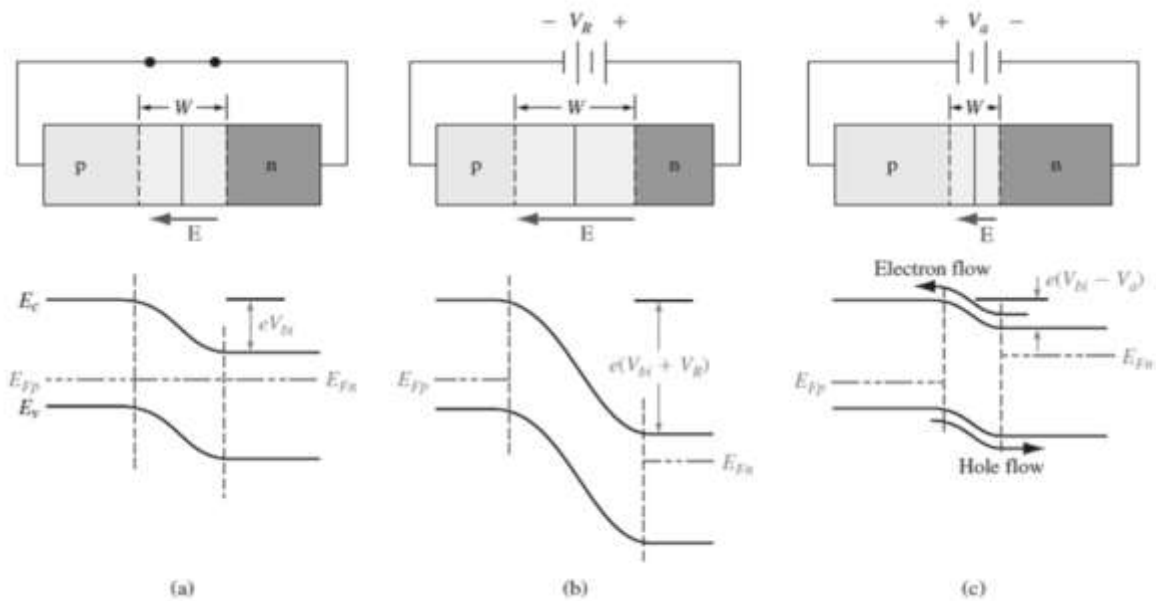
διάχυσης εξισώνεται με την κίνηση των φορέων μειονότητας λόγω του ηλεκτρικού πεδίου με αποτέλεσμα να επέλθει μια κατάσταση ισορροπίας όπου το συνολικό ρεύμα που διαρρέει την επαφή είναι μηδενικό. Επιπλέον, λόγω της φοράς του ηλεκτρικού πεδίου από την περιοχή n προς την περιοχή p, η περιοχή n βρίσκεται σε υψηλότερο δυναμικό από τη περιοχή p και η μεταξύ τους διαφορά δυναμικού να ονομάζεται δυναμικό φραγμού (voltage barrier).



Εικόνα 1: Η επαφή p-n όπου υποδεικνύονται η περιοχή φορτίων χώρου (space charge region), το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο (E-field), οι δυνάμεις διάχυσης (Diffusion force) και πεδίου (E-field force) που ασκούνται στους φορείς [25].

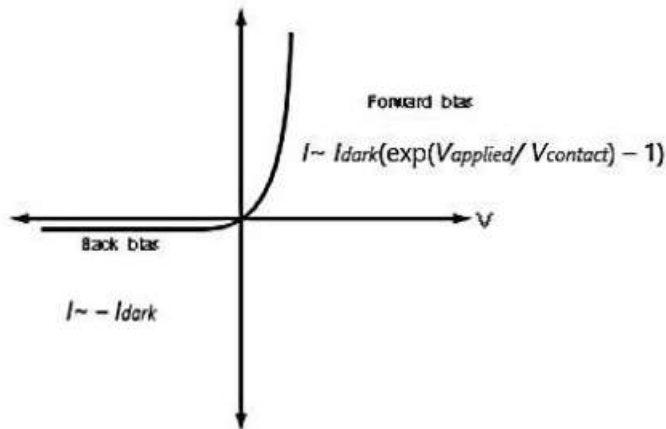
Στη συνέχεια, είναι σημαντικό να εξετάσουμε την συμπεριφορά της επαφής κατά την εφαρμογή εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου, εφαρμόζοντας δηλαδή τάση στα άκρα της. Εφαρμόζοντας θετική τάση, δηλαδή συνδέοντας την p μεριά της επαφής στο θετικό πόλο της εξωτερικής τροφοδοσίας και την n στον αρνητικό πόλο, επιτυγχάνετε η λεγόμενη ορθή πόλωση (forward biasing). Κατά την ορθή πόλωση το πεδίο ωθεί τα ηλεκτρόδια και τις οπές προς το εσωτερικό της επαφής, η περιοχή απογύμνωσης συρρικνώνεται, η ένταση του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου μειώνεται (όπως και το δυναμικό φραγμού), το φαινόμενο της διάχυσης ενισχύεται και υπάρχει ροή ρεύματος από την περιοχή p στην περιοχή n. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερη η εξωτερική τάση τροφοδοσίας τόσο περισσότερο ρεύμα διαρρέει την επαφή. Αντιθέτως, εφαρμόζοντας αρνητική τάση, δηλαδή συνδέοντας την p μεριά της επαφής στον αρνητικό πόλο της εξωτερικής τροφοδοσίας και την n στο θετικό πόλο επιτελείται η λεγόμενη ανάστροφη πόλωση (reverse biasing). Κατά την ανάστροφη πόλωση, το εξωτερικό πεδίο ωθεί τα ηλεκτρόνια και τις οπές στα άκρα της επαφής, έτσι το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης αυξάνεται, το εσωτερικό πεδίο και το φράγμα δυναμικού της επαφής επίσης ενισχύονται, το φαινόμενο τη διάχυσης περιορίζεται

και υπάρχει ροή ρεύματος από την περιοχή n στην περιοχή p η οποία οφείλεται στο ρεύμα ολίσθησης. Ωστόσο, το ρεύμα ολίσθησης είναι σχεδόν μηδενικό ($<1\mu\text{A}$) και αμελητέο και συνεπώς η επαφή λειτουργεί σαν μονωτής.



Εικόνα 2: Μορφή και ενεργειακό διάγραμμα της επαφής p-n σε (a) μηδενική εξωτερική τροφοδοσία, (b) ανάστροφη πόλωση, (c) ορθή πόλωση [25].

Καταλήγοντας, γίνεται αντιληπτό πως μία επαφή p-n επιτρέπει το ρεύμα να ρέει προς μία μόνο κατεύθυνση και αυτό αποτελεί την ανορθωτική συμπεριφορά μιας διόδου. Ο χαρακτήρας της διόδου συνοψίζεται στην χαρακτηριστική της καμπύλη της όπου διαπιστώνουμε πως με εφαρμογή αρνητικής τάσης πόλωσης (ανάστροφη πόλωση) έχουμε ροή ενός σχεδόν μηδενικού αρνητικού ρεύματος (συμπεριφορά μονωτή) ενώ κατά την εφαρμογή θετικής τάσης πόλωσης (ορθή πόλωση) εμφανίζεται ένα εκθετικά αυξανόμενο θετικό ρεύμα (συμπεριφορά αγωγού). Ακόμα, στο γράφημα, το μικρό ρεύμα ολίσθησης κατά την ανάστροφη πόλωση (γνωστό και ως ρεύμα κορεσμού ή ρεύμα διαρροής) παίρνει την ονομασία I_{dark} ενώ δίνεται και ο μαθηματικός ορισμός του ρεύματος κατά την ορθή πόλωση ($V_{applied}$: Η επιβαλλόμενη εξωτερική τάση, $V_{contact}$: το δυναμικό της επαφής κατά τη θερμική ισορροπία).

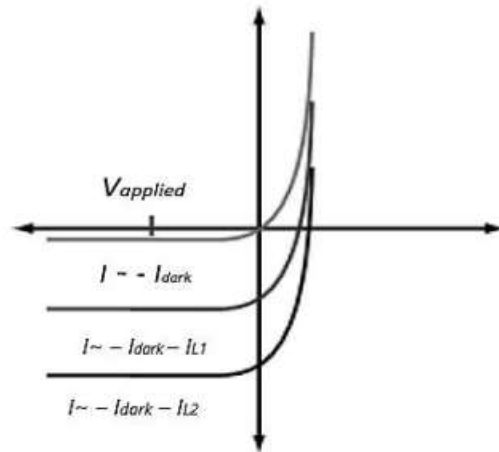


Εικόνα 3: Η χαρακτηριστική καμπύλη I-V μίας διόδου p-n. Υποδεικνύονται οι περιοχές ανάστροφης πόλωσης (back bias) και ορθής πόλωσης (forward bias) και οι ορισμοί του ηλεκτρικού ρεύματος κάθε περιοχής [25].

Η φωτοδίοδος p – n

Κατ' επέκταση, η βάση για διάφορους φωτοανιχνευτές όπως είναι η φωτοδίοδος και το φωτοτρανζίστορ είναι η επαφή p-n. Μια φωτοδίοδος p-n, αποτελεί μια ειδικά κατασκευασμένη επαφή p-n η οποία επιτρέπει τη διείσδυση του φωτός εντός της και την μετατροπή του οπτικού σήματος σε ηλεκτρικό. Η εν λόγω μετατροπή βασίζεται στην απορρόφηση της φωτεινής ενέργειας από το ημιαγώγιμο υλικό που οδηγεί στην μεταπήδηση ηλεκτρονίων του από τη ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας. Όταν αυτό το φαινόμενο λαμβάνει χώρα εντός της περιοχής απογύμνωσης της επαφής, τα δημιουργούμενα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών δεν επανασυνδέονται αλλά καθοδηγούνται από το υπάρχον ηλεκτρικό πεδίο με αποτέλεσμα την δημιουργία ροής ηλεκτρικού ρεύματος. Μάλιστα, περισσότερο φως (μεγαλύτερος αριθμός προσπιπτόντων φωτονίων) συνεπάγεται μεγαλύτερο φωτόρευμα. Ωστόσο, ο παραπάνω μηχανισμός λειτουργεί κυρίως κατά την ανάστροφη πόλωση της επαφής καθώς τότε, όπως εξηγήθηκε παραπάνω, το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης έχει διευρυνθεί και είναι δυνατή η δημιουργία περισσότερων ζευγών ηλεκτρονίων-οπών που θα οδηγηθούν από το εσωτερικό πεδίο. Αντιθέτως, κατά την ορθή πόλωση τα ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών πιθανότατα θα επανασυνδεθούν αμέσως.

Τέλος, η συμπεριφορά της φωτοδιόδου p-n συνοψίζεται και πάλι στην I-V χαρακτηριστική της καμπύλη. Η ίδια φέρει όμοια μορφή με την καμπύλη της απλής διόδου αλλά κατά την ανάστροφη πόλωση το φωτόρευμα προστίθεται στο ομόρροπο ρεύμα κορεσμού.



Εικόνα 4: Η I-V χαρακτηριστική καμπύλη μίας φωτοδιόδου p-n. Φωτίζοντας την επαφή το παραγόμενο φωτόρρευμα προσθέτετε στο ολικό ρεύμα. Η συνεισφορά είναι ανάλογη της ισχύος του προσπίπτοντος φωτός (εδώ $I_{L2} > I_{L1}$) και κυρίως παίζει ρόλο κατά την ανάστροφη πόλωση [25].

Η ετεροεπαφή $n^+ - n$

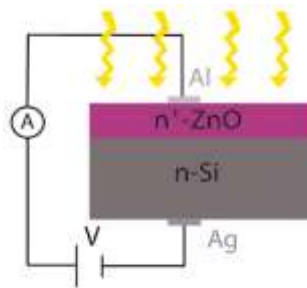
Η ετεροεπαφή $n^+ - n$ απαρτίζεται από δύο περιοχές εμπλουτισμένες με προσμίξεις τύπου δότη (n-type) διαφορετικής συγκέντρωσης. Σε αντίθεση με τη δίοδο $p - n$, όπου οι φορείς αγωγιμότητας είναι τόσο τα ηλεκτρόνια όσο και οι οπές, η αγωγιμότητα της ετεροεπαφής $n^+ - n$ οφείλεται στην κίνηση των ηλεκτρονίων. Επιπλέον, δεν υφίσταται το ισχυρό φράγμα δυναμικού μεταξύ των n και p ντοπαρισμένων περιοχών που φέρει η δίοδος $p - n$. Αντιθέτως, η ετεροεπαφή $n^+ - n$ παρουσιάζει αδύναμο φράγμα δυναμικού, το οποίο επιτρέπει την ροή ηλεκτρικού ρεύματος και προς τις δύο κατευθύνσεις. Σε αυτό το χαρακτηριστικό αποδίδονται οι ιδιαίτερες φωτοανιχνευτικές ιδιότητες της επαφής. Οι φωτοανιχνευτικές διατάξεις $n^+ - \text{ZnO} / n - \text{Si}$ ανήκουν στην παραπάνω κατηγορία μιας και αποτελούνται από ένα λεπτό υμένιο ZnO με συμπεριφορά τύπου n, πάνω σε υπόστρωμα μονοκρυσταλλικού πυριτίου επίσης τύπου n.

Ο φωτοανιχνευτής $n^+ - \text{ZnO} / n - \text{Si}$

Για το σχηματισμό της ετεροεπαφής $n^+ \text{ZnO} / n - \text{Si}$ λεπτά υμένια ZnO (υμένια ονομαστικού πάχους 200 nm, τύπου n με συγκέντρωση φορέων $n = 2.5 * 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ και κινητικότητα $\mu_n = 32 \pm 5 \text{ cm}^2 / (\text{V s})^{-1}$) εναποτέθηκαν σε υποστρώματα μονοκρυσταλλικού πυριτίου (111) τύπου n (με πρόσμιξη φωσφόρου και συγκέντρωση φορέων $N_d = 2 - 3 * 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). Η εναπόθεση του ZnO πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της ατομικής εναπόθεσης με παλμικό laser (ALD – Atomic Layer Deposition) σε θερμοκρασία θαλάμου 150 °C. Για την κατασκευή

της εμπρόσθιας επαφής εναποτέθηκε Al (πάχους 220 nm) με θερμική εξάχνωση και χρήση κατάλληλης μάσκας στο ZnO. Αντιστοίχως, για την οπίσθια επαφή εναποτέθηκε με θερμική εξάχνωση Ag (πάχους 250 nm) στο Si. Τέλος, ολόκληρη η διάταξη ανοπτήθηκε θερμικά (300 °C, 40 λεπτά) σε αδρανές περιβάλλον καθαρού αζώτου (N₂) όπου τόσο η συγκέντρωση φορέων του ZnO όσο και η κινητικότητα τους μειώθηκαν κατά μία τάξη μεγέθους ($n_{annealed} = 3 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_{n,annealed} = 2 \pm 0.5 \text{ cm}^2/(V \text{ s})^{-1}$) [21].

Από τη στιγμή δημιουργίας της επαφής n⁺-ZnO/n-Si και έως ότου να επέλθει κατάσταση ισορροπίας, ηλεκτρόνια διαχέονται από το ZnO στο Si διότι η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στο ZnO είναι κατά τρεις τάξεις μεγέθους υψηλότερη από αυτή στο Si. Συνεπώς, μια μικρή ζώνη απογύμνωσης δημιουργείται στο ZnO και μία ζώνη συσσώρευσης στο Si. Επιπλέον, όπως και στην p-n επαφή το ρεύμα διάχυσης από το ZnO προς το Si έχει αρνητικό πρόσημο ενώ το αντίρροπο ρεύμα πεδίου θετικό πρόσημο. Προκειμένου να κατανοήσουμε την λειτουργία της διάταξης θα εξετάσουμε την απόκριση της σε διάφορες ακτινοβολίες κατά τις λειτουργικές καταστάσεις της μηδενικής πόλωσης, της ορθής πόλωσης και της ανάστροφης πόλωσης. Τονίζεται πως η διάταξη ακτινοβολείται πάντοτε από τη μεριά του ZnO.

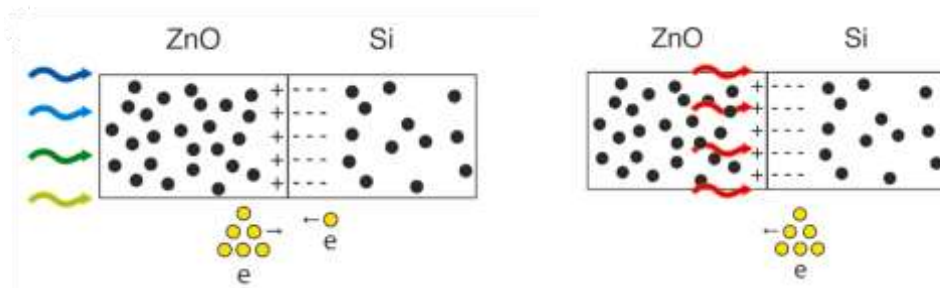


Εικόνα 5: Σχηματικό ακτινοβολήσης της διάταξης n⁺-ZnO/n-Si και εφαρμογής της τάσης πόλωσης [21].

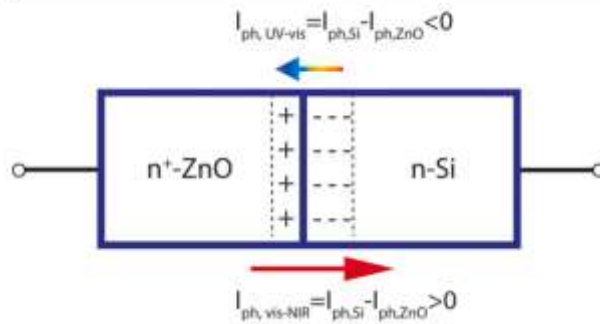
Η πρώτη λειτουργική κατάσταση της διάταξης είναι υπό συνθήκες μηδενικής πόλωσης. Χωρίς ακτινοβολία η επαφή βρίσκεται σε ισορροπία. Κατά την ακτινοβολία με υπεριώδη ακτινοβολία ($\lambda < 388 \text{ nm}$) φωτοφορείς δημιουργούνται κατά κύριο λόγο στην πλευρά του ZnO λόγω της υψηλής του απορροφητικότητας σε αυτά τα μήκη κύματος. Μάλιστα, μετρήσεις φωτοφωταυγείας σε μονοκρυσταλλικό Si πάνω σε υπόστρωμα ZnO και κατόπιν ανόπτησης παρουσιάζουν έντονη κορυφή στα 384 nm. Οι φωτοφορείς ευνοούνται από το φαινόμενο της διάχυσης και όσοι έχουν αρκετή ενέργεια διαπερνούν το ασθενές φράγμα δυναμικού καταλήγοντας στο Si και δημιουργώντας μια μικρή αρνητική ροή ρεύματος. Για μήκη κύματος

εντός του ορατού ($388 \text{ nm} < \lambda < 638 \text{ nm}$), φωτοφορείς δημιουργούνται και στα δύο υλικά. Από τη μια, στο ZnO οι φωτοφορείς οφείλονται σε μεταβάσεις από ελαττωματικές καταστάσεις εντός του ενεργειακού του χάσματος και διαχέονται ξανά προς το Si. Οι μετρήσεις φωτοφωταυγείας επιβεβαιώνουν και πάλι τον ισχυρισμό με μια ασθενή και πλατιά ζώνη στα 523nm. Από την άλλη, οι φωτοφορείς στο Si οφείλονται σε μεταπηδήσεις ηλεκτρονίων από την ζώνη σθένους στην ζώνη αγωγιμότητας και λόγω του εσωτερικού πεδίου κινούνται προς το ZnO παράγοντας θετικό φωτόρευμα. Ωστόσο, οι φωτοφορείς από το ZnO ακόμα υπερτερούν και το συνολικό φωτόρευμα έχει αρνητικό πρόσημο. Η αλλαγή της πολικότητας του φωτορεύματος παρατηρείται για το μήκος κύματος $\lambda = 638 \text{ nm}$ όπου οι φωτοφορείς στο Si αρχίζουν να υπερτερούν από αυτούς του ZnO. Κατόπιν, για $\lambda > 638 \text{ nm}$ και καθώς περνάμε στο φάσμα της υπέρυθρης ακτινοβολίας, το ZnO λειτουργεί σαν μια διαφανή επιφάνεια, φωτοφορείς δημιουργούνται μόνο στο Si, μεταφέρονται με την βοήθεια του εσωτερικού ηλεκτρικού πεδίου στην πλευρά του ZnO και προκαλούν θετική ροή φωτορεύματος.

Εν κατακλείδι, κατανοώντας το μηχανισμό λειτουργίας της διάταξης κατά τη μηδενική πόλωση γίνεται αντιληπτή η ικανότητα της συσκευής να διακρίνει την υπέρυθρη και μη ακτινοβολία αυτόνομα με έλεγχο της πολικότητας του παραγόμενου φωτορεύματος.

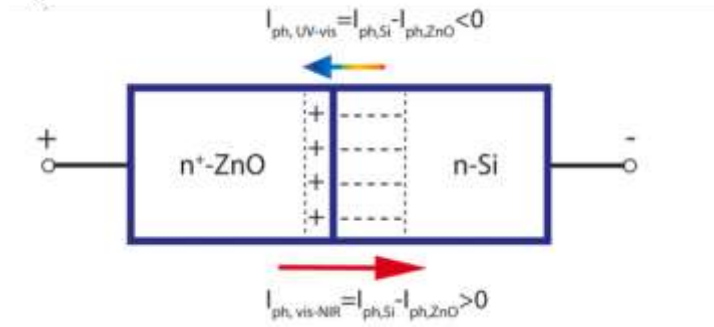


Εικόνα 6: Η $n^+ \text{ ZnO}/n\text{-Si}$ ετεροεπαφή υπό μηδενική πόλωση και ακτινοβολούμενη με ακτινοβολία UV-visible (αριστερά) και IR (δεξιά). Μαύρες κουκίδες: Ηλεκτρόνια. Κίτρινες κουκίδες: Δημιουργούμενοι φωτοφορείς. Η ζώνη απογύμνωσης και συσσώρευσης στο ZnO και στο Si φαίνονται αντίστοιχα [21].



Εικόνα 7: Η φορά του φωτορεύματος σε συνθήκες μηδενικής πόλωσης υπό UV-visible ακτινοβολία ($I_{ph,UV-vis}$: χρωματιστό βέλος) και υπό visible-NIR ακτινοβολία ($I_{ph,vis-NIR}$: κόκκινο βέλος). Τα ρεύματα $I_{ph,ZnO}$, $I_{ph,Si}$ αποτελούν τους παράγοντες του συνολικού φωτορεύματος που δημιουργούνται στο ZnO και στο Si αντίστοιχα [21].

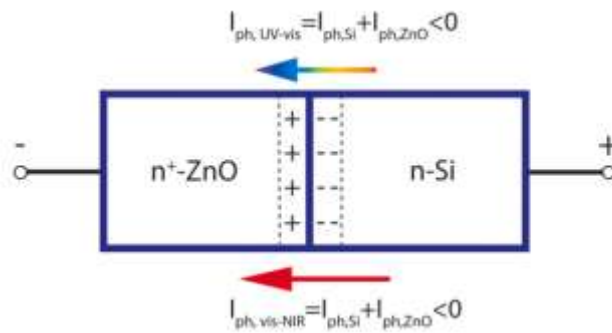
Η δεύτερη λειτουργική κατάσταση της διάταξης είναι υπό τη συνθήκη της ορθής πόλωσης (θετικός πόλος της τροφοδοσίας στο ZnO και αρνητικός πόλος στο Si). Σε αυτή την περίπτωση το εξωτερικό πεδίο υπερτίθεται του εσωτερικού πεδίου της επαφής και η περιοχή φορτίων χώρου μεγεθύνεται. Εξετάζεται αρχικά η περίπτωση της πόλωσης με +1V όπου η έρευνα δείχνει πως κατά την ακτινοβόληση στο φάσμα του υπεριώδους και του ορατού, οι φωτοφορείς που δημιουργούνται στο ZnO έχουν να υπερνικήσουν ένα ενισχυμένο φράγμα δυναμικού για να καταλήξουν στο Si ενώ οι φωτοφορείς που δημιουργούνται στο Si καθοδηγούνται από το ενισχυμένο πεδίο προς το ZnO. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το συνολικό φωτόρευμα να είναι αρνητικό σε ένα μικρότερο φάσμα μηκών κύματος (365 nm – 498 nm). Για $\lambda > 498$ nm οι φωτοφορείς του Si ξεκινούν να υπερτερούν και το φωτόρευμα είναι θετικό. Τέλος για $\lambda > 800$ nm το ZnO λειτουργεί και πάλι σαν μια διάφανη επιφάνεια και το θετικό φωτόρευμα αυξάνεται. Συνεπώς, κατά την ορθή πόλωση η διάταξη εμφανίζει και πάλι φωτοεπιλεκτικό χαρακτήρα μεταξύ των NIR και UV-visible ακτινοβολιών. Βέβαια, εάν αυξηθεί και άλλο η εξωτερική τάση, στα +2V, το πεδίο είναι πλέον αρκετά δυνατό ώστε θετικό φωτόρευμα να εμφανίζεται σε όλο το φάσμα UV-vis-NIR.



s

Εικόνα 8: Η φορά του φωτορεύματος κατά την ορθή πόλωση της διάταξης [21].

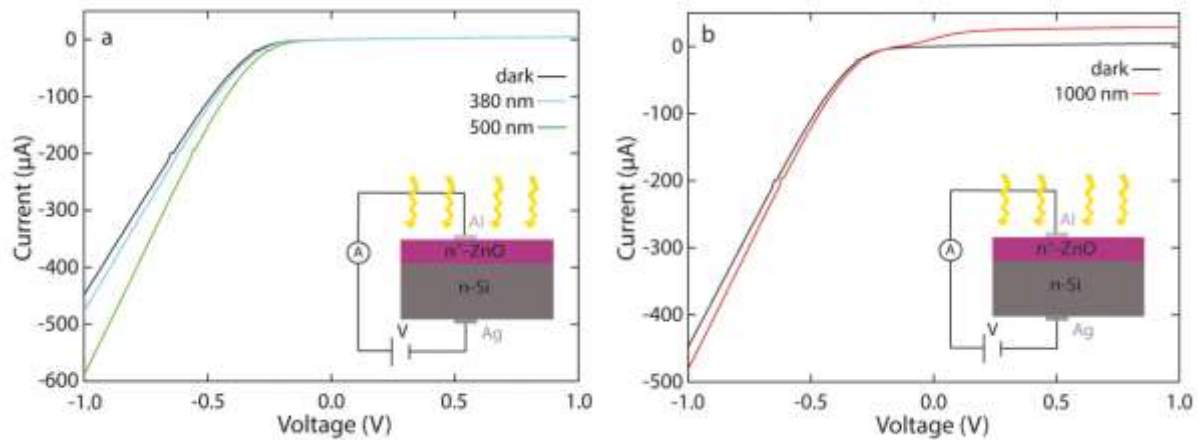
Η τρίτη λειτουργική κατάσταση της διάταξης είναι υπό τη συνθήκη της ανάστροφης πόλωσης (αρνητικός πόλος της τροφοδοσίας στο ZnO και θετικός πόλος στο Si). Τώρα, το εξωτερικό πεδίο αντιτίθεται στο εσωτερικό πεδίο της επαφής, η περιοχή φορτίων συρρικνώνεται και οι δυνάμεις διάχυσης υπερτερούν. Πλέον, ανεξαρτήτως του είδους της ακτινοβολίας, οι φωτοφορείς που δημιουργούνται και στα δύο υλικά ακολουθούν την κατεύθυνση του εξωτερικού πεδίου (από το Si στο ZnO) προσδίδοντας μεγάλο αρνητικό ρεύμα. Έτσι, η διάταξη αποκτά ευρυζωνικό χαρακτήρα και λειτουργεί όπως θα λειτουργούσε μια αντίστοιχη p-n φωτοδίοδος.



Εικόνα 9: Η φορά του φωτορεύματος κατά την ανάστροφη πόλωση της διάταξης [21].

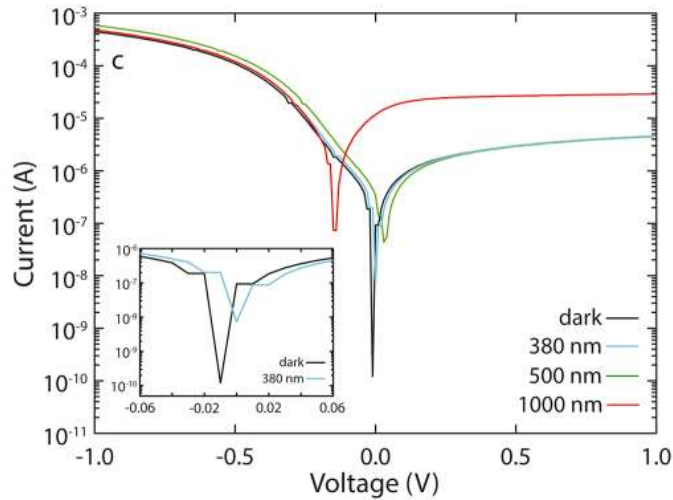
Κλείνοντας, η ανάλυση των λειτουργικών καταστάσεων της διάταξης μας οδηγεί στην κατανόηση της ιδιαίτερης I-V χαρακτηριστικής της καμπύλης. Καταρχάς, σε συνθήκες σκότους, όπου δεν υπάρχει δημιουργία φωτοφορέων, ο φωτοανιχνευτής παρουσιάζει διδοική συμπεριφορά άγοντας κατά την ανάστροφη πόλωση και λειτουργώντας μονωτικά κατά την ορθή πόλωση. Στην συνέχεια, κατά την ακτινοβολία, με την εφαρμογή αρνητικής τάσης πόλωσης

εμφανίζεται έντονο αρνητικό ρεύμα για όλο το φάσμα UV-visible-NIR. Αντιθέτως, με την εφαρμογή θετικής τάσης πόλωσης έχουμε ροή μικρού θετικού ρεύματος κυρίως κατά την ακτινοβολία στο φάσμα του υπέρυθρου.



Εικόνα 10: I-V χαρακτηριστικές καμπύλες του φωτοανιχνευτή $n^+ - \text{ZnO}/n\text{-Si}$ υπό συνθήκες σκότους και ακτινοβολίας UV-visible (αριστερά) και υπό ακτινοβολία NIR (δεξιά) [13].

Επιπλέον, η συμπεριφορά του φωτοανιχνευτή και η αλληλεπίδραση των φωτορευμάτων γίνεται εύκολα αντιληπτή με την παρουσίαση των αντίστοιχων ημιλογαριθμικών καμπυλών. Σαφέστερα, η ημιλογαριθμική καμπύλη φανερώνει την τιμή της επιβαλλόμενης τάσης, κατά την μεταβολή της από -2V σε 2V , για την οποία τα αντικρουόμενα εσωτερικά ρεύματα της συσκευής αλληλοεξουδετερώνονται. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση ανοιχτού κυκλώματος ή τάση ανοιχτοκύκλωσης (V_{oc}). Γίνεται αντιληπτό πως, αλλαγή της πολικότητας του φωτορεύματος μεταφράζεται και σε αλλαγή του προσήμου της τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Έτσι, το αρνητικό φωτόρευμα που δημιουργείται στο φάσμα $365 - 638 \text{ nm}$ γίνεται μηδέν όταν θετική τάση εφαρμόζεται στην πλευρά του ZnO. Από την άλλη, το θετικό φωτόρευμα που παράγεται στο φάσμα $638 - 1000 \text{ nm}$ γίνεται μηδέν όταν αρνητική τάση εφαρμόζεται στην πλευρά του ZnO. Κατόπιν, κατά τη μη φωτοβολία της διάταξης η τάση ανοιχτοκύκλωσης είναι θεωρητικά μηδέν καθώς ο φωτοανιχνευτής βρίσκεται σε ισορροπία. Τέλος, η παρακάτω γραφική συνοψίζει τα εν λόγω συμπεράσματα:



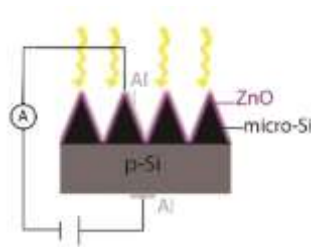
Εικόνα 11: Ημιλογαριθμική καμπύλη των I-V χαρακτηριστικών της εικόνας 5. Το ένθετο απεικονίζει μεγεθυμένη την ημιλογαριθμική καμπύλη για την ακτινοβολία UV [21].

Παρόμοιες διατάξεις

Ο φωτοανιχνευτής n-ZnO/p-μικροδομημένο Si

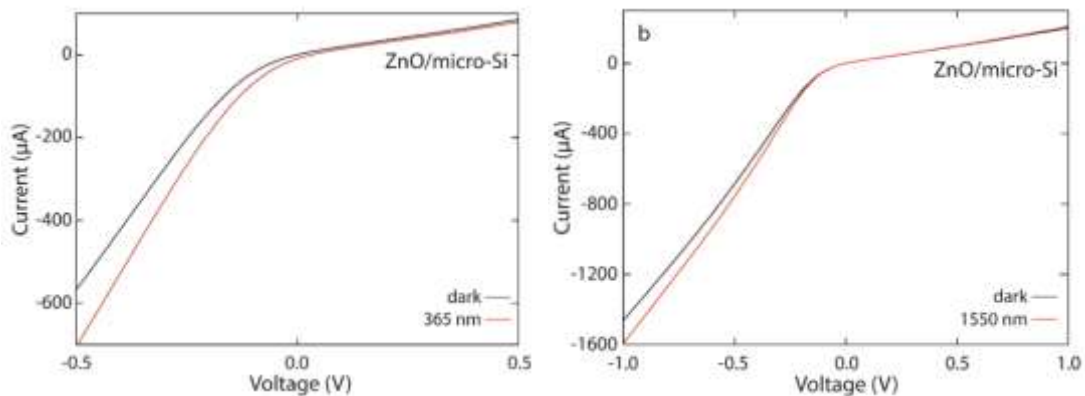
Για το σχηματισμό της ετεροεπαφής ZnO/p-microstructured Si λεπτά υμένα ZnO (ονομαστικού πάχους 200 nm, συγκέντρωσης φορέων $n = 2.5 * 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ και κινητικότητας $\mu_n = 32 \pm 5 \text{ cm}^2/(\text{V s})^{-1}$) εναποτέθηκαν σε υποστρώματα μικροδομημένου μονοκρυσταλλικού πυριτίου με χρήση της μεθόδου ALD και σε θερμοκρασία θαλάμου 150°C. Για την δημιουργία του μικροδομημένου Si αξιοποιήθηκε wafer μονοκρυσταλλικού (100) Si (τύπου p, με πρόσμιξη βορίου, συγκέντρωσης φορέων $N_A = 8 * 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ και κινητικότητας $\mu_p = 14 \text{ cm}^2/(\text{V s})^{-1}$). Αφού προηγήθηκε ο κατάλληλος καθαρισμός τα wafers ακτινοβολήθηκαν από παλμικό laser με παλμούς διάρκειας 5 ns, μήκους κύματος 532 nm και συχνότητας 10 Hz και με τρόπο τέτοιο ώστε κάθε σημείο τους να δεχθεί περίπου 1000 παλμούς. Η εμπρόσθια επαφή της διάταξης (στο ZnO) κατασκευάστηκε με θερμική εναπόθεση Al πάχους 250 nm ενώ η οπίσθια (στο μικροδομημένο Si) με θερμική εναπόθεση Al πάχους 220 nm. Ακολούθησε ανόπτηση της διάταξης σε ατμόσφαιρα N₂ (300 °C για 40 λεπτά) όπου και πάλι η συγκέντρωση φορέων του ZnO και η κινητικότητα τους μειώθηκαν κατά μία τάξη μεγέθους ($n_{annealed} = 3 * 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $\mu_{n,annealed} = 2 \text{ cm}^2/(\text{V s})^{-1}$) [13].

Η ετεροεπαφή n-ZnO/p-Si ανήκει στην κατηγορία των p-n επαφών και συνεπώς παρουσιάζει ένα ισχυρό εσωτερικό φράγμα δυναμικού. Βάση της δομής της, η διάταξη είναι ικανή για ευρυζωνική UV-visible-NIR φωτοανίχνευση κατά τη συνθήκη της αρνητικής πόλωσης (αρνητικός πόλος της τροφοδοσίας στο ZnO και θετικός πόλος στο Si) όπως και η προς εξέταση διάταξη $n^+ZnO/n-Si$. Ωστόσο, το ισχυρό φράγμα δυναμικού δεν επιτρέπει διέλευση φωτοφορέων από το ένα υλικό στο άλλο κατά τη συνθήκη της μηδενικής ή της ορθής πόλωσης και συνεπώς ο φωτοανιχνευτής n-ZnO/p-μικροδομημένο Si δεν έχει τη δυνατότητα της επιλεκτικής φωτοανίχνευσης IR ακτινοβολίας, σε αντίθεση με τη διάταξη $n^+ZnO/n-Si$. Επιπροσθέτως, αξίζει να αναφερθεί πως η μικροδόμηση του πυριτίου προσφέρει αισθητά μεγαλύτερη ανιχνευσιμότητα στην περιοχή του ορατού και του κοντινού υπέρυθρου σε αντίθεση με το απλό υπόστρωμα Si.



Εικόνα 12: : Σχηματικό ακτινοβολήσης της διάταξης ZnO/micro-Si και εφαρμογής της τάσης πόλωσης [13].

Τα παραπάνω συμπεράσματα συνοψίζονται στις I-V χαρακτηριστικές της διάταξης. Ειδικότερα, γίνεται αντιληπτό πως ο φωτοανιχνευτής κατά την ανάστροφη πόλωση αναγνωρίζει το φάσμα UV-visible-NIR αλλά κατά την ορθή πόλωση ακολουθεί τη διοδική συμπεριφορά που εμφανίζεται απουσίας ακτινοβολίας [13].



Εικόνα 13: Χαρακτηριστικές I-V καμπύλες της διάταξης ZnO/micro-Si υπό συνθήκη σκότους και κατά την ακτινοβολήση με ακτινοβολία μήκους κύματος 365 nm (αριστερά) και 1550 nm (δεξιά) [13].

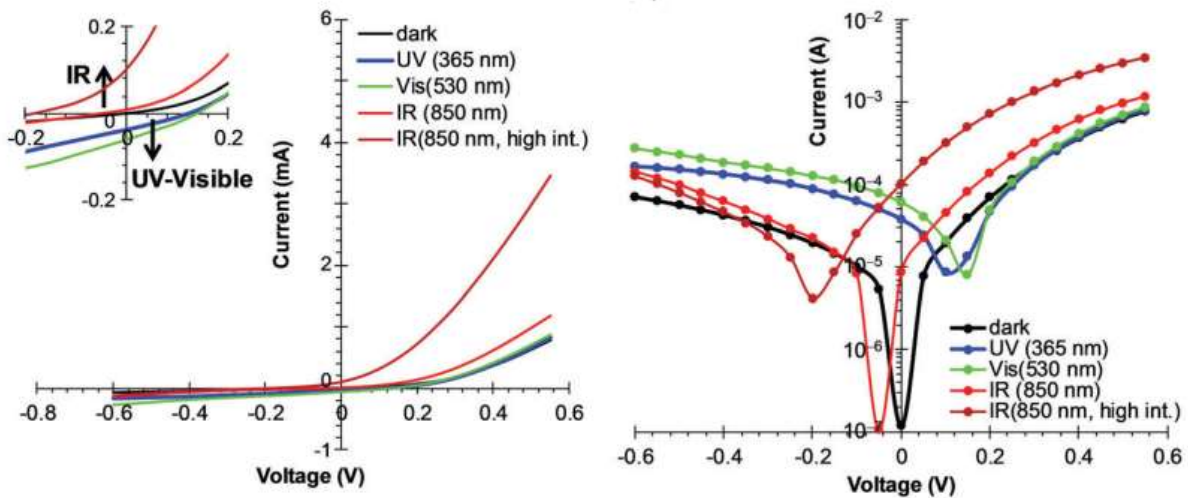
Ο φωτοανιχνευτής p-SnS/p-Si

Μία ακόμη ιδιάζουσα φωτοανιχνευτική διάταξη είναι ο φωτοανιχνευτής p-SnS/p-Si που διερευνήθηκε από τους Malkeshkumar Patel, Mohit Kumarab και Joondong Kim [26]. Όπως και η επαφή $n^+ZnO/n-Si$ έτσι και η παρούσα διάταξη αποτελεί μια ισοτυπική ετεροεπαφή η οποία ωστόσο είναι του τύπου $p^+ - p$. Δηλαδή, απαρτίζεται από δύο περιοχές εμπλουτισμένες με προσμίξεις τύπου αποδέκτη (p-type) διαφορετικής συγκέντρωσης. Για το σχηματισμό της ισοτυπικής ετεροεπαφής ITO/SnS/Si/Al αξιοποιήθηκε η τεχνική magnetron sputtering. Το υπόστρωμα Si (κρυσταλλικό, πάχους 500 μm , τύπου-p, $N_A = 10^{15} cm^{-3}$, ειδικής αντίστασης 1-10 Ωcm , γυαλισμένο από τη μία πλευρά) καθαρίστηκε καταλλήλως σε λουτρό υπερήχων με χρήση ακετόνης, μεθανόλης και απιονισμένου νερού. Κατόπιν, η επαφή Al ($\sim 400 nm$, $1 - 2 sq^{-1}$) κατασκευάστηκε με την τεχνική DC sputtering ακολουθούμενη από ταχεία θερμική επεξεργασία. Στη συνέχεια, υμένιο SnS (σουλφίδιο του κασσιτέρου, $\sim 100 nm$, $N_A = 10^{17} cm^{-3}$) εναποτέθηκε στη γυαλισμένη πλευρά του Si χρησιμοποιώντας το στόχο SnS_2 σε συνθήκες πίεσης 6 mTorr και θερμοκρασίας 300°C για χρόνο 900 sec. Τέλος, το στρώμα ITO (οξειδίο κασσίτερου ινδίου, $\sim 250 nm$) αναπτύχθηκε επίσης με DC sputtering (300W, 5 mTorr, 300°C) πάνω στο υμένιο SnS.

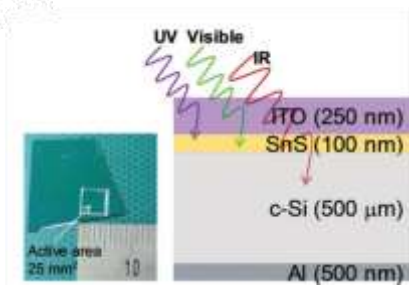
Στην εν λόγω διάταξη οι οπές αποτελούν τους φορείς πλειονότητας και το εσωτερικό δυναμικό της επαφής είναι ασθενές επιτρέποντας ανταλλαγή φορέων μεταξύ των δύο υλικών με παρόμοιο τρόπο όπως στην διάταξη $n^+ZnO/n-Si$. Ταυτοχρόνως, το υμένιο SnS παρουσιάζει έντονη απορρόφηση UV φωτονίων ($\lambda < 400 nm$), μερική απορρόφηση φωτονίων στο φάσμα του ορατού ($400 < \lambda < 760 nm$) και διαπερατότητα στην NIR ακτινοβολία ($\lambda > 760 nm$). Από την άλλη, όπως αναλύθηκε και προηγουμένως, το μονοκρυσταλλικό υπόστρωμα πυριτίου απορροφά φωτόνια από το ορατό ($\lambda < 760 nm$) έως και το κοντινό υπέρυθρο ($760 < \lambda < 1100 nm$).

Ο συνδυασμός των παραπάνω ιδιοτήτων καθιστούν των φωτοανιχνευτή ικανό να διακρίνει μεταξύ της NIR και της UV-visible ακτινοβολίας κατά τη συνθήκη της μηδενικής πόλωσης με έλεγχο της πολικότητας του παραγόμενου φωτορεύματος όπως ακριβώς και ο φωτοανιχνευτής $n^+ZnO/n-Si$. Επιπλέον, κατά την συνθήκη της ορθής πόλωσης ο φωτοανιχνευτής εκτελεί ευρυζωνική UV-visible-NIR φωτοανίχνευση, ιδιότητα που όπως είδαμε η συσκευή $n^+ZnO/n-Si$ παρουσιάζει κατά την ανάστροφη πόλωση. Η διαφορά αυτή έγκειται στο γεγονός πως οι φορείς πλειονότητας και των δύο συσκευών εμφανίζουν μεγαλύτερη συγκέντρωση στο εμπρόσθιο

υμένιο (SnS και ZnO αντίστοιχα) και ταυτοχρόνως είναι διαφορετικής φύσης (οπές για την διάταξη p-SnS/p-Si και ηλεκτρόνια για την διάταξη n⁺ZnO/n-Si). Συνεπώς, τελικό αποτέλεσμα είναι τα ρεύματα διάχυσης και πεδίου να έχουν αντίρροπες φορές και έτσι κατά την ανάστροφη πόλωση να εμφανίζεται ο μονωτικός χαρακτήρας της επαφής (υπερτερούν οι δυνάμεις πεδίου) ενώ κατά την ορθή πόλωση ο αγώγιμος χαρακτήρας (υπερτερούν οι δυνάμεις διάχυσης). Τα παραπάνω απεικονίζονται στις I-V χαρακτηριστικές καμπύλες της διάταξης για τα διάφορα μήκη κύματος ακτινοβολίας όπως και στις αντίστοιχες ημιλογαριθμικές γραφικές παραστάσεις:



Εικόνα 14: I-V χαρακτηριστικές της διάταξης p-SnS/p-Si υπό συνθήκες σκότους και ακτινοβολίας (αριστερά) και η αντίστοιχες ημιλογαριθμικές καμπύλες (δεξιά) [26]



Εικόνα 15: Σχηματική αναπαράσταση και φωτογραφία της διάταξης (ενεργός επιφάνεια 25 mm²)[26]

Μέθοδοι και Διατάξεις

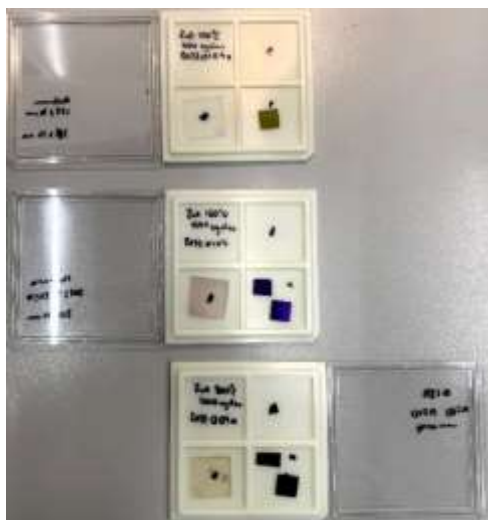
Οι διατάξεις $n^+ZnO/n-Si$ (100°C, 150°C, 200°C) και $n^+ZnO/Glass$ (100°C, 150°C, 200°C)

Οι διατάξεις $n^+ZnO/n-Si$ (100°C, 150°C, 200°C) αποτελούν τον δομικό λίθο των φωτοανιχνευτικών συσκευών της παρούσας μελέτης. Η εναπόθεση των υμενίων ZnO στα υποστρώματα Si εκτελέστηκε με την τεχνική ALD (Atomic Layer Deposition) στο εργαστήριο Materials Research and Technology Department, Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST) απ' όπου και μας αποστάλθηκαν. Συνεχίζοντας, η διαφορά των τριών διατάξεων έγκειται στην διαφορετική θερμοκρασία θαλάμου (100°C, 150°C ή 200°C) κατά την εναπόθεση του υμενίου ZnO με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η συγκέντρωση των φορέων πλειονότητας του. Κατόπιν, τα πάχη των υμενίων ήταν 171 nm για το δείγμα ZnO/n-Si 100°C, 209 nm για το δείγμα ZnO/n-Si 150°C και 170 nm για το δείγμα ZnO/n-Si 200°C. Από την άλλη, ως υπόστρωμα χρησιμοποιήθηκε και στις τρεις περιπτώσεις μονοκρυσταλλικό (111) Si, τύπου n (ντοπαρισμένο με φώσφορο) και με συγκέντρωση φορέων $N_A = 2 - 3 E15 cm^{-3}$.

Μαζί με τις τρεις διατάξεις παραλάβαμε και τρία δείγματα $n^+ZnO/Glass$ (100°C, 150°C, 200°C), τα οποία αποτελούν την εναπόθεση υμενίου ZnO πάνω σε γυαλί εργαστηρίου σε τρεις πάλι θερμοκρασίες. Με βάση αυτά προσδιορίστηκαν από το LIST οι ηλεκτρικές ιδιότητες του ZnO:

T	σ [S/cm]	N_A [cm^{-3}]	μ_n [cm^2/Vs]	d [nm]
ZnO 100°C	0.53 ± 0.02	$(5 \pm 3) E18$	1.1 ± 0.5	178 ± 6
ZnO 150°C	50 ± 20	$(3.7 \pm 0.6) E19$	7.8 ± 2	210 ± 10
ZnO 200°C	90 ± 50	$(2.2 \pm 0.2) E19$	26 ± 3	170 ± 10
Si	-	$(2 - 3) E15$	-	$\sim 500\mu m$

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά υμενίων ZnO (T: Θερμοκρασία εναπόθεσης, σ : Αγωγιμότητα, N_A : Συγκέντρωση φορέων, d: Πάχος υμενίου)



Εικόνα 16: Οι διατάξεις $n^+ZnO/n-Si$ και $n^+ZnO/Glass$ όπως παραλήφθηκαν από το εργαστήριο LIST

Δημιουργία ηλεκτρικών επαφών

Προκειμένου να διερευνηθεί η φωτοηλεκτρική τους απόκριση υπό διάφορες συνθήκες ήταν απαραίτητη η δημιουργία ηλεκτρικών επαφών στις δύο πλευρές τους. Η κατασκευή των ηλεκτρικών επαφών πραγματοποιήθηκε με την τεχνική της θερμικής εξάχνωσης και η διαδικασία συνοψίζεται στην επιλογή των υλικών προς εξάχνωση και των αντίστοιχων φορέων, στην κατασκευή των μασκών που καθορίζουν τις περιοχές εναπόθεσης του υλικού, στον ειδικό καθαρισμό όλων των παραπάνω, στην προετοιμασία του θερμικού εξάχνωτή, στην εκτέλεση των εναποθέσεων και τέλος στην απενεργοποίηση του συστήματος και στην αποθήκευση των νέων συσκευών. Εν κατακλείδι, τα προαναφερθέντα στάδια με τις αντίστοιχες μεθόδους και διατάξεις παρουσιάζονται αναλυτικά παρακάτω:

Θερμική Εξάχνωση

Η τεχνική της θερμικής εξάχνωσης

Η τεχνική της θερμικής εξάχνωσης χρησιμοποιείται ευρέως για εναποθέσεις τόσο ανόργανων όσο και οργανικών υλικών πάνω σε επιθυμητό υπόστρωμα και ανήκει στη γενικότερη κατηγορία των Τεχνικών Φυσικής Εναπόθεσης Ατμών (PVD). Κατ' επέκταση, οι τεχνικές φυσικής εναπόθεσης ατμών αποτελούν ξηρές μεθόδους εναπόθεσης σε περιβάλλον κενού ή σε περιβάλλον αερίου, όπου σωματίδια (ιόντα, άτομα, μόρια) διαφεύγουν από το προς εξάχνωση υλικό κατά την επιβολή υψηλής ενέργειας. Κατόπιν, καταλήγουν στο επιθυμητό υπόστρωμα, το

οποίο απορροφά την κινητική τους ενέργεια επιτρέποντας το σχηματισμό ενός στερεού επιστρώματος.

Συγκεκριμένα, η τεχνική της θερμικής εξάχνωσης στηρίζεται στη θέρμανση του υλικού-στόχου που τοποθετείται σε ένα φορέα-βαρκίδιο (crucible), με σκοπό να εξαχνωθεί και να εναποθεθεί στο επιθυμητό υπόστρωμα. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε περιβάλλον κενού, ο φορέας του υλικού μπορεί να είναι μια σπείρα ή μια χοάνη και για τη θέρμανση χρησιμοποιείται μια ηλεκτρική αντίσταση η οποία αυξάνει τη θερμοκρασία των μορίων του υλικού, ώστε αυτά να μεταβαίνουν από τη στερεά στην αέρια φάση (εξάχνωση). Στη συνέχεια, διασχίζουν το κενό του θαλάμου, προσκρούουν στο κρύο υπόστρωμα, μειώνεται και πάλι η θερμοκρασία τους και έτσι στερεοποιούνται επί της επιφάνειάς του. Η διαδικασία γίνεται εξ' ολοκλήρου σε υψηλό κενό, αφενός, για να αποφευχθούν τυχόν συγκρούσεις με μόρια αερίων που μπορεί να εμποδίζουν την εναπόθεση, και αφετέρου, για να προκύπτουν υμένια χωρίς περιττές προσμείξεις που θα αποτελούσαν επιπλέον παγίδες φορτίων. Κατ' επέκταση, τα πλεονεκτήματα της διαδικασίας μπορούν να συνοψιστούν στην εύκολη και γρήγορη διεκπεραίωση, στην δυνατότητα εναπόθεσης οργανικών και ανόργανων υλικών και στην ομοιογένεια και καθαρότητα των παραγόμενων υμενίων [27]. Με αυτή τη διαδικασία αναπτύξαμε τις μεταλλικές επαφές αλουμινίου και αργύρου στις δύο πλευρές των συσκευών μας. Τέλος, λεπτομέρειες και ανάλυση των παραμέτρων ακολουθεί παρακάτω.

Ο θερμικός εξάχνωτής Edwards Coating System E306A

Για την πραγματοποίηση των εναποθέσεων χρησιμοποιήθηκε ο θερμικός εξάχνωτής Edwards Coating System E306A. Ο ίδιος αποτελείται από τα εξής βασικά τμήματα: Πρώτον, από το θάλαμο κενού, δηλαδή το χώρο στον οποίο δημιουργείται το ελεγχόμενο περιβάλλον χαμηλής πίεσης και όπου λαμβάνουν χώρα οι διαδικασίες της θερμικής εξάχνωσης και εναπόθεσης των υλικών. Ο θάλαμος κενού του συγκεκριμένου θερμικού εξάχνωτή έχει τη μορφή γυάλινου κώδωνα με ικανότητα αφαίρεσης και επανατοποθέτησης του, επιτρέποντας έτσι την πρόσβαση στα περαιτέρω εξαρτήματα του. Δεύτερον, εντός του κώδωνα βρίσκεται εγκατεστημένο το σύστημα θέρμανσης του φορέα-βαρκιδίου, υπεύθυνο για την υψηλή θέρμανση του φορέα και κατ' επέκταση την εξάχνωση του υλικού που περιέχει. Στον εν λόγω εξάχνωτή, η θέρμανση πραγματοποιείται με ηλεκτρική αντίσταση και συγκεκριμένα τοποθετώντας το φορέα μεταξύ δύο ηλεκτροδίων με ελεγχόμενη τροφοδοσία ρεύματος. Αντικρυστά από το φορέα του υλικού

βρίσκεται η πλατφόρμα συγκράτησης του υποστρώματος. Ειδικότερα, πρόκειται για μεταλλικό δίσκο, στην κάτω επιφάνεια του προσκολλούνται τα υποστρώματα που θα καλυφθούν από το εξαχνωμένο υλικό. Στην περίπτωση του Edwards Coating System E306A, για την διευκόλυνση του χρήστη, ο μεταλλικός δίσκος έχει τη δυνατότητα περιστροφής περί του κατακόρυφου άξονα και απαρτίζεται από μεταλλικές τάπες διαφόρων μεγεθών που μπορούν να αφαιρεθούν για να κολληθούν πάνω τους τα υποστρώματα και να επανατοποθετηθούν. Μεταξύ του συστήματος θέρμανσης και της πλατφόρμας του υποστρώματος παρεμβάλλεται μια κινούμενη μεταλλική ασπίδα που αναλόγως της θέσης της επιτρέπει ή εμποδίζει το υλικό απόθεσης να φτάσει στο υπόστρωμα. Η ίδια προσδίδει κυρίως στο χρήστη την δυνατότητα να διακόψει αμέσως την εναπόθεση υλικού, μόλις επιτευχθεί το επιθυμητό πάχος. Κατόπιν, το πάχος του προς δημιουργία υποστρώματος ελέγχεται σε πραγματικό χρόνο με χρήση ενός εξειδικευμένου κρυστάλλου χαλαζία (Quartz Crystal Microbalance – QCM), τοποθετημένου στο κέντρο της πλατφόρμας συγκράτησης των υποστρωμάτων. Σαφέστερα, ο χρήστης εισάγει αρχικά στο σύστημα έλεγχο του κρυστάλλου τις παραμέτρους του εναποτιθέμενου υλικού και λαμβάνει συνεχή ένδειξη για το πάχος του υμενίου που δημιουργείται.

Ακριβώς κάτω από το θάλαμο κενού του και σε άμεση διασύνδεση με αυτόν βρίσκονται οι αντλίες κενού, υπεύθυνες για την δημιουργία και διατήρηση του υψηλού κενού εντός του. Ο συγκεκριμένος εξαχνωτής διαθέτει μια περιστροφική αντλία λαδιού και μια αντλία διάχυσης, οι οποίες λειτουργώντας συνεργατικά εξασφαλίζουν τις κατάλληλες συνθήκες κενού. Ύστερα, την ψύξη των τμημάτων του θερμικού εξαχνωτή φροντίζει ένα εγκατεστημένο σύστημα υδρόψυξης συνδεδεμένο με την κοντινότερη παροχή νερού. Επιπλέον, στο σύστημα ψύξης εντάσσεται και το δοχείο εισαγωγής υγρού υδρογόνου που κυρίως ψύχει την αντλία διάχυσης. Τέλος, οι ηλεκτρικοί διακόπτες του συστήματος, ο έλεγχος της τροφοδοσίας ρεύματος του συστήματος θέρμανσης, οι μοχλοί και οι διακόπτες ενεργοποίησης των αντλιών και τα μετρητικά όργανα κενού αποτελούν το σύστημα έλεγχου του Edwards Coating System E306A μέσω του οποίου ο χρήστης καθοδηγεί την διαδικασία της θερμικής εξάχνωσης και της κατασκευής λεπτών υμενίων.



Εικόνα 17: Ο κώδωνας του θερμικού εξαχνωτή Edwards Coating System E306A

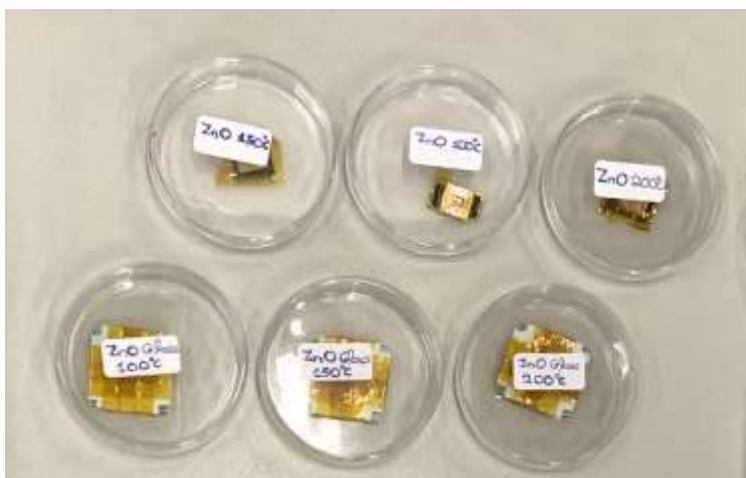
Επιλογή των υλικών προς εξάχνωση και των αντίστοιχων φορέων

Στα δείγματα n^+ -ZnO/n-Si στόχος αποτέλεσε η δημιουργία επαφής αργύρου (Ag) στη μεριά του πυριτίου (κάθοδος) και επαφής αλουμινίου (Al) στην πλευρά του οξειδίου του ψευδαργύρου (άνοδος). Από την άλλη, στα δείγματα n^+ -ZnO/Glass ζητούμενο ήταν η δημιουργία επαφών αλουμινίου (Al) στις τέσσερις γωνίες από τη μεριά του ZnO. Συνεπώς, μικρές ποσότητες αργύρου και αλουμινίου αποτέλεσαν τα προς εξάχνωση υλικά και ήταν διαθέσιμα στο εργαστήριο. Όσον αφορά τους φορείς των υλικών, και για τα δύο επιλέχθηκε φορέας τύπου έλικας κατασκευασμένος από βολφράμιο. Τέλος, προκειμένου τα υλικά να τοποθετηθούν εντός της έλικας κόπηκαν σε μακρόστενες λεπτές λωρίδες.

Κατασκευή μασκών

Στα δείγματα n^+ -ZnO/n-Si σκοπός ήταν η επαφή αργύρου να έχει σχήμα τετραγώνου και η επαφή αλουμινίου σχήμα τρίαυνας. Για να επιτευχθεί αυτό, στην περίπτωση της τετράγωνης επαφής ολόκληρο το δείγμα καλύφθηκε με κολλητική ταινία τύπου kapton tape πλην ενός τετραγώνου στο κέντρο του. Από την άλλη, στην περίπτωση της επαφής τρίαυνας, μεταλλική μάσκα τύπου τρίαυνας προσκολλήθηκε με χρήση kapton tape πάνω στο δείγμα.

Στα δείγματα n^+ -ZnO/Glass, προκειμένου να δημιουργηθούν επαφές αλουμινίου στις τέσσερις γωνίες τους, κατασκευάστηκαν μάσκες από teflon, τέτοιες ώστε να καλύπτουν ολόκληρο το δείγμα εκτός των τεσσάρων άκρων του. Κατόπιν, οι ίδιες προσκολλήθηκαν πάνω στα δείγματα και πάλι με χρήση kapton tape.



Εικόνα 18: Τα δείγματα n^+ -ZnO/n-Si και n^+ -ZnO/Glass φερόντας τις κατάλληλες μάσκες προκειμένου να γίνει η εναπόθεση των επαφών.

Λουτρό υπερήχων

Προϋπόθεση για την πραγματοποίηση της θερμικής εναπόθεσης είναι τα κομμάτια του υλικού προς εξάχνωση, οι φορείς τους και οι μάσκες να είναι καθαρά από οποιοσδήποτε επιμολύνσεις. Για την επίτευξη αυτού χρησιμοποιήθηκε λουτρό υπερήχων. Το λουτρό υπερήχων αποτελεί μια εξειδικευμένη συσκευή καθαρισμού, που με χρήση υπερήχων επιτυγχάνει ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό και ταχύ καθαρισμό των αντικειμένων. Συγκεκριμένα, απαρτίζεται πρώτον από ένα ανοξείδωτο δοχείο το οποίο περιέχει το υγρό καθαρισμού, δεύτερον από τους πιεζόηλεκτρικούς μετατροπείς στον πυθμένα ή τις πλευρές του δοχείου που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε υψηλής συχνότητας υπερήχους (20 έως 40 kHz) και τρίτον από τον διαλύτη ή το υγρό καθαρισμού που θα επιλέξει ο χρήστης βάσει της φύσης των προς καθαρισμό αντικειμένων και της κατάστασης τους. Ύστερα, η διαδικασία καθαρισμού συνοψίζεται στην τοποθέτηση των αντικειμένων εντός του δοχείου, στο γέμισμα του δοχείου με το υγρό καθαρισμού έτσι ώστε αυτά να είναι πλήρως βυθισμένα και στην ενεργοποίηση των μετατροπέων.

Με την ενεργοποίηση των μετατροπέων υπέρηχοι διαπερνούν αμέσως το υγρό καθαρισμού πυροδοτώντας το φαινόμενο της καυσοειδούς αποσύνθεσης. Κατά την καυσοειδή αποσύνθεση δημιουργούνται και καταρρέουν στιγμιαία μικροσκοπικές φούσκες στο υγρό, εκπέμποντας ισχυρά κραδασμικά κύματα εντός του. Αυτά με την σειρά τους προκαλούν έντονη τριβή του καθαριστήριου με τα αντικείμενα και συνεπώς αποτελεσματική απομάκρυνση λασπών, λιπών, ελαίων, σκόνης και άλλων ακαθαρσιών. Στην δική μας περίπτωση, ο καθαρισμός όλων των αντικειμένων έγινε για δεκαπέντε λεπτά εντός λουτρού Cole-Parmer Ultrasonic Cleaner Model 8845-03 με χρήση μεθανόλης ακολουθούμενα από ακόμα δεκαπέντε λεπτά με χρήση ακετόνης. Μετέπειτα, η χρησιμοποιημένη μεθανόλη και ακετόνη τοποθετήθηκαν στα κατάλληλα δοχεία ανακύκλωσης και τα καθαρά πλέον αντικείμενα σε γυάλινα τρυβλία χρησιμοποιώντας μεταλλική τσιμπίδα.



Εικόνα 19: Καθαρισμός των υλικών εντός του λουτρού υπερήχων

Προετοιμασία του θερμικού εξαχνωτή

Μετά την κατασκευή των μασκών, τον καθαρισμό των ίδιων και των υλικών προς εξάχνωση ακολούθησε η προετοιμασία του θερμικού εξαχνωτή. Αρχικά, αφαιρέθηκε ο κώδωνας με σκοπό να καθαριστεί από τυχόν υπολείμματα προηγούμενων εναποθέσεων. Ο καθαρισμός πραγματοποιήθηκε με τρίψιμο του εσωτερικού του με απλό χαρτί ποτισμένο με μεθανόλη. Κατά δεύτερον, έχοντας αφαιρέσει τον κώδωνα, η έλικα με τα κομμάτια αργύρου τοποθετήθηκε προσεκτικά μεταξύ των ηλεκτροδίων της θερμαντικής αντίστασης. Τρίτον, τα δείγματα

n^+ -ZnO/ n -Si και n^+ -ZnO/Glass φορώντας τις κατάλληλες μάσκες στην πλευρά του οξειδίου του ψευδαργύρου προσκολλήθηκαν με χρήση kapton tape στη κάτω επιφάνεια της πλατφόρμας υποστρωμάτων. Τα παραπάνω διεκπεραιώθηκαν με χρήση χειρουργικών γαντιών και масκών προσώπου προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν επιμολύνσεις του θαλάμου κενού με δερματικά έλαια. Κατόπιν, ο κρύσταλλος χαλαζία, για τον έλεγχο του πάχους εναπόθεσης, προσαρμόστηκε στο κέντρο της πλατφόρμας και ο κώδωνας επανατοποθετήθηκε. Ακόμα, έγινε προμήθεια υγρού αζώτου, απαραίτητου για την σωστή λειτουργία του θερμικού εξαχνωτή. Τέλος, ο σωλήνας υδρόψυξης του εξαχνωτή συνδέθηκε στην κοντινότερη παροχή νερού και η απόληξη του σωλήνα εξάτμισης των αντλιών τοποθετήθηκε έξω από το κοντινότερο παράθυρο. Κλείνοντας, το σύνολο των παραπάνω διαδικασιών αποτέλεσε την προετοιμασία του θερμικού εξαχνωτή για την εκτέλεση του πρώτου εκ των δύο κύκλων εναπόθεσης υλικού.

Εναπόθεση επαφών

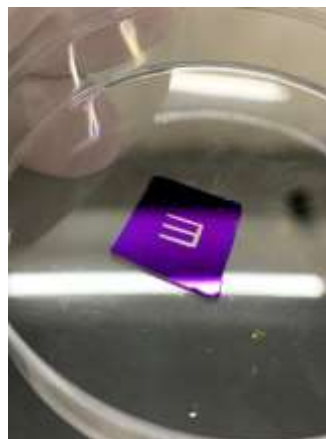
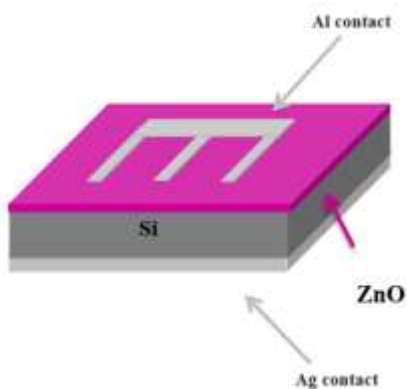
Έχοντας προετοιμάσει κατάλληλα τον θερμικό εξαχνωτή, η διαδικασία εναπόθεσης των επαφών αρκείται στην σωστή διεκπεραίωση των οδηγιών-βημάτων που αναγράφονται στο τεχνικό εγχειρίδιο του μηχανήματος. Έτσι, βηματικά και παρατηρώντας τις ενδείξεις των οργάνων, έγινε η προθέρμανση των αντλιών, η ενεργοποίηση της ηλεκτρικής τροφοδοσίας και της παροχής νερού ψύξης, η τοποθέτηση του υγρού αζώτου στο κατάλληλο δοχείο και η δημιουργία κενού, αρχικά με την περιστροφική αντλία και κατόπιν με συνδυασμό αυτής και της αντλίας διάχυσης. Η ανάγνωση του κενού γίνεται με τους αισθητήρες Penning και Pirani και για την έναρξη της εναπόθεσης υλικού προτείνεται κενό μικρότερο του 10^{-4} mbar.

Με την εξασφάλιση του επιθυμητού κενού ξεκινήσαμε να τροφοδοτούμε με ρεύμα αυξανόμενης έντασης τα ηλεκτρόδια του θερμαντικού στοιχείου έως ότου ο φορέας και το υλικό του να κοκκινίσουν. Ταυτοχρόνως, ενεργοποιήσαμε το σύστημα ελέγχου του κρυστάλλου χαλαζία θέτοντας τις κατάλληλες παραμέτρους βάσει του υλικού προς εξάχνωση. Μόλις ο ρυθμός εξάχνωσης έφτασε τα 2nm/sec απομακρύνθηκε χειροκίνητα η μεταλλική ασπίδα (shutter) και το υλικό ξεκίνησε να εναποτίθεται πάνω στους στόχους. Παράλληλα, το σύστημα ελέγχου του κρυστάλλου μας ενημέρωνε για το αυξανόμενο πάχος του υμενίου που δημιουργείται. Μόλις αυτό έφτασε τα 250 nm, η ασπίδα μετακινήθηκε πάλι πάνω από την έλικα και η τροφοδοσία του θερμαντικού στοιχείου μειώθηκε σταδιακά. Κατ' αυτόν τον τρόπο, ολοκληρώθηκε ο πρώτος κύκλος εναπόθεσης, όπου εναποτέθηκε υμένιο αλουμινίου πάχους 250 nm στις τέσσερις γωνίες

των n^+ -ZnO/Glass και στην τρίαίνα των n^+ -ZnO/n-Si. Κατόπιν, τα δείγματα αφαιρέθηκαν και τα n^+ -ZnO/n-Si αναποδογυρίστηκαν και καλύφθηκαν από karton tape για την εναπόθεση της τετράγωνης επαφής αργύρου. Οι διαδικασίες προετοιμασίας και λειτουργίας του εξαχνωτή πραγματοποιήθηκαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο και έτσι υμένιο αργύρου πάχους 250nm εναποτέθηκε στην κάθοδο των n^+ -ZnO/n-Si.

Απενεργοποίηση του θερμικού εξαχνωτή

Η απενεργοποίηση του θερμικού εξαχνωτή αναλύεται επίσης σε ένα σύνολο οδηγιών που περιλαμβάνουν την απενεργοποίηση των αντλιών, την εισαγωγή ατμοσφαιρικού αέρα στο εσωτερικό του κώδωνα, την αφαίρεση του, την διακοπή του νερού ψύξης όπως και της ηλεκτρικής τροφοδοσίας. Σε καθένα από τους δύο κύκλους λειτουργίας, μετά την αφαίρεση του κώδωνα, τα δείγματα απομακρύνθηκαν με χρήση τσιμπιδας και χειρουργικών γαντιών και τοποθετήθηκαν στα τρυβλία τους. Αντιστοίχως, οι χρησιμοποιημένες έλικες αποθηκεύτηκαν, ο κώδωνας καθαρίστηκε και καταχωρήθηκαν στο μπλοκ αναφοράς του μηχανήματος τα στοιχεία των εναποθέσεων που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 20: Αριστερά: Η δομή των φωτοανιχνευτών n^+ -ZnO/n-Si. Από επάνω προς τα κάτω παρατηρούμε την μεταλλική επαφή αλουμινίου σχήματος τρίαίνας (Al contact), το λεπτό υμένιο οξειδίου του ψευδαργύρου ZnO (με μώβ χρώμα), το υπόστρωμα πυριτίου Si (με γκρι χρώμα) και την τετράγωνη οπίσθια επαφή αργύρου (Ag contact) [25]. Δεξιά: Το δείγμα n^+ -ZnO/n-Si 150°C μετά από την κατασκευή της επαφής Al.

Ανόπτηση

Η τεχνική της ανόπτησης

Η ανόπτηση αποτελεί μια διαδικασία ελεγχόμενης θερμικής επεξεργασίας υλικών, συνήθως μετάλλων ή κραμάτων και απαρτίζεται από τρία διακριτά στάδια: Τη θέρμανση του υλικού, τη διατήρηση του σε υψηλή θερμοκρασία για ένα χρονικό διάστημα και τη σταδιακή ψύξη του. Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την ανύψωση του υλικού σε συγκεκριμένη θερμοκρασία, γνωστή ως θερμοκρασία ανόπτησης, η οποία καθορίζεται με βάση τη σύνθεση και τις επιθυμητές ιδιότητες του. Κατόπιν, το υλικό διατηρείται για καθορισμένη διάρκεια σε αυτή τη θερμοκρασία, ώστε να επιτραπεί η εξασθένιση τυχόν εσωτερικών τάσεων και η ανακρυστάλλωση της ατομικής του δομής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη βελτιστοποίηση των μηχανικών, θερμικών και μικροδομικών ιδιοτήτων του, μειώνοντας τη σκληρότητα του και ενισχύοντας την ολκιμότητα του. Στη συνέχεια, το υλικό ψύχεται σταδιακά και προσεκτικά με ελεγχόμενο ρυθμό, ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός νέων τάσεων ή ατελειών. Αξίζει να αναφερθεί πως η ανόπτηση διαδραματίζει θεμελιώδη ρόλο στην επιστήμη των υλικών καθώς, με τη χειραγώγηση της μικροδομής και των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών, επιτρέπει την τροποποίηση τους και την προσαρμογή τους σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Η διαδικασία της ανόπτησης πραγματοποιείται εντός εξειδικευμένου πυρίμαχου κλιβάνου, ο οποίος ποικίλει σε μέγεθος και διαμόρφωση αναλόγως των επιθυμητών εφαρμογών. Ο ίδιος αποτελείται κυρίως από ένα θερμικά μονωμένο θάλαμο στον οποίο θα τοποθετηθεί το προς ανόπτηση υλικό, θα αναπτυχθεί και θα διατηρηθεί η υψηλή θερμοκρασία και τέλος θα εκτελεστεί η ελεγχόμενη ψύξη. Η ανύψωση της θερμοκρασίας γίνεται με θερμαντικά στοιχεία όπως ηλεκτρικές αντιστάσεις, πηνία επαγωγικής θέρμανσης ή καυστήρες αερίου και ο έλεγχος της με εξειδικευμένα θερμοστοιχεία και συστήματα αυτόματου ελέγχου. Ο κλίβανος μπορεί ακόμα να διαθέτει ειδικό σύστημα ελέγχου της ατμόσφαιρας του εσωτερικού του, έτσι ώστε να αποφευχθεί η οξείδωση ή η μόλυνση αντιδραστικών μετάλλων κατά την ανόπτησή τους. Αυτό επιτυγχάνεται συνήθως με την εισαγωγή αδρανών αερίων, όπως άζωτο ή υδρογόνο. Εν συνεχεία, το σύστημα ελεγχόμενης ψύξης αποτελείται από ανεμιστήρες ή υδρόψυκτους μανδύες που μειώνουν σταδιακά τη θερμοκρασία για την αποφυγή θερμικού σοκ και τη διατήρηση της ομοιομορφίας. Τέλος, ο κλίβανος διαθέτει τα απαραίτητα συστήματα ασφαλείας, όπως

συναγερμούς θερμοκρασίας και μηχανισμούς διακοπής λειτουργίας έκτακτης ανάγκης, ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής λειτουργία του και η προστασία του προσωπικού.

Ανόπτηση των δειγμάτων n^+ -ZnO/n-Si και n^+ -ZnO/Glass

Η ανόπτηση των δειγμάτων n^+ ZnO/n-Si και n^+ ZnO/Glass έγινε με σκοπό την επιδιόρθωση ατελειών στο κρυσταλλικό τους πλέγμα και συνεπώς την βελτίωση των ηλεκτρικών τους ιδιοτήτων. Η ίδια πραγματοποιήθηκε για σαράντα λεπτά σε θερμοκρασία τριακοσίων βαθμών κελσίου και υπό ατμόσφαιρα αζώτου. Συνοψίζοντας, με την εκτέλεση των διεργασιών εναπόθεσης των επαφών και της ανόπτησης ολοκληρώθηκε η κατασκευή των συσκευών n^+ -ZnO/n-Si και n^+ -ZnO/Glass. Έχοντας περάσει από τα δείγματα στις συσκευές, ακολούθησε ο οπτικός και ηλεκτρικός χαρακτηρισμός του οξειδίου του ψευδαργύρου, όπως και οι ηλεκτρικές μετρήσεις που πρόκειται να φανερώσουν τις φωτο-ανιχνευτικές τους ιδιότητες.



Εικόνα 21: Δείγμα n^+ -ZnO/n-Si εντός του κλιβανού ανόπτησης

Χαρακτηρισμός του οξειδίου του ψευδαργύρου

Επόμενο βήμα της ερευνητικής διαδικασίας αποτέλεσε η αξιοποίηση των συσκευών n^+ ZnO/Glass για τον οπτικό και ηλεκτρικό χαρακτηρισμό του οξειδίου του ψευδαργύρου. Συγκεκριμένα, ο οπτικός χαρακτηρισμός πραγματοποιήθηκε για τον προσδιορισμό του ενεργειακού διακένου του οξειδίου του ψευδαργύρου και ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός για την εύρεση της ειδικής του αντίστασης. Σκοπός του χαρακτηρισμού ήταν τα δεδομένα που προέκυψαν να ταυτοποιηθούν με τις αντίστοιχες μετρήσεις που έγιναν από το εργαστήριο που μας απέστειλε τα δείγματα. Ως αποτέλεσμα, επιβεβαιώθηκε πως στην κατοχή μας είχαμε τα σωστά δείγματα καθώς και πως τα ίδια δεν αλλοιώθηκαν κατά την μεταφορά τους.

Οπτικός χαρακτηρισμός

Φασματοφωτομετρία υπεριώδους-ορατού-εγγύς υπέρυθρου (UV-vis-NIR spectrophotometry)

Ο οπτικός χαρακτηρισμός ξεκίνησε με την μέτρηση του φάσματος διαπερατότητας του δείγματος $n^+ZnO/Glass$. Για το λόγο αυτό έγινε χρήση του συστήματος Perkin Elmer UV-vis-NIR Spectrophotometer Lambda 19 το οποίο πραγματοποιεί φασματοφωτομετρία υπεριώδους-ορατού-εγγύς υπέρυθρου. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην μέτρηση της ακτινοβολίας που διαπερνά το δείγμα (διαπερατότητα T) όπως και της ακτινοβολίας που ανακλάται από αυτό.

Σαφέστερα, το φασματοφωτόμετρο λειτουργεί ως εξής: Αρχικά, δύο πηγές φωτός, μία λάμπα δευτερίου για τις υπεριώδεις ακτίνες και μία λάμπα αλογόνου για τις ορατές και υπέρυθρες ακτινοβολίες, παράγουν το φάσμα ακτινοβολιών υπεριώδους-ορατού-εγγύς υπέρυθρου. Κατόπιν, η δέσμη με όλα τα απαιτούμενα μήκη κύματος εισέρχεται διαδοχικά σε δύο μονοχρωμάτορες οι οποίοι την αναλύουν σε όλα τα μήκη κύματος. Ύστερα, με περιστροφική κίνηση και με την χρήση διαφραγμάτων γίνεται η απομόνωση μιας ακτίνας συγκεκριμένου μήκους κύματος κάθε φορά. Εν συνεχεία, η μονοχρωματική αυτή δέσμη διασπάται σε δύο δέσμες. Η μία θα χρησιμοποιηθεί σαν δέσμη αναφοράς και θα ανιχνευτεί απευθείας από έναν φωτοανιχνευτή, ενώ η δεύτερη θα διαπεράσει το δείγμα, πριν καταγραφεί από τον ανιχνευτή. Στο συγκεκριμένο σύστημα οι ανιχνευτές για το υπεριώδες και το ορατό είναι φωτοπολλαπλασιαστές (PMT), ενώ για την κοντινή υπέρυθρη ακτινοβολία είναι ανιχνευτές σουλφιδίου μολύβδου (PbS). Εντέλει, η διαφορά των εντάσεων των δύο δεσμών φανερώνει την διαπερατότητα του δείγματος. Η μέτρηση που λήφθηκε για τα δείγματα μας έγινε για μήκη κύματος από 200 έως 800 nm και με διακριτική ικανότητα 1 nm [28].

Μέθοδος Tauc Plot

Έχοντας συλλέξει τα δεδομένα από τον φασματογράφο, για κάθε τιμή της διαπερατότητας υπολογίστηκε ο συντελεστής απορρόφησης α ως εξής:

$$\alpha = \frac{\ln\left(\frac{1}{T}\right)}{d} \quad [cm^{-1}]$$

(1)

Όπου T η διαπερατότητα και d το πάχος των υμενίων. Σημειώνεται ότι το πάχος των υμενίων είχε μετρηθεί από το εργαστήριο στο Λουξεμβούργο και αναγραφόταν στην συνοδευόμενη με τα δείγματα αναφορά. Επ' ακολούθως, υπολογίστηκε η σταθερά του Planck $h\nu$ βάση του τύπου:

$$h\nu = \frac{1240}{\lambda} \text{ [eV]}$$

(2)

όπου λ το μήκος κύματος σε nm. Επόμενο βήμα ήταν η κατασκευή του διαγράμματος $(a * h\nu)^{1/m}$ ως συνάρτηση του $h\nu$, το οποίο φέρει την ονομασία Tauc plot. Όπως είναι γνωστό, πάνω από το κατώφλι απορρόφησης ο συντελεστής απορρόφησης ακολουθεί τη σχέση $ah\nu \sim (h\nu - E_g)^m$, όπου $m = 2$ για τις έμμεσες μεταβάσεις και $\frac{1}{2}$ για τις άμεσες. Προεκτείνοντας τη γραμμική περιοχή στον άξονα των τετμημένων του διαγράμματος $(a * h\nu)^{1/m} - h\nu$ βρέθηκε γραφικώς το ενεργειακό διάκενο E_g για όλα τα δείγματα $n^+ZnO/Glass$ [29]. Εν κατακλείδι, η παραπάνω διαδικασία αποτέλεσε της εφαρμογή της μεθόδου Tauc Plot για τον προσδιορισμό - επαλήθευση του ενεργειακού διακένου του οξειδίου του ψευδαργύρου, τα αποτελέσματα της οποίας, μαζί με όλους τους ενδιάμεσους υπολογισμούς, αναγράφονται στην ενότητα «Αποτελέσματα».

Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός

Προσκόλληση ηλεκτροδίων χαλκού

Πρώτο βήμα για την εκτέλεση του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού αποτέλεσε η προσκόλληση ηλεκτροδίων στις τέσσερις άκρες των δειγμάτων $n^+ZnO/Glass$. Ως ηλεκτρόδια επιλέχθηκαν λεπτά νήματα χαλκού και η προσκόλληση τους έγινε με χρήση κολλητηριού και καλάι.

Μέθοδος Van der Pauw

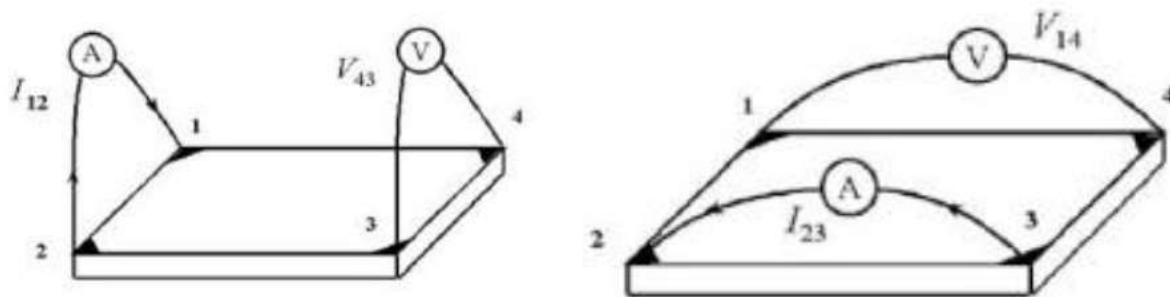
Ακολούθως, πραγματοποιήθηκε εξοικείωση με τον εργαστηριακό εξοπλισμό ηλεκτρικών μετρήσεων, ο οποίος περιλάμβανε μία πηγή συνεχούς ρεύματος Keithley 6220 Precision Current Source και ένα νανοβολτόμετρο Keithley 2182a Nanovoltmetre. Ύστερα, για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης του οξειδίου του ψευδαργύρου αξιοποιήθηκε η μέθοδος Van der Pauw, σύμφωνα με την οποία ισχύει ότι:

$$\rho = \frac{\pi * d}{\ln(2)} * \left(\frac{R_A + R_B}{2} \right) * F$$

(3)

Όπου, ρ η ειδική αντίσταση για ομογενή δείγματα, d το πάχος του υμενίου, R_A και R_B δύο χαρακτηριστικές αντιστάσεις και F ένας παράγοντας ελαχιστοποίησης του σφάλματος που εξάγεται γραφικός μετά τον υπολογισμό των R_A και R_B .

Πρώτο βήμα εφαρμογής της μεθόδου αποτέλεσε η εύρεση των χαρακτηριστικών αντιστάσεων από τα ζεύγη τάσης – ρεύματος. Συγκεκριμένα, εφαρμόζοντας ρεύμα από το ηλεκτρόδιο 1 προς το ηλεκτρόδιο 2 (I_{12}), καταγράφηκε η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων 3 και 4 (V_{34}). Μετά, εφαρμόζοντας ρεύμα από το ηλεκτρόδιο 2 προς το ηλεκτρόδιο 3 (I_{23}), καταγράφηκε η τάση μεταξύ των ηλεκτροδίων 1 και 4 (V_{14}).

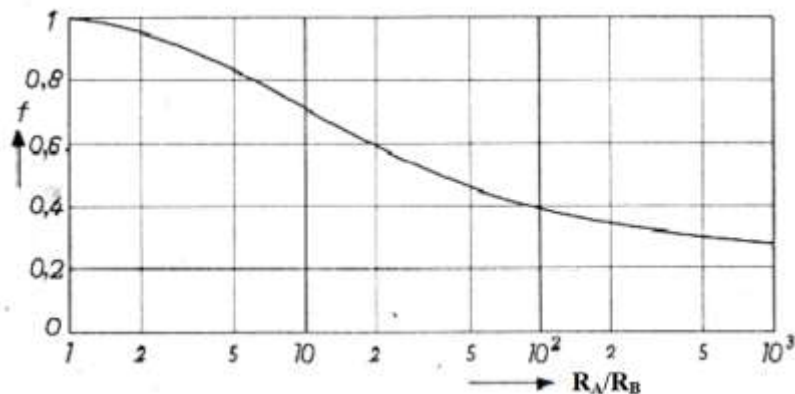


Εικόνα 22: Σημεία μέτρησης πάνω στο δείγμα για τον υπολογισμό των χαρακτηριστικών αντιστάσεων [29]

Εκ τούτου, οι R_A και R_B υπολογίστηκαν ως :

$$R_A = V_{34}/I_{12} \quad (4) \quad R_B = V_{14}/I_{23} \quad (5)$$

και ο συντελεστής F εξήχθη από το παρακάτω διάγραμμα:



Εικόνα 23:Γραφική παράσταση υπολογισμού του παράγοντα F [29]

Έτσι, έγινε ο υπολογισμός της ειδικής αντίστασης για όλα τα δείγματα $n^+ZnO/Glass$ [29]. Κλείνοντας, η εν λόγω διαδικασία αποτέλεσε της εφαρμογή της μεθόδου Van der Pauw για τον προσδιορισμό - επαλήθευση της ειδικής αντίστασης του οξειδίου του ψευδαργύρου, τα αποτελέσματα της οποίας, μαζί και με όλους τους ενδιάμεσους υπολογισμούς, παρουσιάζονται και πάλι στην ενότητα «Αποτελέσματα».

Οπτοηλεκτρονικός χαρακτηρισμός των φωτοανιχνευτών $n^+-ZnO/n-Si$

Εισαγωγή

Όπως αναφέρθηκε, οι διατάξεις $n^+ZnO/n-Si$ ($100^\circ C$, $150^\circ C$, $200^\circ C$) αποτελούν την καρδιά των φωτοανιχνευτών μας και με αυτές πραγματοποιήθηκε πληθώρα φωτοηλεκτρικών μετρήσεων ώστε να διερευνηθεί διεξοδικά η απόκριση τους. Σκοπός των μετρήσεων ήταν η εξαγωγή της χαρακτηριστικής καμπύλης ρεύματος - τάσης (I-V Curve) κατά την ακτινοβόληση τους με πηγές διαφορετικού μήκους κύματος.

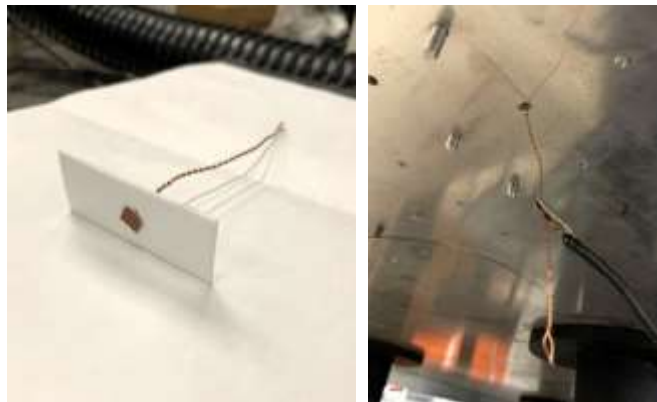
Πειραματική διάταξη

Χώρος κατασκευής και ηλεκτρικές συνδέσεις

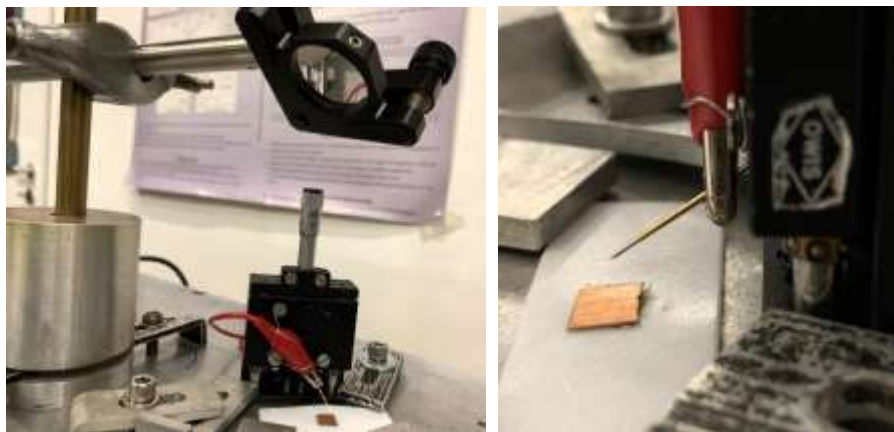
Για την διεξαγωγή των μετρήσεων κατασκευάστηκε πειραματική διάταξη πάνω σε οπτικό πάγκο του εργαστηρίου και όλα τα εξαρτήματα στερεώθηκαν με σφικτήρες, ώστε να εξασφαλισθεί η μέγιστη σταθερότητα. Κύρια προϋπόθεση της πειραματικής διάταξης αποτέλεσε η δημιουργία κυκλώματος μεταξύ των συσκευών και της γεννήτριας τάσης με τρόπο που να επιτρέπει την ακτινοβόληση τους από τις διάφορες πηγές ακτινοβολίας. Για να επιτευχθεί αυτό πραγματοποιήθηκαν οι παρακάτω συνδέσεις:

Η σύνδεση της γεννήτριας με το αρνητικό ηλεκτρόδιο των συσκευών (επαφή αργύρου στην επιφάνεια του πυριτίου) έγινε ως εξής: Επίπεδο ορθογώνιο κομμάτι χαλκού περιβαλλόμενο από πλαστικό τύπου τεφλόν προσκολλήθηκε σε σύρμα χαλκού. Το σύρμα χαλκού διέσχισε μία από τις τρύπες του οπτικού πάγκου, έως ότου να εξέλθει από το κάτω μέρος του. Στη συνέχεια, το κροκοδειλάκι του αρνητικού πόλου της γεννήτριας συνδέθηκε με τη προεξοχή του χάλκινου σύρματος. Τέλος, η τοποθέτηση των συσκευών γινόταν με την πλευρά της επαφής αργύρου πάνω στο επίπεδο κομμάτι χαλκού δημιουργώντας τον αρνητικό πόλο του κυκλώματος και αφήνοντας την εμπρόσθια επιφάνεια του οξειδίου του ψευδαργύρου εκτεθειμένη για ακτινοβόληση.

Από την άλλη, η σύνδεση με το θετικό ηλεκτρόδιο των συσκευών (τρίαινα αλουμινίου στην επιφάνεια οξειδίου του ψευδαργύρου) επιτεύχθηκε με την ακόλουθη συνδεσμολογία: Το κροκοδειλάκι του θετικού πόλου της γεννήτριας προσαρμόστηκε πάνω σε τράπεζα με δυνατότητα κίνησης στον κάθετο άξονα. Το ίδιο συγκρατούσε μια μεταλλική ακίδα που κατέληγε σε οβάλ τελείωμα. Ρυθμίζοντας την τράπεζα στο κατάλληλο ύψος φέρουμε σε επαφή την ακίδα με την τρίαινα αλουμινίου, κλείνοντας έτσι το κύκλωμα. Ολοκληρώνοντας, το οβάλ τελείωμα της ακίδας επέτρεπε την δημιουργία ομαλής επαφής χωρίς να καταστρέφεται ή να διαπερνάται το στρώμα οξειδίου του ψευδαργύρου, γεγονός που είχε παρατηρηθεί κατά τη χρήση μυτερής ακίδας.



Εικόνα 24: Το κομμάτι χαλκού περιβαλλόμενο από πλαστικό τεφλόν και προσκολλημένο πάνω στο σύρμα χαλκού (αριστερά). Το σύρμα χαλκού (αρνητικό ηλεκτρόδιο) όπως προεξέχει κάτω από τον οπτικό πάγκο διασχίζοντας μία από τις τρύπες του (δεξιά).



Εικόνα 25: Καθρέφτης στερεωμένος κατάλληλα ώστε να οδηγεί την ακτινοβολία προς το σημείο τοποθέτησης των διατάξεων (αριστερά). Η μεταλλική ακίδα (θετικό ηλεκτρόδιο) που συγκρατείται από κροκοδειλάκι προσαρμοσμένο πάνω σε τράπεζα (δεξιά).

Μετρητικά όργανα και πειραματικές συνθήκες

Η τροφοδοσία ηλεκτρικής τάσης και η καταγραφή του ρεύματος έγινε με χρήση της γεννήτριας Keithley Series 2400 Sourcemeter. Η γεννήτρια ρυθμίστηκε στην λειτουργία sweep όπου πραγματοποιεί μεταβολή της τάσης τροφοδοσίας από -2V έως 2V καταγράφοντας τις τιμές του παραγόμενου ρεύματος και ο χειρισμός της έγινε από Η/Υ με χρήση του λογισμικού LabView. Κατόπιν, η μέτρηση της ισχύος της προσπίπτουσας κάθε φορά δέσμης πραγματοποιήθηκε με χρήση ισχυόμετρου Scientech 365 Power and Energy Meter.

Εντέλει, για την εκτέλεση των μετρήσεων απαιτούταν συνθήκες σκότους. Για αυτό το λόγο, τα παράθυρα του εργαστηρίου ήταν καλυμμένα με ειδικό υλικό που εμποδίζει την εισροή εξωτερικής ακτινοβολίας, τα φώτα ήταν σβηστά και ο χώρος του πειράματος διαχωριζόταν με ειδικές μαύρες κουρτίνες από το υπόλοιπο εργαστήριο.



Εικόνα 26: Η γεννήτρια Keithley Series 2400 Sourcemeter.

Ακτινοβολήση με μονοχρωματικές πηγές

Για την ακτινοβολήση των συσκευών με ακτινοβολία στο φάσμα του ορατού χρησιμοποιήθηκαν τρεις μονοχρωμάτορες: Ένας laser pointer κόκκινου χρώματος Labtec Notebook Presenter, ένας laser pointer πράσινου χρώματος Kensington και ένας μπλέ φακός Eletrorot. Οι πηγές στερεώθηκαν με χρήση στύλου και δαγκάνας πάνω ακριβώς από τη θέση των συσκευών και με τρόπο που να τις ακτινοβολούν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια των μετρήσεων.



Εικόνα 27: Μονοχρωματικές πηγές ακτινοβολίας από αριστερά προς τα δεξιά: Φακός 405 nm, laser pointer 532 nm, laser pointer 640 nm.

Ακτινοβολήση με υπέρυθρη ακτινοβολία

Για την ακτινοβολήση του δείγματος με υπέρυθρη ακτινοβολία αξιοποιήθηκαν ένα laser διπλανής πειραματικής διάταξης και ένας προσομοιωτής ηλιακής ακτινοβολίας. Αναφορικά με το laser, ήταν το μοντέλο I4-500-1064 της εταιρίας Elforlight με εκπομπή ακτινοβολίας μήκους κύματος 1064nm και μέγιστη ισχύ 1W. Για την εκτροπή της δέσμης του κατασκευάστηκε οπτικός δρόμος χρησιμοποιώντας κάτοπτρα, φακό εστίασης (LB1056-B Convex Lens Thorlabs) και καθρέφτη (ME1-PO1 Round Silver Mirror Thorlabs). Κατόπιν, η ευθυγράμμιση της δέσμης έγινε με τη βοήθεια συναδέλφου τηρώντας όλους τους κανόνες ασφαλείας κατά τον χειρισμό του laser. Τέλος, κάθε ενεργοποίηση και απενεργοποίηση του έγινε ακολουθώντας το κατάλληλο πρωτόκολλο.

Από την άλλη, ο ηλιακός προσομοιωτής είναι μια συσκευή που αναπαράγει τα φασματικά και χωρικά χαρακτηριστικά του φυσικού ηλιακού φωτός για δοκιμαστικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Έτσι, αποτελεί ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στην έρευνα και ανάπτυξη ηλιακών κυττάρων και στις δοκιμές υλικών. Στην διάθεση του εργαστηρίου υπήρχε ο ηλιακός προσομοιωτής Quantum Design Solar Simulator LS0306 και για τα δικά μας πειραματικά ζητούμενα του προσαρμόσαμε βαθυπερατό φίλτρο που αποκόπτει μήκη κύματος μικρότερα των 900nm. Έτσι, απομονώσαμε το υπέρυθρο κομμάτι του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας με απώτερο σκοπό να εκθέσουμε τους φωτοανιχνευτές σε ένα μεγαλύτερο εύρος υπέρυθρων πέρα από την ακτινοβολία των 1064nm που μας προσέδιδε το laser. Τέλος, για την χρήση του ηλιακού προσομοιωτή απαιτούνταν 15 λεπτά προθέρμανσης και ο λαμπτήρας πάντοτε ακτινοβολούσε το δείγμα σε απόσταση 8 – 10 cm.



Εικόνα 28: Το laser υπέρυθρης ακτινοβολίας 1064 nm (αριστερά), η πρόσοψη και η μονάδα ελέγχου του ηλιακού προσομοιωτή (στο κέντρο), η πλάγια όψη του ηλιακού προσομοιωτή (δεξιά).

Λογισμικά συλλογής και επεξεργασίας των μετρήσεων

Ο χειρισμός της γεννήτριας έγινε από Η/Υ με χρήση του λογισμικού LabView. Μάλιστα, το λογισμικό παρείχε την δυνατότητα άμεσης απεικόνισης της καμπύλης I-V αλλά και την επιλογή του βήματος μεταβολής της τάσης, λειτουργίες που στην πορεία των πειραμάτων μας επέτρεψαν να συλλέγουμε και να εξετάζουμε γρήγορα πολλά σετ μετρήσεων επιταχύνοντας την ερευνητική διαδικασία. Επιπλέον, εξυπηρετούσε στην άμεση αποθήκευση και κατηγοριοποίηση των δεδομένων μας. Τέλος, η περαιτέρω ανάλυση των δεδομένων και η εξαγωγή των γραφικών παραστάσεων πραγματοποιήθηκε με χρήση του λογισμικού OriginLab στους Η/Υ του εργαστηρίου.

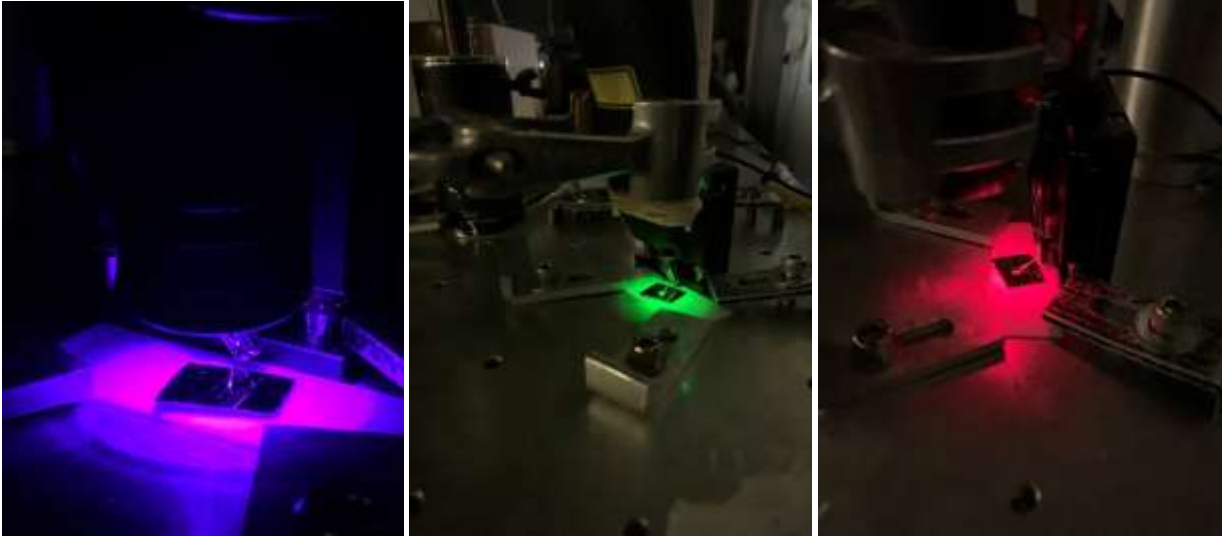
Πειραματική διαδικασία

Κάθε ημέρα διεξαγωγής μετρήσεων ξεκινούσε με την ενεργοποίηση των μηχανημάτων, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η απαραίτητη προθέρμανση τους. Αμέσως μετά, προχωρούσαμε στην εκτέλεση μίας σειράς από voltage sweep μετρήσεις σε συνθήκες σκότους και χωρίς να ακτινοβολείται η συσκευή. Αξίζει να τονίσουμε πως, οι μετρήσεις σε συνθήκες μη ακτινοβολίας αποτελούσαν το πρώτο και αναγκαίο βήμα της πειραματικής διαδικασίας για τους εξής δύο λόγους: Πρώτον, μας επιβεβαίωναν πως έχει δημιουργηθεί σωστή και αξιόπιστη επαφή μεταξύ των συσκευών και των ηλεκτροδίων. Η ορθότητα της επαφής επιβεβαιωνόταν με την εμφάνιση του διοδικού χαρακτήρα των συσκευών κατά την μεταβολή της τάσης από -2V έως 2V ενώ η αξιοπιστία ελεγχόταν με την επί τόπου σύγκριση πολλαπλών διαδοχικών μετρήσεων. Στην περίπτωση όπου ο αναμενόμενος διοδικός χαρακτήρας δεν ήταν ξεκάθαρος ή

οι διαδοχικές μετρήσεις δεν εμφάνιζαν την ζητούμενη επαναληψιμότητα, πραγματοποιήσαμε μικρορυθμίσεις στην τράπεζα της ακίδας, έως ότου να πετύχουμε καλύτερη επαφή.

Δεύτερον, οι μετρήσεις δίχως ακτινοβολία μας παρείχαν για κάθε σετ μετρήσεων μια χαρακτηριστική καμπύλη I-V, η οποία θα λειτουργήσει σαν καμπύλη αναφοράς, ώστε να ερμηνεύσουμε και να συγκρίνουμε ευκολότερα τις μετέπειτα μετρήσεις υπό διάφορες ακτινοβολίες. Επιπροσθέτως, για να επιτύχουμε συνθήκες πλήρους σκότους, χάρτινο κουτί τοποθετούνταν επιπλέον πάνω από την πειραματική διάταξη. Έχοντας επιβεβαιώσει την σταθερότητα και την αξιοπιστία της επαφής μας και έχοντας εξάγει την I-V χαρακτηριστική αναφοράς, ακολούθησε η εκτέλεση των μετρήσεων ακτινοβολώντας τη συσκευή με τις RGB πηγές, κατόπιν με το υπέρυθρο laser και τέλος με τον προσομοιωτή ήλιου.

Σημαντικό σημείο κατά την ακτινοβολία με τις συγκεντρωμένες δέσμες (κόκκινος και πράσινος μονοχρωμάτορας και υπέρυθρο laser) αποτέλεσε η εστίαση της δέσμης στο ενδιάμεσο τμήμα μεταξύ των σκελών της επαφής τρίαυνας. Η συγκεκριμένη ρύθμιση κρίθηκε αναγκαία για τους παρακάτω λόγους: Πρώτον, ήταν σημαντικό η συγκεντρωμένη δέσμη να προσκρούει κυρίως πάνω στο οξειδίο του ψευδαργύρου, καθώς αυτό αποτελεί το υλικό με τις επιθυμητές φωτοηλεκτρικές ιδιότητες και όχι να αντανακλάται από το ασήμι της επαφής τρίαυνας. Ταυτοχρόνως, η δέσμη έπρεπε να ακτινοβολεί περιοχή κοντά στην επαφή, ώστε να υπάρχει άμεση απορρόφηση των ηλεκτρικών φορτίων που δημιουργούνται στο ηλεκτρικό κύκλωμα. Ο συνδυασμός των δύο παραπάνω παραγόντων οδήγησε στην επιλογή των περιοχών με επικάλυψη οξειδίου του ψευδαργύρου μεταξύ των σκελών της επαφής τρίαυνας ως των ιδανικών για την στόχευση laser. Αντιθέτως, οι ευρείες δέσμες του μπλε φακού και του ηλιακού προσομοιωτή κάλυπταν εξολοκλήρου την επιφάνεια της συσκευής, χωρίς συνεπώς να απαιτούνται ρυθμίσεις εστίασης.



Εικόνα 29: Ακτινοβόληση των διατάξεων με ακτινοβολία μήκους κύματος 395 nm, 532 nm και 640 nm (από τα αριστερά προς τα δεξιά)

Μελέτη της χρονικής απόκρισης των φωτοανιχνευτών n^+ -ZnO/n-Si

Εισαγωγή

Ολοκληρώνοντας την μελέτη της φωτοηλεκτρικής συμπεριφοράς των φωτοανιχνευτών n^+ -ZnO/n-Si, η ερευνητική πορεία στράφηκε προς την διερεύνηση της χρονικής τους απόκρισης. Συγκεκριμένα, στόχος αποτέλεσε η καταγραφή και ανάλυση του παραγόμενου ηλεκτρικού σήματος των φωτοανιχνευτών κατά την πάροδο του χρόνου υπό παλμική ακτινοβόληση και χωρίς να τους επιβάλλεται εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Για το λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στην πειραματική διάταξη αλλά και στο τρόπο συλλογής και ανάλυσης των μετρήσεων, όπως παρουσιάζονται παρακάτω.

Πειραματική διάταξη

Μετατροπή της συνεχούς ακτινοβολίας σε παλμική

Για την μετατροπή των πηγών συνεχούς ακτινοβολίας σε παλμικές χρησιμοποιήθηκε chopper με δυνατότητα επιλογής μεταξύ δύο περιστρεφόμενων δίσκων. Οι ίδιοι έφεραν στην επιφάνεια τους ανοίγματα διαφορετικού μήκους επιτρέποντας, κατά την περιστροφή τους, την διακοπή και την επαναφορά της προσπίπτουσας δέσμης ανά ίσα διαδοχικά χρονικά διαστήματα (παλμική συμπεριφορά). Ο chopper υπερυψώθηκε με χρήση βάσης και τοποθετήθηκε στην πορεία της δέσμης ακτινοβολίας με τρόπο που αυτή να διασχίζει τον δίσκο του κατευθυνόμενη προς τη

συσκευή. Έτσι, επιλέγοντας το κατάλληλο δίσκο και ρυθμίζοντας την ταχύτητα περιστροφής του, είμασταν σε θέση να ελέγχουμε την συχνότητα της παλμικής προσπίπτουσας ακτινοβολίας στις συσκευές μας.



Εικόνα 30: Ο Chopper που χρησιμοποιήθηκε για την μετατροπή της συνεχούς ακτινοβολίας σε παλμική

Μετρητικά όργανα

Στη συνέχεια, για την απεικόνιση, ανάλυση και αποθήκευση των καταγραφουσών παλμοσειρών, η γεννήτρια τάσης αντικαταστάθηκε από ένα παλμογράφο Tektronix TDS2012B. Ο ίδιος συνδέθηκε με καλώδιο τύπου BNC σε κροκοδειλάκια στους δύο πόλους της πειραματικής διάταξης, η οποία κατά τα άλλα παρέμεινε η ίδια. Τέλος, από τις διαθέσιμες πηγές χρησιμοποιήθηκαν όλες εκτός του προσομοιωτή ήλιου. Σημειώνεται, ακόμα, πως κατά την ακτινοβολήση με τον μπλε φακό, οπή τοποθετούνταν ακριβώς μπροστά του για την μετατροπή της ευρείας δέσμης σε ένα συγκεντρωμένο σημείο που στη συνέχεια οδηγούνταν στον chopper.

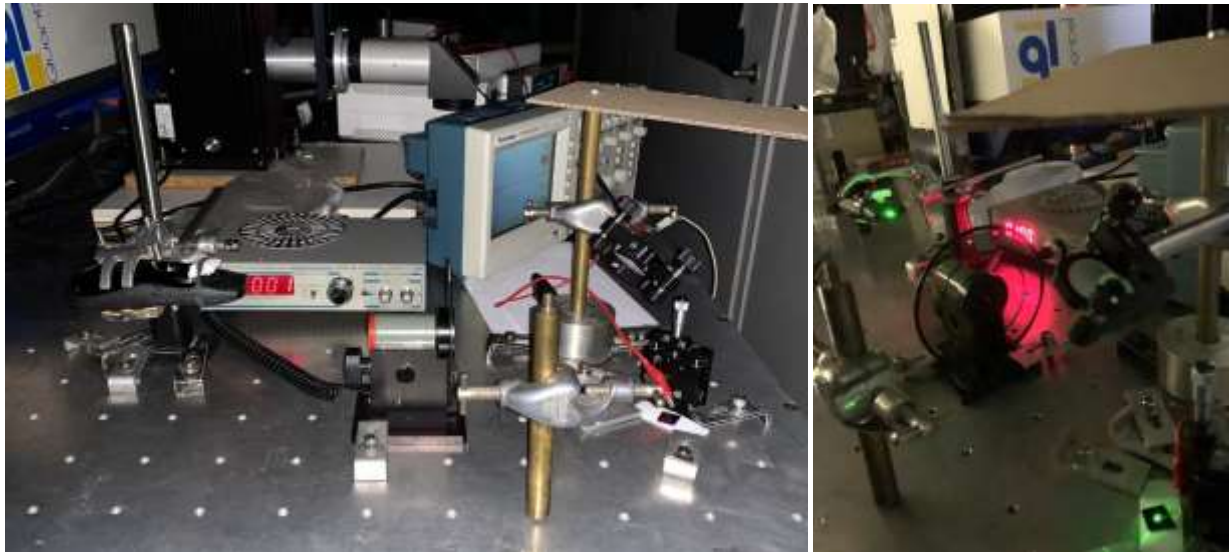


Εικόνα 31: Ο παλμογράφος Tektronix TDS2012B

Πειραματική διαδικασία

Η πειραματική διαδικασία συνοψίζεται στην ακτινοβόληση κάθε συσκευής με παλμική ακτινοβολία συχνοτήτων 4Hz, 10Hz, 100Hz και 1kHz από κάθε διαθέσιμη πηγή. Επιπλέον, αποσκοπούσε στην καταγραφή των εξής δεδομένων: Πρώτον, μίας παλμοσειράς ανά συχνότητα και πηγή ακτινοβολίας και δεύτερον ενός παλμού ανόδου και ενός καθόδου ανά συχνότητα και πηγή ακτινοβολίας. Από την μία, η καταγραφή παλμοσειράς μας φανερώνει πως η προς εξέταση συσκευή αντιλαμβάνεται και διακρίνει κάθε ξεχωριστό παλμό φωτός. Από την άλλη, η απομόνωση και καταγραφή ενός παλμού ανόδου και καθόδου μας επέτρεψε να εξάγουμε τους χρόνους διέγερσης και αποδιέγερσης της συσκευής. Τόσο η καταγραφή της παλμοσειράς, όσο και των μεμονωμένων παλμών ήταν εφικτή αξιοποιώντας τις κατάλληλες λειτουργίες του παλμογράφου.

Η συλλογή μετρήσεων διεξήχθητε ακτινοβολώντας διαδοχικά τους φωτοανιχνευτές. Κατόπιν, η ανάλυση των δεδομένων έγινε και πάλι με τη χρήση του λογισμικού OriginLab και παρουσιάζεται αναλυτικά στην ενότητα «Αποτελέσματα».



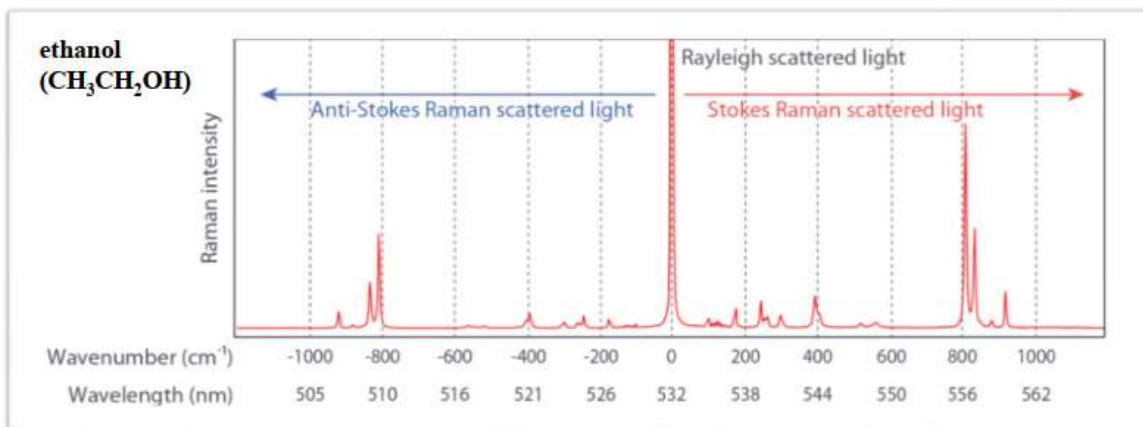
Εικόνα 32: Διάταξη ακτινοβόλησης των φωτοανιχνευτών με παλμική ακτινοβολία (αριστερά), ακτινοβόληση φωτοανιχνευτή με παλμική ακτινοβολία 532 nm και συχνότητας 100 Hz (δεξιά).

Φασματοσκοπία Raman

Η τεχνική της φασματοσκοπίας Raman

Η φασματοσκοπία Raman αποτελεί μία μέθοδο μη-ελαστικής σκέδασης φωτός, η οποία παίρνει το όνομά της από το αντίστοιχο φαινόμενο. Κατά το φαινόμενο Raman, (το οποίο παρατηρήθηκε, για πρώτη φορά το 1928, από τους C. V. Raman και K. S. Krishnan¹ και, ανεξάρτητα, από τους G. Landsberg και L. Madelstam²), όταν κάποιο υλικό σύστημα (αέριο, υγρό, στερεό, άμορφο ή κρυσταλλικό) ακτινοβολείται με μονοχρωματική ακτινοβολία (συνήθως από την περιοχή του ορατού φάσματος), τότε η διάχυτη ακτινοβολία, που σκεδάζεται, (σε διευθύνσεις, γενικά, διαφορετικές από τη διεύθυνση πρόσπτωσης, διέλευσης ή ανάκλασης, αλλά όχι απαραίτητα), περιέχει νέες φασματικές περιοχές, (σε συχνότητες, δηλαδή, διαφορετικές από εκείνη της προσπίπτουσας - διεγείρουσας ακτινοβολίας). Έτσι, μέσω της φασματοσκοπίας Raman μετράται το μήκος κύματος και η ένταση της ανελαστικής σκέδασης του φωτός από τα μόρια. Το σκεδαζόμενο φως “εμφανίζεται” σε μήκη κύματος που παρουσιάζουν μετατόπιση από την προσπίπτουσα ακτινοβολία λόγω των ενεργειών των μοριακών δονήσεων.

Προς περαιτέρω επεξήγηση, οι φασματικές γραμμές Stokes Raman είναι οι φασματικές γραμμές των οποίων η συχνότητα είναι μικρότερη της συχνότητας της προσπίπτουσας ακτινοβολίας λέιζερ και οφείλονται στη σύγκρουση φωτονίων με μόρια που βρίσκονται στη θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση, ενώ οι φασματικές γραμμές Anti-Stokes Raman βρίσκονται σε συχνότητα μεγαλύτερη από της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και οφείλονται στη σύγκρουση φωτονίων με μόρια που βρίσκονται σε διεγερμένες ενεργειακές καταστάσεις. Εν κατακλείδι, τα φάσματα Raman είναι χαρακτηριστικά κάθε μορίου, περιέχουν πληροφορίες για τα δονητικά επίπεδα του μορίου και λόγω των αιχμηρών (στενών) κορυφών επιτρέπουν την αναγνώριση και ταυτοποίηση ενός μορίου από το φάσμα του.



Εικόνα 33: Γράφημα της έντασης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας σε συνάρτηση της διαφοράς συχνότητας (Raman Shift) για το μόριο της αιθανόλης. Φαίνονται η ζώνη ελαστικής σκέδασης (Rayleigh) και οι ζώνες μη-ελαστικής σκέδασης (Stokes Raman και Anti-Stokes)[30]

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του φασματογράφου

Καρδιά του φασματογράφου αποτελεί πρώτον, η μονοχρωματική πηγή φωτός (laser) για την διέγερση του δείγματος και δεύτερον, ένα μέσο ανάλυσης της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας προκειμένου να διαπιστωθεί η ύπαρξη και να προσδιορισθούν τα στοιχεία (συχνότητα, ένταση, εύρος) των ζωνών σκέδασης. Συνοπτικώς, η δέσμη του laser διέρχεται πρώτα από ένα μικρό μονοχρωμάτορα, στη συνέχεια περνά από ένα στοιχείο καθορισμού της πόλωσής του και κατόπιν από ένα φακό εστίασης που την εστιάζει στο εστιακό του επίπεδο. Μετά τον φακό, η συγκλίνουσα δέσμη κατευθύνεται με τη βοήθεια ενός κατόπτρου στο δοκίμιο, το οποίο μπορεί να βρίσκεται σε συνθήκες περιβάλλοντος, σε θάλαμο μεταβλητής θερμοκρασίας - πίεσης, ή και στηριγμένο σε σύστημα μικρομεταφορέων.

Το σκεδαζόμενο φως συλλέγεται με ένα φακό συλλογής και οδηγείται στη σχισμή εισόδου του φασματόμετρου. Στη συνέχεια, το φασματόμετρο αναλύει τη σκεδαζόμενη ακτινοβολία με τη βοήθεια δύο ολογραφικών φραγμάτων, τεσσάρων σχισμών και πέντε καθρεπτών. Το αναλυόμενο φως ανιχνεύεται από έναν φωτοπολλαπλασιαστή που βρίσκεται μετά τη σχισμή εξόδου του φασματόμετρου. Επακολούθως, το ηλεκτρικό σήμα του φωτοπολλαπλασιαστή οδηγείται σε μία συστοιχία ηλεκτρονικών μονάδων, όπου ενισχύεται και καταγράφεται. Η καταγραφή των φασμάτων γίνεται γραμμικά ως προς την συχνότητα (και όχι ως προς το μήκος κύματος) της ακτινοβολίας και βάση των επιλεχθέντων παραμέτρων σάρωσης - καταμέτρησης και του ανοίγματος των σχισμών του φασματόμετρου.

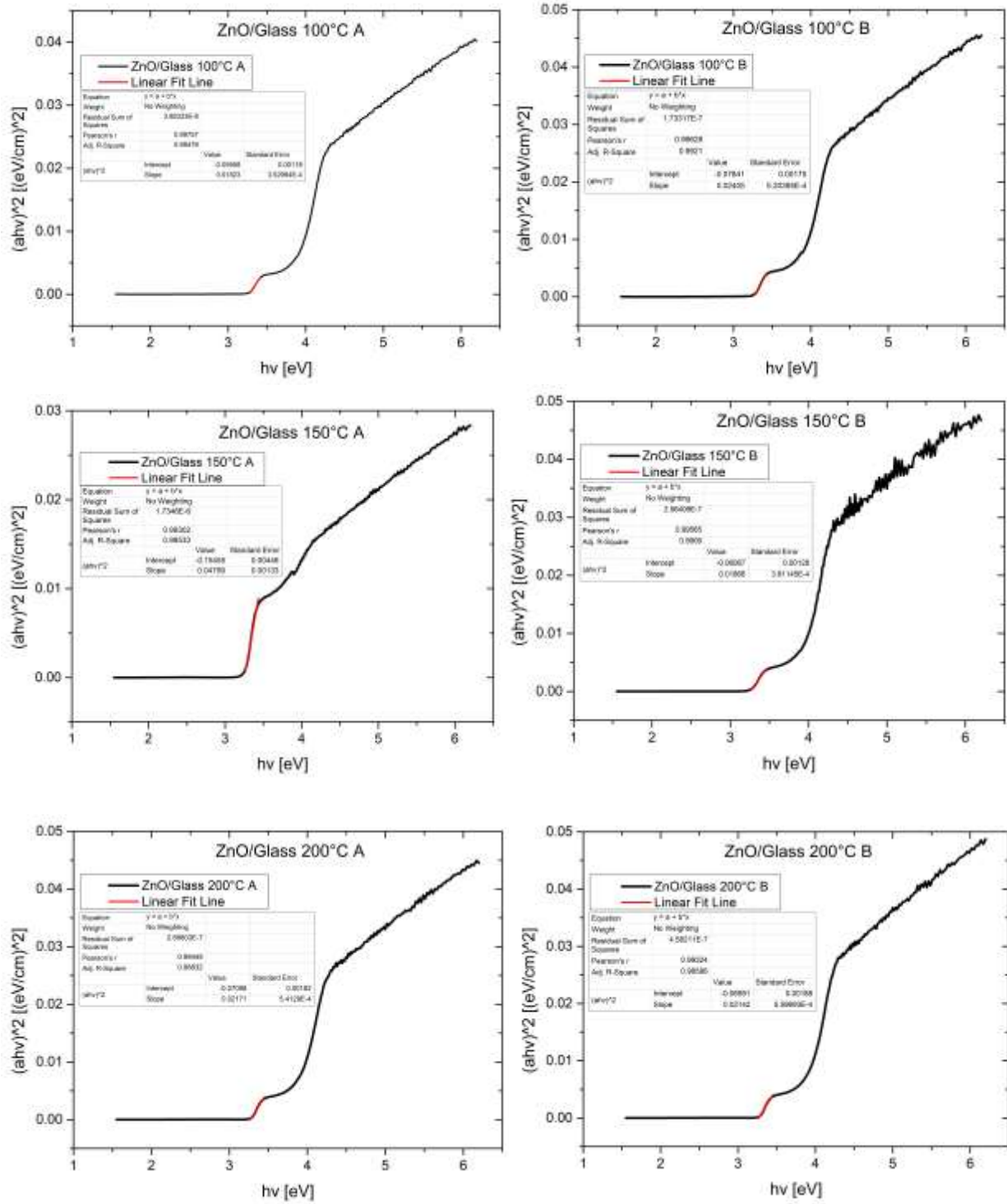
Φασματοσκοπία Raman στα δείγματα n^+ -ZnO/Glass 150°C

Προκειμένου να εξετάσουμε τυχόν μεταβολές στην κρυσταλλική δομή του οξειδίου του ψευδαργύρου μετά την ανόπτηση του όπως και μετά από την ακτινοβολία του με τον φακό υπεριώδους ακτινοβολίας αποφασίσαμε να εκτελέσουμε φασματοσκοπία Raman. Σαφέστερα, η διαδικασία πραγματοποιήθηκε με κάθετη τοποθέτηση του δείγματος. Έτσι η προσπίπτουσα ακτινοβολία του laser είχε την δυνατότητα να εισέλθει βαθύτερα στο λεπτό στρώμα του οξειδίου του ψευδαργύρου προσδίδοντας κατά αυτό το τρόπο ένα αρκετά πιο καθαρό φάσμα Raman.

Αποτελέσματα

Αποτελέσματα οπτικού χαρακτηρισμού

Για κάθε ένα από τα τρία δείγματα n^+ -ZnO/Glass 100°C, 150°C και 200°C συλλέχθηκαν, με τη βοήθεια του φασματοφωτόμετρου UV-vis-NIR, δύο σειρές μετρήσεων διαπερατότητας για μήκη κύματος από 200 nm έως 800 nm με βήμα 1nm. Έπειτα, όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, για κάθε σειρά υπολογίστηκε ο συντελεστής απορρόφησης a , η σταθερά του Planck $h\nu$ και ο όρος $(a * h\nu)^{1/m}$, με τον συντελεστή m να παίρνει την τιμή $1/2$ εφόσον πρόκειται για άμεση μετάβαση. Κατόπιν, έγινε η κατασκευή των διαγραμμάτων $(a * h\nu)^{1/m}$ ως συνάρτηση του $h\nu$ (Tauc Plots) και με την κατάλληλη επεξεργασία ο υπολογισμός του ενεργειακού διακένου και του αντίστοιχου σφάλματος. Τέλος, τα διαγράμματα Tauc και οι τιμές του ενεργειακού διακένου του οξειδίου του ψευδαργύρου παρουσιάζονται εδώ:



Εικόνα 34: Διαγράμματα Tauc για κάθε δείγμα ZnO/Glass

Πίνακας 2: Ενεργειακό διάκενο του οξειδίου του ψευδαργύρου για κάθε δείγμα και το αντίστοιχο σφάλμα

	100°C -A	100°C -B	150°C -A	150°C -B	200°C -A	200°C -B
Band Gap (eV)	3,264	3,182	3,222	3,247	3,226	3,224
Error	0,142	0,17	0,328	0,149	0,181	0,19

Παρατηρούμε πως, οι τιμές του ενεργειακού διακένου που εξήχθησαν από όλα τα δείγματα προσεγγίζουν αρκετά το θεωρητικό ενεργειακό διάκενο του οξειδίου του ψευδαργύρου (3.37eV). Η υπάρχουσα απόκλιση οφείλεται πιθανότητα στο σφάλμα που μετρητικού οργάνου (φασματογράφος) όπως και στο ανθρώπινο σφάλμα κατά την οπτική επιλογή των ορίων της γραμμικής περιοχής των διαγραμμάτων. Εν κατακλείδι, επιβεβαιώσαμε πως στην κατοχή μας είχαμε τα σωστά δείγματα επικαλυμμένα από το επιθυμητό υλικό.

Αποτελέσματα ηλεκτρικού χαρακτηρισμού

Εάν και στόχος αποτέλεσε ο υπολογισμός της ειδικής ηλεκτρικής αντίστασης σε κάθε ένα από τα δείγματα $n^+ZnO/Glass$ 100°C, 150°C και 200°C, επιτεύχθηκε μόνο για το δείγμα των 150°C. Αυτό συνέβη διότι η προσκόλληση των τεσσάρων ηλεκτροδίων χαλκού στις άκρες των δειγμάτων αποδείχθηκε ιδιαίτερα δύσκολη και χρονοβόρα. Συνεπώς, λόγω βιασύνης στην πρόοδο των πειραμάτων, ηλεκτρόδια προσκολλήθηκαν μόνο στο δείγμα $n^+ZnO/Glass$ 150°C και εφαρμόσαμε δύο φορές την μεθόδου Van der Pauw συλλέγοντας τα ακόλουθα αποτελέσματα:

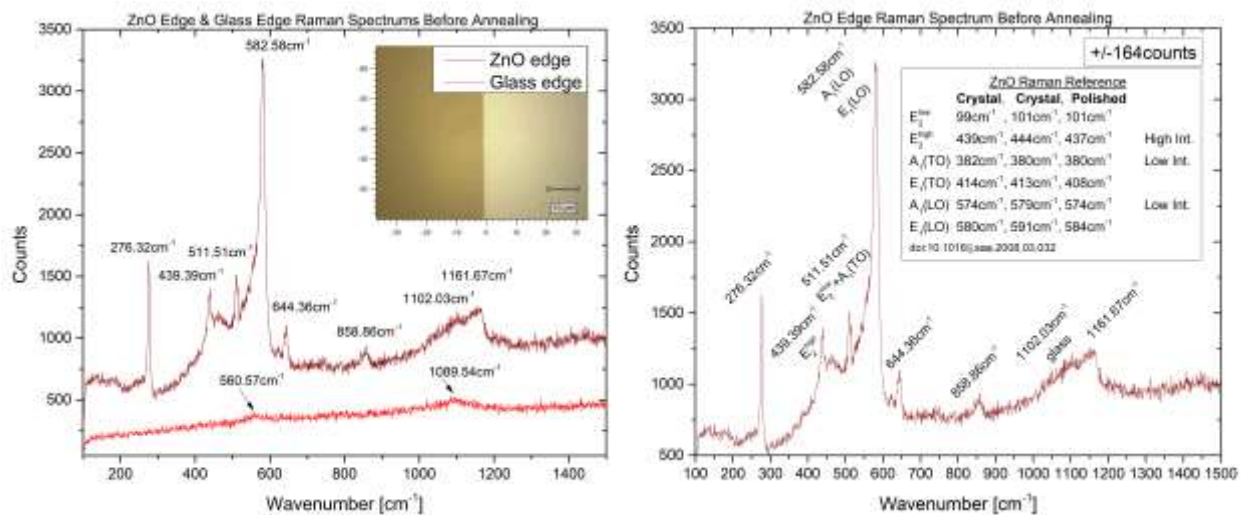
Πίνακας 3: Αποτελέσματα και ενδιάμεσοι υπολογισμοί της μεθόδου Van der Pauw στο δείγμα ZnO/Glass 150°C

d [cm]	δd [cm]	RA [Ω]	δRA [Ω]	RB [Ω]	δRB [Ω]	RA/RB	RB/RA	F	ρ [Ω*cm]	δρ [Ω*cm]	σ [S/cm]	δσ [S/cm]
2.09E-05	1.00E-06	327	4	409	6	0.799511	1.250765	0.98	0.034162	0.001668	29.2722	1.429647
2.09E-05	1.00E-06	323	1	392.7	0.5	0.822511	1.215789	0.98	0.03322	0.00159	30.10248	1.441077

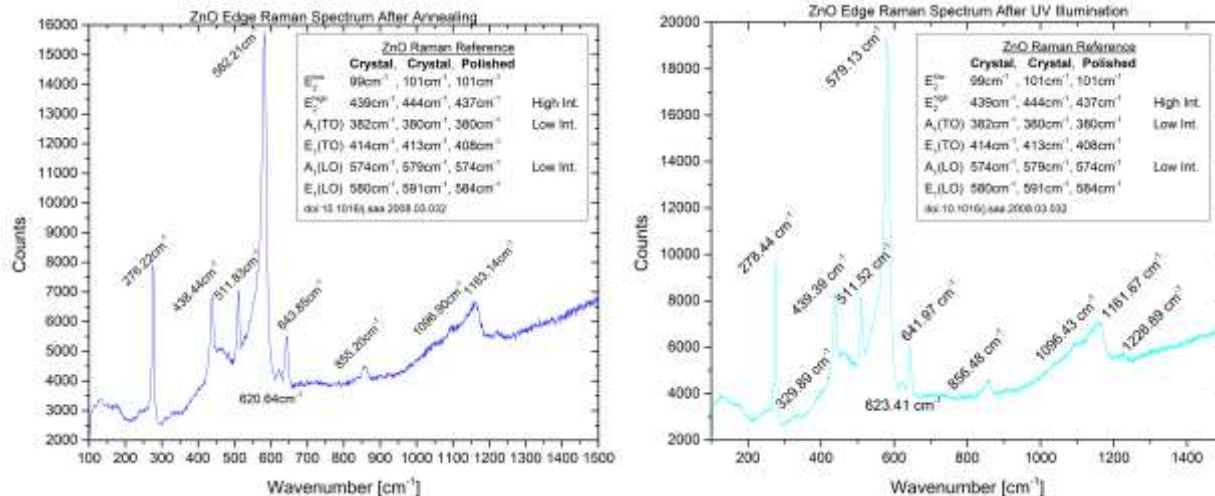
Βλέπουμε πως, και στις δύο περιπτώσεις, η αγωγιμότητα σ που υπολογίστηκε βρίσκεται εντός των ορίων που έθεσε το LIST ($\sigma = 50$ S/cm με $\delta\sigma = 20$ S/cm).

Αποτελέσματα φασματοσκοπίας Raman

Παραθέτονται τα τρία φάσματα Raman που συλλέχθηκαν (πριν την ανόπτηση, μετά την ανόπτηση και μετά από την ακτινοβολία με τον UV φακό). Στο ένθετο των διαγραμμάτων αναφέρονται οι ενεργειακές καταστάσεις ταλάντωσης των μορίων ZnO όπως προκύπτουν στην βιβλιογραφία.



Εικόνα 35: Φάσματα Raman του ZnO προ ανόπτησης και ακτινοβολίας

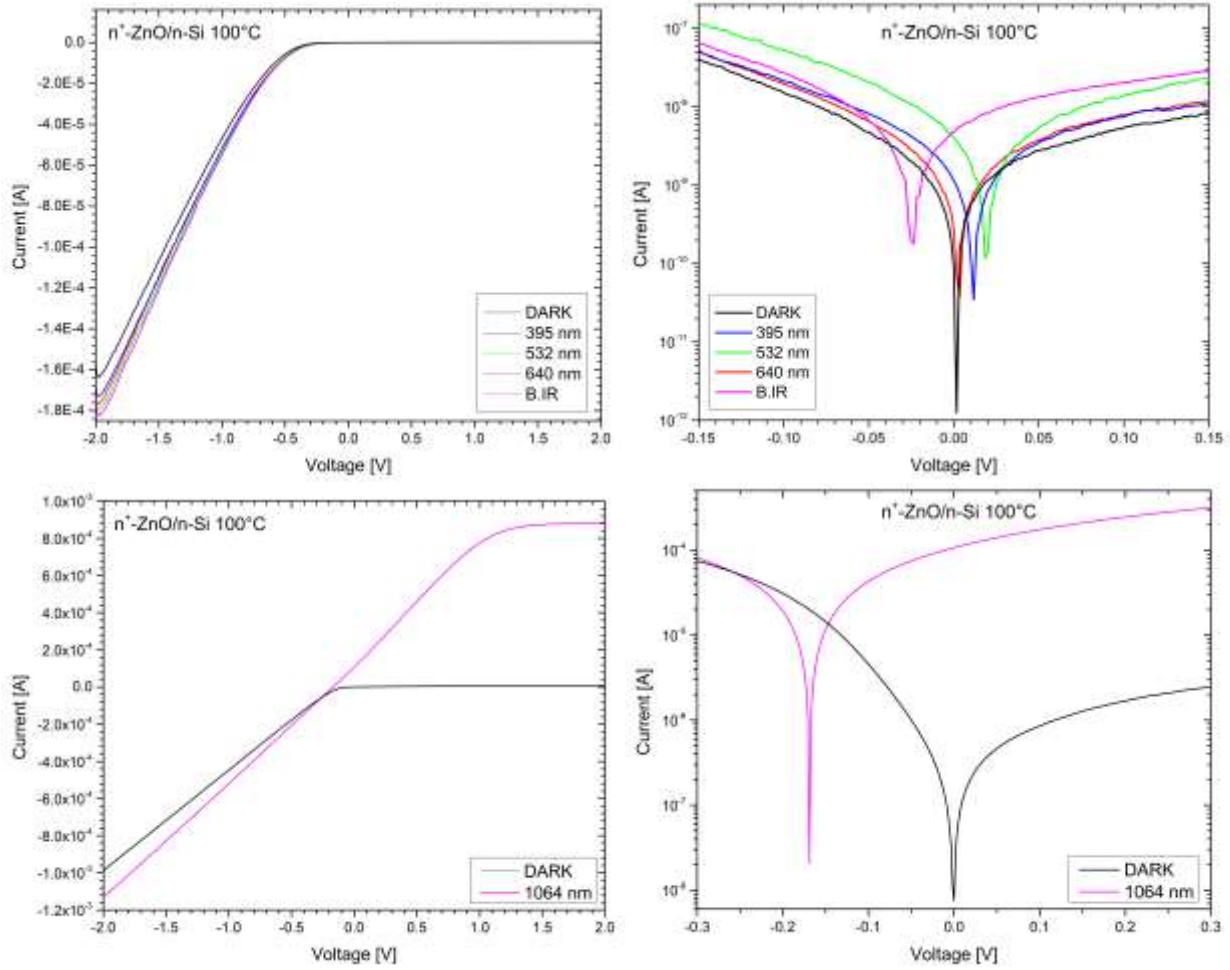


Εικόνα 36: Φάσματα Raman του ZnO κατόπιν ανόπτησης (αριστερά) και έπειτα από ακτινοβολία με UV ακτινοβολία (δεξιά)

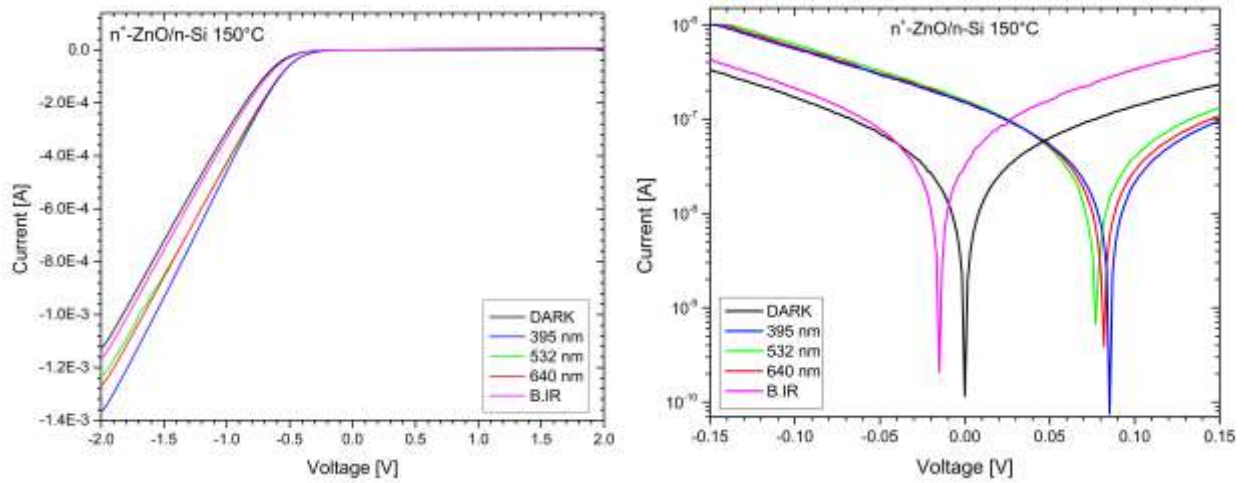
Εξετάζοντας τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές πως το φάσμα Raman του οξειδίου του ψευδαργύρου δεν φέρει αλλαγές μετά την ανόπτηση ή έπειτα από ακτινοβολία με UV ακτινοβολία. Ταυτοχρόνως, βλέπουμε με τη βοήθεια του ενθέτου πως οι κορυφές που εμφανίζονται στο φάσμα αντιστοιχούν με την αντίστοιχη βιβλιογραφία επιβεβαιώνοντας έτσι τη φύση του υλικού μας.

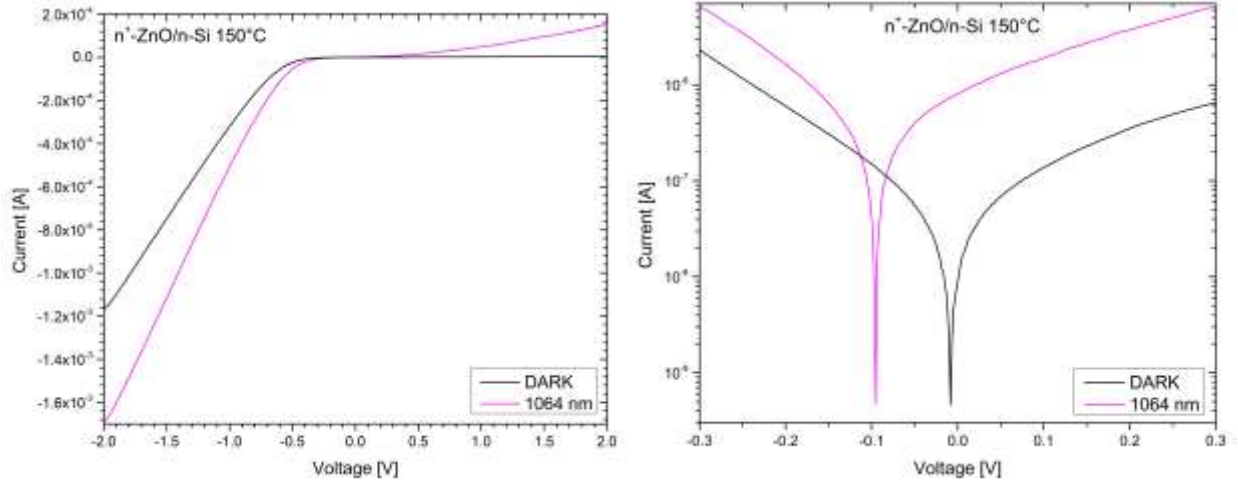
Αποτελέσματα οπτοηλεκτρικού χαρακτηρισμού

Στα παρακάτω διαγράμματα συνοψίζεται ο φωτοηλεκτρικός χαρακτήρας των τριών συσκευών $n^+ZnO/n-Si$ 100°C, 150°C και 200°C. Συγκεκριμένα, για κάθε συσκευή παρουσιάζεται πρώτον η χαρακτηριστική καμπύλη I-V κατά την ακτινοβολία με μήκη κύματος 395 nm, 532 nm, 640 nm και B.IR (broadband IR ~800-1300 nm). Κατά δεύτερων, τοποθετείται ξεχωριστά και η καμπύλη I-V κατά την ακτινοβολία με μήκος κύματος 1064 nm. Τέλος, κάθε I-V γραφική συνοδεύεται από την αντίστοιχη ημιλογαριθμική της καμπύλη που φανερώνει την τάση ανοιχτοκύκλωσης της διάταξης σε κάθε εκδοχή ακτινοβολίας. Την παρουσίαση των διαγραμμάτων διαδέχεται η ποιοτική και ποσοτική ανάλυση τους.

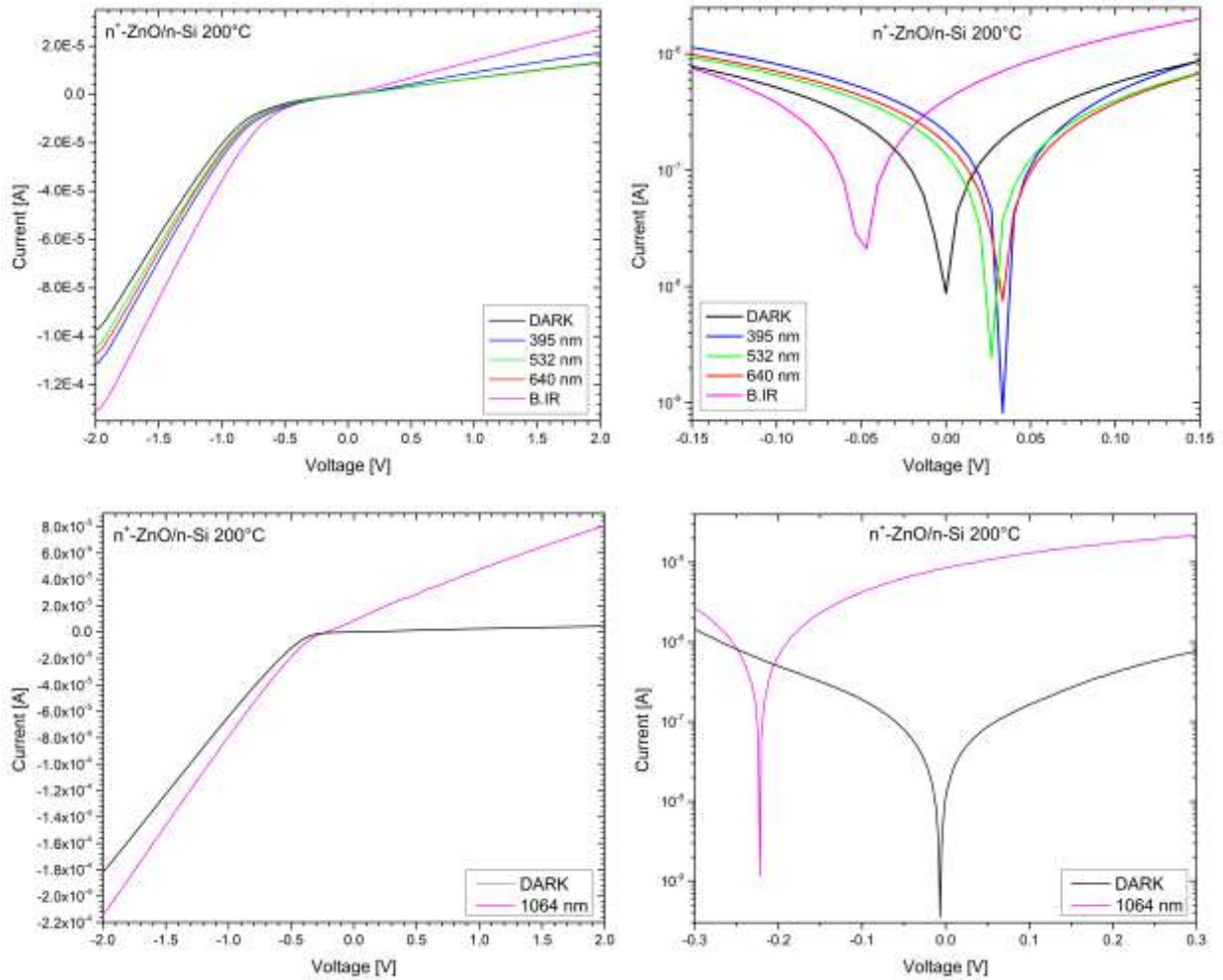


Εικόνα 37: I-V χαρακτηριστικές και οι αντίστοιχες ημιλογαριθμικές τους καμπύλες για τον φωτοανιχνευτή ZnO/n-Si 100°C. Επάνω: Συνθήκες σκότους, UV, ορατής και B.I.R ακτινοβολίας. Κάτω: Υπέρυθη ακτινοβολία 1064 nm.





Εικόνα 38: I-V χαρακτηριστικές και οι αντίστοιχες ημιλογαριθμικές τους καμπύλες για τον φωτοανιχνευτή ZnO/n-Si 150°C. Επάνω: Συνθήκες σκότους, UV, ορατής και B.IR ακτινοβολίας. Κάτω: Υπέρυθη ακτινοβολία 1064 nm.



Εικόνα 39: I-V χαρακτηριστικές και οι αντίστοιχες ημιλογαριθμικές τους καμπύλες για τον φωτοανιχνευτή ZnO/n-Si 200°C. Επάνω: Συνθήκες σκότους, UV, ορατής και B.IR ακτινοβολίας. Κάτω: Υπέρυθη ακτινοβολία 1064 nm.

Ποιοτική ανάλυση αποτελεσμάτων

Εξετάζοντας τα παραπάνω γραφήματα επιβεβαιώνεται η θεωρητική λειτουργία των φωτοανιχνευτικών διατάξεων. Σαφέστερα, από τις I-V γραφικές γίνεται καταρχήν αντιληπτό πως σε συνθήκες σκότους οι διατάξεις $n^+ZnO/n-Si$ 100°C και $n^+ZnO/n-Si$ 150°C παρουσιάζουν διοδικό χαρακτήρα, άγοντας στην περιοχή των αρνητικών τάσεων και εμφανίζοντας σχεδόν μηδενική τιμή ρεύματος στη περιοχή των θετικών τάσεων. Ωστόσο, ο διοδικός χαρακτήρας εμφανίζεται αλλοιωμένος για την διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ 200°C καθώς παρατηρείται αυξημένη ροή ρεύματος κατά την ορθή πόλωση.

Κατόπιν, εξετάζοντας τη συμπεριφορά των διατάξεων υπό ακτινοβολία στο φάσμα του υπεριώδους και του ορατού παρατηρούμε πως, οι διατάξεις $n^+ZnO/n-Si$ 100°C και $n^+ZnO/n-Si$ 150°C διατηρούν την ίδια διοδική συμπεριφορά με μεγαλύτερα κατά απόλυτη τιμή ρεύματα στην περιοχή αγωγής λόγω των παραγόμενων φωτοφορέων που προσθέτουν στο ρεύμα πόλωσης. Ο $n^+ZnO/n-Si$ 200°C εμφανίζει επίσης αυξημένη απόκριση στην περιοχή αγωγής αλλά και πάλι κακή μονωτική λειτουργία στην περιοχή των θετικών τάσεων.

Στην συνέχεια, κατά την ακτινοβολία με υπέρυθη ακτινοβολία ο διοδικός χαρακτήρας και των τριών διατάξεων αλλοιώνεται με την εμφάνιση θετικού φωτορεύματος στην περιοχή ορθής πόλωσης. Βέβαια, το ίδιο είναι αρκετά μικρότερο κατά απόλυτη τιμή από το αντίστοιχο ρεύμα κατά την αναστροφή πόλωση. Σε αυτό το σημείο τονίζεται πως η εν λόγω συμπεριφορά γίνεται αντιληπτή κυρίως κατά την ακτινοβολία των διατάξεων με το laser υπέρυθρης ακτινοβολίας (1064 nm) και όχι τόσο κατά την ακτινοβολία με τον προσομοιωτή ήλιου (B.IR) ο οποίος θεωρητικά φέρει ένα μεγάλο εύρος ακτινοβολιών στο φάσμα του υπέρυθρου. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στην μεγαλύτερη ισχύ και πυκνότητα ακτινοβολίας του laser ανά μονάδα επιφάνειας. Σαφέστερα, το ίδιο μπορούσε να εστιαστεί ακριβώς πάνω στην επιφάνεια οξειδίου του ψευδαργύρου των διατάξεων ενώ η φωτεινή δέσμη του προσομοιωτή πάντοτε υπερκάλυπτε τα δείγματα.

Με βάση τα παραπάνω γίνονται αντιληπτές οι δύο λειτουργικές καταστάσεις των διατάξεων. Από την μία, επιβεβαιώνεται η ικανότητα ανίχνευσης ακτινοβολίας σε ολόκληρο το φάσμα υπεριώδους – ορατού – υπέρυθρου κατά την αρνητική πόλωση και από την άλλη γίνεται αντιληπτή η ικανότητα επιλεκτικής ανίχνευσης υπέρυθρης ακτινοβολίας κατά την ορθή πόλωση.

Στη συνέχεια, οι ημιλογαριθμικές καμπύλες μας πληροφορούν για την τάση ανοιχτοκύκλωσης του κυκλώματος σε κάθε συνθήκη ακτινοβολίας. Με άλλα λόγια, φανερώνουν την τιμή της επιβαλλόμενης τάσης, κατά την μεταβολή της από -2V σε 2V, για την οποία τα αντικρουόμενα εσωτερικά ρεύματα της συσκευής αλληλοεξουδετερώνονται τονίζοντας έτσι και τον επιλεκτικό χαρακτήρα της συσκευής κατά την συνθήκη μηδενικής πόλωσης. Εδώ, τα πειραματικά αποτελέσματα και των τριών διατάξεων μπορούν να συνοψισθούν στις ακόλουθες προτάσεις:

Πρώτον, σε συνθήκες σκότους και οι τρεις διατάξεις εμφανίζουν τάση ανοιχτοκύκλωσης στα 0V, όπως είναι αναμενόμενο, καθώς βρίσκονται σε ισορροπία και δεν υπάρχει ακτινοβολία για την δημιουργία φωτοφορέων.

Δεύτερον, κατά την ακτινοβολία με υπεριώδη ακτινοβολία, και οι τρεις διατάξεις εμφανίζουν θετική τάση ανοιχτοκύκλωσης. Βάση της λειτουργίας των διατάξεων, όπως αναπτύχθηκε στο θεωρητικό κομμάτι της εργασίας, η δημιουργία φορέων στο οξειδίο του ψευδαργύρου και συνεπώς η ροή ρεύματος από αυτό προς το πυρίτιο απαιτεί την εφαρμογή θετικής τάσης για την εξουδετέρωση της, συντελώντας στην εμφάνιση θετικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης. Το ίδιο συμβαίνει και για την ακτινοβολία στο φάσμα του ορατού. Ειδικότερα, παρόλο που φωτοφορείς δημιουργούνται και στα δύο υλικά, υπερισχύουν αυτοί που προέρχονται από τις ελαττωματικές καταστάσεις εντός του ενεργειακού διακένου του οξειδίου του ψευδαργύρου και θα κατευθυνθούν πάλι προς το πυρίτιο.

Από την άλλη, ακτινοβολώντας με υπέρυθρη ακτινοβολία, οι τρεις διατάξεις εμφανίζουν αρνητική τάση ανοιχτοκύκλωσης. Σε αυτή την περίπτωση φωτοφορείς δημιουργούνται στο πυρίτιο, κινούνται προς το οξειδίο του ψευδαργύρου και συνεπώς η ροή τους αντισταθμίζεται με την εφαρμογή αρνητικής τάσης πόλωσης. Έτσι, αιτιολογείτε η καταγραφή αρνητικής τάσης ανοιχτοκύκλωσης.

Εν κατακλείδι, θετικές τιμές τάσης ανοιχτοκύκλωσης υποδεικνύουν ροή συνολικού αρνητικού ρεύματος (από το οξειδίο του ψευδαργύρου προς το πυρίτιο) κατά την απουσία πόλωσης. Αντιστοίχως, αρνητικές τιμές τάσης ανοιχτοκύκλωσης υποδηλώνουν ροή συνολικού θετικού ρεύματος κατά την απουσία πόλωσης. Έτσι, επιβεβαιώνεται και η επιπλέον λειτουργική ικανότητα των συσκευών, δηλαδή η διάκριση της υπέρυθρης ακτινοβολίας από την υπεριώδη-ορατή ακτινοβολία κατά την συνθήκη της μηδενικής πόλωσης με έλεγχο της πολικότητας του παραγόμενου φωτορεύματος.

Ποσοτική ανάλυση αποτελεσμάτων

Όσον αφορά την περιοχή αγωγής (-2V έως 0V), εξετάζουμε την απόκριση των ανιχνευτών στα -2V. Παρατηρούμε πως, τόσο κατά τη συνθήκη σκότους όσο και για ακτινοβολία στο φάσμα UV-vis-B.IR, ο φωτοανιχνευτής $n^+ZnO/n-Si$ 150°C προσδίδει μίας τάξης μεγαλύτερο σήμα, -1120 μA με -1360 μA , από τις άλλες δύο διατάξεις. Συγκεκριμένα, το μετρούμενο ρεύμα για τους φωτοανιχνευτές $n^+ZnO/n-Si$ 100°C και $n^+ZnO/n-Si$ 200°C είναι μεταξύ των -90 μA και -180 μA . Στη συνέχεια, κατά την ακτινοβολία με το IR laser 1064 nm η απόκριση των διατάξεων $n^+ZnO/n-Si$ 100°C και $n^+ZnO/n-Si$ 150°C είναι περίπου -1120 μA και -1680 mA αντίστοιχα, ενώ η διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ 200°C παρουσιάζει κατά μια τάξη μεγέθους μικρότερο σήμα στα περίπου -216 μA . Επιπλέον, υπολογίστηκε για κάθε διάταξη η ποσοστιαία διαφορά του σήματος κάθε ακτινοβολίας στα -2V από το σήμα κατά τη συνθήκη σκότους στα -2V ως ένας δείκτης ποιότητας του ανιχνευτή. Έτσι, προέκυψε ο παρακάτω πίνακας, στην τελευταία σειρά του οποίου αναγράφεται ο μέσος όρος των ποσοστιαίων διαφορών για κάθε διάταξη:

	δA [%]		
	$n^+ZnO/n-Si$ 100oC	$n^+ZnO/n-Si$ 150oC	$n^+ZnO/n-Si$ 200oC
395 nm	6.81%	21.43%	14.07%
532 nm	10.19%	9.82%	7.96%
640 nm	8.51%	13.39%	10.26%
1064 nm	14.05%	44.83%	17.76%

Είναι ξεκάθαρο πως ο ανιχνευτής $n^+ZnO/n-Si$ 150°C παρουσιάζει την μεγαλύτερη κατά μέσο όρο ποσοστιαία απόκλιση σήματος ακτινοβολίας από το σήμα σκότους στα -2V και μάλιστα προηγείται κατά δέκα ποσοστιαίες μονάδες από τον δεύτερο καλύτερο ανιχνευτή.

Κατόπιν, στην περιοχή ορθής πόλωσης (0V έως 2V), διερευνούμε την απόκριση των ανιχνευτών στα +2V. Γίνεται αντιληπτό πως, τόσο κατά την απουσία ακτινοβολίας όσο και κατά την ακτινοβολία στο φάσμα UV-vis-B.IR, το ρεύμα που παρουσιάζουν οι συσκευές δεν είναι απόλυτα μηδέν αλλά λαμβάνει μια μικρή τιμή (< 20 μA στα +2V). Η ίδια, βέβαια, είναι εμφανώς μικρότερη από τη τιμή του θετικού φωτορεύματος που δημιουργεί το IR laser 1064 nm.

Συγκεκριμένα, η διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ $100^\circ C$ παρουσιάζει τη μεγαλύτερη τιμή ρεύματος στα $+2V$, περίπου $880 \mu A$, ακολουθεί η διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ $150^\circ C$ με $160 \mu A$ και τέλος ο ανιχνευτής $n^+ZnO/n-Si$ $200^\circ C$ με απόκριση $80 \mu A$.

Αναφορικά με την τάση ανοιχτοκύκλωσης, παρατηρούμε πως για ακτινοβολία UV-vis ο ανιχνευτής $n^+ZnO/n-Si$ $150^\circ C$ παρουσιάζει το εντονότερο φωτοβολταϊκό φαινόμενο με τιμές τάσης ανοιχτοκύκλωσης που κυμαίνονται από $0.07V$ έως $0.09V$. Αντιθέτως, οι άλλες δύο διατάξεις για το ίδιο φάσμα ακτινοβολίας εμφανίζουν τάση ανοιχτοκύκλωσης από $0.01V$ έως $0.03V$. Εξετάζοντας κατόπιν την τάση ανοιχτοκύκλωσης που προκύπτει από την ακτινοβολία με το IR laser 1064 nm διαπιστώνουμε πως και οι τρεις διατάξεις δίνουν κατά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη απόκριση. Πρωτοστατεί ο ανιχνευτής $n^+ZnO/n-Si$ $200^\circ C$ με απόκριση περίπου $0.22V$, πολύ κοντά ακολουθεί η απόκριση του ανιχνευτή $n^+ZnO/n-Si$ $100^\circ C$ στα $0.17 V$, και τέλος ο ανιχνευτής $n^+ZnO/n-Si$ $150^\circ C$ με τάση ανοιχτοκύκλωσης περίπου $0.1V$.

Κλείνοντας, οφείλουμε να τονίσουμε πως η παρούσα ποσοτική ανάλυση είναι ενδεικτική καθώς διαπιστώσαμε πως το ρεύμα που καταγράφουν τα μετρητικά μας όργανα εξαρτάται σε ένα βαθμό από την πίεση με την οποία η ακίδα ακουμπά την επαφή αλουμινίου. Με τη σειρά της, η πίεση – δύναμη με την οποία η ακίδα ακουμπούσε την επαφή αποτέλεσε ένα μέγεθος που δεν μπορούσαμε να μετρήσουμε ή να ελέγξουμε άμεσα. Παρόλα αυτά, τα νούμερα που παρουσιάστηκαν εδώ είναι σε συμφωνία με παρόμοιες εργασίες.

Συμπεράσματα οπτοηλεκτρονικού χαρακτηρισμού

Συμπερασματικά, καταλήγουμε πως και οι τρεις διατάξεις φέρουν την ικανότητα της ανίχνευσης ευρυζωνικής ακτινοβολίας (στο φάσμα υπεριώδους – ορατού – υπέρυθρου) κατά την ανάστροφη πόλωση τους όπως και την ικανότητα της διάκρισης μεταξύ υπεριώδους-ορατής και υπέρυθρης ακτινοβολίας στις συνθήκες μηδενικής και ορθής πόλωσης. Ωστόσο, συγκρίνοντας τους μεταξύ τους δεν είναι ξεκάθαρο εάν κάποια φέρει βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Ειδικότερα, φαίνεται πως οι ανιχνευτές $n^+ZnO/n-Si$ $100^\circ C$ και $n^+ZnO/n-Si$ $200^\circ C$ συμφωνούν στις τιμές των αποκρίσεων τους με τον $n^+ZnO/n-Si$ $200^\circ C$ ωστόσο να πάσχει στο κομμάτι του διοδικού χαρακτήρα. Ταυτοχρόνως, ο ανιχνευτής $n^+ZnO/n-Si$ $150^\circ C$ δείχνει να υπερτερεί καθώς προσδίδει ισχυρότερη απόκριση από τους άλλους δύο, εμφανίζει τη μεγαλύτερη ποσοστιαία απόκλιση των σημάτων κατά την ακτινοβολία από τη χαρακτηριστική σκότους στην περιοχή

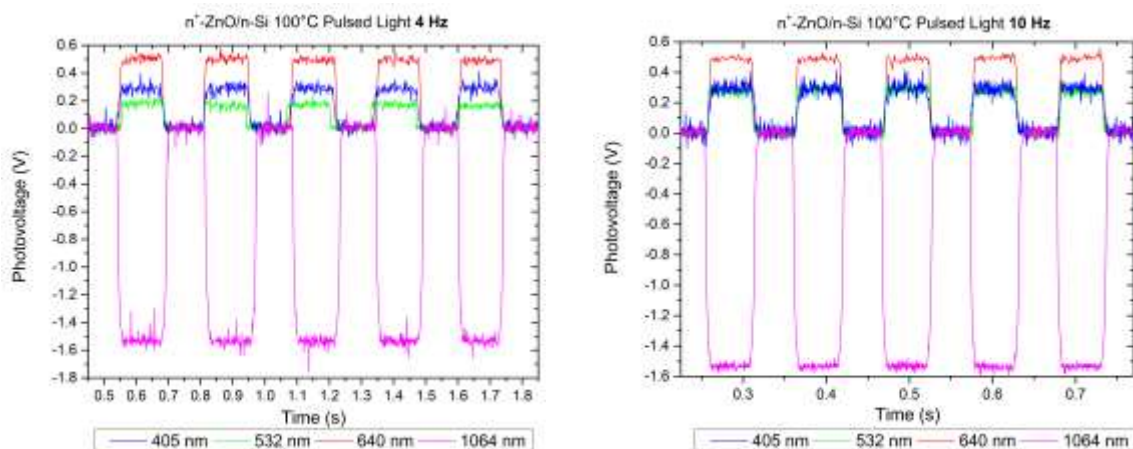
αγωγής όπως και ενισχυμένο φωτοβολταϊκό φαινόμενο και τέλος έχει καλή διοδική συμπεριφορά.

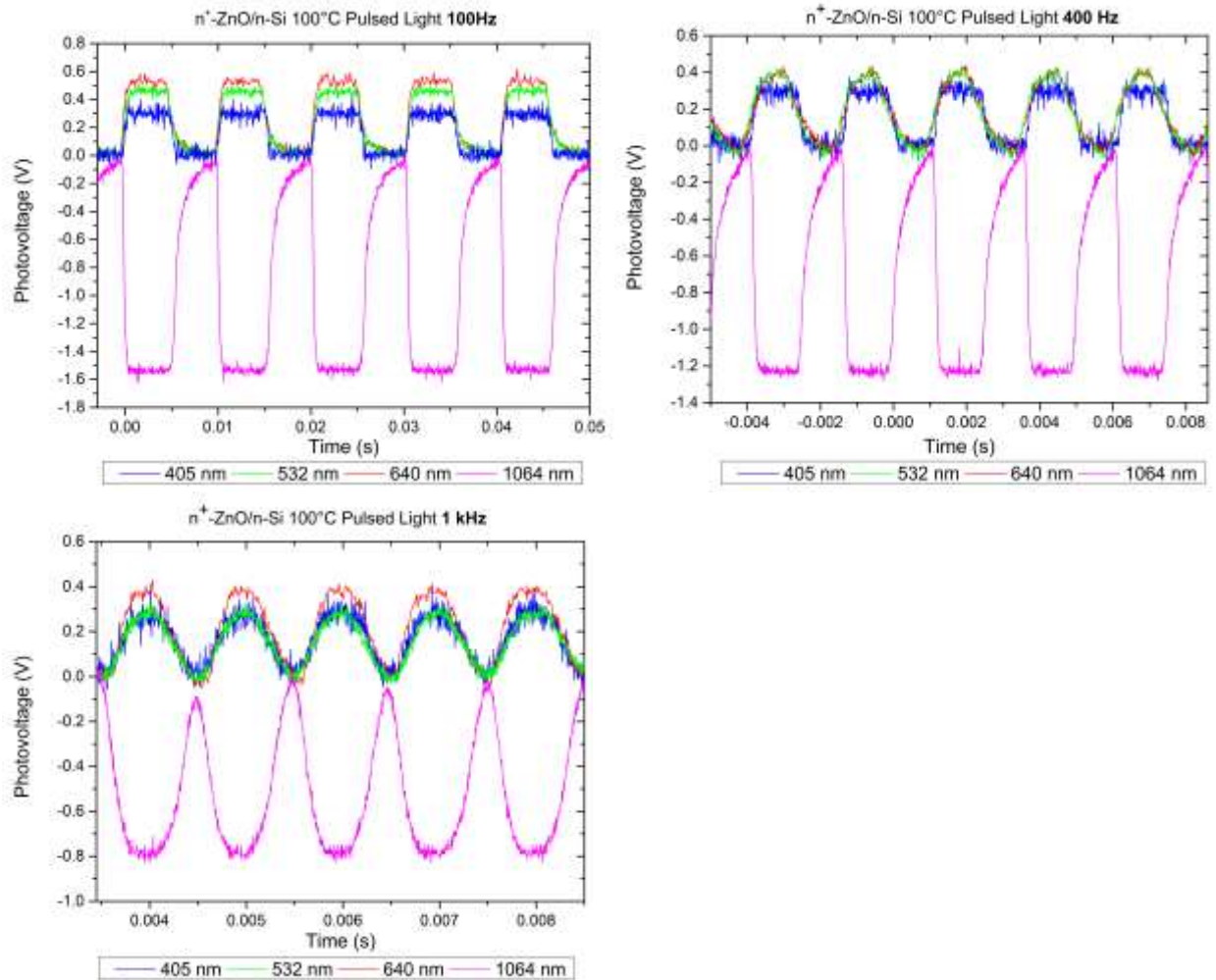
Επιπλέον, με βάση τα παραπάνω, δεν εντοπίζουμε κάποια συστηματικότητα μεταξύ της θερμοκρασίας εναπόθεσης του οξειδίου του ψευδαργύρου (και συνεπώς της διαφορετικής συγκέντρωσης φορέων) και των φωτοανιχνευτικών αποκρίσεων. Υπενθυμίζουμε πως οι διατάξεις $n^+ZnO/n-Si$ 150°C και $n^+ZnO/n-Si$ 200°C έχουν ίδια τάξη συγκέντρωσης φορέων (E19) ενώ η διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ 200°C μία τάξη μεγαλύτερη (E18).

Αποτελέσματα μελέτης χρονικής απόκρισης

Στα παρακάτω διαγράμματα συνοψίζεται η μελέτη της χρονικής απόκρισης των τριών διατάξεων $n^+ZnO/n-Si$ 100°C, 150°C και 200°C κατά την ακτινοβολή τους με παλμική ακτινοβολία. Συγκεκριμένα, για κάθε διάταξη παρουσιάζονται πέντε γραφικές παραστάσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στις συχνότητες παλμικής ακτινοβολίας 4 Hz, 10 Hz, 100 Hz, 400 Hz και 1kHz. Κάθε γραφική παράσταση απεικονίζει με την σειρά της τέσσερις παλμοσειρές, που αντιστοιχούν στα μήκη κύματος 405 nm, 532 nm, 640 nm και 1064 nm.

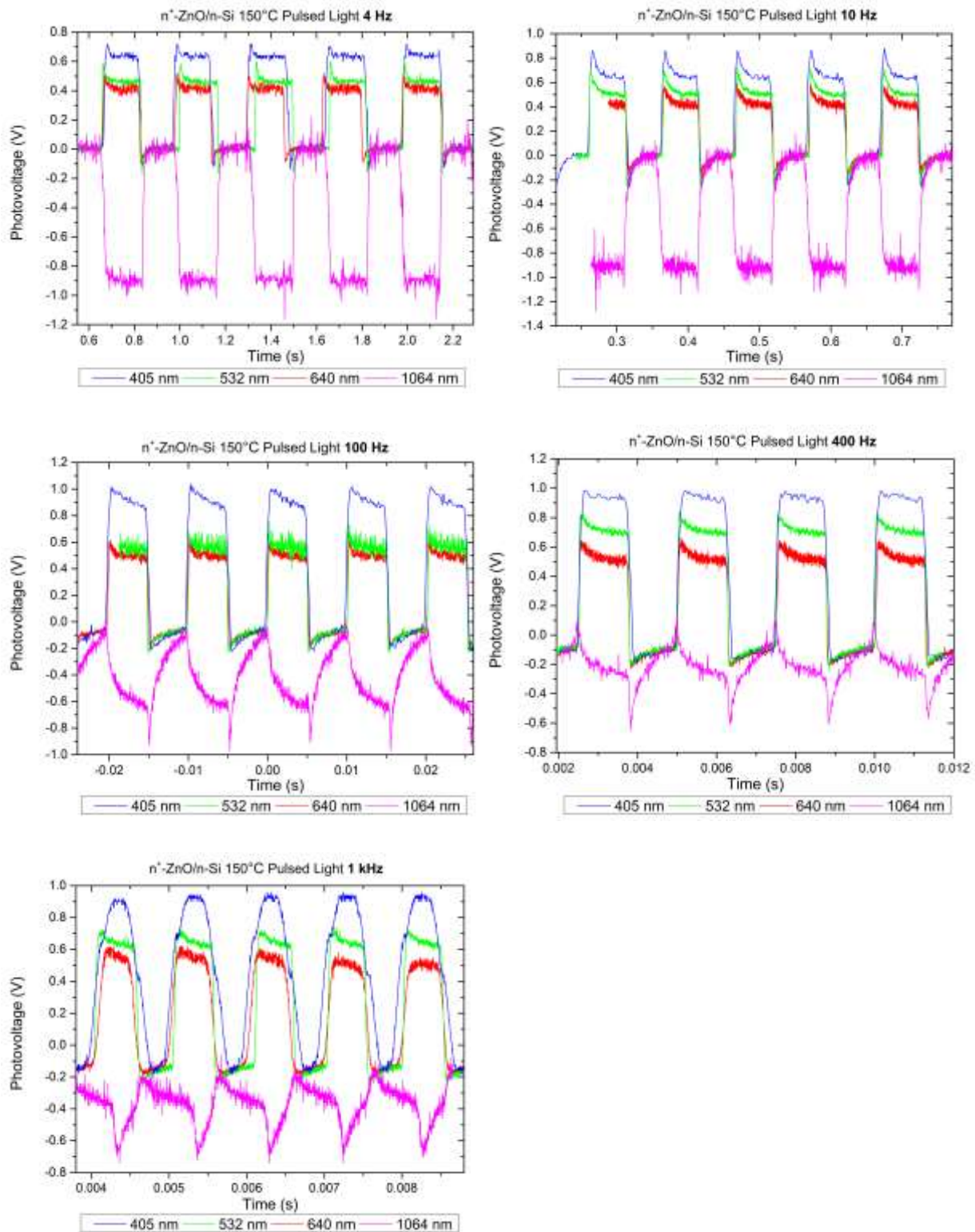
Μελέτη χρονικής απόκρισης της διάταξης $n^+ZnO/n-Si$ 100°C





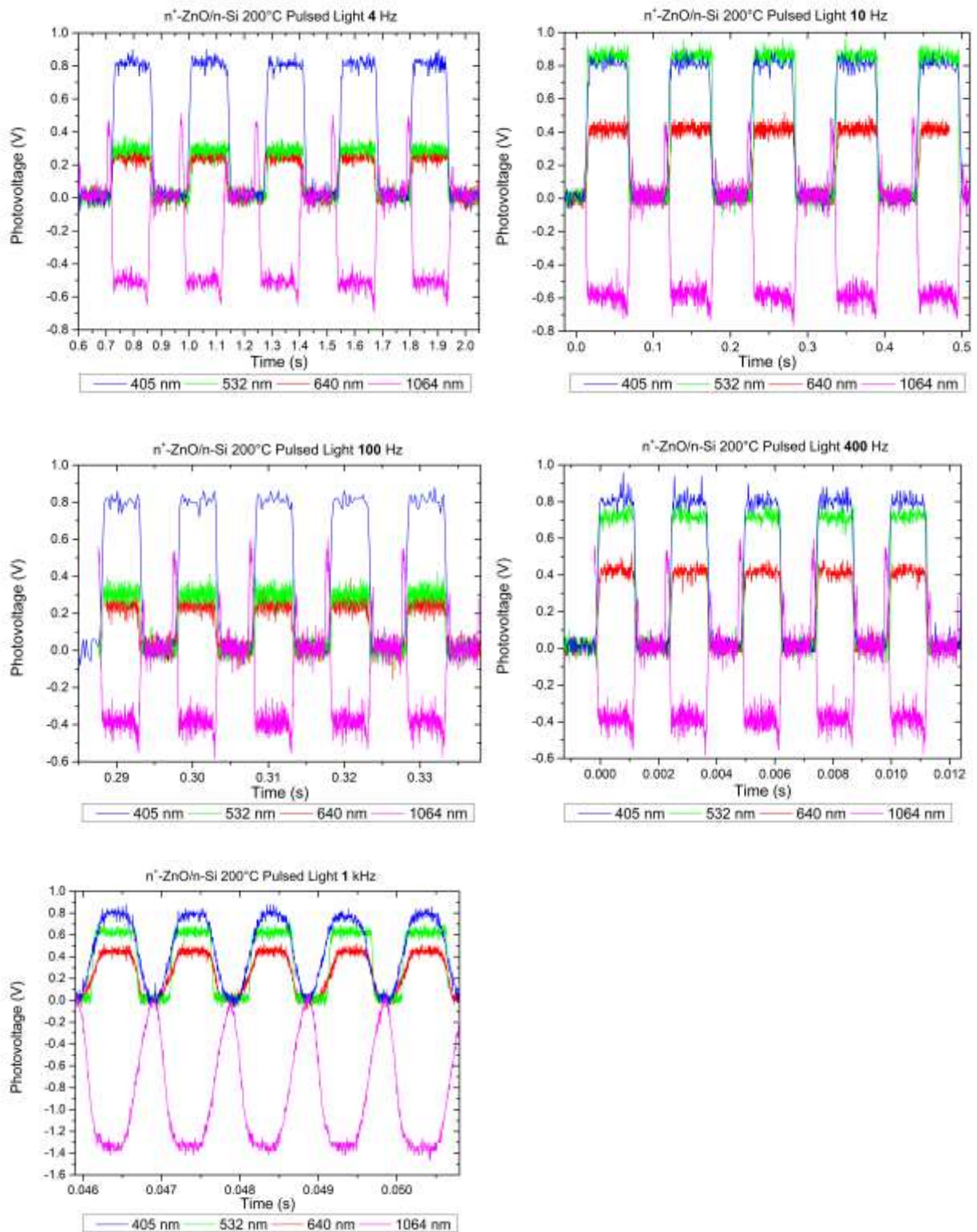
Εικόνα 40: Γραφικές παραστάσεις φωτοτάσης - χρόνου της διάταξης ZnO/ n -Si 100°C υπό συνθήκες παλμικής ακτινοβολίας 1Hz, 4Hz, 100Hz, 400Hz και 1kHz.

Μελέτη χρονικής απόκρισης της διάταξης $n^+ZnO/n-Si$ 150°C



Εικόνα 41: Γραφικές παραστάσεις φωτότασης - χρόνου της διάταξης $ZnO/n-Si$ 150°C υπό συνθήκες παλμικής ακτινοβολίας 1Hz, 4Hz, 100Hz, 400Hz και 1kHz.

Μελέτη χρονικής απόκρισης της διάταξης $n^+ZnO/n-Si$ 200°C



Εικόνα 42: Γραφικές παραστάσεις φωτότασης - χρόνου της διάταξης $ZnO/n-Si$ 200°C υπό συνθήκες παλμικής ακτινοβολίας 1Hz, 4Hz, 100Hz, 400Hz και 1kHz.

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Εξαρχής, γίνεται αντιληπτό πως και οι τρεις φωτοανιχνευτικές διατάξεις είναι ικανές να αντιληφθούν και να αντιδράσουν σε παλμική ακτινοβολία από το φάσμα του υπεριώδους έως και του υπέρυθρου και συχνότητας 4 – 1000 Hz. Αυτό αποδεικνύεται από το γεγονός πως σε όλα τα παρουσιαζόμενα γραφήματα διακρίνονται οι διαδοχικοί ηλεκτρικοί παλμοί που αποτελούν το αναμενόμενο αποτέλεσμα κατά την ακτινοβολή της διάταξης με παλμική ακτινοβολία. Σαφέστερα, οι UV-visible παλμοί (405 nm, 532 nm, 640 nm) μεταφράζονται ως θετική φωτοτάση μεταξύ των επαφών των διατάξεων ενώ οι IR παλμοί (1064 nm) ως αρνητική φωτοτάση. Αυτή η παρατήρηση συμφωνεί με την αρχή λειτουργίας των διατάξεων μιας και, όπως επεξηγήθηκε, ακτινοβολή με UV-visible ακτινοβολία προκαλεί τη ροή θετικού φοτορεύματος (από το ZnO προς το Si) και δηλαδή εμφάνιση θετικής φωτοτάσης στα άκρα των διατάξεων. Αντίστοιχα, ακτινοβολή με IR ακτινοβολία δημιουργεί ροή αρνητικού φοτορεύματος (από το Si στο ZnO) η οποία μεταφράζεται ως αρνητική φωτοτάση στα άκρα των διατάξεων. Επιπλέον, έτσι επιβεβαιώνεται και πάλι η επιλεκτική και ευρυζωνική φωτοανιχνευτική ικανότητα των φωτοανιχνευτών.

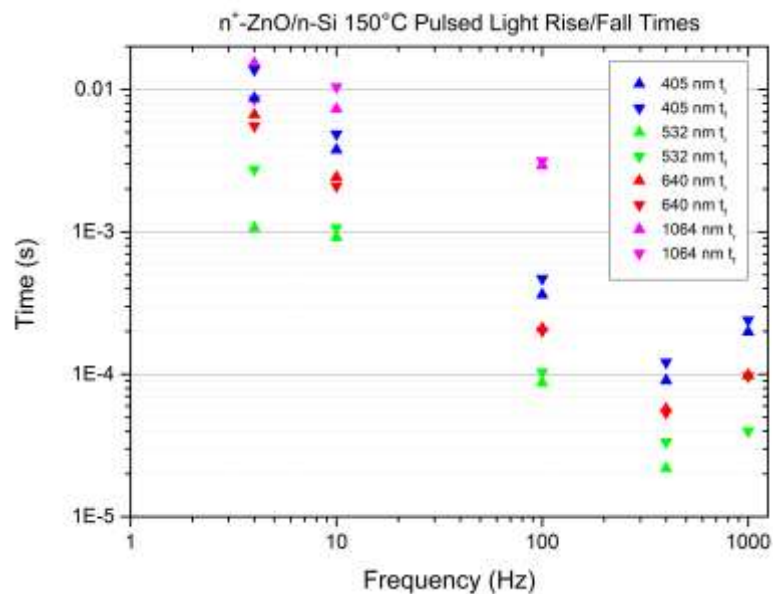
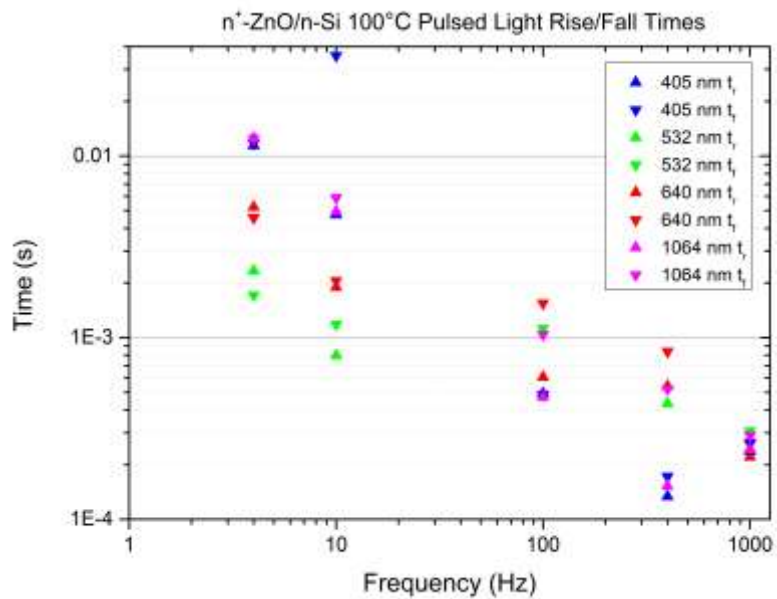
Διαπιστώνουμε ακόμα πως, και στις τρεις διατάξεις, με την αύξηση της παλμικής συχνότητας αλλοιώνεται η μορφή του τετραγωνικού παλμού απόκρισης. Έτσι, εξετάζοντας κάθε διάταξη ξεχωριστά προκύπτουν οι ακόλουθες παρατηρήσεις: Όσον αφορά τη διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ 100°C, η παλμοσειρά της IR ακτινοβολίας αρχίζει να αλλοιώνεται ήδη από τα 100Hz ενώ μεγάλη αλλοίωση παρουσιάζουν οι υπόλοιπες παλμοσειρές στα 400 Hz και 1kHz. Έπειτα, αναφορικά με την διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ 150°C, οι παλμοσειρές της εμφανίζονται γενικά πιο θορυβώδεις ενώ οι IR παλμοί χάνουν εντελώς την μορφή τους μετά τα 10 Hz. Ωστόσο, οι υπόλοιπες ακτινοβολίες διατηρούν πιο τετραγωνικούς παλμούς για τις συχνότητες 100 Hz, 400 Hz και 1kHz συγκριτικά με την διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ 100°C. Τέλος, η διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ 200°C παρουσιάζει το πιο τετραγωνικό προφίλ παλμών από τους τρεις ανιχνευτές για κάθε είδος ακτινοβολίας τόσο για τις χαμηλές όσο και για τις υψηλές συχνότητες. Αυτό πιθανόν να οφείλεται στη κατά μια τάξη μεγαλύτερη κινητικότητα φορέων στον ανιχνευτή $n^+ZnO/n-Si$ 200°C απ' ότι στους άλλους δύο. Βέβαια, είναι σαφές και από τις τρεις διατάξεις πως, εάν έως τα 400 Hz είναι δυνατόν να λάβουμε αρκετά τετραγωνική απόκριση, δεν μπορούμε να αποφύγουμε την παραμόρφωση των παλμοσειρών στη συχνότητα των 1kHz.

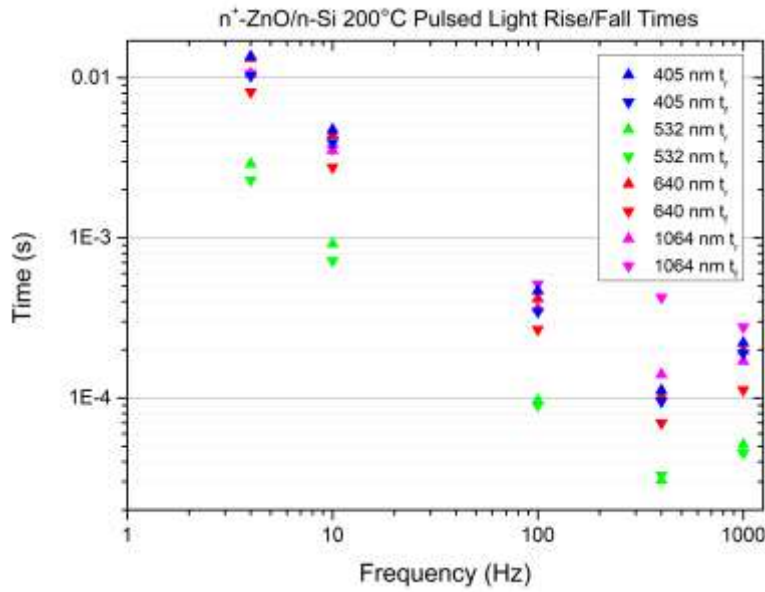
Μελέτη χρόνων ανόδου και καθόδου των παλμών

Απομονώνοντας ένα παλμό ανά ακτινοβολία και διάταξη εξετάστηκαν οι χρόνοι ανόδου και καθόδου του ίδιου με σκοπό την συλλογή περισσότερων πληροφοριών για την ταχύτητα απόκρισης των διατάξεων.

Χρόνοι ανόδου-καθόδου συναρτήσει της συχνότητας παλμικής ακτινοβολίας

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι χρόνοι ανόδου-καθόδου συναρτήσει της συχνότητας παλμικής ακτινοβολίας για κάθε μια από τις τρεις διατάξεις:





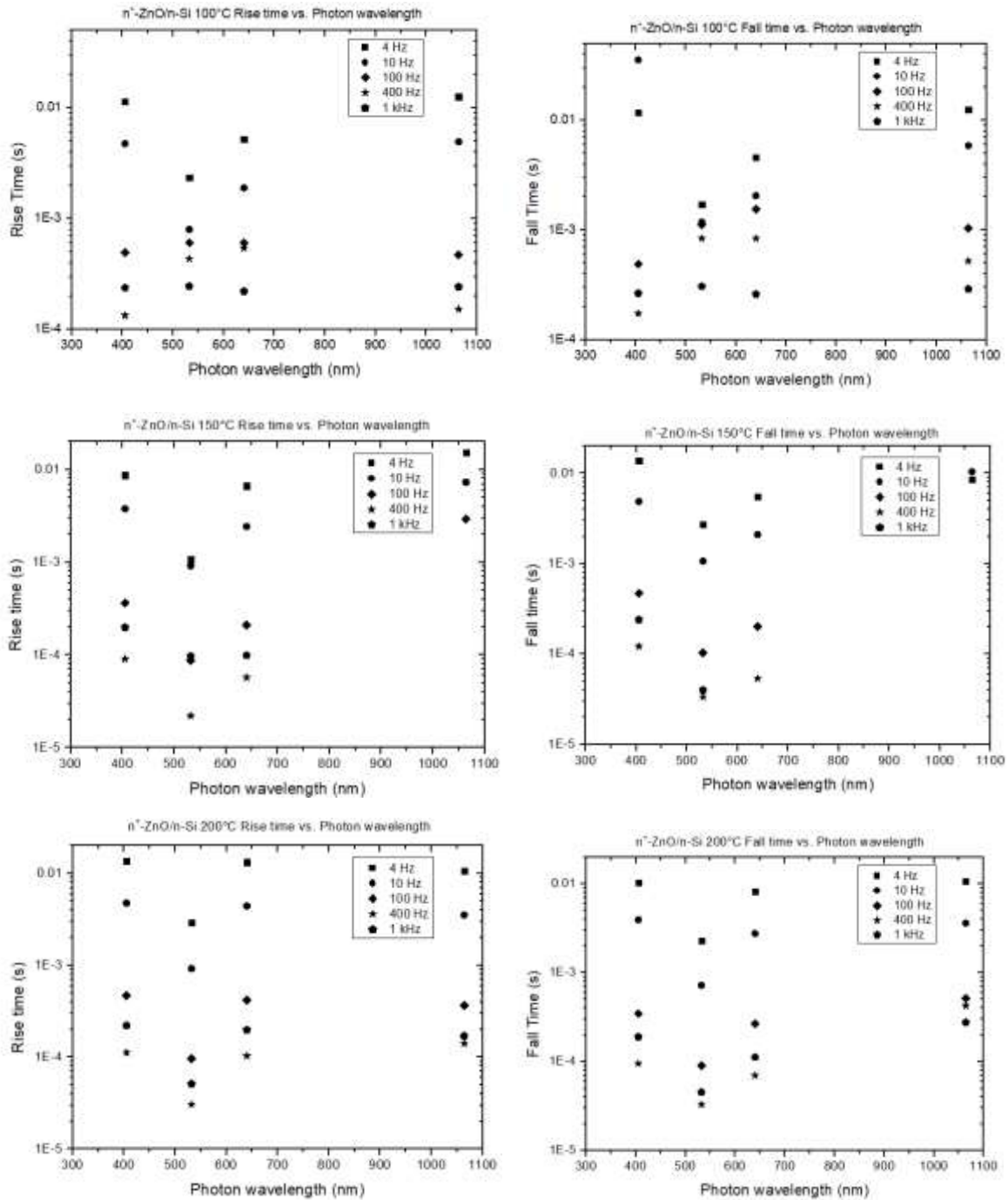
Εικόνα 43: Διαγράμματα χρόνων ανόδου-καθόδου των παλμών συναρτήσει της συχνότητας παλμικής ακτινοβολίας για τις τρεις διατάξεις

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Εξαρχής γίνεται αντιληπτό πως και στις τρεις διατάξεις αύξηση της συχνότητα συνεπάγεται μείωση των χρόνων ανόδου-καθόδου των παλμών για κάθε είδος ακτινοβολίας. Σαφέστερα, βλέπουμε μειώσει των χρόνων έως και κατά δύο τάξης μεγέθους, από E-3 για τις συχνότητες των 4 Hz και 10 Hz σε E-4 για την συχνότητα των 100 Hz και έως και E-5 για τις συχνότητες των 400Hz και 1kHz. Βέβαια, το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με τους συνολικά μικρότερους χρόνους διάρκειας των φαινομένων λόγω της υψηλής συχνότητας. Μια ακόμη παρατήρηση είναι πως στις διατάξεις $n^+ZnO/n-Si$ 150°C και $n^+ZnO/n-Si$ 200°C η ακτινοβολία μήκους κύματος 532 nm εμφανίζει την ταχύτερη απόκριση (μικρότερους χρόνους ανόδου-καθόδου) για όλες τις παλμικές συχνότητες.

Κατ' επέκταση, συγκεκριμένα για τον ανιχνευτή $n^+ZnO/n-Si$ 150°C, παρατηρούμε σε όλες τις παλμικές συχνότητες την εξής κατάταξη των ακτινοβολιών υπεριώδους και ορατού βάση των χρόνων ανόδου-καθόδου τους: Μικρότερους χρόνους παρουσιάζει η ακτινοβολία των 532 nm, ακολουθεί η ακτινοβολία των 640 nm και κατόπιν η ακτινοβολία των 405 nm. Στις συχνότητες που έχουμε δεδομένα και για τα 1064 nm βλέπουμε πως εντάσσονται στην παραπάνω κατάταξη μετά την ακτινοβολία των 405 nm παρουσιάζοντας δηλαδή τους μεγαλύτερους χρόνους ανόδου – καθόδου.

Χρόνοι ανόδου-καθόδου συναρτήσει του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας
 Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι χρόνοι ανόδου και καθόδου των παλμών συναρτήσει του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας για κάθε μια από τις τρεις διατάξεις:



Εικόνα 44: Διαγράμματα χρόνων ανόδου-καθόδου των παλμών συναρτήσει του μήκους κύματος της παλμικής ακτινοβολίας για τις τρεις διατάξεις

Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Καταρχάς, επιβεβαιώνουμε πως οι ταχύτεροι χρόνοι απόκρισης που επιτυγχάνει η διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ 100°C για οποιοδήποτε μήκος κύματος και συχνότητα ακτινοβολίας είναι κατά μια τάξη μεγαλύτεροι (E-4) από τις άλλες δύο διατάξεις (E-5). Αυτό καθιστά την ίδια ένα πιο αργό φωτοανιχνευτή από τους $n^+ZnO/n-Si$ 150°C και $n^+ZnO/n-Si$ 200°C. Στη συνέχεια, μια ακόμα παρατήρηση είναι πως οι μικρότεροι χρόνοι ανόδου και καθόδου εμφανίζονται για κάθε διάταξη όταν αυτή ακτινοβολείται με μήκος κύματος 532 nm. Πιθανότατα αυτό να οφείλεται με την ισχύ και τα χαρακτηριστικά του laser 532 nm.

Τελικά συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την μελέτη των διατάξεων $n^+ZnO/n-Si$ (100°C, 150°C, 200°C) και $n^+ZnO/Glass$ (100°C, 150°C, 200°C) καταλήγουμε στα ακόλουθα συμπεράσματα. Με χρήση των διατάξεων $n^+ZnO/Glass$ (100°C, 150°C, 200°C) πραγματοποιήθηκε ο οπτικός και ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός του οξειδίου του ψευδαργύρου. Συγκεκριμένα, επιβεβαιώθηκε από όλα τα δείγματα ότι τα υμένια ZnO προσεγγίζουν το θεωρητικό ενεργειακό διάκενο των 3.37eV, επαληθεύτηκε από το δείγμα $n^+ZnO/Glass$ 150°C ότι η ειδική αγωγιμότητα του ZnO συμφωνεί με την τιμή που αναγράφεται στην αναφορά παραλαβής του δείγματος και με την εκτέλεση φασματοσκοπίας Raman ταυτοποιήσαμε τα δονητικά επίπεδα του ZnO με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

Συνεχίζοντας, από την μελέτη της οπτοηλεκτρονικής απόκρισης των διατάξεων $n^+ZnO/n-Si$ (100°C, 150°C, 200°C) διαπιστώθηκε ο διοδικός τους χαρακτήρας και επιβεβαιώθηκε η ικανότητα τους για ευρυζωνική φωτοανίχνευση στο φάσμα υπεριώδους – ορατού – υπέρυθρου κατά την ανάστροφη πόλωση όπως και η ικανότητα επιλεκτικής φωτοανίχνευσης της υπέρυθρης ακτινοβολίας κατά την μηδενική και την ορθή πόλωση. Επιπλέον, έγινε αντιληπτό πως η διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ 150°C παρουσιάζει, σε ένα βαθμό, βελτιωμένο ανιχνευτικό χαρακτήρα καθώς προσέδωσε τα ισχυρότερα σήματα, εμφάνισε ενισχυμένο φωτοβολταϊκό φαινόμενο όπως και καλή διοδική συμπεριφορά. Ο ισχυρισμός αυτός επιβεβαιώνεται και συγκρίνοντας την ποσοστιαία απόκλιση της απόκρισης των ακτινοβολιών από την χαρακτηριστική καμπύλη σκότους στα -2V για κάθε διάταξη. Η διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ 150°C εμφανίζει κατά μέσο όρο την μεγαλύτερη ποσοστιαία απόκλιση υποδηλώνοντας καλύτερη φωτοανίχνευση. Ωστόσο, δεν

μπορέσαμε να εντοπίσουμε κάποια συστηματικότητα μεταξύ της διαφορετικής συγκέντρωσης φορέων του ZnO των τριών διατάξεων και των φωτοηλεκτρικών τους αποκρίσεων.

Επιπροσθέτως, από την μελέτη της χρονικής απόκρισης των διατάξεων $n^+ZnO/n-Si$ ($100^\circ C$, $150^\circ C$, $200^\circ C$) εξακριβώθηκε η δυνατότητα τους να διακρίνουν διαδοχικούς παλμούς συχνότητας 4 – 1000 Hz στο φάσμα του υπεριώδους – ορατού – υπέρυθρου. Παρόλα αυτά, έγινε επίσης ξεκάθαρο πως οι παλμοί χάνουν την τετραγωνική τους μορφή στις υψηλές συχνότητες (400Hz και 1kHz), προϋδεάζοντας για πιθανή αδυναμία έγκυρης ανταπόκρισής σε συχνότητες μεγαλύτερες του 1 kHz. Η μικρότερη αλλοίωση παλμών στο εν λόγω φάσμα συχνοτήτων παρατηρείται για την διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ $200^\circ C$, γεγονός που πιθανόν να σχετίζεται με την κατά μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη κινητικότητα φορέων του ZnO της διάταξη σε σχέση με τις άλλες δύο.

Στη συνέχεια, εξάγοντας τους χρόνους ανόδου και καθόδου των παλμών κάθε ακτινοβολίας ανά διάταξη και απεικονίζοντας τους έναντι της συχνότητας βλέπουμε πως οι ίδιοι μειώνονται όσο αυξάνεται η συχνότητα, όπως είναι αναμενόμενο. Επιπλέον, η ακτινοβολία των 532 nm εμφανίζει τους μικρότερους χρόνους ανόδου-καθόδου για τις διατάξεις $n^+ZnO/n-Si$ $150^\circ C$ και $n^+ZnO/n-Si$ $200^\circ C$. Ακόμα, στη διάταξη $n^+ZnO/n-Si$ $150^\circ C$ η χρόνοι ανόδου-καθόδου ακολουθούν αύξουσα κατάταξη βάσει του μήκους κύματος ως εξής: $T_{532\text{ nm}} < T_{640\text{ nm}} < T_{405\text{ nm}} < T_{1064\text{ nm}}$. Κατόπιν, κατασκευάζοντας τα διαγράμματα των χρόνων ανόδου-καθόδου έναντι του μήκους κύματος της ακτινοβολίας επιβεβαιώνουμε πρώτον πως οι διατάξεις $n^+-ZnO/n-Si$ $150^\circ C$ και $n^+-ZnO/n-Si$ $200^\circ C$ αντιδρούν γρηγορότερα από την $n^+-ZnO/n-Si$ $100^\circ C$ και δεύτερον ότι οι μικρότεροι χρόνοι ανόδου και καθόδου για κάθε διάταξη εμφανίζονται όταν αυτή ακτινοβολείται με μήκος κύματος 532 nm.

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν μας οδηγούν στην διαπίστωση πως η φωτοανιχνευτική διάταξη $n^+-ZnO/n-Si$ $150^\circ C$ φέρει βελτιωμένα φωτοανιχνευτικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις άλλες δύο διατάξεις αλλά και αξιόλογη ταχύτητα απόκρισης. Επιπλέον, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν στην παρούσα εργασία αποτελούν βάση για την περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη των υποσχόμενων φωτοανιχνευτικών διατάξεων $n^+ZnO/n-Si$ αλλά και χρήσιμες πληροφορίες για την έρευνα στο κλάδο των φωτοανιχνευτικών διατάξεων που βασίζονται σε ετεροεπαφές.

Βιβλιογραφία

- [1] K. W. A. Chee and K. W. A. Chee, "Introductory Chapter: Photodetectors," *Photodetectors [Working Title]*, Dec. 2018, doi: 10.5772/INTECHOPEN.82045.
- [2] S. Donati, "Photodetectors," *unipv.it*, Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <http://www-3.unipv.it/donati/private/Photodetectors/introd.pdf>
- [3] Y. Singh *et al.*, "Enhanced photoconductivity performance of microrod-based Sb₂Se₃ device," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 243, p. 111765, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.solmat.2022.111765.
- [4] R. A. Yotter and D. M. Wilson, "A review of photodetectors for sensing light-emitting reporters in biological systems," *IEEE Sens J*, vol. 3, no. 3, pp. 288–303, Jun. 2003, doi: 10.1109/JSEN.2003.814651.
- [5] H. Yuan *et al.*, "Polarization-sensitive broadband photodetector using a black phosphorus vertical p–n junction," *Nat Nanotechnol*, vol. 10, no. 8, pp. 707–713, Jun. 2015, doi: 10.1038/nnano.2015.112.
- [6] Dr. R. Paschotta, "Encyclopedia of Laser Physics and Technology - photodetectors, photodiodes, phototransistors, pyroelectric photodetectors, array, powermeter, noise," *www.rp-photonics.com*, Accessed: Oct. 30, 2023. [Online]. Available: <https://www.rp-photonics.com/photodetectors.html>
- [7] Y. Shi *et al.*, "A silicon-based PbSe quantum dot near-infrared photodetector with spectral selectivity," *Nanoscale*, vol. 13, no. 28, pp. 12306–12313, Jul. 2021, doi: 10.1039/D1NR02037D.
- [8] N. Ding *et al.*, "A novel approach for designing efficient broadband photodetectors expanding from deep ultraviolet to near infrared," *Light: Science & Applications 2022 11:1*, vol. 11, no. 1, pp. 1–13, Apr. 2022, doi: 10.1038/s41377-022-00777-w.
- [9] Y. Shi *et al.*, "A silicon-based PbSe quantum dot near-infrared photodetector with spectral selectivity," *Nanoscale*, vol. 13, no. 28, pp. 12306–12313, Jul. 2021, doi: 10.1039/D1NR02037D.
- [10] M. Patel, M. Kumar, and J. Kim, "Polarity flipping in an isotype heterojunction (p-SnS/p-Si) to enable a broadband wavelength selective energy-efficient photodetector," *J Mater Chem C Mater*, vol. 6, no. 26, pp. 6899–6904, Jul. 2018, doi: 10.1039/C8TC02188K.
- [11] W. Tian *et al.*, "Self-Powered Nanoscale Photodetectors," *Small*, vol. 13, no. 45, p. 1701848, Dec. 2017, doi: 10.1002/SMLL.201701848.
- [12] P. N. Ni, C. X. Shan, S. P. Wang, X. Y. Liu, and D. Z. Shen, "Self-powered spectrum-selective photodetectors fabricated from n-ZnO/p-NiO core–shell nanowire arrays," *J Mater Chem C Mater*, vol. 1, no. 29, pp. 4445–4449, Jul. 2013, doi: 10.1039/C3TC30525B.
- [13] G. Chatzigiannakis *et al.*, "Laser-Microstructured ZnO/p-Si Photodetector with Enhanced and Broadband Responsivity across the Ultraviolet-Visible-Near-Infrared Range," *ACS Appl Electron Mater*, vol. 2, no. 9, pp. 2819–2828, Sep. 2020, doi: 10.1021/ACSAELM.0C00492/SUPPL_FILE/ELOC00492_SI_001.PDF.

- [14] C. Klingshirn, "ZnO: From basics towards applications," *physica status solidi (b)*, vol. 244, no. 9, pp. 3027–3073, Sep. 2007, doi: 10.1002/PSSB.200743072.
- [15] H. Wang, P. Kongsuwan, G. Satoh, and Y. Lawrence Yao, "Femtosecond laser-induced simultaneous surface texturing and crystallization of a-Si:H thin film: Absorption and crystallinity," *J Manuf Sci Eng*, vol. 134, no. 3, 2012, doi: 10.1115/1.4006548.
- [16] R. Saha, A. Karmakar, and S. Chattopadhyay, "Enhanced self-powered ultraviolet photoresponse of ZnO nanowires/p-Si heterojunction by selective in-situ Ga doping," *Opt Mater (Amst)*, vol. 105, p. 109928, Jul. 2020, doi: 10.1016/J.OPTMAT.2020.109928.
- [17] N. H. Al-Hardan, M. M. Mohd Rashid, A. Abdul Aziz, and N. M. Ahmed, "Low power consumption UV sensor based on n-ZnO/p-Si junctions," *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, vol. 30, no. 21, pp. 19639–19646, Nov. 2019, doi: 10.1007/S10854-019-02337-2/FIGURES/7.
- [18] I. S. Jeong, J. H. Kim, and S. Im, "Ultraviolet-enhanced photodiode employing n-ZnO/p-Si structure," *Appl Phys Lett*, vol. 83, no. 14, pp. 2946–2948, Oct. 2003, doi: 10.1063/1.1616663.
- [19] J. Qi, X. Hu, Z. Wang, X. Li, W. Liu, and Y. Zhang, "A self-powered ultraviolet detector based on a single ZnO microwire/p-Si film with double heterojunctions," *Nanoscale*, vol. 6, no. 11, pp. 6025–6029, May 2014, doi: 10.1039/C3NR06356A.
- [20] Y. Xie *et al.*, "Polarity-controlled ultraviolet/visible light ZnO nanorods/p-Si photodetector," *J Appl Phys*, vol. 112, no. 12, Dec. 2012, doi: 10.1063/1.4771696/353870.
- [21] G. Chatzigiannakis *et al.*, "Broadband wavelength-selective isotype heterojunction n⁺-ZnO/n-Si photodetector with variable polarity," *J Alloys Compd*, vol. 903, p. 163836, May 2022, doi: 10.1016/J.JALLCOM.2022.163836.
- [22] T. Lakshmipriya and S. C. B. Gopinath, "Introduction to nanoparticles and analytical devices," *Nanoparticles in Analytical and Medical Devices*, pp. 1–29, Jan. 2020, doi: 10.1016/B978-0-12-821163-2.00001-7.
- [23] R. Ghosh and D. Basak, "Electrical and ultraviolet photoresponse properties of quasialigned ZnO nanowires/ p-Si heterojunction," *Appl Phys Lett*, vol. 90, no. 24, Jun. 2007, doi: 10.1063/1.2748333/128447.
- [24] X. Wang, T. Wang, Q. Ren, J. Xu, and Y. Cui, "Construction of localized state levels and near-infrared light absorption of silicon: B/P doping and first-principles calculations," *Micro and Nanostructures*, vol. 184, p. 207695, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.MICRNA.2023.207695.
- [25] "openarchives.gr | Μελέτη των οπτοηλεκτρονικών ιδιοτήτων ετεροδομής ZnO πάνω σε μικροδομημένο Si τύπου p." Accessed: Dec. 09, 2023. [Online]. Available: https://www.openarchives.gr/aggregator-openarchives/edm/pergamos/000005-_uoa_dl_object_uoadl%3A2790747?language=en
- [26] M. Patel, M. Kumar, and J. Kim, "Polarity flipping in an isotype heterojunction (p-SnS/p-Si) to enable a broadband wavelength selective energy-efficient photodetector," *J Mater Chem C Mater*, vol. 6, no. 26, pp. 6899–6904, Jul. 2018, doi: 10.1039/C8TC02188K.

- [27] S. J. C. Irvine, "Film growth and epitaxy methods," *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, pp. 248–260, Jan. 2024, doi: 10.1016/B978-0-323-90800-9.00210-9.
- [28] M. Κουφοπούλου and M. Κουφορούλου, "Εγχάραξη διαφανών ηλεκτροδίων με laser," 2023, doi: 10.26240/HEAL.NTUA.25023.
- [29] I. Fasaki and I. Φασάκη, "Ανάπτυξη συστήματος ανίχνευσης υδρογόνου με βάση λεπτά υμένια NiO και TiO₂, και μελέτη λεπτών υμενίων ZnO για την οπτοηλεκτρονική," Jan. 2009, doi: 10.12681/EADD/18512.
- [30] "Basic of Raman scattering – Nanophoton." Accessed: Feb. 04, 2024. [Online]. Available: <https://www.nanophoton.net/lecture-room/raman-spectroscopy/lesson-1-1>