



ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Κατασκευή και χαρακτηρισμός διόδων Schottky Χρωμίου
σε n-τύπου Καρβιδίου του Πυριτίου (4H-SiC)**

Χαρίδημος Κολιακουδάκης

**Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα
Μικροηλεκτρονικής – Οπτοηλεκτρονικής**

**Τμήμα Φυσικής
Πανεπιστήμιο Κρήτης
Ηράκλειο 2014**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης και είχε ως σκοπό την κατασκευή και τον χαρακτηρισμό διόδων Schottky Χρωμίου (Cr) πάνω σε n-τύπου Καρβιδίου του Πυριτίου (4H-SiC).

Αναλυτικότερα, κατασκευάστηκαν δίοδοι Schottky από τρεις διαφορετικές επιμεταλλώσεις:

- (1) (150nm/3nm) Ni/Ti/4H-SiC
- (2) (200nm) Cr/4H-SiC
- (3) (100nm/50nm) Au/Cr/4H-SiC

Μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής των παραπάνω διόδων, το πειραματικό μέρος της εργασίας ολοκληρώθηκε μέσω του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού χρησιμοποιώντας I-V και C-V μετρήσεις για τον προσδιορισμό του ύψους φραγμού δυναμικού (Φ_b), του παράγοντα ιδανικότητας (n), καθώς και άλλων φυσικών χαρακτηριστικών. Για τις επιμεταλλώσεις (1) και (2) εξετάστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας ανόπτησης στα χαρακτηριστικά των διόδων.

Η κατασκευή και ο χαρακτηρισμός των διόδων πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήρια της Ομάδας Μικροηλεκτρονικής του Ινστιτούτου Ηλεκτρονικής Δομής και Λείζερ (ΙΗΔΛ) του Ιδρύματος Τεχνολογίας και Έρευνας (ΙΤΕ).

Το θεωρητικό κομμάτι της εργασίας αποσκοπεί στην κατανόηση των βασικών αρχών της Φυσικής της επαφής μετάλλου/ημιαγωγού, δίνοντας ιδιαίτερη έμφαση στις επαφές Χρωμίου (Cr) πάνω σε επιφάνειες υποστρώματος εξαγωνικού μονοκρυστάλλου Καρβιδίου του Πυριτίου (4H-SiC), ν-τύπου, με κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό (0001).

Το πειραματικό κομμάτι της εργασίας αποσκοπεί στην ανάλυση των συστημάτων/τεχνικών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή και τον χαρακτηρισμό των δειγμάτων.

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χωριστά για κάθε επιμετάλλωση, συγκρίνοντας την πειραματική τιμή του ύψους φραγμού δυναμικού με την ιδανική θεωρία Schottky και καταλήγουμε σε τελικά συμπεράσματα.

ABSTRACT

The main focus of this study is the fabrication and the characterization of Cr-based Schottky diodes on n-type 4H-SiC. This study was carried out in the Department of Physics of University of Crete.

Schottky diodes were fabricated on n-type 4H-SiC using three different Schottky metal contacts:

- (1) (150nm/3nm) Ni/Ti/4H-SiC
- (2) (200nm) Cr/4H-SiC
- (3) (100nm/50nm) Au/Cr/4H-SiC

For electrical characterization of Schottky diodes I-V and C-V measurements are performed. A set of electrical parameters were extracted from the characterization, such as Schottky barrier height (Φ_b), ideality factor (n), etc. The effect of thermal annealing was studied in both Ni/Ti/4H-SiC and Au/Cr/4H-SiC Schottky diodes.

All the fabrication process and the characterization were performed in the laboratory of Microelectronic Research Group (MRG) of Foundation for Research and Technology of Hellas (FORTH).

The theoretical framework of this project aims to analyze the basic principles of the physics of metal-semiconductor contacts, placing greater emphasis on Cr-based metal contacts upon substrates of hexagonal crystal n-type 4H-SiC, of crystallographic orientation (0001).

The purpose of the experimental part of this project is to analyze all the techniques that were used for the fabrication and the characterization of the processed samples.

Finally, we present the individual results of every single metal deposition by comparing the experimental value of the Schottky barrier height with the ideal Schottky theory and come to conclusive results.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Κωνσταντίνο Ζεκεντέ, (Ερευνητή ΙΗΔΛ του ΙΤΕ) για την καθοδήγηση και την επίβλεψη του.

Θα ήθελα, ακόμα, να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Αλέξανδρο Γεωργακίλα και τον Επίκουρο Καθηγητή Ελευθέριο Ηλιόπουλο του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης, για τις πολύτιμες συμβουλές τους κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Δρ. Γεώργιο Κωνσταντινίδη, Ερευνητή ΕΛΕ Α ΙΗΔΛ του ΙΤΕ για την πολύτιμη συμπαράσταση του όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και την υπόλοιπη ομάδα της Μικροηλεκτρονικής.

Θα ήθελα ακόμα να ευχαριστήσω, τον Καθηγητή Παναγιώτη Τζανετάκη, Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Κρήτης, για την συμβουλευτική αρωγή του.

Όσον αφορά στην ψυχολογική υποστήριξη, ευχαριστώ θερμά την οικογένεια μου, και ιδιαίτερα την γυναίκα μου για την ανοχή της σε περιόδους πίεσης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ: ΔΙΟΔΟΣ SCHOTTKY & ΚΑΡΒΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

1.0 Δίοδος Schottky	1
1.1 Εφαρμογές διόδων Schottky	1
1.2 Δίοδοι Schottky σε διαφορετικούς ημιαγωγούς	2
1.3 Πλεονεκτήματα του SiC	2
1.4 Πλεονεκτήματα 4H-SiC για διόδους Schottky.....	3
1.5 Ιδιότητες του Καρβιδίου του Πυριτίου	4
1.5.1 Κρυσταλλική δομή – Πολυτυπισμός SiC	4
Βιβλιογραφία 1 ^{ου} Κεφαλαίου	7

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ: ΕΠΑΦΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ - ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ

2.0 Γενικά	8
2.1 Επαφή Schottky	9
2.1.1 Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών	9
2.1.2 Περιοχή Απογύμνωσης	13
2.2 Χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης (I-V)	14
2.2.1 Εισαγωγή	14
2.2.2 Θερμιονική εκπομπή	14
2.2.3 Θεωρία διάχυσης	16
2.2.4 Φαινόμενο σήραγγος	16
2.2.5 Φορείς μειονότητας	17
2.2.6 Λοιποί παράγοντες που επηρεάζουν την χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης	18
2.2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ανάστροφης πόλωσης	19
2.2.8 Ωμικές επαφές	19
2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεταλλικών επαφών πάνω σε 4H-SiC τύπου n	20

2.3.1 Γενικά	20
2.3.2 Ωμικές επαφές πάνω σε 4H-SiC	21
2.3.3 Επαφές Schottky πάνω σε 4H-SiC	21
Βιβλιογραφία 2 ^{ου} Κεφαλαίου	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

3.0 Εισαγωγή	27
3.1 Η δομή του 4H-SiC	28
3.2 Τεχνολογία κατασκευής	28
3.2.1 Χημική προετοιμασία δειγμάτων	28
3.2.2 Τεχνική οπτικής λιθογραφίας	29
3.2.2.1 Τεχνικές «Etch back» & «lift off»	31
3.2.3 Τεχνική εξάχνωσης μετάλλων	31
3.2.4 Τεχνικές χημικής χάραξης (αποτύπωση)	32
3.2.4.1 Υγρή χάραξη	32
3.2.4.2 Ξηρή χάραξη	33
3.2.5 Τεχνική οξείδωσης του SiC	34
3.3 Στάδια κατασκευής (process flow) διόδων Schottky 4H-SiC	35
3.3.1 Επιφανειακός καθαρισμός	35
3.3.2 Δημιουργία Mesa	35
3.3.2.1 Φωτολιθογραφία Mesa	35
3.3.2.2 Επιμετάλλωση (δημιουργία μάσκας Al)	37
3.3.2.3 Ξηρή χημική χάραξη (RIE)	38
3.3.3 Καθαρισμός επιφάνειας (RCA cleaning)	39
3.3.4 Υγρή θερμική οξείδωση (wet thermal oxidation)	40
3.3.5 Αφαίρεση οξειδίου (back & front surface oxide striping)	42

3.3.6 Δημιουργία ωμικής επαφής	44
3.3.7 Δημιουργία επαφής Schottky	46
Βιβλιογραφία 3 ^{ου} Κεφαλαίου	49

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ: ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΙΟΔΩΝ SCHOTTKY

4.0 Εισαγωγή	50
4.1 Προσδιορισμός $q\Phi_b$ από μετρήσεις C-V	50
4.2 Προσδιορισμός $q\Phi_b$ από μετρήσεις I-V	52
4.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα	54
4.3.1.0 Μελέτη διόδων Schottky Ni/Ti/4H-SiC	54
4.3.1.1 Πειραματικά αποτελέσματα διόδων Ni/Ti/4H-SiC	54
4.3.2.0 Μελέτη διόδων Schottky Cr/4H-SiC	60
4.3.2.1 Πειραματικά αποτελέσματα διόδων Cr/4H-SiC	60
4.3.3.0 Μελέτη διόδων Schottky Au/Cr/4H-SiC	66
4.3.3.1 Πειραματικά αποτελέσματα διόδων Au/Cr/4H-SiC	66
Βιβλιογραφία 4 ^{ου} Κεφαλαίου	71

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ: ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.0 Γενικά	72
5.1 Συμπεράσματα διόδων Ni/Ti/4H-SiC	73
5.2 Συμπεράσματα διόδων Cr/4H-SiC	73
5.3 Συμπεράσματα διόδων Au/Cr/4H-SiC	73
5.4 Σύγκριση $q\Phi_b$ με ιδανική θεωρία Schottky	74
5.5 Τελικά συμπεράσματα	74

ΔΙΟΔΟΣ SCHOTTKY & ΚΑΡΒΙΔΙΟ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

1.0 Δίοδος Schottky

Η δίοδος Schottky πήρε το όνομα του Γερμανού φυσικού Walter H. Schottky [1], προκύπτει από την επαφή μεταξύ ενός ημιαγωγού και ενός κατάλληλα επιλεγμένου μετάλλου. Η επαφή μετάλλου-ημιαγωγού παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον τόσο σε ερευνητικό επίπεδο, όσο και σε επίπεδο βιομηχανικών εφαρμογών.

1.1 Εφαρμογές διόδων Schottky

Η δίοδος Schottky βρίσκεται ευρεία εφαρμογή σε ψηφιακά κυκλώματα, όπου απαιτείται ταχεία μετάβαση από την αγωγιμότητα στην αποκοπή. Οι κυριότερες εφαρμογές τέτοιων διόδων συναντώνται σε:

- ηλεκτρονικά κυκλώματα ισχύος
(*ανορθωτές ρεύματος*)
(*διακόπτες ελέγχου διάρκειας ροής ρεύματος*)
- φωτοβολταϊκά ηλιακά κύτταρα
(*κατασκευή κυκλωμάτων για την προστασία μπαταριών που αποτρέπει την υπερφόρτωση τους*)
- πολλαπλασιασμό σε επίπεδο συχνότητας (*frequency conversion*)
- ψαλιδιστές τάσης (*voltage clamping*)
(*πρόληψη κορεσμού του τρανζίστορ λόγω υψηλής πυκνότητας ρεύματος*)

1.2 Δίοδοι Schottky σε διαφορετικούς ημιαγωγούς

Οι πιο συνήθεις, ημιαγωγοί, για την κατασκευή διόδων Schottky είναι το Πυρίτιο (*Si*), το Αρσενικούχο Γαλλίο (*GaAs*), το Νιτρίδιο του Γαλλίου (*GaN*) και ο μονοκρυσταλλός του Καρβιδίου του Πυριτίου 4H-SiC. Οι βασικές ηλεκτρονικές ιδιότητες για τους προαναφερθέντες ημιαγωγούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1 [2].

Πίνακας 1.1: Ηλεκτρονικές ιδιότητες του 4H-SiC σε σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές του Si, του GaAs και του GaN.

ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Si	GaAs	4H-SiC	GaN
Ενεργειακό χάσμα E_g (eV)	1.12	1.43	3.26	3.4
Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας T_{max} (°C)	250	500	1450	1660
Πεδίο κατάρρευσης (MV·cm ⁻¹)	0.25	0.3	3	3.3
Θερμική αγωγιμότητα (W·cm ⁻¹ ·K ⁻¹)	1.5	0.46	4.9	≥1.6
Ταχύτητα ολίσθησης e ⁻ (x10 ⁷ cm/s)	1.0	1.0	2.0	1.2-2.7

1.3 Πλεονεκτήματα του SiC

Μέχρι και σήμερα, το πυρίτιο είναι από τα πλέον διαδεδομένα ημιαγωγικά υλικά κατασκευής ολοκληρωμένων διατάξεων και κυκλωμάτων.

Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με τις τρέχουσες τεχνολογικές εξελίξεις, το Si έχει φτάσει κοντά στο θεωρητικό του όριο. Η ανάγκη για βελτιστοποίηση των επιδόσεων και κατασκευής συσκευών που να λειτουργούν σε μεγαλύτερες τάσεις, μεγαλύτερες θερμοκρασίες και περισσότερο ισχύ, οδήγησε στην αναζήτηση και τη μελέτη νέων ημιαγωγικών υλικών.

Το SiC φαίνεται να είναι ένα πολλά υποσχόμενο υλικό, το οποίο έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- ημιαγωγός μεγάλου ενεργειακού χάσματος
- υψηλή Θερμική σταθερότητα
- αντοχή σε ραδιενέργεια
- διαθέσιμα εμπορικά υποστρώματα (6-inch diameter από το 2012)

- ελεγχόμενη ανάπτυξη οξειδίου SiO₂
- έλεγχος προσμίξεων με τεχνικές ιοντικής εμφύτευσης

Από την σύγκριση των ιδιοτήτων μεταξύ των ημιαγωγών του Πίνακα 1 φαίνεται ότι το 4H-SiC παρουσιάζει ενδιαφέρουσες ιδιότητες όπως:

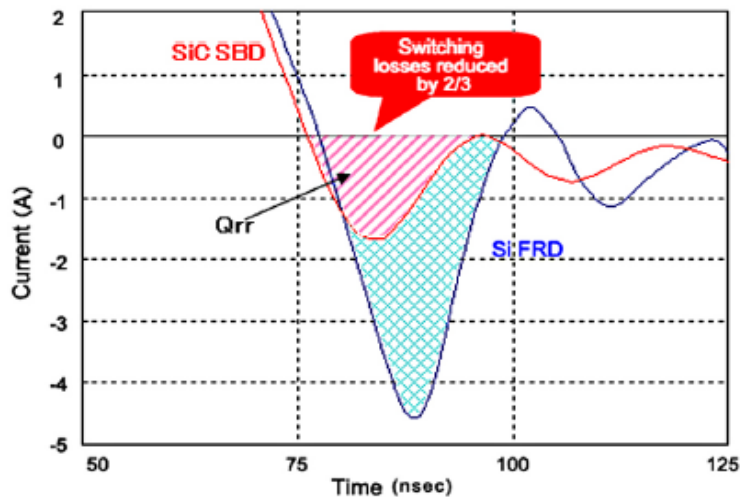
- Μεγάλο ενεργειακό χάσμα (3.26eV)
- Υψηλό ηλεκτρικό πεδίο κατάρρευσης ($3 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1}$)
- Υψηλή θερμική αγωγιμότητα ($4.9 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
- Υψηλή ταχύτητα ηλεκτρονίων κατά τον κορεσμό ($V_{\text{sat}} = 2 \times 10^7 \text{ cm/sec}$)
- Χημική αδράνεια (μικρή ή καθόλου να αντιδρά με άλλα στοιχεία)

1.4 Πλεονεκτήματα 4H-SiC για διόδους Schottky

Στην αγορά υπάρχουν εμπορικώς διαθέσιμες διόδους Schottky φτιαγμένες από SiC από εταιρείες, όπως η Cree και η Infineon. Στην πλειονότητα τους, τέτοιες διόδους αποτελούνται από τον πολύτυπο 4H- όπου η τεχνολογία είναι πιο ώριμη. Οι διόδους από 4H-SiC μπορεί να ανταγωνιστεί αυτή των διόδων πυριτίου και να κάνει πολλά περισσότερα. Τα βασικά πλεονεκτήματα διόδων Schottky από 4H-SiC σε σχέση με εκείνες από πυρίτιο συνοψίζονται παρακάτω:

- Υψηλή τάση κατάρρευσης
(SiC: εμπορικά διαθέσιμα wafers 1200V / 50A)
(Si: 200V)
- Ταχυτάτη διακοπτική λειτουργία
- μικρότερες απώλειες ισχύος
(50A:SiC: <<25W - Si: >>50W)
- μικρότερο φορτίο Q_{rr} (reverse recovery charge)
- Υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (>200°C)
- Si: <150°C

Αξίζει να σημειωθεί ότι, οι διακοπτικές απώλειες (*switching losses*) διόδων σε SiC μειώνονται κατά 2/3 σε σχέση αυτές του πυριτίου. Επιπλέον, ο χρόνος αποκατάστασης Q_{rr} (*reverse recovery time*) κατά την διάρκεια της «turn-off» λειτουργίας διόδων από SiC είναι πολύ μικρότερος σε σχέση με τον αντίστοιχο χρόνο μιας διόδου Si (Σχήμα 1.1).



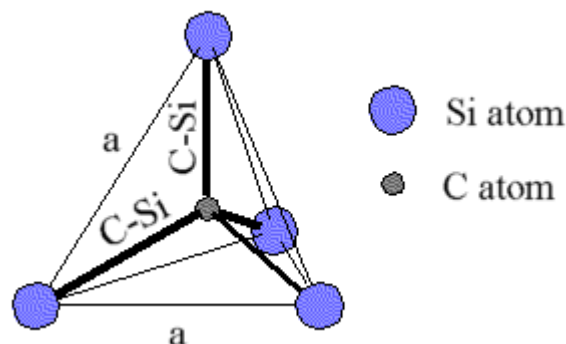
Σχήμα 1.1: Διακοπτικές απώλειες και χρόνος αποκατάστασης σε διόδους Schottky SiC σε σχέση με διόδους Si [SiCED, German, Tutorial ESCRM'08]

1.5 Ιδιότητες του Καρβιδίου του Πυριτίου

Το Καρβίδιο του Πυριτίου (SiC) παρατηρήθηκε για πρώτη φορά στη φύση στις αρχές του 20^{ου} αιώνα από τον Ελβετό επιστήμονα Berzelius.

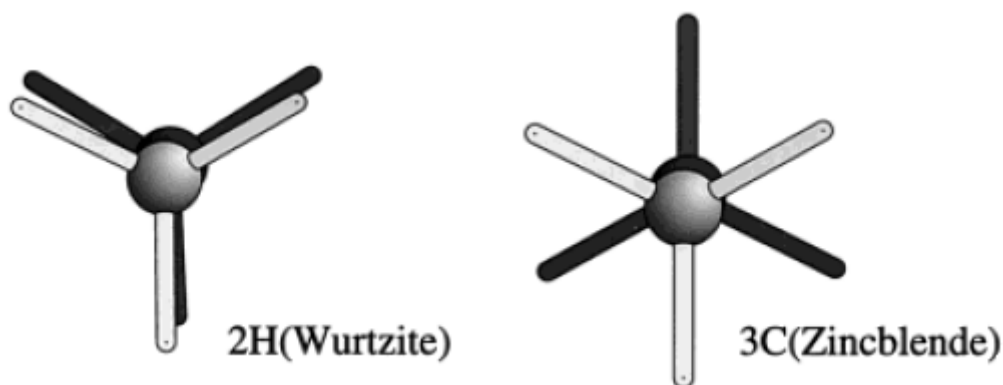
1.5.1 Κρυσταλλική δομή – Πολυτυπισμός SiC

Το SiC είναι μια στερεά διμερής ένωση που αποτελείται από άτομα πυριτίου Si και καρβιδίου C, με στοιχειομετρία 50% καρβίδιο και 50% πυρίτιο. Το SiC είναι ένας ομοιοπολικός κρύσταλλος και έχει τιμές ηλεκτραρνητικότητας κατά Pauling 1,90 για το Si και 2,55 για το C. Κάθε άτομο Si ή C συνδέεται με τέσσερα άτομα (τετραεδρική διάταξη). Ο χημικός δεσμός μεταξύ του Si και του C είναι ομοιοπολικής φύσεως, ενώ στο σύστημα αυτό παρουσιάζονται ομοιοπολικές ακτίνες Si και C 1,17 και 0,77 Άνγκστρεμ αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών ατόμων πυριτίου είναι περίπου 3.09 (Σχήμα 1.2).



Σχήμα 1.2 : Τετραεδρικός σχηματισμός ατόμου C συνδεδεμένο με τέσσερα γειτονικά άτομα Si. Οι αποστάσεις των δεσμών a και C-Si είναι 3.08 και 1.89 Άνγκστρεμ αντίστοιχα [3].

Το SiC παρουσιάζει πολυτιπισμό και κάθε πολύτυπος εμφανίζει διαφορετικές ηλεκτρικές ιδιότητες. Οι πολύτυποι διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ακολουθία που εμφανίζουν οι διπλοστοιβάδες Si-C συσσωρευόμενες η μία πάνω στην άλλη. Κάθε διπλοστοιβάδα ατόμων Si-C μπορεί να τοποθετηθεί σε μία από τρεις συγκεκριμένες θέσεις παράλληλα μετατοπισμένη σε σχέση με μια βασική διπλοστοιβάδα, έστω *A*. Οι θέσεις αυτές ονομάζονται *A*, *B*, ή *C*. Ανάλογα με την ακολουθία επισώρευσης των διπλοστοιβάδων ο σχετικός προσανατολισμός των δεσμών μεταξύ των ατόμων Si και C είναι είτε εξαγωνικού (Wurtzite), είτε κυβικού (Zincblende) τύπου (Σχήμα 1.3) [4, 6].



Σχήμα 1.3 : Χημικοί δεσμοί τύπου Wurtzite και Zincblende μεταξύ Si και C [6].

Οι πιο κοινοί πολύτυποι είναι οι 3C, 4H και 6H. Το κοινό στοιχείο μεταξύ αυτών των πολύτυπων είναι η ύπαρξη διπλοστοιβάδων ατόμων Si και C [4].

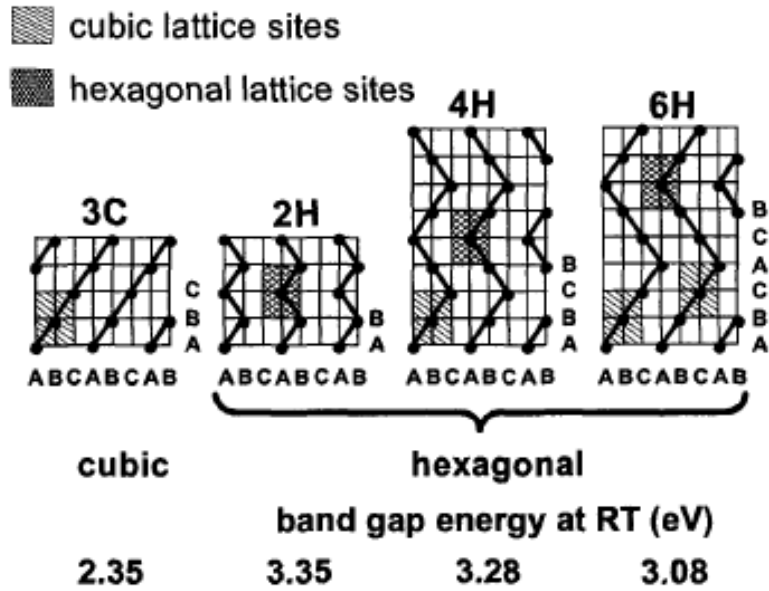
3C-SiC : Κυβική δομή με εξαγωνική κυψελίδα (unit cell) με τρεις διπλοστοιβάδες κατά μήκος της κρυσταλλογραφικής διεύθυνσης 0001 με πλεγματική σταθερά a 4,36 Άνγκστρεμ.

4H- και 6H-SiC : Ακολουθία διπλοστοιβάδων σε διάταξη ζιγκ-ζαγκ. Εδώ, η αλλαγή διεύθυνσης συμβαίνει κάθε δύο και τρεις διπλοστοιβάδες. Έτσι, προκύπτουν εξαγωνικές μοναδιαίες κυψελίδες μήκους τεσσάρων και έξι διπλοστοιβάδων αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4, για το 4H η πλεγματική σταθερά a και c είναι 3,09 και 10,3 Άνγκστρεμ αντίστοιχα, ενώ για το 6H η πλεγματική σταθερά a και c είναι 3,08 και 15,12 Άνγκστρεμ αντίστοιχα [5, 6, 7].

Σημαντικό χαρακτηριστικό των πολύτυπων στο SiC είναι η ύπαρξη πολικών επιφανειών. Για μια επιφάνεια κατά μήκος του c -axis (για παράδειγμα η επιφάνεια (0001) του 4H-SiC) αποτελείται από άτομα Si, ενώ η άλλη από άτομα C (000-1).

Αν η ακολουθία είναι τύπου ABCABC, τότε το πολύτυπο SiC που προκύπτει είναι το κυβικό 3C. Αν η ακολουθίας είναι τύπου ABAB, τότε το πολύτυπο SiC που

προκύπτει παρουσιάζει εξαγωνική συμμετρία και είναι το 2H. Αν η ακολουθία είναι τύπου ABCBABC, τότε το πολύτυπο SiC που προκύπτει παρουσιάζει εξαγωνική συμμετρία και είναι το 4H. Τέλος, αν η ακολουθία είναι τύπου ABCACBABCACB, τότε το πολύτυπο SiC που προκύπτει είναι το 6H με εξαγωνική συμμετρία (Σχήμα 1.4) [8].



Σχήμα 1.4: Ακολουθία συσσώρευσης (stacking sequence) διαφορετικών πολύτυπων SiC [8].

-
- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Walter_H._Schottky
- [2] Jian H. Zhao and Kuang Sheng, Ramon C. Lebron-Velilla, “Silicon Carbide Schottky Barrier Diode”, International Journal of High Speed Electronics and Systems, Vol. 15, No. 4 (2005) 821-866
- [3] http://www.oocities.org/tokyo/teahouse/2188/silicon_carbide.htm
- [4] Ιωάννης Δοντάς, Διδακτορική Διατριβή, “Μελέτη Διεπιφανειών Μετάλλου/Ανθρακοπυριτίου με Επιφανειακά Ευαίσθητες Τεχνικές”, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2003
- [5] F. Bechstedt, P. Käckell, A. Zywietz, K. Karch, B. Adolph, K. Tenelsen, J. Furthmüller, “Polytypism and Properties of Silicon Carbide”, Phys. Stat. Sol. (b) 202, 35 (1997).
- [6] W. R. L. Lambrecht, S. Limpijumnong, S. N. Rashkeev, and B. Segall, “Electronic Band Structure of SiC Polytypes: A Discussion of Theory and Experiment”, Phys. Stat. Sol. (b) 202, 5 (1997).
- [7] <http://www.ioffe.rssi.ru/SVA/NSM/Semicond/SiC/basic.html>
- [8] Gerhard Pensl, Florin Ciobanu, Thomas Frank, Michael Krieger, Sergey Reshanov, Frank Schmid, Michael Weidner, “SiC Material Properties”, International Journal of High Speed Electronics and Systems, Vol. 15, No. 4 (2005) 705-745

ΕΠΑΦΗ ΜΕΤΑΛΛΟΥ - ΗΜΙΑΓΩΓΟΥ

2.0 Γενικά

Η επαφή μεταξύ μιας μεταλλικής και μιας ημιαγωγικής επιφάνειας περιγράφεται χρησιμοποιώντας την χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ($I-V$). Οι επαφές μετάλλου-ημιαγωγού (Metal-Semiconductor, MS) χωρίζονται σε δυο κατηγορίες [1]:

- Ανορθωτικές (*rectifying*)

Δίοδος Schottky¹ (*Schottky diode*): επιτρέπουν μεγάλες τιμές ηλεκτρικού ρεύματος μόνο κατά τη μια διεύθυνση και αμελητέες τιμές στην άλλη.

- Μη ανορθωτικές (*non-rectifying*)

Ωμική επαφή (*ohmic contact*): χαρακτηρίζονται από μια πολύ μικρή αντίσταση, άσχετα με τη φορά του διερχόμενου ρεύματος.

Η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης που προκύπτει από μια ανορθωτική επαφή MS είναι παρόμοια με αυτήν της p-n διόδου. Αυτό μπορεί να ερμηνευτεί από την παρουσία ενός φράγματος δυναμικού που αναπτύσσεται στην διεπιφάνεια της επαφής και ονομάζεται φράγμα Schottky (*Schottky barrier*). Το φράγμα βρίσκεται μεταξύ του επιπέδου Fermi του μετάλλου και της ενεργειακής ζώνης των φορέων πλειονότητας του ημιαγωγού.

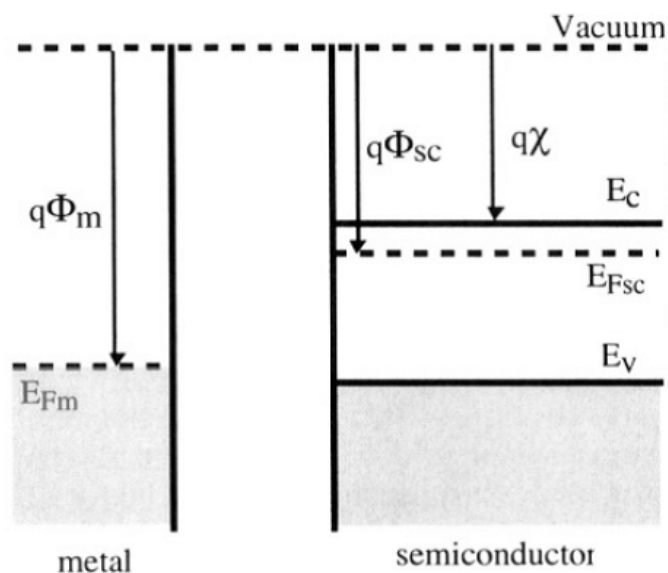
¹ Ο Schottky το 1938 ήταν εκείνος που πρώτος εισήγαγε την θεωρία του φορτίου χώρου στον ημιαγωγό για να εξηγήσει την συμπεριφορά των επαφών μεταξύ μετάλλου-ημιαγωγού.

2.1 Επαφή Schottky

2.1.1 Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών

Για να μελετηθεί η επαφή Schottky, είναι απαραίτητο να ληφθούν υπ' όψιν οι κανόνες που αφορούν το διάγραμμα ενεργειακών ζωνών. Η στάθμη Fermi πρέπει να είναι επίπεδη και μακριά από την ένωση, ενώ οι δυο επαφές θα πρέπει να ακολουθούν τις μεμονωμένες ενεργειακές ιδιότητές τους. Στο Σχήμα 2.1 διακρίνονται τα ενεργειακά διαγράμματα του μετάλλου και του ημιαγωγού τύπου n πριν τα δυο υλικά έρθουν σε επαφή.

Για την περίπτωση ημιαγωγού τύπου n, η επαφή μετάλλου-ημιαγωγού είναι ανορθωτική (επαφή Schottky) όταν έχουμε $\Phi_m > \Phi_{sc}$, ενώ όταν $\Phi_m < \Phi_{sc}$ η επαφή χαρακτηρίζεται ως ωμική. Οι αντίθετες συνθήκες σύγκρισης ισχύουν στην περίπτωση που ο ημιαγωγός είναι p τύπου.

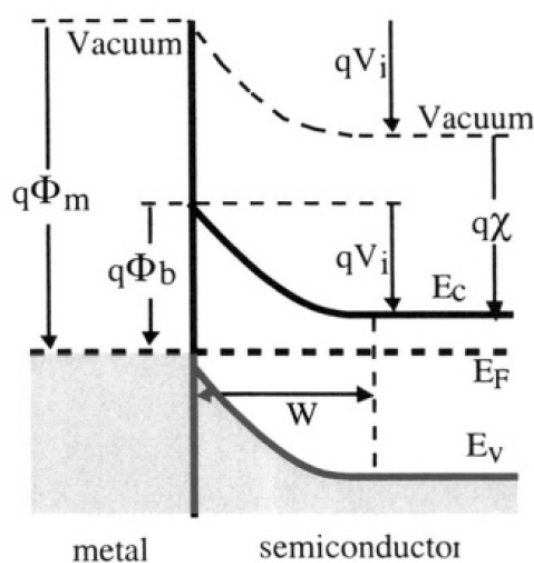


Σχήμα 2.1: Ενεργειακά διαγράμματα μετάλλου και ημιαγωγού τύπου n όπου διακρίνονται οι ενεργειακές στάθμες Fermi του μετάλλου και του ημιαγωγού, καθώς και η στάθμη του κενού, πριν από την δημιουργία της επαφής [2].

Το έργο εξόδου συμβολίζεται ως $q\Phi$ και είναι η ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στο επίπεδο του κενού και στο επίπεδο Fermi. Το επίπεδο του κενού ορίζεται ως η ενέργεια που πρέπει να έχει ένα ηλεκτρόνιο ώστε να μην δεσμεύεται από το συγκεκριμένο υλικό. Το έργο εξόδου του μετάλλου $q\Phi_m$, είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται προκειμένου ένα ηλεκτρόνιο να δραπετεύσει από το στερεό. Στο μέταλλο υπάρχουν ηλεκτρόνια που βρίσκονται στο επίπεδο Fermi E_{Fm} , ενώ από την πλευρά του ημιαγωγού δεν υπάρχουν ηλεκτρόνια στο επίπεδο Fermi E_{Fsc} . Το έργο εξόδου του ημιαγωγού $q\Phi_{sc}$ αντιστοιχεί στην ενέργεια που απαιτείται για να

απομακρυνθεί ένα ηλεκτρόνιο από τον ημιαγωγό. Η ηλεκτρονική συγγένεια (*electron affinity*) $q\chi$ του ημιαγωγού ορίζεται ως η ενεργειακή διαφορά μεταξύ της ζώνης αγωγιμότητας και του επιπέδου του κενού.

Στον σχηματισμό της επαφής μεταξύ του μετάλλου και του ημιαγωγού, έχουμε ανακατανομή ηλεκτρικών φορτίων κατά μήκος της επαφής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, της δημιουργίας ενός ηλεκτροστατικού πεδίου που οδηγεί στην κάμψη των ζωνών στην επιφανειακή περιοχή του ημιαγωγού (Σχήμα 2.2).



Σχήμα 2.2: Ενεργειακά διαγράμματα μέταλλου και ημιαγωγού τύπου *n* μετά τον σχηματισμό της επαφής σε κατάσταση ισορροπίας [2].

Όταν οι δυο επιφάνειες με διαφορετικά έργα εξόδου έρθουν σε επαφή, δημιουργείται μεταξύ τους μια διάφορα δυναμικού, γνωστή ως φράγμα δυναμικού Schottky (Schottky Barrier Height, SBH). Στην ένωση MS, γίνεται μετάβαση ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό προς το μέταλλο, δηλαδή από το τμήμα που έχει την ψηλότερη στάθμη Fermi προς το τμήμα με την χαμηλότερη στάθμη. Τα ηλεκτρόνια που εγκαταλείπουν τον ημιαγωγό δημιουργούν μια περιοχή απογυμνωμένη από ηλεκτρόνια, η οποία έχει πάχος W και ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης. Στην περιοχή αυτή παραμένουν εκτεθειμένα θετικά φορτισμένα σωματίδια. Επομένως, ανάμεσα στο μέταλλο και στον ημιαγωγό δημιουργείται ένα δυναμικό επαφής, το οποίο ονομάζεται εσωτερικό δυναμικό V_i . Αυτό δημιουργεί με την σειρά του, ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο E_i με κατεύθυνση από τα θετικά φορτία προς τα αρνητικά της μεταλλικής επιφάνειας. Μετά από χρόνο, το εσωτερικό δυναμικό αποκτά τιμή τέτοια ώστε αποτρέπει περαιτέρω συσσώρευση ηλεκτρονίων στην μεταλλική επιφάνεια και το σύστημα

ισορροπεί στην κατάσταση αυτή. Η περιοχή απογύμνωσης έχει απογυμνωθεί πλήρως από ηλεκτρόνια και περιέχει μόνο εκτεθειμένους θετικούς φορείς. Η περιοχή απογύμνωσης καλείται και περιοχή χωρικού φορτίου (Space-Charge Region).

Σε κατάσταση ισορροπίας, θα πρέπει η στάθμη Fermi να είναι ενιαία κατά μήκος της επαφής MS και η ηλεκτρονική συγγένεια θεωρείται ότι παραμένει αμετάβλητη ακόμα και μετά την επαφή. Το ποσό της κάμψης των ζωνών θα είναι ίσο με τη διαφορά ανάμεσα στα δυο επίπεδα κενού και θα ισούται με:

$$qV_i = q(\Phi_m - \Phi_{sc}) \quad (2.1)$$

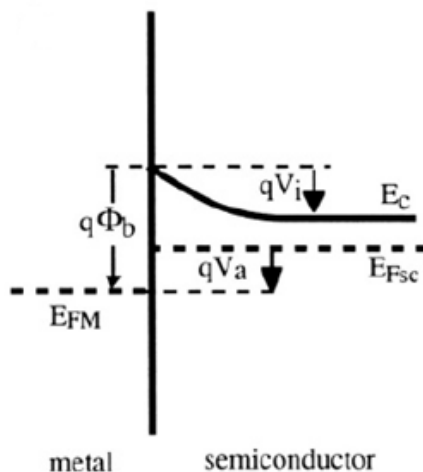
όπου το V_{bi} είναι το δυναμικό επαφής (*built-in potential*). Το ύψος φραγμού δυναμικού που βλέπουν τα ηλεκτρόνια του μετάλλου για να κινηθούν προς τον ημιαγωγό ονομάζεται φραγμός δυναμικού Schottky και ισούται με:

$$q\Phi_b = q(\Phi_m - \chi) = qV_i + (E_C - E_F) \quad (2.2)$$

Σε θερμοκρασία δωματίου, όλα τα δυναμικά επαφής συγκριτικά είναι μεγαλύτερα από την ποσότητα kT/q και μόνο ένας μικρός αριθμός ηλεκτρονίων καταφέρνει τελικά να υπερπηδήσει πάνω από το ύψος φραγμού δυναμικού που βλέπει ένα ηλεκτρόνιο από τον ημιαγωγό προς το μέταλλο. Το ρεύμα που προκύπτει από τα συγκεκριμένα ηλεκτρόνια συμβολίζεται ως $I_{m \rightarrow s}$. Η φορά του βέλους στον συμβολισμό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ηλεκτρόνια μεταφέρουν αρνητικό φορτίο. Οπότε, τα ηλεκτρόνια τα οποία μεταβαίνουν από τον ημιαγωγό στο μέταλλο αντιστοιχούν σε ροή θετικών φορτίων.

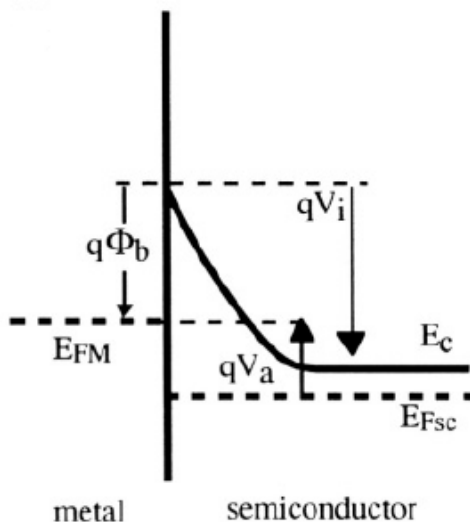
Χωρίς την εφαρμογή εξωτερικής τάσης και σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας, το ρεύμα $I_{m \rightarrow s}$ της επαφής είναι ίσο και αντίθετο με το ρεύμα που ρέει από το μέταλλο στον ημιαγωγό $I_{s \rightarrow m}$. Άρα, σε κατάσταση ισορροπίας ισχύει ότι $I_{m \rightarrow s} = -I_{s \rightarrow m}$.

Εάν στην επαφή MS εφαρμοστεί μια θετική τάση V_a ($V_a > 0$), τότε το ύψος φραγμού δυναμικού που βλέπουν τα ηλεκτρόνια από την πλευρά του ημιαγωγού ελαττώνεται από V_i σε $(V_i - V_a)$ (Σχήμα 2.3) [2, 3]. Η πυκνότητα ηλεκτρονίων που είναι διαθέσιμη για να ρέσουν από τον ημιαγωγό στο μέταλλο αυξάνεται εκθετικά. Από την άλλη, η ροή ηλεκτρονίων από το μέταλλο στον ημιαγωγό παραμένει σταθερή και αυτό συμβαίνει διότι το ύψος φραγμού δυναμικού Φ_b που βλέπουν τα ηλεκτρόνια από την πλευρά του μετάλλου δεν μεταβάλλεται.



Σχήμα 2.3: Ενεργειακό διάγραμμα μετάλλου και ημιαγωγού τύπου n όταν στην επαφή εφαρμόζεται μια θετική εξωτερική τάση V_a [2].

Εάν στην επαφή MS εφαρμοστεί μια αρνητική τάση V_a ($V_a < 0$), τότε το ύψος φραγμού δυναμικού που βλέπουν τα ηλεκτρόνια από την πλευρά του ημιαγωγού αυξάνεται από V_i σε $(V_i - V_a)$ (Σχήμα 2.4). Η ροή ηλεκτρονίων από τον ημιαγωγό στο μέταλλο $I_{m \rightarrow s}$ μειώνεται σημαντικά ενώ η ροή ηλεκτρονίων από το μέταλλο στον ημιαγωγό παραμένει αμετάβλητη $I_{s \rightarrow m}$. Η τιμή της διαφοράς των δυο ροών ρεύματος ($I_{s \rightarrow m} - I_{m \rightarrow s}$) είναι ελάχιστη.



Σχήμα 2.4: Ενεργειακό διάγραμμα μετάλλου και ημιαγωγού τύπου n όταν στην επαφή εφαρμόζεται μια αρνητική εξωτερική τάση V_a [2].

Αντίστοιχα, για μια ιδανική MS τύπου p, ο φραγμός δυναμικού Schottky δίνεται από την εξίσωση:

$$q\Phi_b = E_g - q(\Phi_m - \chi) \quad (2.3)$$

όπου το E_g είναι το ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού.

2.1.2 Περιοχή Απογύμνωσης

Για ημιαγωγό τύπου n, ισχύει ότι η πυκνότητα φορτίου ρ μπορεί να εκφραστεί ως qN_d , για $0 < x < W$, όπου W θυμίζουμε ότι είναι το μήκος της περιοχής απογύμνωσης. Με την βοήθεια της εξίσωσης Poisson γίνεται η σύνδεση της πυκνότητας φορτίου με το ηλεκτροστατικό πεδίο και έχουμε ότι [2, 3]:

$$\frac{d^2\Phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon_{sc}} = -q\frac{N_d}{\epsilon_{sc}} \quad (2.4)$$

$$\frac{d\Phi(x)}{dx} = \frac{qN_d}{\epsilon_{sc}}(W - x) \quad (2.5)$$

Όταν το $x = W$ και σε συνδυασμό με τη χρήση των οριακών συνθηκών, προκύπτει ότι $\Phi(W) = 0$ και $\frac{d\Phi(W)}{dx} = 0$ αφού το δυναμικό Φ και το ηλεκτρικό πεδίο E έχουν τιμή ίση με μηδέν στο ψευδο-ουδέτερο (quasi-neutral) κομμάτι του ημιαγωγού. Ολοκληρώνοντας την Εξίσωση 2.5 και εφαρμόζοντας όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι [2, 3]:

$$\Phi(x) = -\frac{qN_d}{2\epsilon_{sc}}(W - x)^2 \quad (2.6)$$

Το δυναμικό στο σημείο $x = 0$ είναι ίσο με το φράγμα δυναμικού που βλέπουν τα ηλεκτρόνια από την πλευρά του ημιαγωγού, για παράδειγμα $(V_i - V_a)$ όταν εφαρμόζεται μια εξωτερική θετική τάση δυναμικού V_a . Αντικαθιστώντας το $(V_i - V_a)$ στην εξίσωση 2.6 για $\Phi(x = 0)$ προκύπτει η έκφραση για το μήκος της περιοχής απογύμνωσης της επαφής:

$$W(V_a) = \sqrt{\frac{2\epsilon_{sc}}{qN_d}(V_i - V_a)} \quad (2.7)$$

Το ηλεκτρικό πεδίο στο σημείο $x = 0$ είναι ίσο με $E(0) = -qN_d W/\epsilon_{sc}$, ή ακόμα καλύτερα με την χρήση της εξίσωσης 2.5 προκύπτει ότι:

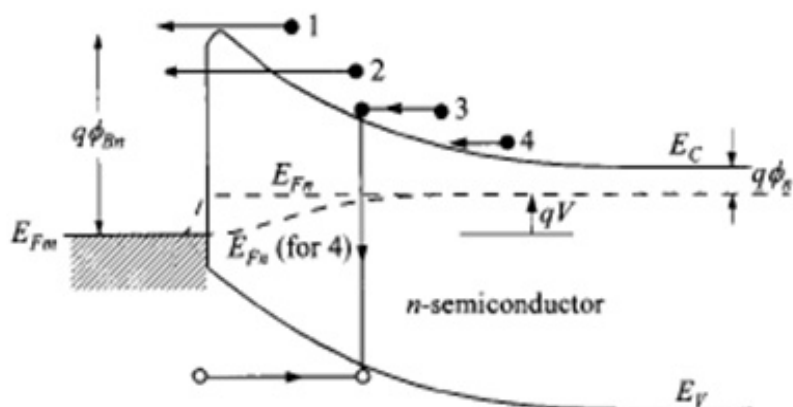
$$E(0) = -\sqrt{\frac{2qN_d}{\epsilon_{sc}}(V_i - V_a)} \quad (2.8)$$

2.2 Χαρακτηριστική Ρεύματος-Τάσης (I-V)

2.2.1 Εισαγωγή

Οι βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς ρεύματος σε μια δίοδο Schottky είναι [3]:

- 1) Θερμιονική εκπομπή
(υπερπήδηση του φράγματος δυναμικού από φορείς)
- 2) Ροή ρεύματος δια του φαινομένου σήραγγας
(*tunneling of carriers*)
- 3) Επανασύνδεση φορέων στην περιοχή απογύμνωσης
(*carrier recombination*)
- 4) Επανασύνδεση φορέων στην ουδέτερη περιοχή του ημιαγωγού
(*carrier recombination in the neutral region*)



Σχήμα 2.5: Βασικοί μηχανισμοί μεταφοράς ρεύματος σε μια δίοδο Schottky. (1) Θερμιονική εκπομπή. (2) Ροή ρεύματος δια του φαινομένου σήραγγας. (3) Επανασύνδεση φορέων στην περιοχή απογύμνωσης. (4) Επανασύνδεση φορέων στην ουδέτερη περιοχή του ημιαγωγού [3].

Για ημιαγωγούς μεγάλου ενεργειακού χάσματος όπως το καρβίδιο του πυριτίου, ο επικρατέστερος μηχανισμός μεταφοράς ρεύματος βασίζεται στην θερμιονική εκπομπή, δηλαδή στην «υπερπήδηση» του φράγματος δυναμικού από τους φορείς. Η θερμιονική εκπομπή αποτελεί κβαντομηχανικό μηχανισμό μεταφοράς σε αντίθεση με τη διάχυση (*diffusion theory*) που συνιστά κλασσικό μηχανισμό μεταφοράς.

2.2.2 Θερμιονική εκπομπή

Οι Schottky και Mott πρώτοι ανέπτυξαν την θεωρία για την ανορθωτική συμπεριφορά επαφών μετάλλου-ημιαγωγού. Με βάση την ανάλυση των Schottky και Mott, και σε συνδυασμό με την θεωρία του Bethe περί θερμιονικής εκπομπής φορέων πάνω από

φράγματα δυναμικού, βοήθησε να διερευνηθεί διεξοδικά η ανορθωτική συμπεριφορά τέτοιων συστημάτων.

Στην περίπτωση της επαφής μετάλλου-ημιαγωγού, η ροή ρεύματος από τον ημιαγωγό στο μέταλλο υπολογίζεται κυρίως από το φραγμό δυναμικού ($V_i - V_a$), όταν η διάδος βρίσκεται σε κατάσταση ορθής πόλωσης. Για να μπορέσει ένα ηλεκτρόνιο να «υπερπηδήσει» το ύψος φραγμού δυναμικού από τον ημιαγωγό, θα πρέπει η κινητική ενέργεια κατά μήκος της x-διεύθυνσης να ισούται τουλάχιστον με [2, 3, 4]:

$$\frac{1}{2}(m_n^* v_{xm}^2) \geq q(V_i - V_a) \quad (2.9)$$

Επομένως, η ροή της πυκνότητας ρεύματος από τον ημιαγωγό στο μέταλλο J_{sm} δίνεται τυπικά από την εξίσωση:

$$J_{sm} = J_0 \exp\left(\frac{qV_a}{k_B T}\right) \quad (2.10)$$

όπου

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right) \quad (2.11)$$

η ποσότητα J_0 ονομάζεται πυκνότητα ρεύματος κόρου, q είναι το στοιχειώδες φορτίο, V_a είναι το εξωτερικό δυναμικό, T είναι η θερμοκρασία, A^* είναι η σταθερά Richardson ($A^* = 4\pi m_n^* q k_B^2 / h^3$) με m_n^* την ενεργό μάζα (effective mass) των ηλεκτρονίων, και Φ_{Bn} είναι το φράγμα δυναμικού σε τύπου n ημιαγωγό. Η τιμή της σταθεράς Richardson A^* για ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο είναι ίσο με $120 A/K^2 cm^2$ [5]. Η ροή του ρεύματος από το μέταλλο στον ημιαγωγό όταν η επαφή βρίσκεται σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας ($V_a = 0$) μπορεί να προκύψει με την βοήθεια της Εξίσωσης 2.10:

$$J_{ms} = -J_{sm} = -J_0 \quad (2.12)$$

Οπότε, το ολικό ρεύμα που ρέει στην επαφή MS υπό συνθήκες ορθής πόλωσης και χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις 2.10 & 2.12 είναι ίσο με:

$$J = J_{sm} + J_{ms} = J_0 \left(\exp\left(\frac{qV_a}{k_B T}\right) - 1 \right) \quad (2.13)$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή ως εξίσωση διόδου Schottky, η οποία δείχνει την εκθετική εξάρτηση της πυκνότητας ρεύματος με την θερμοκρασία και την εφαρμοζόμενη τάση πόλωσης.

2.2.3 Θεωρία διάχυσης

Θεωρούμε ότι το πάχος της περιοχής απογύμνωσης (W) είναι μεγαλύτερο από την μέση ελεύθερη διαδρομή του ηλεκτρονίου στην απογυμνωμένη περιοχή του ημιαγωγού. Στην περιοχή απογύμνωσης, το συνολικό ρεύμα υπολογίζεται από το αλγεβρικό άθροισμα των συνιστωσών ολίσθησης και το ρεύμα διάχυσης. Επίσης, οι πυκνότητες ηλεκτρονίων στα σημεία $x = 0$ και $x = W$ δίνονται από [2, 3]:

$$n(0) = N_c \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{k_B T}\right) \quad (2.14)$$

$$n(W) = N_c \exp\left(-\frac{qV_n}{k_B T}\right) \quad (2.15)$$

όπου $V_n = E_c - E_f$.

Ακόμα, αν θεωρήσουμε την αντίστροφη πόλωση της επαφής, τότε η συνολική πυκνότητα ρεύματος J δίνεται από:

$$J = J_{SD} \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right) \quad (2.16)$$

όπου J_{SD} είναι η πυκνότητα ρεύματος και προκύπτει από τη θεωρία διάχυσης και δίνεται από:

$$J_{SD} = \left(\frac{q^2 D_n N_c}{k_B T} \right) \sqrt{\frac{2q(V_i - V_a) N_D}{\epsilon_0 \epsilon_s}} \exp\left(-\frac{q\Phi_{Bn}}{k_B T}\right) \quad (2.17)$$

Μια γρήγορη σύγκριση μεταξύ των εξισώσεων 2.11 και 2.17 αποκαλύπτει ότι, η πυκνότητα ρεύματος κόρου που προκύπτει από το μοντέλο της θερμιονικής εκπομπής εξαρτάται περισσότερο από την θερμοκρασία σε σχέση με την αντίστοιχη πυκνότητα ρεύματος που προκύπτει από το μοντέλο της διάχυσης.

2.2.4 Φαινόμενο σήραγγος

Ένας επίσης σημαντικός μηχανισμός μεταφοράς ρεύματος, ο οποίος πρέπει να αναφερθεί είναι το φαινόμενο της σήραγγος (*tunneling*) στον ημιαγωγό. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, τα ηλεκτρόνια δεν χρειάζεται να «υπερπηδήσουν» το φράγμα δυναμικού αλλά να περάσουν μέσα από αυτό (Σχήμα 2.6).

Στο μέταλλο βρίσκεται μεγαλύτερος αριθμός ενεργητικού πληθυσμού ηλεκτρονίων από ότι στη ζώνη αγωγιμότητας, γεγονός που σημαίνει ότι όσα ηλεκτρόνια βρίσκονται κοντά στην στάθμη Fermi του μετάλλου E_{Fm} θα μεταβούν στον ημιαγωγό αναζητώντας χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες (φαινόμενο σήραγγας). Κάποια

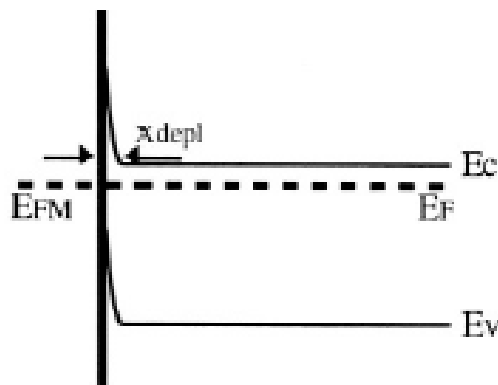
χρονική στιγμή, τα συσσωρευμένα ηλεκτρόνια στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού θα εμποδίσουν την περαιτέρω συσσώρευση ηλεκτρονίων, τότε θα έχει επιτευχθεί ισορροπία. Η περιοχή του ημιαγωγού που βρίσκεται κοντά στην επαφή, και στην οποία υπάρχει περίσσεια ηλεκτρονίων, ονομάζεται περιοχή συσσώρευσης. Είναι φανερό ότι τα επιπλέον ηλεκτρόνια στην περιοχή συσσώρευσης αυξάνουν την αγωγιμότητα της περιοχής αυτής του ημιαγωγού.

Την πιθανότητα που έχει ένα ηλεκτρόνιο για να περάσει δια μέσου του φράγματος δυναμικού δίνεται από την παρακάτω εξίσωση [2]:

$$\theta = \exp\left(-\frac{4}{3}\sqrt{\frac{2qm}{\hbar}}\frac{\Phi_B}{\varepsilon}\right) \quad (2.18)$$

όπου το θ σχετίζεται με την πυκνότητα ρεύματος για τον μηχανισμό σήραγγας από την παρακάτω μαθηματική έκφραση:

$$J_T = qV_R n \theta \quad (2.19)$$



Σχήμα 2.6: Ενεργειακό διάγραμμα μετάλλου και ημιαγωγού τύπου n για την περίπτωση όπου τα ηλεκτρόνια περνάνε μέσα από το φράγμα δυναμικού καταλαμβάνοντας χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες[2].

2.2.5 Φορείς μειονότητας

Αν τώρα θεωρήσουμε μια επαφή μετάλλου-ημιαγωγού τύπου n, είναι απαραίτητο να θεωρήσουμε το ρεύμα που δημιουργείται από τους φορείς μειονότητας, το οποίο οφείλεται στην γένεση οπών στον ημιαγωγό. Επομένως η εξίσωση που δίνει το πυκνότητα ρεύματος φορέων μειονότητας J_p μπορεί να γραφτεί ως [6]:

$$J_p = J_{p0} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.20)$$

ενώ το μήκος διάχυσης φορέων J_{p0} μπορεί να γραφτεί ως:

$$J_{p0} = \frac{qD_p n_i^2}{L_p N_D} \quad (2.21)$$

Η τιμή του ρεύματος των φορέων μειονότητας είναι μικρή αν αυτή συγκριθεί με την αντίστοιχη τιμή του ρεύματος των φορέων πλειονότητας. Γι αυτό το λόγο, η δίοδος Schottky χαρακτηρίζεται ως μονοπολική δίοδος (unipolar diode).

2.2.6 Λοιποί παράγοντες που επηρεάζουν την χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης

Στην πραγματικότητα, η χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης μιας δίοδου Schottky μπορεί να αποκλίνει από την ιδανική συμπεριφορά και αυτό οφείλεται κυρίως σε [3]:

- Μείωση του φράγματος δυναμικού εξαιτίας του φαινομένου «image force barrier lowering».
- Αυξομείωση ύψους φραγμού δυναμικού από τη μεταβολή του εξωτερικού δυναμικού V .

Ας εξετάσουμε πρώτα την περίπτωση του φαινομένου «image force», θεωρώντας ένα ηλεκτρόνιο με κατεύθυνση από τον ημιαγωγό στο μέταλλο. Στην πλευρά του μετάλλου έχουμε την δημιουργία ενός θετικού εικονικού φορτίου (*image charge*), με αποτέλεσμα το ύψος φραγμού δυναμικού Φ_b να χαμηλώνει κατά $\Delta\Phi_{BI}$. Οπότε, το πραγματικό ύψος φραγμού που «βλέπουν» τα ηλεκτρόνια στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι:

$$\Phi_E = \Phi_b - \Delta\Phi_{BI} \quad (2.22)$$

Όταν διαταράσσεται η περιοδικότητα του κρυσταλλικού πλέγματος σε αντιστοιχία με την διεπαφή με το μέταλλο, έτσι οι ενεργειακές καταστάσεις μέσα στο ενεργειακό χάσμα πρέπει να συνυπολογιστούν στην συνθήκη εξισορρόπησης φορτίου στην διεπιφάνεια. Στην περίπτωση αυτή, το ύψος του φράγματος Schottky εξαρτάται από την πολικότητα της επιφάνειας του υποστρώματος, ενώ η εξάρτηση αυτή μπορεί να εκφραστεί από μια θετική παράμετρο $\beta(V)$. Όταν λοιπόν λαμβάνονται υπόψη το φαινόμενο «image force» και η εξάρτηση του ύψους φράγματος Schottky από ένα εξωτερικό δυναμικό, η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής [3]:

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q(\Phi_{bo} - (\Delta\Phi_{BI})_o + \beta V)}{kT}\right) \exp\left(\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1\right) \quad (2.23)$$

2.2.7 Χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ανάστροφης πόλωσης

Όταν μια δίοδος Schottky βρίσκεται σε κατάσταση ανάστροφης πόλωσης, τότε η φορά κίνησης των ηλεκτρονίων είναι με κατεύθυνση από το μέταλλο στον ημιαγωγό. Εάν ισχύει $qV > kT$, τότε η ανάστροφη πυκνότητα ρεύματος μπορεί να εκφραστεί ως εξής [4]:

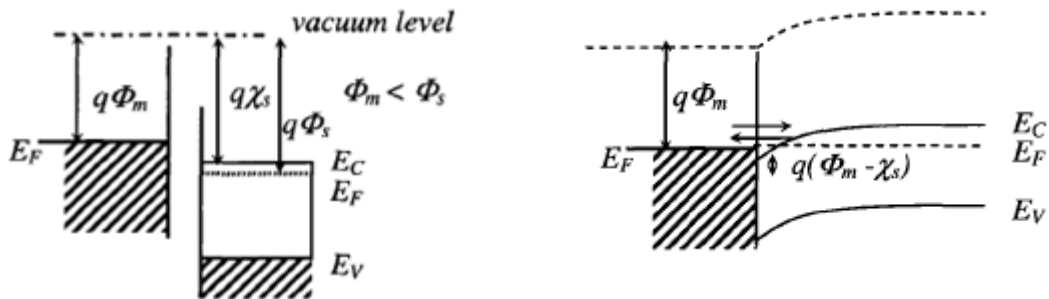
$$J_R = A^{**}T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.24)$$

όπου A^{**} είναι η ενεργός σταθερά Richardson.

2.2.8 Ωμικές επαφές

Οι επαφές MS ωμικού χαρακτήρα παίζουν σημαντικό ρόλο στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, καθώς είναι απαραίτητες για την αλληλεπίδραση των κυκλωματικών στοιχείων με τον έξω κόσμο.

Η ωμική επαφή MS έχει αμελητέα αντίσταση και δεν περιορίζει την ροή του ηλεκτρικού ρεύματος άσχετα με τη φορά του διερχόμενου ρεύματος. Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η δημιουργία μιας τέτοιας επαφής. Το έργο εξόδου του μετάλλου είναι μικρότερο από το έργο εξόδου του ημιαγωγού ($\Phi_m < \Phi_s$).



Σχήμα 2.7: Ενεργειακά διαγράμματα ζωνών μεταξύ ενός μετάλλου και ενός ημιαγωγού τύπου n ($\Phi_m < \Phi_s$) [7].

(α) Πριν την δημιουργία της επαφής

(β) Μετά την δημιουργία της επαφής

Κατά την δημιουργία της επαφής, τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται κοντά στην στάθμη Fermi του μετάλλου θα μεταβούν στην πλευρά του ημιαγωγού, λόγω του φαινομένου σήραγγας, σε χαμηλότερες ενεργειακές στάθμες. Έτσι, τα ηλεκτρόνια θα καταλαμβάνουν τις ενεργειακές στάθμες γύρω από την ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού. Κάποια στιγμή τα συσσωρευμένα ηλεκτρόνια στην E_C του ημιαγωγού θα αποτρέψουν την περαιτέρω μετακίνηση ηλεκτρονίων, τότε θα επέλθει ισορροπία στο

σύστημα. Η στάθμη Fermi θα είναι κοινή κατά μήκος της επαφής MS, όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.7.

Για την δημιουργία μιας τέτοιας επαφής, σημαντικό ρόλο παίζει η επιλογή του μετάλλου. Το επίπεδο της στάθμης Fermi του μετάλλου θα πρέπει να έχει μικρή διαφορά με το επίπεδο της στάθμης Fermi του ημιαγωγού. Κατ' αυτόν τον τρόπο, το ύψος φραγμού δυναμικού ελαττώνεται και τα ηλεκτρόνια μπορούν χωρίς δυσκολία να ρέουν κατά μήκος της επαφής, με μειωμένη αντίσταση επαφής.

Για τον σχηματισμό ωμικής επαφής, χρειάζεται ένα μέταλλο με έργο εξόδου συγκρίσιμο με την ηλεκτρονική συγγένεια του ημιαγωγού τύπου n. Για ημιαγωγούς μεγάλου χάσματος, όπως το SiC, υπάρχουν δυσκολίες επιλογής ενός τέτοιου μετάλλου. Αυτό συμβαίνει κυρίως διότι τα περισσότερα μέταλλα έχουν έργο εξόδου λιγότερο από 5V, ενώ η ηλεκτρονική συγγένεια είναι κοντά στα 4V. Μια καλή λύση για να ξεπεραστεί το πρόβλημα είναι η μεγαλύτερη νόθευση (*doping*) του ημιαγωγού πριν την δημιουργία της επαφής. Με αυτό τον τρόπο, το φράγμα δυναμικού στην επαφή MS λεπταίνει προκαλώντας μείωση της περιοχής απογύμνωσης. Αυτό συνεπάγεται ότι θα αυξηθεί η ροή των ηλεκτρονίων δια μέσου του φράγματος δυναμικού (*ρεύμα σήραγγας*).

Ένας άλλος τρόπος κατασκευής ωμικής επαφής γίνεται μέσω της διαδικασίας της θερμικής ανόπτησης. Κατά την ανόπτηση, η επαφή MS θερμαίνεται σε υψηλή θερμοκρασία για κάποιο χρονικό διάστημα. Η υψηλή θερμοκρασία επιτρέπει την χημική αντίδραση μεταξύ του μετάλλου και του ημιαγωγού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον σχηματισμό κραμάτων – μεταλλικών ενώσεων αλλάζοντας την χημική σύσταση κατά μήκος της επαφής. Με τον τρόπο αυτό, το υλικό γίνεται πιο αγώγιμο στον ηλεκτρισμό.

2.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση μεταλλικών επαφών πάνω σε 4H-SiC τύπου n

2.3.1 Γενικά

Γενικά, το SiC αλληλεπιδρά με τα περισσότερα μέταλλα. Παρακάτω παρουσιάζονται σε πίνακες τα πειραματικά αποτελέσματα μελετών από την βιβλιογραφία για μεταλλικές επαφές πάνω σε επιφάνειες υποστρώματος εξαγωνικού μονοκρυστάλλου 4H-SiC τύπου n, με κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό (0001). Στους πίνακες, μαζί με τα πειραματικά αποτελέσματα αναφέρονται και οι συνθήκες που διεξήχθησαν τα συγκεκριμένα πειράματα.

2.3.2 Ωμικές επαφές πάνω σε 4H-SiC

Στον Πίνακα 1 [7] αναγράφονται τα αποτελέσματα μελετών από την βιβλιογραφία για ωμικές επαφές πάνω σε υποστρώματα 4H-SiC τύπου n. Στην περίπτωση που εναποτέθηκαν περισσότερα από ένα μέταλλο, τότε αυτά χωρίζονται με «/» και εκείνο που είναι σε επαφή με τον ημιαγωγό, βρίσκεται στα αριστερά. Η θερμική ανόπτηση της επαφής MS αναφέρεται όπου πραγματοποιήθηκε.

Πίνακας 1: Βιβλιογραφική ανασκόπηση ωμικών επαφών πάνω σε 4H-SiC τύπου n [7].

Μέταλλο	Θερμική Ανόπτηση επαφής	N_D (cm^{-3})	ρ_c (Ωcm^2)	Αναφορά
Al	-	$>20^{20}$ P-impl	$0.54-1.2 \times 10^{-6}$ (TLM)	[8, 9]
Al/Ni	1000°C (2min) σε Ar	2×10^{20} P-impl	4.8×10^{-5} (TLM)	[10]
Co/Si/Co	500°C (5min) + 800°C (2min) σε κενό	1.1×10^{19} epi	1.8×10^{-6} (TLM)	[11]
Mo	-	$>10^{20}$ P-impl	2×10^{-6} (TLM)	[8]
Nb	1100°C (10min)	1.3×10^{19} epi	$<1 \times 10^{-6}$ (TLM)	[12]
Ni	-	$>10^{20}$ P-impl	3×10^{-6} (TLM)	[12]
Ni	1000°C (1min)	4.2×10^{15} epi	2.8×10^{-3} (c-TLM)	[13]
Ni	1000°C (2min) σε Ar	$>10^{20}$ P-impl	1.2×10^{-6} (TLM)	[14]
Ni	950°C (10min) σε Ar	1×10^{19} epi	2.8×10^{-6} (TLM)	[15]
Ni	1000°C (2min) σε Ar	2×10^{20} P-impl	6×10^{-6} (TLM)	[16]
Ni/Si	950°C (10min) σε Ar	1×10^{19} epi	2.7×10^{-5} (TLM)	[15]
NiCr	1100°C (3min) σε κενό	1.3×10^{19} epi	1.2×10^{-5} (TLM)	[17]
Si/Ni	900°C (10min) σε Ar-H ₂	2×10^{19} epi	1.9×10^{-6} (TLM)	[18]
Ti	-	$>10^{20}$ P-impl	2.7×10^{-7} (TLM)	[19]

2.3.3 Επαφές Schottky πάνω σε 4H-SiC

Στον Πίνακα 2 [20] αναγράφονται τα αποτελέσματα μελετών από την βιβλιογραφία για τον φράγμα δυναμικού διόδων Schottky πάνω σε 4H-SiC τύπου n. Στον πίνακα αναφέρονται, το είδος της μεταλλικής επαφής που χρησιμοποιήθηκε και τα αποτελέσματα του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός περιλαμβάνει τεχνικές ηλεκτρικών μετρήσεων ρεύματος-τάσης ($I-V$) και χωρητικότητας-τάσης ($C-V$).

Πίνακας 2: Ύψος φραγμού δυναμικού Schottky Φ_B διαφορετικών μεταλλικών επαφών πάνω σε τύπου n 4H-SiC (0001), Si-face [20].

Μέταλλο	Ύψος φραγμού δυναμικού		Παράγοντας ιδανικότητας (n)	Αναφορά
	I-V $q\Phi_B$ (eV)	C-V $q\Phi_B$ (eV)		
Ti	0.80	-	1.15	[21]
Ti	0.85	-	1.10	[21]
Ti/Au/Pt/Ti	1.17	-	1.09	[22]
Ti	1.17	-	1.06	[23]
TiW	1.22	1.23	1.05	[24]
TiW	1.18	1.19	1.10	[24]
Cu	1.60	-	<1.10	[25]
Cu	1.80	-	<1.10	[25]
Au	1.73	1.85	1.02	[26]
Ni	1.62	1.75	1.02	[26]
Ni	1.30	-	1.21	[27]
Pt	1.39	-	1.01	[28]

Στα δεδομένα του πίνακα παρατηρείται ότι οι περισσότερες μεταλλικές επαφές είναι ανορθωτικές και το ύψος φραγμού δυναμικού κυμαίνεται από 0.8 έως 1.8 eV. Η διασπορά των αποτελεσμάτων δείχνει την ευαισθησία στις λεπτομέρειες σχηματισμού των διεπιφανειών μετάλλου/ημιαγωγού.

Από την παράθεση των βιβλιογραφικών αποτελεσμάτων, δεν παρατηρείται συσχέτιση μεταξύ του έργου εξόδου του μετάλλου με το ύψος φραγμού δυναμικού της επαφής μετάλλου/ημιαγωγού.

Στον Πίνακα 3 αναγράφεται το έργο εξόδου των πιο διαδεδομένων μετάλλων της βιβλιογραφίας, με υπολογισμένο το αντίστοιχο φράγμα Schottky για ιδανική δίοδο.

Πίνακας 3: Έργο εξόδου Φ_m (eV) διαφορετικών μετάλλων που έχουν μελετηθεί για την δημιουργία δίοδου Schottky πάνω σε n-type 4H-SiC.

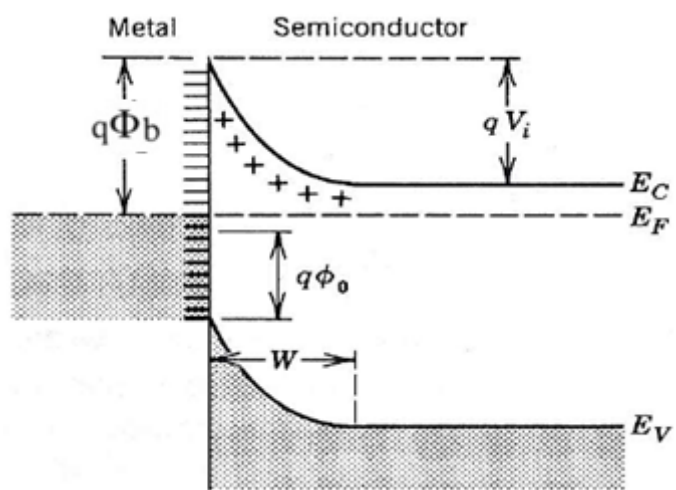
Μέταλλο	Ti	Cr	Cu	Au	Ni	Pt
$q\Phi_m$ (eV)	4.33	4.37	4.65	5.1	5.15	5.65
$q(\Phi_m - \chi_s)$ (eV)	1.23	1.27	1.55	2	2.05	2.55

Με βάση τους Πίνακες 2 & 3, η εξίσωση 2.1 του μοντέλου Schottky-Mott, μολονότι αναφέρεται για την ιδανική περίπτωση δίοδου, φαίνεται να απέχει αρκετά σε πολλές από τις επαφές.

Σημαντική απόκλιση από το ιδανικό μοντέλο που περιγράφηκε νωρίτερα, είναι η παρουσία επιφανειακών καταστάσεων. Με τον ορό επιφανειακές καταστάσεις εννοούμε καταστάσεις εντοπισμένες στην επιφάνεια του ημιαγωγού που παρήχθησαν από την διακοπή της περιοδικότητας του κρυσταλλικού πλέγματος στην επιφάνεια. Οι καταστάσεις αυτές, μπορεί να είναι κατειλημμένες ή κενές από ηλεκτρόνια ανάλογα με τη θέση που καταλαμβάνουν στο ενεργειακό χάσμα σε σχέση με το επίπεδο Fermi.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, οι επιφανειακές καταστάσεις μέσα στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού είναι κατειλημμένες από ηλεκτρόνια έως την ενέργεια $q\Phi_0$. Για μεγάλες συγκεντρώσεις καταστάσεων, έχουμε καθήλωση της στάθμης Fermi E_F στο $q\Phi_0$ (*Fermi level pinning* στην επιφάνεια). Το ύψος φραγμού δυναμικού δίνεται από την εξίσωση:

$$q\Phi_b = E_C - E_F \quad (2.25)$$



Σχήμα 2.8: Επιφανειακές καταστάσεις στον ημιαγωγό, κατειλημμένες από ηλεκτρόνια έως την ενέργεια $q\Phi_0$.

Γενικά, τα συμπεράσματα που προκύπτουν συνοψίζονται ως εξής:

1. Φ_b ανεξάρτητο από Φ_m
2. Καθορισμός στάθμης Fermi από επιφανειακές καταστάσεις \rightarrow οπότε και τιμής του Φ_b .

-
- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Walter_H._Schottky
- [2] Jean-Pierre Colinge, Cynthia A. Colinge, "Physics of Semiconductor Devices", Kluwer Academic Publishers
- [3] S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, J. Wiley & Sons, p. 154, 3d edition, 2007.
- [4] www.physics.csbsju.edu/370/thermionic.pdf
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Thermionic_emission
- [6] Schroder, Semiconductor material and Devices Characterization, Wiley (1997)
- [7] Roccaforte F, La Via F, Raineri V., "Ohmic contacts to SiC", International journal of high speed electronics and systems ", 2005, vol. 15, no4, pp. 781-820.
- [8] S. Tanimoto, M. Inada, N. Kiritani, M. Hoshi, H. Okushi, K. Arai, Single contact-material MESFETs on 4H-SiC, *Mat. Sci. Forum* 457-460, 1221-1224 (2004).
- [9] D. K. Schroder, *Semiconductor material and device characterization*, John Wiley and Sons, New York, 1998.
- [10] N. Kiritani, M. Hoshi, S. Tanimoto, K. Adachi, S. Nishizawa, T. Yatsuo, H. Okushi, K. Arai, Single material ohmic contacts simultaneously formed on the source/p-well/gate of 4H-SiC vertical MOSFETs, *Mat. Sci. Forum* 433-436, 669-672 (2003).
- [11] N.I. Cho, K.H. Jung, Y. Choi, Improved ohmic contact to the n-type 4H-SiC semiconductor using cobalt silicides, *Semicond. Sci. Technol.* **19**, 306-310 (2004).
- [12] T.N. Oder, J.R. Williams, K.W. Bryant, M.T. Bozack, J. Crofton, Low resistance ohmic contacts to n-SiC using Niobium, *Mat. Sci. Forum* 338-342, 997-1000 (2000).
- [13] S.Y. Han, K.H. Kim, J.K. Kim, H.W. Jang, K.H. Lee, N.K. Kim, E.D. Kim, J.L. Lee, Ohmic contact formation mechanism of Ni on n-type 4H-SiC, *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1816-1818 (2001).
- [14] H. Na, H. Kim, K. Adachi, N. Kiritani, S. Tanimoto, H. Okushi, K. Arai, High-quality Schottky and ohmic contacts in planar 4H-SiC semiconductor field-effect transistors and device performance, *J. Electron. Mater.* **33**, 89-93 (2004).
- [15] Ts. Marinova, A. Kakanakova-Gerogieva, V. Krastev, R. Kakanakov, M. Neshev, L. Kassamakova, O. Noblanc, C. Arnodo, S. Cassette, C. Brylinski, B. Pecz, G. Radnoczi, Gy. Vincze, Nickel based ohmic contacts on SiC, *Mat. Sci. Eng. B* **46**, 223-226 (1997).

-
- [16] S. Tanimoto, N. Kiritani, M. Hoshi, H. Okushi, Ohmic contact structure and fabrication process applicable to practical SiC devices, *Mat. Sci. Forum* **389-393**, 879-884 (2002).
- [17] E.D. Luckowski, J.M. Delucca, J.R. Williams, S.E. Mohny, M.J. Bozack, T. Isaac-Smith, J. Crofton, Improved ohmic contact to n-type 4H and 6H-SiC using nichrome, *J. Electron. Mater.* **27**, 330-334 (1998).
- [18] T. Nakamura, M. Satoh, NiSi₂ ohmic contact to n-type 4H-SiC, *Mat. Sci. Forum* **389-393**, 889-892 (2002).
- [19] S. Tanimoto, M. Inada, N. Kiritani, M. Hoshi, H. Okushi, K. Arai, Single contact-material MESFETs on 4H-SiC, *Mat. Sci. Forum* **457-460**, 1221-1224 (2004).
- [20] Jian H. Zhao and Kuang Sheng, Ramon C. Lebron-Velilla, "Silicon Carbide Schottky Barrier Diode", *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, Vol. 15, No. 4 (2005) 821-866.
- [21] K.P. Schoen, J.M. Woodall, J.A. Cooper and M.R. Melloch, "Design considerations and experimental analysis of high-voltage SiC Schottky barrier rectifiers" *Electron Devices, IEEE Trans.*, *45*, 1998, pp. 1595 – 1604.
- [22] L. Kassamakova, A. Kakanakova-Georgieva, R. Kakanakov, T.S. Marinova, I. Kassamakov, Tz. Djambova, O. Noblanc, C. Arnodo, S. Cassette, C. Brylinski, "Thermostable Ti/Au/Pt/Ti Schottky contacts to n-type 4H-SiC" *Semiconductor Science & Technology*. *13*, 1998. 1025.
- [23] U. Zimmermann, A. Hallen and B. Breitholtz, "Current voltage characteristics of high-voltage 4H silicon carbide diodes" *Materials Science Forum.*, *338*, 2000. pp. 1323-1326.
- [24] S.K. Lee, C.-M. Zetterling, M. Ostling, "Schottky diode formation and characterization of titanium tungsten to n-and p-type 4H silicon carbide." *J. Appl. Phys.*, *87*, 2000, p. 8039.
- [25] T. Hatayama, K. Kawahito, H. Kijima, Y. Uraoka and T. Fuyuki, "Electrical properties and interface reaction of annealed Cu/4H-SiC Schottky rectifiers" *Materials Science Forum*, *389-393*, 2002. pp. 925-928.
- [26] A. Itoh, H. Matsunami, "Analysis of Schottky barrier heights of metal/SiC contacts and its possible application to high-voltage rectifying devices" *Physica Status Solidi A-Applied Research*, *162*, 1997. pp. 389-408.

[27] K.P. Schoen, J.M. Woodall, J.A. Cooper and M.R. Melloch, "Design considerations and experimental analysis of high-voltage SiC Schottky barrier rectifiers" *Electron Devices, IEEE Trans.*, *45*, 1998, pp. 1595 – 1604.

[28] V. Saxena, , Jian Nong Su, A.J Steckl, , "High-voltage Ni- and Pt-SiC Schottky diodes utilizing metal field plate termination", *IEEE Trans. Electr. Dev.*, *46*, 1999 pp. 456 – 464.

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

3.0 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την περιγραφή των πειραμάτων κατασκευής διόδων Schottky πάνω σε ημιαγωγό 4H-SiC τύπου n. Συνολικά, κατασκευάστηκαν δίοδοι Schottky από τρεις διαφορετικές επιμεταλλώσεις:

1. (150nm/3nm) Ni/Ti/4H-SiC
2. (200nm) Cr/4H-SiC
3. (100nm/50nm) Au/Cr/4H-SiC

Η κατασκευή των διόδων πραγματοποιείται με τον ελάχιστο αριθμό βημάτων κατασκευής. Τα βασικά βήματα κατασκευής είναι τρία:

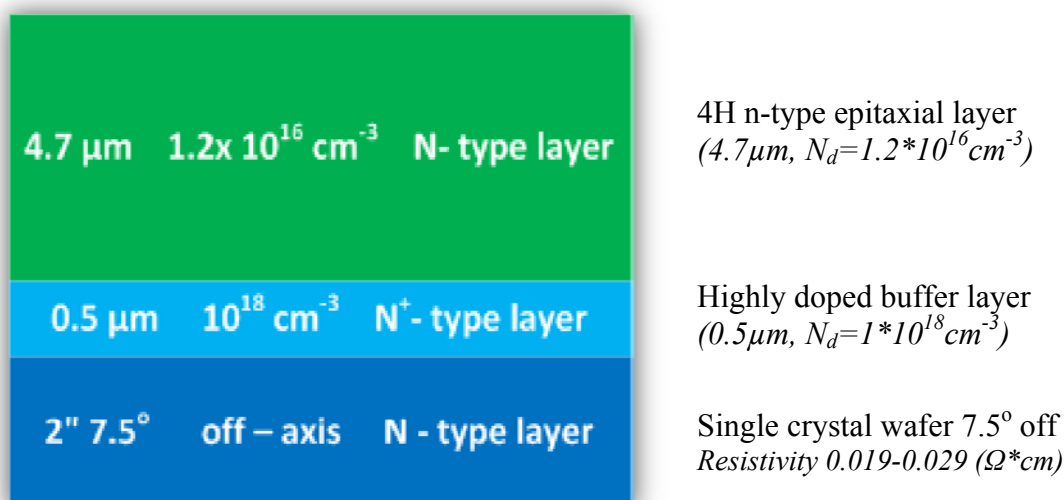
1. Ηλεκτρική απογύμνωση (mesa isolation), όπου ορίζονται τα σχήματα με γεωμετρικό τρόπο και απομονώνονται ηλεκτρικά οι ενεργές περιοχές της ημιαγωγικής δομής, όπου θα τοποθετηθούν οι ημιαγωγικές διατάξεις.
2. Κατασκευή ωμικής επαφής (ohmic contact).
3. Κατασκευή επαφής Schottky (metal Schottky contact)

Όλη η διαδικασία κατασκευής καθώς και οι ηλεκτρικές μετρήσεις των δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Μικροηλεκτρονικής του Ινστιτούτου Ηλεκτρονικής Δομής & Λέιζερ του ΙΤΕ σε συνεργασία με το Φυσικό Τμήμα του Πανεπιστημίου Κρήτης.

3.1 Η δομή του 4H-SiC

Η κατασκευή διόδων Schottky πραγματοποιήθηκε πάνω σε επιφάνειες υποστρώματος εξαγωνικού μονοκρυστάλλου Καρβίδιου του Πυριτίου (4H-SiC), τύπου n, με κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό (0001). Τα υποστρώματα ήταν διαστάσεων 2 ιντσών, κατασκευασμένα από την εταιρεία Cree Research Inc. [1]. Οι κρύσταλλοι 4H-SiC είναι ημιαγωγοί τύπου-n με συγκέντρωση προσμίξεων (10^{18}cm^{-3}) περίπου και ειδικής αντίστασης $0.019 - 0.029 (\Omega \cdot \text{cm})$ και είναι κομμένοι σε γωνία $7.5^\circ \pm 0.5^\circ$ ως προς το επίπεδο (0001) κατά τη διεύθυνση.

Στο σχήμα 3.1 απεικονίζεται η δομή ενός τυπικού υποστρώματος 4H-SiC (0001) από την Cree με τα επιταξιακά στρώματα [1].



Σχήμα 3.1: Επιφάνεια υποστρώματος 4H-SiC(0001) από την Cree Research Inc, με τα αντίστοιχα επιταξιακά υποστρώματα.

3.2 Τεχνολογία κατασκευής

3.2.1 Χημική προετοιμασία δειγμάτων

Ο καθαρισμός της επιφάνειας από τα οργανικά υπολείμματα (διαδικασία απολίπανσης) περιλαμβάνει διαδοχικές εμβάπτισεις της επιφάνειας του υποστρώματος σε διαφορετικές οργανικές χημικές ενώσεις. Η σειρά των χημικών ενώσεων που ακολουθείται είναι προκαθορισμένη και κάθε στάδιο που χρησιμοποιείται έχει συγκεκριμένο στόχο καθαρισμού. Η σειρά απομάκρυνσης των οργανικών υπολειμμάτων περιλαμβάνει τα εξής στάδια:

- Εμβάπτιση σε διάλυμα τριγλωροαιθυλενίου (TCE), το οποίο έχει την δυνατότητα να απομακρύνει το λίπος.

- Εμβάπτιση σε διάλυμα ακετόνης (Acetone), το οποίο απομακρύνει τα υπολείμματα τριγλωροαιθυλενίου.
- Εμβάπτιση σε διάλυμα ισο-προπανόλης (Propanol), το οποίο απομακρύνει τα υπολείμματα ακετόνης.

Ο χρόνος για κάθε εμβάπτιση του wafer είναι 2 λεπτά και για καλύτερο αποτέλεσμα πολλές φορές κατά την διάρκεια της κάθε εμβάπτισης χρησιμοποιείται λουτρό υπέρηχων σε θερμοκρασία 60 °C

Έπειτα, το wafer ξεπλένεται με απιονισμένο H₂O (DI H₂O) με υψηλή ειδική αντίσταση (>8 MΩ cm) για περίπου 30 sec. Στο τέλος της παραπάνω διαδικασίας, το wafer είναι καθαρό από οργανικά υπολείμματα και γίνεται στέγνωμα σε ροή N₂. Συνίσταται ένας οπτικός έλεγχος του wafer για τυχόν εναπομείναντα υπολείμματα/στίγματα στην επιφάνεια. Στην περίπτωση ύπαρξης τέτοιων στιγμάτων, η διαδικασία απολίπανσης επαναλαμβάνεται.

Επειδή τα SiC wafer συνήθως εμφανίζουν στη επιφάνεια τους ένα λεπτό στρώμα οξειδίου, το wafer εμβάπτιζεται σε διάλυμα HF:H₂O υπό αναλογία 10:1 για περίπου 5 λεπτά και έπειτα γίνεται καλό ξέπλυμα με απιονισμένο H₂O.

3.2.2 Τεχνική οπτικής λιθογραφίας

Η τεχνική της οπτικής λιθογραφίας έχει σαν σκοπό την μεταφορά γεωμετρικών σχημάτων από μια μάσκα σε ένα λεπτό στρώμα φωτοευαίσθητης ρητίνης που επικαλύπτει την λεία επιφάνεια του wafer. Τα γεωμετρικά σχήματα καθορίζουν περιοχές ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, όπως για παράδειγμα ηλεκτρικές επαφές. Η φωτολιθογραφία συνδυάζει όλες τις διεργασίες, όπως ανάπτυξη, τροποποίηση και διαμόρφωση υλικού και είναι απαραίτητη για την κατασκευή πολύπλοκων δομών.

Οι φωτοευπαθείς ρητίνες διακρίνονται σε δυο κατηγορίες, θετικές και αρνητικές. Οι θετικές αποτελούνται από τρία υλικά, μια φωτοευπαθή ένωση, μια ρητίνη και έναν οργανικό διαλύτη (AZ400). Οι θετικές εκτίθενται σε φως μόνο τα σημεία εκείνα που πρέπει να αφαιρεθούν. Η έκθεση αυτή έχει σαν αποτέλεσμα να αλλάζει την χημική δομή της ρητίνης, η οποία στην συνέχεια διαλύεται στα υγρά εμφάνισης. Οι αρνητικές είναι συνδυασμός δυο συστατικών, ενός πολυμερούς και μιας φωτοευπαθούς ένωσης. Με την έκθεση σε UV ακτινοβολία, στο πολυμερές συμβαίνει πολυμερισμός (crosslinking), όποτε καθιστά το πολυμερές αδιάλυτο στα υγρά εμφάνισης. Τα υλικά της εμφάνισης απομακρύνουν μόνο τα τμήματα εκείνα που δεν

έχουν εκτεθεί σε UV ακτινοβολία. Και στις δυο περιπτώσεις, η έκθεση σε φως γίνεται με λάμπα υδραργύρου υψηλής πίεσης.

Η διαδικασία εναπόθεσης ρητίνης πάνω στην επιφάνεια του ημιαγωγού είναι η εξής: Η ρητίνη τοποθετείται σε μορφή μικρής σταγόνας διαλύματος στο κέντρο της επιφάνειας του wafer με την βοήθεια μιας πλαστικής «πιπέτας» και στη συνέχεια το δείγμα τοποθετείται σε μια περιστρεφόμενη βάση (φυγοκεντρωτής). Το δείγμα περιστρέφεται (spin coating) έτσι ώστε το πάχος της ρητίνης να απλωθεί ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνεια του δείγματος. Ο τύπος της ρητίνης που χρησιμοποιείται είναι ο AZ5214 και ο χρόνος περιστροφής είναι στις 4000 στροφές ανά λεπτό (rpm) για 20 δευτερόλεπτα. Το τελικό πάχος της ρητίνης που προκύπτει είναι 1.1-1.2 μm.

Μετά την επικάλυψη της επιφάνειας με φωτοευπαθή (θετική ή αρνητική) ρητίνη (με φυγοκέντρωση), ακολουθεί το στάδιο της ανόπτησης (soft baking) της ρητίνης σε φούρνο σταθερής θερμοκρασίας 80 °C για χρόνο 20 λεπτών. Ο σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η σκλήρυνση της ρητίνης, βελτιώνοντας την πρόσφυση της στην επιφάνεια του wafer και για να απομακρυνθεί ο διαλύτης.

Έπειτα, ακολουθεί η τοποθέτηση του δείγματος στο μηχάνημα ευθυγράμμισης μάσκων (Mask Aligner), όπου πραγματοποιείται η έκθεση UV ακτινοβολίας στα 300 nm. Η διαδικασία της ευθυγράμμισης και της έκθεσης προϋποθέτει την επιλογή κατάλληλης μάσκας, όπου θα εκτεθεί το wafer στο φωτοευαίσθητο φιλμ. Οι μάσκες έχουν πάνω τους γεωμετρικά σχήματα (κατασκευασμένα από φιλμ CrO₂). Στις περιοχές του φιλμ όπου η μάσκα αφήνει το φως να πέσει το προστατευτικό υλικό πολυμερίζεται.

Η διαδικασία εμφάνισης της ρητίνης περιλαμβάνει χημικό διάλυμα εμφανιστή (AZ400) προς απιονισμένο νερό σε αναλογία 1:4. Ο χρόνος εμφάνισης μέσα στο διάλυμα είναι περίπου 30 δευτερόλεπτα, ενώ ο χρόνος έκθεσης είναι στα 3.1 δευτερόλεπτα. Μετά την διαδικασία έκθεσης και εμφάνισης της ρητίνης, πάνω στην επιφάνεια του δείγματος εμφανίζονται γεωμετρικά σχήματα αντίστοιχα με εκείνα της επιλεγμένης μάσκας φωτολιθογραφίας που χρησιμοποιήθηκε κατά την διαδικασία της έκθεσης (για ρητίνες θετικού τύπου).

3.2.2.1 Τεχνικές «Etch back» & «Lift-off»

Η διαδικασία της χημικής χάραξης για την διαμόρφωση ενός λεπτού στρώματος φιλμ (μετάλλου) στην επιφάνεια περιλαμβάνει δυο τεχνικές, την τεχνική etch back και lift-off.

Τα διαδοχικά επίπεδα της τεχνικής «etch back» συνοψίζονται παρακάτω:



Εναπόθεση ενός λεπτού στρώματος φιλμ μετάλλου στην επιφάνεια του wafer.



Η ρητίνη τοποθετείται ομοιόμορφα στην επιφάνεια πάνω από το λεπτό στρώμα μετάλλου, εκτίθεται και διαμορφώνεται κατάλληλα ώστε να λειτουργήσει σαν μάσκα προστασίας για τμήματα του λεπτού στρώματος.



Υγρή χάραξη του φιλμ στα κομμάτια εκείνα που δεν προστατεύονται από την μάσκα.

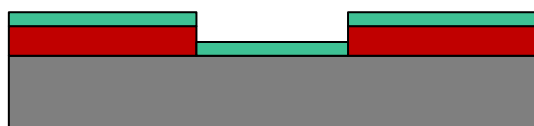


Το wafer εμβαπτίζεται σε ακετόνη για την απομάκρυνση της ρητίνης.

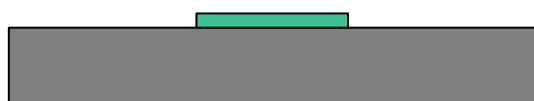
Τα διαδοχικά επίπεδα της τεχνικής «lift-off» συνοψίζονται παρακάτω:



Εναπόθεση φωτορητίνης στην επιφάνεια του wafer, το οποίο στη συνέχεια υφίσταται διαμόρφωση.



Εναπόθεση ενός λεπτού στρώματος μετάλλου

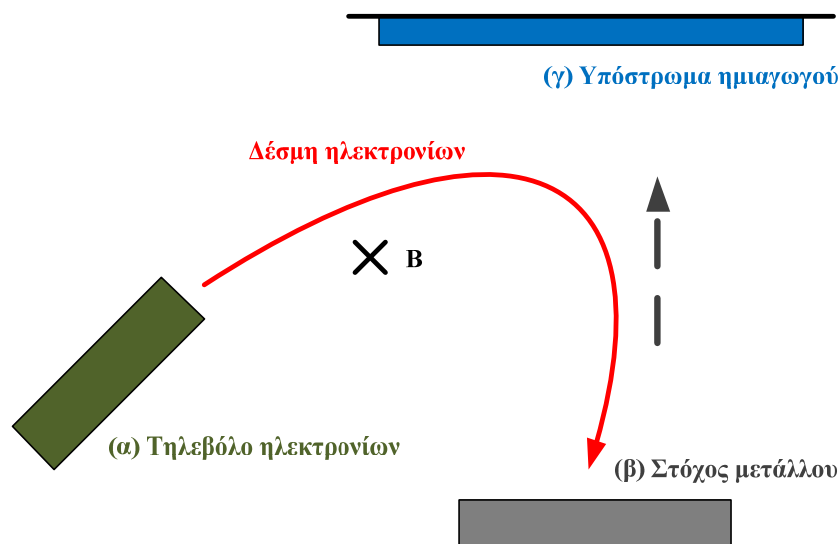


Το wafer εμβαπτίζεται σε ακετόνη για να απομακρυνθεί ταυτόχρονα η ρητίνη και το μέταλλο πάνω από αυτήν.

3.2.3 Τεχνική εξάχνωσης μετάλλων

Η εναπόθεση μετάλλων πάνω σε υπόστρωμα ημιαγωγού πραγματοποιείται με τεχνικές εξάχνωσης μετάλλων με δέσμη ηλεκτρονίων σε θάλαμο υψηλού κενού της τάξης των 2×10^{-7} Torr. Το μηχάνημα που χρησιμοποιείται είναι το μοντέλο Temescal BJD-1800. Στο θάλαμο βρίσκεται ένα τηλεβόλο ηλεκτρονίων (electron gun), το οποίο παρέχει την απαιτούμενη θερμική ενέργεια εξάχνωσης. Η εναπόθεση επιτυγχάνεται οδηγώντας την δέσμη ηλεκτρονίων που παράγεται στο στόχο. Ο στόχος είναι

τοποθετημένος στην επιφάνεια μια υποδοχής από νικελωμένο χαλκό. Η δέσμη των ηλεκτρονίων είναι ρυθμισμένη έτσι ώστε να προσπίπτει στην κεντρική επιφάνεια του στόχου και να διαγράφει καμπύλη τροχιά, λόγω της ύπαρξης ενός μαγνητικού πεδίου (Σχήμα 3.2) [2].



Σχήμα 3.2: Σχηματικό διάγραμμα εξαχνωτή με δέσμη ηλεκτρονίων. Διακρίνεται (α) το τηλεβόλο ηλεκτρονίων, (β) ο στόχος μετάλλου και (γ) το υπόστρωμα όπου εξαχνώνεται ο στόχος και σχηματίζεται το λεπτό στρώμα μετάλλου[2].

3.2.4 Τεχνικές χημικής χάραξης (αποτύπωση)

Η διεργασία της χημικής χάραξης έχει σαν στόχο την δημιουργία στρώματος απομόνωσης (mesa isolation), προκειμένου να δημιουργηθεί μια λειτουργική δομή διόδου Schottky πάνω σε υπόστρωμα SiC. Γενικά, υπάρχουν δυο τεχνικές χάραξης/αποτύπωσης (etching/patterning), οι τεχνικές υγρής και ξηρής χάραξης [3]:

- Υγρή χάραξη (wet etching), όπου η ρητίνη, μη εκτεθειμένο στρώμα υλικού διαλύεται όταν εμβαπτίζεται σε κατάλληλο διάλυμα.
- Ξηρή χάραξη (dry etching), όπου η ρητίνη μη εκτεθειμένο στρώμα υλικού διαλύεται χρησιμοποιώντας ενεργά ιόντα (αέρια φάση).

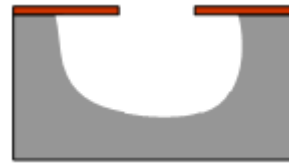
3.2.4.1 Υγρή χάραξη

Στην υγρή χάραξη απαιτείται ένα δοχείο με το κατάλληλο χημικό διάλυμα ώστε να χαραχτεί επιλεκτικά το υλικό. Η επιλεκτική χάραξη απαιτεί μια μάσκα προστασίας, η οποία δεν διαλύεται μέσα στο διάλυμα ή χαράζεται με πολύ αργό ρυθμό σε σχέση με το διαμορφωθέν υλικό. Μερικοί ημιαγωγοί, όπως για παράδειγμα το πυρίτιο

εμφανίζουν ανισότροπη συμπεριφορά σε τεχνικές υγρής χάραξης. Η ανισότροπη χάραξη σε σχέση με την ισότροπη σημαίνει διαφορετικά ποσοστά χάραξης σε διαφορετικές διευθύνσεις στον ημιαγωγό (βλέπε Σχήμα 3.3) [3].



(α) Ισότροπη συμπεριφορά

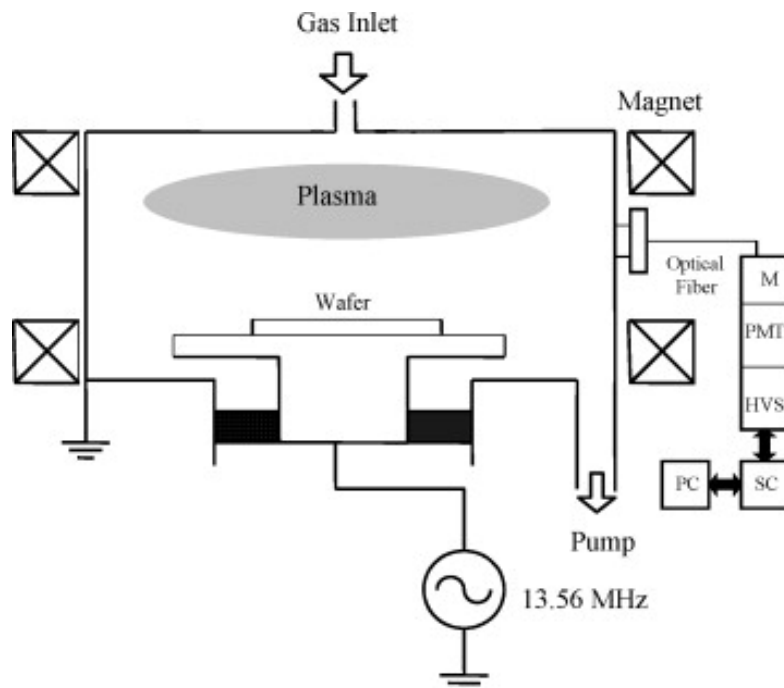


(β) Ανισότροπη συμπεριφορά

Σχήμα 3.3: Παράδειγμα (α) ισότροπης και (β) ανισότροπης υγρής χάραξης ημιαγωγού όπου πάνω στον ημιαγωγό διακρίνεται η μάσκα προστασίας.

3.2.4.2 Ξηρή χάραξη

Η ανάπτυξη διαδικασιών υγρής χάραξης και η αφαίρεση υλικού σε ημιαγωγούς SiC είναι εξαιρετικά δύσκολη να πραγματοποιηθεί, οπότε εφαρμόζονται τεχνικές ξηρής χάραξης σε περιβάλλον πλάσματος (Reactive Ion Etching, RIE). Ένα χαρακτηριστικό σύστημα πειραματικής διάταξης ξηρής χημικής χάραξης φαίνεται στο Σχήμα 3.4 [4, 2].

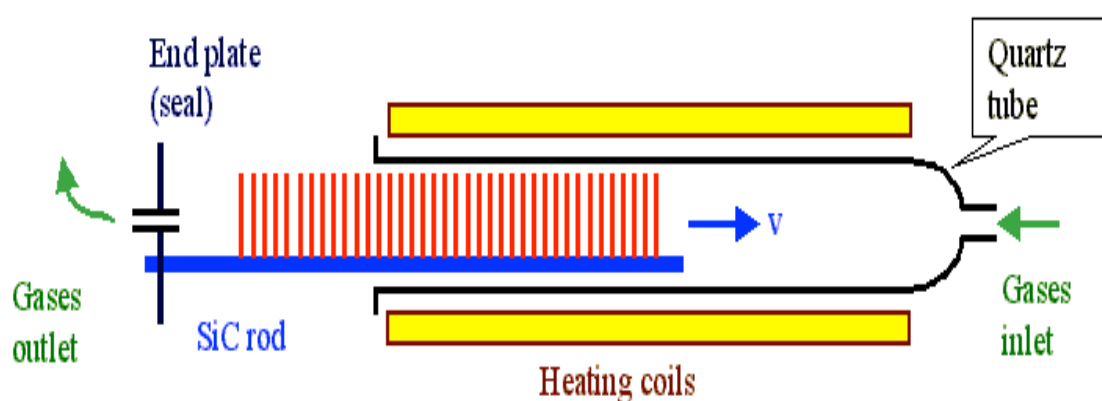


Σχήμα 3.4: Χαρακτηριστική πειραματική διάταξη ξηρής χημικής χάραξης ενεργών ιόντων (Reactive Ion Etching, RIE)

Ο ημιαγωγός τοποθετείται μέσα σε θάλαμο κενού του RIE, στον οποίο εισάγονται διάφορα αέρια (μείγμα αερίων) σε συγκεκριμένες ποσότητες και σε σταθερές ροές. Το πλάσμα δημιουργείται από την εφαρμογή RF συχνότητας 13.56 MHz κατά την δημιουργία ιόντων σε μείγμα αερίων. Εν συνεχεία, τα ιόντα βομβαρδίζουν το δείγμα, με αποτέλεσμα το «σπάσιμο» του μείγματος αερίου σε μόρια ιόντων. Στη συνέχεια, τα ιόντα είναι εκείνα που προκαλούν διάβρωση του μη προστατευμένου υποστρώματος του ημιαγωγού με σκοπό το σχηματισμό 3D γεωμετρικών σχημάτων (mesa). Για το σχηματισμό των mesa, ως μάσκα προστασίας χρησιμοποιείται η ρητίνη. Όμως στην συγκεκριμένη εργασία (όπως θα δούμε αργότερα) που ο ημιαγωγός μας είναι SiC, σαν μάσκα προστασίας χρησιμοποιείται μάσκα από εναπόθεση Αλουμινίου (Al).

3.2.5 Τεχνική οξείδωσης του SiC

Η ανάπτυξη ενός προστατευτικού και μονωτικού στρώματος οξειδίου SiO_2 στην επιφάνεια του ημιαγωγού γίνεται με τεχνικές θερμικής οξείδωσης. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται φούρνος οξείδωσης με θερμοκρασίες που φτάνουν τους 1150°C . Η ατμόσφαιρα της οξείδωσης είναι σε μορφή υδρατμών (wet oxidation). Τα οξειδωτικά υλικά έρχονται σε επαφή με την ελεύθερη επιφάνεια του ημιαγωγού SiC αντιδρούν με αυτήν και η διεπιφάνεια SiO_2 -SiC με αργό ρυθμό οξείδωσης κινείται μέσα, προς τον ημιαγωγό (Σχήμα 3.5). Στο τέλος της διαδικασίας, το πάχος του οξειδίου που προκύπτει είναι περίπου 60-80 nm και βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του ημιαγωγού SiC.



Σχήμα 3.5: Σχηματική αναπαράσταση φούρνου οξείδωσης με την μέθοδο θερμικής οξείδωσης (φούρνος χαλαζία με θερμαντικά σπειρώματα) [5].

3.3 Στάδια κατασκευής (*process flow*) διόδων Schottky 4H-SiC

Στη συνέχεια, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των βημάτων κατασκευής των διόδων Schottky 4H-SiC [3].

3.3.1 Επιφανειακός καθαρισμός

1. Απολίπανση: ακολουθεί σχολαστικός καθαρισμός της επιφάνειας του δείγματος για την απομάκρυνση των οργανικών ουσιών. Η σειρά των χημικών διαλυμάτων που χρησιμοποιούνται είναι η εξής:

- 2 λεπτά σε τριχλωροαιθυλένιο σε λουτρό υπέρηχων και θερμοκρασία 60°C
- 2 λεπτά σε ακετόνη σε λουτρό υπέρηχων και θερμοκρασία 60°C
- 2 λεπτά σε ισο-προπανόλη σε λουτρό υπέρηχων και θερμοκρασία 60°C

Το επόμενο στάδιο είναι το ξέπλυμα του δείγματος σε άφθονο απιονισμένο νερό (DI H₂O) και ακολουθεί το στέγνωμα του υποστρώματος σε ροή αέριου αζώτου (N₂). Ακολουθεί ένας σχολαστικός οπτικός ποιοτικός έλεγχος για τυχόν στίγματα στην επιφάνεια του ημιαγωγού.

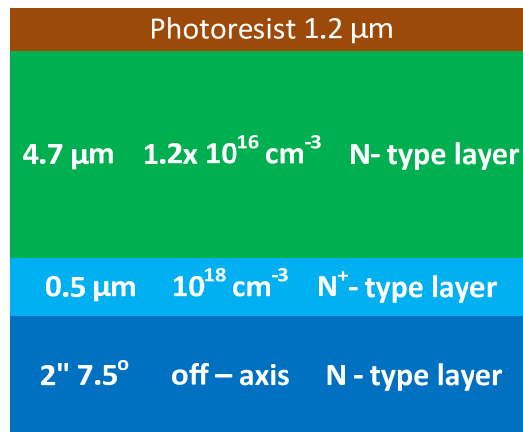
2. Strip native oxide: Ακολουθεί καθαρισμός της επιφάνειας σε λουτρό αραιού διαλύματος HF (10% H₂O) για 5 λεπτά και στέγνωμα. Το στάδιο αυτό έχει σαν σκοπό τη διάσπαση και απομάκρυνση του λεπτού στρώματος οξειδίου (μερικές δεκάδες Angstrom) που πιθανόν να υπάρχει στην επιφάνεια του SiC δειγμάτων.

3.3.2 Δημιουργία Mesa

3.3.2.1 Φωτολιθογραφία Mesa

Ακολουθεί η διαδικασία της φωτολιθογραφίας με σκοπό την δημιουργία μάσκας προστασίας για την δημιουργία των Mesa:

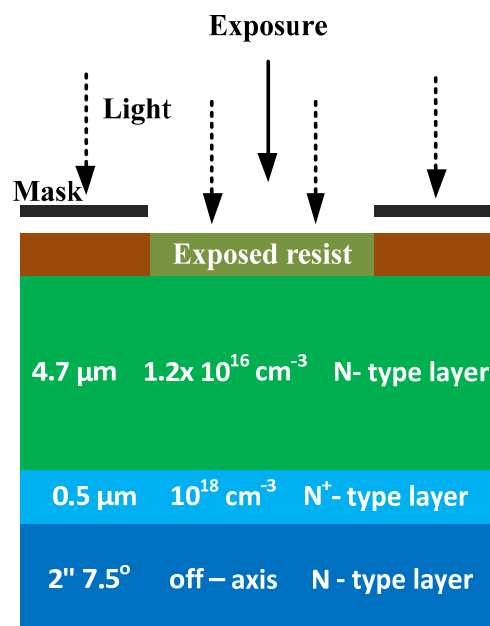
1. Μια στρώση φωτολιθογραφίας (single photolithography step): επικάλυψη της επιφάνειας με θετική ρητίνη AZ5214. Η επικάλυψη γίνεται με φυγοκέντρηση στις 4000 rpm για 20 δευτερόλεπτα. Το πάχος που προκύπτει είναι 1.2 μm (Σχήμα 3.6).



Σχήμα 3.6: Επάνω στο υπόστρωμα του ημιαγωγού εξαπλώνεται φυγοκεντρικά (spin coating) ένα ομοιόμορφο στρώμα θετικής ρητίνης 1.2 μm .

2. Ανόπτηση (soft baking): απομακρύνονται οι διαλύτες από την ρητίνη και μετατρέπεται σε φωτοευπαθής. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται μέσα σε φούρνο θέρμανσης στους 80 °C για 20 λεπτά. Εναλλακτικά, αντί της χρήσης φούρνου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί hot plate στους 110 °C για 30 δευτερόλεπτα (ταχύτερη διαδικασία).

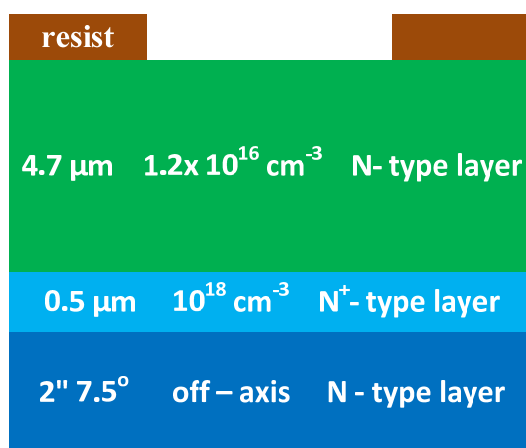
3. Ευθυγράμμιση & έκθεση (mask aligner & exposure): χρησιμοποιείται η πρώτη μάσκα (μάσκα Αλουμινίου) που θα οριοθετήσει τις περιοχές στις οποίες θα τοποθετηθεί το μέταλλο. Τα δείγματα τοποθετούνται στο μηχάνημα για ευθυγράμμιση όπου και γίνεται η έκθεση φωτός. Η χρόνος έκθεσης είναι στα 3.1 δευτερόλεπτα (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Η θετική ρητίνη προστατεύει το κομμάτι εκείνο που πρέπει να διατηρηθεί, ενώ εκείνο που εκτίθεται (φως σε επιλεγμένα σημεία) αφαιρείται στην διαδικασία της εμφάνισης.

4. Εμφάνιση (Development): Ακολουθεί η εμφάνιση της φωτορητίνης AZ5214 σε χημικό διάλυμα αναλογίας 1:4 εμφανιστή AZ400 προς DI H₂O. Ο χρόνος εμφάνισης του wafer στο διάλυμα είναι περίπου 30 δευτερόλεπτα. Στο υπόστρωμα του ημιαγωγού έχουν δημιουργηθεί γεωμετρικά σχήματα όμοια με της μάσκας αλουμινίου που χρησιμοποιήθηκε κατά την έκθεση (Σχήμα 3.8).

Development (positive)

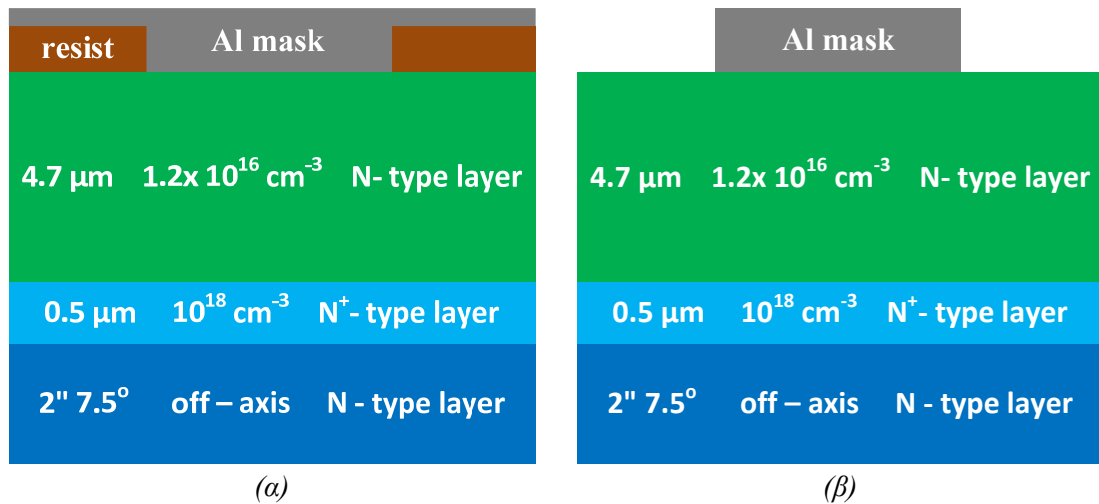


Σχήμα 3.8: Τα τοιχώματα της φωτορητίνης είναι πρακτικώς κατακόρυφα, οπότε μετά την εμφάνιση στο πάνω μέρος της μάσκας είναι ίσο με αυτό στο σημείο επαφής με την επιφάνεια του ημιαγωγού.

3.3.2.2 Επιμετάλλωση (δημιουργία μάσκας Al)

Αφού δημιουργηθούν τα επιμέρους τμήματα ρητίνης πάνω στην επιφάνεια του ημιαγωγού ακολουθεί η διαδικασία της επιμετάλλωσης:

1. Το δείγμα τοποθετείται μέσα στον θάλαμο υπερυψηλού κενού (ultra high vacuum) του Temescal. Τα μέταλλα εναπόθεσης είναι με την σειρά εναπόθεσης, τιτάνιο (Ti) 15nm και αλουμίνιο (Al) 400nm. Η τοποθέτηση 15nm τιτανίου προτείνεται για λόγους καλύτερης πρόσφυσης (adhesion) των μετάλλων στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Μετά την επιμετάλλωση, το δείγμα τοποθετείται σε χημικό διάλυμα ακετόνης ώστε να απομακρυνθούν (lift-off) τα επιλεγμένα κομμάτια ρητίνης και μετάλλου (Σχήμα 3.9).



Σχήμα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση (α) της επιμετάλλωσης Ti (15nm) /Al (400nm) και (β) της διαδικασίας ανύψωσης του μετάλλου (lift-off) για το σχηματισμό των μεταλλικών σχημάτων πάνω στον ημιαγωγό.

3.3.2.3 Ξηρή χημική χάραξη (RIE)

Ακολουθεί η διαδικασία της ξηρής χημικής χάραξης (dry etching) για το σχηματισμό των Mesa:

1. Οι εκτεθειμένες περιοχές της επιφάνειας απομακρύνονται δημιουργώντας έτσι ένα 3D γεωμετρικό σχέδιο (patterning) ύψους περίπου 8 μm. Οι προστατευμένες περιοχές του ημιαγωγού (μάσκα αλουμινίου) διατηρούνται και δεν χαράζονται χημικά. Για να πετύχει η ηλεκτρική απομόνωση (mesa isolation), αφαιρέθηκαν οι ενεργές περιοχές ημιαγωγικών στρωμάτων από ορισμένες περιοχές της δομής. Με αυτό τον τρόπο το ρεύμα περιορίζεται να ρέει σε προκαθορισμένες περιοχές και οι δίοδοι του ίδιου δείγματος δεν επικοινωνούν ηλεκτρικά μεταξύ τους (Σχήμα 3.10α).

Οι βασικές συνθήκες της διαδικασίας RIE που ακολουθήθηκε δίνονται παρακάτω:

Βάση στο θάλαμο κενού του RIE όπου θα τοποθετηθούν τα δείγματα SiC: glass cover of Al electrode, 3 inches Si Wafer (carrier)

Gas: SF₆ (40sccm)

RF power: 200 W

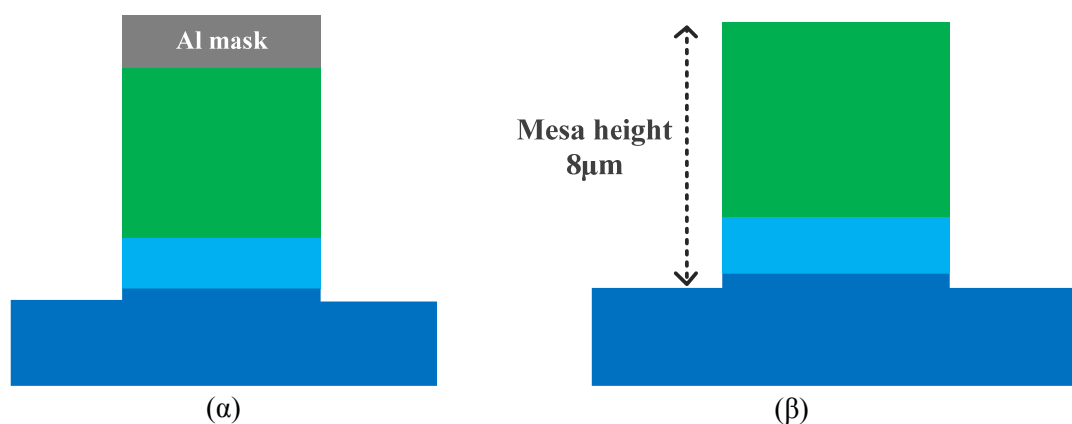
Pressure: 140 mTorr

Temperature: 20 °C

DC bias: 110 Volts

2. Γίνεται αφαίρεση της προστατευτικής μάσκας, το wafer εμβαπτίζεται αρχικά μέσα σε χημικό διάλυμα H₃PO₄ (Al-etcher) για να απομακρυνθεί το αλουμίνιο και έπειτα

σε χημικό διάλυμα HF για να απομακρυνθεί το τιτάνιο. Η οριζόντια τομή του δείγματος που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 3.10β.



Σχήμα 3.10: Σχηματική αναπαράσταση (α) διαμόρφωση που έγινε με την μέθοδο RIE όπου διακρίνονται τα κατακόρυφα τοιχώματα ύψους 8μm και (β) το wafer μετά την αφαίρεση της μάσκας αλουμινίου.

3. Το ύψος του mesa 8μm επιβεβαιώνεται και από την μέτρηση στο α-step προφιλόμετρο.
4. Στο στάδιο αυτό, ακολουθεί λουτρό με απιονισμένο H₂O (DI) για 30 λεπτά και στο τέλος στέγνωμα με ξηρό N₂.

3.3.3 Καθαρισμός επιφάνειας (RCA cleaning)

Μετά την ολοκλήρωση της δημιουργίας των Mesa, τα δείγματα 4H-SiC πριν τοποθετηθούν στο φούρνο οξείδωσης, πραγματοποιείται σχολαστικός και εξειδικευμένος καθαρισμός με βάση μεθόδους προτεινόμενες στη βιβλιογραφία [4, 5]. Οι συγκεκριμένες διαδικασίες καθαρισμού είναι απαραίτητες για την απομάκρυνση υπόλοιπων μεταλλικών προσμείξεων και οξειδίων. Γι αυτό το σκοπό, τα παρακάτω στάδια καθαρισμού είναι απαραίτητα:

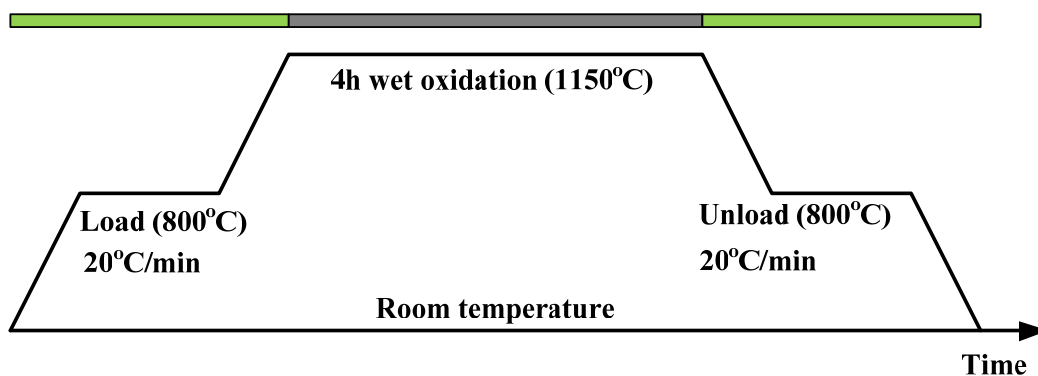
1. Το wafer εμβαπτίζεται σε χημικό διάλυμα Piranha H₂SO₄:H₂O₂ με αναλογίες 1:1, σε θερμοκρασία δωματίου, για 10 λεπτά.
2. Ακολουθεί η μέθοδος εξειδικευμένου καθαρισμού RCA, η οποία έχει καθιερωθεί στη βιβλιογραφία με το συγκεκριμένο όνομα διότι αναπτύχθηκε στα εργαστήρια της RCA, με τα παρακάτω βήματα:
 - Καθαρισμός από οργανικά υπολείμματα και βαρέα μέταλλα σε μείγμα NH₃:H₂O₂ με αναλογίες 1:1, σε θερμοκρασία 90 °C για 10 λεπτά.
 - Ξέπλυμα με απιονισμένο H₂O.

- Καθαρισμός από τις ιοντικές προσμείξεις σε διάλυμα HCl:H₂O₂:H₂O με αναλογίες 1:1:6, σε θερμοκρασία 20 °C, για 10 λεπτά, υπό ανάδευση. Στο στάδιο αυτό απομακρύνονται μέταλλα όπως Al και αλκάλια.
- Ξέπλυμα με απιονισμένο H₂O.
- Διάβρωση του οξειδίου SiO₂ σε διάλυμα HF:H₂O με αναλογία 1:10 για 5 δευτερόλεπτα.
- Ξέπλυμα με απιονισμένο H₂O και στέγνωμα του wafer με ξηρό N₂.

3.3.4 Υγρή Θερμική οξείδωση (wet thermal oxidation)

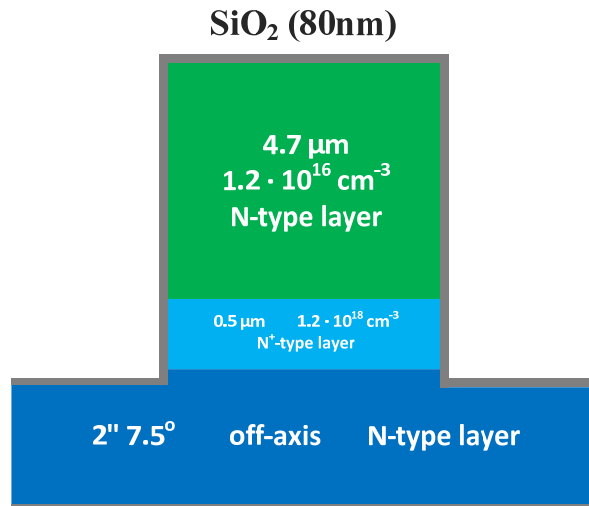
Η οξείδωση της επιφάνειας του υποστρώματος του ημιαγωγού είναι απλή και περιγράφεται παρακάτω:

Στην θερμική οξείδωση καταναλώνονται ελεγχόμενα μερικό στρώμα από το υπόστρωμα του SiC καθώς εξελίσσεται η διαδικασία δημιουργώντας στρώσεις οξειδίου (SiO₂) όχι παχύτερες από 100nm λόγω κορεσμού της επιφάνειας. Το δείγμα τοποθετείται προσεκτικά στο φούρνο οξείδωσης όταν η θερμοκρασία αυξάνεται (ramp up) με σταθερό βήμα (20°C/λεπτό) στους 800°C. Η διαδικασία της θερμικής οξείδωσης εξελίσσεται για θερμοκρασίες στο φούρνο περίπου στους 1150°C, για χρόνο 4 ώρες. Όταν ολοκληρωθεί η οξείδωση, η θερμοκρασία πέφτει (ramp down) ξανά στους 800°C, και το δείγμα ξεφορτώνεται (unload) προσεκτικά από το φούρνο (Σχήμα 3.11).



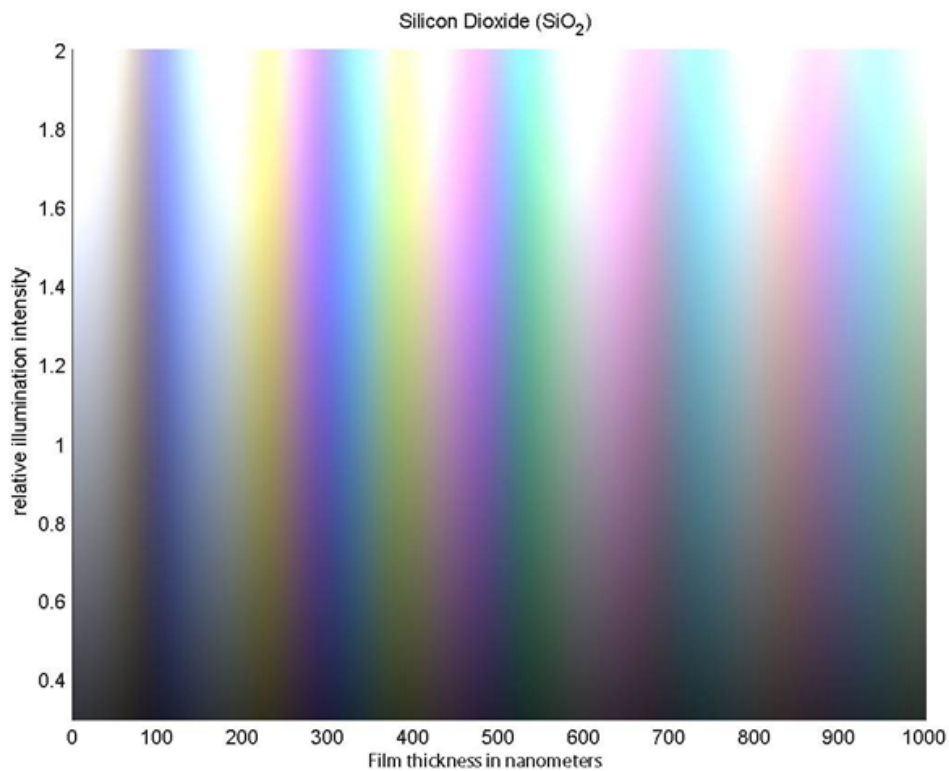
Σχήμα 3.11: Σχηματικό διάγραμμα process flow θερμικής οξείδωσης

Σε όλη την επιφάνεια του wafer (μπροστινή και πίσω πλευρά) έχει αναπτυχτεί ένα λεπτό στρώμα οξειδίου (SiO₂) πάχους 80nm περίπου (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.12: Σχηματική αναπαράσταση του 4H-SiC wafer, όπου διακρίνεται με σκούρο γκρίζο χρώμα το λεπτό φιλμ οξειδίου (SiO₂) 80nm που έχει αναπτυχτεί στην επιφάνεια του ημιαγωγού.

Ένας απλός τρόπος που θα βοηθούσε να μετρηθεί το πάχος του οξειδίου στο υπόστρωμα του ημιαγωγού είναι από την χρωματική αναπαράσταση γραφήματος του Σχήματος 3.13 (οπτική μέθοδος αναγνώρισης). Αρκεί να συγκριθεί η χρωματική απόχρωση του οξειδίου (SiO₂) του υποστρώματος με εκείνο του γραφήματος.



Σχήμα 3.13: Υπολογισμός πάχους του οξειδίου (SiO₂) συγκρίνοντας το χρώμα του λεπτού φιλμ του υποστρώματος του ημιαγωγού με εκείνο του διαγράμματος[5].

3.3.5 Αφαίρεση οξειδίου (back & front surface oxide stripping)

Ακολουθεί η διαδικασία αφαίρεσης οξειδίου (oxide stripping) με κατάλληλα χημικά από το wafer. Με την διαδικασία αυτή, απομακρύνεται επιλεκτικά το οξείδιο από περιοχές (μπροστινή και πίσω πλευρά), επιτρέποντας να κατασκευαστούν πάνω στον ημιαγωγό μεταλλικές επαφές (ωμική και ανορθωτική). Στην μπροστινή πλευρά του wafer θα κατασκευαστεί η ανορθωτική επαφή (Schottky), ενώ στη πίσω πλευρά η ωμική επαφή (ohmic).

Ακολουθεί αναλυτική διαδικασία των βημάτων, ξεκινώντας πρώτα από την αφαίρεση οξειδίου από την πίσω πλευρά του wafer και μετά από την μπροστινή:

1. Για την αφαίρεση του SiO_2 από την κάτω πλευρά του wafer, η μπροστινή πλευρά προστατεύεται και καλύπτεται με ένα στρώμα κεριού (wax) αφήνοντας εκτεθειμένη όλη την πίσω πλευρά του wafer.

Στη συνέχεια, το wafer εμβαπτίζεται σε χημικό διάλυμα buffer HF, $\text{NH}_4\text{:HF}$ με αναλογία 10:1.4, για χρόνο περίπου 30 λεπτών.

Μετά το τέλος της παραπάνω διαδικασίας η πίσω επιφάνεια του wafer είναι ελεύθερη και καθαρή από οξείδιο.

2. Ακολουθεί ξέπλυμα του δείγματος με απιονισμένο H_2O

3. Η απομάκρυνση των υπολειμμάτων κεριού από το wafer γίνεται ως εξής:

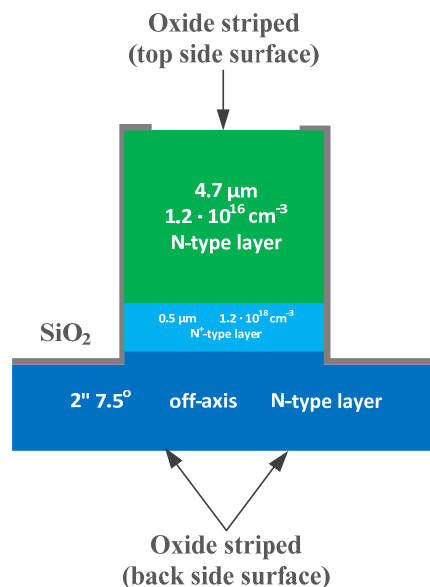
- Εμβάπτιση σε διάλυμα τριχλωροαιθυλενίου χρησιμοποιώντας υπέρηχους, σε θερμοκρασία 60°C , για 2 λεπτά.
- Εμβάπτιση σε διάλυμα ακετόνης (απομάκρυνση TCE) χρησιμοποιώντας υπέρηχους, σε θερμοκρασία 60°C , για 2 λεπτά.
- Εμβάπτιση σε διάλυμα ισο-προπανόλης (απομάκρυνση ακετόνης) χρησιμοποιώντας υπέρηχους, σε θερμοκρασία 60°C , για 2 λεπτά.
- Ξέπλυμα με απιονισμένο H_2O και στέγνωμα του wafer με ξηρό N_2 .

4. Από την πάνω πλευρά του wafer, χρησιμοποιείται η δεύτερη μάσκα (top contact) για την επίτευξη της επιλεκτικής απομάκρυνσης του SiO_2 , στις θέσεις εκείνες όπου θα αναπτυχθούν οι επαφές Schottky των διόδων. Επάνω στο στρώμα οξειδίου θα γίνει επικάλυψη με διπλή επίστρωση ρητίνης (double photolithography step) AZ5214. Οι κύριοι λόγοι της διπλής επίστρωσης είναι κυρίως δυο κατά την διάρκεια εμβάπτισης του wafer σε χημικό διάλυμα buffer HF. Ο πρώτος είναι η καλύτερη προστασία του οξειδίου της πάνω επιφάνειας του wafer και ο δεύτερος είναι για την καλύτερη προστασία των τοιχωμάτων των mesas. Ακολουθεί αναλυτική διαδικασία των βημάτων:

- Πρώτη επικάλυψη της επιφάνειας με ρητίνη (θετική) AZ5214 με φυγοκέντρωση στις 4000 rpm, για 20 δευτερόλεπτα πάχους 1.2μm.
- Ανόπτηση 1 (soft baking) σε φούρνο στους 80°C για 20 λεπτά.
- Δεύτερη επικάλυψη της επιφάνειας με ρητίνη (θετική) AZ5214 με φυγοκέντρωση στις 4000 rpm, για 20 δευτερόλεπτα πάχους 1.2μm
- Ανόπτηση 2 (soft baking) σε φούρνο στους 80°C για 20 λεπτά.
- Προσεκτική ευθυγράμμιση του δείγματος σε σχέση με τα mesas. Ο χρόνος έκθεσης φωτός είναι στα 3.2 δευτερόλεπτα.
- Ακολουθεί η εμφάνιση της διπλής στρώσης ρητίνης σε χημικό διάλυμα αναλογίας 1:4 εμφανιστή AZ400 προς DI H₂O. Ο χρόνος εμβάπτισης του wafer στο διάλυμα είναι περίπου 40 δευτερόλεπτα.
- Ανόπτηση 3 (post bake): Τελευταίο στάδιο της φωτολιθογραφίας, το οποίο προκαλεί σκλήρυνση της ρητίνης, βελτιώνοντας την πρόσφυση της ρητίνης στην επιφάνεια του υποστρώματος.

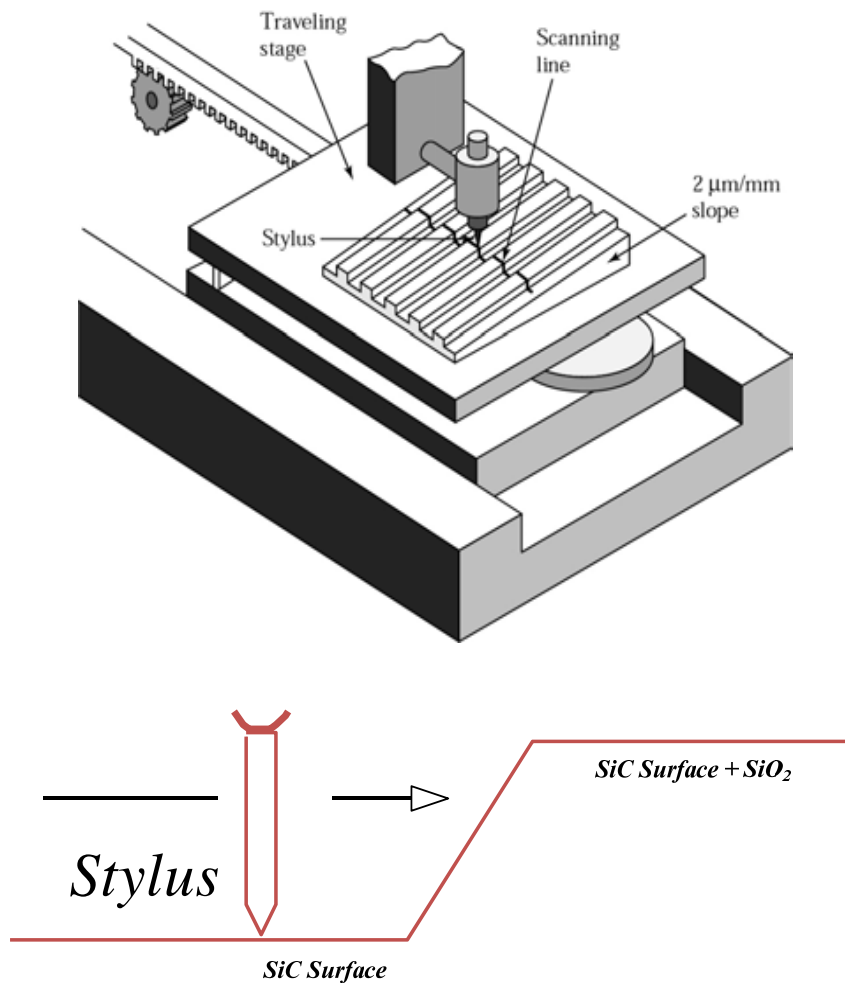
5. Το wafer εμβάπτιζεται σε χημικό διάλυμα buffer HF, NH₄:HF με αναλογία 10:1.4, για χρόνο περίπου 3 λεπτών. Ακολουθεί ξέπλυμα του wafer με απιονισμένο H₂O και στέγνωμα με ξηρό N₂.

Μετά το τέλος της παραπάνω διαδικασίας, η πάνω επιφάνεια του δείγματος είναι ελεύθερη και καθαρή από οξείδιο στα σημεία εκείνα όπου δεν προστατεύτηκαν από την ρητίνη (Σχήμα 3.14).



Σχήμα 3.14: Σχηματική αναπαράσταση όπου φαίνονται οι διαμορφώσεις που έγιναν με την μέθοδο της αφαίρεσης οξειδίου, πίσω πλευρά (back side) και πάνω πλευρά (top side) του ημιαγωγού SiC.

6. Ένας δεύτερος τρόπος μέτρησης (καλύτερης ακρίβειας) του πάχους του οξειδίου στο υπόστρωμα του ημιαγωγού γίνεται με την χρήση ενός οπτικού προφιλόμετρου (surface profilometry), μοντέλο Dektak (Σχήμα 3.15).

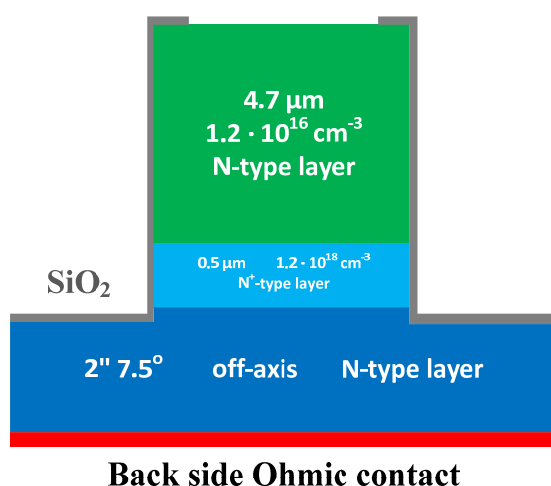


Σχήμα 3.15: Μετά την αφαίρεση επιλεγμένων τμημάτων οξειδίου από το υπόστρωμα του ημιαγωγού, με την βοήθεια μιας ακίδας (stylus) μπορεί να μετρηθεί το ακριβές πάχος του οξειδίου.

3.3.6 Δημιουργία ωμικής επαφής

Το επόμενο βήμα είναι η διαδικασία κατασκευής της ωμικής επαφής (back side ohmic contact) της διόδου Schottky. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι η ακόλουθη:

1. Αμέσως πριν την εισαγωγή των δειγμάτων στο Temescal για επιμετάλλωση, το wafer εμβαπτίζεται σε διάλυμα HF:H₂O με αναλογία 1:10 για 2 δευτερόλεπτα. Όστε να απομακρυνθούν τυχόν οξειδία της πίσω πλευράς του wafer. Το δείγμα ξεπλένεται με απιονισμένο H₂O και στεγνώνεται με ξηρό N₂.
2. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η εξάχνωση των μετάλλων σε συνθήκες υψηλού κενού (2×10^{-7} Torr), επιμεταλλώνοντας ολόκληρη την πίσω πλευρά του wafer:
 - Εξάχνωση τιτανίου (Ti), με πάχος 4nm και εξάχνωση νικελίου (Ni), με πάχος 300nm.
3. Μετά την εξάχνωση των μετάλλων, οι επαφές κραματοποιούνται στο σύστημα ραγδαίας θερμικής ανόπτησης (Rapid Thermal Annealing, RTA). Το δείγμα τοποθετείται μέσα σε θάλαμο κενού, και η κραματοποίηση λαμβάνει χώρα σε ατμόσφαιρα αργού σε δυο βήματα:
 - Στους 350°C για 10 λεπτά
 - Στους 1000 °C για 120 δευτερόλεπτα
4. Με την κραματοποίηση έχει ολοκληρωθεί η κατασκευή της ωμικής επαφής της διόδου Schottky (Σχήμα 3.16). Στο σημείο αυτό γίνεται έλεγχος της ποιότητας της ωμικής επαφής καθώς και έλεγχος της ηλεκτρικής απομόνωσης της διόδου. Για το τελευταίο, ελέγχεται το ρεύμα που αναπτύσσεται μεταξύ των ωμικών επαφών δυο γειτονικών διόδων όταν εφαρμοστεί μεταξύ τους μια διαφορά δυναμικού.

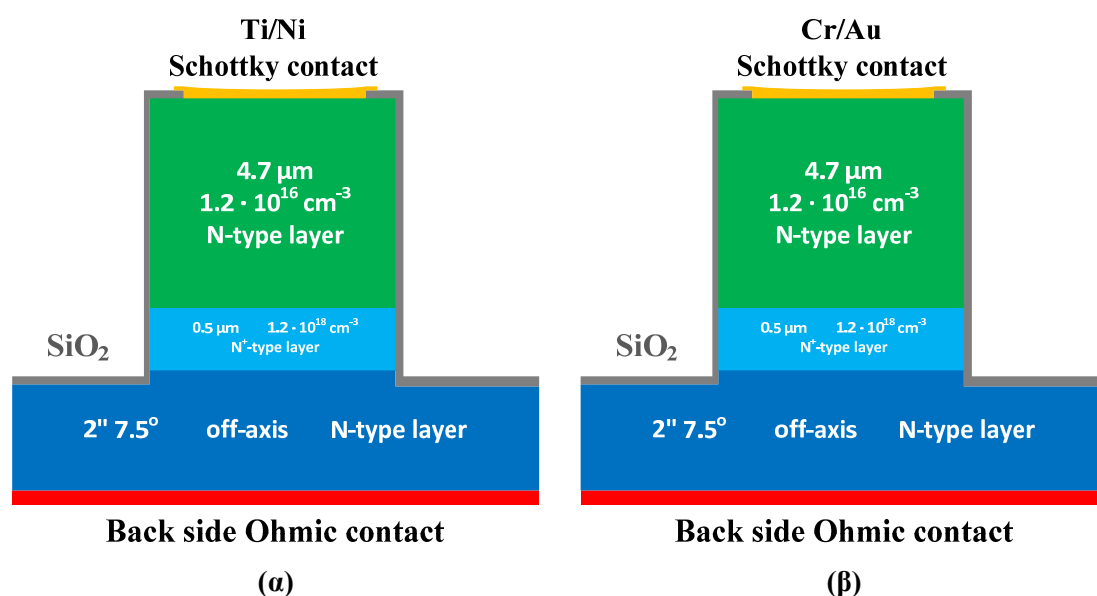


Σχήμα 3.16: Σχηματική απεικόνιση της διόδου όπου φαίνεται ο σχηματισμός της ωμικής επαφής στη πίσω πλευρά του wafer.

3.3.7 Δημιουργία επαφής Schottky

Το τελικό βήμα κατασκευής της διόδου πάνω σε 4H-SiC ολοκληρώνεται με την εξάχνωση του μετάλλου για την δημιουργία της επαφής Schottky. Για την επιμετάλλωση, πραγματοποιήθηκαν δυο διαφορετικές σειρές επιμεταλλώσεων. Στις περιοχές όπου έγινε αφαίρεση του οξειδίου πραγματοποιήθηκε εναπόθεση μεταλλικών επαφών Schottky πάχους (i) 3nm Ti, 150nm Ni και (ii) 150nm Cr, 100 Au.

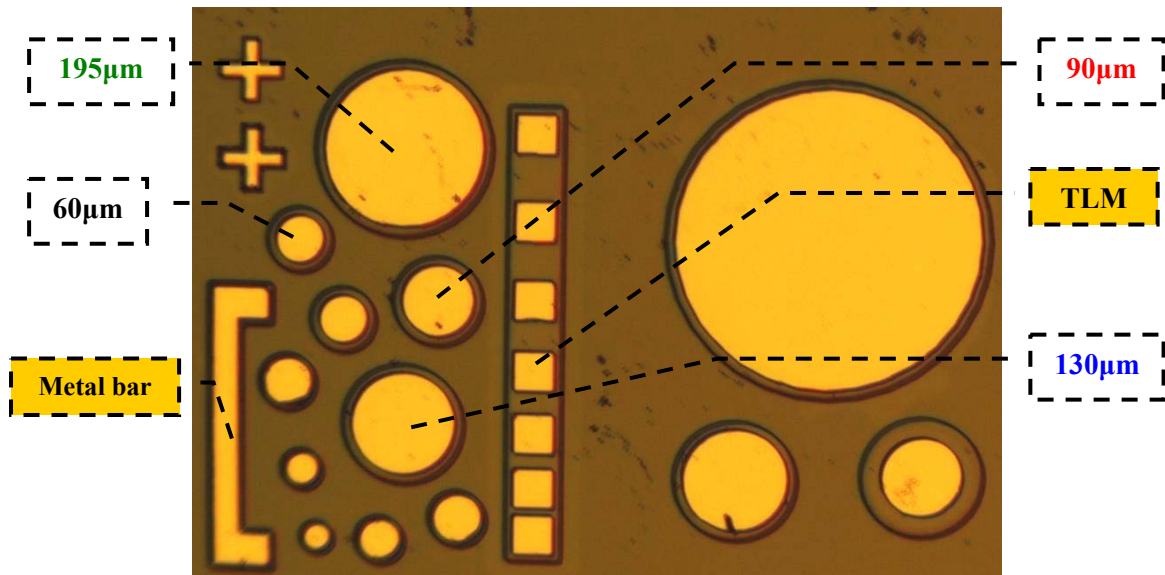
Δυο επιπλέον προσπάθειες επιμεταλλώσεων πραγματοποιήθηκαν (iii) 50nm Cr, 100nm Pt, 200nm Au και (iv) 20nm Cr, 40nm Pt and 150nm Au. Αντιθέτως με τις προσπάθειες (i) και (ii), προβλήματα πρόσφυσης εμφανίσθηκαν στις (iii) και (iv). Πιο συγκεκριμένα, οι προσπάθειες (iii) και (iv) παρουσίασαν αμφότερες προβλήματα πρόσφυσης κατά την διάρκεια της μερικής αφαίρεσης του φωτοευαίσθητου υλικού. Τα σχηματικά διαγράμματα των διατάξεων Schottky διόδων πάνω σε ημιαγωγούς SiC απεικονίζονται στο Σχήμα 3.17.



Σχήμα 3.17: Παραστατική απεικόνιση (τομή), της γεωμετρίας κατασκευής μιας διόδου Schottky πάνω σε 4H-SiC για επαφές Schottky (α) Ti/Ni και (β) Cr/Au.

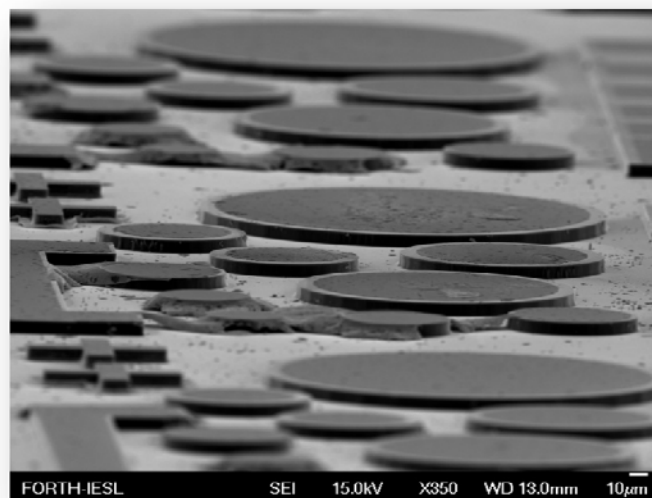
1. Προηγείται της εξάχνωσης η προετοιμασία της επιφάνειας με την απομάκρυνση των οξειδίων, χρησιμοποιώντας χημικό διάλυμα HF (10%) για 2-3 δευτερόλεπτα. Όπως στην περίπτωση της δημιουργίας των ωμικών επαφών, έτσι και οι μεταλλικές επαφές Schottky κατασκευάζονται με τη διαδικασία lift-off.
2. Με το σύστημα των масκών που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των επαφών Schottky ταυτόχρονα κατασκευάζονται διαφορετικές σειρές επαφών Schottky,

αποτελούμενες από διαφορετικές διαμέτρους (195, 130, 90, 60 μm). Εδώ αναφέρονται μόνο οι διαστάσεις των διόδων Schottky, οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον τελικό ηλεκτρικό χαρακτηρισμό. Επίσης, με το ίδιο σύστημα масκών κατασκευάζονται και άλλα είδη διατάξεων και συστημάτων επαφών, όπως για παράδειγμα οι σειρές των ωμικών επαφών για μετρήσεις TLM (Σχήμα 3.18).



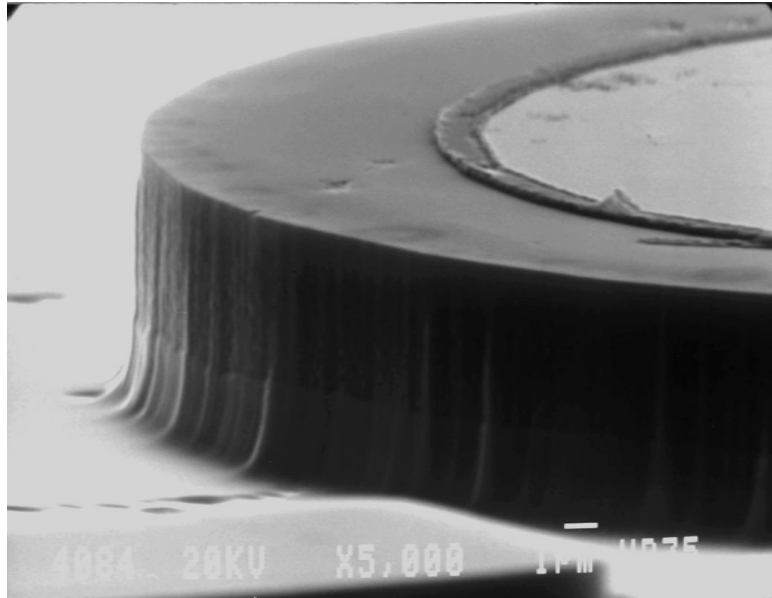
Σχήμα 3.18: Μοναδιαία περίοδος Μάσκας φωτολιθογραφίας (κάτοψη), μετά το πέρας της διαδικασίας κατασκευής, όπου διακρίνονται διάφοροι διαμέτρων

Στο Σχήμα 3.19, διακρίνονται σειρές από επαφές διόδων Schottky διαφορετικών κυκλικών διαστάσεων.



Σχήμα 3.19: Φωτογραφία από SEM, διάφοροι Schottky διάφορων κυκλικών διαστάσεων.

Στο Σχήμα 3.20 (φωτογραφία από SEM) διακρίνεται με μεγάλη λεπτομέρεια η επαφή Schottky κυκλικής γεωμετρίας, ενώ ταυτόχρονα διακρίνεται και ο «λοφίσκος» της ηλεκτρικής απομόνωσης ύψους 8μm (mesa).



Σχήμα 3.20: Φωτογραφία από SEM, διακρίνεται η επαφή Schottky (κυκλικής γεωμετρίας) πάνω στον ημιαγωγό.

-
- [1] Cree Research Inc., 2810 Meridian Parkway, Suite 176, Durham, NC 27713.
- [2] Α. Κωστόπουλος, “Μελέτη ετεροδομών AlGaN/GaN και κατασκευή τρανζίστορς τύπου HFET”, Μεταπτυχιακή διατριβή, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Κρήτης.
- [3] Γ. Κωνσταντινίδης, «Σημειώσεις Μαθήματος Θεωρίας και Εργαστηρίου Κατασκευής Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων», ΕΛΕ ΙΤΕ.
- [4] Κ. Byungwhan, Κ. Minji, “Prediction of plasma etch process by using actinometry-based optical emission spectroscopy data and neural network”, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 2620-2626.
- [5] NE 343: Microfabrication and thin film technology, Instructor: Bo Cui, ECE, University of Waterloo; <http://ece.uwaterloo.ca/~bcui/>, Textbook: Silicon VLSI Technology by Plummer, Deal and Griffin.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΙΟΔΩΝ SCHOTTKY

4.0 Εισαγωγή

Στην εργασία αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των ηλεκτρικών μετρήσεων διόδων Schottky σε μια σειρά από μέταλλα όπως Ti/Ni, Cr και Cr/Au. Από μετρήσεις χαρακτηριστικών χωρητικότητας-τάσης ($C-V$) και ρεύματος-τάσης ($I-V$), υπολογίζονται μια σειρά από τιμές φυσικών και ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των διόδων όπως το ύψος φραγμού δυναμικού (Φ_b), η σειριακή αντίσταση (R_s), η τάση κατάρρευσης (V_{br}), ο παράγοντας ιδανικότητας (n) και η συγκέντρωση (N_d) συναρτήσει της περιοχής απογύμνωσης (W). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν πάνω σε τύπου n υποστρώματα 4H-SiC (0001).

Μια ιδανική δίοδο Schottky διακρίνεται από:

- παράγοντας ιδανικότητας ίσο με μονάδα ($n=1$)
- χαμηλή σειριακή αντίσταση
- υψηλό πεδίο κατάρρευσης
- χαμηλό ανάστροφο ρεύμα (ρεύμα διαρροής)

4.1 Προσδιορισμός $q\Phi_b$ από μετρήσεις $C-V$

Η περιοχή απογύμνωσης μιας διόδου Schottky είναι όμοια με την απόσταση των οπλισμών ενός επίπεδου πυκνωτή. Το μήκος της περιοχής απογύμνωσης (W) και η χωρητικότητα συνδέονται από την παρακάτω μαθηματική εξίσωση:

$$W = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{C} \quad (4.1)$$

όπου ϵ_0 ορίζεται η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού (8.8542×10^{-12} F/m), ενώ ϵ_r είναι η σχετική ηλεκτρική διαπερατότητα (για 4H-SiC είναι 9.76) και A ($=\pi r^2$ για μια κυκλική επαφή) ορίζεται το εμβαδόν του μετάλλου. Για να υπολογίσουμε την κατανομή της συγκέντρωσης των φορέων (N_d) χρησιμοποιούμε την εξίσωση:

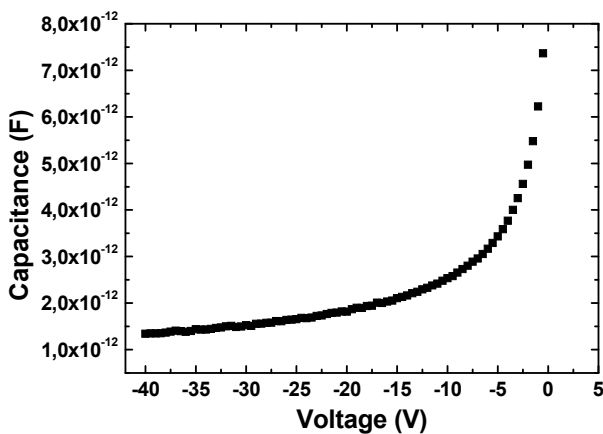
$$N_d = \frac{C^3}{q\epsilon_0\epsilon_r A^2 \left(\frac{dC}{dV}\right)} \quad (4.2)$$

όπου q ορίζεται το ηλεκτρικό φορτίο (1.6×10^{-19} C).

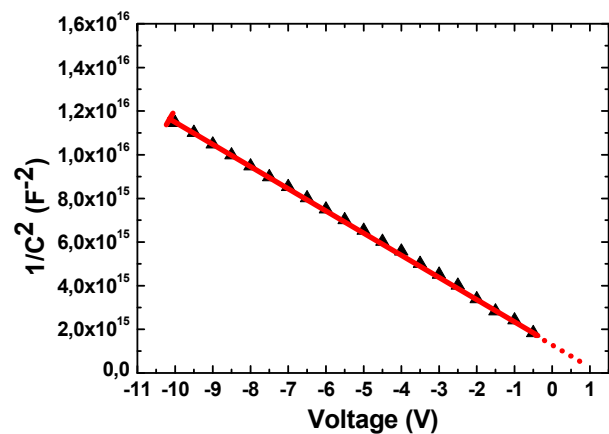
Για τον υπολογισμό του ύψους του φραγμού δυναμικού ακολουθούμε την διαδικασία που περιγράφεται στη βιβλιογραφία [1]. Από μετρήσεις χωρητικότητας-τάσης (C-V) της διόδου μπορεί να υπολογιστεί το εσωτερικό δυναμικό (V_i) και η καθαρή πυκνότητα προσμίξεων ($N_D - N_A$).

$$\frac{C}{A} = \sqrt{\frac{qk_s\epsilon_0(N_A - N_D)}{2(V_i + V_F - kT/q)}} \xrightarrow{\sqrt{(C/A)^2}} \frac{1}{(C/A)^2} = \frac{2(V_i - kT/q)}{qk_s\epsilon_0(N_D - N_A)} + \frac{2}{qk_s\epsilon_0(N_A - N_D)} V \quad (4.3)$$

Από τη γραφική παράσταση του $(C/A)^{-2}$ σε συνάρτηση της τάσης (V), προκύπτει μια ευθεία γραμμή με κλίση που δίνεται από $B = [2/(q\epsilon_0\epsilon_r(N_D - N_A))]$, με σημείο τομής στον V άξονα, $V_i = -V_i + kT/q$ (βλέπε Σχήμα 4.1). Η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων (κόκκινο χρώμα, Σχήμα 4.1(β)) είναι της μορφής $Y = A + B \times X$.



(α)



(β)

Σχήμα 4.1: Ανάλυση χαρακτηριστικής (α) χωρητικότητας-τάσης (C-V) σε ανάστροφη πόλωση. Γραφική παράσταση του $(1/C^2)$ σε συνάρτηση της τάσης (V) μιας Schottky διόδου όπως αυτή μετρήθηκε μέσα στα πλαίσια της παρούσας έρευνας.

Από το παρακάτω σχεδιάγραμμα, η καθαρή πυκνότητα προσμίξεων ($N_D - N_A$) μπορεί να υπολογιστεί και από την κλίση της γραφικής παράστασης (Schottky plot). Η τιμή που προκύπτει από την κλίση θα πρέπει επομένως να είναι σύμφωνη με την τιμή που προκύπτει από την εξίσωση 4.2. Το ύψος φραγμού δυναμικού (Φ_B) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση:

$$\Phi_b = V_i + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_C}{N_A - N_D}\right) + \frac{kT}{q} = V_i + V_0 + \frac{kT}{q} \quad (4.4)$$

όπου $V_0 = \frac{kT}{q} \times \ln\left(\frac{N_C}{N_D - N_A}\right)$, η διαφορά τάσης μεταξύ της στάθμης Fermi και της ζώνης αγωγιμότητας. Για τον υπολογισμό του V_0 , η συγκέντρωση (N_C) για 4H-SiC υποστρώματα δίνεται από $N_C = 2 \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot m_n^* \cdot kT}{h^2} \right]^{\frac{3}{2}} = 3.9 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

4.2 Προσδιορισμός $q\Phi_b$ από μετρήσεις $I-V$

Σε μια δίοδο Schottky, αν V είναι η ορθή πόλωση που εφαρμόζεται, τότε η πυκνότητα ρεύματος J που διαρρέει την επαφή, δίνεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} J &= A^{**} T^2 [\exp(-q\Phi_b / kT) - 1] \\ &= J_S [\exp(-qV / kT) - 1] \\ &= J_S (\exp(qV / kT)) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Η εξίσωση 4.4 ισχύει για $V \gg kT/q$. Το J_S είναι η πυκνότητα ρεύματος κόρου, A^{**} είναι η ενεργός σταθερά Richardson, kT είναι η θερμική ενέργεια (0.026 eV για $T=27^\circ\text{C}$), Φ_b είναι το ύψος φραγμού δυναμικού και k είναι η σταθερά Boltzmann.

Η εξίσωση της πυκνότητας ρεύματος χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό μεταλλικών επαφών Schottky. Από την χαρακτηριστική ρεύματος-τάσης σε ορθή πόλωση υπολογίζονται οι παράμετροι που χαρακτηρίζουν την ποιότητα της επαφής. Οι ηλεκτρικές ιδιότητες της επαφής είναι πολύ ευαίσθητες στον τρόπο κατασκευής, ο οποίος επηρεάζει την επιφάνεια του ημιαγωγού καθώς και τις ιδιότητες του ενδιάμεσου στρώματος μεταξύ μετάλλου και ημιαγωγού. Η πυκνότητα ρεύματος εκφράζεται από την εξίσωση:

$$J = J_S (e^{qV / nkT}) \quad (4.6)$$

Κριτήριο της ποιότητας μιας επαφής Schottky αποτελούν τα μεγέθη Φ_b και n . Αν η τιμή του παράγοντα ιδανικότητας βρίσκεται κοντά στη μονάδα, τότε η επαφή πλησιάζει την ιδανική δίοδο Schottky και το ρεύμα προέρχεται κυρίως από

θερμιοτική εκπομπή. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται το λογαριθμικό διάγραμμα του ρεύματος ως προς την ορθή τάση πόλωσης. Για $V \gg kT / q$ ισχύει ότι:

$$\ln(J) = \ln(J_s) + eV / nkT \quad (4.7)$$

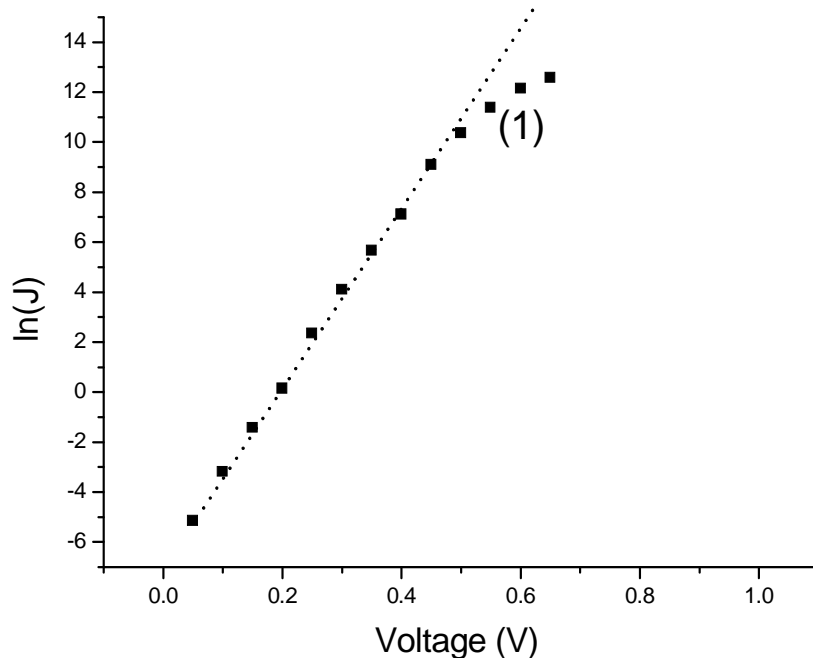
Όπου $J_s = A^{**} T^2 \exp(-q\Phi_b / kT)$. Από το ευθύγραμμο τμήμα της καμπύλης για τιμές της τάσης μακριά από το μηδέν, υπολογίζεται ο παράγοντας ιδανικότητας (κλίση της ευθείας) και ορίζεται ως:

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{\partial V}{\partial \ln J} \right) \quad (4.8)$$

Το ύψος φραγμού δυναμικού υπολογίζεται από την διατομή με τον οριζόντιο άξονα και ορίζεται από την εξίσωση:

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{A^{**} T^2}{J_s}\right) \quad (4.9)$$

Η ευαισθησία της μεθόδου στην ενδεχόμενη αβεβαιότητα για την τιμή του A^{**} είναι μικρή. Για σφάλμα 100% στο A^{**} προκαλεί μεταβολή στο Φ_B λιγότερο από 0.018V. Η θεωρητική τιμή της για ημιαγωγούς 4H-SiC είναι $146 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ [2].



Σχήμα 4.2: Πειραματικά αποτελέσματα (διακεκομμένη γραμμή) πυκνότητας ρεύματος-τάσης χαρακτηριστική μιας διόδου Schottky 4H-SiC. Με τον αριθμό(1) σημειώνεται η περιοχή εμφάνισης της σειριακής αντίστασης.

4.3 Μετρήσεις – Πειραματικά αποτελέσματα

Σε αυτό το κομμάτι του κεφαλαίου παρατίθενται ξεχωριστά οι διάφορες μετρήσεις που έγιναν στις διόδους Schottky των τριών διαφορετικών επιμεταλλώσεων μετά την ολοκλήρωση της πειραματικής διαδικασίας και του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού.

Κατά την εκτέλεση των πειραμάτων, μια και μόνο μέτρηση μπορεί συχνά να οδηγήσει σε μη ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων. Για το λόγο αυτό, για κάθε ποσότητα προτιμήθηκε η μέθοδος των πολλαπλών μετρήσεων, πιο συγκριμένα ο μέσος όρος τριών μετρήσεων.

4.3.1.0 Μελέτη διόδων Schottky Ni/Ti/4H-SiC

Για τις διόδους Schottky Ni/Ti/4H-SiC, το πάχος επιμετάλλωσης για κάθε μέταλλο χωριστά, ξεκινώντας από εκείνο που εξαχνώθηκε πρώτο, ήταν 3nm Ti και 150nm Ni. Το Ti χρησιμοποιήθηκε για να βελτιώσουμε την πρόσφυση της μεταλλικής επαφής κατά μήκος της επιφάνειας του ημιαγωγού.

Εξετάστηκε επίσης, η επίδραση της ανόπτησης (annealing) στα χαρακτηριστικά των διόδων. Πιο συγκεκριμένα, το ίδιο δείγμα υπέστη διαδοχικά βήματα ανόπτησης σύντομης χρονικής διάρκειας (*Rapid Thermal Annealing*). Οι θερμοκρασίες ανόπτησης ήταν 200, 400, 600 και 750 °C. Στο ίδιο δείγμα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις I-V και C-V σε θερμοκρασία 300K μετά από κάθε βήμα ανόπτησης.

4.3.1.1 Πειραματικά αποτελέσματα διόδων Ni/Ti/4H-SiC

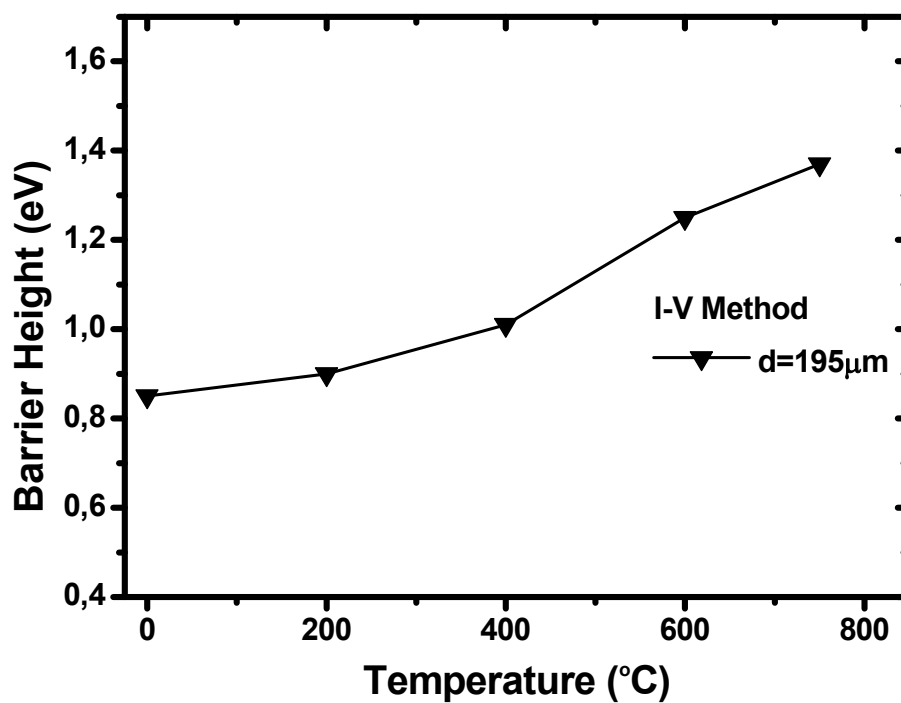
Τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων των διόδων ύστερα από κάθε βήμα ανόπτησης παρουσιάζονται στους επομένους πίνακες.

Σε κάθε βήμα ανόπτησης, έχουμε σε πίνακες τις τιμές των Φ_b και n από τις χαρακτηριστικές I-V, τις τιμές των Φ_b από τις χαρακτηριστικές C-V, καθώς επίσης και τις τιμές των σημείων τομής V_i στον οριζόντιο άξονα, του παράγοντα ιδανικότητας και των ρευμάτων διαρροής για δίοδο Schottky κυκλικής γεωμετρίας με διάμετρο 195 μm .

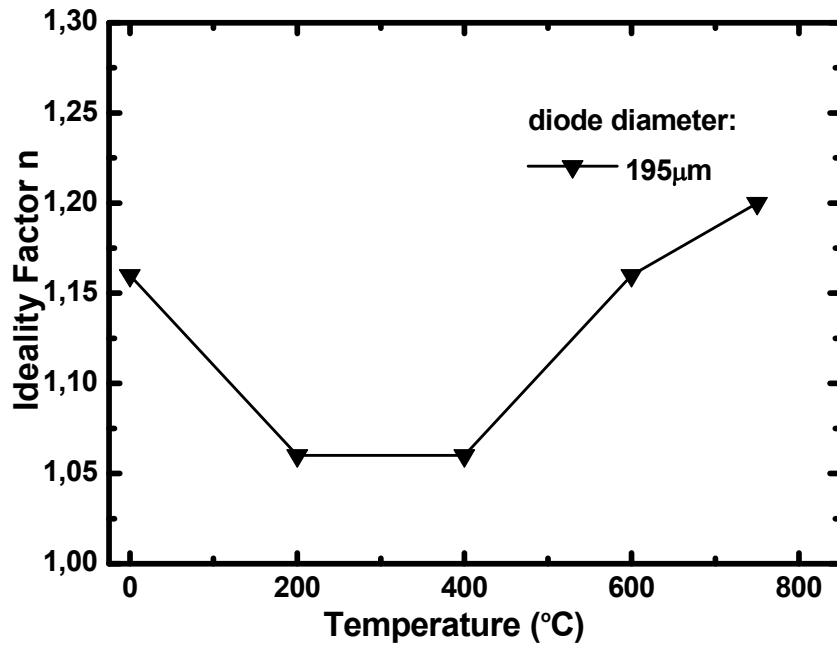
$\Phi_B(I-V)$ & n σε συνάρτηση με την ανόπτηση

Πίνακας 4.1: Πειραματικές τιμές Φ_b (Μέσος Όρος τιμών) από χαρακτηριστικές καμπύλες $I-V$ για διόδους από 3 διαφορετικές περιόδους.

RTA temp. (°C)	$q\Phi_b$ (eV)	Ideality Factor n
0	0.85	1.16
200	0.90	1.06
400	1.01	1.05
600	1.25	1.16
750	1.37	1.20



Σχήμα 4.3: $\Phi_b(I-V)$ σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ανόπτησης

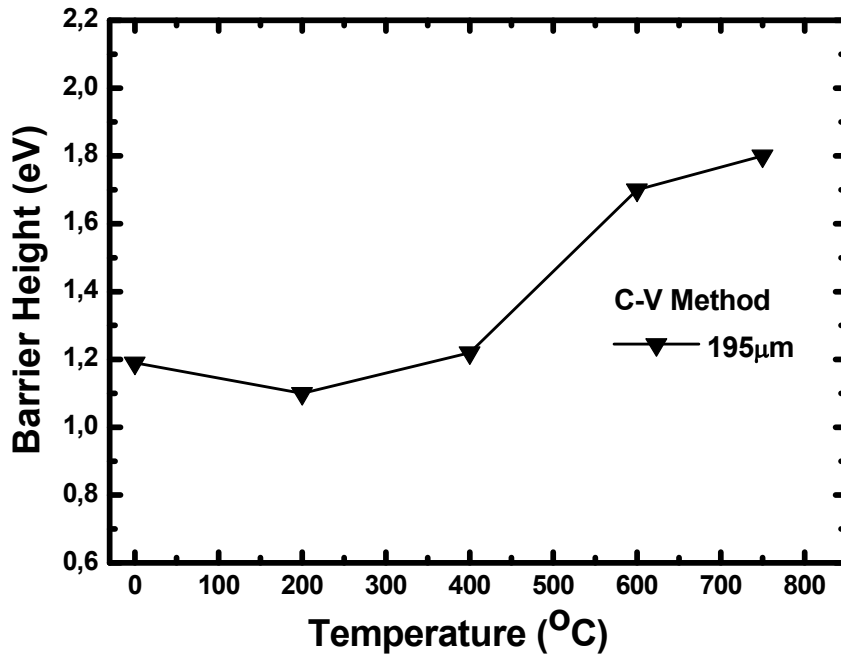


Σχήμα 4.4: Παράγοντας ιδανικότητας n σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ανόπτησης

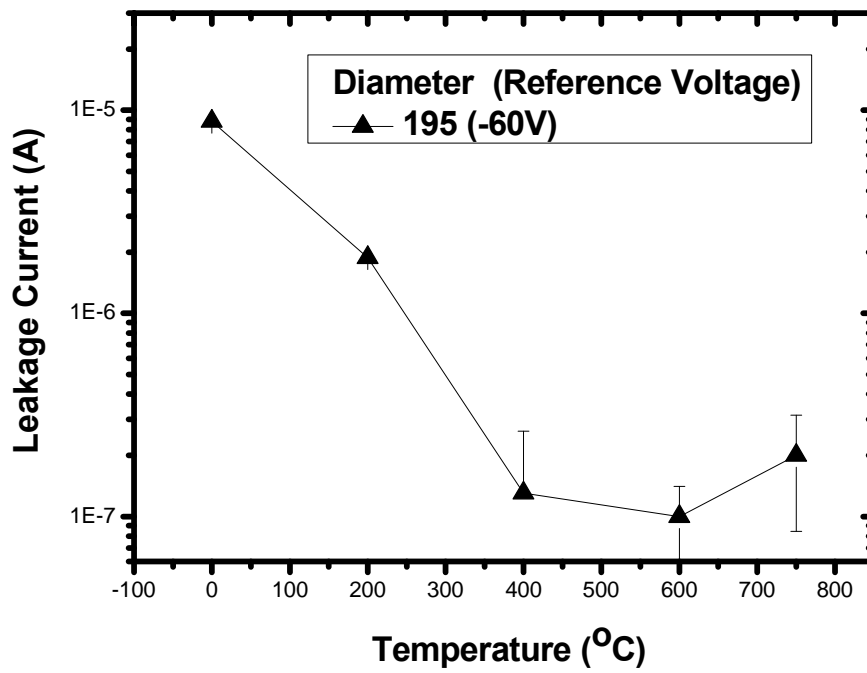
Φ_B (C-V) & Ρεύμα διαρροής σε συνάρτηση με την ανόπτηση

Πίνακας 4.2: Πειραματικές τιμές Φ_b (Μέσος Όρος τιμών) από χαρακτηριστικές καμπύλες $I-V$ για διόδους από 3 διαφορετικές περιόδους.

RTA temp. (°C)	$q\Phi_b$ (eV)	Intercept V_i (eV)	Ρεύμα Διαρροής (A)
0	1.19	0.89	8.8E-6
200	1.10	0.86	1.88E-6
400	1.22	0.92	1.3E-7
600	1.70	1.64	1E-7
750	1.80	1.59	2E-7

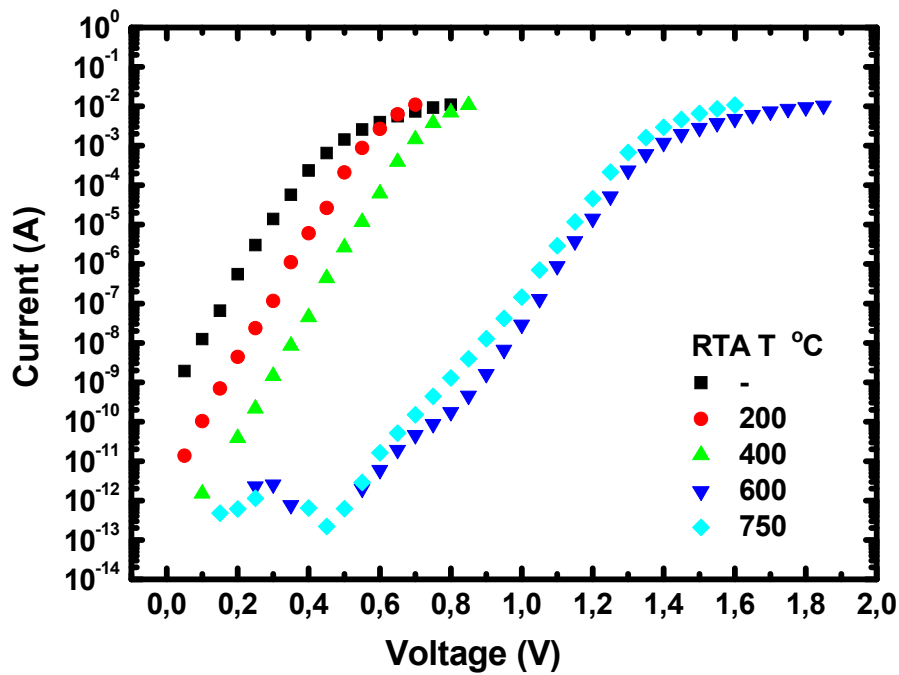


Σχήμα 4.5: $\Phi_b(C-V)$ σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ανόπτησης

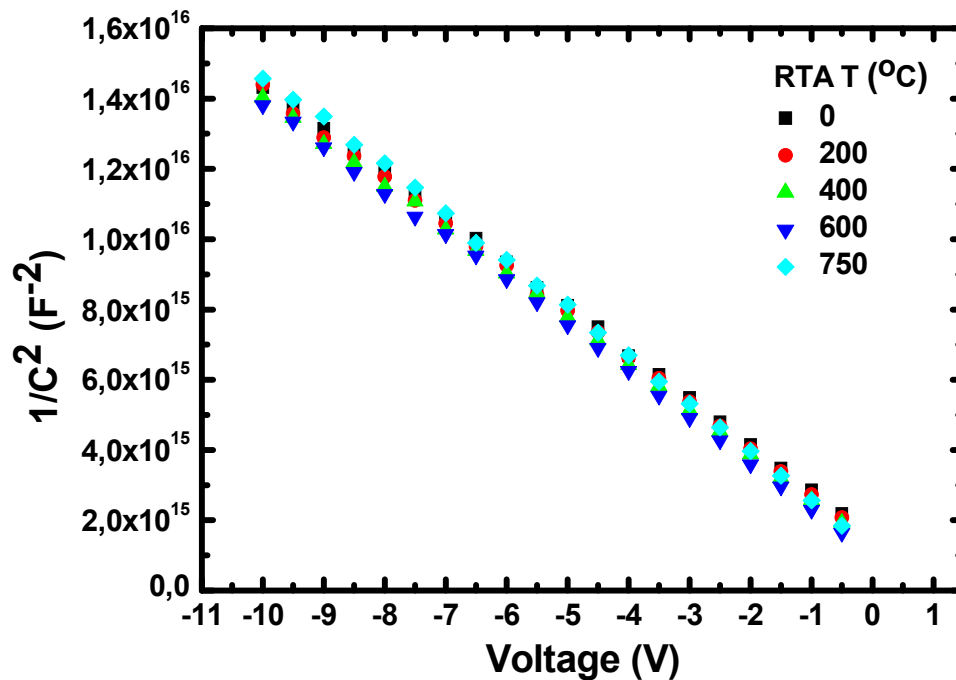


Σχήμα 4.6: Ρεύμα διαρροής διόδου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ανόπτησης

Χαρακτηριστικές I-V & C-V



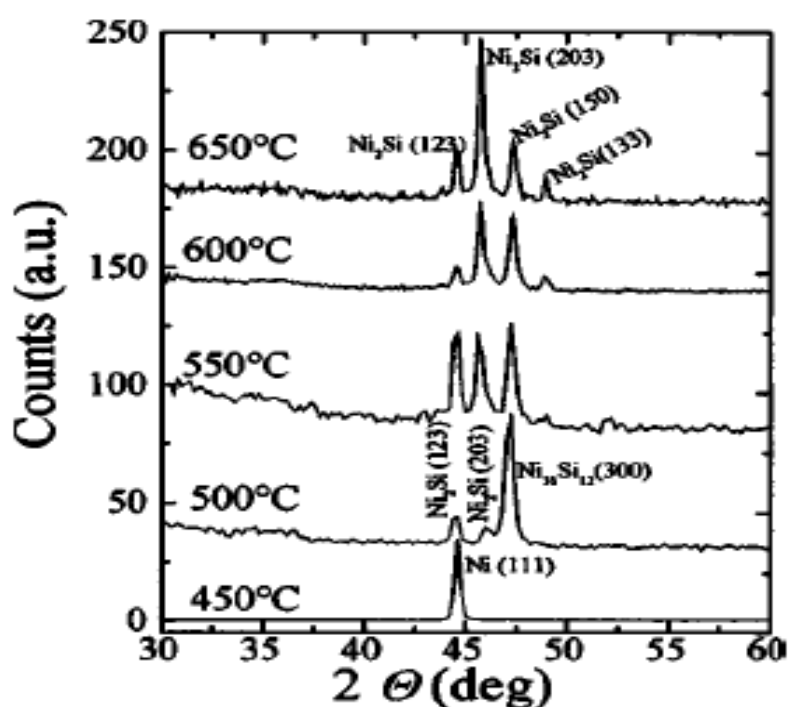
Σχήμα 4.7: Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης (I-V) διόδου Schottky μετά από κάθε βήμα θερμικής ανόπτησης.



Σχήμα 4.8: Χαρακτηριστικές χωρητικότητας-τάσης (C-V) διόδου Schottky μετά από κάθε βήμα θερμικής ανόπτησης.

Ανόπτηση επιμεταλλώσεων Ni/Ti/ 4H-SiC n-type

Αυξάνοντας την θερμοκρασία ανόπτησης, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της διόδου μεταβάλλονται. Πιο συγκεκριμένα, έχουμε μεταβολή του ύψους φραγμού δυναμικού, ενώ παράλληλα έχουμε μείωση της τιμής του ρεύματος διαρροής κατά δυο τάξης μεγέθους. Η ανόπτηση επηρεάζει την χημική σύσταση των διόδων. Για θερμικές ανοπτήσεις μεταξύ 450-650°C, οι δομικές/χημικές αλλαγές των επαφών Ni/Ti/SiC έχουν μελετηθεί στην βιβλιογραφία με την βοήθεια διαγραμμάτων περίθλασης ακτινών X. Σε προσφάτως δημοσιευμένη εργασία [3] γίνεται διεξοδική μελέτη των αποτελεσμάτων της ανόπτησης σε επαφές Ni/Ti/ 4H-SiC.



Σχήμα 4.9: Διάγραμμα περίθλασης ακτινών X για ανοπτήσεις σε θερμοκρασίες 450-650 °C [Roccaforte et.al., JAP, 4313-4318, 2004].

Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από το Σχήμα 4.9 της δημοσιευμένης εργασίας [3] είναι τα ακόλουθα:

- ❑ Θερμοκρασία ανόπτησης $\leq 450^\circ\text{C}$: Δεν παρατηρούνται νέες φάσεις
- ❑ Θερμοκρασία ανόπτησης $\geq 450^\circ\text{C}$: Δημιουργία Ni-silicides
Ni₃₁Si₁₂ & Ni₂Si
- ❑ Θερμοκρασία ανόπτησης $\geq 600^\circ\text{C}$: Δημιουργία Ti-silicides
Ti₅Si₃ & TiC

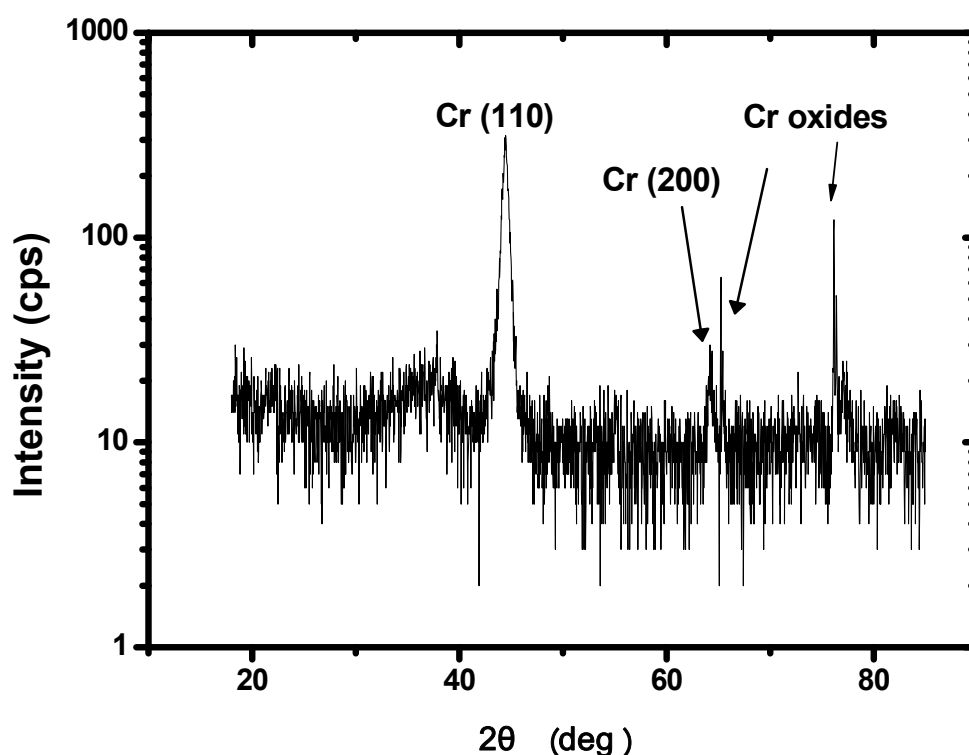
4.3.2.0 Μελέτη διόδων Schottky Cr/4H-SiC

Με στόχο την εμβάθυνση στις ιδιότητες της επαφής Cr/4H-SiC (0001), πραγματοποιήθηκε επιμετάλλωση με 200nm Cr χωρίς την κάλυψη με Au ή άλλο υλικό. Στην συνέχεια, ακολούθησε ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των επαφών. Όμως, οι επαφές του δείγματος, ύστερα από το πρώτο στάδιο ανόπτησης στους 200°C, οξειδώθηκαν. Έγιναν λοιπόν μετρήσεις στις διόδους, χωρίς να εξεταστεί η επίδραση της ανόπτησης στα χαρακτηριστικά των διόδων.

4.3.2.1 Πειραματικά αποτελέσματα διόδων Cr/4H-SiC

Φάσματα περίθλασης ακτινών-X

Κατά την διάρκεια της ανάπτυξης των επαφών Cr/4H-SiC λάβαμε μετρήσεις φασμάτων περίθλασης ακτινών-X, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10.

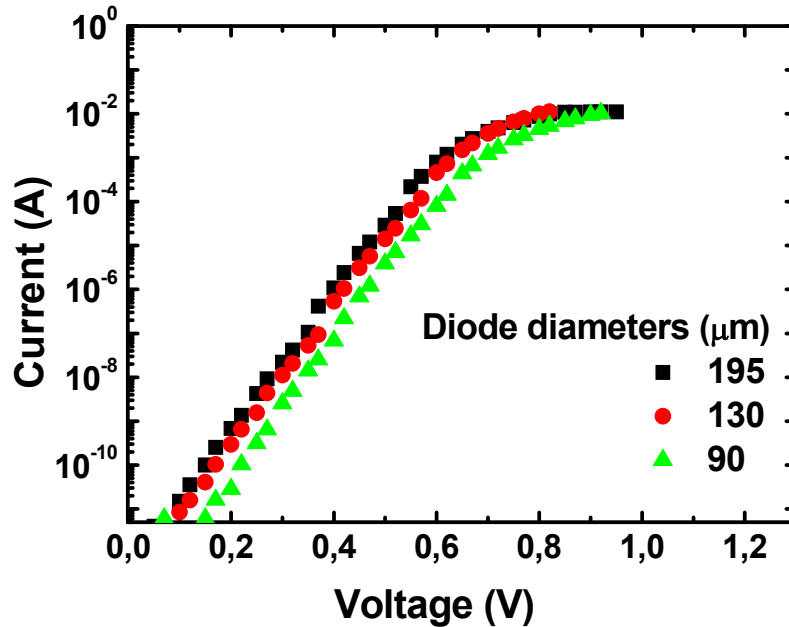


Σχήμα 4.10: Μετρήσεις περίθλασης ακτινών X → στρώμα πολυκρυσταλλικού Cr.

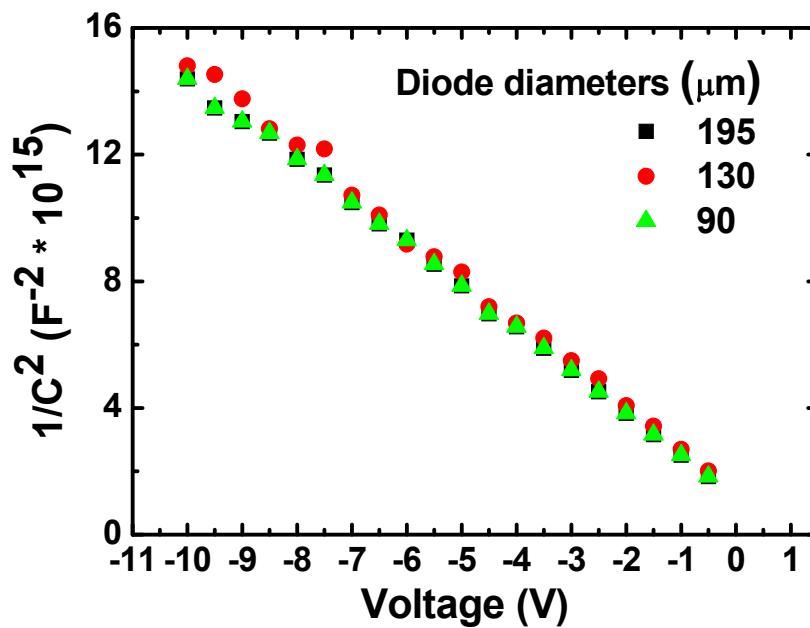
Από τις κορυφές που σημειώνονται στο Σχήμα 4.10, παρατηρούμε τον σχηματισμό πολυκρυσταλλικού Cr.

Χαρακτηριστικές I-V & C-V

Οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης ($I-V$) και χωρητικότητας-τάσης ($C-V$) διόδων Schottky Cr/4H-SiC, τριών διαφορετικών διαστάσεων (195, 130, 90 μm) σε θερμοκρασία δωματίου, διακρίνονται στα Σχήματα 4.11 και 4.12 αντίστοιχα.



Σχήμα 4.11: Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης ($I-V$) διόδων σε θερμοκρασία 300K



Σχήμα 4.12: Χαρακτηριστικές χωρητικότητας-τάσης ($C-V$) διόδων σε θερμοκρασία 300K

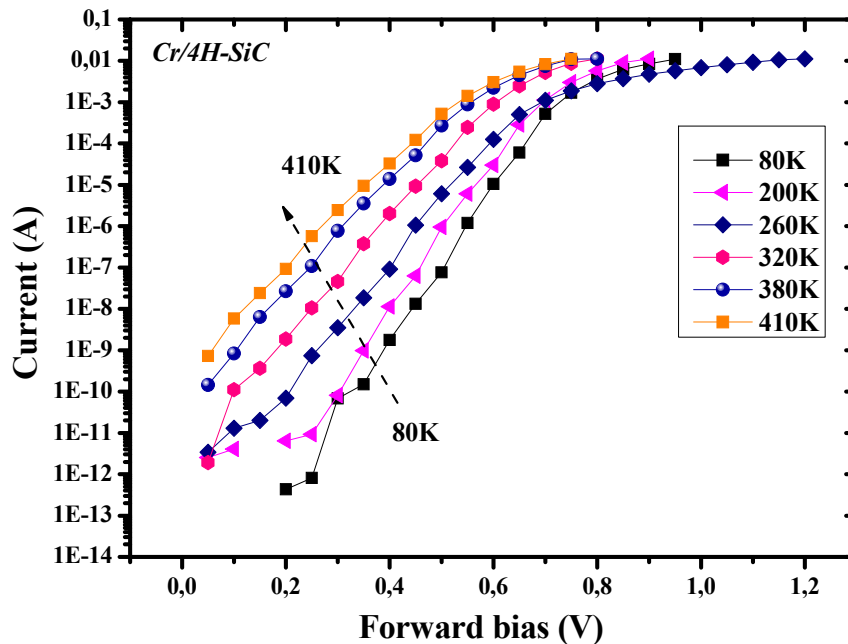
Από τις παραπάνω χαρακτηριστικές είναι προφανές ότι:

- ❑ Η $\ln I-V$ χαρακτηριστική παρουσιάζει γραμμικότητα που φθάνει μέχρι και τις επτά τάξεις μεγέθους.
- ❑ Το ύψος φραγμού δυναμικού (μέσος όρος) από μετρήσεις I-V είναι:
 $q\Phi_b (I-V) = 0.92\text{eV} \pm 0.05\text{eV}$
- ❑ Ο παράγοντας ιδανικότητας (μέσος όρος) είναι:
 $n = 1.11 \pm 0.03$
- ❑ Το ύψος φραγμού δυναμικού (μέσος όρος) από μετρήσεις C-V:
 $q\Phi_b (C-V) = 1.1\text{eV} \pm 0.07\text{eV}$

I-V-T

Οι χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης για μια διόδο Schottky Cr/4H-SiC κυκλικής γεωμετρίας διαμέτρου 130 μm , σε διαφορετικές θερμοκρασίες μέτρησης (I-V-T) φαίνεται στο Σχήμα 4.13. Τα κύρια χαρακτηριστικά της διόδου είναι:

- ❑ Η διόδος Schottky είναι κυκλικής γεωμετρίας με διάμετρο $d=130\mu\text{m}$.
- ❑ Οι θερμοκρασίες μέτρησης είναι μεταξύ 80-410K, με βήμα 30K
- ❑ Τα Φ_b και n υπολογιστήκαν από την γραμμική προσαρμογή της χαρακτηριστικής $\ln I-V$ σε κάθε θερμοκρασία.



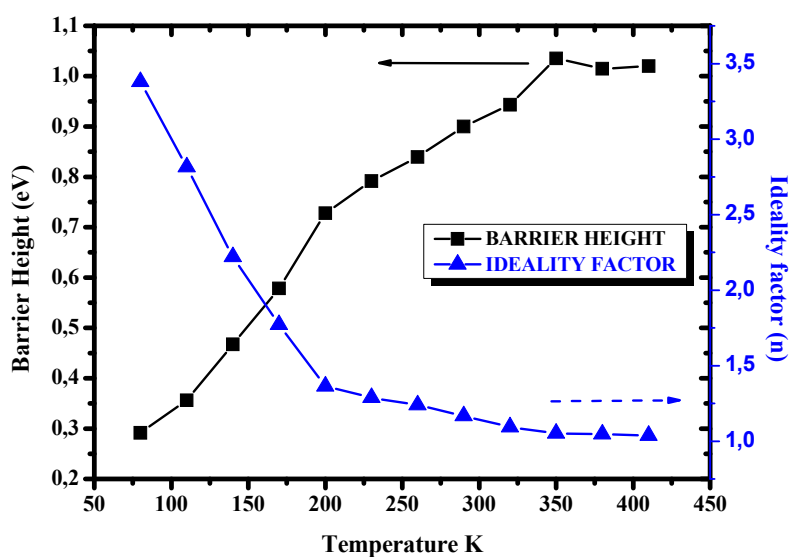
Σχήμα 4.13: Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης μιας διόδου Schottky Cr/4H-SiC σε διαφορετικές θερμοκρασίες.

$\Phi_b(T)$, $n(T)$ & $R(T)$

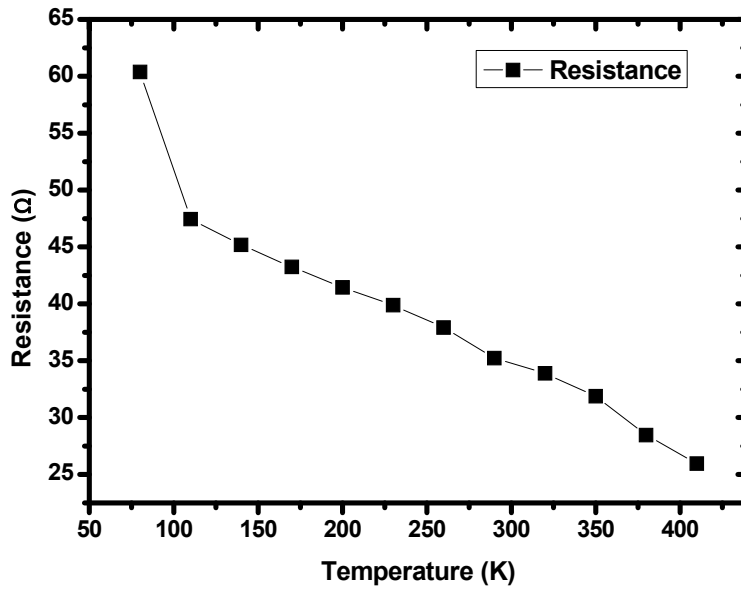
Στην παρούσα μελέτη, τη συνολική εικόνα μεταβολής του ύψους φραγμού δυναμικού Φ_b , του παράγοντα ιδανικότητας n και της σειριακής αντίστασης R σε σχέση με την μεταβολή της θερμοκρασίας παρατηρούμε στα Σχήματα 4.14 και 4.15. Ο Πίνακας 4.3 περιέχει τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων $I-V-T$.

Πίνακας 4.3: Ανασκόπηση των πειραματικών αποτελεσμάτων των μετρήσεων $I-V-T$.

T (K)	$q\Phi_b$ (eV)	n	R (Ω)
80	0.29	3.38	60,38
110	0.36	2.81	47,44
140	0.47	2.22	45,18
170	0.58	1.77	43,24
200	0.73	1.36	41,44
230	0.80	1.31	39,89
260	0.84	1.24	37,92
290	0.90	1.16	35,24
320	0.94	1.09	33,89
350	1.03	1.05	31,88
380	1.01	1.04	28,46
410	1.02	1.03	25,96



Σχήμα 4.14: Μεταβολή του ύψους φραγμού δυναμικού (Barrier height) και του παράγοντα ιδανικότητας (n) με την μεταβολή της θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.15: Μεταβολή της σειριακής αντίστασης της διόδου Cr/4H-SiC με την μεταβολή της θερμοκρασίας.

Συσγέτιση Φ_B & n

Στην βιβλιογραφία [4] οι αποκλίσεις από την ιδανική περιγραφή (με αποτέλεσμα $n > 1$) έχουν συσχετιστεί με εξάρτηση της μετρούμενης τιμής Φ_b από το ηλεκτρικό πεδίο και την εφαρμοζόμενη τάση V' . Έτσι έχουμε ότι

$$\Phi_b(V') = \Phi_{B0} + \left(\frac{n-1}{n}\right)V' \quad (4.10)$$

Όπου: $V' = V_a - IR$ και ο όρος Φ_{B0} ορίζεται το ύψος φραγμού δυναμικού για μηδενική τάση πόλωσης με $V' = V_a = 0$. Αν ορισθεί το Φ_{BF} το ύψος φραγμού δυναμικού για μηδενικό ηλεκτρικό πεδίο ($\vec{\varepsilon} = 0$) τότε

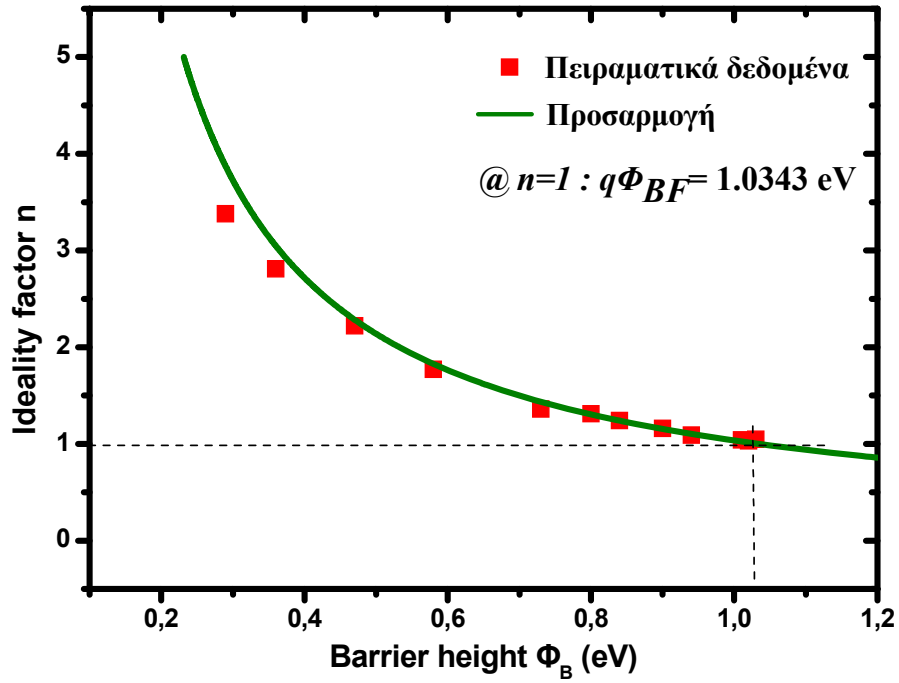
$$\Phi_{B0} = \frac{1}{n}\Phi_{BF} + \left(\frac{n-1}{n}\right)\frac{kT}{q} \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (4.11)$$

Όπου: Φ_{BF} θεωρείται η βασική τιμή φράγματος δυναμικού που χαρακτηρίζει την επαφή μετάλλου-ημιαγωγού [Wagner et. al, IEEE EDL-4, 320 (1983)].

Προσδιορισμός του Φ_{B0} για Cr/4H-SiC

Στο Σχήμα 4.16 δίνεται το διάγραμμα του παράγοντα ιδανικότητας n σαν συνάρτηση του ύψους φραγμού δυναμικού Φ_b από τα αποτελέσματα μετρήσεων I-V σε

διαφορετικές T . Από το Σχήμα 4.16, η καμπύλη δίνει την θεωρητική προσαρμογή, σύμφωνα με την εξίσωση 4.11. Προκύπτει ότι, το ύψος φραγμού δυναμικού είναι ίσο με $q\Phi_{BF} = 1.03 \pm 0.045 \text{ eV}$



Σχήμα 4.16: Διάγραμμα n σαν συνάρτηση του Φ_b , από τα αποτελέσματα μετρήσεων $I-V$ σε διαφορετικές T . Προκύπτει : $q\Phi_{BF} = 1.03 \pm 0.045 \text{ eV}$

4.3.3.0 Μελέτη διόδων Schottky Au/Cr/4H-SiC

Γνωρίζοντας ότι το Cr οξειδώνεται εξαιρετικά εύκολα, πράγμα που αποδείχτηκε στις επαφές Cr/4H-SiC, προχωρήσαμε σε επιμετάλλωση με Cr και κάλυψη με Au. Τα πάχη της επιμετάλλωσης, ξεκινώντας από εκείνο που εξαχνώθηκε πρώτο, ήταν 50nm Cr και 100nm Au.

Εξετάστηκε επίσης, η επίδραση της ανόπτησης (annealing) στα χαρακτηριστικά των διόδων. Πιο συγκεκριμένα, το ίδιο δείγμα υπέστη διαδοχικά βήματα ανόπτησης σύντομης χρονικής διάρκειας (*Rapid Thermal Annealing*). Οι θερμοκρασίες ανόπτησης ήταν 200, 400, 600 και 750 °C. Στο ίδιο δείγμα πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις I-V και C-V σε θερμοκρασία 300K μετά από κάθε βήμα ανόπτησης.

4.3.3.1 Πειραματικά αποτελέσματα διόδων Au/Cr/4H-SiC

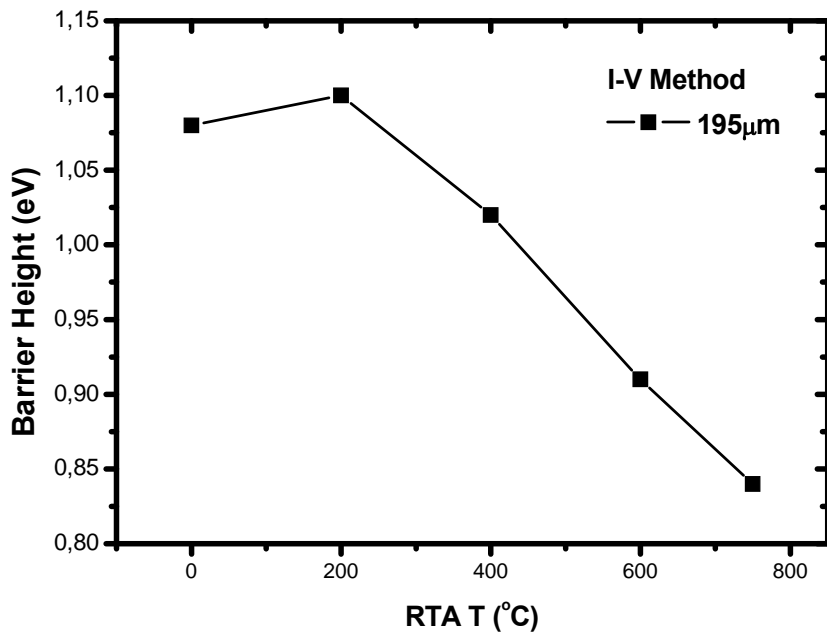
Τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων των διόδων ύστερα από κάθε βήμα ανόπτησης παρουσιάζονται στους επομένους πίνακες.

Σε κάθε βήμα ανόπτησης, έχουμε σε πίνακες τις τιμές των Φ_B και n από τις χαρακτηριστικές $I-V$, τις τιμές των Φ_B από τις χαρακτηριστικές $C-V$ καθώς επίσης και τις τιμές των σημείων τομής V_i στον οριζόντιο άξονα, του παράγοντα ιδανικότητας και των ρευμάτων διαρροής.

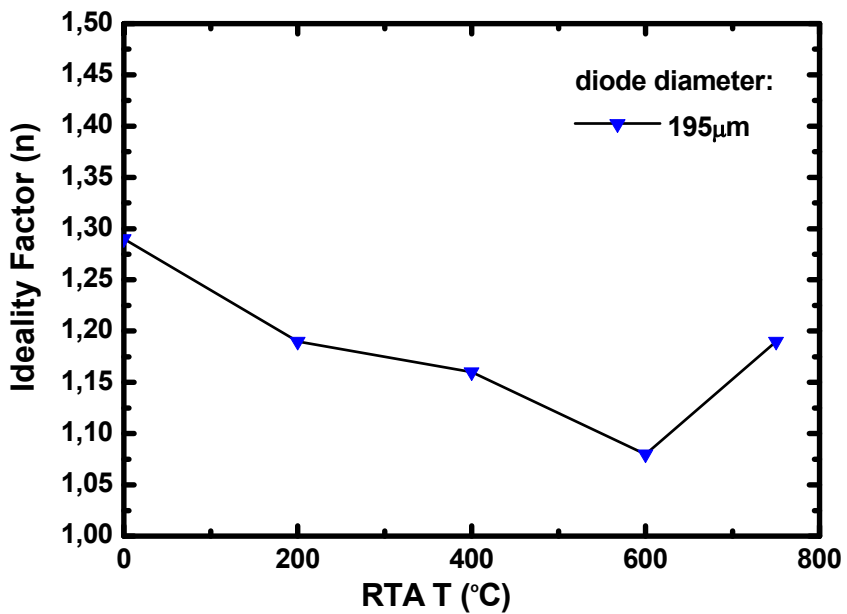
$\Phi_B(I-V)$ & n σε συνάρτηση με την ανόπτηση

Πίνακας 4.4: Πειραματικές τιμές Φ_b (Μέσος Όρος τιμών) από χαρακτηριστικές καμπύλες $I-V$ για διόδους από 3 διαφορετικές περιόδους.

RTA temp. (°C)	$q\Phi_b$ (eV)	Ideality Factor n
0	1.08	1.29
200	1.10	1.19
400	1.02	1.16
600	0.91	1.08
750	0.84	1.19



Σχήμα 4.17: $\Phi_b(I-V)$ σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ανόπτησης

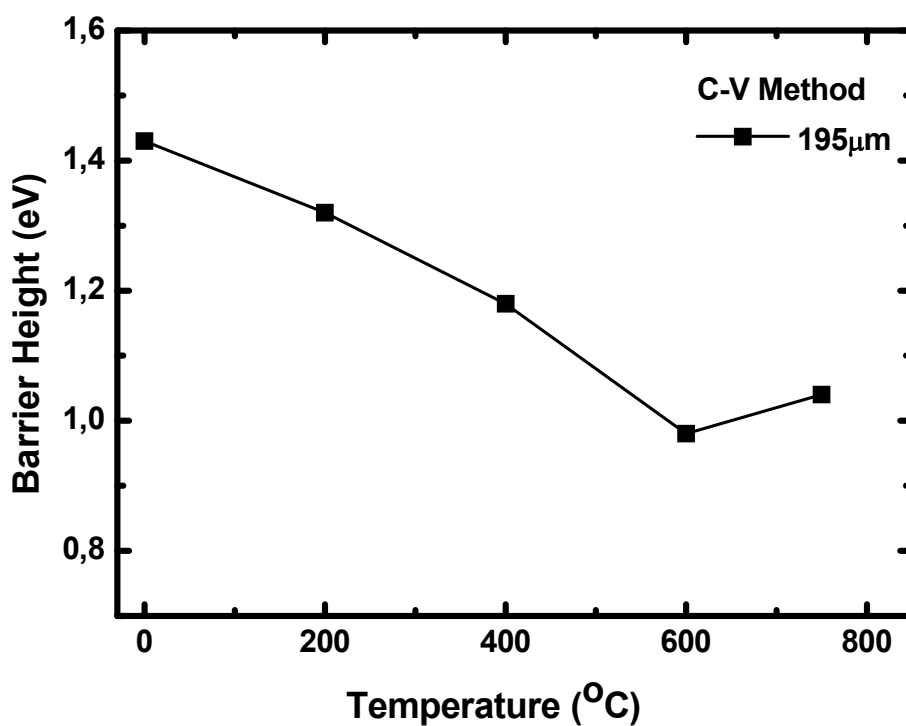


Σχήμα 4.18: Παράγοντας ιδανικότητας n σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ανόπτησης

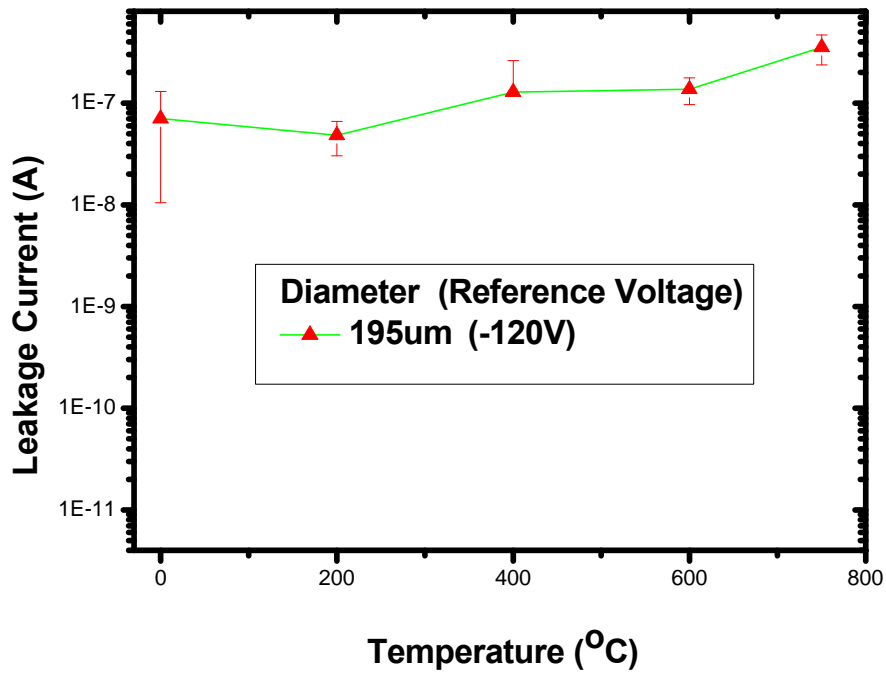
Φ_B (C-V) & Ρεύμα διαρροής σε συνάρτηση με την ανόπτηση

Πίνακας 4.5: Πειραματικές τιμές Φ_b (Μέσος Όρος τιμών) από χαρακτηριστικές καμπύλες I-V για διόδους από 3 διαφορετικές περιόδους.

RTA temp. (°C)	$q\Phi_b$ (eV)	Intercept V_i (eV)	Ρεύμα Διαρροής (A)
0	1.43	1.27	7.06E-8
200	1.32	1.15	4.83E-8
400	1.18	0.90	1.28E-7
600	0.98	0.80	1.36E-7
750	1.04	0.86	3.53E-7

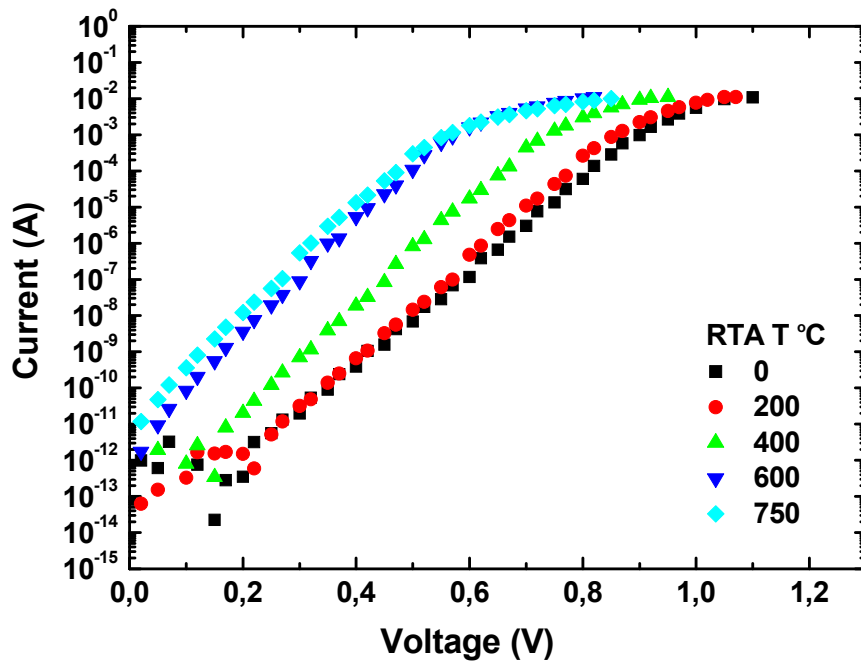


Σχήμα 4.19: Φ_b (C-V) σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ανόπτησης

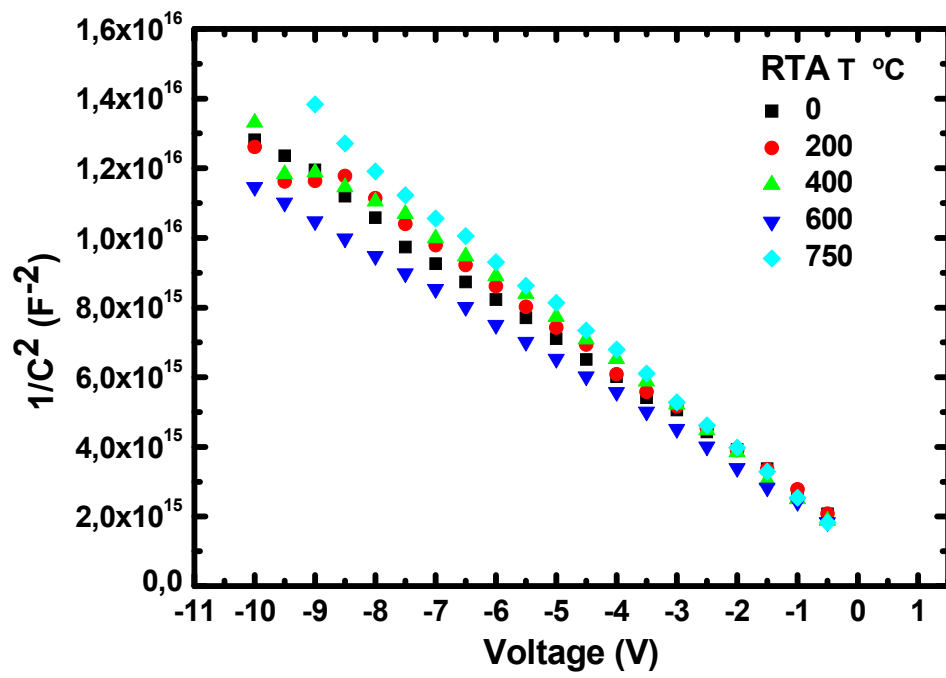


Σχήμα 4.20: Ρεύμα διαρροής διόδου σε συνάρτηση με την θερμοκρασία ανόπτησης

Χαρακτηριστικές I-V & C-V



Σχήμα 4.21: Χαρακτηριστικές ρεύματος-τάσης (I-V) διόδου Schottky μετά από κάθε βήμα θερμικής ανόπτησης.



Σχήμα 4.22: Χαρακτηριστικές χωρητικότητας-τάσης (C-V) διόδου Schottky μετά από κάθε βήμα θερμικής ανόπτησης.

-
- [1] Dieter K. Schroder: Semiconductor Material and Device Characterization, John Wiley and Sons 2nd ed., 168-174, 1998
- [2] R. Perez, N. Mestres, J. Monteserrat, D. Tournier, P Godignon, *phys. stat. sol. (a)* 202, No. 4, 692–697 (2005)
- [3] F. Roccaforte, F. La Via, A. Baeri, V. Raineri, L. Calcagno and F. Mangano, “Structural and electrical properties of Ni/Ti Schottky contacts on silicon carbide upon thermal annealing”, *JAP*, Vol.96, No. 8, 4313-4318 (2004).
- [4] L. F. Wagner, et al., *IEEE Electron Device Letters*, vol. EDL-4, no. 9, pp. 320-322, Sep. 1983.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ & ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.0 Γενικά

Κατασκευάστηκαν δίοδοι Schottky πάνω σε επιφάνειες υποστρώματος εξαγωνικού μονοκρυστάλλου Καρβιδίου του Πυριτίου (4H-SiC), ν-τύπου, με κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό (0001). Οι διαδικασίες κατασκευής για την εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3. Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφηκαν οι διάφορες τεχνικές μετρήσεων για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των διόδων. Κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας, κατασκευάστηκαν δίοδοι Schottky από τρεις διαφορετικές επιμεταλλώσεις:

1. Ni/Ti/4H-SiC
2. Cr/4H-SiC
3. Au/Cr/4H-SiC

Σημαντικό μέρος της παρούσης εργασίας αφορούσε την μελέτη του ύψους φραγμού δυναμικού Φ_B των διόδων Schottky.

Στις περιπτώσεις των διόδων Ni/Ti/4H-SiC και Au/Cr/4H-SiC, οι δίοδοι υπέστησαν διαδοχικά βήματα θερμικών ανοπτήσεων. Η επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά των διόδων μελετήθηκαν ύστερα από κάθε βήμα ανόπτησης.

Στην περίπτωση της διόδου Cr/4H-SiC, το δείγμα οξειδώθηκε από το πρώτο βήμα ανόπτησης. Οπότε, η μελέτη της θερμοκρασίας ανόπτησης στις συγκεκριμένες δόδους δεν ήταν δυνατή.

5.1 Συμπεράσματα διόδων Ni/Ti/4H-SiC

- Οι υψηλές θερμοκρασίες ανόπτησης αναμένεται να προκαλέσουν αλλαγές στη σύνθεση των μεταλλικών επαφών. Η ανόπτηση σε θερμοκρασίες $> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ οδηγούν στο σχηματισμό πυριτιδίων-SiC (SiC-silicides). [Roccaforte et.al., JAP, 4313-4318, 2004]
- Η ανόπτηση μείωσε το ανάστροφο ρεύμα κόρου έως και 2 τάξεις μεγέθους.
- Η τιμή του ύψους φραγμού δυναμικού Φ_b επηρεάζεται από την θερμοκρασία ανόπτησης των μεταλλικών επαφών. Η ανόπτηση μπορεί να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά των διόδων:

	T °C	n	$q\Phi_b(I-V)$ eV	$q\Phi_b(C-V)$ eV
Ni/Ti /4H-SiC	400	1.05	1.01	1.22

5.2 Συμπεράσματα διόδων Cr/4H-SiC

- Προσδιορίστηκε η εξάρτηση των εξαγόμενων τιμών Φ_b και n από την θερμοκρασία λειτουργίας.
- Η λειτουργία των διόδων ήταν σύμφωνη με την θερμονική εκπομπή σε θερμοκρασίες μεταξύ 350-410K, δίνοντας $n < 1.05$.

5.3 Συμπεράσματα διόδων Au/Cr/4H-SiC

- Η τιμή του Φ_b επηρεάζεται από την ανόπτηση των επαφών. Η ανόπτηση μπορεί να βελτιώσει τα χαρακτηριστικά των διόδων :

	T °C	n	$\Phi_b(I-V)$ eV	$\Phi_b(C-V)$ eV
Au/Cr/4H-SiC	600	1.08	0.89	1.03

- Ύστερα από τα διαδοχικά βήματα θερμικών ανοπτήσεων το ανάστροφο ρεύμα κόρου παρέμεινε αμετάβλητο.

5.4 Σύγκριση $q\Phi_b$ με ιδανική θεωρία Schottky

Στο παρακάτω Πίνακα συγκρίνονται οι τιμές του ύψους φραγμού δυναμικού για παράγοντα ιδανικότητας κοντά στη μονάδα ($n \rightarrow 1$). Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας συγκεντρώνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Επαφή	$q\Phi_b (I-V)$ (eV)	$q\Phi_b (C-V)$ (eV)	$q(\Phi_m - \chi)$ (eV)
Ni/Ti/ 4H-Si C	0.90 @ $n=1.06$ ($T_{RTA}=200^\circ C$)	1.10	1.23
Cr/ 4H-SiC	1.03 @ $n=1$	1.20	1.27
Au/Cr/ 4H-SiC	0.89 @ $n=1.09$ ($T_{RTA}=600^\circ C$)	1.03	1.27 (Cr) 2.00 (Au)

5.5 Τελικά συμπεράσματα

- Οι πειραματικές τιμές Φ_b είναι πλησίον των τιμών της ιδανικής θεωρίας Schottky.
- Καλύτερη συμφωνία για τις επαφές Cr/4H-SiC.
- Γενικά, οι τιμές Φ_b από μετρήσεις C-V ήταν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές από μετρήσεις I-V μέχρι και 0.25 eV και οφείλεται σε ανομοιογένειες των Φ_b .
- Για υψηλές τιμές Φ_b οι αντίστοιχες τιμές των ανάστροφων ρευμάτων κόρου ήταν χαμηλότερες.