



## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του Παπαφιλίππου Δημήτρη

Σπουδαστή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών

**«Ανάπτυξη λογισμικού για μετρήσεις δομών πυριτίου στα πλαίσια ανάπτυξης του ανιχνευτή τροχιών του πειράματος CMS-High luminosity-LHC»**

ΣΤΗΝ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΟΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΚΑΙ ΑΝΙΧΕΥΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:** Αλεξόπουλος Θεόδωρος, Καθηγητής, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ

**ΣΥΝΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:** Κυριάκης Αριστοτέλης, Ερευνητής Α, ΙΠΣΦ ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

### ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αλεξόπουλος Θεόδωρος, Καθηγητής, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ  
Κυριάκης Αριστοτέλης, Ερευνητής Α, ΙΠΣΦ ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ  
Λουκάς Δημήτρης Ερευνητής Α, ΙΠΣΦ ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ

[ΑΘΗΝΑ, Σεπτέμβριος 2023]

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Θεόδωρο Αλεξόπουλο για την εμπιστοσύνη που έδειξε αναθέτοντάς μου την εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Δημήτρη Λουκά για την δυνατότητα να διεκπεραιώσω την διπλωματική μου εργασία στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος».

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Άρη Κυριάκη για την καθοδήγηση του και την υποστήριξή του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

© (2022) Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. All rights Reserved. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

# Περιεχόμενα

<b>Πρόλογος</b> .....	<b>9</b>
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>: Εισαγωγή</b> .....	<b>10</b>
1.1 Ο Επιταχυντής Αδρονίων LHC .....	10
1.1.1 Λαμπρότητα.....	10
1.2 Πείραμα του CMS .....	10
1.2.1 Σύστημα Συντεταγμένων.....	11
1.3 Αναβάθμιση Ανιχνευτή Πυριτίου του CMS.....	11
1.3.1 Διάταξη Ανιχνευτή CMS.....	12
1.3.2 Μέτρηση της Ορμής με τον νέο Ανιχνευτή Τροχιών .....	12
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Φυσική Ημιαγωγών και Ημιαγωγίμων Διατάξεων</b> .....	<b>14</b>
2.1 Κρύσταλλος Πυριτίου και Διαγράμματα Ενεργειακών Ζωνών .....	14
2.2 Ενδογενείς Ημιαγωγοί.....	15
2.3 Φορείς Φορτίου εντός των Ημιαγωγών.....	16
2.4 Εξωγενείς Ημιαγωγοί .....	18
2.4.1 Ημιαγωγοί n-type .....	18
2.4.2 Ημιαγωγοί p-type .....	19
2.5 Κίνηση φορέων μέσα στους ημιαγωγούς.....	20
2.5.1 Ολίσθηση.....	20
2.5.2 Διάχυση .....	20
2.6 Επαφή p-n.....	21
2.6.1 Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση .....	23
2.6.2 Χωρητικότητα Περιοχής Απογύμνωσης .....	24
2.6.3 Διάσπαση σε Ανάστροφη Πόλωση .....	25
2.7 Δομές MOS (Metal-Oxide-Semiconductor).....	25
2.7.1 Πυκνωτής MOS.....	26
2.7.2 Χωρητικότητα πυκνωτή MOS.....	29
2.7.3 Τρανζίστορ MOSFET .....	32
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Ανιχνευτικές Διατάξεις Πυριτίου</b> .....	<b>36</b>
3.1 Αρχή Λειτουργίας Ανιχνευτών Πυριτίου Στην Φυσική Υψηλών Ενεργειών .....	36
3.1.1 Σύζευξη Σήματος.....	37
3.1.2 Συλλογή Σήματος Και Ανίχνευση Θέσης Σωματιδίου.....	38
3.1.3 Απομόνωση Ηλεκτροδίων n+.....	39
3.1.4 Σύστημα Πόλωσης Της Ανιχνευτικής Διάταξης .....	39

3.1.5 Προστασία Από Περιβαλλοντικές Συνθήκες .....	41
3.1.6 P-type Και Ανοχή Στις Ισχυρές Ακτινοβολίες (Radiation Hard) .....	41
3.2 Τεχνολογία Των Δισκίων Πυριτίου (wafers) .....	43
2.3.2 Ειδή Ανιχνευτικών Διατάξεων Ανιχνευτή Τροχιών .....	43
<b>Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup> : Διαδικασία Ποιοτικού Ελέγχου Δοκιμίων .....</b>	<b>45</b>
4.1 Halfmoons .....	45
4.2 Ηλεκτρονικές Δομές και Χαρακτηρισμός των Παραμέτρων τους .....	47
4.2.1 Δίοδος .....	47
4.3.1.1 Χαρακτηριστικά Διόδου .....	48
<b>Ρεύμα Διαρροής .....</b>	<b>48</b>
<b>Τάση Απογύμνωσης και Αντίσταση .....</b>	<b>48</b>
4.2.2 Πυκνωτής MOS .....	49
4.2.2.1 Χαρακτηριστικά Πυκνωτή MOS .....	50
<b>Τάση Επίπεδων Ζωνών .....</b>	<b>50</b>
4.2.3 Gate-Controlled-Diode (GCD) .....	51
4.2.3.1 Χαρακτηριστικά GCD .....	52
<b>Επιφανειακό Ρεύμα και Επιφανειακή Ταχύτητα Φορέων .....</b>	<b>52</b>
<b>Ρεύμα Γένεσης και Χρόνος Ζωής .....</b>	<b>54</b>
4.2.4 FET (Field-Effect-Transistor) .....	54
4.2.5 Πυκνωτές Σύζευξης (Coupling Capacitors) .....	56
4.2.6 Διάσπαση Διηλεκτρικού .....	57
4.2.7 Διατάξεις Van Der Pauw .....	57
<b>Αντίσταση Ταινίας (Sheet Resistance) .....</b>	<b>58</b>
<b>Πλάτος Λωρίδας (Linewidth) .....</b>	<b>59</b>
4.2.8 Δομή Μαιάνδρου (Meander Structures) .....	60
4.2.9 Αλυσίδες Επαφής (Contact Chains) .....	61
4.2.10 Διάταξη Σταυρού-Γέφυρας Kelvin (Cross Bridge Kelvin) .....	62
4.3 Συστήματα Εργαστηρίου .....	63
4.3.1 Σταθμός Μετρήσεων (Probe Station) .....	63
4.3.2 Κάρτα PCB (Probe Card) .....	63
4.3.3 Σύστημα Ηλεκτρομηχανικού Δρομολογητή (Switching Matrix) .....	64
4.3.4 Ηλεκτρόμετρο .....	66
4.3.5 LCR-meter .....	66
4.3.6 Λογισμικό Ελέγχου Των Μετρήσεων .....	66
4.4 Περιβαλλοντικές συνθήκες .....	67
<b>Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Ανάπτυξη Λογισμικού για τον Χαρακτηρισμό Ανιχνευτών Πυριτίου .....</b>	<b>68</b>

5.1 Λογισμικού Ανάλυσης Δεδομένων .....	68
5.1.1 Επιλογή Προγραμματιστικού Περιβάλλοντος.....	68
5.1.2 Παρουσίαση Λειτουργίας Λογισμικού.....	68
5.1.3 Περιγραφή του αρχείου Επικεφαλίδας Directory_List.h .....	69
5.1.4 Περιγραφή του αρχείου Επικεφαλίδας Data_Analysis.h .....	70
5.1.5 Κύριο Παράθυρο .....	70
5.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης.....	71
5.2.1 Πυκνωτές MOS .....	72
5.2.1.1 Χαρακτηριστικές CV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOS για Δοκίμια τύπου 2-S.....	72
5.2.1.2 Χαρακτηριστικές CV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOS για Δοκίμια τύπου PSS.....	74
5.2.1.3 Χαρακτηριστικές CV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOS για Δοκίμια τύπου PSP.....	75
5.2.2 Τρανζίστορ MOSFET .....	77
5.2.2.1 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOSFET για Δοκίμια τύπου 2-S.....	77
5.2.2.2 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOSFET για Δοκίμια τύπου PSS.....	78
5.2.2.3 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOSFET για Δοκίμια τύπου PSP.....	79
5.2.3 Δίοδοι τύπου p-n.....	80
5.2.3.1 Χαρακτηριστικές CV και Ιστογράμματα των Διατάξεων Διόδων για Δοκίμια τύπου 2-S.....	81
5.2.3.2 Χαρακτηριστικές CV και Ιστογράμματα των Διατάξεων Διόδων για Δοκίμια τύπου PSS.....	83
5.2.4 Διατάξεις GCD και GCD05.....	84
5.2.4.1 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων GCD για Δοκίμια τύπου 2-S.....	85
5.2.4.2 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων GCD για Δοκίμια τύπου PSS.....	86
5.2.4.3 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων GCD για Δοκίμια τύπου PSP.....	87
5.2.5 Πολυκρυσταλλική αντίσταση RPoly.....	88
5.2.5.1 Χαρακτηριστικές VI και Ιστογράμματα των Διατάξεων RPoly για Δοκίμια τύπου 2-S.....	89
5.2.5.2 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων RPoly για Δοκίμια τύπου PSS.....	90
5.2.6 Διατάξεις Van der Pauw (P-stop).....	90

5.2.6.1 Χαρακτηριστικές V-I και Ιστογράμματα των Διατάξεων VdPStop για Δοκίμια τύπου 2-S .....	91
5.2.6.2 Χαρακτηριστικές V-I και Ιστογράμματα των Διατάξεων VdPStop για Δοκίμια τύπου PSS.....	92
5.2.6.3 Χαρακτηριστικές V-I και Ιστογράμματα των Διατάξεων VdPStop για Δοκίμια τύπου PSP.....	93
5.3 Συμπεράσματα Ανάλυσης με την Χρήση Λογισμικού.....	93
<b>Κεφάλαιο 6° : Σύνοψη.....</b>	<b>95</b>
6.1 Ποιοτικός Έλεγχος Διατάξεων Πυριτίου .....	95
<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>97</b>





# Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής (ΙΠΣΦ) του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Η θεματολογία της αφορά την ανάπτυξη λογισμικού για τον χαρακτηρισμό ανιχνευτών πυριτίου στα πλαίσια της αναβάθμισης του πειράματος CMS/LHC. Στην δεύτερη φάση του πειράματος στον επιταχυντή Αδρονίων αναμένονται υψηλές δόσης ακτινοβολίας γεγονός που καθιστά αναγκαία την αναβάθμιση των υπάρχοντων ανιχνευτικών συστημάτων [1]. Οι νέοι αισθητήρες πυριτίου με γεωμετρία μικρο-λωρίδων αναμένεται να έχουν μεγαλύτερη ανοχή στη αναμενόμενη υψηλή δόση ακτινοβολίας. Η φάση παραγωγής τους έχει ξεκινήσει από την *Hamamatsu Photonics K.K.*. Στα πλαίσια της αναβάθμισης πολλά ινστιτούτα σε συνεργασία με το CERN έχουν αναλάβει τον ρόλο του ποιοτικού ελέγχου των νέων ανιχνευτών συμπεριλαμβανομένου και του ΙΠΣΦ του ΕΚΕΦΕ «Δημόκριτος». Σε αυτή την διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό για την ανάλυση των δεδομένων που λαμβάνονταν από το εργαστήριο. Κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις από δοκίμια με διατάξεις ημιαγωγών στο εργαστήριο με σκοπό την συλλογή δεδομένων. Οι που μελετώνται δομές σχετίζονται άμεσα με τους ανιχνευτές καθώς ανατηχθήκαν στο ίδιο δισκίο με του ανιχνευτές. Το λογισμικό ανάλυσης που αναπτύχθηκε αποτελείται από ένα γραφικό περιβάλλον στο οποίο εισάγονται τα δεδομένα των μετρήσεων και πραγματοποιείται ο χαρακτηρισμός των διατάξεων και η εξαγωγή των παραμέτρων για τον ποιοτικό έλεγχο. Σε αυτή την εργασία παρουσιάζονται ενδεικτικά για κάθε τύπο ανιχνευτών οι κυριότερες μετρούμενες παράμετροι για να δοθεί μια εικόνα της διαδικασίας του ποιοτικού ελέγχου των ανιχνευτών.

Στο 1<sup>ο</sup> κεφάλαιο γίνεται μια περιγραφή του επιταχυντή αδρονίων LHC και του πειράματος CMS. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο επισημάνονται βασικές αρχές της φυσικής ημιαγωγών και περιγράφονται οι βασικές ημιαγωγίμες διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν στον χαρακτηρισμό των αισθητήρων πυριτίου. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο περιγράφεται η αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών καθώς και η συμπεριφορά όταν δεχτούν υψηλές δόσεις ακτινοβολίας. Στο κεφάλαιο 4 αναλύονται οι μεθοδολογίες, οι παράμετροι που εξάγονται και τα συστήματα του εργαστηρίου. Στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρουσιάζονται το λογισμικό ανάλυσης και μερικά από τα αποτελέσματα της ανάλυσης των μετρήσεων. Τέλος ακολουθεί η σύνοψη και τα συμπεράσματα του ποιοτικού ελέγχου.

# Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>

## Εισαγωγή

### 1.1 Ο Επιταχυντής Αδρονίων LHC

Ο επιταχυντής Αδρονίων LHC (Large Hadron Collider) είναι ο μεγαλύτερος επιταχυντής που έχει κατασκευαστεί μέχρι στιγμής. Αποτελείται από δύο δακτυλίους που περιέχουν υπεραγωγίμους μαγνήτες και επιταχυντικές διατάξεις που βρίσκονται σε ένα τούνελ 27 Km. Ο σχεδιασμός του επιτρέπει τις συγκρούσεις ιόντων με ταυτόσημο φορτίο και βαριών ιόντων. Ο LHC ξεκίνησε να λειτουργεί στα τέλη του 2009 επιτυγχάνοντας τις πρώτες συγκρούσεις δεσμών πρωτονίων (p-p) με ενέργεια δέσμης στα 450 GeV. Ο επιταχυντής σχεδιαστικέ να φτάνει σε ενέργειές 14 TeV στο κέντρο μάζας των συγκρούσεων [2]. Κατά μήκος του LHC εκτελούνται διάφορα πειράματα όπως το ATLAS, ALICE, CMS και LHCb. Ο στόχος του LHC είναι να απαντηθούν θεμελιώδη ερωτήματα στον χώρο της φυσικής υψηλών ενεργειών γύρω από το καθιερωμένο πρότυπο καθώς και πέρα από αυτο. Το 2012 με επιτυχία ανιχνεύθηκε το μποζόνιο *Higgs* στους ανιχνευτές ATLAS και CMS επιβεβαιώνοντας τον μηχανισμό *Higgs* και κλείνοντας έτσι το τελευταίο αναπάντητο ερώτημα σχετικά με το καθιερωμένο πρότυπο [3] [4].

#### 1.1.1 Λαμπρότητα

Στην πειραματική φυσική για να διεισδύσουμε βαθύτερα μέσα στα άτομα χρειάζονται συγκρουόμενες δέσμες σωματιδίων με ενέργειες στο κέντρο μάζας των κρούσεων της τάξεως των TeV. Κατά την κρούση των δεσμών πραγματοποιούνται πολλαπλές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων οι οποίες ονομάζονται γεγονότα. Η παράμετρος που σχετίζεται με τον αριθμό γεγονότων ανά δευτερόλεπτο που παράγονται κατά τις αλληλεπιδράσεις ονομάζεται λαμπρότητα  $L$  και εξάγεται από την παρακάτω σχέση,

$$\frac{dR}{dt} = L \cdot \sigma_{event}. \quad (1.1)$$

Όπου  $R$  ο αριθμός γεγονότων,  $\sigma_{event}$  η ενεργός διατομή και  $L$  η λαμπρότητα με μονάδες μέτρησης  $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ .

Η λαμπρότητα δίνεται από,

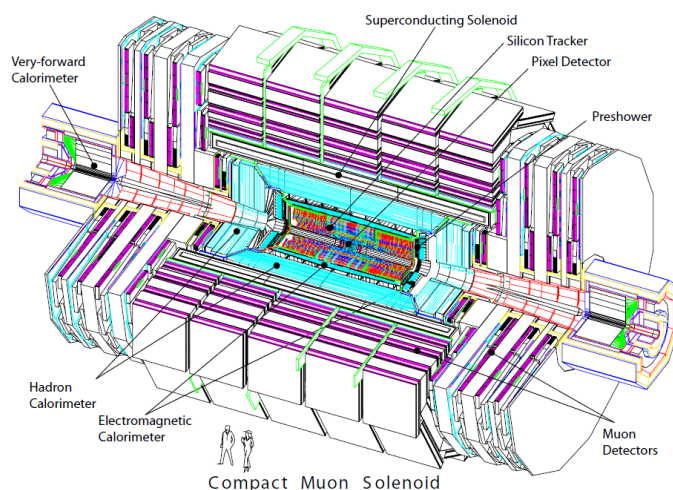
$$L = \frac{N_1 N_2 f N_b}{4\pi \sigma_x \sigma_y} \quad (1.2)$$

Όπου  $N_1$  και  $N_2$  ο αριθμός των σωματιδίων ανά δέσμη  $f$  η συχνότητα περιστροφής  $N_b$  ο αριθμός των δεσμών και  $\sigma_x, \sigma_y$  οι απόκλισης των δεσμών στους άξονες  $x$  και  $y$  [5].

### 1.2 Πείραμα του CMS

Ο CMS είναι ένας από τους μεγάλους ανιχνευτές του LHC, αποτελείται από ένα κύλινδρο με πολλαπλές στρώσεις με ανιχνευτικά συστήματα. Κάθε στρώση εξυπηρετεί διαφορετικούς σκοπούς. Βασικό χαρακτηριστικό του ανιχνευτή είναι το υπεραγωγίμο

μαγνητικό σωληνοειδές που βρίσκεται γύρω από το σημείο της κρούσης δημιουργώντας μαγνητικό πεδίο κοντά στα 4 Tesla. Στο εσωτερικό του στεγάζεται ο τροχιοδεικτικός ανιχνευτής πυριτίου (Silicon Tracker) και το εσωτερικό ηλεκτρομαγνητικό θερμιδόμετρο με κρυστάλλους σπινθηρισμού και το αδρονικό θερμιδόμετρο ενώ στις εξωτερικές στρώσεις είναι τοποθετημένοι οι ανιχνευτές μονίων (Εικόνα 1.1) [6].



**Εικόνα 1.1:** Προοπτική απεικόνιση του ανιχνευτή CMS [6].

### 1.2.1 Σύστημα Συντεταγμένων

Το σύστημα συντεταγμένων που χρησιμοποιείται έχει ως σημείο αναφοράς το σημείο της κρούσης. Οι άξονες που εφαρμόζονται είναι ο  $y$ -άξονας που δείχνει κάθετα προς τα πάνω, ο  $x$ -άξονας ακτινικά προς το κέντρο και ο  $z$ -άξονας κατά μήκος της δέσμης. Μέσω των συντεταγμένων μπορεί να προσδιοριστεί η ψευδωκύτητα (pseudorapidity)  $\eta$  [6].

Η ψευδωκύτητα δίνεται από την σχέση,

$$\eta = \ln \left( \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (1.3)$$

Το παραπάνω μέγεθος περιγράφει την γωνία  $\theta$  ενός σωματιδίου σε σχέση με τον  $y$ -άξονα.

## 1.3 Αναβάθμιση Ανιχνευτή Πυριτίου του CMS

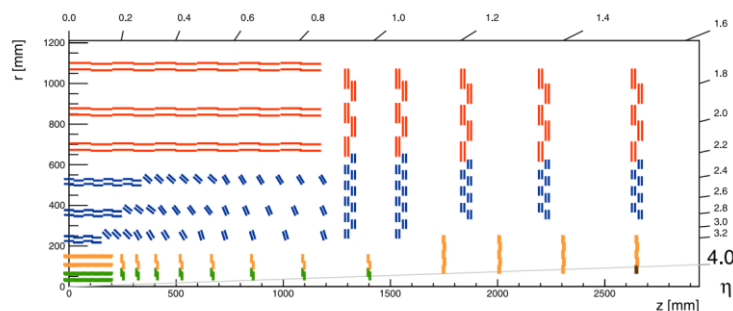
Στην δεύτερη φάση της αναβάθμισης του ανιχνευτή του CMS η στιγμιαία λαμπρότητα αναμένεται να φτάνει τα  $10^{35} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ , ο νέος επιταχυντής αναφέρεται ως High Luminosity LHC (HL-LHC). Για κάθε συγκρουόμενη δέσμη θα πραγματοποιούνται 140-200 συγκρούσεις πρωτονίων [7]. Όλες οι ανιχνευτικές διατάξεις βρίσκονται σε εύρος ψευδωκύτητας  $|\eta| < 4.0$ . Όλοι οι ανιχνευτές πυριτίου θα έχουν αντικατασταθεί μέχρι το 2025 (τέλος του run 3) για να ανταπεξέλθουν στην μεγάλες δόσεις ακτινοβολία [8].

### 1.3.1 Διάταξη Ανιχνευτή CMS

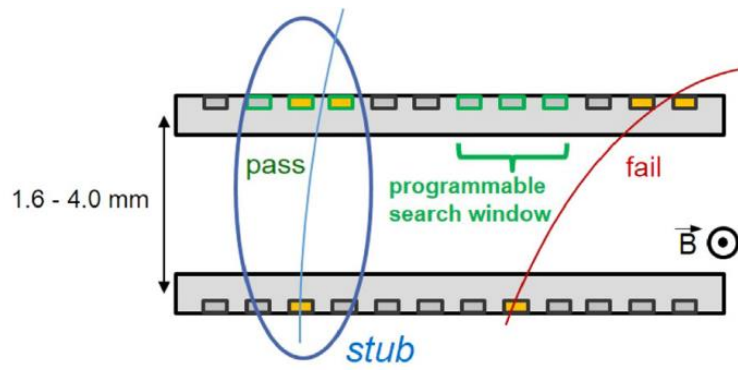
Ο ανιχνευτής CMS αποτελείται από δύο μέρη, έναν κύλινδρο με ομόκεντρες κυλινδρικές επιφάνειες στο εσωτερικό του και στα άκρα του επίπεδους δίσκους. Σε κάθε μια από αυτές τις επιφάνειες τοποθετούνται οι ανιχνευτικές διατάξεις. Ο κύριος ανιχνευτής χωρίζεται σε δύο περιοχές τον εξωτερικό ανιχνευτή (Outer Tracker) και τον εσωτερικό (Inner Tracker). Οι μικρο-ανιχνευτές που τοποθετούνται στον εσωτερικό ανιχνευτή απαρτίζονται από μικρο-ψηφίδες (PSP) και απεικονίζουν στις τρεις διαστάσεις την θέση του σωματιδίου, αφού κοντά στο σημείο της κρούσης απαιτείται μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα. Στον εξωτερικό ανιχνευτή οι μικρο-ανιχνευτές αποτελούνται από μικρο-λωρίδες (2-S και PSS) [7]. Οι τρεις τύποι αισθητήρων περιγράφονται στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του ανιχνευτή συσσωρεύεται μεγάλος όγκος δεδομένων στα συστήματα αποθήκευσης πολλά από τα οποία είναι ακατάλληλα. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος εφαρμόζονται δύο συστήματα απόφασης δεδομένων με τις ονομασίες Level 1 (L1) και High-Level Trigger (HLT). Ο L1 θα εμπεριέχει τον νέο ανιχνευτή τροχιών και θα απορρίπτει γεγονότα που θα έχουν τροχιές με ορμή μικρότερη των 2 GeV/c [9]. Ο HLT εκτελεί μια απλοποιημένη ανακατασκευή αυτών των γεγονότων και αποφασίζει ποια θα αποθηκευτούν στο δίσκο για ανάλυση.

### 1.3.2 Μέτρηση της Ορμής με τον νέο Ανιχνευτή Τροχιών

Ο νέος ανιχνευτής τροχιών έχει την δυνατότητα να μετράει την ορμή των σωματιδίων πολύ πιο γρήγορα από τον υπάρχοντα για αυτό και θα συμμετέχει στο επίπεδο λήψης αποφάσεων πρώτου επιπέδου L1. Η τεχνική που χρησιμοποιείται αποτελείται από δύο παράλληλους ανιχνευτές πυριτίου που απέχουν μεταξύ τους μερικά χιλιοστά (1.8-4mm). Κατά την διέλευση των φορτισμένων σωματιδίων παράγεται σήμα στους πάνω και κάτω ανιχνευτές. Όταν το σήμα σε μια μικρολωρίδα του κάτω ανιχνευτή ταιριάζει μέσα σε ένα προκαθορισμένο παράθυρο αριθμού μικρολωρίδων του πάνω ανιχνευτή τότε η μέτρηση γίνεται δεκτή (Εικόνα 1.2) και παράγεται ένα στίγμα τροχιάς (stub). Η σύνδεση πολλών stubs μας δίνει την τροχία η οποία μας δίνει την τροχιά για φορτισμένα σωματίδια με ορμή μεγαλύτερη των 2 GeV/c. Με αυτή την τεχνική είναι δυνατή η χρήση δυνατή η χρήση του ανιχνευτή τροχιών στο πρώτο επίπεδο απόφασης L1[7].



**Εικόνα 1.2:** Διάταξη του ανιχνευτή τροχιών του CMS μετά την αναβάθμιση που προβλέπεται για την φάση υψηλής λαμπρότητας του πειράματος (HL-LHC). Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται η ακτινική απόσταση  $r$  από το κέντρο του ανιχνευτή σε σχέση με την απόσταση του πλάτους του κυλίνδρου  $z$  ( $r$ - $z$ ) καθώς και η ψευδοκλίση  $|\eta| < 4.0$ . Στις ακτινικές αποστάσεις 0-200 mm που αντιστοιχεί στον εσωτερικό ανιχνευτή τροχιών τοποθετούνται οι ανιχνευτές μικρο-ψηφίδων (PSP). Στις ακτινικές αποστάσεις 200-1200 mm θα τοποθετηθεί ο εξωτερικός ανιχνευτής όπου σε απόσταση 200-600 mm τοποθετούνται οι ανιχνευτές μακρο-ψηφίδων (PSS) με μπλε χρώμα και από 600-1200 mm οι ανιχνευτές μικρο-λωρίδων (2-S) με κόκκινο χρώμα. Αντίστοιχα ισχύει κατά τον άξονα  $z$  [7].



**Εικόνα 1.3:** Περιγραφή της τεχνικής μέτρησης της ορμής για χρήση του ανιχνευτή τροχιών στο πρώτο επίπεδο λήψης απόφασης L1. Όταν η το φορτισμένο σωματίδιο περάσει μέσα από το παράθυρο ανίχνευσης του πάνω ανιχνευτή τότε έχει αποδεκτή τιμή ορμής  $< 2 \text{ GeV}/c$  από το σύστημα λήψης L1 [7].

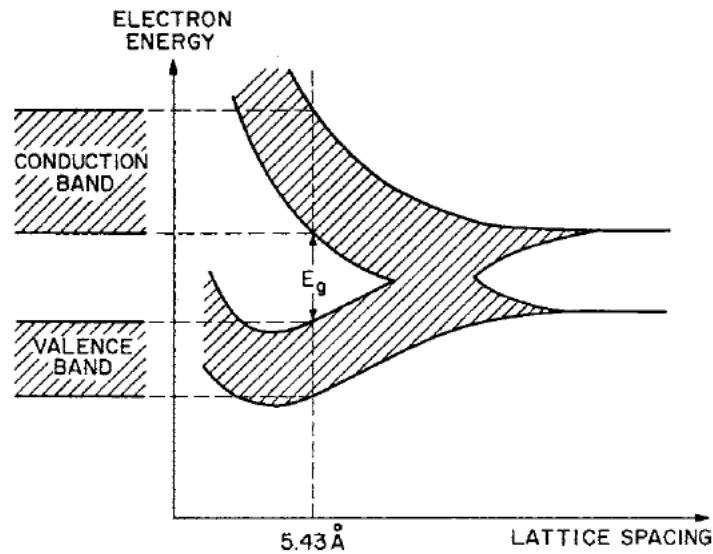
# Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>

## Φυσική Ημιαγωγών και Ημιαγωγίων Διατάξεων

Στον παρόν κεφάλαιο γίνεται μια αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο πίσω από την θεωρία των ημιαγωγών και γενικότερα των ημιαγωγίων διατάξεων. Αρχικά, γίνεται αναφορά στο στοιχείο και τις ιδιότητες του πυριτίου (Si) που αποτελεί το βασικό στοιχείο στις ανιχνευτικές διατάξεις. Στη συνέχεια αναλύονται σε βάθος οι βασικές ιδιότητες των ενδογενών και εξωγενών ημιαγωγών (p-type και n-type). Τέλος, γίνεται αναφορά και ανάλυση στις κυριότερες ημιαγωγίες διατάξεις των ανιχνευτών πυριτίου, Δίοδος p-n, Πυκνωτής MOS και τρανζίστορ MOSFET.

### 2.1 Κρύσταλλος Πυριτίου και Διαγράμματα Ενεργειακών Ζωνών

Η ηλεκτρονιακή διάταξη ενός απομονωμένου ατόμου του πυριτίου είναι  $[\text{Ne}]3s^2p^2$ . Το άτομο πυριτίου έχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους τα οποία όταν αλληλεπιδρούν με άλλα άτομα, δημιουργούν τέσσερα τροχιακά το  $\Psi(3s)$ ,  $\Psi(3p_x)$ ,  $\Psi(3p_y)$  και  $\Psi(3p_z)$  τα οποία όταν συνδυαστούν μεταξύ τους δημιουργούν τέσσερα υβριδικά τροχιακά που το καθένα τους διαθέτει από ένα ηλεκτρόνιο σθένους. Μεταξύ των γειτονικών ατόμων πυριτίου γίνεται επικάλυψη των υβριδικών τροχιακών τους με αποτέλεσμα τον σχηματισμό δύο μοριακών τροχιακών όπου το πρώτο ονομάζεται δεσμικό τροχιακό  $\Psi_A$  και το δεύτερο ονομάζεται αντιδεσμικό τροχιακό  $\Psi_A$  με ενέργειες  $E_A$  και  $E_A$  αντίστοιχα. Εν ολίγοις, δημιουργείται ένας κρύσταλλος πυριτίου όπου κάθε άτομο πυριτίου συνδέεται με άλλα τέσσερα άτομα πυριτίου, δημιουργώντας έτσι ένα τρισδιάστατο πλέγμα. Λόγω των δεσμών μεταξύ των ηλεκτρονίων που σχηματίζονται εντός του πλαισίου του κρυσταλλικού πλέγματος, δημιουργούνται ενεργειακές ζώνες. Οι παραπάνω επικαλύψεις των τροχιακών  $\Psi_A$  που είναι κατειλημμένες με δύο ηλεκτρόνια αντιπαράλληλου spin δημιουργούν την ενεργειακή ζώνη σθένους και στη συνέχεια οι επικαλύψεις των τροχιακών  $\Psi_A$  οι οποίες είναι κενές δημιουργούν τη ζώνη αγωγιμότητας. Το κενό ανάμεσα στη ζώνη σθένους και τη ζώνη αγωγιμότητας ονομάζεται ενεργειακό κενό  $E_g$  ή απαγορευμένη περιοχή επειδή δεν λαμβάνουν χώρα ηλεκτρονικές καταστάσεις. Επιπλέον η μέγιστη ενέργεια της ζώνης σθένους (Valance Band) συμβολίζεται με  $E_v$  καθώς η ελάχιστη ενέργεια της ζώνης Αγωγιμότητας (Conductive Band) με  $E_c$  [10].



Εικόνα 2.1: Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών πυριτίου [11].

## 2.2 Ενδογενείς Ημιαγωγοί

Ενδογενής ημιαγωγός είναι ένας ιδανικός κρύσταλλος χωρίς προσμίξεις ή κρυσταλλικές ατέλειες όπως για παράδειγμα εξαθρώσεις ή συνοριακές διαταραχές μεταξύ των κόκκων. Γίνεται η υπόθεση ότι ο κρύσταλλος αποτελείται από άτομα Si με δομή σε τέλεια διάταξη, παρόμοια με αυτή του διαμαντιού. Σε θερμοκρασίες αρκετά κοντά στο απόλυτο μηδέν η ζώνη σθένους είναι πλήρως κατειλημμένη. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από το απόλυτο μηδέν το κρυσταλλικό πλέγμα αρχίζει να ταλαντώνεται και δημιουργείται μια κατανομή ενέργειας. Είναι γνωστό ότι η μέση ενέργεια ταλάντωσης είναι  $\langle E \rangle = 3kT$  η οποία καθιστά εξαιρετικά δύσκολο να σπάσουν οι δεσμοί Si-Si. Παρόλα αυτά, σε ορισμένες περιοχές του κρυστάλλου ο δεσμός αυτός ενδέχεται να σπάσει με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου που θα έχει μεταβεί από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας και θα περιφέρεται εντός του κρυστάλλου. Το κενό που αφήνει το ηλεκτρόνιο ονομάζεται **οπή**. Το εν λόγω κενό είναι πιθανό θα καταλειφθεί από ένα άλλο ηλεκτρόνιο ενός γειτονικού ατόμου. Η κατάληψη της οπής οφείλεται στο φαινόμενο σήραγγας και έτσι προκαλείται η μετατόπιση της. Πρέπει να επισημανθεί ότι τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη σθένους δεν είναι εντοπισμένα στην ατομική περιοχή που είναι ο δεσμός τους, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η κυματοσυνάρτηση του ηλεκτρονίου εκτείνεται σε όλο το μήκος του κρυστάλλου με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια να μπορούν να μεταφερθούν από έναν δεσμό σε έναν άλλον.

Η μετάβαση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας γίνεται μέσω δύο κύριων μηχανισμών. Ο πρώτος είναι λόγω απορρόφησης ενός φωτονίου ενέργειας  $h\nu$  που είναι μεγαλύτερη από το ενεργειακό κενό. Ο δεύτερος τρόπος είναι αποτέλεσμα πλεγματικών ταλαντώσεων (ταλαντώσεις φωνονίων) και ονομάζεται θερμική διέγερση [10].

## 2.3 Φορείς Φορτίου εντός των Ημιαγωγών

Όταν το ηλεκτρόνιο μεταβεί στη ζώνη αγωγιμότητας αυτομάτως δημιουργείται μια οπή στη ζώνη σθένους. Λόγω της απουσίας του ηλεκτρονίου, στην περιοχή γύρω από την οπή δημιουργείται θετικό φορτίο. Στην ουσία η οπή συμπεριφέρεται ως ελεύθερο σωματίδιο μέσα στον κρύσταλλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα άλλο ηλεκτρόνιο ενός γειτονικού ατόμου να μεταφερθεί στην θέση της οπής δημιουργώντας με τη σειρά του μια νέα οπή στην αρχική του θέση. Με την διαδικασία αυτή η οπή μετατοπίζεται σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του ηλεκτρονίου ανεξάρτητα από αυτό. Υπό την παρουσία ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια αρχίζουν να κατευθύνονται σε αντίθετη διεύθυνση από αυτό, συνεπώς δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα. Αντίστοιχη συμπεριφορά έχουν και οι οπές με διαφορά ότι η κατεύθυνση τους είναι στην ίδια διεύθυνση με αυτή του πεδίου. Επομένως, συμπεραίνεται ότι οι οπές και τα ηλεκτρόνια αποτελούν τους φορείς φορτίου στο εσωτερικό των ημιαγωγών [10]. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι κατά την κίνηση των ηλεκτρονίων και των οπών μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα ασκούνται διάφορες δυνάμεις. Οι αλληλεπιδράσεις αυτές συμπεριλαμβάνονται μέσα στον όρο της ενεργού μάζας  $m^*$  έτσι ώστε να ισχύει  $F = m^* \cdot a$ .

Η συγκέντρωση των ελεύθερων φορέων φορτίου μπορεί να εκτιμηθεί από την χρήση της κατανομής Fermi-Dirac η οποία δίνει την πιθανότητα κατάληψης μιας ηλεκτρονιακής κατάστασης.

Κατανομή Fermi-Dirac:

$$F(E, T) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)} \quad (2.1)$$

Όπου  $E_F$  η ενέργεια Fermi για την οποία η πιθανότητα για  $E = E_F$  είναι  $F(E_F, T) = 1/2$ ,  $k$  η σταθερά Boltzmann και  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία σε Kelvin. Η ενέργεια Fermi βρίσκεται στο κέντρο του ενεργειακού κενού  $E_g$  και θεωρείται ότι ισαπέχει από τις  $E_C$  και την  $E_V$ . Επειδή το ενεργειακό κενό δεν περιέχει ηλεκτρονικές καταστάσεις μπορεί να γίνει η παραδοχή ότι  $E - E_F \gg kT$  με αποτέλεσμα να γίνεται χρήση της στατιστικής Boltzmann [10]. Η κατανομή Fermi-Dirac για τα ηλεκτρόνια δίνεται από,

$$F_n(E, T) = F(E, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}.$$

Η κατανομή Fermi-Dirac για τις οπές θα είναι η πιθανότητα μια κατάσταση να μην είναι κατειλημμένη, οπότε η πιθανότητα υπολογίζεται ως  $1 - F(E, T)$ . Όπου η  $F(E, T)$  δίνεται από την σχέση 2.1, η αντίστοιχη παραδοχή σε αυτή την περίπτωση είναι ότι  $E - E_F \ll kT$ . [10] Η κατανομή Fermi-Dirac για τις οπές δίνεται από

$$F_p(E, T) = 1 - F(E, T) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E_F - E}{kT}\right)}.$$

Ο αριθμός των καταστάσεων  $N(E)$  για κάποια ενέργεια  $E$  δίνεται από την σχέση,

$$N(E) \cdot dE = 4\pi \cdot \left(\frac{2m^*}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} E^{\frac{1}{2}} dE.$$

Όπου  $m^*$  η ενεργός μάζα του ηλεκτρονίου (ή της οπής),  $h$  η σταθερά του Planck και  $E$  κάποια ενέργεια της αντίστοιχης ενεργειακής ζώνης.



Ολοκληρώνοντας την προηγούμενη σχέση σε κάθε ενεργειακή ζώνη μπορεί να υπολογιστεί η συγκέντρωση των αντίστοιχων φορέων φορτίου. Αρχικά θα υπολογιστεί η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων  $n$ ,

$$n = \int_{E_C}^{\infty} N(E) \cdot F_n(E, T) dE .$$

Αντίστοιχα η συγκέντρωση των οπών  $p$ ,

$$p = \int_0^{E_V} N(E) \cdot F_p(E, T) dE .$$

Οι παραπάνω ολοκληρώσεις καταλήγουν στις αντίστοιχες σχέσεις,

$$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) \quad (2.2a)$$

$$\text{όπου, } N_C = 2 \left(\frac{2\pi m_n kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} .$$

$$p = N_V \exp\left(-\frac{E_F - E_V}{kT}\right) \quad (2.2b)$$

$$\text{όπου, } N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} .$$

Τα  $N_C$  και  $N_V$  ονομάζονται ενεργές πυκνότητες καταστάσεων στις άκρες της ζώνης αγωγιμότητας και ζώνης σθένους αντίστοιχα. Τυπικές τιμές τους είναι  $N_C = 2.8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$  και  $N_V = 1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$  αντίστοιχα. Το γινόμενο της συγκέντρωσης των οπών και των ηλεκτρονίων δίνεται από,

$$n \cdot p = N_C \cdot N_V \exp\left(-\frac{E_C - E_V}{kT}\right) \quad \text{Όπου } E_g = E_C - E_V \text{ το ενεργειακό κενό [11].}$$

Το παραπάνω γινόμενο είναι ανεξάρτητο του ενεργειακού επιπέδου Fermi. Στην περίπτωση των ενδογενών ημιαγωγών οι συγκεντρώσεις των ηλεκτρονίων και των οπών είναι ίσες,  $n=p=n_i$ . Το  $n_i$  ονομάζεται ενδογενής συγκέντρωση (intrinsic concentration) καθώς και το ενεργειακό επίπεδο Fermi το οποίο βρίσκεται στο κέντρο του ενεργειακού κενού ονομάζεται ενδογενές επίπεδο Fermi (intrinsic Fermi level).

Το γινόμενο των ηλεκτρονίων  $n$  και οπών  $p$  θα ισούται,

$$n \cdot p = n_i^2 = N_C \cdot N_V \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right) \quad (2.3)$$

Η σχέση 2.3 ονομάζεται νόμος δράσης μαζών.

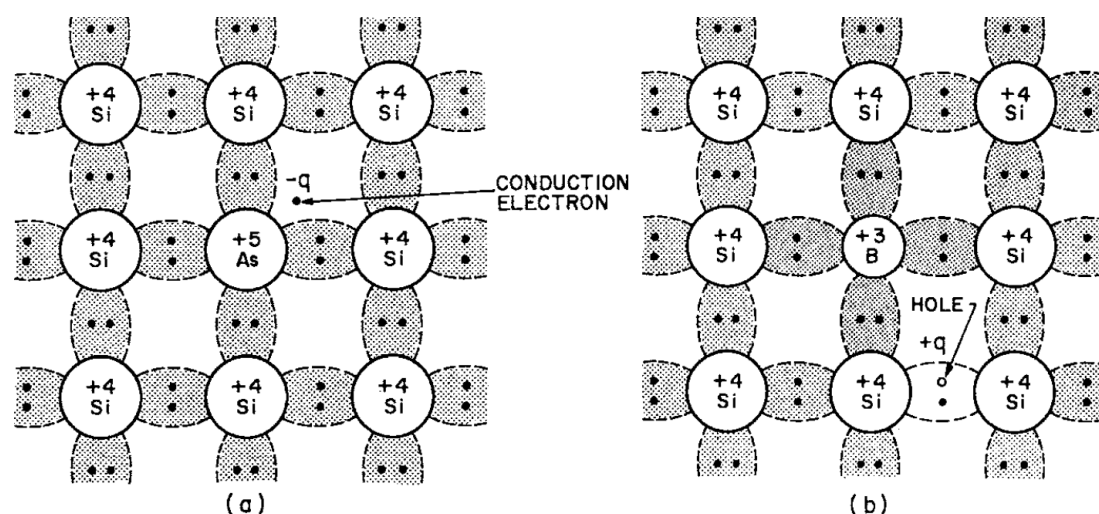
Το ενδογενές επίπεδο Fermi θα ισούται με,

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3kT}{4} \ln\left(\frac{m_p}{m_n}\right) \quad \text{ή } E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3kT}{4} \ln\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \quad (2.4)$$

Οι ενεργές συγκεντρώσεις εξαρτώνται από τις μάζες των φορέων φορτίου όπως φαίνεται από τις σχέσεις 2.2a και 2.2b. Ο δεύτερος όρος του δεξιού μέλους, για την περίπτωση ενδογενών ημιαγωγών θα είναι μηδέν. Αυτό οφείλεται στον νόμο δράσης μαζών (σχέση 2.3) [10].

## 2.4 Εξωγενείς Ημιαγωγοί

Εξωγενείς ημιαγωγοί (ή ημιαγωγοί προσμίξεων) δημιουργούνται με την πρόσμιξη στοιχείων σε ένα καθαρό ημιαγώγιμο κρύσταλλο με σκοπό την αύξηση της συγκέντρωσης φορέων φορτίου. Η διαδικασία αυτή επιτρέπει την δημιουργία δύο τύπων ημιαγωγού, των n-τύπου (n-type) και p-τύπου (p-type). Ο πρώτος τύπος (n-type) οφείλεται σε προσμίξεις ατόμων που διαθέτουν περισσότερα ηλεκτρόνια σθένους σε σχέση με αυτά του κρυστάλλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των ηλεκτρονίων στην ζώνη αγωγιμότητας. Ο δεύτερος τύπος ημιαγωγού (p-type) προκύπτει από προσμίξεις ατόμων περιέχουν λιγότερα ηλεκτρόνια σθένους με αποτέλεσμα την αύξηση των οπών στην ζώνη σθένους [12].



**Εικόνα 2.2:** (εικόνα a) Ημιαγωγός τύπου n με προσμίξεις ατόμων αρσενικού (As). (εικόνα b) ημιαγωγός τύπου p με προσμίξεις ατόμων βορίου (B) [12].

### 2.4.1 Ημιαγωγοί n-type

Οι προσμίξεις που γίνονται σε έναν ημιαγωγό τύπου n ονομάζονται δότες (Donors) και το ενεργειακό τους επίπεδο θα βρίσκεται εντός του ενεργειακού κενού. Επειδή τα ηλεκτρόνια σθένους δημιουργούν δεσμούς με τα γειτονικά άτομα του κρυστάλλου, θα υπάρχει ένα ηλεκτρόνιο που παραμένει αδέσμευτο. Εξαιτίας του προηγούμενου η συμπεριφορά των δοτών είναι παρόμοια με αυτή του ατόμου του υδρογόνου. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα η ενέργεια ιονισμού να βρίσκεται κοντά στην ζώνη αγωγιμότητας.

Η ενέργεια δεσμού του ατόμου του υδρογόνου δίνεται από την παρακάτω σχέση,

$$E_H = \frac{m_0 q^4}{32\pi^2 \epsilon_0 \hbar^2} = 13.6eV.$$

Όπου  $q$ ,  $m_0$  το φορτίο και η μάζα του ηλεκτρονίου,  $\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του κενού και  $\hbar$  η ανηγμένη σταθερά του Planck.

Αντικαθιστώντας την μάζα με την ενεργό μάζα  $m^*$  του ηλεκτρονίου μέσα στο πλέγμα και την διηλεκτρική σταθερά του κενού με  $\epsilon_s$  (η οποία είναι η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού), η ενέργεια ιονισμού των δοτών γίνεται,

$$E_D = \frac{m^* q^4}{32\pi^2 \epsilon_s \hbar^2} = 0.032 \text{ eV}.$$

Η διαφορά  $E_C - E_D$  για το πυρίτιο είναι της τάξης μερικών eV, όπου  $E_D$  το ενεργειακό επίπεδο του δότη και  $E_C$  το επίπεδο της ζώνης αγωγιμότητας. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στους δότες χρειάζονται πολύ μικρή ενέργεια για να απελευθερωθεί κάποιο ηλεκτρόνιο στην ζώνη αγωγιμότητας, η θερμική ταλάντωση σε θερμοκρασία δωματίου είναι αρκετή ώστε να επιτευχθεί ιονισμός [10].

$$E_C - E_D = \left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_s}\right) \cdot \left(\frac{m^*}{m_0}\right) E_H.$$

Στους n-type ημιαγωγούς η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη από τις οπές, κατά συνέπεια το επίπεδο Fermi δεν βρίσκεται στο κέντρο της απαγορευμένης ζώνης όπως φαίνεται από την σχέση 2.4 (για ενδογενείς ημιαγωγούς), αλλά κοντά στην  $E_C$  [12].

#### 2.4.2 Ημιαγωγοί p-type

Οι προσμίξεις τύπου p ονομάζονται αποδέκτες (Acceptors). Το ενεργειακό επίπεδο των αποδεκτών βρίσκεται και αυτό μέσα στην απαγορευμένη ζώνη του ημιαγωγού. Η διαφορά τους με τους n-type είναι ότι το ενεργειακό επίπεδο των αποδεκτών είναι κοντά στην ζώνη σθένους έτσι ώστε η διαφορά  $E_A - E_V$  να είναι της τάξεως μερικών eV. Αυτό διευκολύνει την διέγερση των ηλεκτρονίων από την ζώνη σθένους στο επίπεδο  $E_A$  έτσι ώστε να δημιουργείται μεγαλύτερη συγκέντρωση οπών.

Το επίπεδο Fermi βρίσκεται κοντά στην  $E_V$  όπως μπορεί να παρατηρηθεί από την 2.4.

Οι διαφορά των ενεργειακών ζωνών με την ενέργεια Fermi για υψηλές συγκεντρώσεις προσμίξεων δίνεται από τις ακόλουθες σχέσεις,

$$E_C - E_F = kT \ln \left(\frac{N_C}{N_D}\right) \quad (2.5)$$

και,

$$E_F - E_V = kT \ln \left(\frac{N_V}{N_A}\right).$$

Οι παραπάνω σχέσεις εξάγονται από τις 2.2 όπου  $n = N_D$  και  $p = N_A$  [12]. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι συγκέντρωσης των προσμίξεων παρουσιάζουν μεγάλη θερμοκρασιακή εξάρτηση [10].

Επιπλέον οι σχέσεις 2.2 λαμβάνοντας ως επίπεδο αναφοράς το ενδογενές επίπεδο Fermi ( $E_i$ ) μπορούν να γραφτούν,

$$n = n_i \exp \left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right) \quad (2.6)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right) [12].$$

## 2.5 Κίνηση φορέων μέσα στους ημιαγωγούς

Στο εσωτερικό των ημιαγωγών υπάρχει ηλεκτρική ουδετερότητα όταν βρίσκονται σε θερμική ισορροπία  $n \cdot p = n_i^2$ . Όταν εφαρμοστεί κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο τότε οι φορείς φορτίου κινούνται σύμφωνα με αυτό. Η κίνηση λόγω της εφαρμογής του ηλεκτρικού πεδίου ονομάζεται ολίσθηση (Drift). Επιπλέον, όταν η κατανομή των φορέων είναι ανομοιογενής τότε υπάρχει το φαινόμενο διάχυσης (Diffusion) των φορέων μέχρι να έρθουν σε θερμική ισορροπία [12].

### 2.5.1 Ολίσθηση

Όταν εφαρμοστεί ηλεκτρικό πεδίο σε έναν ημιαγωγό παρατηρείται κίνηση των ηλεκτρονίων που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας. Η εν λόγω κίνηση επιταχύνεται μέσω της δύναμης που ασκεί το ηλεκτρικό πεδίο έχοντας ως συνέπεια την αύξηση της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων. Με αυτό τον τρόπο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν σε ανώτερες ενεργειακές καταστάσεις της ζώνης αγωγιμότητας. Αυτό συμβαίνει μέχρι να συγκρουστούν με κάποιο άτομο πυριτίου και να ακολουθήσει η μετάπτωση τους σε χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη. Η παραπάνω διαδικασία είναι επαναλαμβανόμενη και πανομοιότυπη με αυτή που ακολουθούν οι οπές. Ο μέσος ελεύθερος χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών σκεδάσεων συμβολίζεται με  $\tau_c$  [10].

Οι ταχύτητες ολίσθησης των φορέων φορτίου θα είναι,

$$v_n = \frac{-e \tau_c}{m_n^*} E = -\mu_n E \quad \text{για τα ηλεκτρόνια,} \quad (2.7)$$

$$v_p = \frac{e \tau_c}{m_p^*} E = \mu_p E \quad \text{για τις οπές.}$$

Ο όρος  $\frac{q \tau_c}{m^*}$  ονομάζεται κινητικότητα και παρουσιάζει θερμοκρασιακή εξάρτηση η οποία οφείλεται στον μέσο ελεύθερο χρόνο  $\tau_c$ . Για μεγάλες θερμοκρασίες η πιθανότητα κάποιος φορέας να συγκρουστεί με άτομα του κρυστάλλου είναι μεγαλύτερη λόγω των θερμικών ταλαντώσεων [10].

### 2.5.2 Διάχυση

Στην περίπτωση μη ομογενούς κατανομής φορτίου παρατηρείται το φαινόμενο διάχυσης. Στην ουσία τα ελεύθερα φορτία που κινούνται σε τυχαίες διευθύνσεις όπου κατευθύνονται από υψηλότερες συγκεντρώσεις προς χαμηλότερες διαμορφώνοντας μια ομοιόμορφη κατανομή φορτίου [10]. Το φαινόμενο της διάχυσης περιγράφεται μαθηματικά από τις παρακάτω εξισώσεις :

$$F_n = -D_n \nabla n \quad (2.8)$$

$$F_p = -D_p \nabla p$$

Το  $F_n$  είναι η σωματιδιακή ροή των ηλεκτρονίων και  $F_p$  η ροή των οπών,  $D$  ο συντελεστής διάχυσης,  $\nabla n$  και  $\nabla p$  οι βαθμίδες συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων και οπών αντίστοιχα.

Συνδυάζοντας τα παραπάνω φαινόμενα ολίσθησης και διάχυσης η συνολική πυκνότητα ρεύματος των ημιαγωγών περιγράφεται από τις παρακάτω σχέσεις,

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \nabla n \quad (2.9)$$

$$J_p = q\mu_p pE - qD_p \nabla p \quad [12].$$

Όπου ο συντελεστής διάχυσης σχετίζεται με την κινητικότητα από την σχέση Einstein,

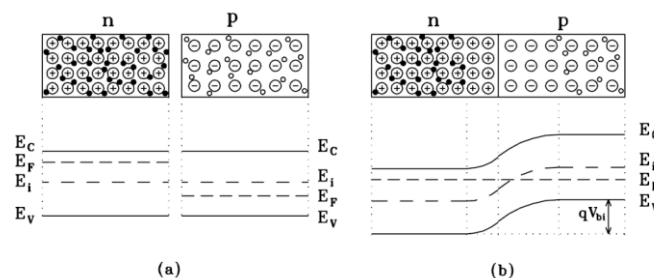
$$D_n = \frac{kT}{e} \mu_n \quad \text{και} \quad D_p = \frac{kT}{e} \mu_p.$$

Επίσης  $D = L^2 \tau$  όπου  $L = \sqrt{D\tau}$  ονομάζεται μήκος διάχυσης [10].

## 2.6 Επαφή p-n

Η επαφή p-n (ή δίοδος p-n) δημιουργείται στην περίπτωση που ένας ημιαγωγός τύπου p έρχεται σε επαφή με έναν ημιαγωγό τύπου n χωρίς να εφαρμοστεί κάποιο εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι φορείς φορτίου να διαχέονται μέχρι να έρθουν σε θερμική ισορροπία έτσι ώστε γύρω από την επαφή να δημιουργηθεί ηλεκτρική ουδετερότητα. Οι περιοχές p και n σε πρώτη φάση είναι ουδέτερες, έπειτα από την επαφή τα ηλεκτρόνια των ατόμων των δοτών διαχέονται στην περιοχή p και επανασυνδέονται με τις οπές, κατά αντιστοιχία οι οπές της περιοχής p επανασυνδέονται με τα ηλεκτρόνια της περιοχής n. Τα άτομα των δοτών μετατρέπονται σε θετικά ιόντα και των αποδεκτών σε αρνητικά. Δημιουργώντας έτσι ένα εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο το οποίο εκτείνεται γύρω από την επαφή p-n. Η περιοχή αυτή ονομάζεται **περιοχή απογύμνωσης (Depletion region)** καθώς δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς. Μεταξύ των περιοχών p και n δημιουργείται ένα εσωτερικό δυναμικό (Build-in)  $V_{bi}$ .

Όπως προαναφέρεται, το επίπεδο Fermi διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του ημιαγωγού όμως θα πρέπει να είναι σταθερό κατά την επαφή p-n. Επιπλέον γύρω από την περιοχή απογύμνωσης παρουσιάζεται μια ομαλή πτώση των ενεργειακών ζωνών κατά παράγοντα  $V_{bi} = E_{Fn} - E_{Fp}$  όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [13].



**Εικόνα 2.4 :** **a)** Απεικονίζονται οι δύο τύποι ημιαγωγών καθώς και τα ενεργειακά διαγράμματα τους πριν την επαφή. **b)** Κατά την επαφή p-n οι φορείς φορτίου κάθε ημιαγωγού διαχέονται προς το αντίθετο φορτίο μέχρι το σύστημα να έρθει σε ισορροπία. Στο σημείο γύρω από την επαφή οι ενεργειακές ζώνες κάμπτονται και δημιουργείται μια περιοχή απογύμνωσης όπου δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς φορτίου [13].

Για τον υπολογισμό του εσωτερικού δυναμικού γίνεται χρήση του νόμου Gauss

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_s} \text{ που συνεπάγεται στην εξίσωση Poisson } \frac{d^2\Phi}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_0 \epsilon_s}.$$

Τα όρια της περιοχής απογύμνωσης είναι  $-x_p \leq x \leq 0$  για την p περιοχή και  $0 \leq x \leq x_n$  για την n περιοχή, όπου  $w = x_n + x_p$  το πλάτος της. Η πυκνότητα φορτίου ισούται με  $\rho(x) = -q \cdot (n(x) - p(x) + N_A - N_D)$ . Για την πυκνότητα φορτίου γίνεται η παραδοχή ότι έχει μια απότομη πτώση έξω από τα όρια της περιοχής απογύμνωσης ώστε να θεωρείται αμελητέα η συνεισφορά των  $n(x)$  και  $p(x)$ .

Ολοκληρώνοντας το νόμο Gauss με πυκνότητα φορτίου  $\rho(x) = -q \cdot (N_A - N_D)$  στα παραπάνω όρια το ηλεκτρικό πεδίο δίνεται από,

$$E_n(x) = \frac{q N_D}{\epsilon_0 \epsilon_s} (x - x_n) \quad \text{για} \quad 0 \leq x \leq x_n \quad (2.10)$$

$$E_p(x) = \frac{-q N_A}{\epsilon_0 \epsilon_s} (x + x_p) \quad \text{για} \quad -x_p \leq x \leq 0 \quad (2.11)$$

Με μέγιστη τιμή (για  $x = 0$ ),

$$E_{max} = \frac{-q N_D}{\epsilon_0 \epsilon_s} x_n = \frac{-q N_A}{\epsilon_0 \epsilon_s} x_p. \quad (2.12)$$

Οι 2.10 και 2.11 ολοκληρώνονται στα παραπάνω όρια, με αρχική συνθήκη  $\Phi(0) = 0$ ,

$$\Phi_n(x) = -\frac{1}{2} |E_{max}| x_n \left[ \left( \frac{x}{x_n} \right)^2 - 2 \frac{x}{x_n} \right] \quad \text{για} \quad 0 \leq x \leq x_n$$

$$\Phi_p(x) = -\frac{1}{2} |E_{max}| x_p \left[ \left( \frac{x}{x_p} \right)^2 + 2 \frac{x}{x_p} \right] \quad \text{για} \quad -x_p \leq x \leq 0$$

Το άθροισμα των παραπάνω δυναμικών στα όρια της περιοχής απογύμνωσης ισούται με την μέγιστη τιμή του εσωτερικού δυναμικού όπου  $V_{bi} = \Phi_n(x_n) + \Phi_p(-x_p) = \frac{1}{2} |E_{max}| w$ . Τα δυναμικά  $\Phi_p(x) = E_{F_n} - E_i$  και  $\Phi_n(x) = E_i - E_{F_p}$  αποτελούν την διαφορά μεταξύ του ενδογενούς με του εξωγενούς επιπέδου Fermi. Μέσω των σχέσεων 2.6 το εσωτερικό δυναμικό γίνεται,

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right). \quad [14] \quad (2.13)$$

Όπου  $N_A, N_D$  οι συγκεντρώσεις των αποδεκτών και των δοτών αντίστοιχα και  $n_i$  η ενδογενής συγκέντρωση. Πρέπει να σημειωθεί ότι όταν η επαφή βρεθεί σε θερμική ισορροπία ισχύει ότι  $n \cdot p = n_i^2$  [10].

Η σχέση του εσωτερικού δυναμικού με το μήκος της περιοχής απογύμνωσης δίνεται από,

$$V_{bi} = \frac{1}{2} |E_{max}| w \quad \text{όπου} \quad w = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 N_A + N_D}{q N_A N_D}} V_{bi}.$$

Ο όρος  $N_s = \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}$  ονομάζεται συγκέντρωση υποστρώματος (Substrate Concentration).

Στην επαφή p-n οι συγκεντρώσεις των οπών και των ηλεκτρονίων παρουσιάζουν εξάρτηση από το εσωτερικό δυναμικό. Οι σχέσεις 2.6 γράφονται,

$$n_{no} = n_{po} \exp\left(\frac{-qV_{bi}}{kT}\right) \quad (2.14)$$

$$p_{no} = p_{po} \exp\left(\frac{-qV_{bi}}{kT}\right).$$

Τα  $n_{po}$  και  $p_{no}$  ονομάζονται φορείς μειονότητας και είναι οι συγκεντρώσεις στις περιοχές p και n αντίστοιχα, ενώ τα  $n_{no}$  και  $p_{po}$  είναι οι ενδογενείς συγκεντρώσεις [10].

### 2.6.1 Ορθή και Ανάστροφη Πόλωση

Ως ορθή πόλωση (Forward Bias) ορίζεται η περίπτωση που εφαρμόζεται τάση στα άκρα της διόδου p-n όπου ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται με την p περιοχή και ο αρνητικός με την n, στην αντίθετη περίπτωση ονομάζεται ανάστροφη πόλωση (Reverse Bias). Αυτό που παρατηρείται στην ορθή πόλωση είναι η μείωση του πλάτους  $w$  της περιοχής απογύμνωσης λόγω της μείωσης του εξωτερικού δυναμικού κατά  $V_{bi} - V$ , όπου  $V > 0$  είναι η τάση πόλωσης. Στην περίπτωση όπου υπάρχει ανάστροφη πόλωση τότε η περιοχή απογύμνωσης αυξάνεται με  $V < 0$ . Το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης δίνεται από,

$$w = \sqrt{\frac{2\epsilon_s\epsilon_0}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} (V_{bi} - V)}.$$

Η μείωση αυτή στην ορθή πόλωση οφείλεται στο γεγονός ότι το εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που έχει αντίθετη κατεύθυνση από το εσωτερικό έχει ως συνέπεια την μείωση του φράγματος δυναμικού  $qV(x)$ . Η πιθανότητα κάποιος φορέας φορτίου να διασχίσει την περιοχή απογύμνωσης αυξάνεται με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συγκεντρώσεις φορέων μειονότητας στις ουδέτερες περιοχές όπου μερικοί από αυτούς επανασυνδέονται και χάνονται. Οι φορείς που χάνονται όπως οι οπές αναπληρώνονται από την θετική τάση που εφαρμόζεται στην p περιοχή, αντίστοιχα ισχύει το ίδιο και για τα ηλεκτρόνια. Με αυτή την διαδικασία είναι δυνατή η συντήρηση ρεύματος που οφείλεται κατά κύριο λόγο στην διάχυση των φορέων μειονότητας. [10]

Η συνολική πυκνότητα ρεύματος για την ορθή πόλωση δίνεται από το μοντέλο Shockley.

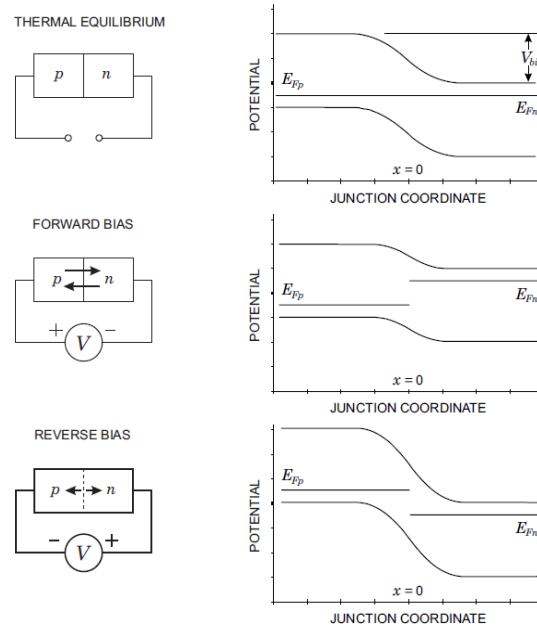
$$J = J_s \left[ \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad \text{όπου} \quad J_s = \left( \frac{qD_p}{L_p N_D} + \frac{qD_n}{L_n N_A} \right) n_i^2 \quad (2.15)$$

Όμως, μερικοί φορείς επανασυνδέονται μέσα στην περιοχή απογύμνωσης, με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα ρεύμα επανασύνδεσης που συμβάλλει στο συνολικό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό είναι,  $J_{rec} = \frac{qwn_i}{2\tau_r} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$ , με  $\tau_r$  να είναι ο χρόνος επανασύνδεσης. Το συνολικό ανάστροφο ρεύμα αποτελείται από το ρεύμα διάχυσης και επανασύνδεσης [10].

Στην περίπτωση ανάστροφης πόλωσης η περιοχή απογύμνωσης αυξάνεται καθώς και το φράγμα δυναμικού. Οι φορείς φορτίου δεν μπορούν να περάσουν το φράγμα δυναμικού και έτσι δεν υπάρχει ρεύμα μέσα στο σώμα του ημιαγωγού. Πάραυτα παρατηρείται ένα ασθενές ρεύμα που οφείλεται στον μηχανισμό γένεσης ζευγών ηλεκτρονίων-οπών μέσα στην περιοχή απογύμνωσης. Το παρόν ρεύμα ονομάζεται ρεύμα γένεσης και περιγράφεται από,

$$J_{gen} = \frac{qn_i}{\tau_g} (w - w_0). \quad (2.16)$$

Όπου  $w = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(N_A+N_D)}{qN_A N_D} (V_{bi} - V)}$ ,  $w_o = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(N_A+N_D)}{qN_A N_D} V_{bi}}$  και  $\tau_g$  ο χρόνος ζωής των ζευγών ηλεκτρονίων-οπών. [11]



**Εικόνα 2.5:** Στο παραπάνω σχήμα απεικονίζονται τα ενεργειακά διαγράμματα χωρίς εξωτερική πόλωση, με ορθή πόλωση και με ανάστροφη πόλωση [11].

## 2.6.2 Χωρητικότητα Περιοχής Απογύμνωσης

Στην περιοχή απογύμνωσης μιας επαφής p-n η οποία περιβάλλεται από θετικά και αρνητικά ιόντα που απέχουν μεταξύ τους κατά  $w$  είναι δυνατό να υπολογιστεί η χωρητικότητα της εν λόγω περιοχής (όπως στον πυκνωτή παράλληλων πλακών). Το φορτίο που αποθηκεύεται στην περιοχή απογύμνωσης δεν έχει γραμμική εξάρτηση από την τάση που εφαρμόζεται. Η χωρητικότητα μπορεί να προσδιοριστεί από την παρακάτω σχέση,

$$C_D = \frac{dQ}{dV} = \frac{\epsilon_s A}{w}, \text{ όπου } A \text{ η επιφάνεια διατομής του ημιαγωγού [10].}$$

Η χαρακτηριστική εξίσωση C-V είναι,

$$C_D = A \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_{sub}}{2} (V_{bi} - V)^{-1/2}}. \quad [10] \quad (2.17)$$

Για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης υποστρώματος  $N_{sub}$  χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική εξίσωση  $1/C^2 - V$ ,

$$\frac{1}{C_D^2} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_{sub}} (V_{bi} - V). \quad (2.18)$$

Η παραπάνω σχέση είναι γραμμική και η κλίση της ευθείας είναι,

$$\frac{d(1/C^2)}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_A}. \quad (2.19)$$



Μέσω της 2.19 μπορεί να υπολογιστεί η  $N_{sub}$ .

$$N_{sub} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 \frac{d(1/c^2)}{dv}} [11]. \quad (2.20)$$

### 2.6.3 Διάσπαση σε Ανάστροφη Πόλωση

Κατά την αύξηση της τάσης της ανάστροφης πόλωσης μετά από μια κρίσιμη τιμή, η επαφή p-n οδηγείται σε διάσπαση και παρατηρείται μια απότομη αύξηση του ανάστροφου ρεύματος. Αυτή η αύξηση οφείλεται σε δύο φαινόμενα το φαινόμενο χιονοστιβάδας και την διάσπαση Zener. Όταν ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο συγκρούεται με κάποιο άτομο του κρυστάλλου έχει ως αποτέλεσμα τον ιονισμό του. Το νέο ηλεκτρόνιο θα συγκρουστεί με την σειρά του με κάποιο άλλο άτομο το οποίο θα απελευθερώσει ένα ηλεκτρόνιο το οποίο θα ακολουθήσει την ίδια διαδικασία, ο μηχανισμός αυτός αποτελεί το φαινόμενο χιονοστιβάδας. Η προϋπόθεση για να συμβεί ο ιονισμός ενός ατόμου χρειάζεται η ενέργειά του ηλεκτρονίου να είναι μεγαλύτερη ή ίση του ενεργειακού διάκενου [11].

Η τάση διάσπασης (Breakdown Voltage) δίνεται από,

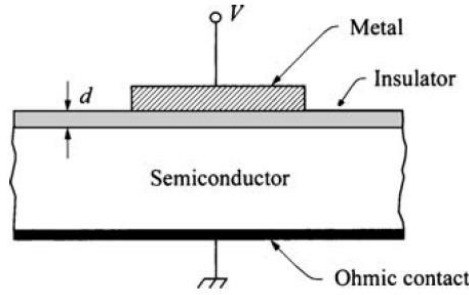
$$V_{bd} = \frac{\epsilon_s E_m^2}{2qN} [10]. \quad (2.21)$$

Όπου  $E_m$  η μέγιστη τιμή του πεδίου,  $\epsilon_s$  η διηλεκτρική σταθερά στον ημιαγωγό,  $q$  το φορτίο και  $N$  η συγκέντρωση υποστρώματος.

Το δεύτερο φαινόμενο είναι η διάσπαση Zener που αποτελείται από το φαινόμενο σήραγγας. Όταν η ανάστροφη πόλωση είναι πολύ μεγάλη οι ενεργειακές ζώνες κάμπτονται σε μεγάλο βαθμό έτσι ώστε η ζώνη σθένους της p περιοχής να είναι ψηλότερα από την ζώνη αγωγιμότητας της n περιοχής. Το αποτέλεσμα της κάμψης αυτής είναι μέσα στην περιοχή απογύμνωσης η απόσταση μεταξύ της ζώνης σθένους και αγωγιμότητας να μειώνεται. Με αυτό τον τρόπο οι φορείς μπορούν να ξεπεράσουν το φράγμα δυναμικού λόγω του φαινομένου σήραγγας [11].

## 2.7 Δομές MOS (Metal-Oxide-Semiconductor)

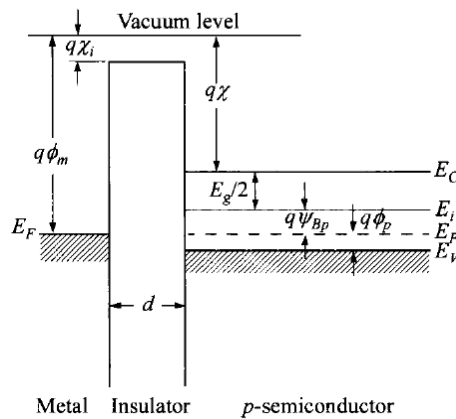
Οι δομές MOS αποτελούνται από την επαφή μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού. Το οξείδιο που έχει το ρόλο του διηλεκτρικού είναι συνήθως το  $\text{SiO}_2$  (οξείδιο του πυριτίου). Το  $\text{SiO}_2$  αποτελεί ένα σταθερό και χημικά αδρανές υλικό και θεωρείται ένας πολύ καλός μονωτής [14]. Οι δομές που αναφέρονται παρακάτω είναι ο πυκνωτής MOS και το τρανζίστορ MOSFET.



Εικόνα 2.5 : Δομή Metal-Oxide-Semiconductor [12].

### 2.7.1 Πυκνωτής MOS

Ο πυκνωτής MOS είναι μια αρκετά χρήσιμη δομή που συναντάται στους ανιχνευτές μικρο-λωρίδων (microstrips). Οι ανιχνευτές μικρο-λωρίδων αποτελούνται από λωρίδες πυριτίου υψηλών προσμίξεων και ένα στρώμα SiO<sub>2</sub> με λωρίδες μετάλλου που συνδέονται με τα ηλεκτρονικά ανάλυσης του σήματος [14]. Το οξείδιο χρησιμοποιείται για την καλύτερη απομόνωση των λωρίδων. Οι καταστάσεις της επαφής Si-SiO<sub>2</sub> καθορίζονται από το δυναμικό που εφαρμόζεται στην μεταλλική επαφή. Διακρίνονται τέσσερις βασικές περιπτώσεις όπου εξαρτώνται από την εφαρμογή της τάσης, η κατάσταση επίπεδων ζωνών (Flat-Band condition), συσσώρευσης (accumulation), απογύμνωσης (depletion) και αναστροφής (inversion) [12].



Εικόνα 2.6 : Στην παραπάνω εικόνα απεικονίζεται τα ενεργειακό διάγραμμα ενός p-MOS πυκνωτή [12].

Στην ιδανική περίπτωση MOS τα έργα εξόδου του μετάλλου  $\phi_m$  και του ημιαγωγού  $\phi_s$  είναι ίσα έτσι ώστε,  $\phi_{ms} = \phi_m - \phi_s = 0$  σε πραγματικές συνθήκες η διαφορά των έργων εξόδου ισούται με την τάση επίπεδων ζωνών,  $\phi_{ms} = V_{FB}$ .

Όπου για μηδενική πόλωση  $V = 0$  ισχύει,

$$q\phi_{ms} = q\phi_m - \left[ q\chi + \frac{E_g}{2} + q\Phi_B \right] = V_{FB} \quad \text{όπου} \quad \Phi_B = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) \text{ για p-type.} \quad (2.22)$$

Το  $q\chi$  ονομάζεται ηλεκτρονική συγγένεια (electron affinity) και το  $q\Phi_B = E_i - E_F$ . Στην επαφή Si-SiO<sub>2</sub> ( $x = 0$ ) οι ενεργειακές ζώνες κάμπτονται κατά  $\Psi_s$  που είναι το δυναμικό επιφάνειας του οξειδίου. Μέσα στην περιοχή  $0 \leq x \leq w_D$  το δυναμικό είναι  $\Psi(x) = \Phi(x) - \Phi_B$  όπου για  $x = w_D$  το  $\Psi(w_D) = 0$  και  $\Phi(w_D) = \Phi_B$ .

Για  $0 \leq x \leq w_D$  οι συγκεντρώσεις των φορέων δίνονται από,

$$n(x) = n_i \exp\left(\frac{q\Phi(x)}{kT}\right) = n_{p0} \exp\left(\frac{q\Psi(x)}{kT}\right) \quad (2.23)$$

$$p(x) = n_i \exp\left(\frac{-q\Phi(x)}{kT}\right) = p_{p0} \exp\left(\frac{-q\Psi(x)}{kT}\right)$$

Για  $x = 0$  οι συγκεντρώσεις στην επιφάνεια του οξειδίου,

$$n_s = n_i \exp\left(\frac{q\Phi_s}{kT}\right) = N_D \exp\left(\frac{q\Psi_s}{kT}\right) \quad (2.24)$$

$$p_s = n_i \exp\left(\frac{-q\Phi_s}{kT}\right) = N_A \exp\left(\frac{-q\Psi_s}{kT}\right).$$

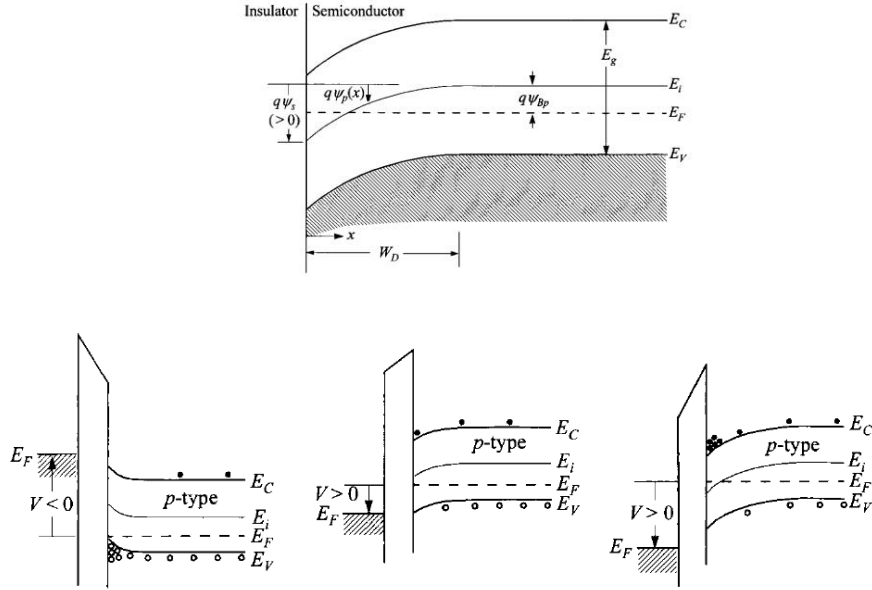
Στην δομή του πυκνωτή MOS με ημιαγωγό τύπου p, κατά την εφαρμογή πόλωσης στην μεταλλική επαφή γίνεται ανάλυση των παραπάνω περιπτώσεων. Όταν η τάση V που εφαρμόζεται είναι  $V < V_{FB}$ , με  $V_{FB}$  τάση επίπεδων ζωνών (στην ιδανική περίπτωση είναι  $V_{FB} = 0$ ), τα όρια των ενεργειακών ζωνών κάμπτονται προς τα πάνω. Οπές συσσωρεύονται εντός του ημιαγωγού κάτω από το οξείδιο και το επίπεδο Fermi παραμένει σταθερό. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται συσσώρευση ( $V < V_{FB}$ ) καθώς για x κοντά στην διεπιφάνεια Si-SiO<sub>2</sub> ο όρος  $E_i - E_F$  αυξάνεται και παρατηρείται τοπική αύξηση των οπών όπως παρατηρείται από την παρακάτω σχέση,

$$p(x) = n_i \exp\left[\frac{q(E_i - E_F)}{kT}\right].$$

Στην περίπτωση που η πόλωση είναι  $V > V_{FB}$ , αλλά σχετικά μικρή, τα όρια των ζωνών στρέφονται προς τα κάτω. Έτσι οι οπές απομακρύνονται από την επαφή και δημιουργείται μια περιοχή απογύμνωσης. Όπως φαίνεται και από την παραπάνω σχέση όπου ο όρος  $E_i - E_F$  μειώνεται. Μέσα στην περιοχή απογύμνωσης το φορτίο είναι αρνητικό λόγω των ιόντων των αποδεκτών.

Η επόμενη περίπτωση είναι όταν  $V \gg V_{FB}$  η πόλωση σε αυτή την περίπτωση είναι αρκετά μεγαλύτερη από το  $V_{FB}$ . Οι ενεργειακές ζώνες στρέφονται απότομα προς τα κάτω το  $E_i$  βρίσκεται κάτω από το  $E_F$  το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των φορέων μειονότητας στην διεπιφάνεια, που αποτελούνται από τα ηλεκτρόνια. Η περίπτωση αυτή ονομάζεται αναστροφή.

Οι παραπάνω περιπτώσεις με βάση την 2.24 μπορούν να γραφτούν και  $\Psi_s < 0$  για τη συσσώρευση,  $\Psi_s = 0$  για τις επίπεδες ζώνες  $0 < \Psi_s < \Phi_B$  για την απογύμνωση και  $\Phi_B < \Psi_s < 2\Phi_B$  ασθενής αναστροφή και για  $\Psi_s > 2\Phi_B$  είναι ισχυρή αναστροφή [12].



**Εικόνα 2.7 :** Οι τρεις περιπτώσεις συσσώρευσης (accumulation) ,απογύμνωσης (Depletion) και αναστροφής (inversion) αντίστοιχα [12].

Για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέσα στο MOS δίνεται από την λύση της εξίσωσης Poisson.

$$\frac{d\phi^2}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \text{ όπου } \rho(x) = q[p(x) - n(x) + N_D - N_A].$$

Η λύση της εξίσωσης Poisson θα είναι,

$$E(x) = \pm \frac{\sqrt{2}kT}{qL_D} F\left(\Psi(x), \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) \quad (2.25)$$

Όπου  $E(x)$  το ηλεκτρικό πεδίο για  $\Psi(x) > 0$  έχει θετικό πρόσημο ενώ για  $\Psi(x) < 0$  αρνητικό. Όπου,

$$F\left(\Psi(x), \frac{n_{po}}{p_{po}}\right) = \sqrt{\left[ \exp\left(-\frac{q\Psi(x)}{kT}\right) + \frac{q\Psi(x)}{kT} - 1 \right] + \frac{n_{po}}{p_{po}} \left[ \exp\left(\frac{q\Psi(x)}{kT}\right) - \frac{q\Psi(x)}{kT} - 1 \right]} \quad (2.26)$$

και  $L_D = \sqrt{\frac{kT\epsilon_s}{q^2 p_{po}}}$  το μήκος Debye. Το φορτίο μέσα στον ημιαγωγό δίνεται από την σχέση,

$$Q(x) = -\epsilon_s E(x) = \mp \frac{\sqrt{2}\epsilon_s kT}{qL_D} F\left(\Psi(x), \frac{n_{po}}{p_{po}}\right). \quad (2.27)$$

Το επιφανειακό φορτίο  $Q_s$  είναι συνάρτηση του επιφανειακού δυναμικού  $\Psi_s$ . Για τον p-type ημιαγωγούς οι φορείς πλειονότητας  $p_{po} \gg n_{po}$  επομένως στην περιοχή συσσώρευσης που ισχύει  $\Psi_s < 0$  το συνολικό επιφανειακό φορτίο θα είναι θετικό σύμφωνα με την 2.27. Στην συνάρτηση  $F$  για αυτήν την περίπτωση υπερισχύει ο αριστερά όρος έτσι ώστε το επιφανειακό φορτίο να είναι ανάλογο του όρου  $\exp(-q\Psi(x)/2kT)$ . Για  $\Psi_s = 0$  το επιφανειακό φορτίο θα είναι μηδενικό. Όταν  $0 < \Psi_s < 2\Phi_B$  βρισκόμαστε στην περιοχή απογύμνωσης και το επιφανειακό φορτίο είναι ανάλογο του  $\sqrt{\psi_s}$ . Τέλος, για  $\Psi_s > 2\Phi_B$  έχουμε αναστροφή όπου το  $Q_s$  είναι ανάλογο του όρου  $\exp(q\Psi(x)/2kT)$  [12], [15].

## 2.7.2 Χωρητικότητα πυκνωτή MOS

Στην αναστροφή το φορτίο του πυκνωτή είναι  $Q_M = -(Q_n + qN_A W_D) = -Q_s$ . Το  $Q_M$  είναι το φορτίο μέσα στο μέταλλο,  $Q_n$  το φορτίο λόγω της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων,  $qN_A W_D$  είναι το φορτίο των ιονισμένων αποδεκτών,  $W_D$  είναι το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης και  $Q_s$  είναι το συνολικό φορτίο μέσα στον ημιαγωγό.

Το δυναμικό που εφαρμόζεται στο μέταλλο είναι,

$$V - V_{FB} = V_{ox} + \Psi_s \text{ για ιδανικό MOS.}$$

Όπου  $V_{ox}$  το δυναμικό μέσα στον μονωτή.

$$V_{ox} = E_{ox} d_{ox} = \frac{|Q_s| d_{ox}}{\epsilon_s} = \frac{|Q_s|}{C_{ox}}$$

Μπορεί να υπολογιστεί η συνολική χωρητικότητα του πυκνωτή που αποτελείται από την χωρητικότητα του οξειδίου και του ημιαγωγού σε σειρά,

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_{ox}} \Rightarrow C = \frac{C_s C_{ox}}{C_s + C_{ox}} \text{ με } C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}}, C_s = \frac{dQ_s}{d\Psi_s} \text{ και } d_{ox} \text{ είναι το πάχος του οξειδίου.}$$

Όπως παρατηρείται από τα προηγούμενα η χωρητικότητα του οξειδίου εξαρτάται από το πάχος  $d_{ox}$  του επομένως είναι μια σταθερή ποσότητα. Σε αντίθεση με την χωρητικότητα του ημιαγωγού που εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη τάση στην επαφή του μετάλλου.

Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας  $C_s$  θα αναλυθούν κάθε μία από της παραπάνω περίπτωσης για τον προσδιορισμό της καμπύλης C-V. Η χωρητικότητα του ημιαγωγού δίνεται από την σχέση,

$$C_s = \frac{dQ_s}{d\Psi_s} = \frac{\epsilon_s}{\sqrt{2}L_D} \frac{1 - \exp\left(-\frac{q\Psi_s}{kT}\right) + (n_{po}/p_{po}) \left[\exp\left(\frac{q\Psi_s}{kT}\right) - 1\right]}{F(\Psi_s, n_{po}/p_{po})} \quad (2.28)$$

Για την περίπτωση επίπεδων ζωνών ( $\Psi_s = 0$ ) ο όρος  $\frac{n_{po}}{p_{po}} \approx 0$  θεωρείται αμελητέος για p-τύπου ημιαγωγούς. Αναλύοντας τον όρο  $\exp(-q\Psi_s/kT)$  σε σειρά Taylor η 2.28 γίνεται,

$$C_s = C_{FB} = \frac{\epsilon_s}{L_D} \quad (2.29)$$

Η συνολική χωρητικότητα δίνεται από την,

$$C(\Psi_s = 0) = \frac{\epsilon_s \epsilon_{ox}}{\epsilon_s d_{ox} + \epsilon_{ox} L_D} \quad (2.30)$$

Από την προηγούμενη μπορεί να προσδιοριστεί το πάχος του οξειδίου.

Στην περιοχή συσσώρευσης όπου ( $\Psi_s < 0$ ) το φορτίο συσσώρευσης είναι ανάλογο του όρου  $\exp(-q\Psi(x)/2kT)$  συνεπώς η χωρητικότητα γίνεται,

$$C_{acc} = \frac{C_{FB}}{\sqrt{2}} \exp\left(-\frac{q\Psi_s}{2kT}\right) \quad (2.31)$$

Στην περιοχή απογύμνωσης  $0 \leq \Psi_s \leq 2\Phi_B$  το φορτίο μέσα στο διάστημα  $0 \leq x \leq w_D$  αποτελείται από τα ιόντα των αποδεκτών και ισούται με,

$$Q_s = \frac{-\sqrt{2}\varepsilon_s kT}{qL_D} \sqrt{\frac{q\Psi_s}{kT}} = -\sqrt{q\varepsilon_s N_A \Psi_s} = -qN_A w_D \quad (2.32)$$

Συνδυάζοντας την 2.31 με την σχέσεις  $V - V_{FB} = V_{ox} + \Psi_s$  και  $V_{ox} = \frac{|Q_s|d_{ox}}{\varepsilon_s}$  το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης γίνεται,

$$w_D = \sqrt{\frac{\varepsilon_s}{C_{ox}^2} + \frac{2\varepsilon_s(V_{FB}-V)}{qN_A}} - \frac{\varepsilon_s}{C_{ox}} \quad (2.33)$$

Η χωρητικότητα απογύμνωσης είναι,  $C_D = \frac{\varepsilon_s}{w_D}$

Λύνοντας την εξ. Poisson  $\rho(x) = q N_A / \varepsilon_s$  το  $\Psi(x)$  για την απογύμνωση είναι,

$$\Psi(x) = \Psi_s \left(1 - \frac{x}{w}\right)^2 \text{ όπου } \Psi_s = \frac{qN_A w_D^2}{2\varepsilon_s}.$$

Η χωρητικότητα απογύμνωσης είναι συναρτήσει της  $\Psi_s$ ,

$$C_D = \frac{C_{FB}}{\sqrt{2}} \left(\frac{q\Psi_s}{2kT} - 1\right)^{1/2}. \quad (2.34)$$

Τέλος όταν εφαρμόζεται μεγαλύτερη θετική πόλωση στην περιοχή αναστροφής τέτοια ώστε  $2\Phi_B < \Psi_s$  η χωρητικότητα φτάνει σε μία ελάχιστη  $C_{min}$  τιμή με  $V = V_{min}$  και υπολογίζεται από το ελάχιστο της σχέσης 2.28,

$$\frac{dC_s}{dV_{min}} = 0.$$

Όσο συνεχίζει να αυξάνεται η θετική πόλωση πηγαίνοντας στην περιοχή ισχυρής αναστροφής υπάρχει μια αύξηση στην χωρητικότητα πέρα από την ελάχιστη χωρητικότητα (εικόνα 2.8) που περιγράφεται από,

$$C_I = \frac{C_{FB}}{\sqrt{2}} \frac{n_i}{N_A} \exp\left(\frac{q\Psi_s}{kT}\right) \quad (2.35)$$

Μέσα στην περιοχή ισχυρής αναστροφής το πλάτος  $w_D$  της περιοχής απογύμνωσης μεγιστοποιείται έτσι ώστε,

$$w_{Dmax} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \Psi_s (strong\ inv)}{qN_A}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (2\Phi_B)}{qN_A}} \quad (2.36)$$

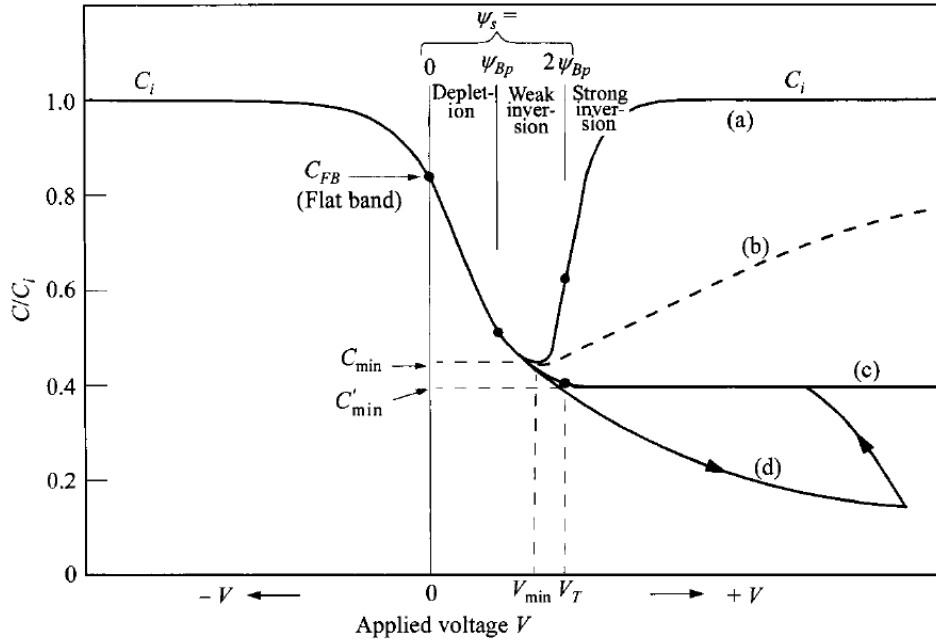
$$\text{Όπου, } \Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

Η ελάχιστη χωρητικότητα συναρτήσει του πλάτους  $w_D$  στην ισχυρή αναστροφή γίνεται,

$$C_{min} = \frac{\varepsilon_s \varepsilon_{ox}}{\varepsilon_s d_{ox} + \varepsilon_{ox} w_{Dmax}} \quad (2.37)$$

Μια ακόμα σημαντική ποσότητα είναι η τάση κατωφλίου (Threshold Voltage) η οποία είναι η τάση που ξεκινά η αναστροφή. Δίνεται από την παρακάτω σχέση,

$$V_{Th} = \frac{|Q_s|}{C_{ox}} + 2\Phi_B = \frac{\sqrt{2\varepsilon_s q N_A (2\Phi_B)}}{C_{ox}} + 2\Phi_B. \quad (2.38)$$



Εικόνα 2.8: Η χαρακτηριστική καμπύλη C-V [12].

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω η διαφορά των έργων εξόδου του μετάλλου και του ημιαγωγού είναι η τάση επίπεδων ζωνών, δηλαδή η τάση που χρειάζεται να εφαρμοστεί για να γίνουν οι ενεργειακές ζώνες επίπεδες.

$$\varphi_m - \varphi_s = V_{FB}$$

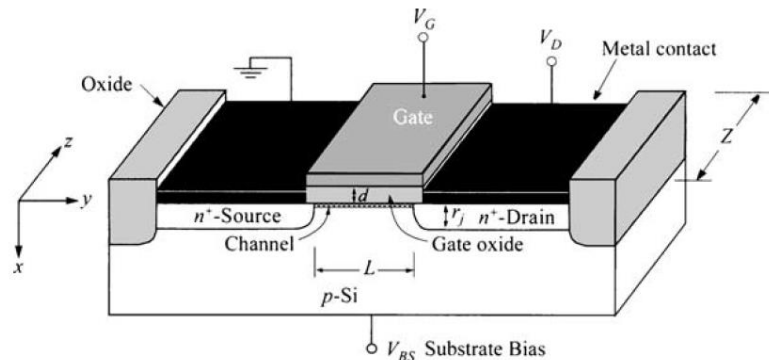
Πρέπει να σημειωθεί ότι στην διεπιφάνεια του οξειδίου παγιδεύονται φορτία  $Q_{ot}$ , δηλαδή υπάρχουν ενεργειακές καταστάσεις που βρίσκονται μέσα στην απαγορευμένη περιοχή του ημιαγωγού. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται συγκεντρώσεις φορτίων στην επαφή  $SiO_2-Si$ , αυτές οι συγκεντρώσεις επηρεάζουν το δυναμικό που εφαρμόζεται στο μέταλλο. Υπάρχουν και άλλες κατηγορίες φορτίων όπως κινητά φορτία  $Q_m$  που αποτελούνται από διάφορα αλκαλικά στοιχεία καθώς και σταθερά φορτία εντός του οξειδίου  $Q_f$ . Τα φορτία αυτά αντιμετωπίζονται ως ένα ενιαίο φορτίο  $Q_{ox} = Q_{ot} + Q_m + Q_f$ , με εμφάνιση του παραπάνω φορτίων μεταβάλετε η τάση που εφαρμόζεται στο μέταλλο. Έτσι η και η τάση επίπεδων ζωνών,

$$V_{FB} = \varphi_m - \varphi_s - \frac{(Q_{ot} + Q_f + Q_m)}{C_{ox}} \quad (2.39)$$

$$\text{όπου, } \varphi_s = q\chi + \frac{E_g}{2} + kT \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right) [12], [15]. \quad (2.40)$$

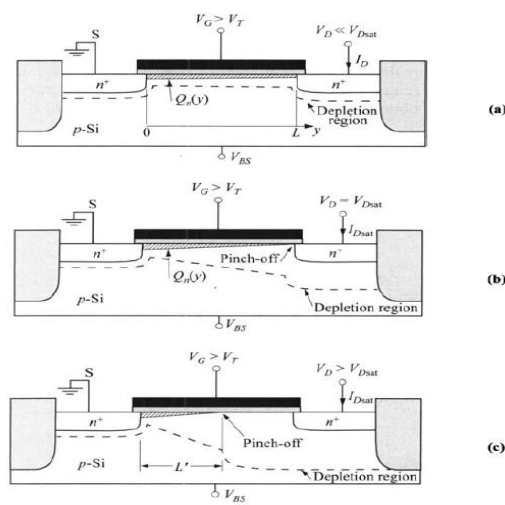
### 2.7.3 Τρανζίστορ MOSFET

Το τρανζίστορ MOSFET είναι μια δομή που αποτελείται από τέσσερα στοιχεία. Αρχικά από έναν ημιαγωγό τύπου p που αποτελεί το κύριο σώμα της δομής (Bulk). Μέσα στο σώμα λαμβάνουν χώρα δύο περιοχές n<sup>+</sup> που απέχουν κατά L μεταξύ τους, οι επαφές των δυο αυτών περιοχών ονομάζονται πηγή (Source) και απαγωγός (Drain). Στο μέσο υπάρχει μια μεταλλική επαφή που διαχωρίζεται με το κύριο σώμα από κάποιο διηλεκτρικό υλικό, στην προκειμένη περίπτωση οξείδιο του πυριτίου ακριβώς όπως μια δομή MOS. Η παραπάνω επαφή ονομάζεται πύλη (Gate) [12].



Εικόνα 2.9 : Δομή MOSFET [12].

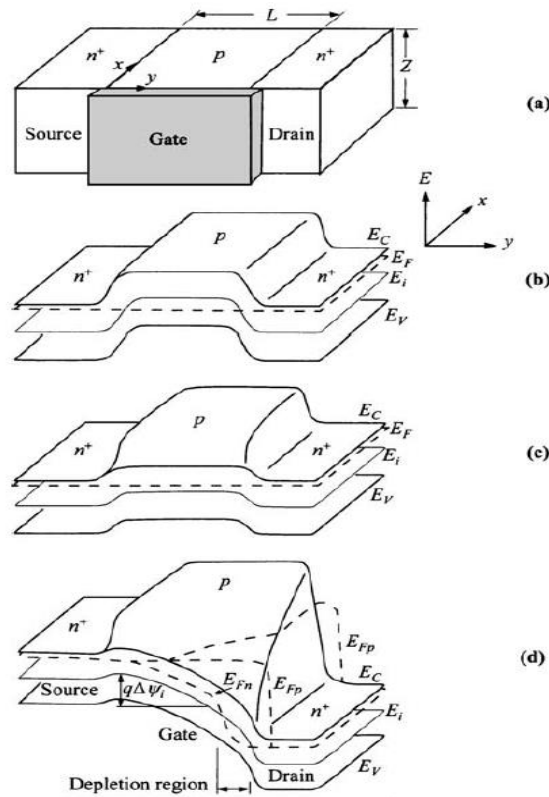
Το τρανζίστορ MOSFET έχει τρεις περιοχές λειτουργίας, όταν εφαρμοστεί θετική τάση στην πύλη αρκετή ώστε να υπάρχει αναστροφή αν εφαρμοστεί μια μικρή τάση  $V_D$  στην απαγωγή τότε ηλεκτρόνια ρέουν από την πηγή προς τον απαγωγό μέσω ενός καναλιού. Το κανάλι που δημιουργήθηκε συμπεριφέρεται σαν αντίσταση και υπάρχει ροή ρεύματος όπου αυξάνεται γραμμικά σε σχέση με την τάση  $V_D$  στον απαγωγό. Η περιοχή αυτή ονομάζεται γραμμική. Καθώς αυξάνεται η  $V_D$  φτάνει σε μια οριακή τιμή  $V_{Dsat}$  όπου το πάχος του στρώματος αναστροφής μηδενίζεται στα όρια του απαγωγού με το κανάλι. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο στραγγαλισμού (Pinch-off point). Για μεγαλύτερες τάσεις από την οριακή τιμή  $V_{Dsat}$  το ρεύμα παραμένει σταθερό και το μήκος της περιοχής αναστροφής μειώνεται. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή κόρου.



Εικόνα 2.10 : a) Γραμμική περιοχή για  $V_D \ll V_{Dsat}$ . b) Μη γραμμική περιοχή για  $V_D = V_{Dsat}$ . c) Περιοχή κόρου όπου το ρεύμα είναι σταθερό για  $V_D > V_{Dsat}$  [12].



Το ενεργειακό διάγραμμα κατά τον άξονα y φαίνεται στο παρακάτω σχήμα για μηδενική τάση στην πύλη και στον απαγωγό. Όταν εφαρμοστεί τάση στην περιοχή του απαγωγού το επίπεδο Fermi της n+ περιοχής  $E_{Fn}$  πέφτει κάτω από αυτό της p περιοχής  $E_{Fp}$ .



**Εικόνα 2.11 :** **a)** Η δομή του MOSFET στραμμένη κατά 90°. **b)** Το ενεργειακό διάγραμμα σε ισορροπία χωρίς εφαρμογή τάσης. **c)** Το ενεργειακό διάγραμμα όταν εφαρμοστεί τάση στην πύλη  $V_G$ . Όπως φαίνεται για  $x = 0$  το επίπεδο Fermi πλησιάζει την ζώνη αγωγιμότητας στο μεσαίο τμήμα της δομής. **d)** Στο τελευταίο σχήμα απεικονίζεται το ενεργειακό διάγραμμα κατά την εφαρμογή μικρής τάσης  $V_D$  και στην απαγωγή. Αυτό που παρατηρείται στην περιοχή της απαγωγής είναι η πτώση του επιπέδου Fermi  $E_{Fn}$  κάτω από το επίπεδο  $E_{Fp}$ .

Στην θέση  $x = 0, y = 0$  το επιφανειακό δυναμικό είναι  $\Psi_S = 2\Phi_B$  όμως στην περιοχή του απαγωγέα (Drain region) λόγω της εφαρμογής τάσης  $V_D$  είναι,

$$\Psi_S = 2\Phi_B + V_D \quad (2.41)$$

Το επίπεδο Fermi των φορέων πλειονότητας είναι σταθερό κατά x καθώς στην περιοχή του απαγωγέα μεταβάλλεται κατά y.

Όπως αναφέρεται παραπάνω στον πυκνωτή MOS η τάση που εφαρμόζεται στην πύλη ισούται με,

$$V_G = \Psi_S + V_{ox} \text{ όπου } V_{ox} = \frac{Q_s}{C_{ox}}.$$

Από τις παραπάνω σχέσεις δίνεται το φορτίο μέσα στον ημιαγωγό σε συνάρτηση με την θέση του y,

$$Q_s(y) = -(V_G - \Psi_S(y))C_{ox} \text{ και } C_{ox} = \frac{\epsilon_s}{d} \text{ όπου } d \text{ πάχος του οξειδίου της πύλης.}$$

Το  $Q_s$  είναι το άθροισμα του φορτίου αναστροφής  $Q_n$  και του φορτίου της απογυμνωμένης περιοχής  $Q_B$ .

$$Q_n = Q_s - Q_B = -(V_G - \Psi_S(y))C_{ox} - Q_B$$

και

$$Q_B = -qN_A W_D = -\sqrt{2qN_A \epsilon_s (V_D + 2\Phi_B)} \text{ με } W_D \text{ το πλάτος απογύμνωσης.}$$

Το επιφανειακό δυναμικό γράφεται ως συνάρτηση της θέσης  $y$  επομένως η σχέση 2.41 γίνεται,

$$\Psi_S = 2\Phi_B + \Delta\Psi_i(y)$$

Το  $\Delta\Psi_i(y)$  είναι η τάση που εφαρμόζεται στο σημείο  $y$  σε σχέση με την πύλη. Στην άκρη της περιοχής του απαγωγού είναι ίση με  $V_D$ .

Συνεπώς το φορτίο αναστροφής δίνεται από,

$$Q_n = -(V_G - \Delta\Psi_i(y) + 2\Phi_B)C_{ox} + \sqrt{2qN_A \epsilon_s (\Delta\Psi_i(y) + 2\Phi_B)}. \quad (2.42)$$

Η ειδική αγωγιμότητα του στρώματος αναστροφής υπολογίζεται,  $g = \frac{z\mu_n}{L} Q_n$  όπου  $z$ , το πάχος του MOSFET κατά τον άξονα  $z$ ,  $\mu_n$  η κινητικότητα των ηλεκτρονίων αναστροφής και  $L$  το μήκος του καναλιού πηγής-απαγωγού.

Ολοκληρώνοντας την παρακάτω σχέση από την πηγή ( $y = 0, V(0) = 0$ ) μέχρι τον απαγωγό ( $y=L, V(L) = V_D$ ),

$$\int_0^{I_D} dI = \int_{V(0)=0}^{V(L)=0} g dV$$

Το ρεύμα του καναλιού είναι,

$$I_D = \frac{z}{L} \mu_n C_{ox} \left\{ \left( V_G - V_{FB} - V_T - \frac{V_D}{2} \right) V_D - \frac{2}{3} \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A}}{C_{ox}} \left[ (V_D + 2\Phi_B)^3 - (2\Phi_B)^3 \right] \right\}.$$

Η παραπάνω σχέση προσεγγίζεται μέσω δυναμικών σειρών ως,

$$I_D = \frac{z}{L} \mu_n C_{ox} \left( V_G - V_T - \frac{V_D}{2} \right) V_D.$$

Όπου,

$$V_T = V_{FB} + \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\Phi_B)}}{C_{ox}} + 2\Phi_B \text{ η τάση κατωφλίου.}$$

Όταν η για  $V_D \ll (V_G - V_T)$  τότε η σχέση του ρεύματος-τάσης είναι γραμμική.

Στην περίπτωση όπου η τάση στον απαγωγό αυξηθεί έτσι ώστε  $Q_n(L) = 0$  τότε η λύση της 2.42 ως προς το δυναμικό  $V_D$  για  $x = L$  είναι,

$$V_{Dsat} = \Delta\Psi_i(L) = V_G - V_{FB} - 2\Phi_B + K^2 \left[ 1 - \sqrt{1 + \frac{2(V_G - V_{FB})}{K^2}} \right] \quad (2.43)$$

Όπου  $K = \sqrt{\epsilon_s q N_A / C_{ox}}$ .

Το ρεύμα στην περιοχή του κόρου δίνεται από,

$$I_{Dsat} = \frac{Z}{2ML} \mu_n C_{ox} (V_G - V_T)^2 \quad (2.44)$$

Όπου,  $M = 1 + \frac{K}{2\sqrt{\Phi_B}}$  και εξαρτάται από την συγκέντρωση των προσμίξεων και του πάχους του οξειδίου.

Στην χαρακτηριστική καμπύλη  $I_D$ - $V_G$  στην περιοχή κάτω από την τάση κατωφλίου  $V_T$  η επιφάνεια του ημιαγωγού βρίσκεται σε ασθενή αναστροφή. Το ρεύμα που εμφανίζεται κυριαρχείται από το φαινόμενο διάχυσης.

$$I_D = -qD_n \frac{\partial n}{\partial y}.$$

Στην περιοχή κάτω από το  $V_T$  μια χρήσιμη ποσότητα είναι η ταλάντευση υπο-κατωφλίου (Sub threshold swing) που υπολογίζεται από,

$$S = \left( \frac{\partial \log(I_D)}{\partial V_G} \right)^{-1} \quad (2.45)$$

Η παραπάνω ποσότητα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της τάση κατωφλίου όπως αναλύεται σε επόμενο κεφάλαιο [12], [15].

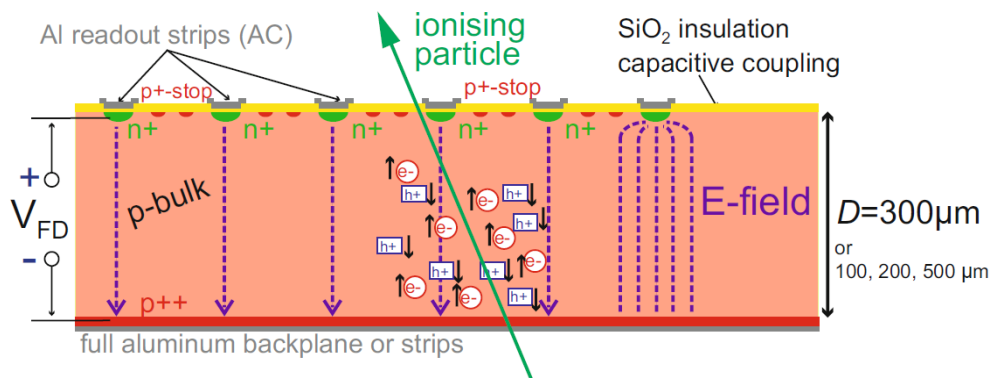
# Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>

## Ανιχνευτικές Διατάξεις Πυριτίου

Σε αυτό το κεφάλαιο αναφέρεται η αρχή λειτουργίας των ανιχνευτικών διατάξεων της αναβάθμισης δεύτερης φάσης του πειράματος CMS/LHC στο πλαίσιο του LHC υψηλής λαμπρότητας (HL-LHC). Γίνεται ανάλυση στις δομές και ιδιότητες των ανιχνευτών μικρολωρίδων (microstrips) καθώς και στην ανοχή τους στις ακτινοβολίες μεγάλης δόσης που αναμένονται στο HL-LHC. Συγκεκριμένα όλοι οι τροchioδεικτικοί ανιχνευτές του CMS/LHC θα αντικατασταθούν μέχρι το 2025 με νέους για τις ανάγκες του πειράματος.

### 3.1 Αρχή Λειτουργίας Ανιχνευτών Πυριτίου Στην Φυσική Υψηλών Ενεργειών

Η βασική δομή των ανιχνευτών πυριτίου στα πλαίσια της φυσικής υψηλών ενεργειών σε μια πρώτη προσέγγιση αποτελείται από έναν ημιαγωγό τύπου p που αποτελεί το κύριο σώμα (p-bulk) του ανιχνευτή. Στο πάνω μέρος του p-type υπάρχουν εμφυτεύματα από λωρίδες n+ ημιαγωγών δημιουργώντας επαφές n+-p. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διέρχεται μέσα από τον ανιχνευτή καθώς το σωματίδιο χάνει κινητική ενέργεια λόγω της αλληλεπιδράσεως του με το κρυσταλλικό πλέγμα του p-Si δημιουργούνται ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών. Τα ηλεκτρόνια συλλέγονται από τις λωρίδες n+ που δημιουργούνται από τα ζεύγη. Στην επαφή εφαρμόζεται ανάστροφη πόλωση (ο θετικός πόλος της πηγής συνδέεται στα n+) ώστε να δημιουργείται όσο το δυνατόν μεγαλύτερη περιοχή απογύμνωσης. Σε αντίθετη περίπτωση όπου η απογύμνωση δεν έχει το μέγιστο δυνατό πλάτος τα ζεύγη έξω από αυτή επανασυνδέονται με τους ελεύθερους φορείς με αποτέλεσμα να χάνεται ένα μέρος του ανιχνευόμενου σήματος. Η ελάχιστη τάση που εφαρμόζεται στις διόδους n+-p ώστε να δημιουργείται μέγιστο πλάτος απογύμνωσης σε όλο το πάχος του ανιχνευτή ονομάζεται τάση απογύμνωσης (Full Depletion Voltage)  $V_{FD}$ . Τα ηλεκτρόνια συλλέγονται από τα ηλεκτρόδια n+. Στο κάτω μέρος του ανιχνευτή λαμβάνει χώρα ένα στρώμα υψηλής πρόσμιξης p++ που ονομάζεται backplane στο οποίο συλλέγονται οι οπές (Εικόνα 3.1).

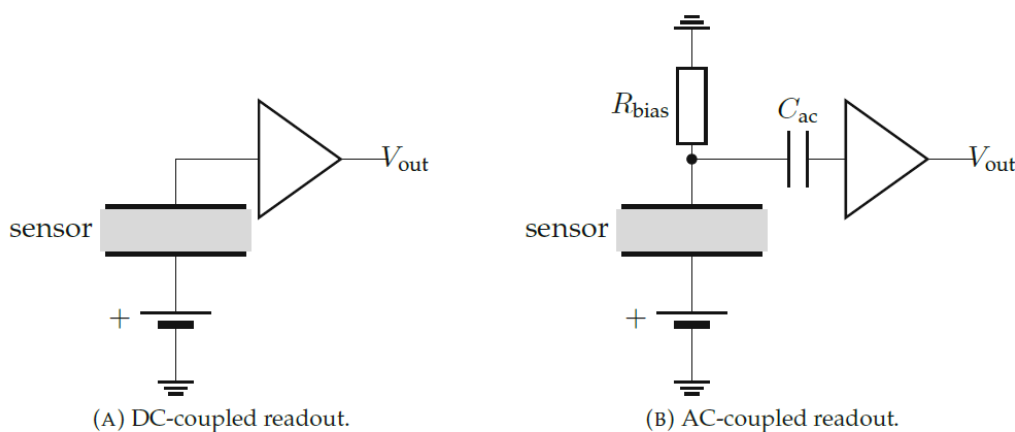


**Εικόνα 3.1:** Το φορτισμένο σωματίδιο διέρχεται μέσα στον όγκο του ανιχνευτή με αποτέλεσμα την δημιουργία ζευγών e-h+. Η εφαρμοζόμενη τάση  $V_{FD}$  στις διόδους n+-p δημιουργεί ηλεκτρικά πεδία και οι δημιουργούμενοι φορείς ολισθαίνουν στα αντίστοιχα ηλεκτρόδια. Μόλις τα ηλεκτρόνια συλλεχθούν από τις λωρίδες n+, μέσω AC-σύζευξης το σήμα μεταφέρεται στις μεταλλικές λωρίδες και μεταφέρεται στα ηλεκτρονικά ανάγνωσης [14].

Ένα στρώμα διοξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) διαχωρίζει τα ηλεκτρόδια  $n^+$  από τις μεταλλικές λωρίδες (readout strips), συνήθως το υλικό τους είναι το αλουμίνιο (Al). Η επαφή  $n^+$ - $\text{SiO}_2$ -Al είναι στην ουσία μια δομή MOS. Όταν οι φορείς φορτίου συλλέγονται από τα ηλεκτρόδια σχηματίζεται ένας παλμός ρεύματος ως έξοδος στα μεταλλικά ηλεκτρόδια, η διαδικασία αυτή ονομάζεται σύζευξη σήματος μέσω πυκνωτή (AC-Coupling) [14].

### 3.1.1 Σύζευξη Σήματος

Η λήψη του σήματος γίνεται με δύο τρόπους, όταν η λήψη είναι άμεση, δηλαδή τα ηλεκτρόδια  $n^+$  έρχονται σε επαφή με τις μεταλλικές λωρίδες η σύζευξη ονομάζεται DC-coupling. Στην ουσία οι φορείς που γεννιούνται κατά την διέλευση του σωματιδίου μεταφέρονται απευθείας στους ενισχυτές σήματος. Όμως στο εσωτερικό του όγκου γεννιούνται επιπλέον ζεύγη τα οποία οφείλονται στην ανάστροφη πόλωση και όχι από το ανιχνευόμενο σωματίδιο. Επομένως το επαγόμενο ρεύμα μεταφέρεται μαζί με το ρεύμα γένεσης από τους επιπλέον φορείς, το ρεύμα αυτό αναφέρεται ως ρεύμα διαρροής (Leakage Current). Είναι φανερό με τη μέθοδο αυτή τα ηλεκτρονικά δυσκολεύονται στην ανάλυση καθώς λαμβάνονται λανθασμένα σήματα. Η μέθοδος αυτή είναι εφικτή για μικρού μήκους ηλεκτρόδια και αμελητέο ρεύμα διαρροής. Στην έμμεση λήψη εφαρμόζεται ένα υψηλερατό φίλτρο (κύκλωμα R-C) στα ηλεκτρόδια. Η σύζευξη του σήματος με τα ηλεκτρόδια αλουμινίου γίνεται μέσω της δομής MOS, η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται AC-coupling. Μέσω του φίλτρου το συνεχές ρεύμα διαρροής εξαλείφεται και το καθαρό σήμα φτάνει στους ενισχυτές. Πάραυτα πάνω στις ανιχνευτικές διατάξεις του Outer Tracker υπάρχουν και οι δύο διατάξεις, αναφέρονται ως DC-pads και AC-pads αντίστοιχα ώστε να είναι εφικτός ο χαρακτηρισμός και η μελέτη των ιδιοτήτων των microstrips. Οι παραπάνω διατάξεις απεικονίζονται στην Εικόνα 3.2 [16].



**Εικόνα 3.2:** A) DC-coupling, το εναλλασσόμενο σήμα και το συνεχές ρεύμα διαρροής μεταφέρονται απευθείας στον ενισχυτή. B) AC-coupling, το ρεύμα διαρροής διαχωρίζεται μέσω της εφαρμογής ενός υψηλερατού φίλτρου και στη συνέχεια φτάνει στον ενισχυτή. Τα στοιχεία  $R_{bias}$  και  $C_{ac}$  είναι ενσωματωμένα πάνω στον ανιχνευτή [16].

### 3.1.2 Συλλογή Σήματος Και Ανίχνευση Θέσης Σωματιδίου

Στους ανιχνευτές πυριτίου η λήψη του σήματος εξαρτάται από τις κινητικότητες των φορέων φορτίου  $\mu_e$  και  $\mu_h$  αντίστοιχα. Οι παράμετροι που επηρεάζουν αυτά τα μεγέθη είναι η πόλωση  $V_{bias}$  και η θερμοκρασία. Οι τυπικές τιμές για τις κινητικότητες των ηλεκτρονίων και οπών για τον CMS/LHC είναι  $\mu_e=1350 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$  και  $\mu_h=450 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{sec}$  και για τον μέσο χρόνο ολίσθησης μέσα στον όγκο του ανιχνευτή  $t_e = 1.5 \text{ ns}$  και  $t_h = 4.5 \text{ ns}$  για μέση δύναμη ηλεκτρικού πεδίου  $\langle E \rangle = 15 \text{ kV/cm}$ . Όπως γίνεται αντιληπτό οι οπές κινούνται πολύ πιο αργά από τα ηλεκτρόνια και η συνεισφορά τους στο σήμα είναι δευτερεύουσα. Για περιπτώσεις ασθενών σημάτων τα ζεύγη που επάγονται κατά την ακτινοβολήση χάνονται μέσα στον θόρυβο από τα φορτία που γεννιούνται στην περιοχή απογύμνωσης κατά την εφαρμοζόμενη πόλωση (ρεύμα διαρροής). Επομένως όταν το σήμα μοιράζεται σε διάφορα ηλεκτρόδια ενδέχεται κάποια απώλεια στην ανάλυση. Όταν το ανιχνευόμενο σήμα συλλέγεται εξ ολοκλήρου από ένα ηλεκτρόδιο (single-strip-event) τότε η θέση του σωματιδίου δίνεται από τον αριθμό της λωρίδας. Διαφορετικά για γεγονότα που ανιχνεύονται από δύο τουλάχιστον λωρίδες αν το φορτίο που επάγεται είναι αρκετό ώστε να διαπεράσει το κατώφλι του θορύβου τότε η θέση καθορίζεται από το «κέντρο βάρους» της κατανομής του φορτίου. Ο υπολογισμός του σήματος δίνεται από αλγορίθμους όπου λαμβάνουν τις κατανομές φορτίου από κάθε ηλεκτρόδιο. Ο καλύτερος εντοπισμός σωματιδίων επιτυγχάνεται για γεγονότα που λαμβάνουν χώρα στο μέσο δύο ηλεκτροδίων όπου η κορυφή των παλμών είναι σχεδόν ίδια και ο θόρυβος μικρός. Επισημαίνεται ότι για σήματα που ανιχνεύονται κοντά σε μια λωρίδα η διακριτική ικανότητα μειώνεται. Αυτό οφείλεται στην ανίχνευση μικρού παλμού σε κάποιο γειτονικό ηλεκτρόδιο για το οποίο η κορυφή δεν ξεπερνά τον θόρυβο. Αυτό αυξάνει το σφάλμα στον καθορισμό του «κέντρου βάρους» της κατανομής [14].

Η μέθοδος του «κέντρου βάρους» δίνεται από τον παράγοντα  $\eta$  στον οποίο εμπλέκονται οι κορυφές των παλμών κάθε λωρίδας. Όπου  $PH_1$  και  $PH_2$  οι κορυφές από δύο λωρίδες.

$$\eta = \frac{PH_1}{PH_1+PH_2} \quad (3.1)$$

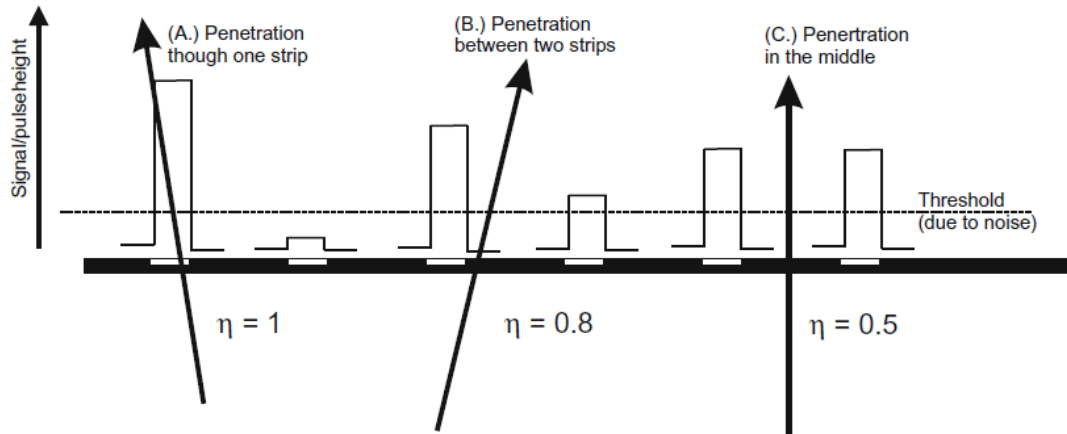
Η θέση του σωματιδίου δίνεται από την παρακάτω σχέση,

$$x = x_{strip1} + \eta(x_{strip2} - x_{strip1}) \quad (3.2)$$

Όπου  $x_{strip1}$  και  $x_{strip2}$  οι θέσεις των ηλεκτροδίων αντίστοιχα. Η σχέση  $f(\eta)$  δεν είναι πάντα γραμμική καθώς εξαρτάται από την γεωμετρία του ανιχνευτή. Δύο ακόμα σημαντικοί παράμετροι που επηρεάζουν την ανίχνευση της θέσης των γεγονότων στις ανιχνευτικές διατάξεις είναι οι αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων  $p$  (pitch) και η αναλογία σήματος-θορύβου. Η χωρική διακριτική ικανότητα των ανιχνευτών είναι περίπου 2 - 4  $\mu\text{m}$ .

Η τυπική απόκλιση δίνεται ποσοτικά από,

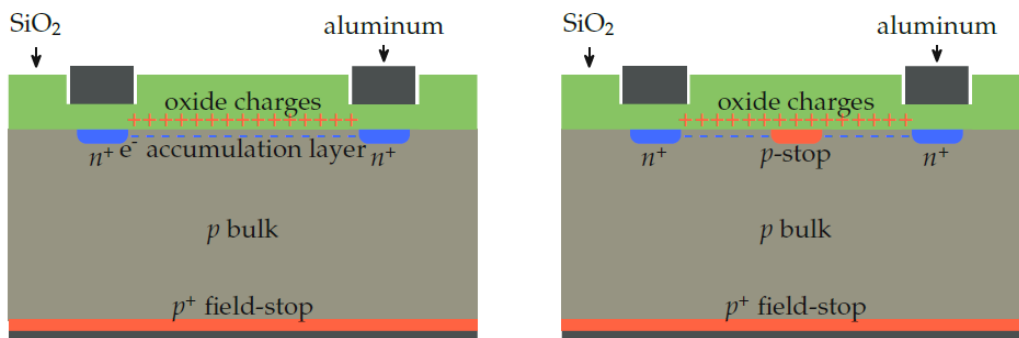
$$\sigma_x \propto \frac{p}{\text{signal/noise}}, \text{ η απόσταση των ηλεκτροδίων προς αναλογία σήματος-θορύβου [14].}$$



**Εικόνα 3.3:** Α) Στο αριστερό διάγραμμα για  $\eta = 1$  παρουσιάζεται ο αντίστοιχος παλμός για την ανίχνευση του σωματιδίου πολύ κοντά σε κάποιο ηλεκτρόδιο, όπως φαίνεται στο γειτονικό ηλεκτρόδιο επάγεται και σε αυτό κάποιος παλμός. Όμως βρίσκεται κάτω από το κατώφλι του θορύβου. Β) Στο μεσαίο διάγραμμα απεικονίζονται οι παλμοί του ανιχνεύμενου σωματιδίου του οποίου η θέση δίνεται από την κατανομή φορτίου. Γ) Τέλος στο δεξί διάγραμμα παρουσιάζεται η περίπτωση όπου και τα δύο ηλεκτρόδια έχουν ισοϋνείς κορυφές παλμών. Δηλαδή ο εντοπισμός γίνεται στο μέσο των ηλεκτροδίων [14].

### 3.1.3 Απομόνωση Ηλεκτροδίων n+

Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί ότι στην διεπαφή του στρώματος διοξειδίου του πυριτίου με το πυρίτιο ( $\text{SiO}_2$  -Si) παγιδεύονται διάφορα θετικά φορτία. Τα θετικά φορτία στην επιφάνεια του οξειδίου έλκουν τους αρνητικά φορτισμένους φορείς φορτίου, κάτω από το οξείδιο δημιουργείται ένα στρώμα από ηλεκτρόνια μεταξύ των εμφυτευμένων ημιαγωγών n+ (Εικόνα 3.3) και έτσι επηρεάζεται η απόδοση του ανιχνευτή. Μεταξύ των ηλεκτροδίων δημιουργείται ένα βραχυκύκλωμα. Για να επιτευχθεί η απομόνωση εμφυτεύονται λωρίδες από p+ ημιαγωγούς (αναφέρονται ως p-stops) γύρω από τις λωρίδες n+. Στα p-stops εφαρμόζεται αρνητική πόλωση ώστε στην περιοχή απογύμνωσης να υπάρχει αρνητική πυκνότητα φορτίου [17].

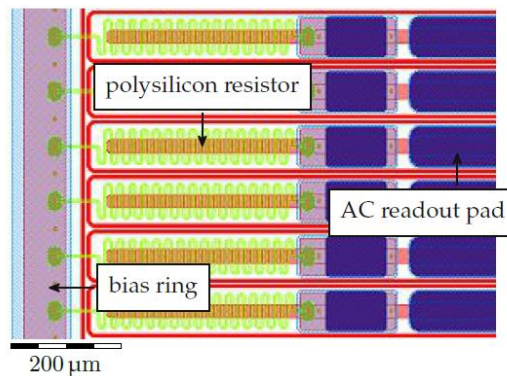


**Εικόνα 3.3:** Απεικονίζεται η διατομή του ανιχνευτή. Στην αριστερή διατάξει δεν υπάρχει απομόνωση των ηλεκτροδίων αυτό έχει ως συνέπεια να έλκονται ηλεκτρόνια από τα θετικά φορτία στην επιφάνεια του  $\text{SiO}_2$ . Δεξιά αποτρέπεται η συσσώρευση των ηλεκτρονίων με την εμφύτευση των p-stops [16].

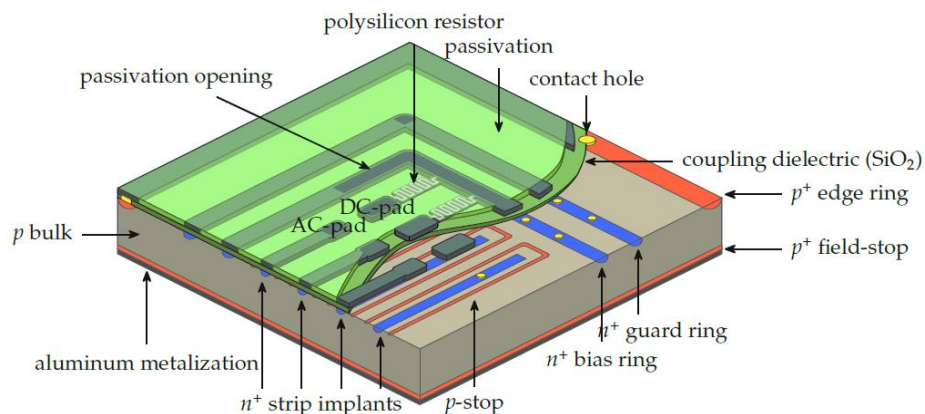
### 3.1.4 Σύστημα Πόλωσης Της Ανιχνευτικής Διάταξης

Όπως αναφέρεται για να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή απογύμνωση στον όγκο του ανιχνευτή είναι απαραίτητη η εφαρμογή πόλωσης στις επαφές n+-p. Το δυναμικό εφαρμόζεται μεταξύ κάθε ηλεκτροδίου n+ και του στρώματος p++ (backplane). Το τελευταίο

λόγω των υψηλών προσμείξεων από αποδέκτες παρουσιάζει χαμηλή αντίσταση και αποτελεί μια καλή ωμική επαφή με την μεταλλική επίστρωση. Η περιοχή  $p^{++}$  χρησιμοποιείται έτσι ώστε να αποτρέπονται οι υψηλές πυκνότητες ηλεκτρικού πεδίου και να φτάσει σε διάσπαση ο ανιχνευτής λόγω υπερ-απογύμνωσης. Η παραπάνω επίστρωση αναφέρεται και ως *field-stop*. Οι ανιχνευτές λειτουργούν πέρα από την τάση απογύμνωσης  $V_{bias} > V_{FD}$  για την καλύτερη συλλογή των φορτίων. Η πόλωση γίνεται από έναν δακτύλιο πόλωσης (Bias Ring) ο οποίος περιτριγυρίζεται γύρω από τα ηλεκτρόδια και συνδέεται με κάθε ένα ξεχωριστά. Στη συνέχεια, η μεταφορά της πόλωσης από τον δακτύλιο στα εμφυτεύματα  $n^+$  γίνεται με διάφορες μεθόδους όμως η ιδανικότερη γίνεται με χρήση αντιστάσεων πολυκρυσταλλικού πυριτίου (polysilicon) (Εικόνα 3.4). Η μέθοδος αυτή είναι αποδοτικότερη γιατί το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο έχει μεγάλη ανεκτικότητα στις ισχυρές ακτινοβολίες. Στην Εικόνα 3.5 απεικονίζεται μια ολοκληρωμένη ανιχνευτική διάταξη. Η τάση που εφαρμόζεται είναι  $V_{bias} > 600\text{ V}$  ώστε να έχει μέγιστη απόδοση. Τέτοιες τάσεις θα πρέπει να υποστηρίζονται από τους ανιχνευτές χωρίς να φτάνουν σε διάσπαση [14].



**Εικόνα 3.4:** Διάταξη αντίστασης πολυκρυσταλλικού πυριτίου για την εφαρμογή πόλωσης στις μικρολωρίδες [14].



**Εικόνα 3.5:** Η ανιχνευτική διάταξη ενός n-in-p ανιχνευτή [18].

Οι ανιχνευτές μικρολωρίδων σχεδιάζονται πάνω σε δισκία πυριτίου (wafers) μέσω λιθογραφικών μεθόδων. Κατά την διαδικασία κοπής των ανιχνευτών από τα δισκία πυριτίου στα άκρα δημιουργούνται διάφορα ενεργειακά επίπεδα που λαμβάνουν χώρα στην απαγορευμένη ζώνη του Si επάγοντας ρεύμα διαρροής. Η καταστολή του ρεύματος διαρροής και των υψηλών πεδίων στην περιοχή των ρωγμών επιτυγχάνεται με την εφαρμογή ενός



πλατιού εμφυτεύματος υψηλής πρόσμειξης p+ το οποίο ονομάζεται edge-field-shaper. Βρίσκεται στην περιφέρεια του ανιχνευτή όπου έχει γίνει η τομή. Η πόλωση που εφαρμόζεται στην λωρίδα p+ είναι ίδια με αυτή στο κάτω μέρος του ανιχνευτή (Field-stop ή backplane) [14].

### 3.1.5 Προστασία Από Περιβαλλοντικές Συνθήκες

Οι ανιχνευτές είναι ευαίσθητες διατάξεις, η απόδοση τους επηρεάζεται άμεσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες καθώς αυτές μπορεί να είναι και καταστροφικές. Συνεπώς το πάνω μέρος των ανιχνευτών επιστρώνεται με ένα μονωτικό υλικό (Passivation). Η μόνωση συνήθως αποτελείται από διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ), νιτρίδιο πυριτίου ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) και πυριτικό άλας με προσμίξεις φωσφόρου (Phosphorous Silicate Glass). Τα μοναδικά στοιχεία πάνω στην διάταξη που έχουν επαφή με τις περιβαλλοντικές συνθήκες είναι οι μεταλλικές επαφές αλουμινίου [14].

### 3.1.6 P-type Και Ανοχή Στις Ισχυρές Ακτινοβολίες (Radiation Hard)

Στα πλαίσια της αναβάθμισης του επιταχυντή 14 TeV LHC (Large Hadron Collider) του CERN η στιγμιαία λαμπρότητα της ακτινοβολίας αυξάνεται κατά μια τάξη μεγέθους σε σχέση με την υπάρχουσα επιταχυντική διάταξη προσεγγίζοντας τα  $10^{35} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$ . Η παραπάνω αύξηση αποτελεί μια πρόκληση για την κατασκευή νέων ανιχνευτών που θα είναι ανθεκτικοί στην ισχυρή ακτινοβολία [19]. Σε υψηλά επίπεδα ακτινοβολίας μειώνεται η ικανότητα των ανιχνευτών να συλλέγουν τα φορτία που επάγονται. Τα κύρια φαινόμενα που παρατηρούνται είναι η δυσκολία της πλήρους απογύμνωσης και η δημιουργία παγίδων από ενεργειακά επίπεδα που εμφανίζονται κοντά στο ενδογενές επίπεδο Fermi κατά την ακτινοβολία.

Σε μικροσκοπική κλίμακα τα σωματίδια που διέρχονται στον όγκο του ανιχνευτή χάνουν την κινητική τους ενέργεια ως επί το πλείστον ionίζοντας τα άτομα του κρυστάλλου του Si. Παράλληλα υπάρχει η πιθανότητα φορτισμένα σωματίδια και μη να συγκρούονται ελαστικά με τα άτομα του πλέγματος. Αυτή η αλληλεπίδραση έχει ως συνέπεια άτομα του κρυστάλλου να εκτοπίζονται από της θέσεις τους αφήνοντας κενά. Τα εκτοπισμένα άτομα έχοντας απορροφήσει επαρκεί κινητική ενέργεια μετά τις κρούσεις μπορούν να δημιουργήσουν δευτερογενείς συγκρούσεις με άλλα άτομα του κρυστάλλου. Οι αταξίες που εμφανίζονται επηρεάζουν σημαντικά την λειτουργία του ανιχνευτή. Σε μακροσκοπική κλίμακα το ρεύμα διαρροής αυξάνεται από κέντρα (ενεργειακά επίπεδα) γένεσης και επανασύνδεσης φορέων που λαμβάνουν χώρα στο ενεργειακό κενό. Το φορτίο μέσα στην απογύμνωση επηρεάζει την εφαρμοζόμενη τάση απογύμνωσης του ανιχνευτή καθώς και πολλά φορτία δεν συλλέγονται από ενδεχόμενες παγίδες φορτίων από τα κανάλια. Η βλάβη της ακτινοβολίας εξαρτάται από την ενέργεια του σωματιδίου και τον τύπο του. Για την περιγραφή του φαινομένου γίνεται η υπόθεση της μη ionίζουσας απώλειας ενέργειας (non-ionizing energy loss ή NIEL) [19]. Η υπόθεση είναι ότι όποια μετατόπιση εξαιτίας μη ionίζουσας απώλειας ενέργειας έχει γραμμική εξάρτηση από την ενέργεια που συσσωρεύεται στο πλέγμα. Η ζημιά συσχετίζεται με κάποιο σωματίδιο αναφοράς, συνήθως με νετρόνιο 1 MeV.

Η γραμμική σχέση συσχετίζει τις ροές φορτισμένων σωματιδίων και νετρονίων 1 MeV,

$$\Phi_{eq} = \kappa \Phi, \quad (3.3)$$

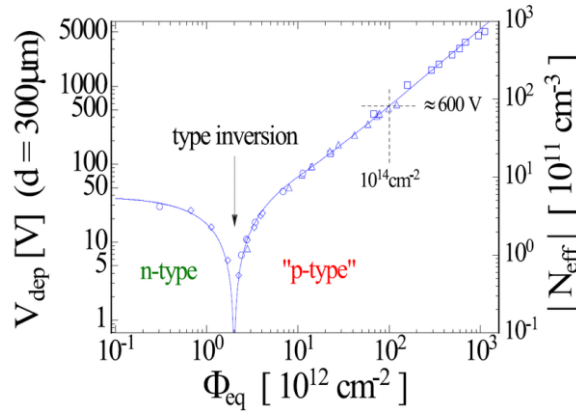
όπου  $\Phi_{eq}$  η ροή των νετρονίων,  $\Phi$  η ροή σωματιδίων κάποιου είδους και  $\kappa$  ο παράγοντάς βλάβης ακτινοβολίας.

Για έναν ανιχνευτή που έχει υπόστρωμα n-bulk και ηλεκτρόδια p+, δηλαδή τεχνολογίας p-in-n, τα άτομα του πλέγματος και τα άτομα των δοτών εκτοπίζονται αντίστοιχα από την ακτινοβολία, τα κενά που εμφανίζονται στον κρύσταλλο καταλαμβάνονται από άλλα άτομα αλλάζοντας τη δομή του ημιαγωγού. Στο εσωτερικό της απαγορευμένης ενεργειακής περιοχής εμφανίζονται διάφορα ενεργειακά επίπεδα που οφείλονται στις αταξίες που δημιουργήθηκαν από την ακτινοβολία. Αυτό που παρατηρείται από πειραματικές μελέτες είναι ότι τα ενεργειακά επίπεδα στο ενεργειακό κενό λειτουργούν κυρίως ως επίπεδα αποδεκτών. Το αποτέλεσμα είναι ο n-type ημιαγωγός να μετατρέπεται σε p-type. Κατά την συνεχή ακτινοβολία η περιοχή και η τάση απογύμνωσης μειώνονται μέχρι να αναστραφούν πλήρως. Ενεργειακά επίπεδα που τοποθετούνται κοντά στο κέντρο της απαγορευμένης περιοχής λειτουργούν ως παγίδες φορτίων οι οποίες επηρεάζουν την συλλογή φορτίων από τα ηλεκτρόδια. Η πιθανότητα ένας φορέας φορτίου να φτάσει στο ηλεκτρόδιο χωρίς να παγιδευτεί δίνεται από,

$$P = e^{-t/\tau_r} \quad (3.4)$$

Όπου  $t$  ο χρόνος ολίσθησης του φορέα και  $\tau_r$  ο χρόνος παγίδευσης. Η παραπάνω σχέση μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της απόστασης  $x$  που διανύει ο φορέας,

$P = e^{-x/L}$ , όπου  $L$  η χαρακτηριστική απόσταση που διανύει ένας φορέας που έχει παγιδευτεί, εξαρτάται από την η ταχύτητα ολίσθησης  $v_{dr}$  και τον χρόνο  $\tau_r$ ,  $L = v_{dr} \cdot \tau_r$ . Για χαμηλά επίπεδα ακτινοβολίας το  $L$  είναι συγκρίσιμο με το πάχος του υποστρώματος  $W$  [14].



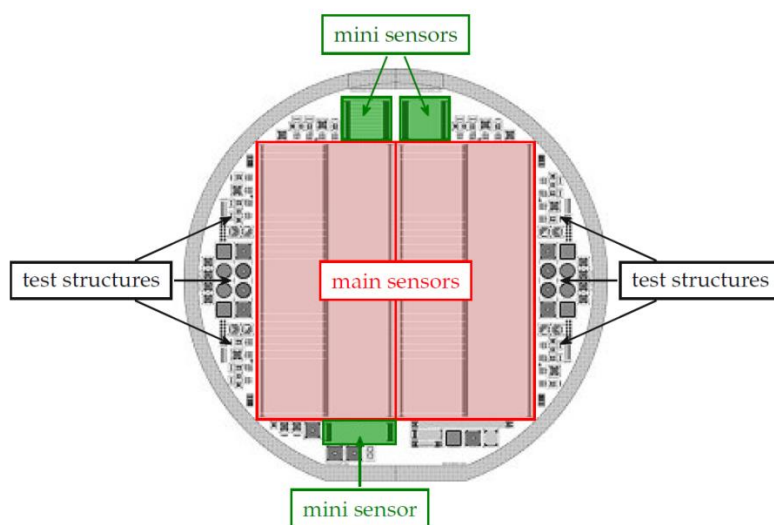
**Εικόνα 3.6:** Στο παραπάνω διάγραμμα απεικονίζεται το φαινόμενο μετατροπής τύπου ημιαγωγού κατά την ακτινοβολία του από δέσμη σωματιδίων. Αρχικά όσο αυξάνεται η ακτινοβολία η τάση απογύμνωσης μειώνεται. Μετά από μια κρίσιμη τιμή της ροής η συγκέντρωση των δοτών μειώνεται και παρουσιάζεται αύξηση των αποδεκτών. Ο ημιαγωγός n μετατρέπεται σε p τύπου [20].

Η επίλυση του φαινομένου αφαίρεσης δοτών ή αποδεκτών από τις ελαστικές κρούσεις της ακτινοβολίας γίνεται με την ανάπτυξη ημιαγωγών υψηλής συγκέντρωσης ατόμων οξυγόνου. Τα άτομα οξυγόνου εμποδίζουν την ανάπτυξη επιπλέον συγκεντρώσεων αποδεκτών [20]. Όμως τα ενεργειακά επίπεδα των παγίδων φορτίου εξακολουθούν να υφίστανται. Η προσέγγιση στο παρόν πρόβλημα γίνεται με την ανάπτυξη τεχνολογίας ανιχνευτών τύπου n-in-n και n-in-p [21]. Όπου οι μικρο-λωρίδες είναι εμφυτεύματα n+ ημιαγωγών και το υπόστρωμα n-bulk ή p-bulk αντίστοιχα. Οι διατάξεις τύπου n-in-n είναι σύνθετα συστήματα και περιλαμβάνουν ηλεκτρόδια και στις δύο όψεις των ανιχνευτών γεγονός που τα καθιστά

ακριβά στην κατασκευή τους. Αντίθετα οι διατάξεις n-in-p περιλαμβάνουν ηλεκτρόδια στην μια όψη των ανιχνευτών και είναι οικονομικά βιώσιμες. Τα κύρια πλεονεκτήματα λειτουργίας τέτοιου είδους ανιχνευτών με p υπόστρωμα είναι ότι οι συλλεγόμενοι φορείς είναι ηλεκτρόνια τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερες κινητικότητες σε σχέση με τις οπές. Επιπλέον η περιοχή απογύμνωσης ξεκινά από τα ηλεκτρόδια και αυξάνεται κατά τη ακτινοβολήση του υποστρώματος. Έτσι δεν είναι απαραίτητο στις διόδους n+-p να εφαρμόζεται πλήρης τάση απογύμνωσης (Full Depletion Voltage).

### 3.2 Τεχνολογία Των Δισκίων Πυριτίου (wafers)

Τα δισκία πυριτίου είναι λεπτά δισκία από κρυσταλλικό πυρίτιο τα οποία αποτελούν το υπόστρωμα για μικροηλεκτρονικές διατάξεις, ολοκληρωμένα κυκλώματα ακόμα και φωτοβολταϊκές διατάξεις. Στα πλαίσια της φυσικής υψηλών ενεργειών στα δισκία πυριτίου βρίσκονται οι ανιχνευτές. Η παραγωγή τους γίνεται από κατασκευαστικές βιομηχανίες ημιαγωγών όπως η *Hamamatsu Photonics K.K.* Ο στόχος είναι η επίτευξη λεπτότερου ενεργού πάχους στους ανιχνευτές (η περιοχή μεταξύ των ηλεκτροδίων και του στρώματος *field-stop*). Γενικότερα το πάχος του *field-stop* είναι τη τάξεως περίπου του 1  $\mu\text{m}$ . Για να επιτευχθεί λεπτότερο ενεργό πάχος εφαρμόζονται διαφορετικές τεχνικές κατασκευής όπου το στρώμα *field-stop* φτάνει στα 20-30  $\mu\text{m}$  [22]. Στο σχεδιασμό των δισκίων οι ανιχνευτές τοποθετούνται στο κέντρο ώστε να έχουν την μεγαλύτερη δυνατή επιφάνεια [16]. Στην περιφέρεια τοποθετούνται δομές δοκιμής και ελέγχου που ονομάζονται *Halfmoons* τα οποία περιλαμβάνουν μικροηλεκτρονικές διατάξεις και μικρο- ανιχνευτές *Εικόνα 3.7*.

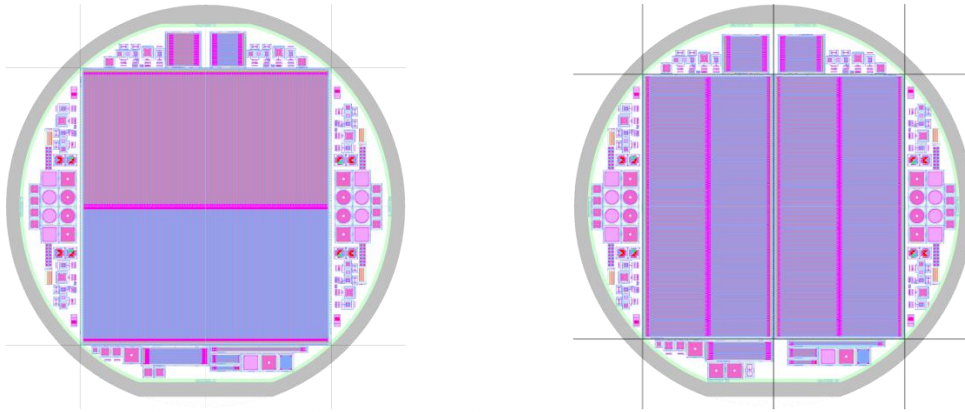


**Εικόνα 3.7:** Στο κέντρο του δισκίου βρίσκεται ο κύριος ανιχνευτής που θα χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή του τροχιοδεικτικού ανιχνευτή του πειράματος CMS/LHC στην φάση αναβάθμισης HL-LHC. Στην περιφέρεια βρίσκονται τα *Halfmoons* που χρησιμοποιούνται για τον γρήγορο χαρακτηρισμό των ανιχνευτικών διατάξεων [16].

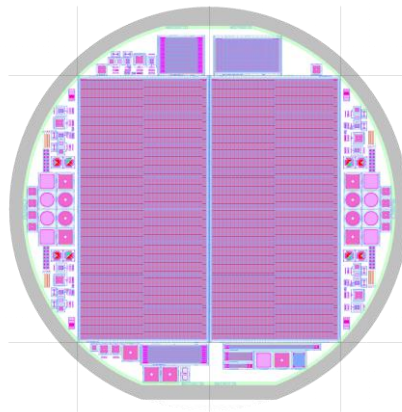
#### 2.3.2 Ειδή Ανιχνευτικών Διατάξεων Ανιχνευτή Τροχιών

Στον ανιχνευτή τροχιών χρησιμοποιούνται τρία μοντέλα ανιχνευτών οι 2-S , PSS και PSP . Οι διαφορές των διατάξεων είναι η διαφορετική γεωμετρία σχεδιασμού τους η οποία σχετίζεται με την διακριτική τους ικανότητα και την απόσταση του από το σημείο της κρούσης. Στο

εξωτερικό μέρος ( $r > 600$  mm) του εξωτερικού ανιχνευτή τροχιών τοποθετούνται οι ανιχνευτές 2-S (Εικόνα 3.10), ενώ στο εσωτερικό βρίσκονται οι PSS και τα δύο μοντέλα διατάξεων μοιράζονται τα ίδια γενικά χαρακτηριστικά. Η διαφορά μεταξύ τους είναι η διαστάσεις των μικρο-λωρίδων. Στον εσωτερικό ανιχνευτή τροχιών τοποθετούνται οι PSP ανιχνευτές με γεωμετρία μικρο-ψηφίδων. Οι ανιχνευτές 2-S με διαστάσεις  $10 \times 10$  cm<sup>2</sup> περιλαμβάνουν συνολικά  $2 \times 1016$  κανάλια από παράλληλες μικρο-λωρίδες ανάγνωσης. Το μήκος κάθε λωρίδας είναι στα 5 cm και οι αποστάσεις μεταξύ τους είναι 90 μm (pitch). Αντίστοιχα οι ανιχνευτές PSS (Εικόνα 3.10) με διαστάσεις  $10 \times 5$  cm<sup>2</sup> περιλαμβάνουν  $2 \times 960$  μακρο-ψηφίδων (λωρίδα- ψηφίδων) κανάλια, το μήκος κάθε λωρίδας είναι 2.35 cm και το pitch τους στα 100 μm. Τέλος οι ανιχνευτές PSP (Εικόνα 3.11) με διαστάσεις  $50 \times 50$  μm<sup>2</sup>. Οι αισθητήρες PSP τοποθετούνται στην περιοχή του εσωτερικού ανιχνευτή για  $r < 200$  mm οι οποίοι παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακριτική ικανότητα και στις τρεις διατάξεις για την ανίχνευση του φορτισμένου σωματιδίου [23]. Οι παραπάνω ανιχνευτές σχεδιάζονται πάνω στα δισκία πυριτίου με τις αντίστοιχες δομές ελέγχου για την διαδικασία του ποιοτικού ελέγχου.



**Εικόνα 3.10:** Διατάξεις δισκίων πυριτίου (wafers) ανιχνευτές 2-S (αριστερά) και PSS (δεξιά) του εξωτερικού ανιχνευτή τροχιών τύπου n-in-p.



**Εικόνα 3.11:** Διάταξη δισκίου πυριτίου (wafers) για ανιχνευτή PSP του εσωτερικού ανιχνευτή τροχιών τύπου n-in-p.

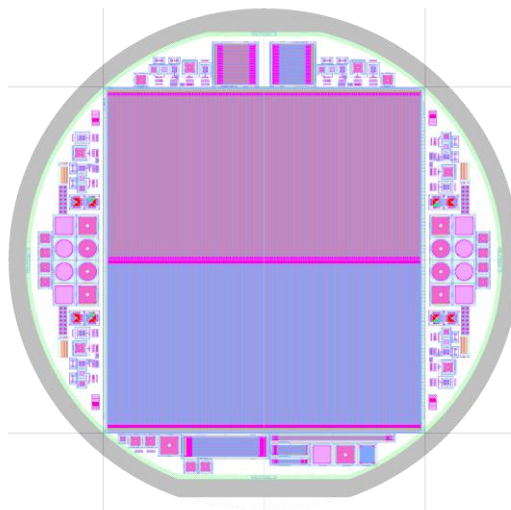
# Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>

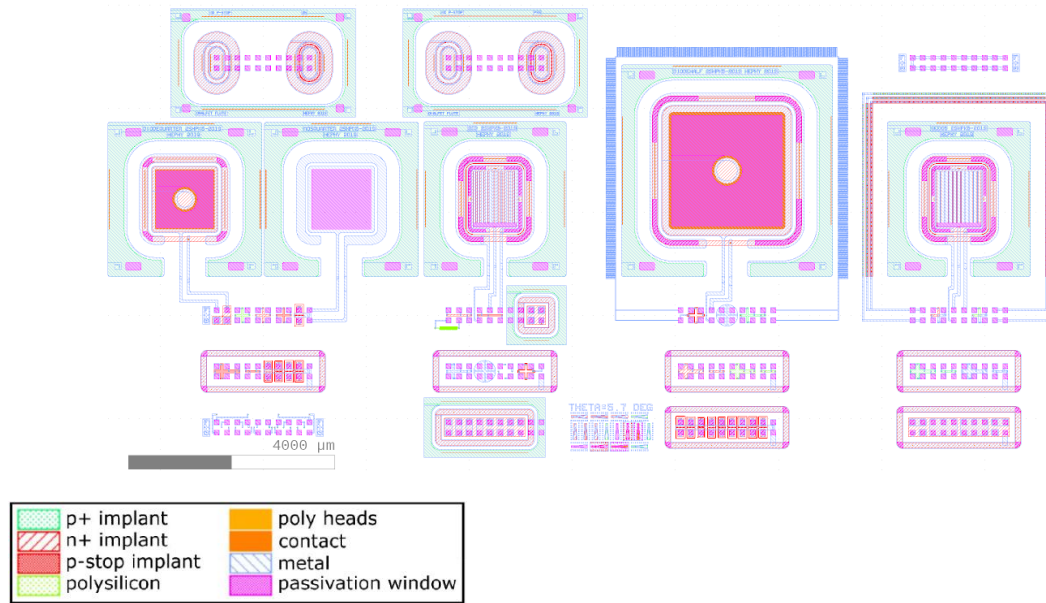
## Διαδικασία Ποιοτικού Ελέγχου Δοκιμίων

Ο ποιοτικός έλεγχος είναι μια απαραίτητη διαδικασία για το έλεγχο σταθερότητας και ποιότητας των ανιχνευτικών διατάξεων. Η διαδικασία του ελέγχου γίνεται σε δομές ελέγχου (test structures) οι οποίες έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τον κύριο ανιχνευτή που αναφέρεται στο κεφάλαιο 2. Μέσω των παραπάνω δομών εξάγονται σημαντικές παράμετροι για τον χαρακτηρισμό των ανιχνευτών, χωρίς να διακινδυνεύεται η μέτρηση αυτών των παραμέτρων στους ανιχνευτές αυτούς καθ' αυτούς. Ο έλεγχος και χαρακτηρισμός των ανιχνευτικών διατάξεων εφαρμόζεται στις δομές ελέγχου που ονομάζονται *Halfmoons* όπως έχει αναφέρεται στο κεφάλαιο 2. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται οι δομές που περιέχονται στα *Halfmoons*, οι παράμετροι και ο χαρακτηρισμός τους καθώς και τα μετρητικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για να γίνουν οι μετρήσεις στον χώρο του εργαστηρίου.

### 4.1 Halfmoons

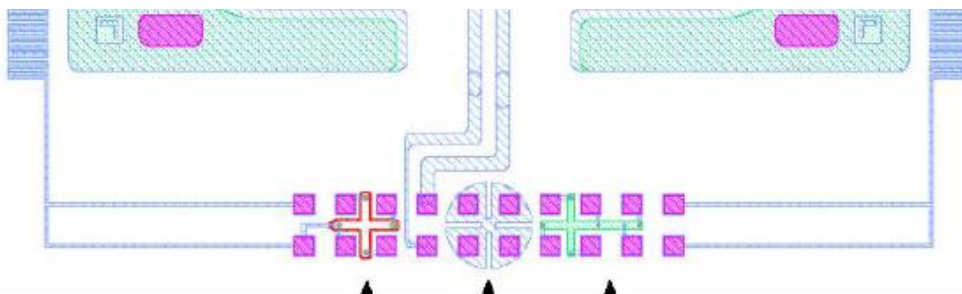
Οι δομές ελέγχου βρίσκονται στο ίδιο δισκίο πυριτίου (wafer) και παράγονται με τις ίδιες λιθογραφικές τεχνικές που παράγεται και ο κεντρικός ανιχνευτής. Τοποθετούνται στην περιφέρεια των δισκίων πυριτίου έτσι ώστε να αξιοποιείται ο κενός χώρος. Πάνω στα *Halfmoons* περιέχονται ημιαγωγικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται για τον αναλυτικό χαρακτηρισμό των ανιχνευτών *εικόνα 4.1*. Σε κάθε δισκίο πυριτίου τύπου p (όπως διακρίνεται από το χαρακτηριστική τομή στο κάτω μέρος του δισκίου) βρίσκονται έξι *Halfmoons* και καθένα από αυτά έχει την αντίστοιχη ονομασία ανάλογα με την θέση που είναι τοποθετημένο. Κατηγοριοποιούνται με τις ονομασίες East (δεξιά), West (αριστερά) και North (πάνω), South (κάτω).



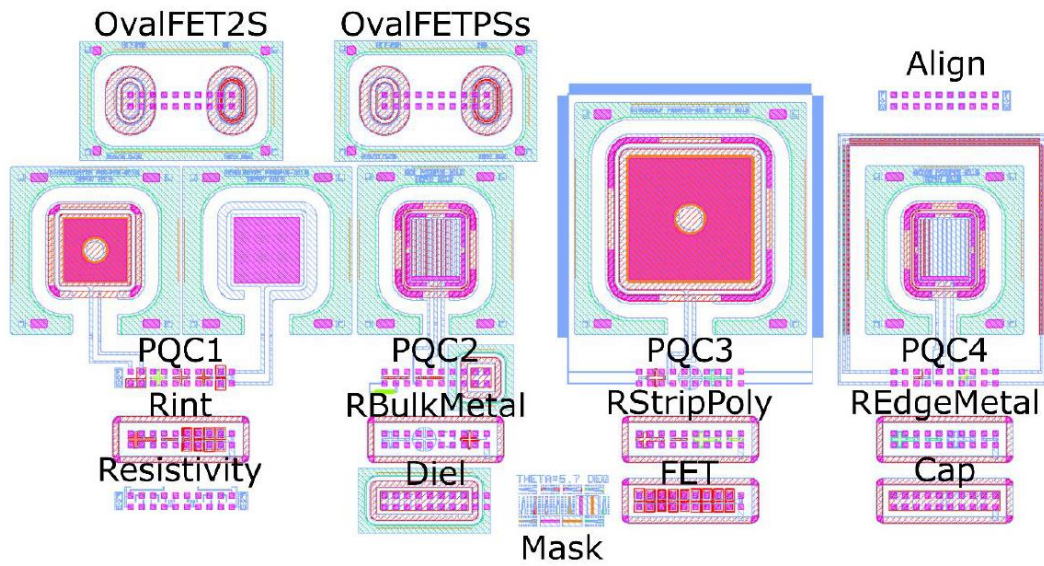


**Εικόνα 4.1:** Στην πάνω εικόνα απεικονίζεται ολόκληρο το δισκίο τύπου p και οι έξι (6) δομές *Halfmoon* στην περιφέρεια (από μια δομή αριστερά και δεξιά και από δύο δομές πάνω και κάτω από τον κεντρικό ανιχνευτή). Στην κάτω εικόνα απεικονίζονται οι ημιαγωγικές δομές που βρίσκονται σε ένα αριστερό ή δεξιό *Halfmoon* (West ή East). Οι δομές που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις είναι δίοδοι, τρανζίστορ MOSFET, πυκνωτές MOS και άλλου τύπου διατάξεις όπως Gate-Control-Diodes (GCD) και δομές Van der Pauw.

Οι μετρήσεις συλλέγονται μέσω ενός συστήματος που περιλαμβάνει 20 βελόνες (ηλεκτρόδια) που έρχονται σε επαφή με τις ημιαγωγικές διατάξεις μέσω διάταξης μικρών πλακιδίων (*flutes*) όπως φαίνεται στην εικόνα 4.2. Τα τέσσερα κύρια *flutes* που χρησιμοποιούνται αναφέρονται ως “PQC Flutes” (εικόνα 4.3) και με αυτά πραγματοποιούνται δύο τύποι μετρήσεων : μετρήσεις “Quick Flutes” και μετρήσεις “Extended Flutes”. Από τις πρώτες εξάγονται βασικές παράμετροι για τον άμεσο ποιοτικό έλεγχο των ανιχνευτών και αναφέρονται ως “PQC flute 1” και “PQC flute 2” αντίστοιχα. Από το δεύτερο σετ μετρήσεων εξάγονται επιπλέον παράμετροι που αναφέρονται αντίστοιχα ως “PQC flute 3” και “PQC flute 4”.



**Εικόνα 4.2:** Αντιπροσωπευτικό παράδειγμα διάταξης μικρών πλακιδίων που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις και τον χαρακτηρισμό παραμέτρων του ανιχνευτή.

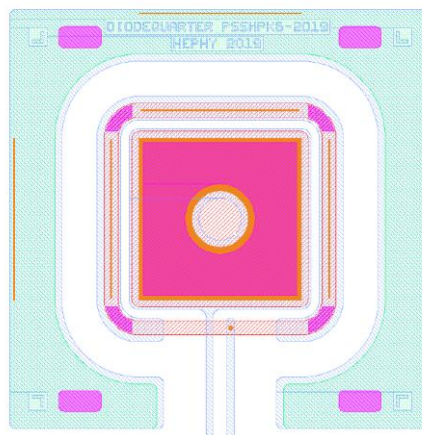


**Εικόνα 4.3:** Οι βασικές διατάξεις πλακιδίων (PQC1, PQC2, PQC3 και PQC4) που χρησιμοποιούνται για τις μετρήσεις με τις αντίστοιχες συνδέσεις τους στις υπό μελέτη ηλεκτρονικές δομές.

## 4.2 Ηλεκτρονικές Δομές και Χαρακτηρισμός των Παραμέτρων τους

### 4.2.1 Δίοδος

Οι επαφές p-n είναι από τις σημαντικότερες δομές και αποτελούν θεμέλιο λίθο για τις εφαρμογές στην φυσική υψηλών ενεργειών. Στα *Halfmoons* συνδέονται δύο δίοδοι στα flute 1 και flute 3 με διαστάσεις  $1.25 \times 1.25 \text{ mm}^2$  (quarter-sized diode, εικόνα 4.4) και  $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$  (half-sized diode) αντίστοιχα.



**Εικόνα 4.4:** Σχέδιο Διόδου με διαστάσεις  $1.25 \times 1.25 \text{ mm}^2$  (quarter-sized diode) .

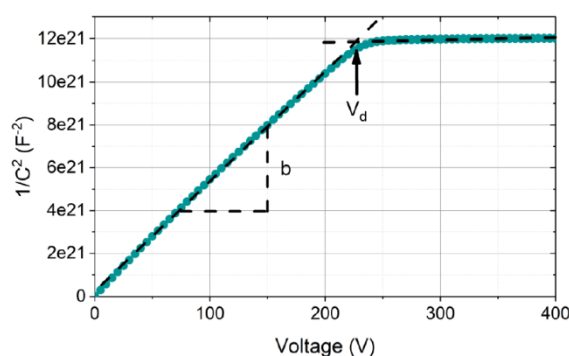
#### 4.3.1.1 Χαρακτηριστικά Διόδου

##### Ρεύμα Διαρροής

Στην δίοδο εφαρμόζεται ανάστροφη πόλωση με αποτέλεσμα να εμφανίζεται ρεύμα διαρροής. Η ύπαρξη του συσχετίζεται με δύο φαινόμενα. Το πρώτο φαινόμενο αφορά την διάχυση των φορέων μειονότητας από τις ουδέτερες περιοχές προς την περιοχή απογύμνωσης και το δεύτερο σχετίζεται με ζεύγη ηλεκτρονίων-οπών που γεννιούνται στο εσωτερικό της περιοχής απογύμνωσης. Ειδικά μετά από ακτινοβόληση το ρεύμα διαρροής αυξάνεται δραστικά. Ο προσδιορισμός του ρεύματος διαρροής είναι σημαντικός για την σωστή λειτουργία του ανιχνευτή καθώς επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό η αναλογία θορύβου-σήματος και επομένως η προ ενισχυτική ηλεκτρονική διάταξη. Ο υπολογισμός του ρεύματος διαρροής γίνεται με τον προσδιορισμό της καμπύλης ρεύματος-τάσης (I-V). Η διαδικασία της μέτρησης γίνεται με τη εφαρμογή τάσης από 0 μέχρι 1000V με βήμα 10V και σχεδιάζοντας την καμπύλη I-V. Μέσω της οποίας εξάγεται η τιμή του ρεύματος στα 600 V. Το αποτέλεσμα  $I(600\text{ V})$  ανά μονάδα όγκου θα πρέπει να βρίσκεται κάτω από το όριο  $< 2.5\text{ nA/mm}^2$ .

##### Τάση Απογύμνωσης και Αντίσταση

Όπως και με το ρεύμα διαρροής η τάση απογύμνωσης επηρεάζει την απόδοση του ανιχνευτή υπό συνθήκες ακτινοβόλησης (η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ανιχνευτική διάταξη αναφέρεται αναλυτικότερα στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο). Από την καμπύλη χωρητικότητας-τάσης (C-V) υπολογίζεται η τάση απογύμνωσης  $V_{dp}$  (**Full Depletion Voltage**). Η διαδικασία της μέτρησης γίνεται με την εφαρμογή ανάστροφης πόλωσης στην δίοδο από 0 μέχρι 500 V με βήμα 5 V. Ο υπολογισμός της παραμέτρου εξάγεται απ' τον σχεδιασμό της καμπύλης  $1/C^2$  με την εφαρμοζόμενη τάση. Με την εφαρμογή δύο εφαπτόμενων όπως φαίνεται στην εικόνα 4.5, η προβολή του σημείου τομής τους στον άξονα της τάσης είναι η τάση απογύμνωσης.



**Εικόνα 4.5:** Η καμπύλη  $1/C^2$ -V από την οποία υπολογίζεται η τάση απογύμνωσης ως το σημείο τομής των δύο εφαπτόμενων ευθειών.

Η συμπεριφορά της δίοδου είναι παρόμοια με αυτή ενός πυκνωτή παράλληλων πλακών, όπου η περιοχή απογύμνωσης φέρεται ως διηλεκτρικό υλικό μεταξύ των n και p ηλεκτροδίων. Η χωρητικότητα του πυκνωτή δίνεται από την σχέση,

$$C = \frac{A\epsilon_{si}}{d} \quad (4.1)$$

Όπου  $d$  το ενεργό πάχος της περιοχής απογύμνωσης και  $\epsilon_{si}$  διηλεκτρική σταθερά του Πυριτίου και  $A$  η επιφάνεια της δίοδου.



Το σχήμα της διόδου είναι τετραγωνικό με πλευρές  $a$ , όμως οι γωνίες είναι στρογγυλές. Γύρω από την διόδο υπάρχει ένας περιφερειακός δακτύλιος (guard ring) τύπου  $n^+$ , συνεπώς η χωρητικότητα αποτελείται από το άθροισμα της επίπεδης  $C_{\text{planar}}$  και περιφερειακής  $C_{\text{edge}}$  διόδου. Θα πρέπει να υπολογιστεί η χωρητικότητα της διόδου λαμβάνοντας υπόψιν την διόρθωση ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια των παραμέτρων.

$$C = a^2 C_{\text{planar}} + 4a C_{\text{edge}}, \text{ όπου } a \text{ η πλευρά της διόδου.}$$

Οι χωρητικότητες  $C_{\text{planar}}$  και  $C_{\text{edge}}$  έχουν μονάδες χωρητικότητας ανά επιφάνεια και χωρητικότητας ανά μήκος αντίστοιχα. Για καλύτερη συμπεριφορά της διόδου ο περιφερειακός δακτύλιος γειώνεται ώστε η περιφερειακή συνεισφορά ( $C_{\text{edge}}$ ) να είναι αμελητέα.

Από την σχέση 1.17 του 1<sup>ου</sup> κεφαλαίου η χωρητικότητα εκφράζεται συναρτήσει της τάσης πόλωσης.

$$C = A \sqrt{\frac{q \epsilon_s N_{\text{sub}}}{2}} (V_{bi} - V)^{-\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Όπου  $N_{\text{sub}}$  είναι η συγκέντρωση των φορέων του υποστρώματος και ταυτίζεται με την συγκέντρωση των αποδεκτών  $N_A$  για τα δοκίμια τύπου-p,  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $A$  η επιφάνεια της διόδου,  $V_{bi}$  το δυναμικό της επαφή p-n και  $V$  το δυναμικό της πόλωσης. Για  $V = V_{dp}$  η χωρητικότητα φτάνει στην ελάχιστη τιμή  $C_{\text{min}}$ . Από την παρακάτω σχέση προσδιορίζεται η συγκέντρωση των αποδεκτών,

$$N_A = \frac{2}{q \epsilon_s A^2 \frac{d(1/C^2)}{dV}} \quad (4.3)$$

όπου  $\frac{d(1/C^2)}{dV}$  είναι η κλίση της καμπύλης του σχήματος 4.5.

Για τον υπολογισμό της αντίστασης του υποστρώματος χρησιμοποιείται η σχέση,

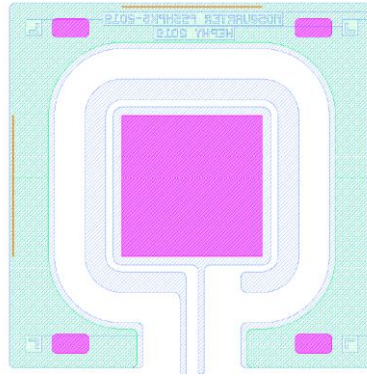
$$\rho = \frac{d^2}{2 \epsilon_{si} \mu_h V_{dp}} \quad (4.4)$$

Όπου  $\mu_h$  η κινητικότητα των οπών για δοκίμια τύπου-p και  $V_{dp}$  η τάση απογύμνωσης. Όμως θα πρέπει να προσδιοριστεί το ενεργό πάχος. Το  $d$  είναι στην ουσία το πλάτος της μέγιστης απογύμνωσης μέσα στον όγκο του ανιχνευτή.

Συνοπτικά από τις δομές διόδου εξάγονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες I-V και C-V. Μέσω της I-V εξάγεται το ρεύμα διαρροής στα 600 V (Leakage Current). Από την καμπύλη C-V υπολογίζεται η τάση απογύμνωσης (Full Depletion Voltage) και η ελάχιστη χωρητικότητα. Οι προηγούμενες παράμετροι χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της συγκέντρωσης του υποστρώματος, την αντίσταση και το ενεργό πάχος. [24]

## 4.2.2 Πυκνωτής MOS

Τα PQC flute 1 συνδέονται με διατάξεις MOS με διαστάσεις  $1.29 \times 1.29 \text{ mm}^2$  (quarter-sized MOS, εικόνα 4.5). Οι παράμετροι που εξάγονται από τις δομές MOS είναι η τάση επίπεδων ζωνών (Flat Band Voltage), η συγκέντρωση του οξειδίου, η χωρητικότητα απογύμνωσης καθώς και το πάχος του.

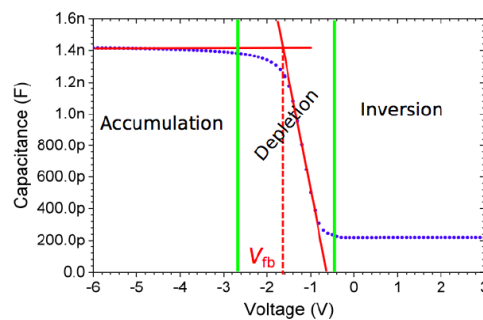


Εικόνα 4.5: Σχήμα δομής quarter-sized MOS.

#### 4.2.2.1 Χαρακτηριστικά Πυκνωτή MOS

##### Τάση Επίπεδων Ζωνών

Οι δομές MOS χρησιμοποιούνται για την μελέτη των ιδιοτήτων της διεπαφής ημιαγωγού-οξειδίου (Si-SiO<sub>2</sub>). Από τις μετρήσεις εξάγεται η χαρακτηριστική καμπύλη C-V από την οποία υπολογίζεται η τάσης επίπεδων ζωνών V<sub>fb</sub> (Flat Band Voltage). Η διαδικασία της μέτρησης γίνεται με την εφαρμογή τάσης στο MOS από -5 μέχρι 10 V με βήμα 0.1 V και η πύλη βρίσκεται σε γείωση. Στο διάστημα των -5 με 10 V διακρίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας (συσσώρευσης, απογύμνωσης και αναστροφής, εικόνα 4.6). Η ανάλυση για τον υπολογισμό της τάσης επίπεδων ζωνών V<sub>fb</sub> γίνεται με την εφαρμογή δύο μεθόδων. Στην πρώτη μέθοδο η V<sub>fb</sub> δίνεται από την προβολή του σημείου τομής δύο εφαπτόμενων που εφαρμόζονται στην περιοχή συσσώρευσης (Accumulation) και απογύμνωσης (Depletion). Στην δεύτερη μέθοδο υπολογίζεται το μέγιστο της πρώτης παραγώγου στην περιοχή απογύμνωσης όπου η προβολή του στον άξονα της τάσης είναι η V<sub>fb</sub>. Τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων είναι αποδεκτά [15].



Εικόνα 4.6: Χαρακτηριστική καμπύλη C-V της δομής MOS. Γραφικά αναπαρίσταται μια από τις μεθόδους υπολογισμού της τάσης επίπεδων ζωνών (V<sub>fb</sub>) ως το σημείο τομής των εφαπτόμενων που φέρονται στην περιοχή συσσώρευσης (accumulation) και απογύμνωσης (depletion).

Μια ακόμα παράμετρος που εξάγεται από τη χαρακτηριστική καμπύλη είναι η χωρητικότητα του οξειδίου C<sub>ox</sub>. Υπολογίζεται μέσω της εφαπτόμενης με μηδενική κλίση στην περιοχή συσσώρευσης.

Από την σχέση 2.39 του 2<sup>ου</sup> κεφαλαίου μπορεί να υπολογιστεί το φορτίο του οξειδίου,

$$V_{FB} = \Phi_m - \Phi_s - \frac{Q_{ox}}{C_{ox}} \quad (4.5)$$

όπου  $\Phi_m$  και  $\Phi_s$  τα έργα εξόδου του μετάλλου και του ημιαγωγού αντίστοιχα. Στην περίπτωση όπου το μέταλλο είναι αλουμίνιο το έργο εξόδου του είναι 4.08 eV. Για τον ημιαγωγό το έργο εξόδου εξαρτάται από την θερμοκρασία και την συγκέντρωση των αποδεκτών  $N_A$ . Το έργο εξόδου του ημιαγωγού δίνεται από την παρακάτω σχέση,

$$\Phi_s = q\chi + \frac{E_g}{2} + kT \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (4.6)$$

όπου  $q$  το φορτίο του ηλεκτρονίου,  $\chi$  ηλεκτρονική συγγένεια (electron affinity),  $E_g$  το ενεργειακό χάσμα,  $N_A$  η συγκέντρωση των φορέων του υποστρώματος (αποδεκτών),  $n_i$  η ενδογενής συγκέντρωση. Με τυπικές τιμές είναι  $\chi = 4.05$  eV,  $E_g = 1.12$  eV για τη περίπτωση πυριτίου,  $N_A = 5 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$  και  $n_i$  η ενδογενής συγκέντρωση που έχει εξάρτηση από την θερμοκρασία δίνεται από την ακόλουθη σχέση,

$$n_i = 1.821 \times 10^{15} T^{1.699} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) [25] \quad (4.6.1)$$

όπου  $k$  η σταθερά Boltzmann,  $T$  η θερμοκρασία και  $E_g$  το ενεργειακό χάσμα

Η συγκέντρωση του οξειδίου δίνεται από την σχέση,

$$N_{ox} = \frac{C_{ox}}{qA_{gate}} (\Phi_{ms} - V_{FB}) \quad (4.7)$$

όπου  $C_{ox}$  η χωρητικότητα του οξειδίου και  $A_{Gate}$  η επιφάνεια της πύλης. Τυπική τιμή για το  $\Phi_{ms} = \Phi_m - \Phi_s = -0.68$  eV.

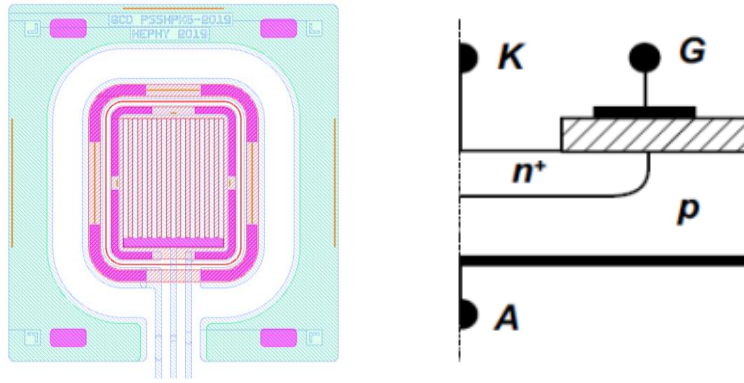
Τέλος το πάχος του οξειδίου προσδιορίζεται από,

$$t_{ox} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A_{Gate}}{C_{ox}} \quad (4.8)$$

Όπου το  $\epsilon_r$  η διηλεκτρική τιμή του οξειδίου με τιμή 4.9.

### 4.2.3 Gate-Controlled-Diode (GCD)

Οι δομές Gate-Controlled-Diode (GCD) είναι σχετικά πρόσφατες διατάξεις, αποτελούνται από το συνδυασμό επαφών p-n και πυκνωτών MOS (εικόνα 4.7). Τα PQC flute 2 και PQC flute 4 συνδέονται με δομές GCD, στην δομή του flute 4 η πύλη έχει μεγαλύτερο πλάτος σε σχέση με αυτή του flute 2. Οι συγκεκριμένες δομές χρησιμοποιούνται για την μελέτη των επιφανειακών φαινομένων όπως το επιφανειακό ρεύμα και η πυκνότητα των παγίδων διεπαφής του οξειδίου. Ο σχεδιασμός τους περιλαμβάνει n+ λωρίδες εμφυτευμένες σε υπόστρωμα τύπου-p και μεταλλικές λωρίδες αλουμινίου οι οποίες έρχονται σε επαφή με το υπόστρωμα και τα εμφυτεύματα.

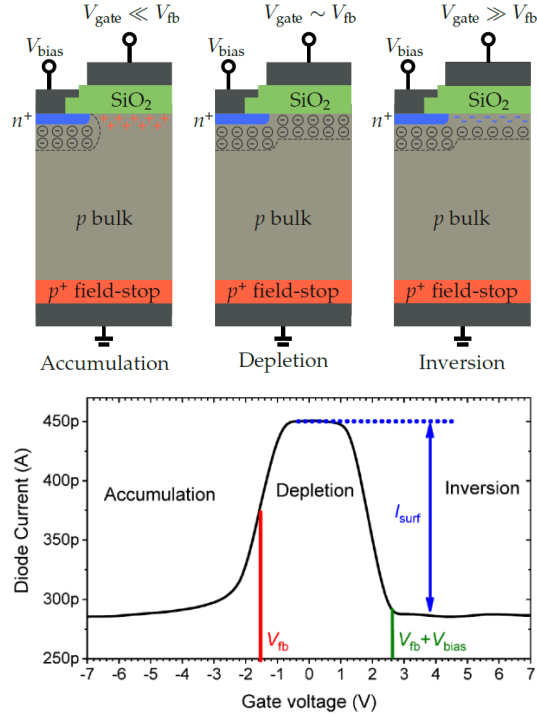


**Εικόνα 4.7:** Σχέδιο της δομής GCD (Gate-Controlled-Diode). Στην δεξιά εικόνα απεικονίζεται η διατομή της δομής GCD. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί είναι ο συνδυασμός μιας επαφής n+-p και μίας δομής MOS.

#### 4.2.3.1 Χαρακτηριστικά GCD

##### Επιφανειακό Ρεύμα και Επιφανειακή Ταχύτητα Φορέων

Η δομή GCD έχει τις ίδιες περιοχές λειτουργίας με έναν πυκνωτή MOS. Για τις ανάγκες των μετρήσεων εφαρμόζεται σταθερή ανάστροφη πόλωση στην διόδο και μεταβαλλόμενη τάση στην πύλη. Η διαδικασία της μέτρησης γίνεται με εφαρμογή τάσης  $-5\text{ V}$  στην διόδο και γείωση στο στρώμα της επίστρωσης  $p^+$  στο κάτω μέρος της διάταξης (backplane). Στην πύλη εφαρμόζεται τάση από  $+10$  μέχρι  $-10\text{ V}$  με βήμα  $0.1\text{ V}$ . Το μετρούμενο ρεύμα της διόδου  $I_{meas}$  αποτελείται από το ρεύμα στην επιφάνεια του οξειδίου  $I_{surf}$  και το ρεύμα γένεσης  $I_{bulk}$  από το υπόστρωμα εξαιτίας επαγόμενων φορέων φορτίου που δημιουργούνται, δηλαδή  $I_{meas} = I_{surf} + I_{bulk}$ . Μεταξύ της επαφής n-p δημιουργείται μια περιοχή απογύμνωσης σταθερού πλάτους. Καθώς η τάση στην πύλη μεταβάλλεται εμφανίζονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της GCD όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.8. Η αρχική περιοχή που εμφανίζεται είναι η *Συσσώρευση* (Accumulation), στην οποία ένα στρώμα από θετικά φορτία συσσωρεύεται κάτω από την επιφάνεια του οξειδίου. Όταν η τάση της πύλης είναι πολύ μικρότερη από την τάση επίπεδων ζωνών ( $V_{gate} \ll V_{FB}$ ) το ρεύμα που επικρατεί είναι το ρεύμα γένεσης. Όταν η τάση της πύλης είναι συγκρίσιμη με την τάση επίπεδων ζωνών ( $V_{gate} \sim V_{FB}$ ) η διάταξη περνάει στην περιοχή *Απογύμνωσης* (Depletion). Η περιοχή απογύμνωσης εκτείνεται κάτω από το οξείδιο και το συνολικό ρεύμα αυξάνεται κατακόρυφα. Με την περαιτέρω αύξηση της τάσης στην πύλη το συνολικό ρεύμα μειώνεται ελαφρώς. Η συνεισφορά στο συνολικό ρεύμα γίνεται από το επιφανειακό και το ρεύμα γένεσης μέσα στην περιοχή απογύμνωσης της επαφής p-n. Για την περίπτωση όπου η τάση στην πύλη έχει αυξηθεί αρκετά πάνω από την τάση επίπεδων ζωνών ( $V_{gate} \gg V_{FB}$ ) τότε κάτω από το οξείδιο συσσωρεύονται ηλεκτρόνια και το συνολικό ρεύμα μειώνεται κατακόρυφα φτάνοντας σε μία σταθερή τιμή, σε αυτή την περίπτωση στο σύστημα δημιουργείται *Αναστροφή* (Inversion) [26].



**Εικόνα 4.8 :** Στην πάνω εικόνα παρουσιάζονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας της δομής GCD όταν η τάση της πύλης αυξάνεται. Στην κάτω εικόνα απεικονίζεται το διάγραμμα IV της δομής GCD.

Το επιφανειακό ρεύμα υπολογίζεται από την διαφορά μεταξύ του ρεύματος στην περιοχή απογύμνωσης  $I_{dep}$  και του ρεύματος στην περιοχή αναστροφής  $I_{inv}$ ,

$$I_{surf} = I_{dep} - I_{inv}.$$

Από την τιμή του παραπάνω υπολογίζεται η επιφανειακή ταχύτητα φορέων  $S_0$  από την σχέση,

$$S_0 = \frac{I_{surf}}{qn_i A} \quad (4.9)$$

όπου  $q$  το φορτίο,  $n_i$  η ενδογενής συγκέντρωση δίνεται από την σχέση 4.6.1 και  $A$  η επιφάνεια της GCD.

Μια ακόμα παράμετρος που προσδιορίζεται από την η επιφανειακή ταχύτητα φορέων  $S_0$  είναι η πυκνότητα των παγίδων διεπαφής  $D_{it}$  του πυριτίου με το οξείδιο. Από την σχέση,

$$D_{it} = \frac{S_0}{\sigma_s u_{th} \pi k T} \quad (4.10)$$

όπου  $u_{th}$  η μέση ταχύτητα ενός ελεύθερου φορέα μεταξύ δύο διαδοχικών συγκρούσεων με το ταλαντευόμενο πλέγμα (θερμικές ταλαντώσεις),  $\sigma_s$  η ενεργός διατομή των κέντρων παγίδευσης,  $k$  η σταθερά Boltzmann και  $T$  η θερμοκρασία.

## Ρεύμα Γένεσης και Χρόνος Ζωής

Το ρεύμα γένεσης  $I_{bulk}$  υπολογίζεται από την διαφορά του ρεύματος στην περιοχή απογύμνωσης  $I_{acc}$  με το ρεύμα στην περιοχή ισχυρής αναστροφής  $I_{inv}$ ,

$$I_{bulk} = I_{acc} - I_{inv}.$$

Με την χρήση του  $I_{bulk}$  υπολογίζεται ο χρόνος ζωής του ρεύματος από τις παρακάτω σχέσεις,

$$\tau_g = qn_i A \frac{(W_g - W_{g_0})}{I_{bulk}} \quad (4.11)$$

με  $W_g$  και  $W_{g_0}$  τα πλάτη της περιοχής απογύμνωσης με εφαρμογή πόλωσης  $V_{bias} \neq 0$  και  $V_{bias} = 0$  αντίστοιχα και  $I_{bulk}$  το ρεύμα γένεσης.

$$W_g = \sqrt{2 \frac{\epsilon_{Si}(V_{bias} + 2\Phi_F)}{qN_A}} \quad (4.12)$$

$$W_{g_0} = \sqrt{2 \frac{\epsilon_{Si}2\Phi_F}{qN_A}}.$$

Το  $\Phi_F$  είναι το δυναμικό Fermi που δίνεται από την σχέση,

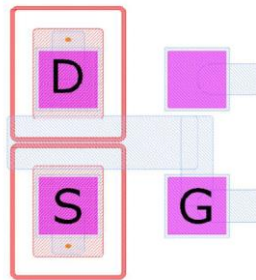
$$\Phi_F = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{ni}{N_A} \right) \quad (4.13)$$

όπου  $k$  η σταθερά Boltzmann και  $T$  η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin.

Με χρήση λογισμικού ανάλυσης η εξαγωγή του  $I_{surf}$  από την I-V γίνεται με δύο μεθόδους. Η πρώτη διαδικασία γίνεται υπολογίζοντας την διαφορά του μέγιστου σημείου της καμπύλης με την μέση τιμή των 20 τελευταίων σημείων από την περιοχή αναστροφής. Στην δεύτερη μέθοδο υπολογίζεται η μέση τιμή των σημείων της περιοχής απογύμνωσης αντί του μέγιστου σημείου της IV. Τα όρια των περιοχών λειτουργίας της GCD καθορίζονται από τον υπολογισμό της δεύτερης παραγώγου ώστε να προσδιοριστούν τα σημεία καμψής της IV. Σε αντιστοιχία το  $I_{bulk}$  προσδιορίζεται με την ίδια διαδικασία όπως στην δεύτερη μέθοδο του  $I_{surf}$  [26].

### 4.2.4 FET (Field-Effect-Transistor)

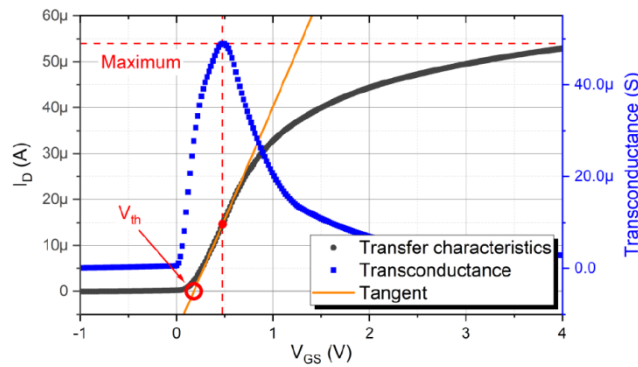
Οι δομές MOSFET χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των λωρίδων απομόνωσης (p-stops). Στο PQC flute 1 πάνω σε συγκεκριμένες επαφές της διάταξης μικρών πλακιδίων βρίσκεται μια δομή MOSFET (εικόνα 4.9).



**Εικόνα 4.9:** FET δομή πάνω στην διάταξη μικρών πλακιδίων.

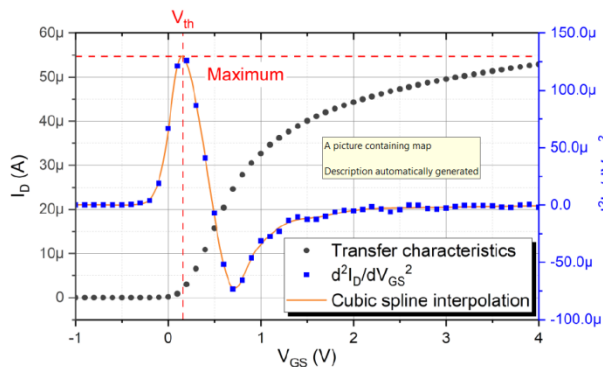
Για να προσδιοριστεί η χαρακτηριστική καμπύλη I-V του FET το στρώμα *backplane* και η πηγή (Source) συνδέονται με την γείωση. Η τάση που εφαρμόζεται στον απαγωγό (Drain) είναι  $V_{DS} = V_{drain} - V_{source} = 100\text{ mV}$ . Στην πύλη (Gate) εφαρμόζεται μεταβλητή τάση  $V_{GS}$  από  $-5$  μέχρι  $10\text{ V}$  με βήμα  $100\text{ mV}$ . Η παράμετρος που εξάγεται από την χαρακτηριστική καμπύλη είναι η τάση κατωφλίου  $V_{th}$  (Threshold Voltage). Η τάση κατωφλίου είναι η ελάχιστη τιμή που εφαρμόζεται ώστε να δημιουργηθεί κανάλι μεταξύ της πηγής και απαγωγέα.

Για την επεξεργασία των μετρήσεων εφαρμόζονται τρεις μέθοδοι ανάλυσης. Η πρώτη μέθοδος ELR (Extraction-Linear-Region) είναι η πιο συνηθής. Αρχικά υπολογίζεται το μέγιστο της πρώτης παραγώγου της καμπύλης I-V, όπου  $g_m = dI_{Drain}/dV_{GS}$  ονομάζεται διαγωγιμότητα. Στην καμπύλη I-V διέρχεται εφαπτόμενη ευθεία της οποίας η κλίση δίνεται από το μέγιστο της πρώτης παραγώγου. Το σημείο τομής της ευθείας με τον οριζόντιο άξονα αν προστεθεί η τιμή  $\frac{V_{DS}}{2}$  δίνει τη ζητούμενη τάση κατωφλίου [27].



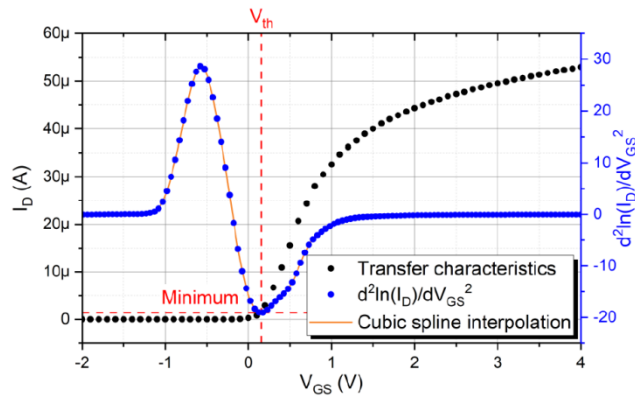
**Εικόνα 4.10:** Μέθοδος ELR.

Η επόμενη μέθοδος ονομάζεται SD (Second-Derivative), υπολογίζεται το μέγιστο της δεύτερης παράγωγου (η πρώτη παράγωγος της διαγωγιμότητας). Η τάση κατωφλίου  $V_{th}$  δίνεται από την προβολή του μεγίστου στον οριζόντιο άξονα [28].



**Εικόνα 4.11:** Μέθοδος SD.

Η τελευταία μέθοδος ονομάζεται SDL (Second-Derivative-Logarithmic) η τάση κατωφλίου καθορίζεται από τον υπολογισμό της παραγώγου του λογαρίθμου του  $I_D$ . Από το υπολογισμό του ελαχίστου της καμπύλης  $d \ln(I_D)/d V_{GS}$  με την τάση  $V_{GS}$  δίνεται η  $V_{th}$  [29].



Εικόνα 4.12: Μέθοδος SDL.

Ο όρος  $S = \frac{dV_G}{d \log(I_D)}$  ονομάζεται υποκατώφλι (subthreshold) και σχετίζεται με την πυκνότητα των παγίδων διεπαφής. Το υποκατώφλι δίνεται από,

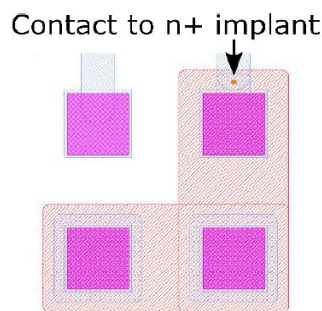
$$S = \frac{kT}{q} \left( 1 + \frac{C_D + C_{it}}{C_{ox}} \right) \ln(10) \quad (4.14)$$

όπου  $C_D$ ,  $C_{ox}$  και  $C_{it}$  οι χωρητικότητες της απογύμνωσης, του οξειδίου και των παγιδευμένων φορτίων στην διεπαφή αντίστοιχα. Η πυκνότητα των παγίδων χρησιμοποιώντας τις προηγούμενες δύο σχέσεις μπορεί να υπολογιστεί από,

$$D_{it} = \frac{C_{it}}{q} [12]. \quad (4.15)$$

#### 4.2.5 Πυκνωτές Σύζευξης (Coupling Capacitors)

Οι πυκνωτές σύζευξης (εικόνα 4.12) βρίσκονται στο PQC Flute 1 πάνω στην διάταξη μικρών πλακιδίων, παρόμοια με τις δομές FET. Μέσω των πυκνωτών εξάγονται η χωρητικότητα και το πάχος του οξειδίου. Η παράμετρος της χωρητικότητας είναι σημαντική καθώς σχετίζεται με τον θόρυβο που επάγει η σύζευξη AC (AC-Coupling) στα ηλεκτρονικά ανάγνωσης. Κατά την διαδικασία της μέτρησης εξάγεται η καμπύλη χωρητικότητας-τάσης (C-V). Η τάση που εφαρμόζεται είναι από -5 μέχρι 5 V με βήμα 0.1 V. Η χωρητικότητα προσδιορίζεται από την μέση τιμή των σημείων της μετρούμενη χωρητικότητας της καμπύλης C-V.

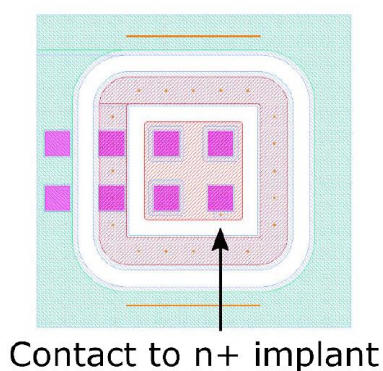


Εικόνα 4.12: Coupling Capacitors



#### 4.2.6 Διάσπαση Διηλεκτρικού

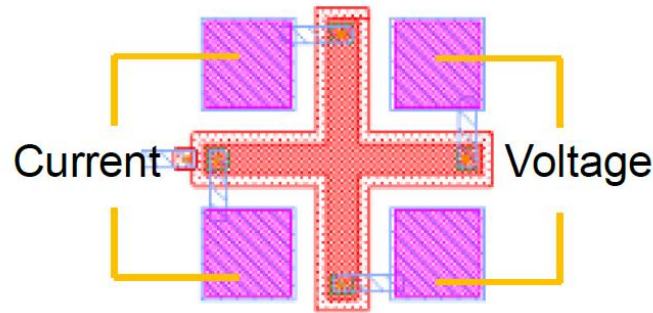
Η τάση διάσπασής του διηλεκτρικού υλικού είναι μια σημαντική παράμετρος για τον προσδιορισμό της σωστής λειτουργίας του ανιχνευτή. Από αυτή την διάταξη της εικόνας 4.13 προσδιορίζεται η μέγιστη τάση που μπορεί να εφαρμοστεί μεταξύ των ηλεκτροδίων  $n^+$  και των μεταλλικών επαφών μέχρι να διασπαστεί το διηλεκτρικό υλικό και να το διαπεράσει ρεύμα. Σε αντίθεση με την διάσπαση επαφής  $n$ - $p$  όπου το ρεύμα προέρχεται από φαινόμενα χιονοστιβάδας, τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων του διηλεκτρικού απομακρύνονται από τα άτομα εξαιτίας της υψηλής τάσης [10]. Η διαδικασία της μέτρησης εξελίσσεται με τα εμφύτευμα  $n^+$  να γειώνονται και με την εφαρμογή υψηλής τάσης στις μεταλλικές επαφές μέχρι 200 V και πάνω, η αύξηση της τάσης γίνεται με βήμα 10 V. Η μέτρηση σταματά όταν το ρεύμα φτάσει στο όριο και πραγματοποιηθεί διάσπαση. Η ανοχή του διηλεκτρικού στην υψηλή τάση θα πρέπει να τουλάχιστον 150 V.



Εικόνα 4.13: Διάταξη μικρών πλακιδίων για διάσπαση διηλεκτρικού.

#### 4.2.7 Διατάξεις Van Der Pauw

Η τεχνική Van Der Pauw εφαρμόζεται για μετρήσεις τεσσάρων επαφών. Η τεχνική μέτρησης της αντίστασης με την χρήση τεσσάρων επαφών εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της αντίστασης των δισκίων (wafers) και γενικότερα υλικών με γεωμετρία λεπτής ταινίας και χαμηλών τιμών αντίστασης. Η μέθοδος χρησιμοποιεί τέσσερα ηλεκτρόδια όπου στα δύο εφαρμόζεται ροή ρεύματος ενώ τα υπόλοιπα μετρούν την τάση. Για τον προσδιορισμό της αντίστασης του υλικού εξάγεται η καμπύλη  $I$ - $V$  μέσω της οποίας υπολογίζεται η αντίσταση. Στην συνέχεια η διαδικασία επαναλαμβάνεται επιλέγοντας διαφορετικές επαφές. Στα *flutes* υπάρχουν διατάξεις Van-der-Pauw με διαφορετικές γεωμετρίες για τον υπολογισμό σημαντικών παραμέτρων αντίστασης όπως των εμφυτευμάτων  $n^+$ , των  $p$ -stops, του αλουμινίου και του πολυκρυσταλλικού αντιστάτη.



Εικόνα 4.13: Διάταξη Van Der Pauw με γεωμετρία σταυρού.

### Αντίσταση Ταινίας (Sheet Resistance)

Η αντίσταση ταινίας  $R_{sheet}$  αναφέρεται σε υλικά που αποτελούνται από πολύ λεπτές επιφάνειες. Η  $R_{sheet}$  σχετίζεται με την ειδική αντίσταση μέσω της σχέσης,

$$R_{sheet} = \frac{\rho}{t} \quad (4.15)$$

Όπου  $\rho$  η ειδική αντίσταση και  $t$  το πάχος της επιφάνειας. Οι μονάδα μέτρησης της  $R_{sheet}$  είναι μονάδες αντίστασης ανά τετράγωνο (Ohm /square). Η αντίσταση υπολογίζεται από,

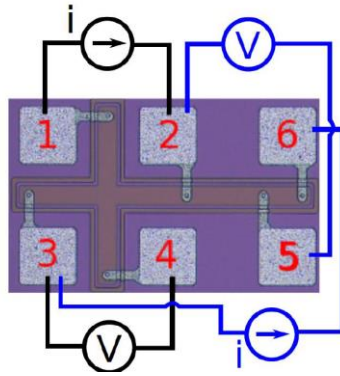
$$R = R_{sheet} \frac{L}{W} \quad (4.16)$$

Η μονάδα square ή sq αναφέρεται ως ο λόγος μήκους προς πλάτος της μετρούμενης επιφάνειας  $\frac{L}{W}$ .

Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4.14) απεικονίζεται μια διάταξη VDP σταυρού-γέφυρας (Cross-Bridge) με 6 επαφές. Ο υπολογισμός της  $R_{sheet}$  για ρεύμα που διέρχεται από τις επαφές 1 και 2 και τάση που εφαρμόζεται στις 3 και 4 δίνεται από,

$$R_{sheet} = \frac{\pi}{\ln(2)} \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (4.17)$$

Στις παρούσες διατάξεις δεν απουσιάζουν επιφανειακές διαρροές κατά την μέτρηση από ατέλειες που υπάρχουν στις επαφές. Για αυτό τον λόγο εφαρμόζονται δύο είδη μετρήσεων οι κανονικές (standard) και οι περιστρεφόμενες (rotated). Όπου στις πρώτες επιλέγονται οι αντίστοιχες επαφές όπως στην σχέση 4.17 ενώ για τις περιστρεφόμενες ο λόγος τάσης προς ρεύμα θα είναι  $V_{13}/I_{24}$ . Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται ώστε να ελαχιστοποιούνται λάθη κατά την μέτρηση, η τιμή της αντίστασης υπολογίζεται από την μέση τιμή των δύο μετρήσεων [30].



**Εικόνα 4.14:** Cross-Bridge Van-der-Pauw. Το αριστερό μέρος ονομάζεται σταυρός οπού συνδέεται το μαύρο κύκλωμα, σε αυτή τη δομή προσδιορίζονται οι παράμετροι της επιφανειακής αντίστασης

### Πλάτος Λωρίδας (Linewidth)

Για τον υπολογισμό του πλάτους (Linewidth) χρησιμοποιούνται διατάξεις όπως αυτής της εικόνας 4.14, το δεξιό μέρος της ονομάζεται γέφυρα. Όπως και στην διάταξη σταυρού για την αντίσταση ταινίας έτσι και σε αυτήν πραγματοποιούνται μια κανονική και μια περιστρεφόμενη μέτρηση για την παράμετρο του πλάτους. Το πλάτος για standard μετρήσεις καθορίζεται από την σχέση,

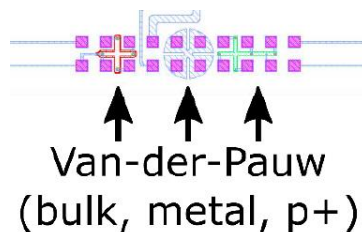
$$w = \frac{R_{sh} d_{25} I_{36}}{V_{25}} \quad (4.18)$$

Όπου  $d_{25}$  η απόσταση μεταξύ των επαφών 2 και 5,  $R_{sh}$  η επιφανειακή αντίσταση,  $I_{36}$  το ρεύμα στις επαφές 3 με 6 και  $V_{25}$  η τάση στις επαφές 2 με 5.

Το πλάτος για rotated μετρήσεις καθορίζεται από την σχέση,

$$w = \frac{R_{sh} d_{23} I_{14}}{V_{23}} \quad (4.19)$$

Στο PQC Flute 1 υπάρχουν σταυροί Van der Pauw για μετρήσεις της αντίστασης ταινίας των εμφυτευμάτων polysilicon, p+ και p-stops. Ενώ στο PQC Flute 2 υπάρχουν δύο δομές linewidth για n+ και p-stop εμφυτεύματα. Επιπλέον δομές VDP βρίσκονται στο PQC Flute 3 για τον υπολογισμό την επιφανειακής αντίστασης του μετάλλου που ονομάζεται Clover-Shaped-Vdp εικόνα 4.15.



**Εικόνα 4.15:** PQC Flute 3, στα αριστερά υπάρχει μια δομή σταυρού VdP-Cross, στο μέσο λαμβάνει χώρα μια δομή Clover-Shaped-Vdp και στα δεξιά μια δομή Cross-Bridge.

Για τον προσδιορισμό της επιφανειακής αντίστασης και του πλάτους προσδιορίζεται η καμπύλη V-I. Σε αυτού του τύπου τις μετρήσεις η τάση είναι συναρτήσει του εφαρμοζόμενου ρεύματος. Η διαδικασία της μέτρησής για κάθε δομή γίνεται με τις παρακάτω ρυθμίσεις:

- Για τα *p-stops* η εφαρμογή ρεύματος είναι από -1μΑ μέχρι 1μΑ ή, με βήμα 50 nA.

-Για την αντιστάτη πολυκρυσταλλικού πυριτίου εφαρμόζεται ρεύμα από -10 μΑ μέχρι 10 μΑ με βήμα 500 nA.

-Για τα εμφυτεύματα n+ ρεύμα από -1 mA μέχρι 1 mA με βήμα 50 μΑ.

-Για τα εμφυτεύματα p+ ρεύμα από -10 μΑ μέχρι 10 μΑ με βήμα 500 nA.

-Για το αλουμίνιο εφαρμόζεται ρεύμα από -10 mA μέχρι 10 mA με βήμα 500 μΑ.

#### 4.2.8 Δομή Μαιάνδρου (Meander Structures)

Στα δισκία πυριτίου υπάρχουν επιπλέον δομές για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης οι οποίες ονομάζονται μαιάνδροι (meanders). Οι μαιάνδροι είναι σχεδιασμένοι με μεγάλη αναλογία μήκους προς πλάτος, κατά μήκος περιλαμβάνεται μεγάλος αριθμός αναδιπλώσεων (εικόνα 4.16). Οι επιφανειακές αντιστάσεις (Sheet Resistances) του αλουμινίου και του πολυκρυσταλλικού πυριτίου εξάγονται από δομές σαν και αυτές. Ο μεταλλικός μαιάνδρος αποτελείται από μια πλατιά λωρίδα αλουμινίου πλάτους 10 μm και περιέχει 12853 αναδιπλώσεις. Σε αντιστοιχία ο πολυκρυσταλλικός μαιάνδρος αποτελείται από μια λωρίδα πλάτους 5 μm και περιλαμβάνει 476 αναδιπλώσεις.

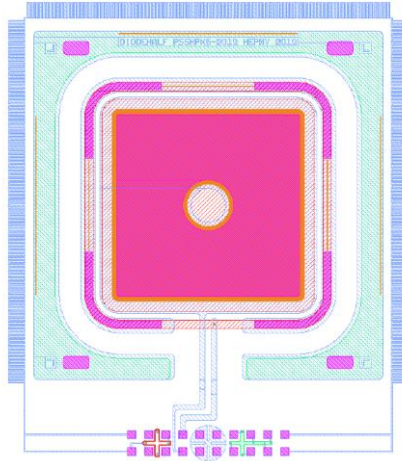
Η ειδική αντίσταση ανά τετράγωνο υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση,

$$\frac{\rho}{sq} = R \frac{w}{l} [Oh m/square] [30] \quad (4.20)$$

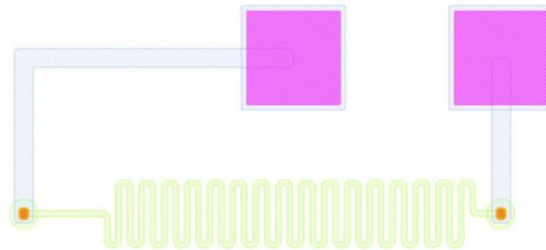
Όπου ο λόγος πλάτους-μήκους  $w/l$  είναι γνωστός και  $R$  η αντίσταση.

Η αντίσταση του μετάλλου εξάγεται από την καμπύλη I-V. Η μέτρηση γίνεται με την εφαρμογή της τεχνικής 4 επαφών, εφαρμόζεται ρεύμα από -1 mA μέχρι 1 mA με βήμα 50 μΑ. Η παράμετρος της επιφανειακής αντίστασης πρέπει να είναι κάτω από  $< 25 m\Omega/square$ . Όπου η μονάδα square αναφέρεται στον λόγο μήκους προς πλάτος  $\frac{l}{w}$ . Η παραπάνω διάταξη λαμβάνει χώρα στο PQC Flute 3.

Η αντίσταση του πολυκρυσταλλικού πυριτίου εξάγεται από την καμπύλη I-V. Η μέτρηση γίνεται με την εφαρμογή τάσης από -100 mV μέχρι 100 mV με βήμα 25 mV.



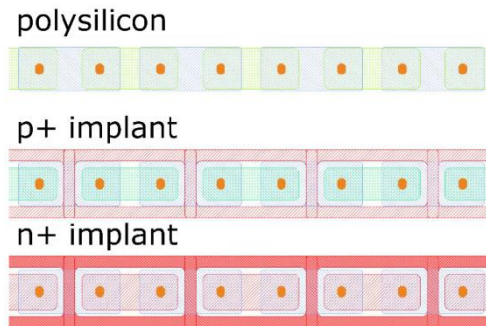
**Εικόνα 4.16 a :** Στην περιφέρεια της διόδου βρίσκεται η δομή του μεταλλικού μαιάνδρου. Η μέτρηση γίνεται στο PQC Flute 3.



**Εικόνα 4.16 b :** Η δομή του πολυκρυσταλλικής αντίστασης (polysilicon meander). Η μέτρηση γίνεται στο PQC Flute 2.

#### 4.2.9 Αλυσίδες Επαφής (Contact Chains)

Οι διατάξεις των αλυσίδων επαφής αξιοποιούνται με σκοπό τον έλεγχο των επαφών μετάλλου-ημιαγωγού. Οι μετρήσεις αφορούν τις επαφές Al-n<sup>+</sup>, Al-p<sup>+</sup> και Al-polysilicon. Μέσω αυτών των διατάξεων προσδιορίζεται η αντίσταση των παραπάνω επαφών. Στην περίπτωση όπου κάποια επαφή είναι ελαττωματική η αντίσταση της αλυσίδας αυξάνεται. Η δομή αποτελείται από επαναλαμβανόμενα στοιχεία (n<sup>+</sup>, p<sup>+</sup> ή polysilicon) που συνδέονται μέσω μεταλλικών γραμμών (συνδέσμων) που τοποθετούνται πάνω από τις δύο οπές επαφής των γειτονικών στοιχείων. Δεδομένου ότι η αντίσταση των μεταλλικών συνδέσμων αλουμινίου είναι πολύ χαμηλή μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Οι συγκεκριμένες διατάξεις περιτριγυρίζουν την δομή GCD του PQC Flute 4. Η διαδικασία της μέτρησης γίνεται με την χρήση 4 επαφών.

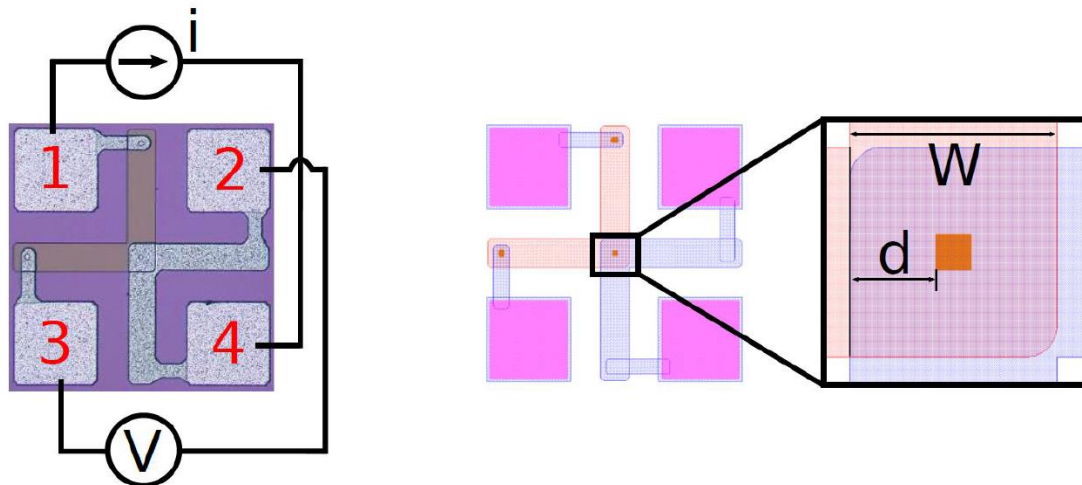


Εικόνα 4.17: Σχήμα των αλυσίδων επαφής.

#### 4.2.10 Διάταξη Σταυρού-Γέφυρας Kelvin (Cross Bridge Kelvin)

Η διάταξη τεσσάρων επαφών Cross-Bridge-Kelvin-Resistance (CBKR) εικόνα 4.18, συνήθως χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης επαφής μετάλλου-ημιαγωγού. Ως εναλλακτική τεχνική των διατάξεων αλυσίδας της προηγούμενης παραγράφου. Υπάρχουν δύο είδη διατάξεων για την μέτρηση της αντίστασης επαφής, μετάλλου-n+ και μετάλλου-polysilicon. Εφαρμόζεται ροή ρεύματος στις επαφές 1 με 4 και η τάση μετρείται από τις επαφές 2 και 3. Η αντίσταση επαφής υπολογίζεται από,

$R_c = \frac{V_{23}}{I_{12}}$  και η ειδική αντίσταση δίνεται από  $\rho_c = \frac{R_c}{A}$ , όπου  $A$  είναι η επιφάνεια της επαφής.



Εικόνα 4.18: Αριστερά απεικονίζεται η διάταξη CBKR. Στην δεξιά εικόνα στο κέντρο του σταυρού παρουσιάζεται η επικάλυψη του μετάλλου με τον ημιαγωγό σε μια επιφάνεια  $A = W \cdot d$ . Στο κέντρο της  $A$  βρίσκεται η επαφή.

Ωστόσο οι παραπάνω σχέσεις δεν είναι ακριβείς και για τον καλύτερο υπολογισμό της αντίστασης επαφής πρέπει να ληφθεί υπόψιν και η περιοχή επικάλυψης από την οποία διέρχεται ρεύμα. Οπότε η αντίσταση επαφής  $R_c$  δίνεται από,

$$R_c = R_k - R_{geom} = \frac{V_{23}}{I_{14}} - \frac{4R_{sh}d^2}{3w^2} \left(1 + \frac{d}{2(w-d)}\right) \quad (4.21)$$

Όπου  $R_k$  η μετρούμενη αντίσταση από τις αντίστοιχες επαφές  $\left(\frac{V_{23}}{I_{14}}\right)$ ,  $R_{geom}$  η αντίσταση λόγω της περιοχής επικάλυψης,  $R_{sh}$  η αντίσταση ταινίας  $w$  και  $d$  τα πραγματικό πλάτος και μήκος της επαφής [31].

Η καμπύλη IV εξάγεται με την εφαρμογή ρεύματος από -10  $\mu\text{A}$  μέχρι 10  $\mu\text{A}$  με βήμα 100 nA για την μέτρηση του πολυκρυσταλλικού πυριτίου. Για την μέτρηση επαφής p+ εφαρμόζεται ρεύμα από -100  $\mu\text{A}$  μέχρι 100  $\mu\text{A}$  με βήμα 1  $\mu\text{A}$ .

### 4.3 Συστήματα Εργαστηρίου

Τα κέντρα τα οποία πραγματοποιούν τον ποιοτικό έλεγχο της δεύτερης φάσης αναβάθμισης του πειράματος CMS/LHC βρίσκονται στην Αυστρία, Ιταλία, ΗΠΑ και Ελλάδα. Στην Ελλάδα το εργαστήριο το οποίο επιφορτιστεί με τον ποιοτικό έλεγχο είναι το εργαστήριο οργανολογίας του Ινστιτούτου Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ “Δημόκριτος”. Για την λήψη των δεδομένων από τις δοκιμαστικές δομές (που περιγράφηκαν παραπάνω) χρησιμοποιούνται: α) ένα σύστημα σταθμού μετρήσεων (probe-station), β) μια κάρτα PCB (probe card) με διάταξη ηλεκτροδίων που ακουμπάνε στα μικροπλακίδια που αναφέρονται παραπάνω, γ) ένα ηλεκτρονικό σύστημα ηλεκτρομηχανικών διακοπών που επιτρέπει την αυτόματη εναλλαγή των μετρήσεων, δ) μετρητικά όργανα τάσης, έντασης και χωρητικότητας και αγωγιμότητας μεγάλης ακρίβειας με αντίστοιχες πηγές τάσης και ρεύματος και ένα σύστημα συλλογής δεδομένων ανεπτυγμένο σε λογισμικό LabView.

#### 4.3.1 Σταθμός Μετρήσεων (Probe Station)

Ο σταθμός μετρήσεων είναι ένα σύστημα που πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Σε κάθε κέντρο ο σταθμός διαφέρει όμως η γενική λειτουργία είναι ίδια. Τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν τον σταθμό μετρήσεων είναι τα ακόλουθα:

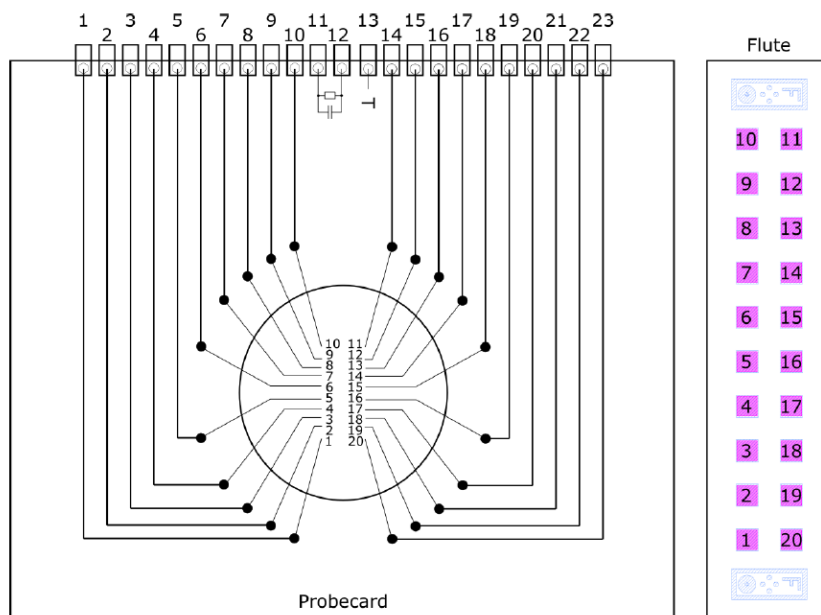
- Μια κάρτα PCB, η οποία αποτελείται από μια πλακέτα με 20 βελόνες-ηλεκτρόδια.
- Ένα μεταλλικό δίσκο (Chuck) με οπές κενού για την σταθεροποίηση του δείγματος πάνω δίσκο
- Ένα μικροσκόπιο για την χειροκίνητη ευθυγράμμιση των δειγμάτων με τα ηλεκτρόδια της κάρτας PCB.

#### 4.3.2 Κάρτα PCB (Probe Card)

Η κάρτα PCB αποτελείται από μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος PCB (Printed Circuit Board) με 20 ηλεκτρόδια τα οποία έρχονται σε επαφή με τις 20 πλακίδια του εκάστοτε PQC Flute κάθε δοκιμίου. Η πλακέτα έχει 23 εξόδους με τριαξονικά βύσματα LEMO, τα 20 βύσματα συνδέονται με τις αντίστοιχα ηλεκτρόδια ενώ τα υπόλοιπα συνδέονται με έναν ανιχνευτή θερμοκρασίας και υγρασίας και ένα δοκιμαστικό κύκλωμα RC με αντίσταση 100 M $\Omega$  και πυκνωτή 10 pF.



**Εικόνα 4.20:** Παραπάνω απεικονίζεται η κάρτα PCB με τα 20 ηλεκτρόδια.



**Εικόνα 4.21:** Σχηματικό συνδεσμολογίας κάρτας PCB.

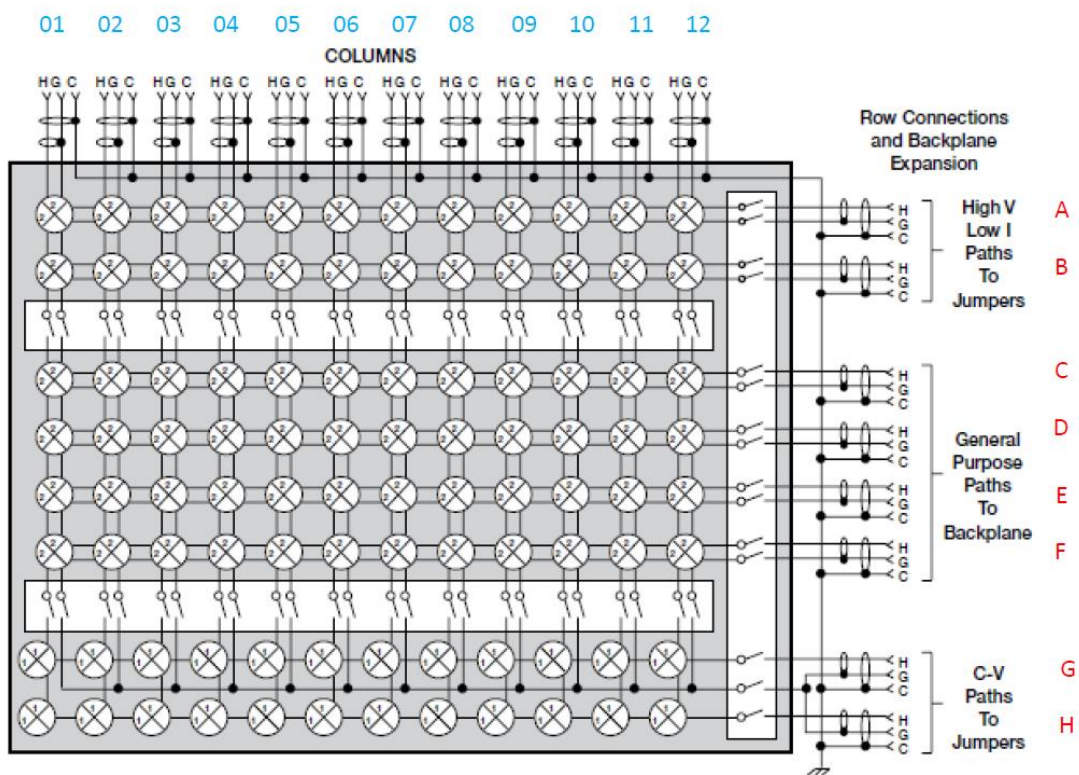
### 4.3.3 Σύστημα Ηλεκτρομηχανικού Δρομολογητή (Switching Matrix)

Η κάρτα PCB καθώς και τα χειροκίνητα συστήματα μετρήσεων συνδέονται με ένα σύστημα που αποτελείται από τρεις  $8 \times 12$  Keithley 707B matrix cards που αποτελούν το σύστημα ηλεκτρομηχανικού δρομολογητή. Το σύστημα αυτό επιτρέπει την γρήγορη και αυτόματη σύνδεση με τα μετρητικά όργανα για την πραγματοποίηση όλων των σεναρίων των μετρήσεων. Περιέχει επίσης μια κάρτα υψηλής τάσης  $8 \times 12$  High-voltage card 7072-HV και



για χαμηλής τάσης 8×12 “Low-voltage” Semiconductor card 7072. Κάθε κάρτα διαθέτει 8 γραμμές με αντίστοιχα σύμβολα από “A” μέχρι “H”, και 12 στήλες αριθμημένες από “1” μέχρι “12”. Τα όργανα συνδέονται με τις θύρες των 8 γραμμών, ενώ στις 12 στήλες γίνεται σύνδεση με τα ηλεκτρόδια της κάρτας PCB. Κάθε κανάλι μεταξύ γραμμών και στηλών αναγνωρίζεται μέσω αλφαριθμητικών χαρακτήρων τεσσάρων συμβόλων λόγου χάριν 1A12, 2D01 κ.τ.λ.

Όλες οι στήλες και οι γραμμές αντίστοιχα έχουν ως έξοδο τριαξονικά βύσματα. Όλα τα κανάλια του 7072 (Low Voltage) λειτουργούν για χαμηλές τάσεις < 200 V εκτός από τις γραμμές “A” και “B” εικόνα 4.22. Οι τελευταίες μπορούν να διατηρήσουν τάσεις της τάξεως του 1.3 kV. Οι γραμμές “A” και “B” της κάρτας 7072-HV είναι τα μοναδικά κανάλια που έχουν την ανοχή υψηλών τάσεων πάνω από 200 V σε οποιοδήποτε άλλο κανάλι αυτό θα είναι καταστροφικό. Τα κανάλια των γραμμών “C” μέχρι “F” είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους εξαρχής, αντίθετα τα “A” με “B” και “G” με “H” δεν είναι.



Εικόνα 4.22: Σχήμα κάρτας 7072-HV Switching Matrix.

Στα όργανα του εργαστηρίου περιλαμβάνονται επίσης δύο συστήματα που λειτουργούν ως πηγές τάσης ή ρεύματος και έχουν την δυνατότητα να μετρούν το ρεύμα και την τάση σε πραγματικό χρόνο. Τα όργανα αυτά είναι τα ακόλουθα:

**Keithley 2410** είναι ένα σύστημα το οποίο μπορεί να τροφοδοτήσει τάση από 5  $\mu$ V μέχρι 1.1 kV και ρεύμα από 50 pA μέχρι 1 A. Στον ίδιο χρόνο έχει την δυνατότητα να μετράει τάσεις από 1  $\mu$ V μέχρι 1.1 kV και ρεύμα από 10 pA μέχρι 1 A.

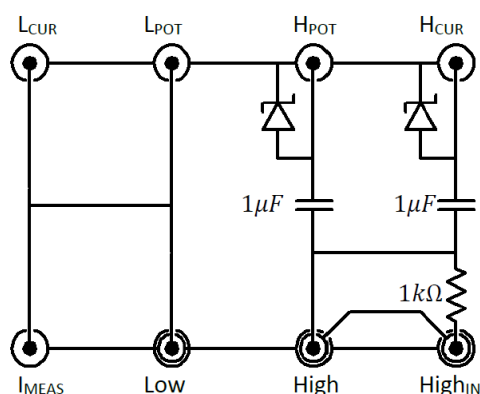
**Keithley 2400** το οποίο χρησιμοποιείται ως επιπλέον πηγή για συγκεκριμένες μετρήσεις. Τροφοδοτεί τάση από 5  $\mu\text{V}$  μέχρι 200 V και ρεύμα από 50 pA μέχρι 1A. Αντίστοιχα μετράει τάση στο εύρος 1  $\mu\text{V}$  μέχρι 200 V και ρεύμα από 10 pA μέχρι 1 A.

#### 4.3.4 Ηλεκτρόμετρο

Το ηλεκτρόμετρο (αναφέρεται και ως πικοαμπερόμετρο) χρησιμοποιείται για μετρήσεις ρεύματος υψηλής ακρίβειας. Το μοντέλο είναι το **Keithley 6485** και χρησιμοποιείται για μετρήσεις ρεύματος από 10 fA μέχρι 20 mA σε χρόνο 1000 αναγνώσεων ανά δευτερόλεπτο. Παράλληλα υπάρχει και το μοντέλο **Keithley 6517A** που είναι ηλεκτρόμετρο το οποίο παρέχει τάση από 5 mV μέχρι 1 kV και μετράει ρεύμα από 20 pA καθώς μπορεί να μετρήσει αντίσταση μέχρι 200 T $\Omega$ .

#### 4.3.5 LCR-meter

Για τον υπολογισμό της χωρητικότητας-αγωγιμότητας το όργανο που χρησιμοποιείται είναι το HP4284A το οποίο λειτουργεί σε συχνότητες από 20 Hz μέχρι 1 MHz και μέγιστο σήμα πλάτους μέχρι 1 V. Οι συχνότητες για τις ανάγκες της μέτρησης είναι από 1kHz μέχρι 10kHz με τυπικό πλάτος σήματος στα 250 mV. Το παρόν όργανο χρειάζεται ένα σύστημα αποσύζευξης (Iso Box) εικόνα 4.23 ώστε να επιτρέπει συνεχές ρεύμα πέρα από τα επιτρεπτό όριο του οργάνου των 40 V.



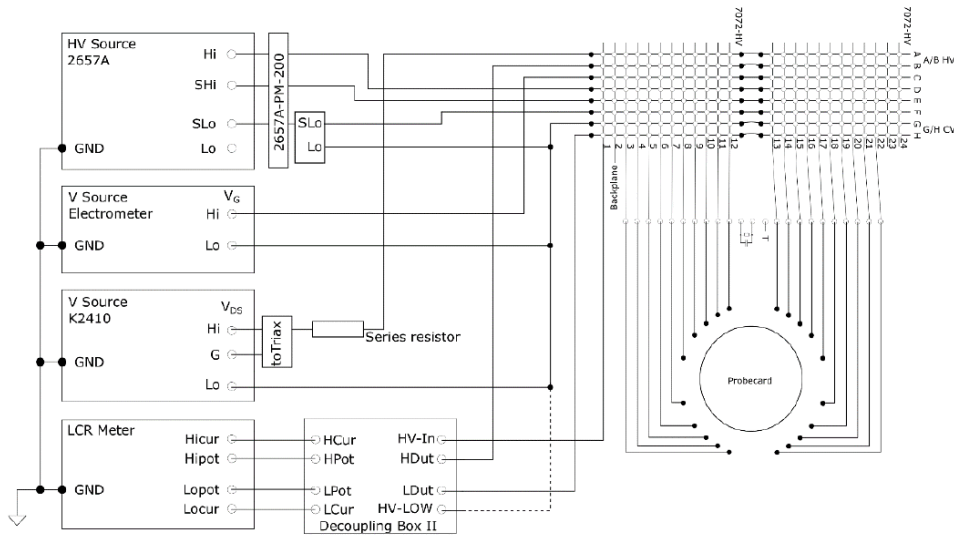
**Εικόνα 4.23:** Το Iso-box συνδέει την τάση του σήματος από τον μετρητή LCR σε κυκλώματα υψηλής τάσης ενώ προστατεύει τις εξόδους του οργάνου από υψηλή τάση με διόδους Zener.

#### 4.3.6 Λογισμικό Ελέγχου Των Μετρήσεων

Στα κέντρα ποιοτικού ελέγχου χρησιμοποιείται κατάλληλο λογισμικό ώστε να γίνεται σωστός χειρισμός του συστήματος αυτοματισμού. Σε όλα τα κέντρα οι προδιαγραφές είναι παρόμοιες και συνήθως το λογισμικό αναπτύσσεται με την χρήση LabView. Η διαδικασία του ποιοτικού ελέγχου γίνεται σε τρεις φάσεις, την απόκτηση δεδομένων (Data Acquisition), την ανάλυση (Data Analysis) και τέλος την εισαγωγή των δεδομένων σε μια κεντρική βάση δεδομένων (Database Interface) στο πείραμα.

Η απόκτηση δεδομένων αφορά την σύνδεση του λογισμικού με τον χειρισμό του σταθμού μετρήσεων και των οργάνων μέτρησης. Η αρχική διαδικασία είναι η ευθυγράμμιση των πλακιδίων του δείγματος με τα αντίστοιχα ηλεκτρόδια της κάρτας PCB μέσω

ηλεκτρονικού μικροσκοπίου και κατάλληλο χειρισμό του μεταλλικού δίσκου επαφής (chuck). Μετά την επίτευξη της ευθυγράμμισης, η διαδικασία λήψης των δεδομένων γίνεται αυτοματοποιημένα μέσω του σταθμού. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες των μετρούμενων δομών εξάγονται σε πραγματικό χρόνο με την χρήση σχετικού λογισμικού. Η ανάλυση των δεδομένων γίνεται με την χρήση παρόμοιων λογισμικών ανεπτυγμένα σε LabView, Python ή ROOT CERN σε περιβάλλον C++. Η περιγραφή του λογισμικού ανάλυσης δεδομένων γίνεται στο επόμενο κεφάλαιο.



Εικόνα 4.24: Συνδεσμολογία των οργάνων με τον Switching Matrix και την probe card.

#### 4.4 Περιβαλλοντικές συνθήκες

Οι σταθερές περιβαλλοντικές συνθήκες όπως θερμοκρασία και υγρασία παίζουν σημαντικό ρόλο στον χαρακτηρισμό των δομών. Οι θερμοκρασία μέσα στο περίβλημα του σταθμού μετρήσεων πρέπει να είναι στους  $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  και η αντίστοιχη σχετική υγρασία κάτω από το 30%. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στο γεγονός ότι η θερμοκρασία μιας δεδομένης μέτρησης πρέπει να παραμένει.

# Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup>

## Ανάπτυξη Λογισμικού για τον Χαρακτηρισμό Ανιχνευτών Πυριτίου

Στο προηγούμενο κεφάλαιο περιγράφηκε η διαδικασία λήψης δεδομένων μέσω του σταθμού μετρήσεων. Το επακόλουθο βήμα της προηγούμενης διαδικασίας είναι η ανάλυση δεδομένων μέσω κατάλληλου λογισμικού. Στο παρόν κεφάλαιο λαμβάνει χώρα μια αναλυτική περιγραφή της λειτουργίας του εν λόγω λογισμικού. Επιπλέον γίνεται παρουσίαση ενδεικτικών αποτελεσμάτων για τον χαρακτηρισμό ορισμένων δοκιμίων.

### 5.1 Λογισμικού Ανάλυσης Δεδομένων

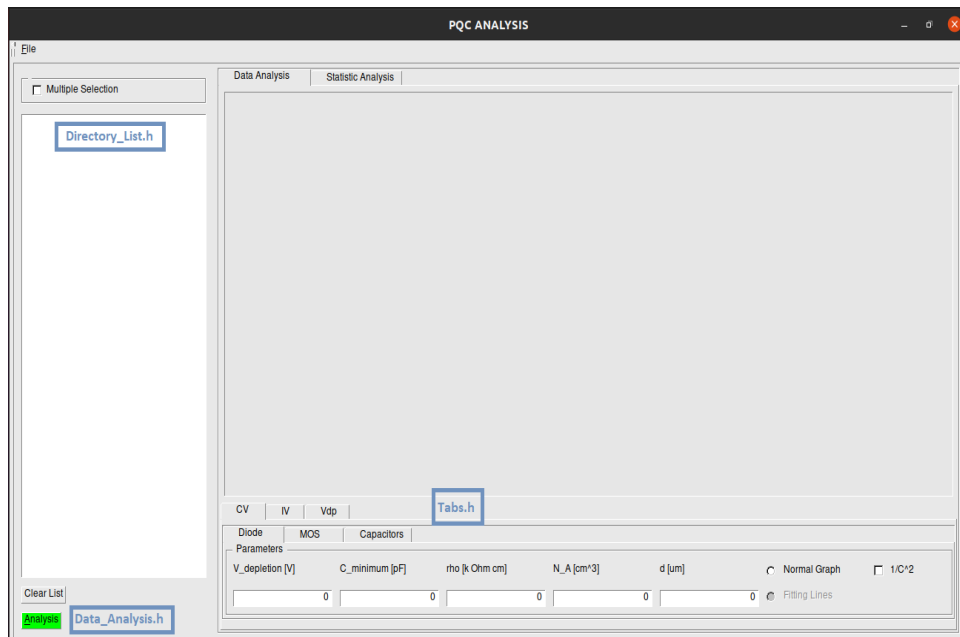
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας για τις ανάγκες του ποιοτικού ελέγχου αναπτύχθηκε κατάλληλο λογισμικό για την ανάλυση και τον χαρακτηρισμό των δοκιμίων. Ο σκοπός που εξυπηρετείται από το συγκεκριμένο λογισμικό είναι η διευκόλυνση του χρήστη ώστε να έχει την δυνατότητα να αναλύει γρήγορα και αποδοτικά τα δεδομένα που λαμβάνονται στο εργαστήριο. Η διαδικασία της ανάλυσης για κάθε μετρούμενη δομή δοκιμής θα αναλυθεί παρακάτω.

#### 5.1.1 Επιλογή Προγραμματιστικού Περιβάλλοντος

Το λογισμικό ανάλυσης αναπτύχθηκε σε περιβάλλον C++. Ένα ακόμη εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στον σχεδιασμό της εφαρμογής (λογισμικού Ανάλυσης) είναι το ROOT [32]. Το λογισμικό ROOT αποτελεί μια προγραμματιστική δομή που σχεδιαστική στο CERN για την επεξεργασία δεδομένων στα πλαίσια της πειραματικής φυσικής υψηλών ενεργειών. Το προγραμματιστικό περιβάλλον του είναι ανεπτυγμένο σε C/C++ και περιλαμβάνει βιβλιοθήκες με μαθηματικά και προγραμματιστικά εργαλεία για της ανάγκες του κλάδου. Μια ακόμη δυνατότητα που προσφέρεται από το συγκεκριμένο λογισμικό είναι οι βιβλιοθήκες γραφικού περιβάλλοντος για σχεδίαση και επεξεργασία διαγραμμάτων, εφαρμογών ακόμη και σχεδιασμού προσομοιώσεων.

#### 5.1.2 Παρουσίαση Λειτουργίας Λογισμικού

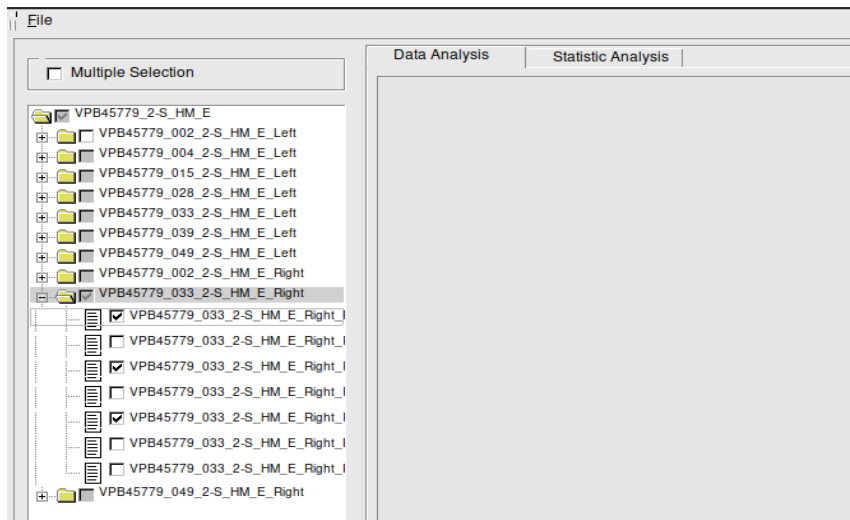
Το λογισμικό υποστηρίζεται σε περιβάλλον Linux και χρησιμοποιεί γραφικό περιβάλλον με το οποίο αλληλεπιδρά ο χρήστης. Είναι ένα λογισμικό ανοιχτού κώδικά ώστε να υπάρχει η δυνατότητα τροποποίησης σε οποιοδήποτε σημείο του κώδικα. Το γραφικό μέρος του λογισμικού αποτελείται από ένα αρχείο τύπου .cpp με την ονομασία PQC\_Program.cpp που αποτελεί το κύριο μέρος του κώδικα. Στο πάνω μέρος του αρχείου περιέχονται με την μορφή αρχείων επικεφαλίδας (Head Files) οι εφαρμογές του λογισμικού για την επεξεργασία και την ανάλυση. Τα ονόματα των παραπάνω αρχείων είναι Directory\_List.h, Data\_Analysis.h και Statistic\_Analysis.h. η περιγραφή τους γίνεται παρακάτω. Το λογισμικό αλληλεπιδρά με τον χρήστη μέσω ενός παραθύρου διαλόγου (εικόνα 5.1).



**Εικόνα 5.1:** Παράθυρο διαλόγου με τον χρήστη. Πάνω στην εικόνα αναγράφονται στα μπλε πλαίσια οι εφαρμογές με τις οποίες μπορεί να αλληλεπιδράσει ο χρήστης.

### 5.1.3 Περιγραφή του αρχείου Επικεφαλίδας Directory\_List.h

Στο αριστερό μέρος του παραθύρου διαλόγου της εικόνας 5.1 στο λευκό πλαίσιο υπάρχει μια δομή Λίστας-Δένδρου (List-Tree) η οποία παρέχεται από τις βιβλιοθήκες του ROOT. Στην παραπάνω δομή εισάγονται οι φάκελοι με τα αρχεία μετρήσεων σε μορφή ανάγνωσης (.txt) ταξινομημένοι κατά αλφαβητική σειρά. Μέσα στο κώδικα του Directory\_List.h περιέχεται ένα ακόμα αρχείο επικεφαλίδας με την ονομασία “Data\_Format.h” το οποίο ταξινομεί τα δεδομένα των μετρήσεων. Το “Data\_Format.h” κατηγοριοποιεί τα αρχεία των μετρήσεων ανά αριθμό δοκιμίων και τα αποθηκεύει σε μια δομή τύπου “struct” με την μορφή δυναμικά δεσμευμένου πίνακα-διάνυσμα (vector) με την αντίστοιχη ονομασία List\_Of\_Files. Στις θέσεις αυτού του διανύσματος αποθηκεύονται δεδομένα όπως το όνομα του δοκιμίου (λ.χ VPX37400\_2-S\_009\_HM\_W\_Left) σε μια αλφαριθμητική μεταβλητή (string), οι διευθύνσεις των αρχείων ανάγνωσης κάθε μετρούμενης ημιαγωγικής διάταξης και οι ονομασίες τους. Τα δύο προηγούμενα αποθηκεύονται σε δύο διανύσματα αλφαριθμητικού τύπου που ορίζονται μέσα στην δομή. Στην συνέχεια τα δεδομένα του List\_Of\_Files εισάγονται στην λίστα-δέντρο και εμφανίζονται σε γραφική μορφή στο λευκό πλαίσιο τις εικόνας 5.1. Στον χρήστη δίνεται η δυνατότητα να επιλέξει ένα ή περισσότερα δοκίμια για την ανάλυση. Η επιλογή των δοκιμίων γίνεται όταν τα κουτιά επιλογής που βρίσκονται μεταξύ του εικονιδίου του φακέλου και του ονόματος αλλάζουν κατάσταση όπως απεικονίζεται στην εικόνα 5.2.



**Εικόνα 5.2:** Στο λευκό πλαίσιο εμφανίζονται οι φάκελοι των μετρήσεων σε γραφική μορφή ώστε ο χρήστης να έχει την δυνατότητα να επιλογής για την ανάλυση.

#### 5.1.4 Περιγραφή του αρχείου Επικεφαλίδας Data\_Analysis.h

Μόλις επιλεγθούν τα εκάστοτε δοκίμια η ανάλυση τους πραγματοποιείται όταν ο χρήστης πατήσει το πράσινο κουμπί που αναγράφεται η ονομασία “Analysis”. Μέσα στο αρχείο Data\_Analysis.h ορίζονται δύο κλάσεις με αντίστοιχες ονομασίες Data\_Analysis και Test\_Structure\_Analysis. Η πρώτη παρέχει μαθηματικά εργαλεία βασισμένα στις βιβλιοθήκες του ROOT και διαβάζει τα αρχεία των δεδομένων. Στην δεύτερη κλάση πραγματοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων και εξάγονται οι παράμετροι για το χαρακτηρισμό κάθε διάταξης. Μέσα στον κώδικα ορίζονται δομές τύπου “struct” για κάθε μία διάταξη που περιλαμβάνουν τις χαρακτηριστικές παραμέτρους και τις χαρακτηριστικές καμπύλες. Μόλις πραγματοποιηθεί η ανάλυση οι πληροφορίες εξάγονται ως πακέτα με την ονομασία “package” και εισάγονται σε μια μεγαλύτερη δομή με την μορφή πίνακα-διάνυσμα με ονομασία List\_Of\_Package. Κάθε θέση αυτού του διανύσματος αποθηκεύει τις χαρακτηριστικές παραμέτρους ενός δοκιμίου.

#### 5.1.5 Κύριο Παράθυρο

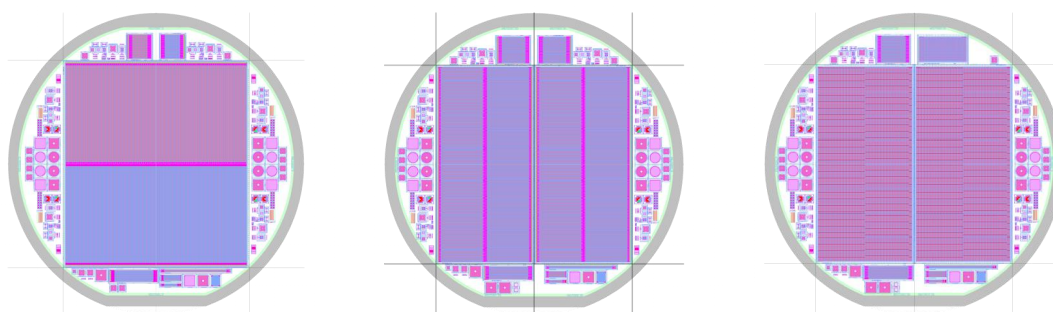
Στο μέσο του γραφικού περιβάλλοντος βρίσκονται δύο ετικέτες (Tabs) με τις αντίστοιχες ονομασίες “Data Analysis” και “Statistics”. Η πρώτη αποτελείται από μια οθόνη στην οποία παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες και οι εξαγόμενοι παράμετροι που είναι αποθηκευμένοι στην δομή List\_Of\_Package. Στο κάτω μέρος της ετικέτας βρίσκεται ένα ακόμα αντικείμενο ετικετών όπου ο χρήστης έχει την δυνατότητα να δει τις χαρακτηριστικές παραμέτρους για κάθε διάταξη. Το παραπάνω αντικείμενο παρέχεται από το φάκελο “Tabs.h” και η εμφάνιση των αριθμητικών τιμών εναλλάσσεται με την αντίστοιχη επιλογή του φακέλου από το αριστερό πλαίσιο που εμφανίζονται οι φάκελοι. Στην δεύτερη ετικέτα πραγματοποιείται μια στατιστική ανάλυση όπου παρουσιάζονται η μέση τιμή, η τυπική απόλυση και το τυπικό σφάλμα κάθε παραμέτρου καθώς και τα αντίστοιχα ιστογράμματα τους. Τα εργαλεία για την στατιστική ανάλυση περιέχονται στο φάκελο “Statistic\_Analysis.h”.

Η εισαγωγή δεδομένων μέσα στο λογισμικό γίνεται από τον χρήστη μέσω της επιλογής “File” στο πάνω αριστερό μέρος του παραθύρου διαλόγου (εικόνα 5.1). Μέσα στο “File” περιέχονται οι παρακάτω επιλογές “Open” και “Save as”. Η πρώτη επιλογή δίνει την δυνατότητα στον χρήστη μέσω ενός παραθύρου διαλόγου να επιλέξει την διεύθυνση του φακέλου με τα αρχεία δεδομένων και να τα εισάγει στην δομή Λίστας-Δένδρου. Επιλέγοντας την δεύτερη μπορεί να αποθηκεύσει στην διεύθυνση που επιθυμεί τα αποτελέσματα από την ανάλυση. Τα δεδομένα αποθηκεύονται στο σύστημα του υπολογιστή με την μορφή αρχείων .csv και οι χαρακτηριστικές καμπύλες των μετρήσεων σε αρχεία εικόνας .png.

## 5.2 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων Ανάλυσης

Η αναβάθμιση της δεύτερης φάσης του ανιχνευτή τροχιών του πειράματος CMS/LHC περιλαμβάνει την παραγωγή των νέων ανιχνευτικών διατάξεων. Ο ποιοτικός έλεγχος που πραγματοποιείται στο εργαστήριο αφορά παρτίδες δοκιμών της παραγωγής. Σε κάθε παρτίδα περιέχονται πολλαπλά δοκίμια τα οποία κατηγοριοποιούνται με έναν σειριακό αριθμό (λ.χ VPB46970\_020\_2-S\_HM\_W, όπου ο αριθμός 46970 αντιστοιχεί στον αριθμό της παρτίδας και ο 020 αντιστοιχεί στον αύξοντα αριθμό του δοκιμίου).

Ακολούθως θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του χαρακτηρισμού ορισμένων βασικών διατάξεων καθώς και η σύγκριση τους με τα αναμενόμενα όρια που δίνονται από την βιομηχανία παραγωγής τους. Οι παρτίδες που επιλέχθηκαν για την ανάλυση είναι ενδεικτικά οι ακόλουθες: VPB45779\_2-S\_HM, VPB39547\_PSS\_HM και η VPX45788\_PSP\_HM, εξετάζοντας έτσι όλες τις διαφορετικές περιπτώσεις δομών πυριτίου (περιφερειακές δομές του δισκίου της εικόνας 5.3) που αντιστοιχούν στις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις αισθητήρων πυριτίου (κεντρική δομή του δισκίου εικόνας 5.3) που θα εγκατασταθούν στον αναβαθμισμένο ανιχνευτή τροχιών.



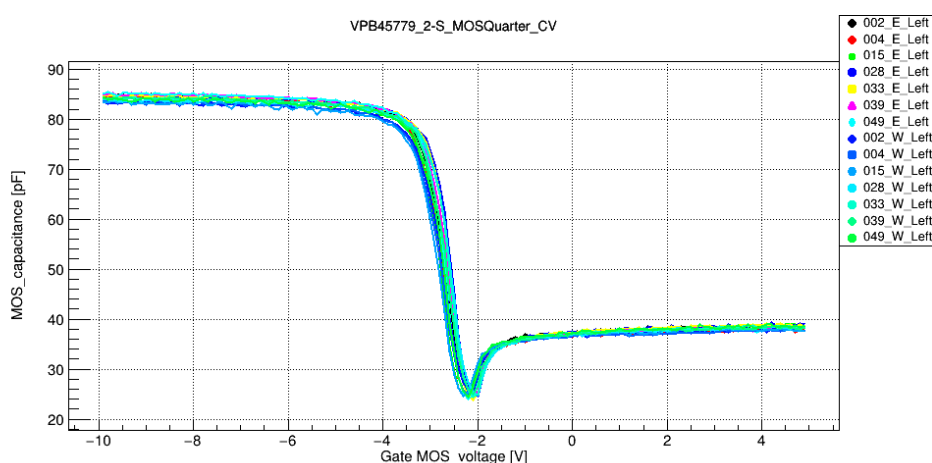
**Εικόνα 5.3:** Απεικόνιση δικίων πυριτίου ανιχνευτή 2-S (αριστερή εικόνα), PSS (κεντρική εικόνα) και PSP (δεξιά εικόνα). Αριστερά και δεξιά για κάθε δισκίο βρίσκονται τα West και East Halfmoons, ενώ στο πάνω και κάτω μέρος τα North και South Halfmoons. Μέσω του χαρακτηρισμού τους ελέγχεται οι ομοιογένεια του ανιχνευτή.

## 5.2.1 Πυκνωτές MOS

Οι διατάξεις MOS μετريούνται μέσω των “PQC Flute 1” όπως αυτό περιγράφεται στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Η μετρούμενη ποσότητα είναι η χωρητικότητα για διαφορές τιμές της τάσης. Οι πυκνωτές MOS στις διατάξεις των περιφερειακών δοκιμίων (Halfmoon) προσομοιάζουν την διάταξη των μικρολωρίδων Al/SiO<sub>2</sub>/n+ (αλουμίνιου) για τους ανιχνευτές 2-S, PSS και Au/SiO<sub>2</sub>/n+ (χρυσός) για τους PSP. Μέσω της ανάλυσης της χαρακτηριστικής καμπύλης C-V εξάγονται βασικοί παράμετροι για τον χαρακτηρισμό τους. Τέτοιοι παράμετροι είναι η τάση επίπεδων ζωνών ( $V_{FB}$ ) με αναμενόμενη τιμή  $< 5$  V (κατασκευαστικό όριο), η συγκέντρωση φορέων του οξειδίου ( $N_{ox}$ ), το πάχος του οξειδίου ( $t_{ox}$ ) με αναμενόμενη τιμή  $\sim 700$  nm και η χωρητικότητα της περιοχής συσσώρευσης  $C_{acc}$  αναμενόμενης τιμής  $\sim 82$  pF.

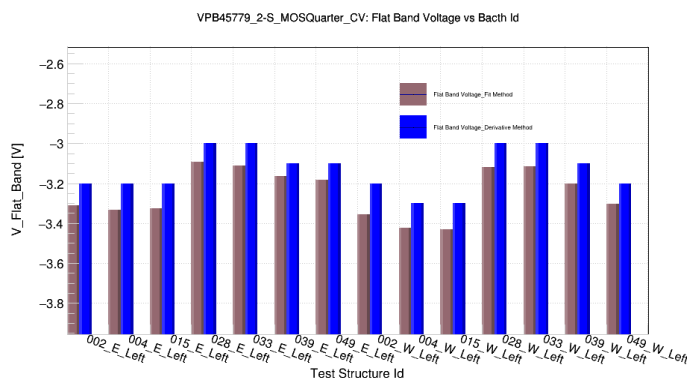
Για τον υπολογισμό της τάσης επίπεδων ζωνών ( $V_{FB}$ ) χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι που υπάρχουν στον κώδικα του αρχείου Data\_Analysis.h. Στην πρώτη μέθοδο στην περιοχή συσσώρευσης και απογύμνωσης εφαρμόζονται εφαπτόμενες ευθείες και μέσω του σημείου τομής τους υπολογίζεται η τάση επίπεδων ζωνών. Για τον προσδιορισμό των σημείων των ευθειών υπολογίζονται τα σημεία καμπής της καμπύλης C-V τα οποία αντιστοιχούν στα όρια των περιοχών λειτουργίας του MOS. Η δεύτερη μέθοδος υπολογίζει το σημείο της τάσης επίπεδων ζωνών ως το μέγιστο σημείο της πρώτης παραγώγου της καμπύλης C-V. Μια ακόμη παράμετρος που εξάγεται μέσω της χαρακτηριστικής καμπύλης είναι η χωρητικότητα απογύμνωσης ( $C_{acc}$ ) μέσω του σημείου τομής της ευθείας στην περιοχή συσσώρευσης με τον κάθετο άξονα των χωρητικοτήτων. Το πάχος του οξειδίου ( $t_{ox}$ ) και η συγκέντρωση των φορέων του οξειδίου ( $N_{ox}$ ) υπολογίζονται από τους τύπους 4.1 και την 4.7 αντίστοιχα του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου (αντικαθιστώντας τον όρο  $\epsilon_{Si}$  με  $\epsilon_{SiO_2}$ ). Παρακάτω γίνεται παρουσίαση των χαρακτηριστικών καμπύλων C-V και των ιστογραμμάτων για κάθε περίπτωση αισθητήρα.

### 5.2.1.1 Χαρακτηριστικές CV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOS για Δοκίμια τύπου 2-S

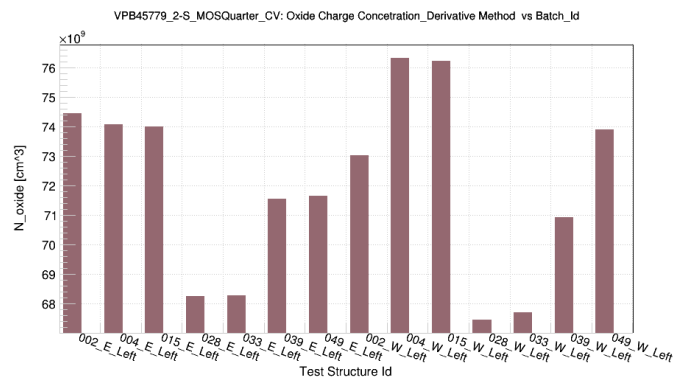


Εικόνα 5.4: Χαρακτηριστικές καμπύλες C-V των διατάξεων MOS για δοκίμια τύπου 2-S.

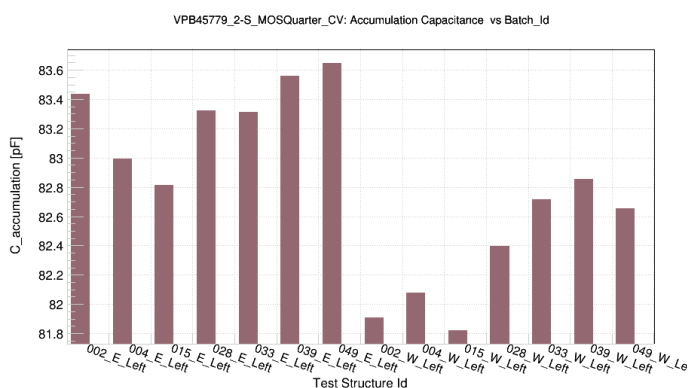




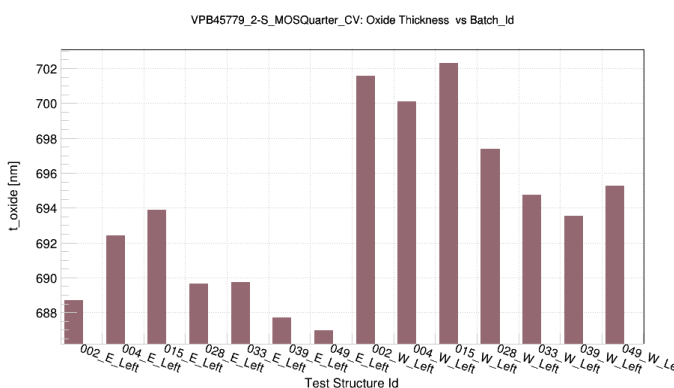
(α) Τάση επίπεδων ζωνών ( $V_{FB}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου 2-S. Οι καφέ στήλες αντιστοιχούν στην μέθοδο εφαπτόμενων ευθειών. Οι μπλε στην μέθοδο της πρώτης παραγώγου.



(β) Συγκέντρωση φορτίων στο οξείδιο του πυριτίου ( $N_{ox}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου 2-S.



(γ) Χωρητικότητα της περιοχής συσσώρευσης ( $C_{acc}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου 2-S.



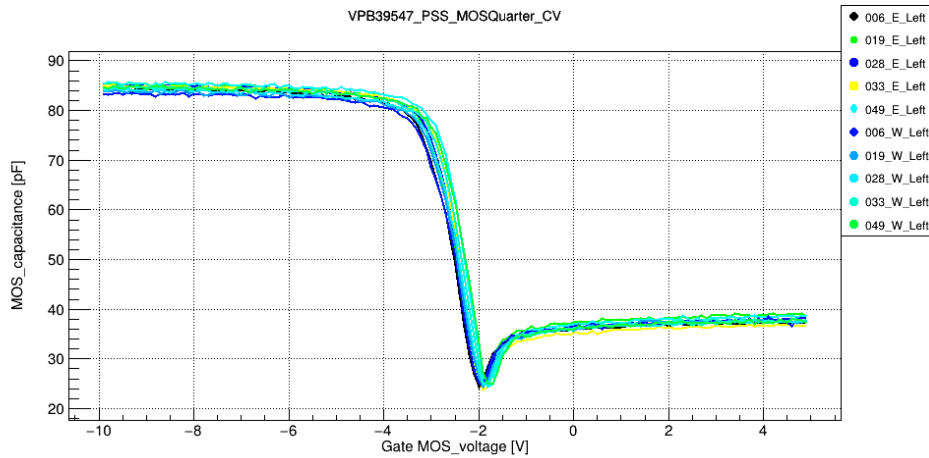
(δ) Πάχος οξειδίου του πυριτίου ( $t_{ox}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου 2-S.

**Εικόνα 5.5:** Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται οι παράμετροι του MOS για δοκίμια τύπου 2-S. Στο ιστόγραμμα α παρουσιάζεται η τάση επίπεδων ζωνών για τις δύο μεθόδους υπολογισμού. Στα διαγράμματα β-δ παρουσιάζονται η συγκέντρωση των φορέων οξειδίου, η χωρητικότητα στην περιοχή συσσώρευσης και το πάχος οξειδίου αντίστοιχα.

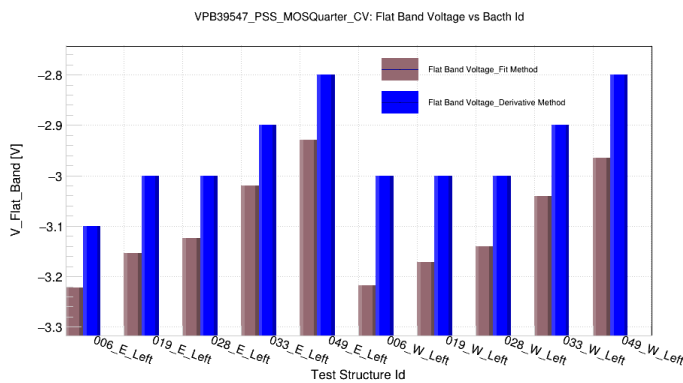
**Πίνακας 5.1:** Παράμετροι Πυκνωτή MOS για Δοκίμια τύπου 2-S

Παράμετροι\Δοκίμια	2-S	Όριο Προδιαγραφής
Τάση επίπεδων ζωνών $V_{FB}$ (εφ. Ευθείες)	$-3.3 \pm 0.1$ V	<5
Τάση επίπεδων ζωνών $V_{FB}$ (1 <sup>η</sup> παράγωγος)	$-3.1 \pm 0.1$ V	<5
Συγκέντρωση οξειδίου $N_{ox}$	$(7.2 \pm 0.4) \cdot 10^{10}$ cm <sup>-3</sup>	
Πάχος οξειδίου $t_{ox}$	$694 \pm 5$ nm	~700 nm
Χωρητικότητα συσσώρευσης $C_{acc}$	$82.8 \pm 0.6$ pF	~82 pF

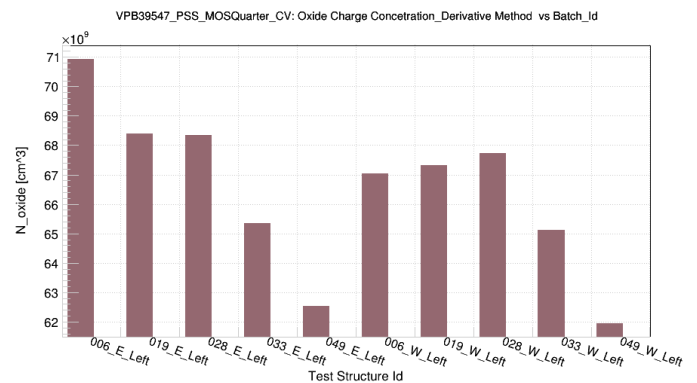
### 5.2.1.2 Χαρακτηριστικές CV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOS για Δοκίμια τύπου PSS



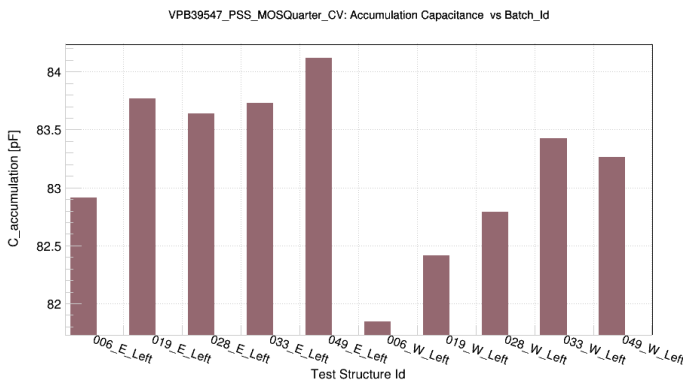
Εικόνα 5.6: Χαρακτηριστικές καμπύλες C-V των διατάξεων MOS για δοκίμια τύπου PSS.



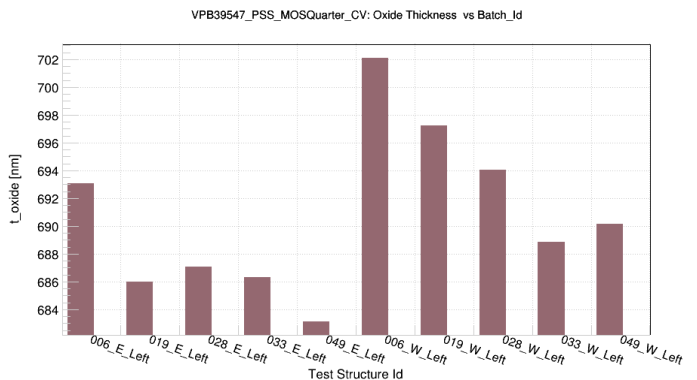
(α) Τάση επίπεδων ζωνών ( $V_{FB}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου PSS. Οι καφέ στήλες αντιστοιχούν στην μέθοδο εφαπτόμενων ευθειών. Οι μπλε στην μέθοδο της πρώτης παραγώγου.



(β) Συγκέντρωση φορτίων στο οξείδιο του πυριτίου ( $N_{ox}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου PSS.



(γ) Χωρητικότητα της περιοχής συσσώρευσης ( $C_{acc}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου PSS.



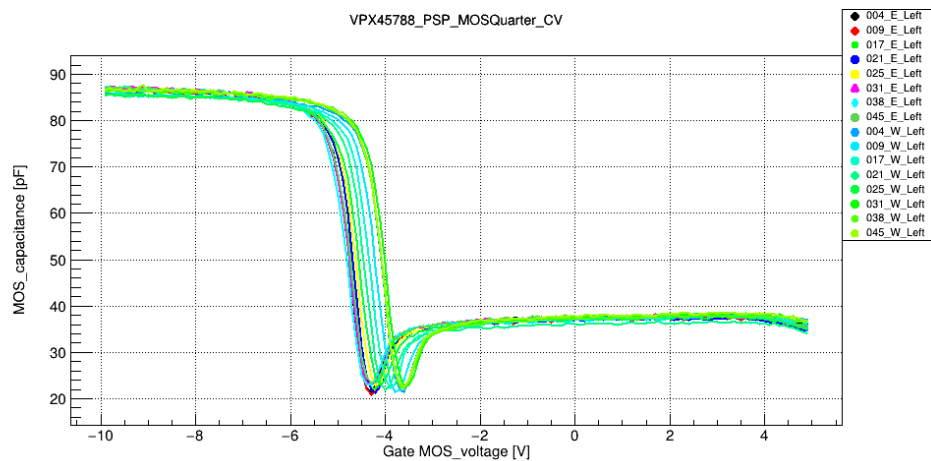
(δ) Πάχος οξειδίου του πυριτίου ( $t_{ox}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου PSS.

**Εικόνα 5.7:** Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται οι παράμετροι του MOS για δοκίμια τύπου PSS. Στο ιστόγραμμα α παρουσιάζεται η τάση επίπεδων ζωνών για τις δύο μεθόδους υπολογισμού. Στα διαγράμματα β-δ παρουσιάζονται η συγκέντρωση των φορέων οξειδίου, η χωρητικότητα στην περιοχή συσσώρευσης και το πάχος οξειδίου αντίστοιχα.

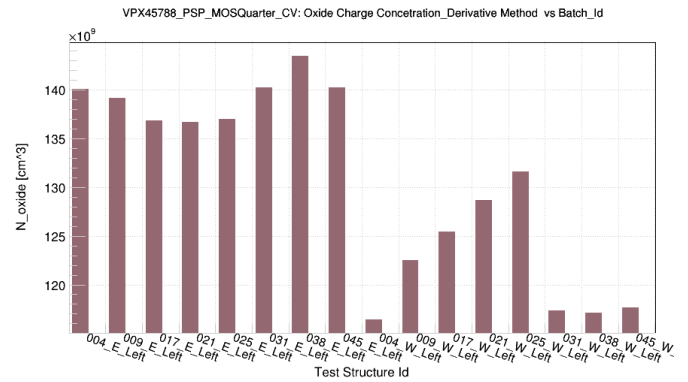
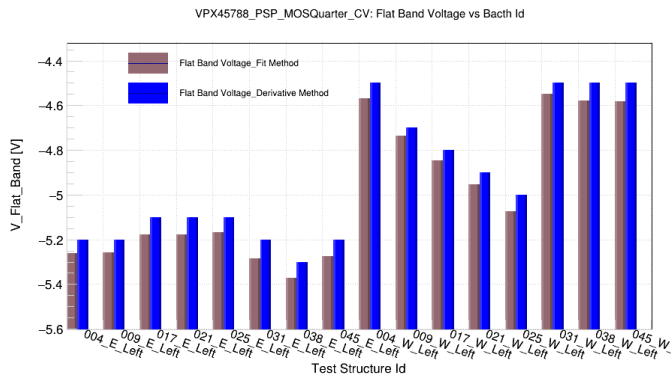
**Πίνακας 5.2:** Παράμετροι Πυκνωτή MOS για Δοκίμια τύπου PSS

Παράμετροι\Δοκίμια	PSS	Όριο Προδιαγραφής
Τάση επίπεδων ζωνών $V_{FB}$ εφ. ευθείες	$-3.1 \pm 0.1$ V	<5
Τάση επίπεδων ζωνών $V_{FB}$ 1 <sup>η</sup> παράγωγος	$-2.9 \pm 0.1$ V	<5
Συγκέντρωση οξειδίου $N_{ox}$	$(6.6 \pm 0.3) \cdot 10^{10}$ cm <sup>-3</sup>	
Πάχος οξειδίου $t_{ox}$	$691 \pm 6$ nm	~700 nm
Χωρητικότητα συσσώρευσης $C_{acc}$	$83.2 \pm 0.7$ pF	~82 pF

### 5.2.1.3 Χαρακτηριστικές CV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOS για Δοκίμια τύπου PSP

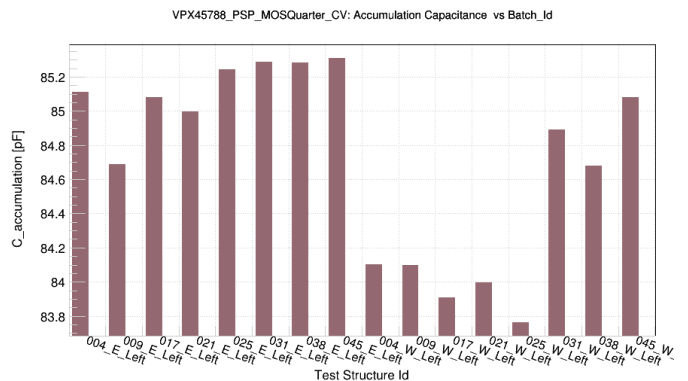
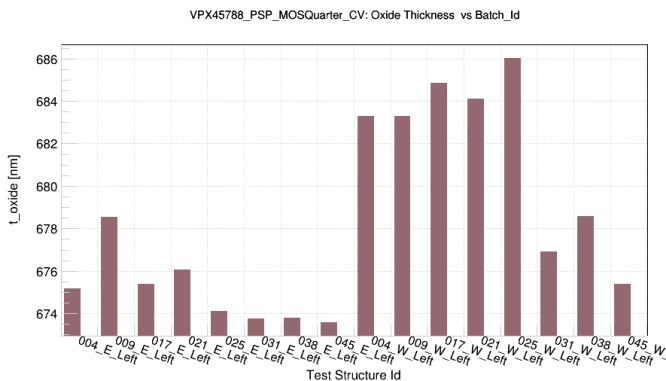


**Εικόνα 5.8:** Χαρακτηριστικές καμπύλες C-V των διατάξεων MOS για δοκίμια τύπου PSP.



(α) Τάση επίπεδων ζωνών ( $V_{FB}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου PSP. Οι καφέ στήλες αντιστοιχούν στην μέθοδο εφαπτόμενων ευθειών. Οι μπλε στην μέθοδο της πρώτης παραγώγου.

(β) Συγκέντρωση φορτίων στο οξειδίο του πυριτίου ( $N_{ox}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου PSP.



(γ) Χωρητικότητα της περιοχής συσσώρευσης ( $C_{acc}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου PSP.

(δ) Πάχος οξειδίου του πυριτίου ( $t_{ox}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOS για δοκίμια τύπου PSP.

**Εικόνα 5.9:** Στα παραπάνω διαγράμματα παρουσιάζονται οι παράμετροι του MOS για δοκίμια τύπου PSP. Στο ιστόγραμμα *α* παρουσιάζεται η τάση επίπεδων ζωνών για τις δύο μεθόδους υπολογισμού. Στα διαγράμματα *β-δ* παρουσιάζονται η συγκέντρωση των φορέων οξειδίου, η χωρητικότητα στην περιοχή συσσώρευσης και το πάχος οξειδίου αντίστοιχα.

Παράμετροι\Δοκίμια	PSP	Όριο Προδιαγραφής
Τάση επίπεδων ζωνών $V_{FB}$ εφ. ευθείες	$-5.0 \pm 0.3$ V	<5 V
Τάση επίπεδων ζωνών $V_{FB}$ 1 <sup>η</sup> παράγωγος	$-4.9 \pm 0.3$ V	<5 V
Συγκέντρωση οξειδίου $N_{ox}$	$(1.3 \pm 0.1) \cdot 10^{11}$ cm <sup>-3</sup>	
Πάχος οξειδίου $t_{ox}$	$678 \pm 5$ nm	~700 nm
Χωρητικότητα συσσώρευσης $C_{acc}$	$84.7 \pm 0.6$ pF	~82 pF

Στους πίνακες 5.1a-5.1c παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των παραμέτρων που εξάγονται από τις διατάξεις MOS. Για τους ανιχνευτές 2-S και PSS οι τιμές της τάσης επίπεδων ζωνών είναι σχετικά κοντά και για τις δύο πλευρές του wafer. Για τους PSP παρατηρείται ότι η  $V_{FB}$  είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά αυτό οφείλεται στο διαφορετικό μέταλλο που χρησιμοποιείται που είναι ο χρυσός το οποίο έχει διαφορετικό έργο εξόδου από το

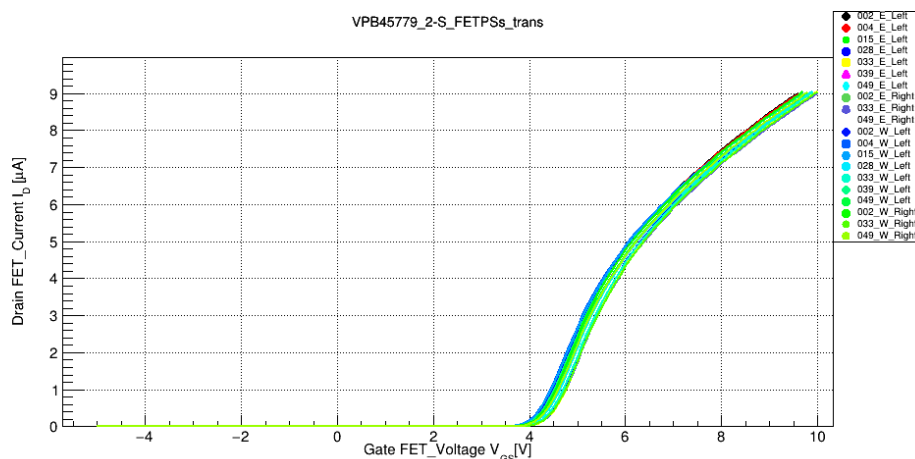
αλουμίνιο. Οι υπόλοιπες παράμετροι είναι κοντά στα αναμενόμενα όρια όρια προδιαγραφών.

## 5.2.2 Τρανζίστορ MOSFET

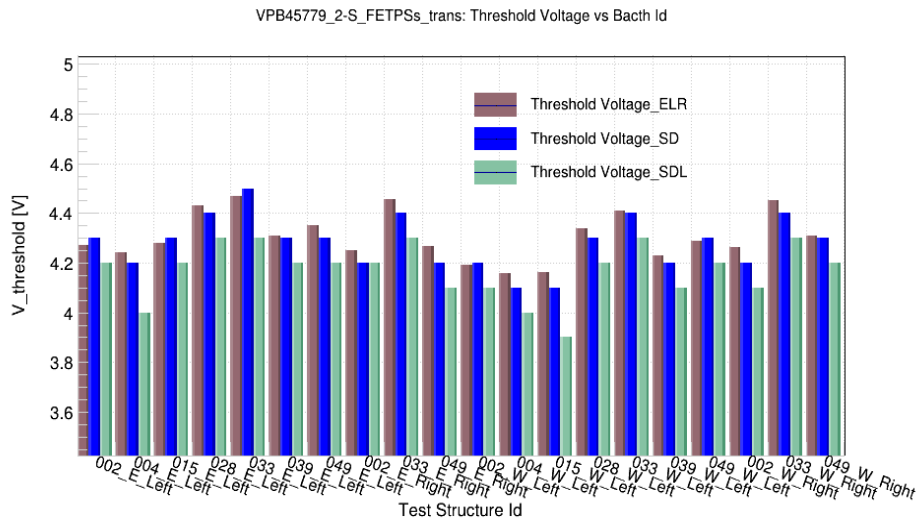
Τα τρανζίστορ MOSFET μετριοούνται από τα “PQC Flute 1” από τα οποία μετρίεται το ρεύμα δίνοντας αυξανόμενη τάση με σταθερό βήμα. Οι διατάξεις FET προσομοιάζουν το σύστημα μεταξύ δύο μικρο-λωρίδων στο οποίο μελετάται το κατώτατο όριο τάσης που μπορεί να εφαρμοστεί μέχρι να δημιουργηθεί κανάλι μεταξύ τους. Η παράμετρος που εξάγεται από τις συγκεκριμένες διατάξεις είναι η τάση κατωφλίου ( $V_{th}$ ).

Ο υπολογισμός της τάσης κατωφλίου υπολογίζεται με τρεις μεθόδους από την καμπύλη I-V. Η πρώτη μέθοδος (Extraction Linear at Region-ELR) βασίζεται στον υπολογισμό του μέγιστου της πρώτης παραγώγου της καμπύλης I-V. Στην συνέχεια χαράζεται η εφαπτομένη στο σημείο προβολής του μέγιστου της παραγώγου με την καμπύλη I-V. Το σημείο τομής της εφαπτομένης με τον άξονα των τάσεων δίνει την τάση κατωφλίου του FET. Η δεύτερη μέθοδος (Second Derivative-SD) υπολογίζει το μέγιστο της δεύτερης παραγώγου της I-V και η προβολή του στον άξονα τάσεων δίνει την τάση κατωφλίου. Τέλος για την τρίτη μέθοδο (Second Derivative Logarithmic-SDL) υπολογίζεται το ελάχιστό της δεύτερης παράγωγου του λογαρίθμου του ρεύματος ( $d^2\ln(I_D)/d^2V$ ) και η προβολή του στο άξονα των τάσεων δίνει την τάση κατωφλίου. Σε κάθε μέθοδο πριν τον υπολογισμό της παραγώγου εφαρμόζεται πριν και μετά ένα φίλτρο εξομάλυνσης της καμπύλης για μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς.

### 5.2.2.1 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOSFET για Δοκίμια τύπου 2-S



Εικόνα 5.10: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V των διατάξεων MOSFET για δοκίμια τύπου 2-S.

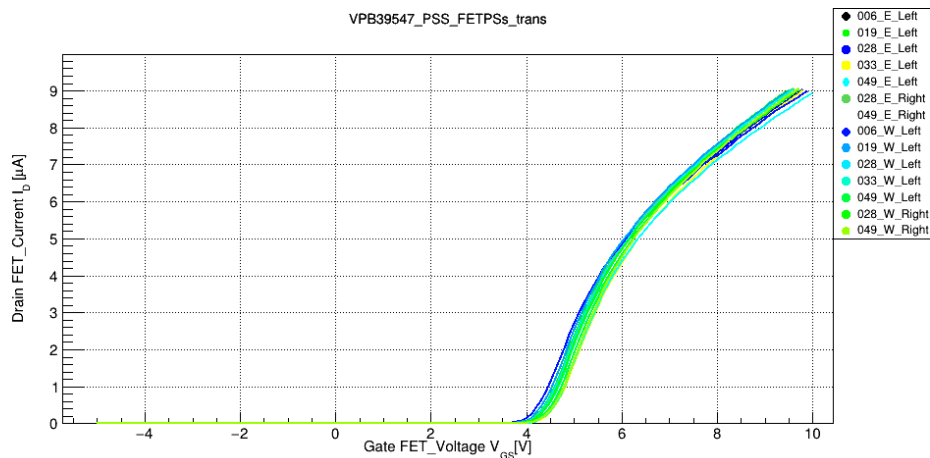


**Εικόνα 5.11:** Τάση κατωφλίου ( $V_{th}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOSFET για δοκίμια τύπου 2-S. Οι καφέ στήλες αντιστοιχούν στην μέθοδο ELR, οι μπλε στην SD και οι πράσινες στην SDL.

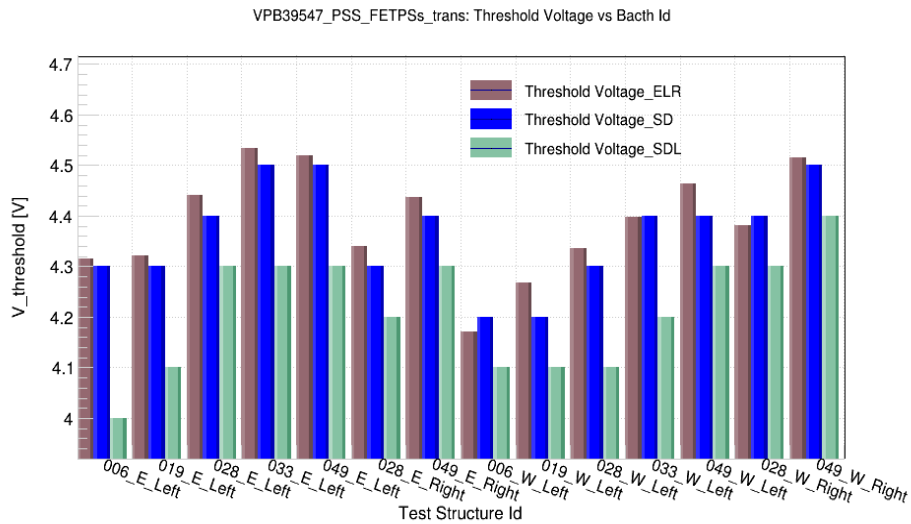
**Πίνακας 5.4:** Παράμετροι Τρανζίστορ MOSFET για Δοκίμια τύπου 2-S

Παράμετροι\Δοκίμια	2-S
Τάση κατωφλίου $V_{th}$ (ELR)	$4.3 \pm 0.1$ V
Τάση κατωφλίου $V_{th}$ (SD)	$4.3 \pm 0.1$ V
Τάση κατωφλίου $V_{th}$ (SDL)	$4.2 \pm 0.1$ V

### 5.2.2.2 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOSFET για Δοκίμια τύπου PSS



**Εικόνα 5.12:** Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V των διατάξεων MOSFET για δοκίμια τύπου PSS.

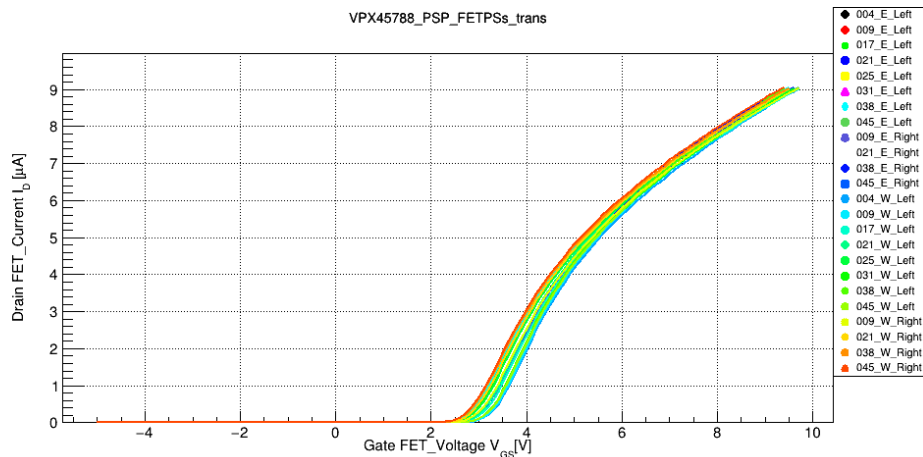


**Εικόνα 5.12:** Τάση κατωφλίου ( $V_{th}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOSFET για δοκίμια τύπου PSS. Οι καφέ στήλες αντιστοιχούν στην μέθοδο ELR, οι μπλε στην SD και οι πράσινες στην SDL.

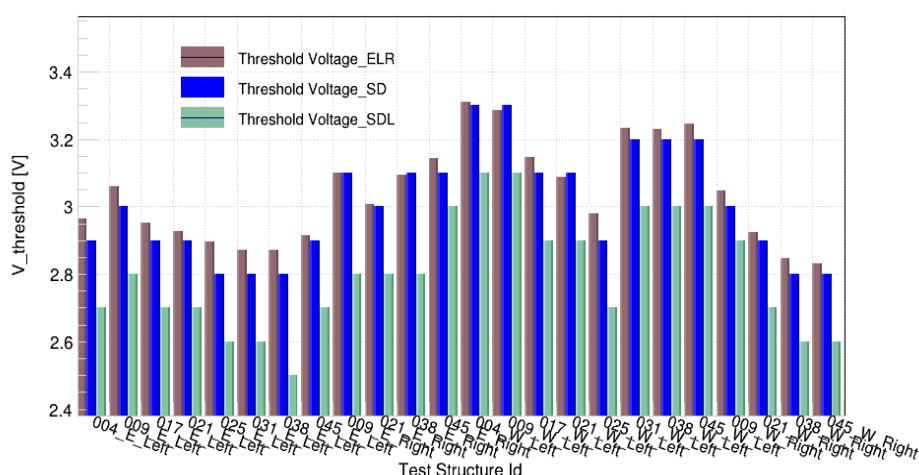
**Πίνακας 5.5:** Παράμετροι Τρανζίστορ MOSFET για Δοκίμια τύπου PSS

Παράμετροι\Δοκίμια	PSS
Τάση κατωφλίου $V_{th}$ (ELR)	$4.4 \pm 0.1$ V
Τάση κατωφλίου $V_{th}$ (SD)	$4.4 \pm 0.1$ V
Τάση κατωφλίου $V_{th}$ (SDL)	$4.2 \pm 0.1$ V

### 5.2.2.3 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων MOSFET για Δοκίμια τύπου PSP



**Εικόνα 5.13:** Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V των διατάξεων MOSFET για δοκίμια τύπου PSP.



**Εικόνα 5.14:** Τάση κατωφλίου ( $V_{th}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος MOSFET για δοκίμια τύπου PSP. Οι καφέ στήλες αντιστοιχούν στην μέθοδο ELR, οι μπλε στην SD και οι πράσινες στην SDL.

**Πίνακας 5.6:** Παράμετροι Τρανζίστορ MOSFET για Δοκίμια τύπου PSP

Παράμετροι\Δοκίμια	PSP
Τάση κατωφλίου $V_{th}$ (ELR)	$3.0 \pm 0.2$ V
Τάση κατωφλίου $V_{th}$ (SD)	$3.0 \pm 0.2$ V
Τάση κατωφλίου $V_{th}$ (SDL)	$2.8 \pm 0.2$ V

Τα αποτελέσματα της τάση κατωφλίου και για τις τρεις μεθόδους είναι κοντά και στα όρια του σφάλματος. Από τις εικόνες 5.11, 5.12 και 5.13 φαίνεται ότι για την μέθοδο ELR (καφέ στήλες) και SD (μπλε στήλες) οι τιμές της τάσης κατωφλίου συμφωνούν. Για τα δοκίμια 2-S και PSS τα αποτελέσματα είναι αρκετά κοντά όμως για τους PSP η τιμή της  $V_{th}$  είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά παρόμοια με την τάση επίπεδων ζωνών των διατάξεων MOS.

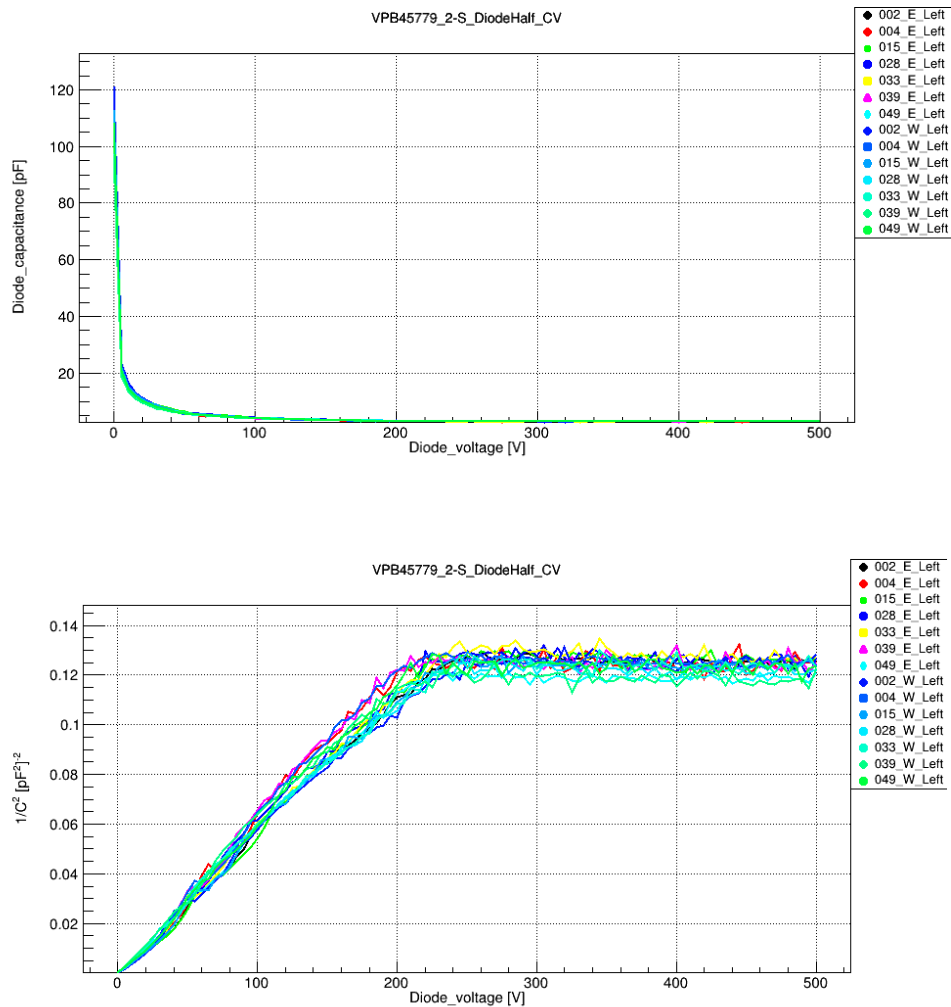
### 5.2.3 Δίοδοι τύπου p-n

Οι μετρήσεις των διόδων πραγματοποιούνται στο “PQC Flute 3” και χαρακτηρίζουν τις επαφές n+-p του ανιχνευτή. Οι παράμετροι που χαρακτηρίζονται είναι η τάση απογύμνωσης της επαφής ( $V_{fd}$ ) με αναμενόμενη τιμή  $< 350$  V, η ελάχιστη χωρητικότητα ( $C_{min}$ ), η ειδική αντίσταση στο σώμα του ανιχνευτή (p-bulk), το ενεργό πάχος της περιοχής απογύμνωσης (d) και το ρεύμα για τάση 600V  $I(600V)$ . Από τα δεδομένα των μετρήσεων σχεδιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες C-V από τις οποίες εξάγονται η τάση απογύμνωσης και η ελάχιστη χωρητικότητα ενώ από τις I-V η τάση διάσπασης το ρεύμα στα 600 V. Οι διατάξεις διόδων βρίσκονται στο “PQC Flute 3”. Για την ανάλυση της C-V σχεδιάζεται η καμπύλη  $1/C^2-V$  στην οποία εφαρμόζονται δύο εφαπτώμες, η πρώτη

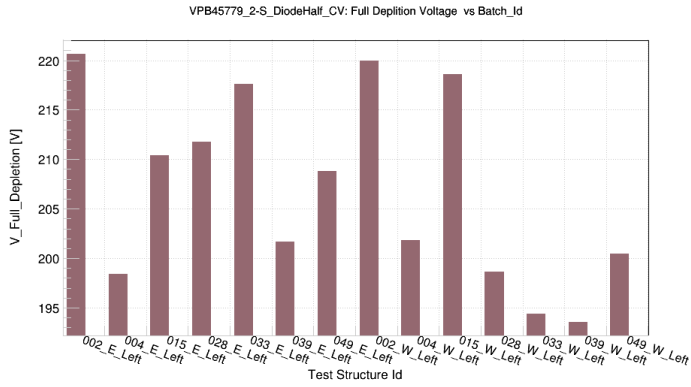


υπολογίζεται με την εφαρμογή ευθείας από 0 V μέχρι κάποιο προκαθορισμένο σημείο. Για τον υπολογισμό τια καλύτερη δυνατή ευθείας υπολογίζεται ο συντελεστής προσδιορισμού  $R^2$ . Η διαδικασία έχει ως εξής μέσα σε μία επανάληψη υπολογίζεται μια αρχική ευθεία με προκαθορισμένο αριθμό σημειων (πέντε σημεία) όσο εξελισεται η επανάληψη οριθμός των σημείων αυξάνεται υπολογίζοντας νέες ευθείες. Η ευθεία με την μεγαλύτερη τιμή του  $R^2$  κοντά στο 1 εφαρμόζεται στην C-V, ατίστοιχη διαδικασία εφαρμοζεται για την δεύτερη εφαπτόμενη. Επιπλέον σε αυτό το σημείο γίνεται χαρακτηρισμός των ανιχνευτών 2-S και PSS καθώς για τους PSS δεν λαμβάνεται μέτρηση για τις διόδους. Η παράμετροι της ειδικής αντίστασης και του πάχους του οξειδίου εξάγονται από τις σχέσης 4.4 και 4.1 του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου. Παρακάτω παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες C-V και  $1/C^2$ -V οι χαρακτηριστικές παράμετροι για δομές p-n από δοκίμια τύπου 2-S και PSS.

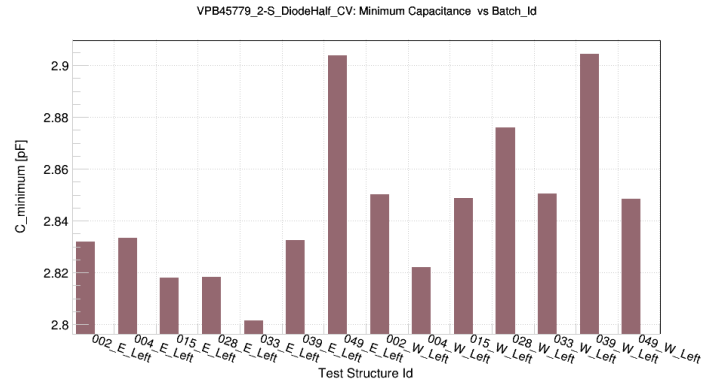
### 5.2.3.1 Χαρακτηριστικές CV και Ιστογράμματα των Διατάξεων Διόδων για Δοκίμια τύπου 2-S



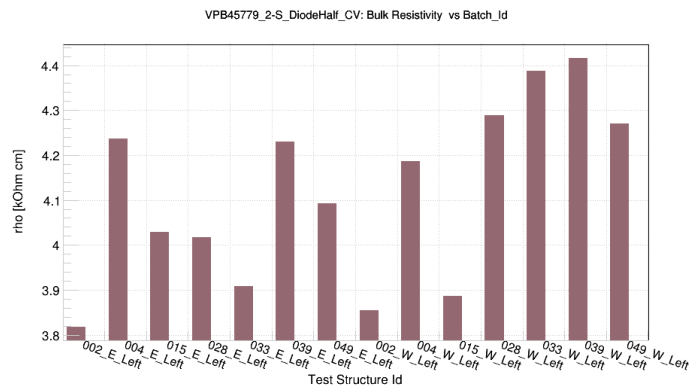
**Εικόνα 5.15:** Χαρακτηριστικές καμπύλες C-V (πάνω εικόνα) και  $1/C^2$ -V (κάτω εικόνα) των διατάξεων Διόδων p-n για δοκίμια τύπου 2-S.



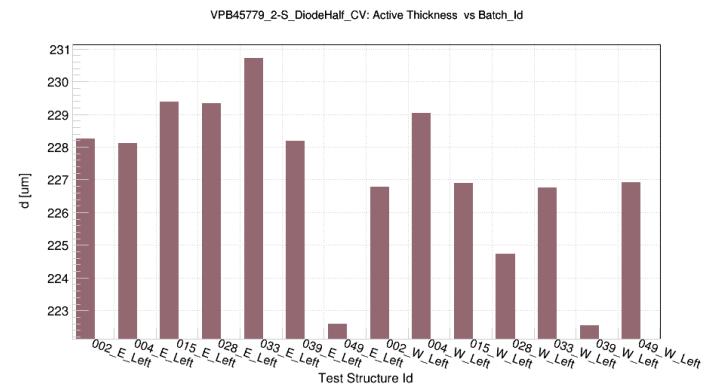
(α) Τάσης απογύμνωσης ( $V_{fd}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος διόδου p-n για δοκίμια τύπου 2-S.



(β) Ελάχιστη χωρητικότητα ( $C_{min}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος διόδου p-n για δοκίμια τύπου 2-S.



(γ) Ειδική αντίσταση ( $\rho_{ho}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος διόδου p-n για δοκίμια τύπου 2-S.



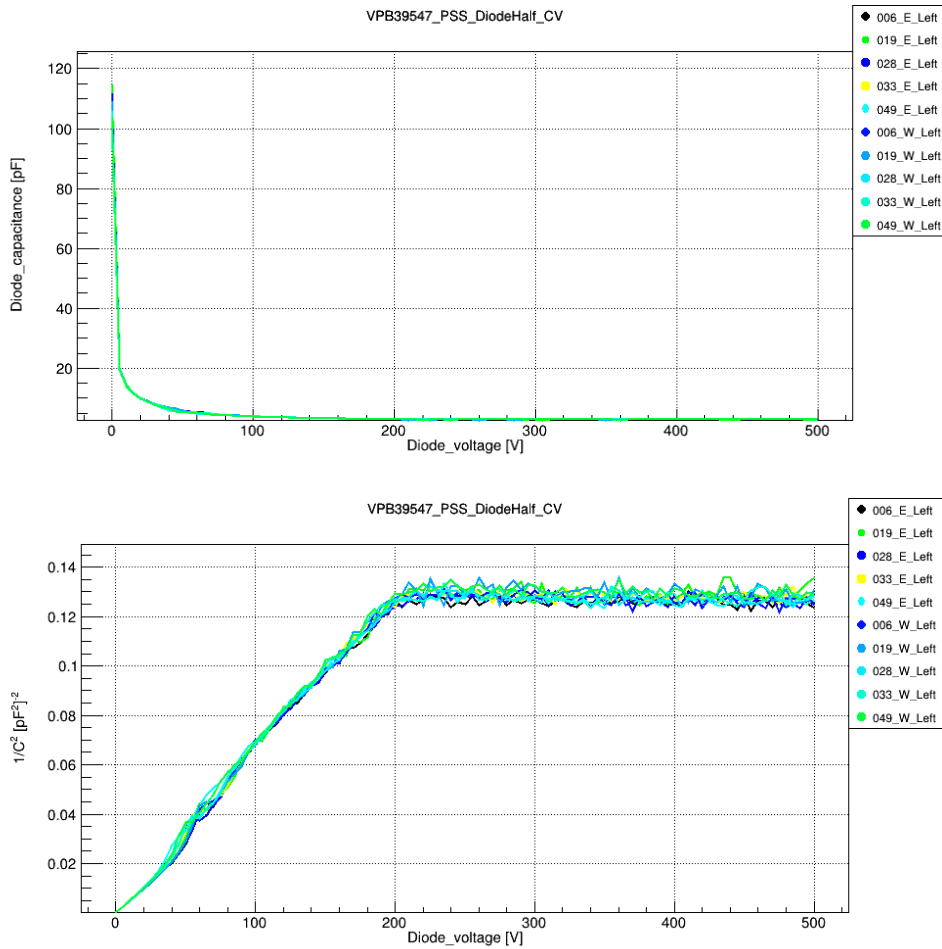
(δ) Ενεργό πάχος ( $d$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος διόδου p-n για δοκίμια τύπου 2-S.

**Εικόνα 5.16:** Στα διαγράμματα *a-d* παρουσιάζονται η τάση απογύμνωσης, η ελάχιστη χωρητικότητα, η ειδική αντίσταση και το ενεργό πάχος των διόδων p-n για δοκίμια τύπου 2-S.

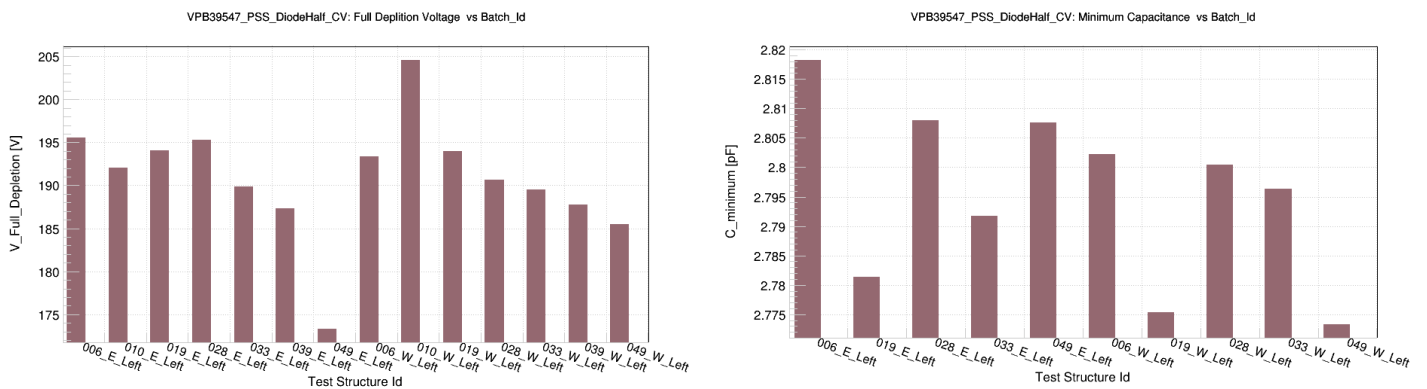
**Πίνακας 5.7:** Παράμετροι Διόδων για Δοκίμια τύπου 2-S

Παράμετροι\Δοκίμια	2-S	Όριο Προδιαγραφής
Τάση απογύμνωσης $V_{fb}$	$207 \pm 10$ V	$< 350$ V
Ελάχιστη χωρητικότητα $C_{min}$	$2.85 \pm 0.03$ pF	
Ειδική αντίσταση $\rho$	$4.1 \pm 0.2$ kΩ·cm	
Ενεργό πάχος $d$	$227 \pm 2$ nm	
Ρεύμα στα 600 V $I_{600V}$	$0.4 \pm 0.2$ nA	

### 5.2.3.2 Χαρακτηριστικές CV και Ιστογράμματα των Διατάξεων Διόδων για Δοκίμια τύπου PSS

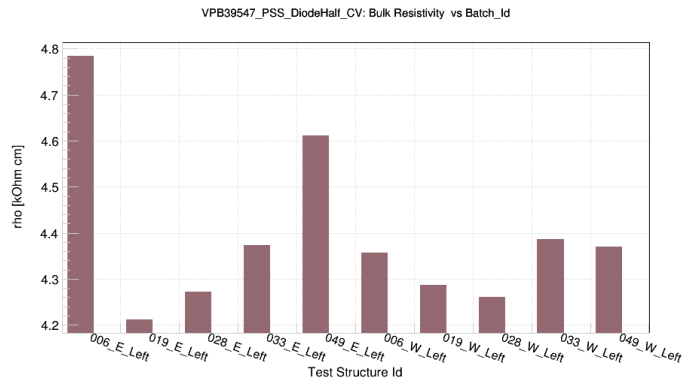


Εικόνα 5.17: Χαρακτηριστικές καμπύλες C-V (πάνω εικόνα) και  $1/C^2$ -V (κάτω εικόνα) των διατάξεων Διόδων p-n για δοκίμια τύπου PSS.

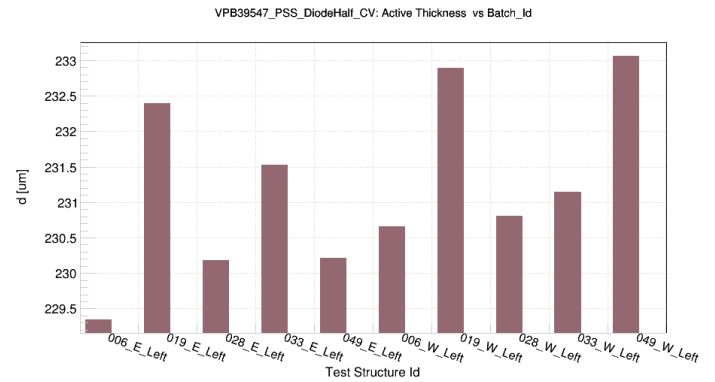


(α) Τάσης απογύμνωσης ( $V_{fd}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος διόδου p-n για δοκίμια τύπου PSS.

(β) Ελάχιστη χωρητικότητα ( $C_{min}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος διόδου p-n για δοκίμια τύπου PSS.



(γ) Ειδική αντίσταση ( $\rho_b$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος διόδου p-n για δοκίμια τύπου PSS.



(δ) Ενεργό πάχος (d) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος διόδου p-n για δοκίμια τύπου PSS.

**Εικόνα 5.18:** Στα διαγράμματα α-δ παρουσιάζονται η τάση απογύμνωσης, η ελάχιστη χωρητικότητα, η ειδική αντίσταση και το ενεργό πάχος των διόδων p-n για δοκίμια τύπου PSS.

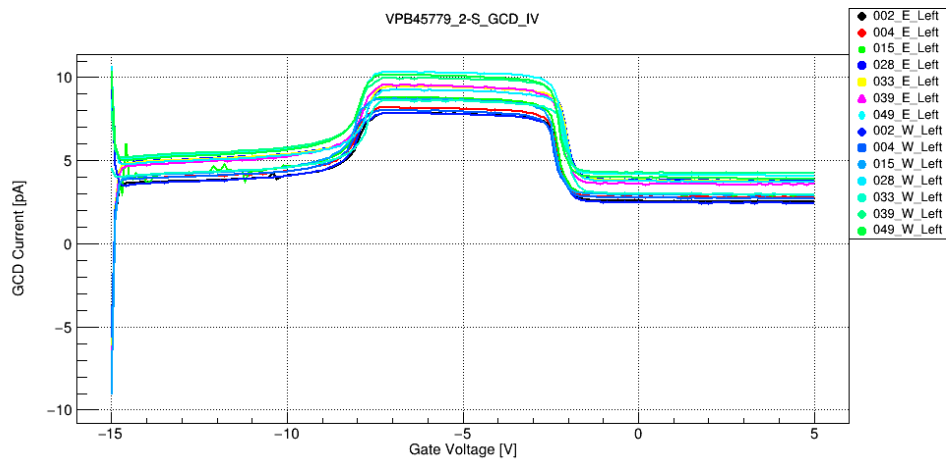
**Πίνακας 5.8:** Παράμετροι Διόδων για Δοκίμια PSS

Παράμετροι\Δοκίμια	PSS	Όριο Προδιαγραφής
Τάση απογύμνωσης $V_{fb}$	$190 \pm 7$ V	< 350 V
Ελάχιστη χωρητικότητα $C_{min}$	$2.80 \pm 0.01$ pF	
Ειδική αντίσταση $\rho$	$4.5 \pm 0.2$ kΩ·cm	
Ενεργό πάχος d	$231 \pm 1$ μm	
Ρεύμα στα 600 V $I_{600V}$	$0.3 \pm 0.1$ nA	

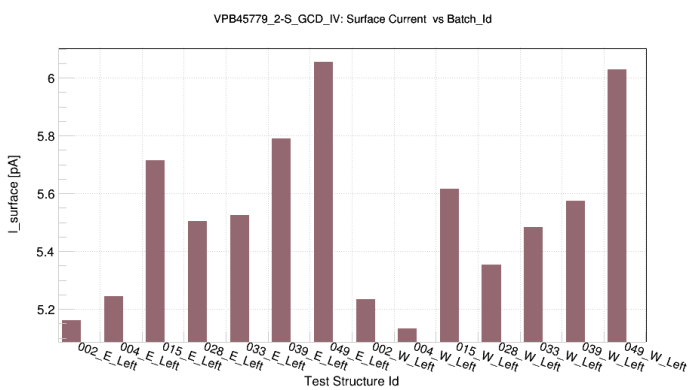
#### 5.2.4 Διατάξεις GCD και GCD05

Από τα “PQC Flute 2” και “PQC Flute 4” γίνεται ο χαρακτηρισμός των διατάξεων GCD, παίρνοντας της χαρακτηριστικές I-V. Μέσω των δομών εξάγονται παράμετροι σχετικές με τα επιφανειακά φαινόμενα γύρω από το οξείδιο όπως το επιφανειακό ρεύμα ( $I_{surf}$ ), η ταχύτητα επανασύνδεσης ( $S_0$ ), η πυκνότητα παγίδων διεπαφής του οξειδίου ( $D_{it}$ ) και η τάση επίπεδων ζωνών ( $V_{FB}$ ). Για την ανάλυση των καμπύλων I-V υπολογίζονται τα σημεία καμπής για τον προσδιορισμό των περιοχών λειτουργίας της GCD. Το επιφανειακό ρεύμα υπολογίζεται από τη διαφορά τις μέσης τιμής των σημείων της περιοχής απογύμνωσης και αναστροφής. Ο υπολογισμός των παραμέτρων  $S_0$  και  $D_{it}$  γίνεται από τις σχέσεις 4.9 και 4.10 του 4<sup>ου</sup> κεφαλαίου.

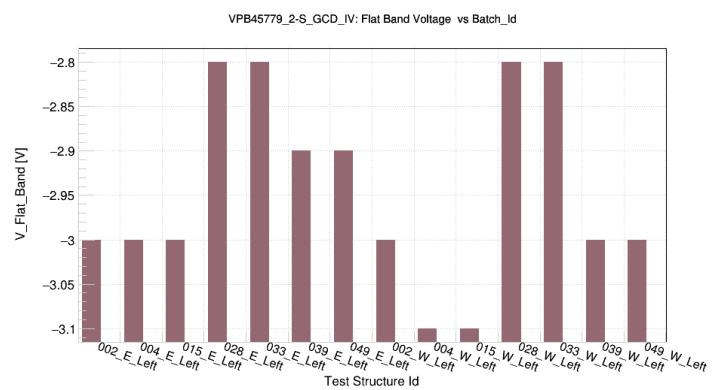
### 5.2.4.1 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων GCD για Δοκίμια τύπου 2-S



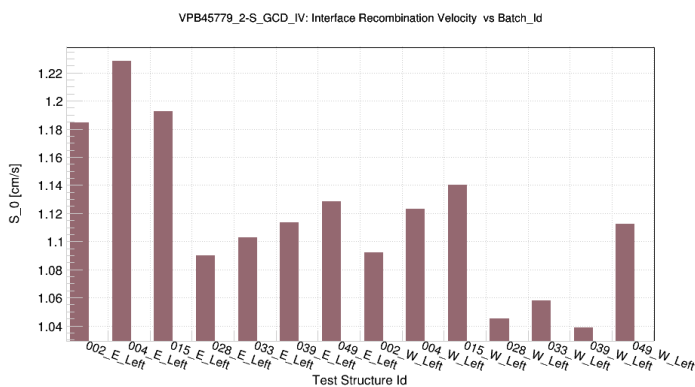
Εικόνα 5.19: Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V των διατάξεων GCD για δοκίμια τύπου 2-S.



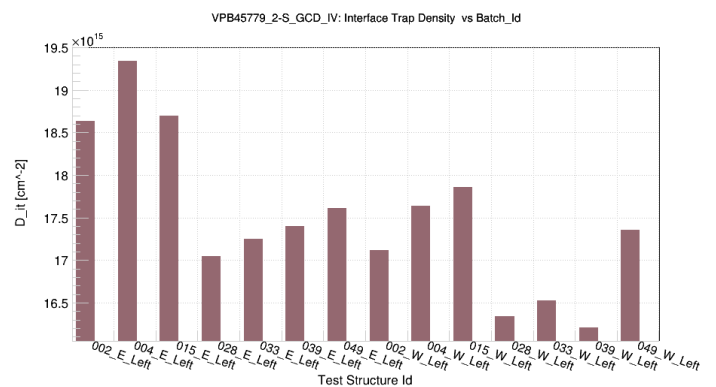
(α) Επιφανειακό ρεύμα ( $I_{surf}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου 2-S.



(β) Ιστογράμμο επίπεδων ζωνών ( $V_{FB}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου 2-S.



(γ) Ταχύτητα επανασύνδεσης ( $S_0$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου 2-S.



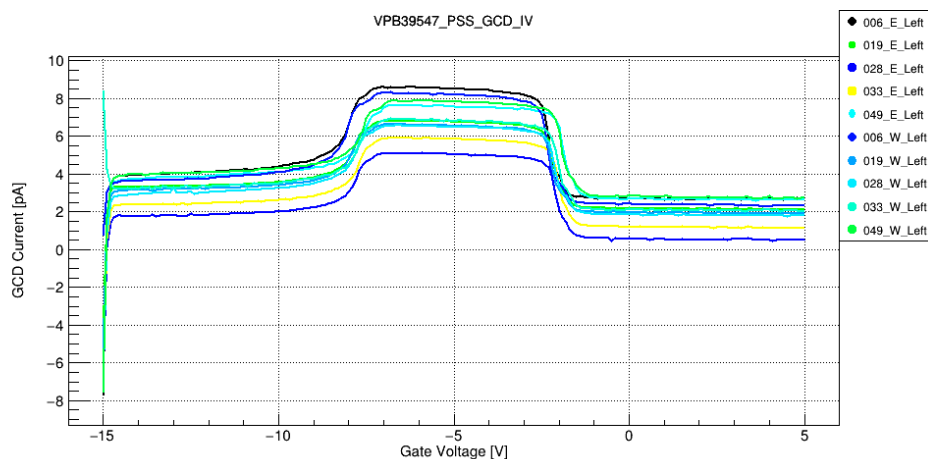
(δ) Πυκνότητα παγίδων διεπιφάνειας ( $D_{it}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου 2-S.

Εικόνα 5.20: Στα διαγράμματα α-δ παρουσιάζονται το επιφανειακό ρεύμα, η τάση επίπεδων ζωνών, η ταχύτητα επανασύνδεσης των φορέων και η πυκνότητα διεπαφής για δοκίμια τύπου 2-S.

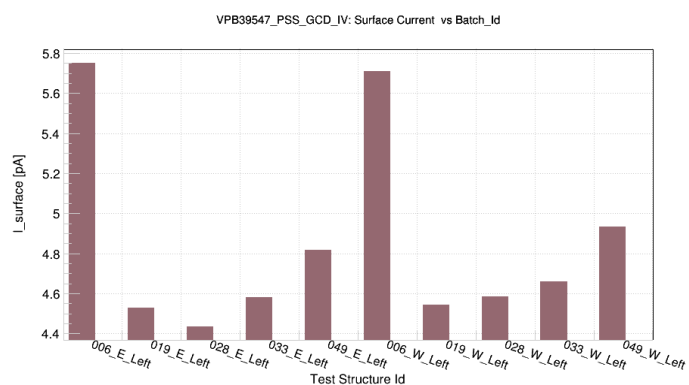
**Πίνακας 5.9:** Παράμετροι GCD για Δοκίμια 2-S

Παράμετροι\Δοκίμια	2-S
Επιφανειακό ρεύμα $I_{surf}$	$5.5 \pm 0.3 \text{ pA}$
Τάση επίπεδων ζωνών $V_{FB}$	$-2.94 \pm 0.1 \text{ V}$
Ταχύτητα επανασύνδεσης $S_0$	$1.12 \pm 0.06 \text{ cm/sec}$
Πυκνότητα παγίδων διεπαφής $D_{it}$	$(1.8 \pm 0.1) \cdot 10^{16} \cdot \text{cm}^{-2}$

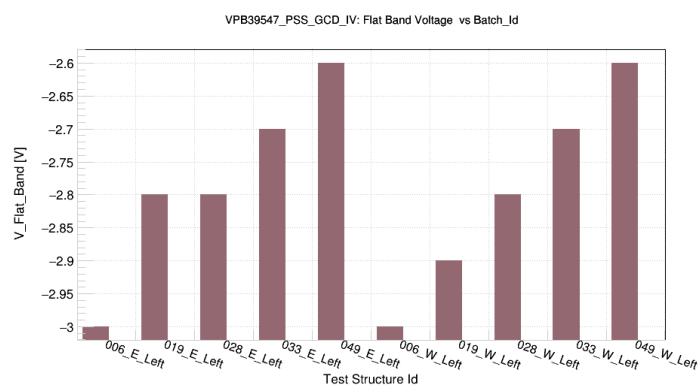
#### 5.2.4.2 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων GCD για Δοκίμια τύπου PSS



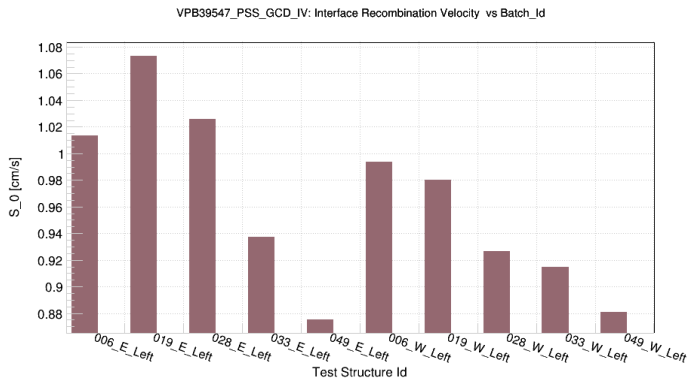
**Εικόνα 5.21:** Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V των διατάξεων GCD για δοκίμια τύπου PSS.



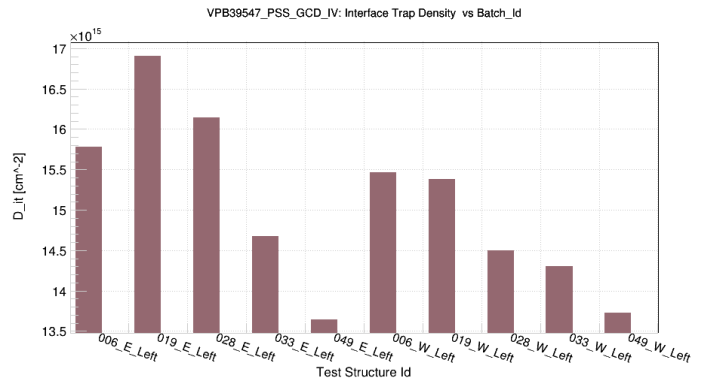
(α) Επιφανειακό ρεύματος ( $I_{surf}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου PSS.



(β) Ιστογράμματα επίπεδων ζωνών ( $V_{FB}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου PSS.



(γ) Ταχύτητα επανασύνδεσης ( $S_0$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου PSS.



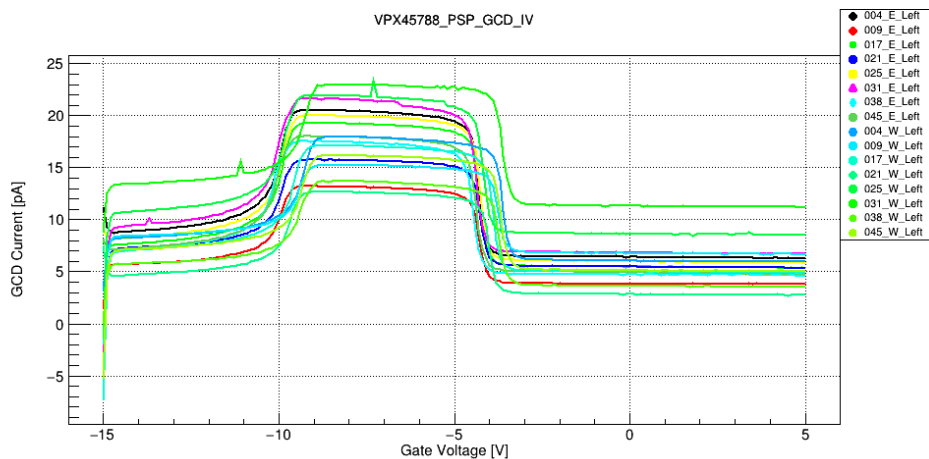
(δ) Πυκνότητα παγίδων διεπιφάνειας ( $D_{it}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου PSS.

**Εικόνα 5.22:** Στα διαγράμματα α-δ παρουσιάζονται το επιφανειακό ρεύμα, η τάση επίπεδων ζωνών, η ταχύτητα επανασύνδεσης των φορέων και η πυκνότητα διεπαφής για δοκίμια τύπου PSS.

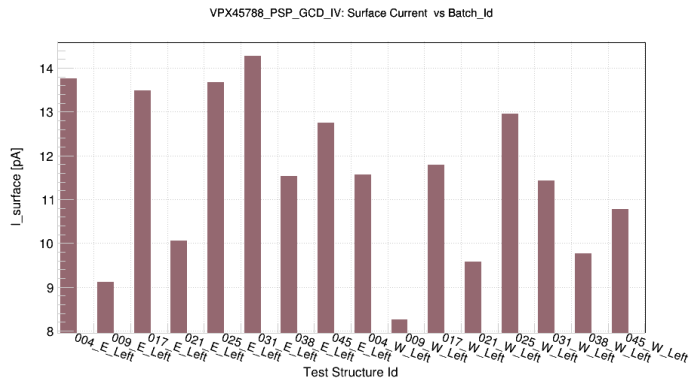
**Πίνακας 5.10:** Παράμετροι GCD για Δοκίμια PSS

Παράμετροι\Δοκίμια	PSS
Επιφανειακό ρεύμα $I_{surf}$	$5.0 \pm 0.6$ pA
Τάση επίπεδων ζωνών $V_{FB}$	$-2.8 \pm 0.1$ V
Ταχύτητα επανασύνδεσης $S_0$	$0.96 \pm 0.06$ cm/sec
Πυκνότητα παγίδων διεπαφής $D_{it}$	$(1.5 \pm 0.1) \cdot 10^{16} \cdot \text{cm}^{-2}$

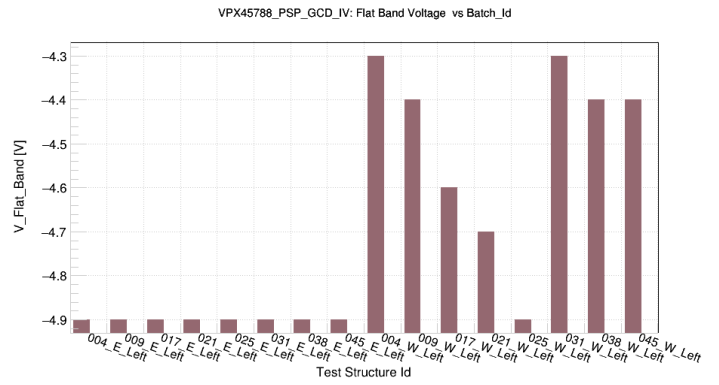
#### 5.2.4.3 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων GCD για Δοκίμια τύπου PSP



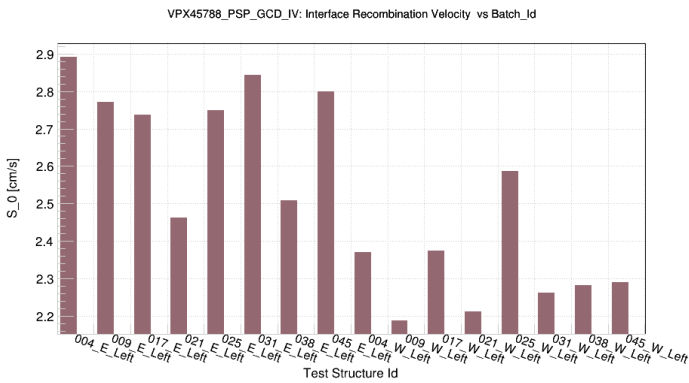
**Εικόνα 5.23:** Χαρακτηριστικές καμπύλες I-V των διατάξεων GCD για δοκίμια τύπου PSP.



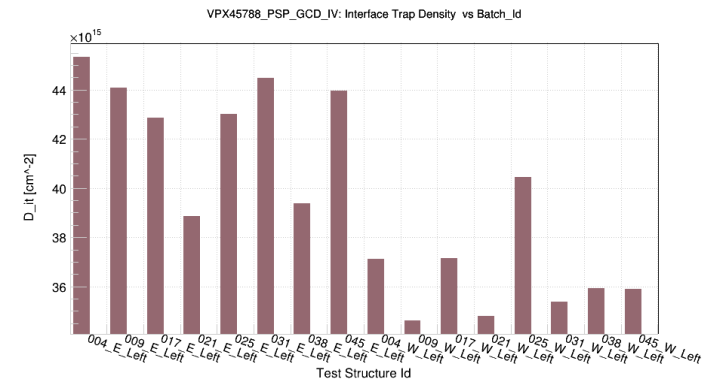
(α) Επιφανειακό ρεύμα ( $I_{surf}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου PSP.



(β) Ιστόγραμμα επίπεδων ζωνών ( $V_{FB}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου PSP.



(γ) Ταχύτητα επανασύνδεσης ( $S_0$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου PSP.



(δ) Πυκνότητα παγίδων διεπιφάνειας ( $D_{it}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος GCD για δοκίμια τύπου PSP.

**Εικόνα 5.24:** Στα διαγράμματα α-δ παρουσιάζονται το επιφανειακό ρεύμα, η τάση επίπεδων ζωνών, η ταχύτητα επανασύνδεσης των φορέων και η πυκνότητα διεπαφής για δοκίμια τύπου PSP.

**Πίνακας 5.11:** Παράμετροι GCD για Δοκίμια PSP

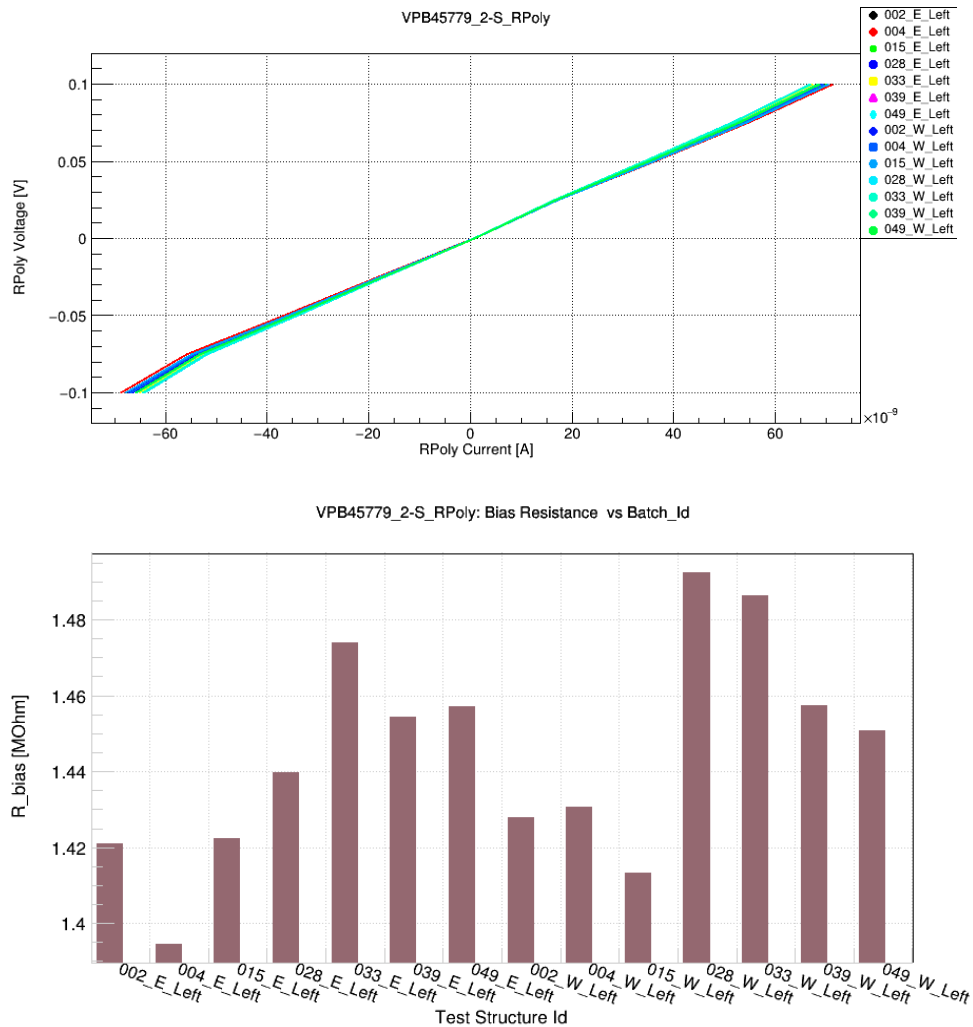
Παράμετροι\Δοκίμια	PSP
Επιφανειακό ρεύμα $I_{surf}$	$11.5 \pm 1.8$ pA
Τάση επίπεδων ζωνών $V_{FB}$	$-4.7 \pm 0.3$ V
Ταχύτητα επανασύνδεσης $S_0$	$2.5 \pm 0.3$ cm/sec
Πυκνότητα παγίδων διεπαφής $D_{it}$	$(4.0 \pm 0.4) \cdot 10^{16} \cdot \text{cm}^{-2}$

### 5.2.5 Πολυκρυσταλλική Αντίσταση RPoly

Οι διατάξεις για την μέτρηση της πολυκρυσταλλικής αντίστασης λαμβάνονται από τα “PQC Flute 2”. Η παράμετρος της αντίστασης που εξάγεται από της καμπύλες I-V χαρακτηρίζει την αντίσταση του πολυκρυσταλλικού πυριτίου που βρίσκεται ανάμεσα στο δακτύλιο πόλωσης και των μικρολωρίδων. Τα δοκίμια PSP δεν περιλαμβάνουν διάταξη πολυκρυσταλλικού πυριτίου.



### 5.2.5.1 Χαρακτηριστικές VI και Ιστογράμματα των Διατάξεων RPoly για Δοκίμια τύπου 2-S

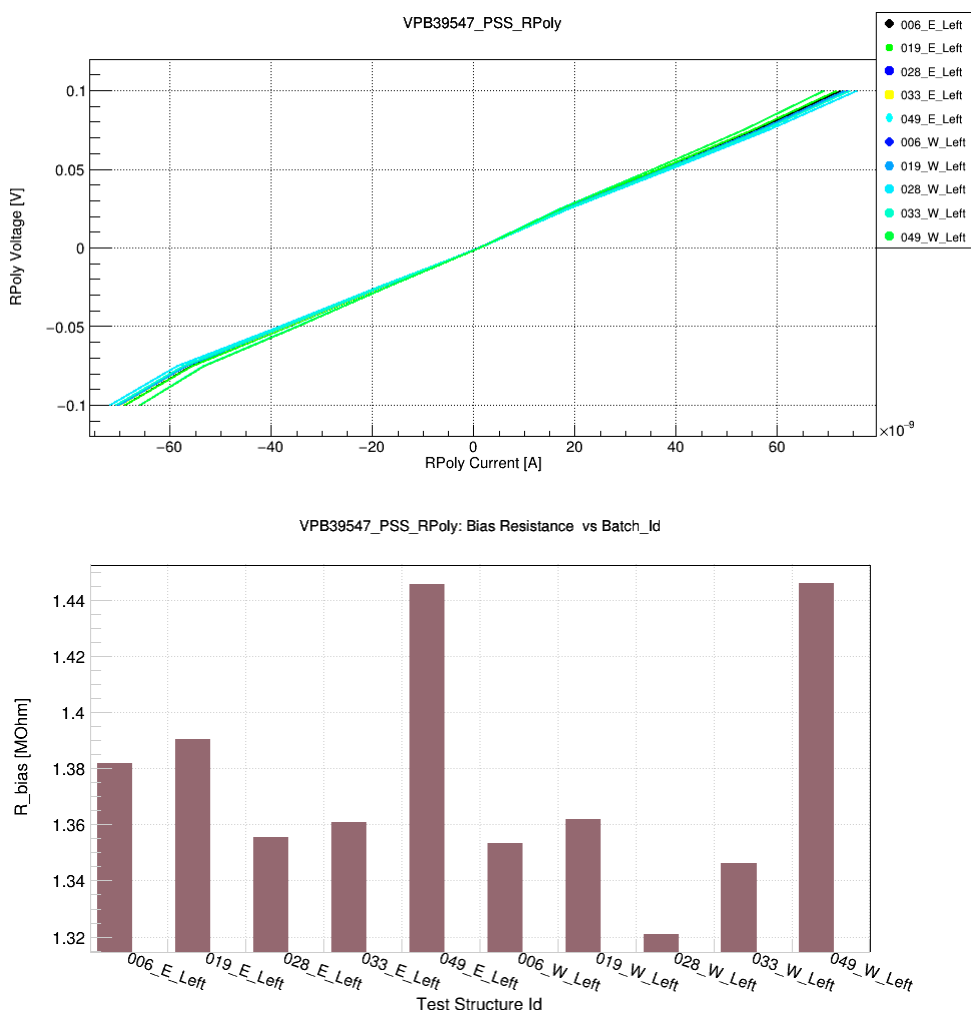


**Εικόνα 5.25:** (Πάνω) Χαρακτηριστικές καύκες V-I για τον υπολογισμό της αντίστασης RPoly των δοκιμών τύπου 2-S, (Κάτω) Πολυκρυσταλλική αντίσταση ( $R_{poly}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος RPoly για δοκίμια τύπου 2-S.

**Πίνακας 5.12:** Παράμετροι Rpoly για Δοκίμια 2-S

Παράμετροι\Δοκίμια	2-S
Αντίσταση Poly-Si	$1.44 \pm 0.03 \text{ M}\Omega$

### 5.2.5.2 Χαρακτηριστικές IV και Ιστογράμματα των Διατάξεων RPoly για Δοκίμια τύπου PSS



**Εικόνα 5.26:** (Πάνω) Χαρακτηριστικές καμπύλες V-I για τον υπολογισμό της αντίστασης RPoly των δοκιμών τύπου PSS, (Κάτω) Πολυκρυσταλλική αντίσταση ( $R_{poly}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος RPoly για δοκίμια τύπου PSS.

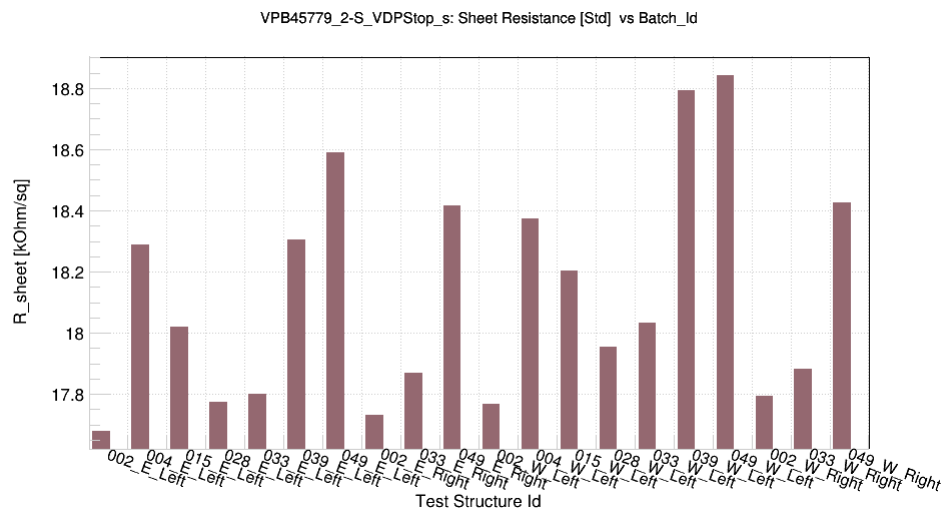
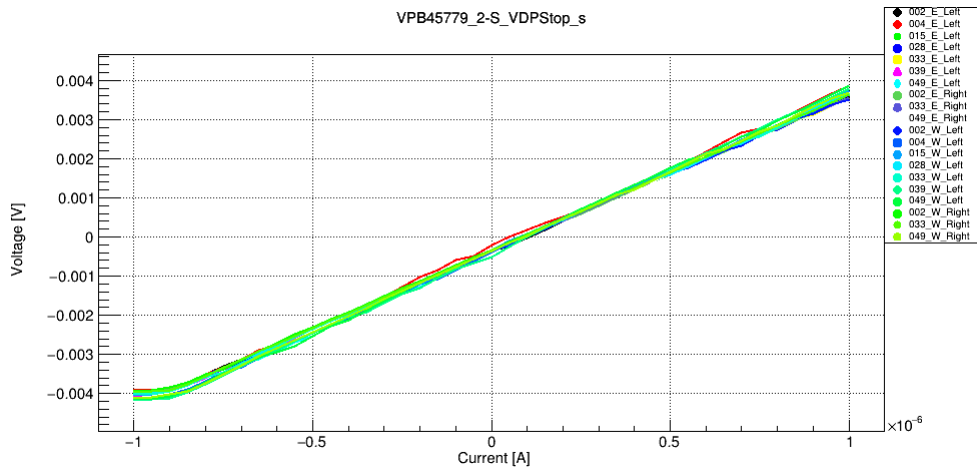
**Πίνακας 5.13:** Παράμετροι Rpoly για Δοκίμια PSS

Παράμετροι\Δοκίμια	PSS
Αντίσταση Poly-Si	$1.38 \pm 0.04 \text{ M}\Omega$

### 5.2.6 Διατάξεις Van der Pauw (P-stop)

Στις διατάξεις Van der Pauw εξάγονται χαρακτηριστικοί παράμετροι για τον χαρακτηρισμό της αντίστασης ταινίας. Η διάταξη VdPStop που παρουσιάζεται παρακάτω χαρακτηρίζει την αντίσταση των δακτυλίων p-stop για την απομόνωση των μικρολωρίδων από ανεπιθύμητα φορτία που συσσωρεύονται κάτω από την επιφάνεια του οξειδίου.

### 5.2.6.1 Χαρακτηριστικές V-I και Ιστογράμματα των Διατάξεων VdPStop για Δοκίμια τύπου 2-S

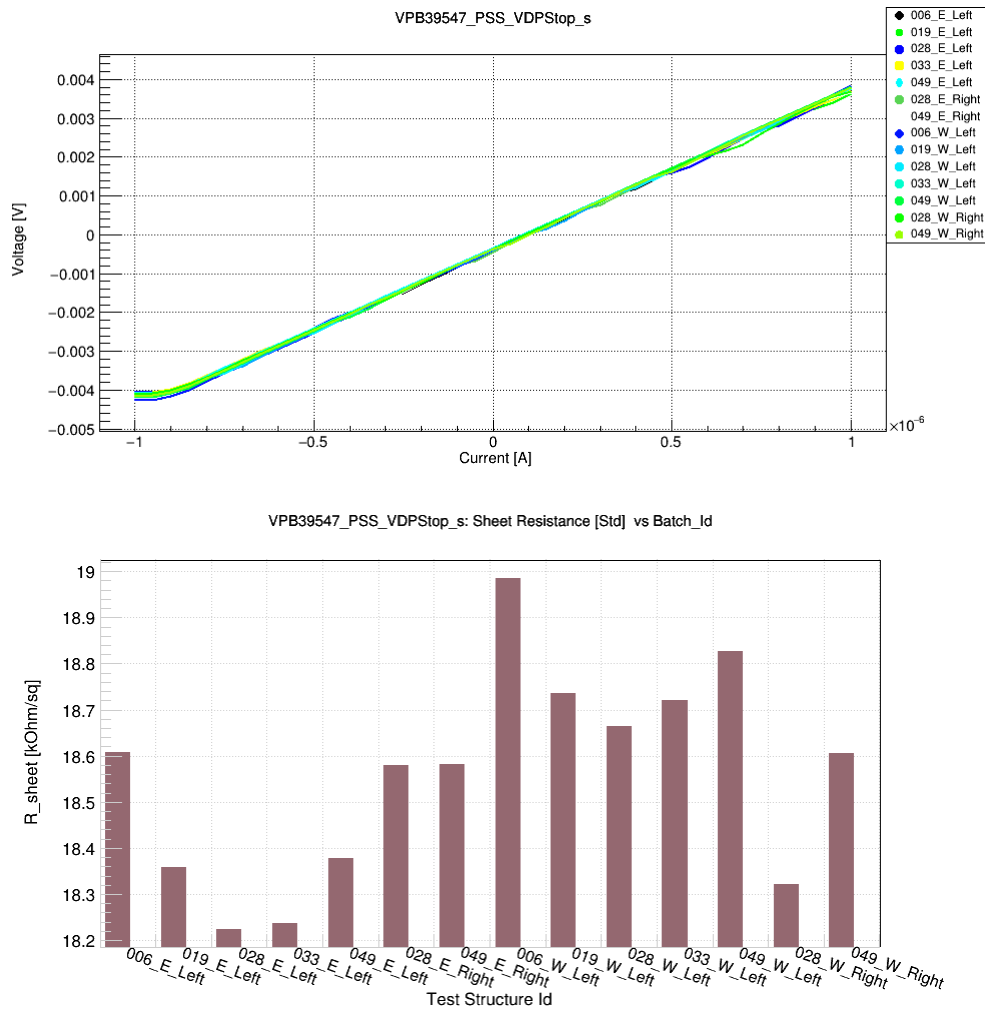


Εικόνα 5.27: (Πάνω) Χαρακτηριστικές καμπύκες V-I για την μέτρηση της αντίστασης ταινίας, (Κάτω) Αντίσταση ταινίας ( $R_{sheet}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος VdPStop για δοκίμια τύπου 2-S.

Πίνακας 5.13: Παράμετρος Αντίστασης Ταινίας P-stop για Δοκίμια 2-S

Παράμετροι\Δοκίμια	2-S	Όριο
Αντίσταση Ταινίας $R_{sheet}$ p-Stop	$18.1 \pm 0.4$ k $\Omega$ /sq	18-20 k $\Omega$ /sq

### 5.2.6.2 Χαρακτηριστικές V-I και Ιστογράμματα των Διατάξεων VdPStop για Δοκίμια τύπου PSS

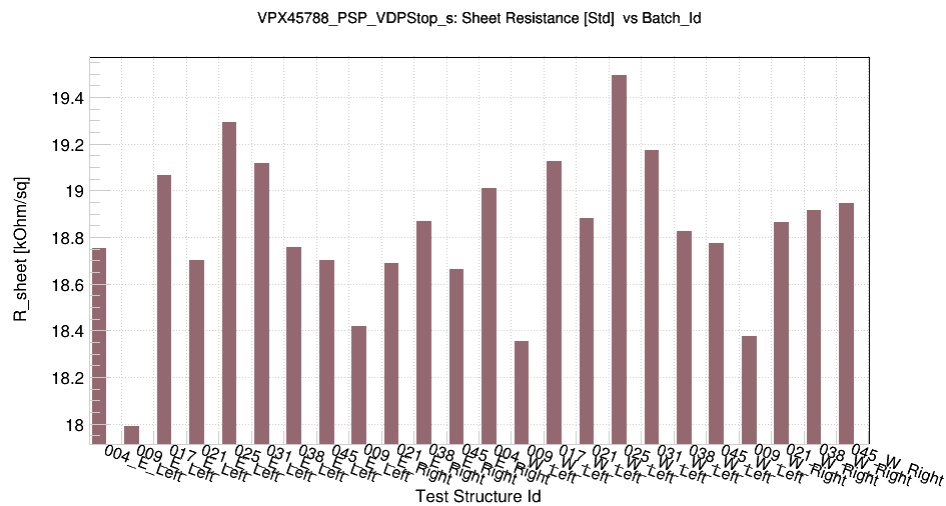
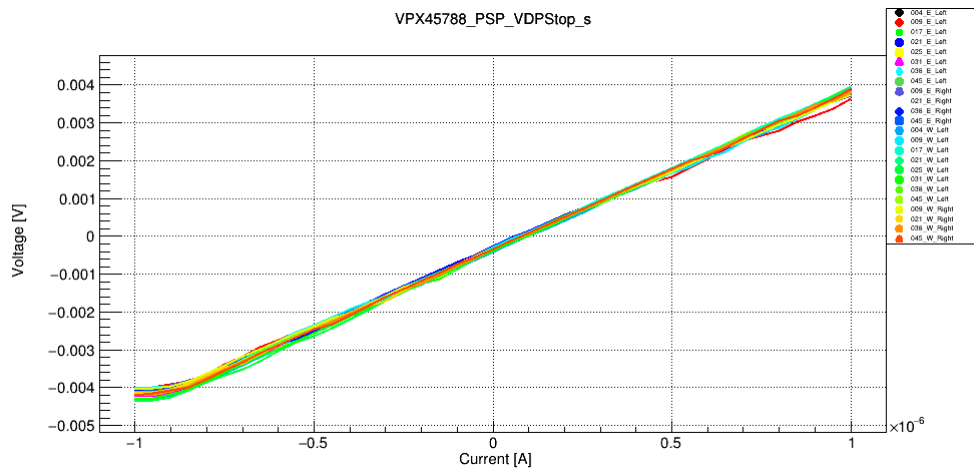


**Εικόνα 5.29:** (Πάνω) Χαρακτηριστικές καμπύλες V-I για την μέτρηση της αντίστασης ταινίας, (Κάτω) αντίσταση ταινίας ( $R_{sheet}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος VDPStop για δοκίμια τύπου PSS.

**Πίνακας 5.14:** Παράμετροι Αντίστασης Ταινίας P-stop για Δοκίμια PSS

Παράμετροι\Δοκίμια	PSS	Όριο
Αντίσταση Ταινίας $R_{sheet}$ p-Stop	$18.6 \pm 0.3$ $k\Omega/sq$	18-20 $k\Omega/sq$

### 5.2.6.3 Χαρακτηριστικές V-I και Ιστογράμματα των Διατάξεων VdPStop για Δοκίμια τύπου PSP



**Εικόνα 5.32:** (Πάνω) Χαρακτηριστικές καμπύκες V-I για την μέτρηση της αντίστασης ταινίας, (Κάτω) αντίσταση ταινίας ( $R_{sheet}$ ) σε συνάρτηση με τον αύξοντα αριθμό του δείγματος VDPStop για δοκίμια τύπου PSP.

**Πίνακας 5.15:** Παράμετροι Αντίστασης Ταινίας P-stop για Δοκίμια PSP

Παράμετροι\Δοκίμια	PSP	Όριο
Αντίσταση Ταινίας $R_{sheet}$ p-Stop	$18.8 \pm 0.3$ kΩ/sq	18-20 kΩ/sq

### 5.3 Συμπεράσματα Ανάλυσης με την Χρήση Λογισμικού

Τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών φαίνονται να είναι ικανοποιητικά, οι παράμετροι για τα δισκία πυριτίου VPB45779\_2-S, VPB39547\_PSS και VPX45788\_PSP για τα Halfmoons East και West βρίσκονται εντός των ορίων που έχουν τεθεί κατά τον

σχεδιασμό που ικανοποιούν τις προδιαγραφές του πειράματος. Όσον αφορά τους ανιχνευτές 2-S και PSS τα αποτελέσματα είναι κοντά, αντίθετα κάποια χαρακτηριστικά των PSP διαφοροποιούνται που οφείλεται το διαφορετικό μέταλλο που χρησιμοποιήθηκε (χρυσό αντί για αλουμίνιο). Συμπερασματικά ο χαρακτηρισμός των δομών σε όλη την επιφάνεια του δισκίου και επομένως συμπεραίνουμε ότι και οι ανιχνευτές θα έχουν τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί από το πείραμα.

# Κεφάλαιο 6

## Σύνοψη

Η αναβάθμιση των νέων τροchioδεικτικών ανιχνευτών του CMS/LHC αναμένεται να έχει ολοκληρωθεί στο διάστημα 2025-2027. Στο HL-LHC αναμένεται να παράγονται 200 γεγονότα ανά σύγκρουση και επομένως το περιβάλλον λειτουργίας των ανιχνευτών πυριτίου θα χαρακτηρίζεται από υψηλές δόσεις ακτινοβολίας που μπορούν να φτάσουν τα 12 MGy για τα εσωτερικά στρώματα του ανιχνευτή. Οι τύποι των αισθητήρων που προτάθηκαν είναι τα 2-S, PSS (ανιχνευτές μικρολωρίδων) και PSP (ανιχνευτές μακρο-ψηφίδων). Καθένας από τους παραπάνω αισθητήρες τοποθετούνται σε συγκεκριμένες αποστάσεις στον χώρο του κύριου ανιχνευτή. Το ΠΠΣΦ του ΕΚΦΕ «Δημόκριτος» σε συνεργασία με άλλα ινστιτούτα και το CERN συμμετέχει στον ποιοτικό έλεγχο των νέων αισθητήρων του αναβαθμισμένου ανιχνευτή τροχιών του πειράματος CMS.

### 6.1 Ποιοτικός Έλεγχος Διατάξεων Πυριτίου

Οι μετρήσεις των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στο χώρο του εργαστηρίου συσώρευσαν έναν όγκο δεδομένων ανά παρτίδα δισκίων πυριτίου (wafer) για κάθε ένα από τους τύπους αισθητήρων που προαναφέρθηκαν. Κατά την διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας ο χαρακτηρισμός των δομών πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικό ανάλυσης που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που παρουσιάστηκαν ήταν ικανοποιητικά καθώς οι μετρούμενες παράμετροι βρίσκονταν εντός των προκαθορισμένων ορίων. Για κάθε έναν από τους τρεις τύπους ανιχνευτών ο χαρακτηρισμός των δομών ελέγχου *East* και *West* έδειξε ικανοποιητική ομογένεια σε όλη την περιοχή των δισκίων.

Κάθε ημιαγώγιμη διάταξη που μετρήθηκε προσομοίαζε τις λειτουργίες των ανιχνευτών μικρο-λωρίδων. Στις δομές ελέγχου οι διατάξεις των πυκνωτών MOS και των τρανζίστορ MOSFET προσομοιάζουν την συμπεριφορά του οξειδίου μεταξύ των μεταλλικών λωρίδων με τις λωρίδες n+. Οι παράμετροι που χαρακτηρίστηκαν δίνουν μια εικόνα για την αποδοτική συλλογή του σήματος κατά την διαδικασία της AC-σύζευξης. Μια ακόμα διάταξη που μελετά τα επιφανειακά φαινόμενα πάνω στην επιφάνεια του οξειδίου ήταν η GCD. Ο χαρακτηρισμός των διόδων n+p προσομοιάζει την συμπεριφορά στην επαφή των λωρίδων n+ με το σώμα του ανιχνευτή (p-bulk) προσδιορίζοντας την περιοχής απογύμνωσης της επαφής που παίζει καίριο ρόλο για την ικανοποιητική συλλογή των φορτίων που διαμορφώνουν το σήμα. Η αντίσταση ταινίας για τα p-stop που απομονώνουν τα κανάλια του ανιχνευτή μελετήθηκε από τις διατάξεις Van der Pauw. Τέλος η μέτρηση για την πολύκρυσταλλική αντίσταση προσομοιάζει τους αντιστάτες μεταξύ του δακτυλίου πόλωσης και των μικρο-λωρίδων. Τέλος όλες οι παράμετροι που μελετήθηκαν ήταν σύμφωνες με τις προδιαγραφές που είχαν τεθεί κατά τον σχεδιασμό των διατάξεων.





# Βιβλιογραφία

- [1] «The Phase-2 Upgrade of the CMS Tracker,» CMS Collaboration, 1 July 2017. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://cds.cern.ch/>.
- [2] L. Evans και P. Bryant, «LHC Machine,» *Journal of Instrumentation*, 14 August 2008.
- [3] C. Collaboration, «Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the,» 28 January 2013. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://cds.cern.ch/>.
- [4] A. Collaboration, «Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC,» 01 August 2012. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://cds.cern.ch/>.
- [5] W. Herr και B. Muratori, «Concept of luminosity,» 11 04 2006. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://cds.cern.ch>.
- [6] C. Collaboration, «The CMS experiment at the CERN LHC,» *Journal of Instrumentation*, 14 August 2008.
- [7] S. R. Chowdhury, «The Phase-2 Upgrade of the CMS Outer Tracker,» *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research*, 1 November 2020.
- [8] P. Luukka, «CMS Inner Tracker Upgrade,» 11 January 2020. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://cds.cern.ch/>.
- [9] E. Migliore, «The CMS Tracker Upgrade for the High-Luminosity LHC,» Dipartimento di Fisica, Torino, 2019.
- [10] S.O.Kasap, ΑΡΧΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ, ΑΘΗΝΑ: ΠΑΠΙΑΣΩΤΗΡΙΟΥ, 2004.
- [11] G. LUTZ, Semiconductor Radiation Detectors, Munich, Germany: Springer, 2007.
- [12] S. a. K. K.Ng, Physics of Semiconductor Devices, Hoboken, New Jersey: WILEY INTERSCIENCE, 2007.
- [13] H. Spieler, Semiconductor Detector Systems, Oxford, New York: OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS, 2005.
- [14] F. Hartmann, Evolution of Silicon Sensor Technology in Particle Physics, International Publishing AG: Springer, 2017.
- [15] E. N. & J. BREWS, MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, Murray Hill, New Jersey: JOHN WILEY & SONS, 1982.
- [16] V. Hinger, *Silicon Sensor Process Quality Control for the CMS Phase-2 Upgrade*,

Vienna, 2021.

- [17] C. Piemonte, «Device Simulations of Isolation Techniques». *IEEE TRANSACTIONS ON NUCLEAR SCIENCE*, VOL. 53, NO. 3, JUNE 2006.
- [18] T. Bergauer, U. Bartl, D. Blöch, M. Döcke, M. Dragicevic, J. Hacker, V. Hinger, A. König, E. Pree και M. Valentan, «History, status and prospects of producing silicon sensors for HEP,» *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A*, pp. 1-6, 21 April 2019.
- [19] Y. Unnoa, S. Teradaa, T. Kohrikia, Y. Ikegamia, K. Harab, K. Inoueb και A. Mochizukib, «p-Bulk silicon microstrip sensors and irradiation,» *Science Direct*, 24 May 2007.
- [20] E. Fretwurst, G. Lindstroem, I. Pintilie και J. Stahl, «Radiation damage in silicon detectors caused by hadronic and electromagnetic irradiation,» University of Hamburg, Germany, National Institute for Material Physics, Bucharest, November 2002. [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://inspirehep.net/>.
- [21] E. Currás, M. Fernández, C. Gallrapp, L. Gray, M. Mannelli, P. Meridiani, M. Moll, S. Nourbakhsh, C. Scharf, P. Silva, G. Steinbrueck, T. T. d. Fatis και I. Vila, «Radiation hardness and precision timing study of silicon detectors for the CMS High Granularity Calorimeter (HGC),» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 25 March 2016.
- [22] A. Dierlamm, «Silicon sensor developments for the CMS Tracker upgrade,» *Journal of Instrumentation*, 31 January 2012.
- [23] F. Ravera, «The CMS Outer Tracker for the High Luminosity LHC,» CMS Collaboration, Batavia, 2022.
- [24] E. Fretwurst, E. Garutti, M. Hufschmidt, R. Klanner, I. Kopsalis και J. Schwandt, «The influence of edge effects on the determination of the doping profile of silicon pad diodes,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, pp. 231-236, 21 September 2017.
- [25] K. Misiakos και D. Tsamakis, «Accurate measurements of the silicon intrinsic carrier density from 78 to 340 K,» *Journal of Applied Physics*, pp. 95 and 319-356, 1 SEPTEMBER 1993.
- [26] C. Becker, C. Gößling, C. Lichau, T. Wübber, J. Wüstenfeld και R. Wunstorf, «Gate-controlled diodes for characterization of the Si–SiO<sub>2</sub> interface with respect to surface effects of silicon detectors,» *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, pp. 605-613, 21 April 2000.
- [27] D. Schroder, *Semiconductor Material and Device Characterization*, New York: Wiley, 1990.

- [28] K. Terada, «Comparison of MOSFET-threshold-voltage extraction methods,» *Solid-State Electronics*, pp. 35-40, 1 January 2001.
- [29] A. Ortiz-Conde, F. G. Sanchez, J. Liou, A. Cerdeira, M. Estrada και Y. Yue, «A review of recent MOSFET threshold voltage,» *Microelectronics Reliability*, pp. 583-596, April–May 2002.
- [30] L. J. v. d. PAUW, «A METHOD OF MEASURING SPECIFIC RESISTIVITY AND HALL EFFECT OF DISCS OF ARBITRARY SHAPE,» *Philips Research Reports*, pp. 1-9, February 1958.
- [31] T. A. Schreyer και K. Saraswat, «A two-dimensional analytical model of the cross-bridge Kelvin resistor,» *IEEE*, 1 December 1986.
- [32] «<https://root.cern/>,» [Ηλεκτρονικό]. Available: <https://root.cern/about/>.
- [33] A. Oblakowska-Mucha, «RADIATION DAMAGE IN SILICON PARTICLE,» *ACTA PHYSICA POLONICA B*, 3 October 2017.