



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ακτινοβόληση με πρωτόνια 8 MeV
Ημιαγωγικών μνημών με εμφυτευμένα νανοσωματίδια
για αποθήκευση φορτίου

ΖΑΧΟΠΟΥΛΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

Επιβλέπων :

Δ. Τσουκαλάς, Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τ' αποτελέσματα της έρευνας για την ακτινοβόληση με πρωτόνια ενέργειας 8 MeV ηλεκτρονικών μη πτητικών ημιαγωγικών μνήμων με νανοσωματίδια. Χρησιμοποιήθηκαν ως δείγματα τράνζίστορ με εμφυτευμένα νανοσωματίδια πυριτίου καθώς και πυκνωτές με μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας. Η σωματιδιακή ακτινοβολία που επιδρά με τις διατάξεις προκαλεί βλάβες τόσο στο οξείδιο όσο και στο υπόστρωμα του Si που αποτελεί το δομικό στοιχείο των μνημών μας. Σκοπός μας είναι να μελετήσουμε τις μεταβολές των χαρακτηριστικών των μνημών πριν και μετά την ακτινοβόληση και να αποφανθούμε σχετικά με την αξιοπιστία τους, την αντοχή τους και τη γενικότερη συμπεριφορά τους ως μνήμες.

ABSTRACT

In this paper we present the results of 8 MeV proton irradiation on electronic semiconductor non volatile memories. Samples used during this experiment are transistors implanted with silicon nanoparticles as well as MOS capacitors implanted with metallic platinum nanoparticles. The charged particles that traverse these devices can cause severe damage to the dielectric or even the silicon substrate, which is the structural element of our devices. Our goal is to study the changes of the memories' characteristics, before and after irradiation, so that we can discuss about their reliability, endurance and their mnemonic behavior as a whole.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ειλικρινά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Δημήτριο Τσουκαλά, ο οποίος με εμπιστεύτηκε αναθέτοντάς μου το παρόν, εκπονηθέν έργο και μου μετέφερε τις γνώσεις του ολά αυτά τα χρόνια.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Dr. Emanuele Verrelli, που χωρίς την υπομονή αλλά και την επιστημονική του κατάρτισή του δεν θα ήταν δυνατή η διεξαγωγή και ολοκλήρωση της παρουσας διπλωματικής εργασίας.

Δεν θα πρέπει σε καμία περίπτωση να παραλείψω τον συνάδελφο Αράπη Παναγιώτη ο οποίος κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της δικής του διπλωματικής εργασίας με βοήθησε σε μεγάλο βαθμό ώστε να καταφέρω να συνεχίσω το τρέχον έργο.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους γονείς μου για την υπομονή και κατανόηση που επέδειξαν όλα αυτά τα χρόνια.

Γ.Α.Ζ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή.....	8
Κεφάλαιο 1. Ο πυκνωτής Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού (MOS).....	9
1.1 Εισαγωγή.....	9
1.2 Ο ιδανικός πυκνωτής MOS.....	10
1.2.1 Η δομή του πυκνωτή MOS.....	10
1.2.2 Μηδενική τάση πύλης.....	11
1.2.3 Μη μηδενική τάση πύλης.....	12
1.2.4 Η χωρητικότητα και οι CV χαρακτηριστικές του ιδανικού πυκνωτή MOS..	14
1.3 Ο πραγματικός πυκνωτής MOS.....	17
1.3.1 Φορτία στο οξείδιο.....	17
1.3.2 Διέλευση φορτίων μέσα απο το οξείδιο.....	19
1.3.3 Διηλεκτρική κατάρρευση του οξειδίου (Dielectric Breakdown).....	20
Βιβλιογραφία.....	21
Κεφάλαιο 2. Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου MOSFET.....	22
2.1 Εισαγωγή.....	22
2.2 Λειτουργία τρανζίστορ.....	23
2.2.1 Χαρακτηριστική καμπύλη I_d-V_d	23
2.2.2 Χαρακτηριστική καμπύλη I_d-V_g	26
Βιβλιογραφία.....	28

Κεφάλαιο 3. Μνήμες τύπου MOS & MOSFET με εμφυτευμένα νανοσωματίδια..	29
3.1 Εισαγωγή.....	29
3.2 Μνήμες Floating Gate-Flash με αιωρούμενη πύλη.....	30
3.3 Μνήμες MOS&MOSFET με νανοσωματίδια.....	32
3.3.1 Μηχανισμοί αποθήκευσης φορτίου.....	33
3.3.2 Απαιτήσεις στα χαρακτηριστικά λειτουργίας ημιαγωγικών δομών.....	35
3.4 Σύγκριση NC με FG μνήμες.....	36
Βιβλιογραφία.....	38
Κεφάλαιο 4. Η ακτινοβολία στο διάστημα.....	39
4.1 Εισαγωγή.....	39
4.2 Πηγές ακτινοβολίας στο διάστημα.....	39
Βιβλιογραφία.....	45
Κεφάλαιο 5. Επίδραση της ακτινοβολίας στο οξειδίο του πυκνωτή MOS.....	46
5.1 Οι διαδικχικές φάσεις μετά την ακτινοβόληση του MOS.....	46
5.2 Μετατόπιση τάσης κατωφλίου.....	48
5.3 Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων/οπών.....	51
5.3.1 Πυκνότητα οπών που επιζούν.....	51
5.3.2 Μοντέλα δύο ακραίων περιπτώσεων.....	52
5.3.3 Υπολογισμός της αρχικής μέγιστης μετατόπισης της τάσης V_T	54
5.4 Μεταφορά φορτίων.....	55
5.5 Οπές παγιδευμένες κοντά στη διεπιφάνεια.....	56
5.5.1 Το φαινόμενο της αντίστροφης ανόπτησης.....	59
Βιβλιογραφία.....	61

Κεφάλαιο 6. Κατασκευή δειγμάτων (Μνήμες MOS με νανοσωματίδια PT)	62
6.1 Εισαγωγή.....	62
6.2 Περιγραφή του συστήματος εναπόθεσης.....	63
6.3 Σύντομη περιγραφή κατασκευής δειγμάτων.....	66
6.4 Πυκνότητα νανοσωματιδίων και παράθυρο μνήμης.....	69
Κεφάλαιο 7. Ακτινοβόληση με πρωτόνια 8 MeV NC-MOS πυκνωτών	72
7.1 Τα δείγματα του περάματος.....	72
7.2 Πειραματική διάταξη των μετρήσεων.....	73
7.3 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός δειγμάτων πριν την ακτινοβόληση.....	75
7.4 Προγραμματισμός μνημών και παράθυρο μνήμης.....	80
7.5 Ακτινοβόληση δειγμάτων.....	82
7.6 Πειραματική μέθοδος εντοπισμού των ακτινοβολημένων περιοχών.....	88
7.7 Επίδραση της ακτινοβολίας σε αρχικά προγραμματισμένες μνήμες.....	90
Βιβλιογραφία.....	92
Κεφάλαιο 8. Ακτινοβόληση NC-MOSFET με πρωτόνια 8 MeV	93
8.1 Εισαγωγή.....	93
8.2 Τα δείγματα του περάματος.....	93
8.3 Συνδεσμολογία πειραματικών διατάξεων για τις ηλεκτρικές μετρήσεις.....	96
8.4 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός πριν την ακτινοβόληση.....	99
8.4.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης.....	99
8.4.2 Μελέτη του παραθύρου μνήμης των τρανζίστορ.....	102
8.5 Ακτινοβόληση δειγμάτων.....	106
8.6 Επίδραση της ακτινοβολίας σε προγραμματισμένα CAST.....	109
8.6.1 Επίδραση της ακτινοβολίας στην μετατόπιση της τάσης κατωφλίου V_T	111
8.6.2 Εξάρτηση της κλίσης της χαρακτηριστικής I_d-V_g σε σχέση με τη δόση.....	114

8.7 Αντοχή (Endurance) των CAST κατά τον επαναπρογραμματισμό της μνήμης	115
8.8 Χρόνος διατήρησης φορτίου σε προγραμματισμένα CAST (Retention).....	117
8.9 Συμπεράσματα.....	119
Βιβλιογραφία.....	121

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τ' αποτελέσματα της έρευνας πάνω στις συνέπειες της ακτινοβόλησης με πρωτόνια ενέργειας 8 MeV ηλεκτρονικών μη πτητικών μνημών με εμφυτευμένα νανοσωματίδια. Ως μη πτητικές μνήμες θεωρούμε τις ημιαγωγικές διατάξεις που ο χρήστης μπορεί να αποθηκεύει την πληροφορία ως φορτίο, θετικό ή αρνητικό, το οποίο θα παραμένει χωρίς την εφαρμογή τάσης και υπάρχει η δυνατότητα ανάγνωσης αυτής της δυαδικής πληροφορίας. Οι διατάξεις που χρησιμοποιούνται είναι τρανζίστορ MOSFET με εμφυτευμένα νανοσωματίδια πυριτίου καθώς και πυκνωτές MOS με εμφυτευμένα μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας. Οι ακτινοβολήσεις πραγματοποιήθηκαν στον επιταχυντή TANDEM που βρίσκεται στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος και οι ηλεκτρικές μετρήσεις έγιναν στο κτήριο φυσικής του ΕΜΠ.

Σκοπός της έρευνας είναι να δούμε το κατά πόσο επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά των μνημών (αντοχή κατά τον επαναπρογραμματισμό και κατακράτηση φορτίου) μετά την αλληλεπίδραση με την ιοντίζουσα ακτινοβολία καθώς και τα γενικότερα χαρακτηριστικά ως μνήμες.

Στο πρώτο μέρος της πειραματικής έρευνας αναφερόμαστε πάνω στον χαρακτηρισμό πυκνωτών MOS με εμφυτευμένα νανοσωματίδια πλατίνας μέσης διαμέτρου 3 nm πριν και μετά την ακτινοβόληση. Τα δείγματα κατασκευάστηκαν στον καθαρό χώρο (clean room) του τομέα φυσικής και η διαδικασία κατασκευής του αναφέρεται σε ξεχωριστό κεφάλαιο όπως παρουσιάζεται στη συνέχεια.

Το δεύτερο πειραματικό κομμάτι πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος της E.S.A. (European Space Agency) που έχει αναλάβει ο τομέας Φυσικής του ΕΜΠ και αφορά την ακτινοβόληση τρανζίστορ με εμφυτευμένα νανοσωματίδια πυριτίου. Σ' αυτό το μέρος μελετήθηκε η στατιστική συμπεριφορά διατάξεων CAST (Cell Array Stress Test), χιλιάδες έως εκατομμύρια τρανζίστορ-μνήμες δηλαδή συνδεδεμένα σε σειρά, καθώς και διατάξεις single cell τρανζίστορ που αποτελούν μνήμες ενός κελιού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Ο πυκνωτής Μετάλλου – Οξειδίου – Ημιαγωγού (MOS).

1.1 Εισαγωγή.

Οι πυκνωτές MOS αποτελούν ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία στα ψηφιακά κυκλώματα. Χρησιμοποιούνται συνήθως σαν στοιχεία αποθήκευσης φορτίου στις μνήμες τυχαίας προσπέλασης (Random Access Memories, RAMs), ενώ αποτελούν το βασικό στοιχείο των τρανζίστορ επίδρασης πεδίου MOSFET.

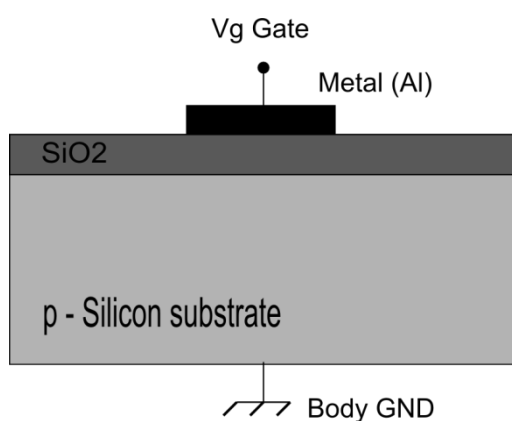
Ο πυκνωτής MOS αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου συνόλου διατάξεων μετάλλου – μονωτή – ημιαγωγού με όνομα MIS (Metal – Insulator – Semiconductor). Ουσιαστικά η δομή MIS αποτελείται από έναν ημιαγωγό (τύπου p ή n), πάνω στον οποίο έχει δημιουργηθεί ένα μονωτικό στρώμα (συνήθως SiO_2) και πάνω σ' αυτό ένα στρώμα μετάλλου, όπως για παράδειγμα το αλουμίνιο (Al).

Η δομή MIS παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από το έτος 1959 από τους Moll, Pfann και Garrett. Τα χαρακτηριστικά τους αναλύθηκαν από τους Frankl, Linder και η πρώτη επιτυχημένη κατασκευή MOS έγινε από τους Ligenza και Spitzer Το 1960.

1.2 Ο ιδανικός πυκνωτής MOS.

1.2.1 Η δομή του πυκνωτή MOS.

Στην εικόνα 1.1 παρουσιάζεται η εγκάρσια τομή ενός πυκνωτή MOS. Ο ημιαγωγός και το μέταλλο αποτελούν τους οπλισμούς του πυκνωτή, ενώ το οξείδιο είναι το διηλεκτρικό του.



Εικόνα 1.1.
Εγκάρσια τομή της δομής του πυκνωτή MOS.

Ένας ιδανικός πυκνωτής χαρακτηρίζεται από τις παρακάτω ιδιότητες:

1. Το διηλεκτρικό παρουσιάζει άπειρη αντίσταση με αποτέλεσμα να μην έχουμε μεταφορά φορτίου διαμέσω του οξειδίου.
2. Για συνθήκες οποιασδήποτε τάσης φορτία μπορούν να βρίσκονται μόνο μέσα στον ημιαγωγό καθώς και στην επιφάνεια του μετάλλου, ενώ στο οξείδιο δεν παρατηρούμε καθόλου φορτία.
3. Για μηδενική τάση πύλης η ζώνη Fermi του μετάλλου βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με αυτή του ημιαγωγού.

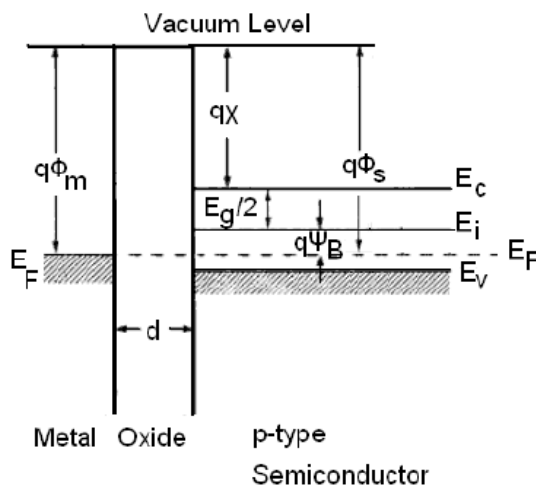
1.2.2 Μηδενική τάση πύλης.

Πιο αναλυτικά, το τρίτο χαρακτηριστικό κατά σειρά όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως για τον ιδανικό πυκνωτή, έχει ως εξής: Για μηδενική εξωτερική τάση στην πύλη (μέταλλο) $V_g = 0$ η διαφορά του έργου εξόδου του μετάλλου $q\Phi_m$ και του έργου εξόδου του ημιαγωγού $q\Phi_s$ είναι μηδέν. Άρα ιδανικά θα πρέπει να ισχύει ότι:

$$q\Phi_m = q\Phi_s \quad (1.1)$$

Το έργο εξόδου του αλουμινίου υπολογίζεται στα 4.1 eV.

Στην εικόνα 1.2 παρουσιάζεται το ενεργειακό διάγραμμα ενός ιδανικού πυκνωτή p-MOS για $V_g = 0$.



Εικόνα 1.2.

Το ενεργειακό διάγραμμα ιδανικού πυκνωτή MOS για μηδενική τάση πύλης.

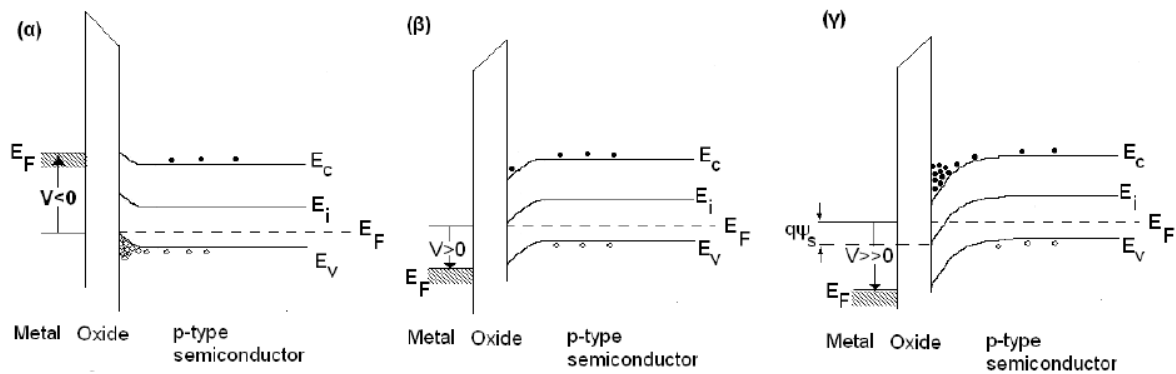
Στην περίπτωση μας ισχύει η σχέση επιπέδων ζωνών (flat band):

$$q\Phi_{ms} = q\Phi_m - q\Phi_s = q\Phi_m - (q\chi + E_g/2 + q\Psi_B) \quad (1.2)$$

Με $q\chi$ συμβολίζουμε την ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στην ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού και το επίπεδο του κενού και ονομάζεται ηλεκτρονική συγγένεια (affinity). Η ποσότητα $q\Psi_B$ όπως φαίνεται από το σχήμα είναι η διαφορά ($E_i - E_F$) όπου E_i το ενδογενές επίπεδο Fermi.

1.2.3 Μη μηδενική τάση πύλης.

Στην περίπτωση που εφαρμόζεται μη μηδενική τάση στην πύλη διακρίνουμε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις ανάλογα με το είδος της πόλωσης: (α) Συσσώρευση, (β) Απογύμνωση (γ) Αντιστροφή. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα ενεργειακά διαγράμματα για την κάθε περίπτωση.



Εικόνα 1.3.

Το ενεργειακά διαγράμματα ιδανικού p - MOS για μη μηδενική τάση πύλης για:

- (α) Αρνητική πόλωση – Συσσώρευση.
- (β) Θετική πόλωση – Απογύμνωση.
- (γ) Ισχυρή θετική πόλωση – Αντιστροφή.

Πιο αναλυτικά έχουμε:

- $V_G < 0$: Συσσώρευση (Accumulation)

Με την εφαρμογή αρνητικής τάσης στην πύλη μειώνεται το ηλεκτροστατικό δυναμικό του μετάλλου σε σχέση με τον ημιαγωγό, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι ενέργειες των ηλεκτρονίων σε αυτό σε σχέση με του ημιαγωγού. Γι' αυτό το λόγο παρατηρούμε κάμψη των ενεργειακών ζωνών προς τα πάνω με συνέπεια τη συσσώρευση οπών στην περιοχή κάτω από το οξείδιο.

- $V_G > 0$: Απογύμνωση (Depletion)

Για μικρές θετικές τάσεις στην πύλη δημιουργείται ένα πεδίο στο οξείδιο που επιταχύνει τα αρνητικά φορτία προς το ηλεκτρόδιο του μετάλλου και έτσι εμφανίζεται πλεόνασμα θετικού φορτίου στη διεπιφάνεια μετάλλου – οξειδίου. Οι ενεργειακές ζώνες στρέφονται προς τα κάτω και μια περιοχή

εύρους w απογυμνώνεται από τους φορείς πλειοψηφίας. Στην περιοχή αυτή μένουν μόνο φορείς αντίθετου φορτίου με επιφανειακή πυκνότητα

$$Q_{SC} = -qN_A W \quad (1.3)$$

- $V_G \gg 0$: Αναστροφή (Inversion)

Για ακόμα θετικότερες τάσεις στην πύλη έχουμε μεγαλύτερη κάμψη των ενεργειακών ζωνών με αποτέλεσμα το επίπεδο Fermi E_F να μετατοπίζεται πάνω από το ενδογενές επίπεδο Fermi E_i . Σ' αυτή την περίπτωση έχουμε τοπική συγκέντρωση ηλεκτρονίων κάτω από το οξείδιο συνολικού φορτίου Q_n , το πλήθος των οποίων όταν ξεπεράσει τη συγκέντρωση N_A (συγκέντρωση αποδεκτών υποστρώματος) θα μεγαλώνει χωρίς να έχουμε περαιτέρω αύξηση της περιοχής απογύμνωσης (strong inversion). Τότε το πλάτος της θα είναι μέγιστο w_{max} και το συνολικό φορτίο του ημιαγωγού θα δίνεται από την σχέση:

$$Q_S = Q_n - qN_A w_{max} = Q_s - \sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\Psi_B)} \quad (1.4)$$

όπου $\Psi_B = \Psi_s / 2$ ή αλλιώς $\Psi_s = 2\Psi_B$.

Το δυναμικό Ψ_s είναι η ποσότητα που ορίζεται ως η απόσταση του επιπέδου E_i πριν την εφαρμογή της τάσης, από το επίπεδο E_i που έχει καμφθεί λόγω εφαρμογής της τάσης. Για:

- $\Psi_s = 0$ έχουμε συνθήκη επιπέδων ζωνών (flat band)
- $\Psi_s < 0$ έχουμε συσσώρευση οπών (accumulation)
- $\Psi_s > 0$ έχουμε απογύμνωση οπών (depletion)
- $\Psi_s > \Psi_B$ έχουμε αντιστροφή (inversion)

Ισχυρή αντιστροφή εμφανίζεται για

$$\Psi_s = 2 \Psi_B = \frac{2KT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (1.5)$$

Όπου T η θερμοκρασία (K), $K = 8.617 \cdot 10^{-5} \text{ eV} \cdot \text{K}^{-1}$ η σταθερά Boltzmann και n_i η ενδογενής συγκέντρωση φορέων του ημιαγωγού.

1.2.4 Η χωρητικότητα και οι CV χαρακτηριστικές του ιδανικού πυκνωτή MOS.

Η συνολική χωρητικότητα ενός πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{d(-Q_s)}{dV_G} \quad (1.6)$$

Η εμφάνιση του (-) στην παραπάνω έκφραση δικαιολογεί την παρουσία φορτίου στον ημιαγωγό πάντα αντίθετου από την εφαρμοζόμενη τάση στην πύλη.

Η τάση πύλης μοιράζεται εν μέρει στο οξειδίο και εν μέρει στον ημιαγωγό:

$$V_G = V_{ox} + \Psi_S = -\frac{Q_s}{C_{ox}} + \Psi_S \quad (1.7)$$

όπου $C_{ox} = \epsilon_{ox}/d_{ox}$ η χωρητικότητα του οξειδίου ανά μονάδα επιφάνειας.

Η συνολική χωρητικότητα του πυκνωτή δίνεται από το άθροισμα των χωρητικοτήτων οξειδίου και απογύμνωσης σε σειρά όπως φαίνεται παρακάτω:

$$C = \frac{C_{ox}C_d}{C_{ox}+C_d} \quad (1.8)$$

με την χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας στην περιοχή απογύμνωσης να ισούται με

$$C_d = \frac{\epsilon_s}{w} \quad (1.9)$$

Για την περίπτωση της συσσώρευσης, που έχουμε αρνητική τάση πύλης ($V_G < 0$), δεν έχουμε περιοχή απογύμνωσης με αποτέλεσμα να έχουμε μέγιστη συνολική χωρητικότητα:

$$C_{max} = C_{ox} \quad (1.10)$$

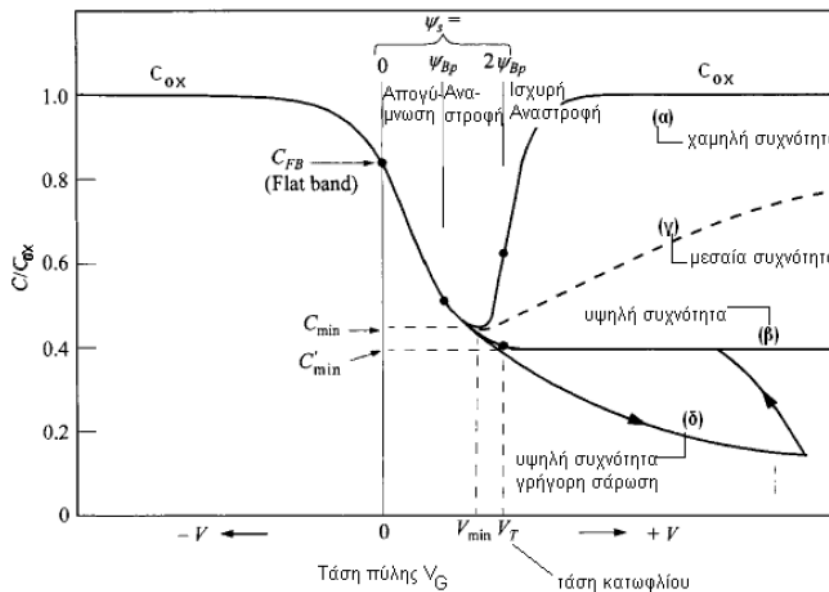
Αντίθετα για την περιοχή της απογύμνωσης, όπου έχουμε μια θετική, αυξανόμενη τάση πύλης ($V_G > 0$), η συνολική χωρητικότητα μειώνεται μέχρι να φτάσει μια ελάχιστη τιμή λόγω της μέγιστης τιμής του πλάτους $w = w_{max}$ της περιοχής απογύμνωσης (ισχυρή αντιστροφή):

$$C_{min} = \frac{C_{ox}C_{dmax}}{C_{ox}+C_{dmax}} \quad (1.11)$$

Η μικρότερη τάση που πρέπει να εφαρμοστεί ώστε να έχουμε την ελάχιστη συνολική χωρητικότητα ονομάζεται τάση κατωφλίου V_T (Threshold Voltage):

$$V_T = V_{ox} + \Psi_{s(inversion)} = \frac{Q_S}{C_{ox}} + 2 \cdot \Psi_B = \frac{\sqrt{2q\epsilon_S N_A (2\Psi_B)}}{C_{ox}} + \frac{2KT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (1.12)$$

Η συχνότητα έχει σημαντική επίδραση στην χαρακτηριστική καμπύλη χωρητικότητας – τάσης όπως φαίνεται στην εικόνα 1.4.



Εικόνα 1.4. Η εξάρτηση της καμπύλης χωρητικότητας – τάσης με την συχνότητα για έναν ιδανικό πυκνωτή MOS.

Στις υψηλές συχνότητες (1MHz) ο αριθμός των ηλεκτρονίων στο στρώμα αναστροφής δεν μπορεί ν' αυξηθεί για μικρές μεταβολές της τάσης στην πύλη, γιατί δεν βρίσκονται άλλα ηλεκτρόνια στο υπόστρωμα ώστε να προστεθούν σ'αυτά του στρώματος αναστροφής. Έτσι για να ισορροπηθεί το φορτίο της πύλης που μεταβάλλεται αλλάζει το φορτίο της περιοχής απογύμνωσης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η συνολική χωρητικότητα να φτάσει σε μια ελάχιστη τιμή όταν η περιοχή απογύμνωσης γίνει μέγιστη (w_{max}).

Στις χαμηλές συχνότητες (5-100 Hz) προλαβαίνουν να δημιουργηθούν ηλεκτρόνια στο υπόστρωμα τα οποία εμπλουτίζουν το στρώμα αναστροφής (inversion layer) το οποίο ακολουθεί τις μεταβολές στην πύλη.

Στην περίπτωση που έχουμε γρήγορο ρυθμό μεταβολής της τάσης για υψηλή συχνότητα δεν παρατηρείται δημιουργία στρώματος αναστροφής, αλλά εμφανίζεται το φαινόμενο της βαθιάς απογύμνωσης (deep depletion). Σ' αυτή την περίπτωση δεν προλαβαίνουν να δημιουργηθούν ηλεκτρόνια αναστροφής και το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης ξεπερνάει την μέγιστη τιμή του με την ολοένα αυξανόμενη τάση πύλης. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η μεγαλύτερη μείωση της χωρητικότητας κάτω από το C_{min} . Το φαινόμενο αυτό παύει να υπάρχει για κάποια τιμή της τάσης όπου τελικά δημιουργείται στρώμα αναστροφής και η χωρητικότητα αυξάνεται στη ελάχιστη τιμή της. Ο χρόνος που χρειάζεται ένας πυκνωτής για να επανέρθει από την κατάσταση βαθιάς απογύμνωσης ονομάζεται χρόνος συγκράτησης (retention time).

1.3 Ο πραγματικός πυκνωτής MOS.

1.3.1 Φορτία στο οξείδιο.

Ένας από τους παράγοντες (εκτός από τη μη μηδενική διαφορά των έργων εξόδου μετάλλου – ημιαγωγού, $q\Phi_{ms} \neq 0$) που προκαλεί απόκλιση της συμπεριφοράς ενός πυκνωτή MOS από την ιδανική είναι η ύπαρξη φορτίου μέσα στο οξείδιο. Εδώ διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες:

- i. *Φορτία παγιδευμένα στην διεπιφάνεια SiO_2/Si (Q_{it} , Interface Trapped Charge)* τα οποία οφείλονται σε ενεργειακές καταστάσεις μέσα στο ενεργειακό χάσμα του πυριτίου. Αυτές οι καταστάσεις μπορούν να ανταλλάσσουν φορτία (ηλεκτρόνια ή οπές) με το πυρίτιο. Οι καταστάσεις αυτές διακρίνονται σε τύπου δότη εάν είναι φορτισμένες θετικά όταν είναι άδειες και ουδέτερα κατειλημμένες και σε τύπου αποδέκτη, εάν είναι αρνητικά φορτισμένες όταν είναι άδειες και ουδέτερα κατειλημμένες. Το πλήθος των διεπιφανειακών καταστάσεων δίνεται από:

$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \quad (1.13)$$

- ii. *Σταθερά ή δέσμια φορτία (Q_f , Fixed Oxide Charge).* Τα φορτία αυτά είναι κυρίως θετικά και εντοπίζονται σε μια μικρή απόσταση από τη διεπιφάνεια SiO_2 / Si . Η δημιουργία του φορτίου είναι αποτέλεσμα της ύπαρξης μη στοιχειομετρικού SiO_x . Η τιμή του Q_f δεν επηρεάζεται από την εφαρμοζόμενη τάση στο μέταλλο της επαφής σε αντίθεση με τη συμπεριφορά του φορτίου Q_{it} .
- iii. *Ευκίνητα φορτία του οξειδίου (Q_m , Mobile Ionic Charge),* τα οποία οφείλονται σε ιόντα Na^+ , K^+ που μολύνουν το οξείδιο κατά την ανάπτυξή του.

Το φορτίο αυτό δίνεται από τη σχέση:

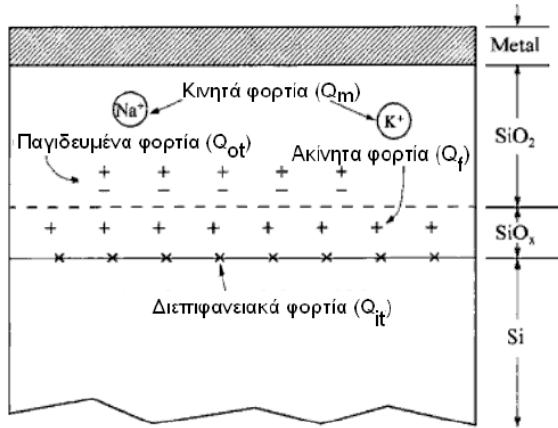
$$Q_m = \frac{1}{d} \int_0^d \rho_m(x) dx \quad (1.14)$$

όπου $\rho_m(x)$ η κατανομή της πυκνότητας του φορτίου Q_m .

- iv. *Παγιδευμένο φορτίο στο οξείδιο (Q_{ob} , Oxide Trapped Charge).* Το φορτίο αυτό οφείλεται σε οπές ή ηλεκτρόνια που είναι παγιδευμένα στο κυρίως σώμα του οξειδίου. Η δημιουργία οπών και ηλεκτρονίων μπορεί να είναι αποτέλεσμα της πρόσπτωσης ιονίζουσας ακτινοβολίας, για παράδειγμα. Εάν είναι η

κατανομή της πυκνότητας του φορτίου Q_{ot} τότε το συνολικό φορτίο θα δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{ot} = \frac{1}{d} \int_0^d \rho_{ot}(x) dx \quad (1.15)$$

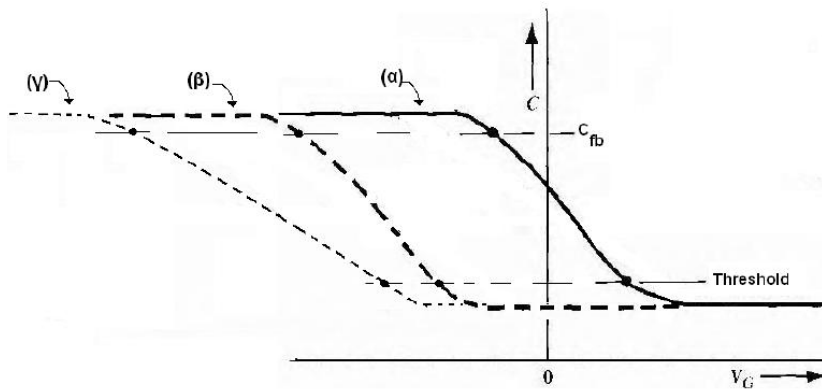


Εικόνα 1.5.

Σχηματική αναπαράσταση των φορτίων που βρίσκονται μέσα στο οξείδιο ενός πραγματικού πυκνωτή MOS.

Ανακεφαλαιώνοντας, βλέπουμε πως οι παραπάνω αποκλίσεις από την ιδανική συμπεριφορά δεν επιτρέπουν να πληρείται η συνθήκη επιπέδων ζωνών για μηδενική τάση πύλης. Επίσης η ύπαρξη επιφανειακών καταστάσεων δεν προκαλεί μόνο την μετατόπιση αλλά και την κύρτωση της ήδη μετατοπισμένης C-V και λόγω της κάμψης των ενεργειακών ζωνών πρέπει να εφαρμοστεί μια τάση (V_{FB} τάση επιπέδων ζωνών), ώστε να εξουδετερωθεί τόσο το παγιδευμένο φορτίο όσο και η διαφορά των έργων εξόδου ϕ_{ms} .

$$V_{FB} = \Phi_{ms} - \frac{Q_{it} + Q_f + Q_m + Q_{ot}}{C_{ox}} \quad (1.16)$$



Εικόνα 1.6

Αποκλίσεις από την ιδανική συμπεριφορά μια επαφής MOS

(α) ιδανική) επίδραση φορτίων στο οξείδιο και διαφοράς έργων εξόδου. (γ) επίδραση του Q_{it} .

1.3.2 Διέλευση φορτίων από το οξείδιο.

Το SiO₂ είναι ένα διηλεκτρικό με ειδική αντίσταση της τάξεως του 10⁻⁵ Ω·cm, που δεν είναι όμως άπειρη όπως θεωρείται στον ιδανικό πυκνωτή MOS. Γι'αυτό το λόγο εφαρμόζοντας στην πύλη μια τάση υπάρχει πάντα μια πιθανότητα να περάσουν κάποια ηλεκτρόνια το φραγμό δυναμικού του οξειδίου (3.1 eV). Η διαρροή ηλεκτρονίων πραγματοποιείται κβαντομηχανικά μέσω δύο κύριων μηχανισμών:

- Μηχανισμός άμεσης σήραγγας (direct tunneling)
- Μηχανισμός Fowler – Nordheim (F – N)

Στην περίπτωση του μηχανισμού άμεσης σήραγγας, κάποιοι φορείς μπορούν να διαπεράσουν το οξείδιο εάν πολωθεί ο πυκνωτής p-MOS με τάση τέτοια ώστε να ισχύει:

$$V_{ox} < q\chi \quad (1.17)$$

όπου V_{ox} η τάση που εφαρμόζεται στο οξείδιο.

Αντίστοιχα στην περίπτωση του μηχανισμού F-N υπάρχει πιθανότητα τα ηλεκτρόνια να καταφέρουν να διαπεράσουν ένα τριγωνικό φραγμό δυναμικού, όταν η τάση πόλωσης του πυκνωτή είναι τέτοια ώστε να ισχύει:

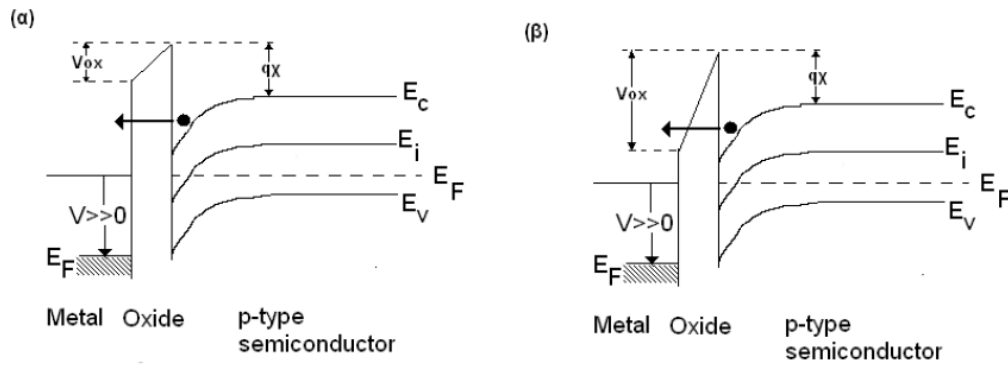
$$V_{ox} > q\chi \quad (1.18)$$

Οι πυκνότητες ρεύματος διαρροής για τις δύο περιπτώσεις δίνονται από του παρακάτω τύπους:

$$J_{\text{direct-tunneling}} = A_G \frac{q^3 m / m_{ox} E_{ox}^2}{8\pi h B} \exp\left(-\frac{8\pi \sqrt{2m_{ox} \Phi_B^3} [1 - (qV_{ox} / \Phi_B)]^{1.5}}{3qhE_{ox}}\right) \quad (1.19)$$

$$J_{\text{F-N}} = \frac{q^3 E_{ox}^2}{8\pi h \Phi_{ox}} \exp\left(-\frac{8\pi \sqrt{2m^*} \Phi_{ox}^{3/2}}{3hqE_{ox}}\right) \quad (1.20)$$

Όπου E_{ox}: η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στο οξείδιο, m*: η ενεργός μάζα του ηλεκτρονίου στο οξείδιο και Φ_{ox}: ο φραγμός δυναμικού στη διεπιφάνεια οξειδίου/ημιαγωγού.



Εικόνα 1.7

Οι κβαντομηχανικοί μηχανισμοί διέλευσης φορτίων μέσω του οξειδίου.

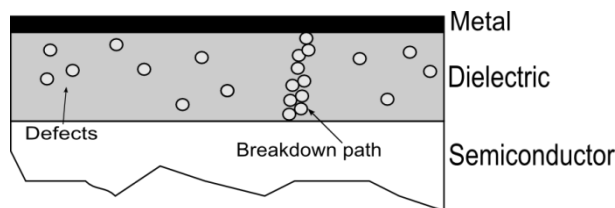
(α) Μηχανισμός άμεσης σήραγγας (direct tunneling).

(β) Μηχανισμός Fowler – Nordheim.

1.3.3 Διηλεκτρική κατάρρευση του οξειδίου (Dielectric Breakdown).

Με την εφαρμογή υψηλής τάσης στην πύλη, το οξείδιο θα άγει ρεύμα σύμφωνα με τους μηχανισμούς που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι φορείς που περνούν το οξείδιο να προκαλούν ατέλειες (defects), οι οποίες όταν φτάσουν έναν μεγάλο αριθμό δημιουργούν αγωγίματα μονοπάτια (breakdown conduction paths), με αποτέλεσμα το υλικό να χάσει τις μονωτικές του ιδιότητες.

Η τάση κατάρρευσης εξαρτάται κυρίως από την ποιότητα κατασκευής του διηλεκτρικού καθώς και το πάχος του. Η διηλεκτρική κατάρρευση ενός καλής ποιότητας οξειδίου πάχους 100nm επέρχεται για εντάσεις μεγαλύτερες των 10-15 MV/cm.



Εικόνα 1.7

Οι ατέλειες καθώς και τ' αγωγίματα μονοπάτια που δημιουργούνται από το ρεύμα διαρροής και οδηγούν στην διηλεκτρική κατάρρευση του οξειδίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ Κεφάλαιο 1

- [1] S.M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices”, Willey Interscience, 3rd edition 2007.
- [2] Donald A. Neamen “Semiconductor Physics and Devices”, Mc-Graw Hill-Higher Education 3rd edition, 2003.
- [3] Θαναηλάκης Αντώνης, «Τεχνολογία Υλικών», τόμος Β', εκδόσεις ΕΜΠ, 1990.
- [4] S.O Kasap, «Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και διατάξεων», μετάφραση Θ.Δρίτσας εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2^η έκδοση, 2004.
- [5] Δ.Τσουκαλάς, Απόσπασμα σημειώσεων του μαθήματος 8^{ου} εξαμήνου «Φυσική των ηλεκτρονικών διατάξεων».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

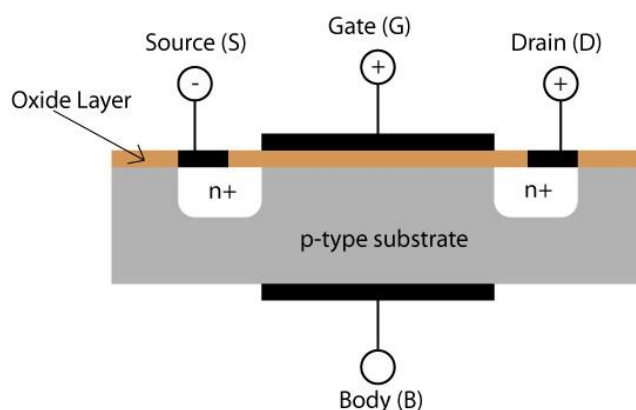
Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου MOSFET.

2.1 Εισαγωγή.

Το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου μετάλλου – οξειδίου – ημιαγωγού (MOSFET) πολλές φορές το συναντάμε υπό τον γενικό όρο FET μετάλλου – μονωτή – ημιαγωγού (Metal – Insulator – Semiconductor Field Effect Transistor). Αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα στοιχεία για την κατασκευή των ολοκληρωμένων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων (όπως οι μικροεπεξεργαστές και οι δυναμικές μνήμες) και δημιουργήθηκε από τους Kahng και Atalla το 1960. Το πλεονέκτημα των MOSFET έναντι στα διπολικά τρανζίστορ είναι ότι καταναλώνουν πολύ μικρή ισχύ και καταλαμβάνουν πολύ μικρότερο χώρο για την εκτέλεση δεδομένης λειτουργίας με αποτέλεσμα να αποτελεί μια πιο συμφέρουσα προσέγγιση για την αγορά.

Στην εικόνα 2.1 φαίνεται σχηματικά η δομή ενός n- MOSFET. Αποτελείται από ένα πυκνωτή n-MOS στο οποίο το υπόστρωμα (τύπου p) έχουν σχηματιστεί περιοχές n^+ . Το τρανζίστορ MOSFET αποτελείται από τέσσερις ακροδέκτες:

την πύλη (Gate), το υπόστρωμα (Body), την εκροή ή απαγωγό (Drain) και την πηγή (Source).

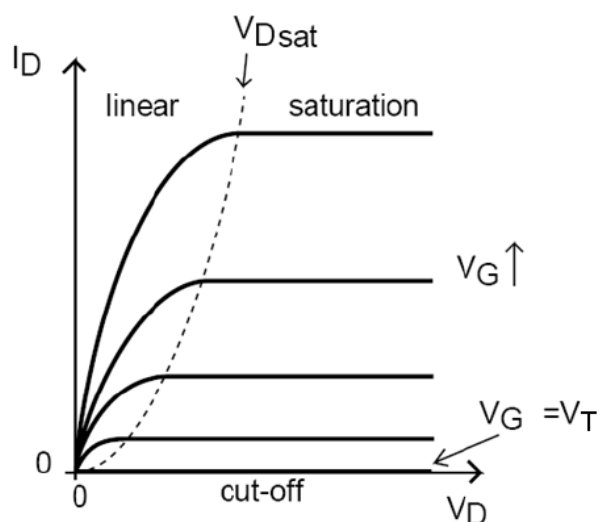


Εικόνα 2.1.
Η δομή ενός τρανζίστορ n-MOSFET.

2.2 Λειτουργία τρανζίστορ.

2.2.1 Χαρακτηριστική καμπύλη $I_d - V_d$

Στην εικόνα 2.2 παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη $I_d - V_d$ για διάφορες αυξανόμενες τιμές της τάσης πύλης V_g . Με την εφαρμογή της τάσης V_g στην πύλη και σαρώνοντας την τάση ανάμεσα στην εκροή και την γειωμένη πηγή παίρνουμε το ρεύμα I_d της εκροής.

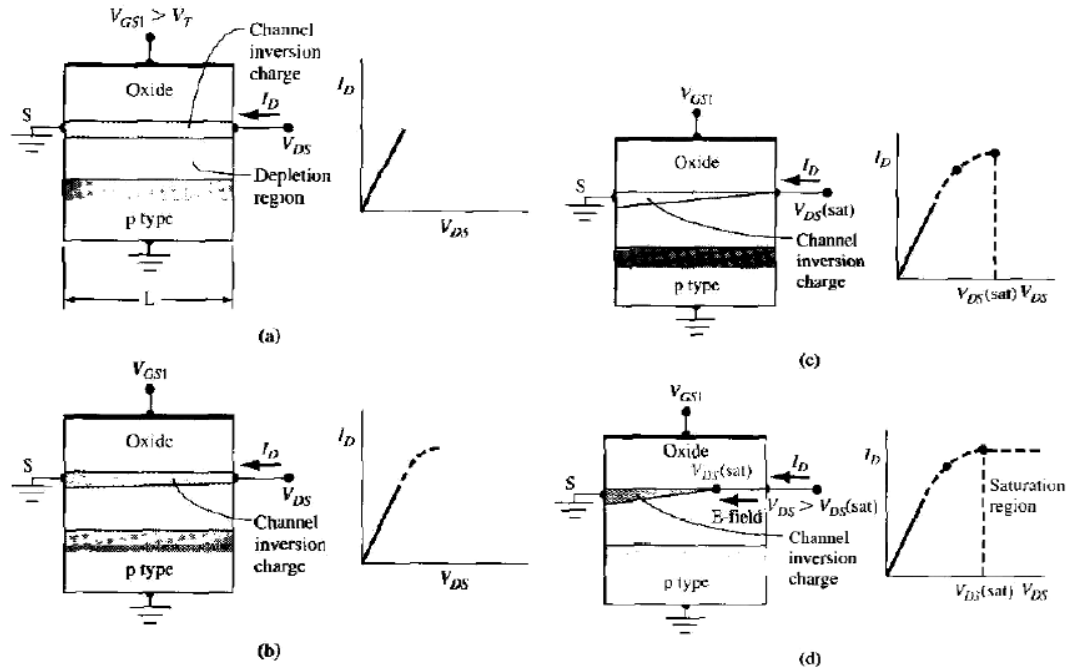


Εικόνα 2.2.
Η χαρακτηριστική καμπύλη $I_d - V_d$ για αυξανόμενες τάσεις πύλης.

Όπου V_T στο σχήμα είναι η τάση κατωφλίου που δίνεται από τη σχέση:

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4\epsilon q N_A \psi_B}}{C_{ox}} \quad (2.1)$$

Η καμπύλη $I_d - V_d$ για αυξανόμενες τάσεις V_g είναι αποτέλεσμα διαφόρων καταστάσεων όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 2.3.

Η συμπεριφορά του n-MOSFET κατά την εφαρμογή κάθετης θετικής τάσης με παράλληλη αύξηση της διαφοράς δυναμικού του καναλιού.

Εάν εφαρμόσουμε μια θετική τάση στην πύλη ($V_g > V_T$) δημιουργείται το στρώμα αναστροφής, δηλαδή ένα κανάλι ηλεκτρονίων στο υπόστρωμα του Si. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα με την εφαρμογή μια μικρής τάσης στην εκροή να παρουσιάζεται ροή ηλεκτρονίων από την πηγή προς τον απαγωγό. Τότε το κανάλι συμπεριφέρεται σαν μια αντίσταση με ρεύμα I_d . Η περιοχή αυτή είναι η γραμμική περιοχή και το ρεύμα σ' αυτή την περιοχή δίνεται από:

$$I_d = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{Z}{L} \cdot (V_g - V_T) \cdot V_d \quad (2.2)$$

όπου Z , L το πλάτος και μήκος του καναλιού αντίστοιχα και μ_n η ευκινησία των ηλεκτρονίων.

Για περαιτέρω αύξηση της τάσης V_d η ανάστροφη πόλωση της επαφής αυξάνεται, με αποτέλεσμα την αύξηση του πλάτους της περιοχής απογύμνωσης. Κατά συνέπεια παρουσιάζεται μια μέγιστη μείωση της πυκνότητας φορτίου που οδηγεί σε μείωση της αγωγιμότητας του καναλιού. Το ρεύμα τότε δεν αυξάνεται γραμμικά αλλά παραβολικά, μέχρι ν' αποκτήσει την μέγιστη τιμή του $I_{d,sat}$ (εικόνα 2.3-c). Το σημείο

όπου $V_d = V_{d,sat}$ ονομάζεται σημείο στραγγαλισμού (pinch-off). Το ρεύμα σ' αυτή την περιοχή δίνεται από τη σχέση:

$$I_d = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{Z}{L} \cdot \left[(V_g - V_T) \cdot V_d - \frac{mV_d^2}{2} \right] \quad (2.3)$$

με m να είναι ο συντελεστής επίδρασης σώματος και ισούται με:

$$m = 1 + \frac{\sqrt{\epsilon q N_A / 4 \Psi_B}}{C_{ox}} \quad (2.4)$$

Με επιπλέον αύξηση της τάσης σε τιμές μεγαλύτερες της $V_{d,sat}$, το σημείο στραγγαλισμού μετακινείται μειώνοντας το μήκος του καναλιού. Το ρεύμα I_d δεν μεταβάλλεται και παραμένει σταθερό στη τιμή $I_{d,sat}$.

Η τάση και το ρεύμα κορεσμού δίνεται από τους τύπους (2.5), (2.6).

$$V_{d,sat} = \frac{V_g - V_T}{m} \quad (2.5)$$

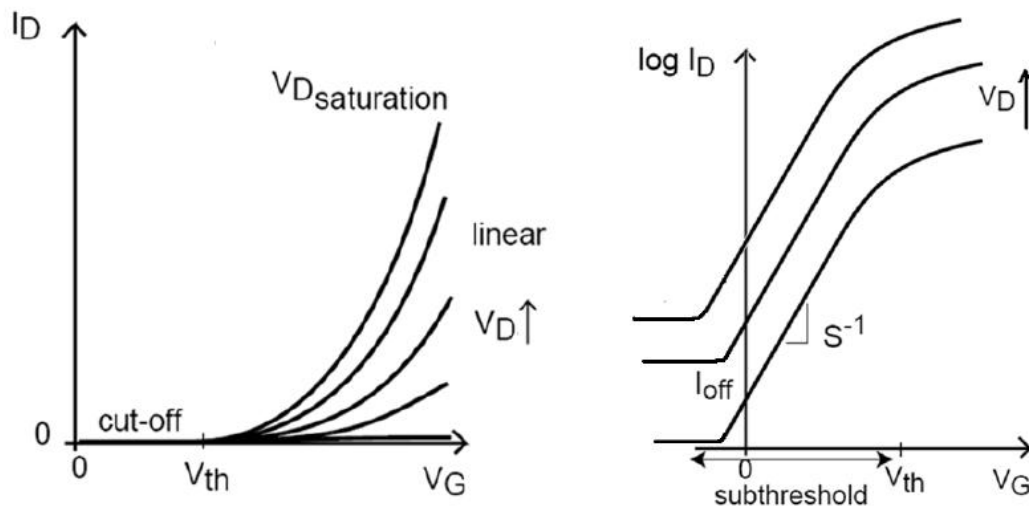
$$I_{d,sat} = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{Z}{L} \cdot \frac{(V_g - V_T)^2}{2m} \quad (2.6)$$

Στην περιοχή κορεσμού (saturation) το μέγιστο ρεύμα $I_{d,sat}$ δεν αλλάζει και δεν εξαρτάται από την τάση V_d συνεπώς ισχύει:

$$\frac{dI_d}{dV_d} = 0 \quad (2.7)$$

2.2.2 Χαρακτηριστική καμπύλη $I_d - V_g$.

Με την εφαρμογή μικρής θετικής τάσης στην εκροή V_d , έχοντας την πηγή και το υπόστρωμα γειωμένα, και σαρώνοντας την τάση V_g στην πύλη παίρνουμε το ρεύμα καναλιού I_d . Η $I_d - V_g$ χαρακτηριστική που προκύπτει φαίνεται στην εικόνα 2.4.



Εικόνα 2.4.

Η χαρακτηριστική καμπύλη $I_d - V_g$ για αυξανόμενες τάσεις V_d σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα.

Όταν η τάση πύλης είναι κατά πολύ μικρότερη από την τάση κατωφλίου V_T τότε δεν παρουσιάζεται διερχόμενο ρεύμα I_d για καμία τάση V_d , αφού στο υπόστρωμα έχουμε συσσώρευση οπών. Τότε λέμε ότι το τρανζίστορ βρίσκεται στην κατάσταση OFF. Για τάσεις πύλης μεγαλύτερες από την τάση κατωφλίου κυριαρχεί το ρεύμα ολίσθησης I_d , που παρουσιάζει γραμμική αύξηση με την τάση που εφαρμόζεται στην πύλη. Τότε λέμε ότι το τρανζίστορ βρίσκεται στην κατάσταση ON.

Για τάσεις λίγο μικρότερες από την τάση κατωφλίου παρατηρούμε ένα μικρό, εκθετικά αυξανόμενο ρεύμα διάχυσης. Αυτό το ρεύμα ονομάζεται υποκατωφλιακό ρεύμα (sub threshold current) και δίνεται από τον τύπο:

$$I_{d, \text{sub}} = e^{q(V_g - V_T)/KT} \quad (2.8)$$

όπου T η θερμοκρασία.

Για την περιοχή λειτουργίας του sub threshold current μια σημαντική παράμετρος είναι η αντίστροφη κλίση S της καμπύλης $\log I$ - V . Χαρακτηριστικό είναι πως η ποσότητα αυτή αυξάνεται με την αύξηση των διεπιφανειακών καταστάσεων-παγίδων (παρουσιάζονται πειραματικά αποτελέσματα στο κεφάλαιο 7) μεταξύ Si-SiO₂. Το sub threshold swing υπολογίζεται από τον τύπο:

$$S = \left[\frac{d(\log I_d)}{dV_g} \right]^{-1} \text{ (mV/decade)} \quad (2.9)$$

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ Κεφάλαιο 2

- [1] S.M. Size, “Physics of Semiconductor Devices”, Willey Interscience, 3rd edition 2007.
- [2] Donald A. Neamen “Semiconductor Physics and Devices”, Mc-Graw Hill-Higher Education 3rd edition, 2003.
- [3] Θαναηλάκης Αντώνης, «Τεχνολογία Υλικών», τόμος Β’, εκδόσεις ΕΜΠ, 1990.
- [4] S.O Kasap, «Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών και διατάξεων», μετάφραση Θ.Δρίτσας εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2^η έκδοση, 2004.
- [5] Δ.Τσουκαλάς, Απόσπασμα σημειώσεων του μαθήματος 8^{ου} εξαμήνου «Φυσική των ηλεκτρονικών διατάξεων».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Μνήμες τύπου MOS και MOSFET με εμφυτευμένα νανοσωματίδια.

3.1 Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια ζούμε μια ραγδαία αύξηση της τεχνολογίας σε όλους τους τομείς, και κατακλυζόμαστε από μεγάλο όγκο πληροφοριών. Γι' αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η ανάγκη μας για όλο και πιο αξιόπιστες συσκευές αποθήκευσης. Η τεχνολογία των ημιαγωγών έχει συμβάλει σε μεγάλο βαθμό σ' αυτό το κομμάτι.

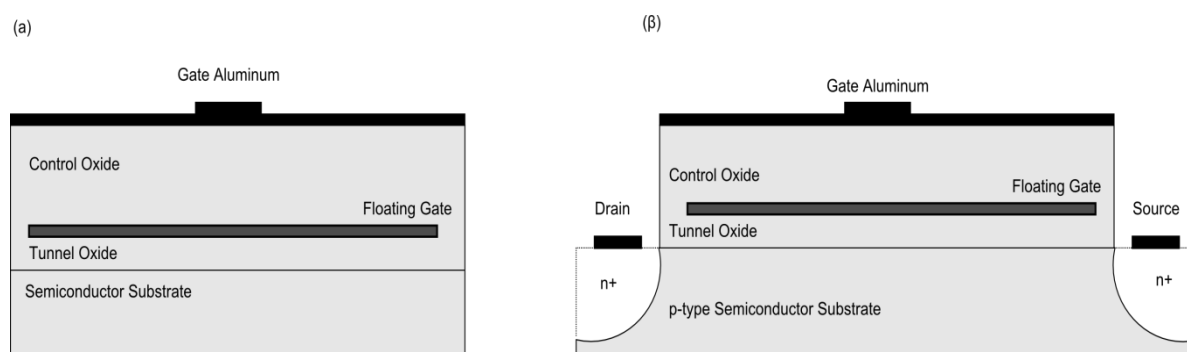
Η βασική ιδέα αποθήκευσης πληροφορίας 1 bit είναι η διακρίτοτητα μεταξύ δύο λογικών καταστάσεων «0» και «1» και στη συνέχεια η ικανότητα ανάγνωσης αυτής της πληροφορίας.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συσκευών αποθήκευσης όπως οι μαγνητικές και οι οπτικές μνήμες. Συγκριτικά με τις μνήμες που προαναφέρθηκαν οι ημιαγωγικές παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά ως προς την αξιοπιστία, την σχέση απόδοσης ταχύτητας, το χαμηλό κόστος, την χαμηλή κατανάλωση ισχύος καθώς και την συμβατότητα με τις υπάρχουσες τεχνολογικές μεθόδους εμπορικής κατασκευής τους.

Ο τύπος μνημών που θα μας απασχολήσουν σ' αυτό το κεφάλαιο είναι οι μη πτητικές μνήμες (NV – Non Volatile), μνήμες δηλαδή που διατηρούν το αποθηκευμένο φορτίο ακόμα και χωρίς την εφαρμογή τάσης. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα ασχοληθούμε με μνήμες EEPROM (Electrically Erasable Programmable Read Only Memories) αιωρούμενης πύλης καθώς και τους περιορισμούς που οδήγησαν στην δημιουργία μνημών με εμφυτευμένα νανοσωματίδια.

3.2 Μνήμες Floating Gate – Flash με αιωρούμενη πύλη.

Οι μνήμες flash κατασκευάστηκαν για πρώτη φορά το 1984 και είναι τύπου NV-EEPROM. Το κύριο κομμάτι τους είναι πυκνωτής τύπου MOS ή τρανζίστορ τύπου MOSFET που στο οξειδίό τους είναι εμφυτευμένο ένα στρώμα αγώγιμου υλικού, στην περίπτωσή μας η αιωρούμενη πύλη (floating gate). Η διάταξη των ημιαγωγικών μνημών φαίνεται στην εικόνα 3.1(α)-(β).



Εικόνα 3.1
(α) FG MOS πυκνωτής (β) FG n-MOSFET τρανζίστορ

Όπως βλέπουμε στην προηγούμενη εικόνα η αιωρούμενη πύλη βρίσκεται μέσα στο οξειδίο της διάταξης χωρίζοντάς το σε δύο περιοχές. Το οξειδίο ελέγχου (control oxide) αποτελεί το μονωτικό υλικό μεταξύ της μεταλλικής επαφής και του αποθηκευμένου φορτίου στην αιωρούμενη πύλη και το οξειδίο σήραγγας (tunnel oxide) ανάμεσα στο υπόστρωμα Si και του αγώγιμου αποθηκευτικού μέσου.

Η βασική ιδέα του προγραμματισμού της μνήμης βασίζεται στη μεταφορά φορτίων μέσα και έξω από την αιωρούμενη πύλη. Με την εφαρμογή θετικού τετραγωνικού παλμού στην πύλη μεταφέρονται ηλεκτρόνια (στην περίπτωση p-τύπου υποστρώματος) στην αιωρούμενη πύλη και η διάταξή μας βρίσκεται στην κατάσταση «1» Write. Η διαδικασία μεταφοράς φορτίου πραγματοποιείται κυρίως μέσω μηχανισμού Fowler-Nordheim. Αντίστοιχα για την κατάσταση Erase (διαγραφή) εφαρμόζεται αρνητικός παλμός στην πύλη ο οποίος απομακρύνει τα ηλεκτρόνια από το μέσο αποθήκευσης (floating gate) πίσω στο υπόστρωμα και η διάταξη βρίσκεται

στην κατάσταση «0». Η διαδικασία αποφόρτισης γίνεται μέσω του αντίστροφου μηχανισμού Fowler-Nordheim.

Η διαφορά στις καταστάσεις «0» και «1» εντοπίζεται στην διαφορετική τιμή της τάσης επιπέδων ζωνών V_{FB} για πυκνωτές και της τάσης κατωφλίου V_T για τα τρανζίστορ. Για την κατάσταση «1» τα αποθηκευμένα ηλεκτρόνια μετατοπίζονται σε υψηλότερες τιμές τις παραπάνω τάσεις, αφού τα επιπλέον ηλεκτρόνια αυξάνουν τη χωρητικότητα των πυκνωτών P-MOS, ενώ για τα τρανζίστορ N-MOSFET μειώνεται η κινητικότητα των ηλεκτρονίων μειώνοντας την αγωγιμότητά τους. Όσον αφορά την κατάσταση της διαγραφής «0» έχουμε την αντίθετη διεργασία παρατηρώντας μετατόπιση σε μικρότερες τιμές των τάσεων. Η μετατόπιση της τάσης κατωφλίου για την αιωρούμενη πύλη δίνεται από:

$$\Delta V_T = \frac{Q_{FG}}{C_{CG}} \quad (3.1)$$

Όπου Q_{FG} το φορτίο στην αιωρούμενη πύλη και C_{CG} η χωρητικότητα μεταξύ της πύλης ελέγχου και της αιωρούμενης πύλης που δίνεται από τη σχέση:

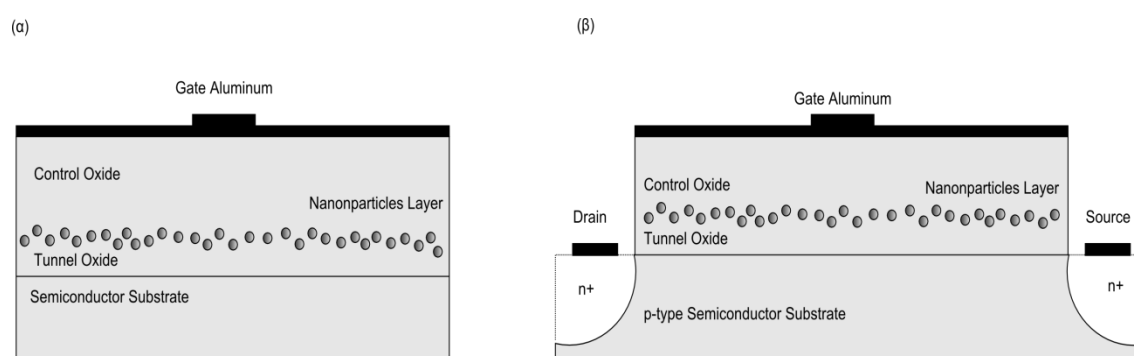
$$C_{CG} = \frac{\epsilon \cdot A}{t_{CO}} \quad (3.2)$$

με A την επιφάνεια του πυκνωτή και ϵ τη διηλεκτρική του σταθερά.

Για την διαδικασία της ανάγνωσης της κάθε κατάστασης, για παράδειγμα της εγγραφής Write, επιλέγουμε μια τιμή τάσης ανάμεσα στις δύο καταστάσεις ούτως ώστε να μην μετρηθεί ρεύμα I_{DS} στο κανάλι του τρανζίστορ ή η μέγιστη χωρητικότητα C_{ox} στον πυκνωτή. Αντίστοιχα για την κατάσταση διαγραφής «0» επιλέγεται τάση τέτοια ώστε να μετράται υψηλή τιμή ρεύματος ή ελάχιστη τιμή χωρητικότητας για τρανζίστορ ή πυκνωτές αντίστοιχα.

3.3 Μνήμες MOS&MOSFET με νανοσωματίδια.

Οι μνήμες τύπου MOS και MOSFET με νανοσωματίδια αποτελούν την εξέλιξη των μνημών αιωρούμενης πύλης. Η δομή και η λειτουργία των μνημών αυτών είναι παρόμοια με αυτή των FG memories με την διαφορά πως η αιωρούμενη πύλη έχει αντικατασταθεί από στρώμα νανοσωματιδίων μέσα στο οξειδίο. Το υλικό των σωματιδίων μπορεί να είναι μέταλλο (χρυσός, πλατίνα) ή ημιαγωγός (πυρίτιο). Η δομή των μνημών φαίνεται στην εικόνα 3.2.



Εικόνα 3.2
Ημιαγωγικές μνήμες με εμφυτευμένα νανοσωματίδια τύπου:
(α) MOS (β) MOSFET

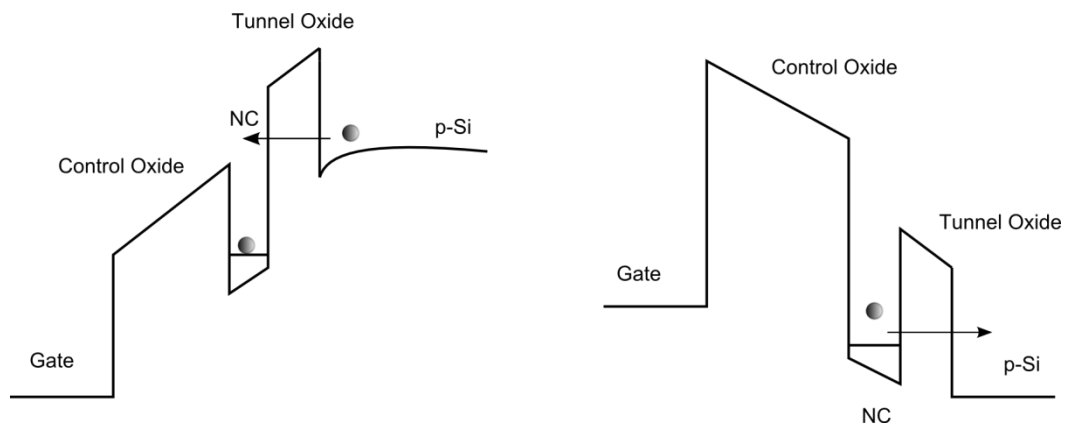
Το οξειδίο αποτελεί σημαντικό μέρος της όλης διάταξης των μνημών. Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο χωρίζεται στο οξειδίο ελέγχου και το οξειδίο σήραγγας. Το οξειδίο ελέγχου πρέπει να είναι πιο παχύ από της σήραγγας για να διασφαλίζει πως δεν θα έχουμε διαρροή φορτίου από το αποθηκευτικό μέσο προς το μεταλλικό ηλεκτρόδιο. Το δεύτερο πρέπει να έχει σαφώς μικρότερο πάχος τέτοιο ώστε να καταφέρνουν οι φορείς να το διαπερνούν και να φτάνουν τα νανοσωματίδια μέσω μηχανισμών σήραγγας (direct tunneling & F-N tunneling). Εάν καταφέρουμε και έχουμε ένα οξειδίο σήραγγας μικρότερο από 3nm τότε ο κυρίαρχος τρόπος μεταφοράς φορτίου στο αποθηκευτικό μέσο είναι η άμεση σήραγγα που μας προεξοφλεί τις χαμηλότερες τάσεις καθώς και χρόνους προγραμματισμού.

Γενικά κατά την εναπόθεση των σωματιδίων είναι σημαντικό να πετυχαίνουμε όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη κατανομή στην περιοχή του οξειδίου και διάμετρο αρκετά μικρή (2-6 nm). Είναι σημαντικό η απόσταση μεταξύ των νανοσωματιδίων να

είναι μεγαλύτερη από το πάχος του οξειδίου σήραγγας έτσι ώστε να ανταλλάσουν φορτίο μόνο με το υπόστρωμα και όχι μεταξύ τους.

3.3.1 Μηχανισμοί αποθήκευσης φορτίου

Με την εφαρμογή θετικής τάσης στην πύλη, οι ζώνες κάμπτονται ώστε να εισέλθουν ηλεκτρόνια μέσω μηχανισμού άμεσης σήραγγας ή F-N από το υπόστρωμα στα νανοσωματίδια. Αντίθετα με την εφαρμογή αρνητικής τάσης της πύλης τα ηλεκτρόνια εξέρχονται από τα νανοσωματίδια. Τα διαγράμματα ενεργειακών ζωνών της πύλης φαίνονται στην εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3
Διάγραμμα ενεργειακών ζωνών μιας μνήμης με νανοσωματίδια κατά την διαδικασία εγγραφής (αριστερά) και την διαδικασία διαγραφής (δεξιά).

Με την αποθήκευση ενός ηλεκτρονίου στο νανοσωματίδιο δημιουργείται ένα απωστικό πεδίο λόγω φράγματος Coulomb, με αποτέλεσμα να χρειάζεται επιπλέον ηλεκτροστατική ενέργεια E_c (σχέση 3.3) ώστε ν' αποθηκευτεί ένα ακόμη ηλεκτρόνιο.

$$E_c = e^2/2C_{nc} \quad (3.3)$$

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της αποθήκευσης φορτίου στα νανοσωματίδια είναι η εμφάνιση φαινομένων κβαντισμού της ενέργειας. Η εμφάνιση αυτών των φαινομένων είναι αποτέλεσμα του συγκρίσιμου μεγέθους του μήκους κύματος των φορέων με αυτό των νανοσωματιδίων. Το φαινόμενο ονομάζεται αποθήκευση φορτίου σε

κβαντικές τελείες. Η ενέργεια που απαιτείται για την αποθήκευση ενός ηλεκτρονίου σε μια κβαντική τελεία είναι το άθροισμα της ηλεκτροστατικής ενέργειας E_c και της διαφοράς ενέργεια ΔE_n μεταξύ δύο διαδοχικών ενεργειακών σταθμών λόγω κβαντικού περιορισμού.

$$E = E_c + \Delta E_n \quad (3.4)$$

Σημαντικό είναι πως κάθε νανοσωματίδιο μπορεί ν' αποθηκεύσει συγκεκριμένο αριθμό φορέων λόγω του φράγματος Coulomb και των κβαντικών περιορισμών που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τόσο τις μικρές τάσεις αλλά και χρόνους προγραμματισμού της μνήμης.

Η τάση φόρτισης που απαιτείται για να εγγραφεί ένα ηλεκτρόνιο στο νανοσωματίδιο λόγω σήραγγας δίνεται από την προσεγγιστική σχέση:

$$V_w = \frac{E_c}{e} \cdot \left(1 + \frac{d_{co}}{d_{To}}\right) + V_T \quad (3.5)$$

όπου V_T η τάση κατωφλίου και d_{co} και d_{To} τα πάχη του οξειδίου ελέγχου και σήραγγας αντίστοιχα.

Η μετατόπιση της τάσης V_{FB} του πυκνωτή MOS λόγω της αποθήκευσης φορτίου δίνεται από:

$$\Delta V_{FB} = - \frac{\Delta Q}{C_{ox}} \quad (3.6)$$

Το αποθηκευμένο φορτίο εξαρτάται από το πλήθος N_d των φορτίων που βρίσκονται σε κάθε νανοσωματίδιο, μέσα στην επιφανειακή πυκνότητα N νανοσωματιδίων.

$$Q = e \cdot N_d \cdot N \quad (3.7)$$

Είναι προφανές ότι μεγαλύτερη πυκνότητα νανοσωματιδίων μας δίνει μεγαλύτερο παράθυρο μνήμης ΔV_{FB} . Ένα σημαντικό στοιχείο που πρέπει να προσέχουμε είναι η πυκνότητα των σωματιδίων να μην είναι τόσο μεγάλη ώστε να δημιουργείται ένα λεπτό στρώμα φιλμ, αλλά να απέχουν μεταξύ τους μια ελάχιστη απόσταση των 5nm ώστε να μειώνεται η πιθανότητα εκφόρτισης μέσω γειτονικών κρυστάλλων.

3.3.2 Απαιτήσεις στα χαρακτηριστικά λειτουργίας ημιαγωγικών δομών.

Για τις ημιαγωγικές διατάξεις μνημών που αναφέρθηκαν θέλουμε να πληρούν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά με σκοπό την καλύτερη λειτουργία τους.

Έχει ήδη αναφερθεί πως βασικό χαρακτηριστικό των διατάξεων αυτών είναι το παράθυρο μνήμης. Όσο μεγαλύτερο παράθυρο καταφέρουμε να πετύχουμε τόσο καλύτερη η λειτουργία της μνήμης. Βέβαια είναι σημαντικό να τονίσουμε πως αποζητάμε όσο το δυνατόν πιο χαμηλούς χρόνους και τάσεις προγραμματισμού που να μας δίνουν ένα βέλτιστο παράθυρο μνήμης, αρκετά μεγάλο ώστε οι δύο καταστάσεις «0» και «1» να είναι σαφώς διακρίσιμες.

Ο επαναπρογραμματισμός της μνήμης αποτελεί επίσης σημαντικό λειτουργικό χαρακτηριστικό των μνημών. Η μνήμη πρέπει να αντέχει τουλάχιστον μετά από 10^6 κύκλους εγγραφής/διαγραφής χωρίς δηλαδή να επέρχεται σημαντική διαφορά στο παράθυρο μνήμης μετά από το πέρας αυτής της διεργασίας. Συνήθως κατά την διαδικασία εγγραφής/διαγραφής δημιουργούνται παγίδες στο οξειδίο ή στη διεπιφάνεια οξειδίου υποστρώματος με αποτέλεσμα να μετατοπίζεται η V_{FB}/V_T και να επέρχονται αλλοιώσεις στο παράθυρο μνήμης.

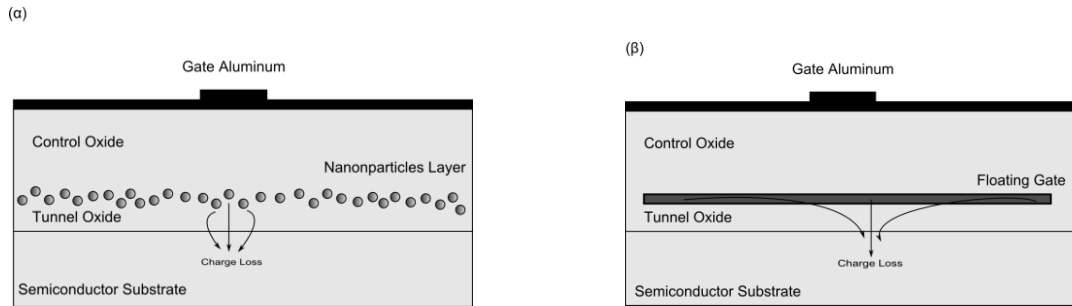
Τέλος βασική απαίτηση από τις μνήμες είναι η ικανότητα κατακράτησης του φορτίου, της πληροφορίας δηλαδή, που έχει αποθηκευτεί στη διάταξη για μεγάλο χρονικό διάστημα. Οι εμπορικές απαιτήσεις επιβάλουν έναν μέσο χρόνο κατακράτησης φορτίου γύρω στα 10 χρόνια. Ο χρόνος διατήρησης φορτίου ονομάζεται “Data Retention Time” και έχει άμεση σχέση με το κατά πόσο μετά από 10 χρόνια η μνήμη διατηρεί ένα ασφαλές παράθυρο μνήμης.

3.4 Σύγκριση NC με FG μνήμες.

Οι παλιότερες τεχνολογικά μνήμες αιωρούμενης πύλης τείνουν ν' αντικατασταθούν από τις μνήμες με εμφυτευμένα νανοσωματίδια. Σε αυτή την εξέλιξη οδηγηθήκαμε λόγω κάποιων προβλημάτων που παρουσιάζουν οι πρώτες έναντι των δεύτερων. Αρχικά σημαντικό μειονέκτημα θεωρείται το ενιαίο στρώμα αποθηκευτικού μέσου της αιωρούμενης πύλης αφού οποιαδήποτε ατέλεια μπορεί να οδηγήσει σε πλήρη αποφόρτισή του με αποτέλεσμα την απώλεια όλης της αποθηκευμένης πληροφορίας. Γι' αυτό το λόγο δεν επιτρέπεται να έχουμε σμίκρυνση των διαστάσεων της αιωρούμενης πύλης κάτω από 8-10 nm. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η αύξηση των τάσεων εγγραφής/διαγραφής που οδηγεί σε μεγαλύτερη καταπόνηση του οξειδίου πύλης, και έχει άμεσο αντίκτυπο στην αντοχή της μνήμης κατά την διαδικασία του endurance.

Αντίθετα οι μνήμες με εμφυτευμένα νανοσωματίδια παρουσιάζουν σαφώς πιο βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Λόγω της κατασκευής το φορτίο αποθηκεύεται σε ξεχωριστά νανοσωματίδια με αποτέλεσμα οποιαδήποτε ατέλεια να οδηγήσει σε μερική απώλεια πληροφορίας από το ελαττωματικό σωματίδιο και ίσως από τα γειτονικά του. Αυτό οδήγησε σε όλο και μικρότερες δομές τόσο του οξειδίου σήραγγας αλλά και των ίδιων των νανοσωματιδίων. Έτσι μπορούμε να χρησιμοποιούμε όλο και μικρότερες τάσεις προγραμματισμού πράγμα πιο φιλικό όσον αφορά την καταπόνηση του οξειδίου πύλης, αλλά και στην διαδικασία του endurance.

Ωστόσο οι μνήμες νανοσωματιδίων έχουν κάποια μειονεκτήματα, όπως η δυσκολία βιομηχανικής μαζικής παραγωγής, χωρίς αποκλίσεις στην ομοιομορφία του σχήματος, της θέσης και πυκνότητας των νανοσωματιδίων. Τέλος λόγω του μικρού πάχους του οξειδίου σήραγγας αντιμετωπίζονται προβλήματα κατακράτησης φορτίου.



Εικόνα 3.4

Η εκφόρτιση σε περίπτωση αστοχίας του αποθηκευτικού μέσου

(α) Σε μνήμες με εμφυτευμένα νανοσωματίδια (β) Σε μνήμες αιωρούμενης πύλης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ Κεφάλαιο 3

- [1] S.M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices”, Willey Interscience, 3rd edition 2007.
- [2] Donald A. Neamen “Semiconductor Physics and Devices”, Mc-Graw Hill Higher-Education 3rd edition, 2003.
- [3] Στ. Κολλιοπούλου, «Νανοηλεκτρονικές Διατάξεις πυριτίου», Διδακτορική Διατριβή Α.Π.Θ, 2005.
- [4] Π.Δημητράκης «Νανοςωματίδια ως δομικά στοιχεία σε ηλεκτρονικές διατάξεις», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π 2006.
- [5] Αντ. Αναστασιάδης, «Ακτινοβόληση με δέσμη πρωτονίων 1.6&6.5 MeV εμφυτευμένων MOS πυκνωτών με νανοςωματίδια Si», διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία, Ε.Μ.Π

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

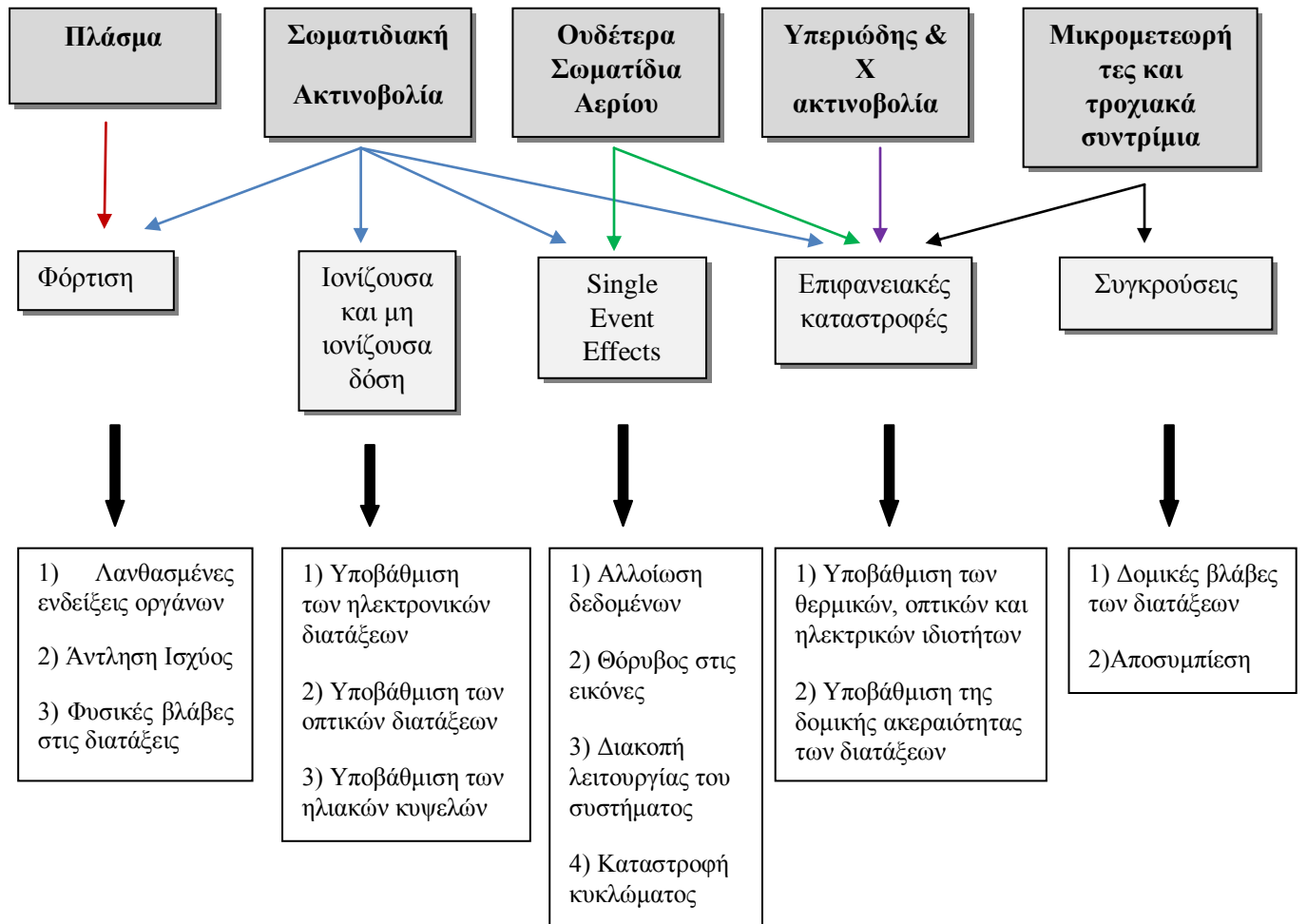
Η ακτινοβολία στο διάστημα.

4.1 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες με την ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας έχουν αυξηθεί κατά πολύ τα μέρη στα οποία μπορούμε να συναντήσουμε κάποια μορφή ακτινοβολίας, πολλές φορές βλαβερή και άλλες όχι τόσο. Περιοχές με στρατιωτικές εγκαταστάσεις, πυρηνικοί σταθμοί, χώροι αποθήκευσης πυρηνικών αποβλήτων καθώς και εγκαταστάσεις αεροηλεκτρονικών συστημάτων πλήττονται από ραδιενεργή ακτινοβολία. Μπορεί το είδος της ακτινοβολίας, η συνολική δόση και η ενέργεια να διαφέρουν στις περιοχές που αναφέρθηκαν, υπάρχει όμως μεγάλος κίνδυνος καταστροφής των ηλεκτρονικών συστημάτων των εκάστοτε εγκαταστάσεων. Το ραδιενεργό περιβάλλον του διαστήματος αποτελεί μια σημαντική πηγή ακτινοβολίας με αποτέλεσμα πολλά από τα ηλεκτρονικά συστήματα των δορυφόρων που περιστρέφονται γύρω από τη Γή να εκτίθενται άμεσα και να υπόκεινται σε μεγάλες καταστροφές. Γι' αυτό το λόγο πρέπει να κατανοήσουμε πλήρως τους τρόπους αλληλεπίδρασης των διαφόρων ειδών ακτινοβολίας με τις ηλεκτρονικές διατάξεις με σκοπό να κατασκευάσουμε κατάλληλα συστήματα προστασίας.

4.2 Πηγές ακτινοβολίας στο διάστημα.

Ο πλανήτης μας είναι περικυκλωμένος από ένα πολύ ραδιενεργό περιβάλλον, αποτελούμενο κυρίως από υψηλοενεργειακά σωματίδια (ηλεκτρόνια, πρωτόνια, βαρέα ιόντα). Στην εικόνα 4.1 παρουσιάζονται τα σωματίδια και το είδος της επίδρασης που έχουν στα ηλεκτρονικά συστήματα.



Έκανα 4.1
Πηγές ακτινοβολίας και η επίδρασή τους στις ιδιότητες των διατάξεων.

Τύπος Σωματιδίου	Μέγιστη Ενέργεια
Παγιδευμένα ηλεκτρόνια	10s of MeV
Παγιδευμένα πρωτόνια και Βαρέα Ιόντα	100s of MeV
Ηλιακά πρωτόνια	GeV
Ηλιακά Βαρέα Ιόντα	GeV
Κοσμική Ακτινοβολία	TeV

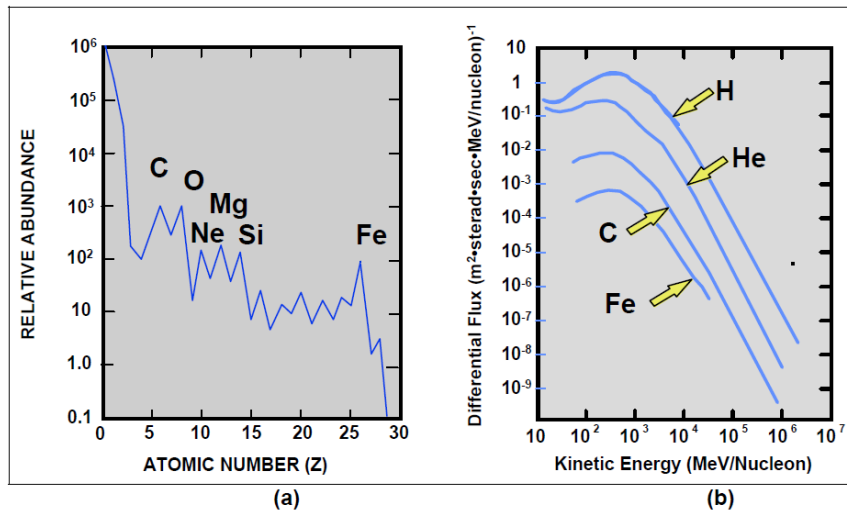
Εικόνα 4.2
Μέγιστες ενέργειες των σωματιδίων της ακτινοβολίας του διαστήματος.

Η ακτινοβολία μπορεί ν' αποτελείται από παγιδευμένα σωματίδια σε τροχιές που καθοδηγούνται από το μαγνητικό πεδίο της Γής, ή ελεύθερα σωματίδια τα οποία προέρχονται είτε από τον ήλιο είτε από διάφορες γαλαξιακές πηγές. Οι σημαντικότερες πηγές ακτινοβολίας είναι:

- Κοσμική Ακτινοβολία
- Διαστρικά Αέρια
- Ηλιακές Καταιγίδες
- Παγιδευμένα σωματίδια από τη Γή

Κοσμική ακτινοβολία.

Η υψηλής ενέργειας ακτινοβολία που προέρχεται από το διάστημα ονομάζεται κοσμική. Έχει προέλευση τον ήλιο καθώς και άλλες αστρικές πηγές και παρουσιάζει αύξηση κατά τις εξάρσεις της ηλιακής δραστηριότητας. Η κοσμική ακτινοβολία συνίσταται από υψηλής ενέργειας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία καθώς και από υποατομικά σωματίδια που μεταφέρουν μεγάλα ποσά ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα αποτελείται περίπου κατά 85% από πρωτόνια, 14% από σωματίδια άλφα και περίπου 1% από βαριά ιόντα, με ενέργειες που ποικίλουν από μερικά MeV έως GeV ακόμα και TeV ανά πυρήνα. Η συνολική ροή των σωματιδίων κοσμικής ακτινοβολίας (που αποτελείται κυρίως από πρωτόνια) που έχει παρατηρηθεί έξω από τη μαγνητόσφαιρα σε απόσταση όσο της Γής με τον ήλιο (1 AU) είναι περίπου 4 p/cm^2 . Κατά την είσοδό της στην ατμόσφαιρα η ακτινοβολία αλληλεπιδρά με πυρήνες ατόμων και προκύπτουν δευτερογενή ταχέως κινούμενα υποατομικά σωματίδια (νετρόνια, πόνια, μεσόνια κτλ.) τα οποία βομβαρδίζουν την επιφάνεια της Γής. Πρέπει να σημειωθεί πως παρόλο το μικρό ποσοστό των βαρύτερων πυρήνων που περιέχονται στην ακτινοβολία αυτά τα σωματίδια έχουν μεγάλες ενέργειες και είναι ικανά να διεισδύσουν ακόμα και σε μερικά εκατοστά ανθρώπινου ιστού ή άλλων υλικών. Επίσης αυτού του είδους τα σωματίδια είναι έντονα φορτισμένα με αποτέλεσμα να προκαλούν ιονισμό σε μεγάλο βαθμό. Τέλος, αν και το ποσοστό των βαρέων ιόντων που υπάρχουν στην κοσμική ακτινοβολία είναι συγκριτικά μικρό, παρουσιάζουν πολύ σημαντικές βιολογικές επιδράσεις συγκρίσιμες με αυτές των πρωτονίων.



Εικόνα 4.3
Ποσότητες (a) και τα ενεργειακά φάσματα (b) των στοιχείων της κοσμικής ακτινοβολίας.

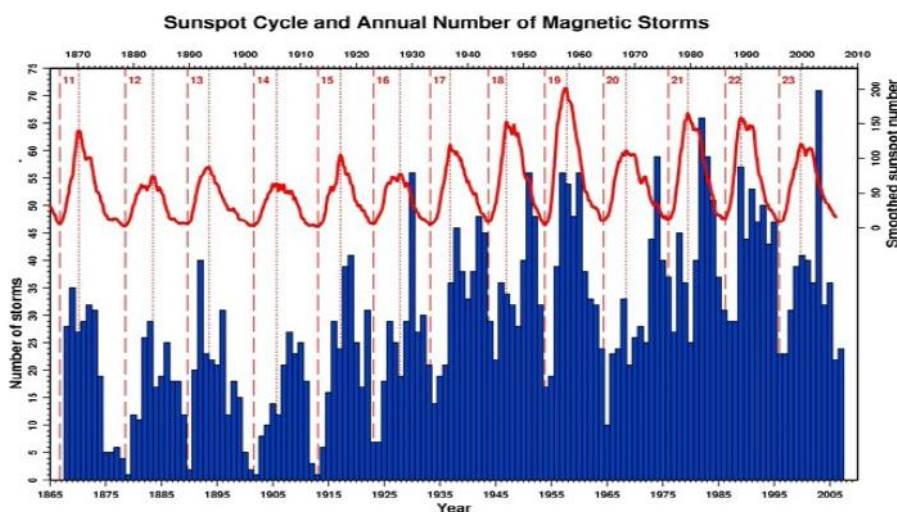
Διαστρικά αέρια.

Το 1972 και 1973 κάποιοι ερευνητές παρατήρησαν, κατά τη διάρκεια ήρεμης ηλιακής δραστηριότητας, αυξημένες διακυμάνσεις στη ροή του Ηλίου (He), του Οξυγόνου και του Αζώτου. Αυτό το φαινόμενο ονομάστηκε anomalous component. Η πιο εύλογη θεωρία μέχρι στιγμής είναι πως καθώς ουδέτερα διαστρικά αέρια διαχέονται στην ηλιόσφαιρα, ιονίζονται από την ηλιακή ακτινοβολία (UV) ή ανταλλάσσουν φορτία με τα πρωτόνια των ηλιακών ανέμων και στη συνέχεια εκτοξεύονται στην εξωτερική ηλιόσφαιρα μέσω του ηλιακού ανέμου και κατευθύνονται προς τους διάφορους πλανήτες του συστήματος.

Ηλιακές καταιγίδες.

Οι ηλιακές καταιγίδες αποτελούνται από ηλεκτρόνια, πρωτόνια και βαρέα ιόντα με τα τελευταία να αποτελούν τον μεγαλύτερο κίνδυνο τόσο για τις ηλεκτρονικές διατάξεις όσο και για τον άνθρωπο έξω από το προστατευτικό μαγνητικό πεδίο της Γης. Συνήθως τα ηλεκτρόνια φτάνουν πρώτα και ακολουθούν τα βαρέα ιόντα. Μέχρι στιγμής δεν υπάρχουν επαρκείς τρόποι μέσω των οποίων να μπορούμε να υπολογίσουμε το πότε αυτά τα ιόντα θα φτάσουν.

Αυτή τη στιγμή υπάρχουν περίπου 936 δορυφόροι σε λειτουργία. Οι περισσότεροι από αυτούς έχουν δείξει να είναι αρκετά ευπαθείς σε ηλιακές καταιγίδες με αρκετούς από αυτούς να υπόκεινται σε ελάχιστες φθορές, ενώ άλλοι οδηγούνται στην πλήρη καταστροφή ή αστοχία.



Εικόνα 4.4
Ο ηλιακός κύκλος και ο ετήσιος αριθμός ηλιακών καταιγίδων.

Παγιδευμένα σωματίδια από την Γη.

Σ' αυτή την ενότητα θα αναφερθούμε στο διαστημικό περιβάλλον όπου οι περισσότεροι δορυφόροι λειτουργούν και βρίσκονται σε τροχιές που ποικίλουν σε υψόμετρο, από μερικά χιλιόμετρα (150-600 km) έως και 35.880 km (geosynchronous orbits). Τα περισσότερα σωματίδια προέρχονται από τον ήλιο στη μορφή θερμού ιονισμένου αερίου που ονομάζεται ηλιακός άνεμος. Ο ηλιακός άνεμος εγχέεται ακτινικά από τον ήλιο με ταχύτητες που φτάνουν τα 1000 km/sec και αντιπροσωπεύει μια ηλιακή απώλεια μάζας περίπου 10^{14} kg/day.

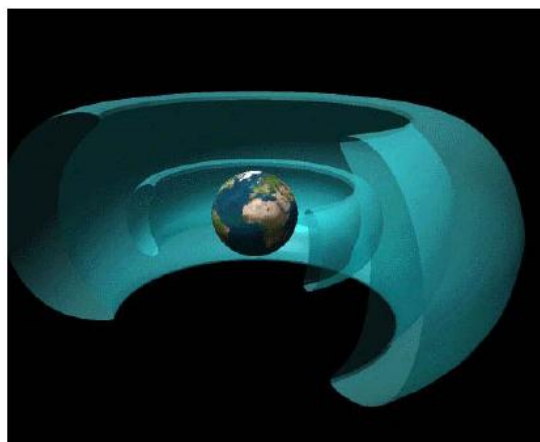
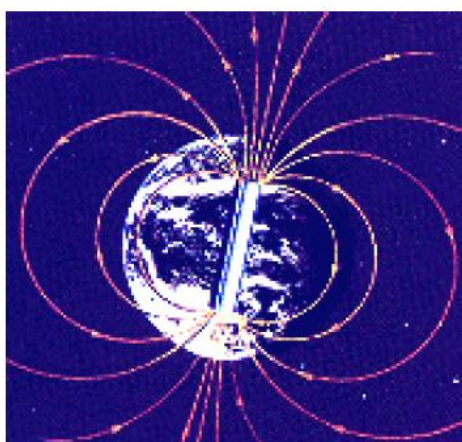
Το περιβάλλον ακτινοβολίας που έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι οι περιοχές κοντά στη Γή σε αποστάσεις περίπου 1-12 φορές την ακτίνα της Γής ($R_{\text{earth}} = 6380$ km). Σε αυτή την περιοχή υπάρχουν σε αφθονία ηλεκτρικά φορτισμένα σωματίδια παγιδευμένα στη μαγνητόσφαιρα της Γής, καθώς και βαριά ιόντα (σε μικρότερες

ποσότητες) από τις κοσμικές ακτίνες. Καθώς ο ηλιακός άνεμος σαρώνεται από τη Γή σχηματίζεται μια γεωμετρική κοιλότητα από το μαγνητικό πεδίο της Γής.

Η κίνηση των παγιδευμένων σωματιδίων είναι αρκετά πολύπλοκη καθώς περιστρέφονται και αναπηδούν στις γραμμές του μαγνητικού πεδίου, και ανακλούνται μπρός και πίσω σε κατοπτρικά συζευγμένα πεδία (περιοχές με μέγιστη ένταση του μαγνητικού πεδίου κατά μήκος της τροχιάς τους) σε αντίθετα ημισφαίρια. Οι περιοχές που παγιδεύονται τα σωματίδια ονομάζονται ζώνες Van-Allen (Van Allen Belts).

Τα ηλεκτρόνια στη μαγνητόσφαιρα της Γής έχουν ενέργειες από μερικά keV μέχρι περίπου 7 MeV και είναι παγιδευμένα σε μια σχεδόν σπειροειδή περιοχή στο κέντρο του γεωμαγνητικού ισημερινού και εκτείνεται σε 1-12 R_{earth} . Τα ηλεκτρόνια διαφοροποιούνται σε αυτά που βρίσκονται στην εσωτερική περιοχή ($< 5\text{MeV}$) και την εξωτερική περιοχή ($\sim 7\text{MeV}$). Τα παγιδευμένα πρωτόνια, που προέρχονται κυρίως από την κοσμική ακτινοβολία, έχουν ενέργειες που ξεκινάνε από μερικά MeV και φτάνουν σχεδόν τα 800 MeV. Τα πρωτόνια καταλαμβάνουν σχεδόν την ίδια περιοχή με τα ηλεκτρόνια παρόλο που η περιοχή με την υψηλότερη ροή πρωτονίων, για ενέργειες μεγαλύτερες των 30 MeV, είναι μια σχετικά μικρή περιοχή περίπου 1,5 R_e .

Αξίζει να σημειωθεί πως η πραγματική ροή πρωτονίων ή ηλεκτρονίων που συναντά ένα διαστημικό σκάφος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις διάφορες τροχιακές παραμέτρους, την ώρα έναρξης της αποστολής καθώς και τη διάρκειά της.



Εικόνα 4.5
Το μαγνητικό πεδίο της Γής (αριστερά), οι ζώνες Van-Allen (Van Allen Belts).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ Κεφάλαιο 4

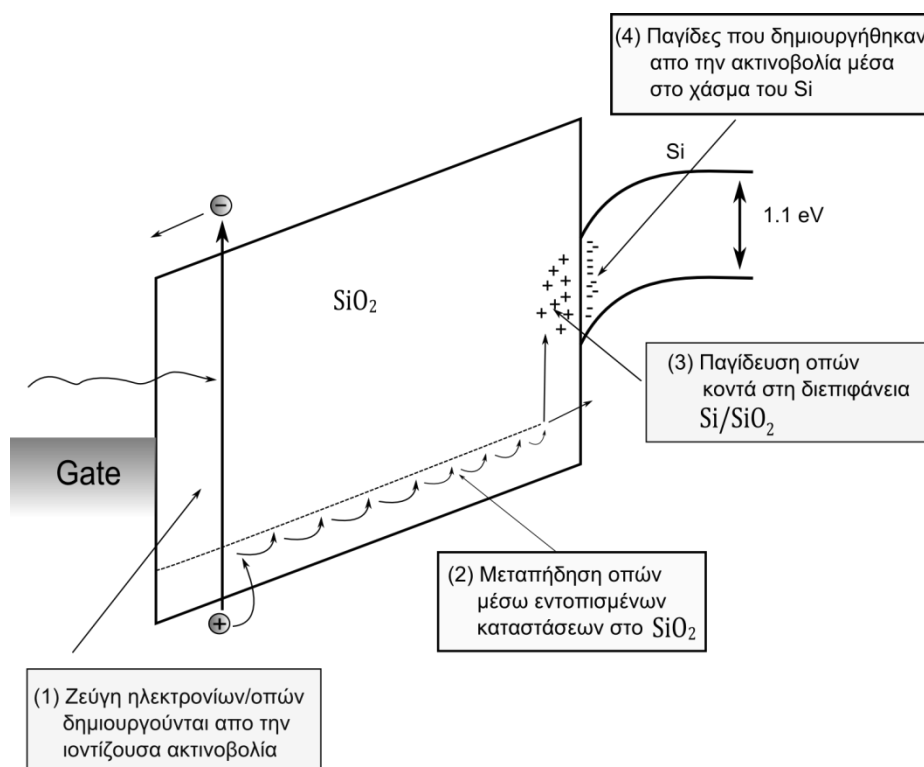
- [1] Henry B. Garrett “Space Radiation Environment”, Jet Propulsion Laboratory - California Institute of Technology.
- [2] L.D. Edmonds, C.E. Bames, L.Z. Scheick, “An Introduction to Space Radiation Effects on Microelectronics”, JPL Publication 00-06, Jet Propulsion Laboratory - California Institute of Technology NASA.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Επίδραση της ακτινοβολίας στο οξείδιο του πυκνωτή MOS.

5.1 Οι διαδοχικές φάσεις μετά την ακτινοβόληση του MOS.

Με την πρόσπτωση ακτινοβολίας στον πυκνωτή ικανής να ιονίσει το οξείδιο λαμβάνουν χώρα μια σειρά από γεγονότα τα οποία αλλάζουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του όπως η CV καμπύλη του καθώς και η τάση καταφλίου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται «Total Dose Ionizing Effect» και διακρίνεται σε τέσσερις διαδοχικές φάσεις όπως παρουσιάζονται παρακάτω.



Εικόνα 5.1

Τα διαδοχικά στάδια μετά τον ιονισμό λόγω ακτινοβόλησης του πυκνωτή.

- **Φάση 1:** Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων – οπών.

Όταν η ionίζουσα ακτινοβολία διαπεράσει το οξείδιο, η ενέργεια που εναποτίθεται δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων/οπών (electron/hole pairs generation). Η απαιτούμενη ενέργεια ανά ζεύγος έχει μετρηθεί να είναι $E_{\text{pair}} =$

17 ± 1 eV. Τα πρώτα κίολας picoseconds πραγματοποιείται επανασύνδεση ενός μεγάλου ποσοστού των ζευγών ηλεκτρονίων/οπών (recombination). Αυτό το ποσοστό εξαρτάται κυρίως από το εφαρμοζόμενο πεδίο, την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας καθώς και το είδος των εκάστοτε σωματιδίων (της ακτινοβολίας). Επειδή στο SiO₂ τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται είναι πιο ευκίνητα από τις οπές, συλλέγονται από το ηλεκτρόδιο πύλης σε χρόνους της τάξεως picoseconds. Αντίθετα οι οπές που δεν επανασυνδέθηκαν παρουσιάζουν αρκετά χαμηλότερη ευκινησία με αποτέλεσμα να παραμένουν στις θέσεις δημιουργίας, αποκαλώντας αρνητική μετατόπιση της τάσης κατωφλίου ή επιπέδων ζωνών, για τρανζίστορ ή πυκνωτές αντίστοιχα. Αυτή η πρώτη διαδικασία γένεσης και επανασύνδεσης φορέων είναι από τους κυριότερους μηχανισμούς που διαμορφώνει την συμπεριφορά των ημιαγωγικών μνημών μετά την ακτινοβόληση.

▪ **Φάση 2:** *Μετακίνηση οπών στο οξείδιο.*

Στα επόμενα 100 nanoseconds μετά την ακτινοβόληση και σε συνθήκες θερμοκρασίας δωματίου οι οπές που δεν επανασυνδέθηκαν μετακινούνται από το οξείδιο μέσα στο υπόστρωμα του πυριτίου (hopping transport). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, βραχυπρόθεσμα να υπάρχει μια σύντομη ανάκτηση της τάσης πράγμα που επηρεάζεται από παράγοντες όπως το εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο, τη θερμοκρασία και το πάχος του οξειδίου. Αξίζει να σημειωθεί πως για χαμηλότερες θερμοκρασίες ο χρόνος μετακίνησης των οπών αυξάνεται.

▪ **Φάση 3:** *Παγίδευση οπών μέσα στο οξείδιο κοντά στη διεπιφάνεια.*

Όταν οι οπές καταφέρουν και φτάσουν στη διεπιφάνεια Si/SiO₂ τότε κάποιες από αυτές συλλαμβάνονται από παγίδες στην περιοχή και παραμένουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα, από ώρες μέχρι και χρόνια. Αυτή η διαδικασία εξαρτάται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η ποιότητα του οξειδίου και το εφαρμοζόμενο πεδίο.

- **Φάση 4: Παγίδες διεπιφάνειας.**

Τέλος άλλο ένα χαρακτηριστικό που επηρεάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του πυκνωτή MOS είναι η δημιουργία παγίδων στη διεπιφάνεια Si/SiO₂. Αυτές είναι τοπικές καταστάσεις με ενεργειακές καταστάσεις που εντοπίζονται μέσα στο ενεργειακό χάσμα του Si.

5.2 Μετατόπιση τάσης κατωφλίου.

Άμεση συνέπεια των διεργασιών που πραγματοποιούνται μετά την ακτινοβόληση στο οξείδιο του πυκνωτή, όπως παρουσιάστηκαν προηγουμένως, είναι η μετατόπιση της τάσης κατωφλίου V_T .

$$V_T(t) = V_T^0 + \Delta V_T(t) \quad (5.1)$$

όπου V_T^0 η τάση κατωφλίου πριν την ακτινοβόληση η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$V_T^0 = \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}} + \frac{2kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (5.2)$$

ΔV_T είναι η μετατόπιση της τάσης κατωφλίου μετά την ακτινοβόληση, μεταβάλλεται με το χρόνο και είναι το άθροισμα τριών συνεισφορών:

$$\Delta V_T(t) = \Delta V_{st}(t) + \Delta V_{ox}(t) + \Delta V_{IT}(t) \quad (5.3)$$

όπου :

ΔV_{st} : η συνεισφορά της σύντομης διαδικασίας (short term) μετακίνησης των οπών μέσα στο οξείδιο, αμέσως μετά τη δημιουργία τους.

ΔV_{ox} : η συνεισφορά των παγιδευμένων οπών μέσα στο οξείδιο (oxide trapped charge).

ΔV_{IT} : η συνεισφορά των παγίδων διεπιφάνειας SiO₂/Si (interface trapped charge).

Αναλυτικά οι παραπάνω συνιστώσες προκύπτουν από τις σχέσεις:

$$\Delta V_{st}(t) = -q/C_{ox} \cdot \int_0^{t_{ox}} (dx/t_{ox}) \cdot n_h(x,t) \quad (5.4)$$

$$\Delta V_{OX}(t) = -q/C_{ox} \cdot \Delta N_{OT}(t) \quad (5.5)$$

$$\Delta V_{IT}(t) = -\Delta Q_{IT}/C_{ox} \quad (5.6)$$

t_{ox} : το πάχος του οξειδίου.

$C_{ox} = \epsilon_{ox}/t_{ox}$: η χωρητικότητα του οξειδίου.

$n_h(x,t)$: η πυκνότητα των μεταφερόμενων οπών στο οξείδιο.

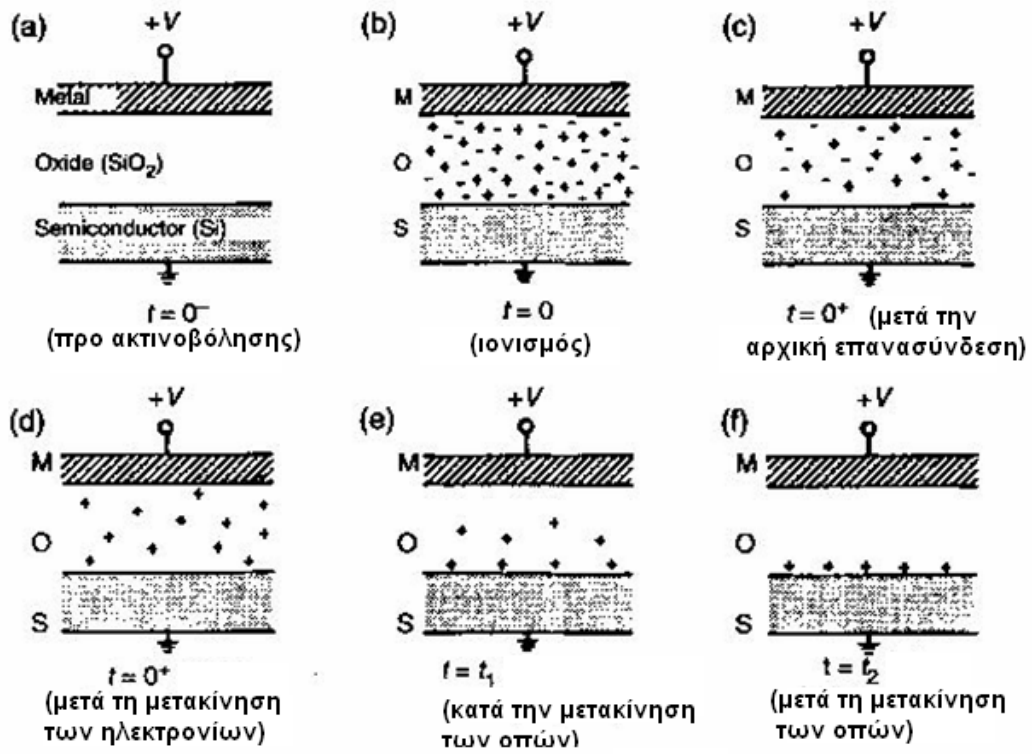
ΔN_{OT} : η πυκνότητα των παγιδευμένων οπών στο οξείδιο.

ΔV_{IT} : το φορτίο που βρίσκεται παγιδευμένο στη διεπιφάνεια.

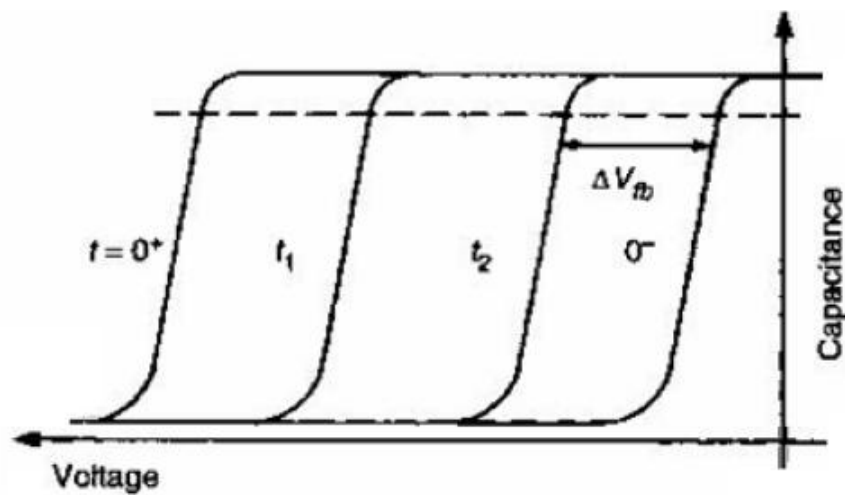
ΔQ_{IT} : το φορτίο που βρίσκεται παγιδευμένο στην επιφάνεια.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη της δημιουργίας και μεταφοράς οπών μέσα στο οξείδιο μετά τον ιονισμό από την προσπίπτουσα ακτινοβολία καθώς και η πορεία της CV χαρακτηριστικής του πυκνωτή.

1. $t = 0^-$: πριν την ακτινοβολήση του πυκνωτή.
2. $t = 0$: η στιγμή που ακτινοβολείται ο πυκνωτής και δημιουργούνται τα ζεύγη ηλεκτρονίων/οπών.
3. $t = 0^+$: επανασύνδεση κάποιων ζευγών τα επόμενα picoseconds.
4. $t = 0^+$: τα ηλεκτρόνια έχουν συλλεγθεί από την πύλη και η χαρακτηριστική CV παρουσιάζει τη μέγιστη αρνητική μετατόπιση.
5. $t = t_1$: οπές μετακινούνται προς το υπόστρωμα ενώ κάποιες άλλες παγιδεύονται μέσα στο οξείδιο. Έχουμε μετατόπιση της καμπύλης προς τα δεξιά.
6. $t = t_2$: παρουσιάζονται οπές παγιδευμένες κοντά στη διεπιφάνεια. Παρατηρούμε μεγαλύτερη μετατόπιση της CV προς τα δεξιά.



Εικόνα 5.2
 Σχηματική αναπαράσταση των χρονικών διαστημάτων και των διεργασιών που πραγματοποιούνται αμέσως μετά την ακτινοβόληση ενός πυκνωτή MOS



Εικόνα 5.3
 Η μετατόπιση της CV χαρακτηριστικής για τις διαδοχικές χρονικές στιγμές μετά την ακτινοβόληση.

5.3 Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων/οπών.

Η μέγιστη αρχική μετατόπιση της τάσης κατωφλίου εξαρτάται από την αρχική πυκνότητα των οπών που δημιουργήθηκαν από την ιονίζουσα ακτινοβολία, καθώς και από το κλάσμα των οπών που θα επιβιώσουν από την επανασύνδεση.

Το ποσοστό των οπών που τελικά δεν θα επανασυνδεθεί καθορίζει την τελική μετατόπιση της τάσης κατωφλίου και εξαρτάται από δυο παράγοντες:

- Το μέτρο του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο οξείδιο το οποίο διαχωρίζει τα φορτία.
- Τη γραμμική πυκνότητα (linear density) των ζευγών ηλεκτρονίων/οπών. Η γραμμική πυκνότητα καθορίζεται από την γραμμική μεταφορά ενέργειας (Linear Energy Transfer – LET) η οποία εξαρτάται από την ενέργεια και το είδος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η LET είναι αντιστρόφως ανάλογη της μέσης απόστασης ανάμεσα στα ζεύγη με αποτέλεσμα όσο πιο μικρή η μέση απόσταση τόσο μεγαλύτερη η πιθανότητα επανασύνδεσης των φορέων και κατά συνέπεια τόσο πιο μικρό το ποσοστό των οπών που θα επιβιώσουν μέσα στο οξείδιο.

5.3.1 Πυκνότητα οπών που επιζούν.

Η ενέργεια που απαιτείται για την δημιουργία ενός ζεύγους έχει υπολογιστεί να είναι $E = 17 \pm 1 \text{ eV}$.

Για την απαιτούμενη δόση χρησιμοποιούμε την μονάδα μέτρησης:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/gr} = 6.24 \cdot 10^{13} \text{ eV/gr}$$

Η πυκνότητα του οξειδίου του πυριτίου είναι περίπου $d_{SiO_2} = 2.2 \text{ gr/cm}^3$

Με τα δεδομένα αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε την αρχική πυκνότητα των οπών που προκύπτουν από τον ιονισμό:

$$g_0 = \frac{d_h}{E} = \frac{2.2}{17} \frac{g}{\text{cm}^3 \cdot \text{eV}} = \frac{2.2}{17} \cdot 6.24 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3} \text{ rad}^{-1} = 8.1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ rad}^{-1} \quad (5.7)$$

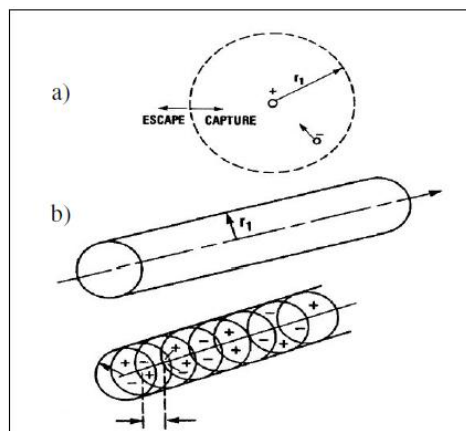
Ο αριθμός που προκύπτει αποτελεί την πυκνότητα των οπών που δημιουργούνται αρχικά μέσα στο οξείδιο. Στη συνέχεια αυτή η πυκνότητα μειώνεται λόγω της άμεσης επανασύνδεσης με τα ηλεκτρόνια προτού αυτά προλάβουν να συλλεγούν από το ηλεκτρόδιο της πύλης.

5.3.2 Μοντέλα δύο ακραίων περιπτώσεων.

Η κατανομή των ζευγών αμέσως μετά τη δημιουργία τους μπορεί να περιγραφεί από δύο ακραίες περιπτώσεις που περιγράφονται από τα ακόλουθα μοντέλα:

- α) Μοντέλο απομακρυσμένων ζευγών (geminate – separated e/h pairs – model)
- β) Μοντέλο αλληλεπικαλυπτόμενων ζευγών (columnar – overlapping e/h pairs – model).

Η βασική διαφορά ανάμεσα στα δύο αυτά μοντέλα είναι η μέση θερμική απόσταση ανάμεσα στο ζεύγος ηλεκτρονίου/οπής, αφού οι φορείς έχουν χάσει μεγάλο μέρος της κινητικής τους ενέργειας και έχουν βρεθεί σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Για το SiO₂ η απόσταση αυτή είναι 8nm.



Εικόνα 5.4
Μοντέλα που περιγράφουν τη δημιουργία ζευγών στο οξείδιο αμέσως μετά την ακτινοβόληση.

- Στο μοντέλο απομακρυσμένων ζευγών, η απόσταση μεταξύ των ζευγών είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μέση θερμική απόσταση ηλεκτρονίου/οπής. Τότε το πρόβλημα της επανασύνδεσης αντιμετωπίζεται ως ενδεχόμενο μόνο για τους φορείς του ίδιου του ζεύγους. Η πιθανότητα επανασύνδεσης είναι ανάλογη της ελκτικής δύναμης Coulomb, αντιστρόφως ανάλογη του εξωτερικού εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου (που προσπαθεί να τα διαχωρίσει) καθώς και μιας τυχαίας κίνησης λόγω θερμικών διακυμάνσεων στο χώρο.
- Στο μοντέλο των αλληλεπικαλυπτόμενων ζευγών, η μέση απόσταση μεταξύ των ζευγών είναι κατά πολύ μικρότερη από τη μέση θερμική απόσταση των φορέων του κάθε ζεύγους. Έτσι θεωρούμε τα ηλεκτρόνια και τις οπές να έχουν μια κυλινδρική διατομή γύρω από το εισερχόμενο σωματίδιο. Η πιθανότητα επανασύνδεσης των φορέων γίνεται πολύ μεγαλύτερη από το πρώτο μοντέλο αφού το κάθε ξεχωριστό φορτίου αλληλεπιδρά με πολλά γειτονικά του αντίθετου φορτίου.

Για εισερχόμενα σωματίδια μικρής LET (γραμμικής μεταφοράς ενέργειας), όπως για παράδειγμα ηλεκτρόνια μεγάλης ενέργειας, παρατηρούμε δημιουργία χαμηλής κατανομής ζευγών κατά μήκος της διαδρομής του διερχόμενου σωματιδίου. Σ' αυτή την περίπτωση ταιριάζει το μοντέλο των απομακρυσμένων ζευγών αφού για ηλεκτρόνιο ενέργειας 1MeV η μέση απόσταση μεταξύ των ζευγών υπολογίζεται στα 50nm. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως η μέση θερμική απόσταση μεταξύ ηλεκτρονίου/οπής είναι 8nm πράγμα που επιβεβαιώνει την αναγωγή του φαινομένου στο πρώτο μοντέλο.

Αντίθετα για εισερχόμενα σωματίδια μεγάλης LET, όπως για παράδειγμα πρωτόνια, βαρέα ιόντα ή σωματίδια άλφα, παρατηρούμε πυκνή δημιουργία ζευγών κατά μήκος της τροχιάς του διερχόμενου σωματιδίου. Γι' αυτό το λόγο ανατρέχουμε στο δεύτερο κατά σειρά μοντέλο (μοντέλο αλληλεπικαλυπτόμενων ζευγών) αφού για πρωτόνια ενέργειας 1MeV η μέση απόσταση των ζευγών υπολογίζεται στα 0.3nm ($0.3 < 8\text{nm}$).

5.3.3 Υπολογισμός της αρχικής μέγιστης μετατόπισης της τάσης V_T .

Οι ενδιάμεσες καταστάσεις ανάμεσα στα δύο ακραία μοντέλα αφορούν το ποσοστό των οπών που έχουν επιβιώσει από την αρχική επανασύνδεση των φορέων (fractional yield). Η εξάρτηση αυτή αφορά το είδος των εισερχόμενων σωματιδίων καθώς στις ακραίες περιπτώσεις των υψηλοενεργειακών ηλεκτρονίων (12 MeV) το ποσοστό των οπών που επιβιώνουν φτάνει το 100%, ενώ στα χαμηλής ενέργειας σωματίδια άλφα (2 MeV) το ποσοστό είναι εξαιρετικά χαμηλό. Να σημειωθεί πως για τις ενδιάμεσες καταστάσεις το ποσοστό οπών που επιβιώνουν αυξάνεται για μεγάλες εντάσεις πεδίου που τείνει να διαχωρίσει τους φορείς μεταξύ τους.

Για να υπολογίσουμε την αρχική (μέγιστη) μετατόπιση της τάσης V_{FB} αμέσως μετά την πρόσπτωση της ακτινοβολίας αρκεί να γνωρίζουμε το ποσοστό των οπών που επιβιώνουν από την αρχική επανασύνδεση $f_y(E_{ox})$, καθώς και την αρχική πυκνότητα των οπών που δημιουργούνται κατά τον ιονισμό ανά μονάδα δόσης. Οπότε για τη χρονική στιγμή t^+ και θεωρώντας ομοιόμορφη κατανομή των οπών μέσα στο οξειδίο έχουμε ότι η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου θα είναι:

$$\Delta Q_h = q \cdot g_o \cdot t_{ox} \cdot f_y(E_{ox}) \cdot D \text{ (Coulomb} \cdot \text{cm}^{-1}) \quad (5.8)$$

όπου D η δόση σε rad.

Έτσι η αρχική μετατόπιση προκύπτει από τη σχέση:

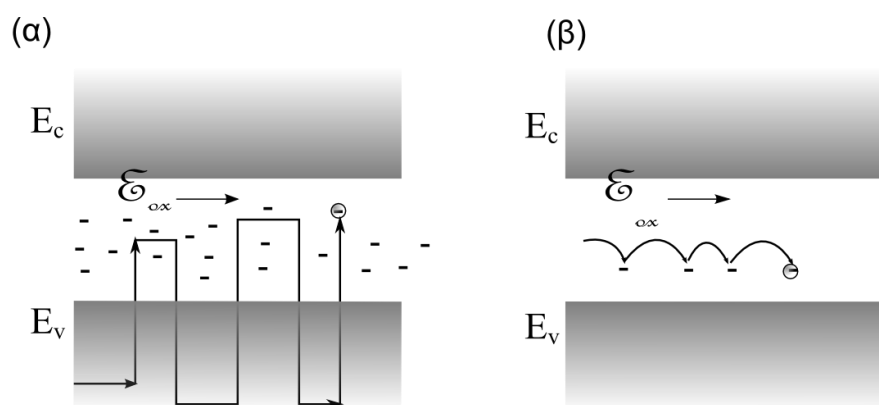
$$\Delta V_T(0^+) = - \Delta Q_h / 2C_{ox} \quad (5.9)$$

- Το μέγεθος ΔV_T μετράται σε Volts, το πάχος του οξειδίου t_{ox} σε nm και η δόση σε rad.
- Οι παράγοντες g_o και q παίρνουν τις τιμές $g_o = 8.1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{rad}^{-1}$ και $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb}$.
- Βλέπουμε πως η ΔV_T εξαρτάται από το τετράγωνο του πάχους του οξειδίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα λεπτότερα οξείδια να επιφέρουν μικρότερες αλλαγές στην συμπεριφορά των διατάξεων μετά τον ιονισμό.

5.4 Μεταφορά φορτίων

Κατά τη διαδικασία μεταφοράς των οπών δια μέσω του οξειδίου, εφαρμογή μιας θετικής τάσης στο οξείδιο έχει σαν αποτέλεσμα την μετακίνηση των οπών προς το υπόστρωμα του Si. Οι μηχανισμοί αυτής της διαδικασίας αναφέρονται παρακάτω:

- Μεταφορά διαμέσου της ζώνης σθένους με ενδιάμεσες παγιδεύσεις (trap-mediated transport via valence band hole conduction).
- Μεταφορά μέσα στο ενεργειακό χάσμα μεταπηδώντας σε εντοπισμένες ενεργειακές καταστάσεις μέσω φαινομένου σήραγγας (hopping transport via direct hole tunneling between localized trap sites within SiO₂ bandgap).



Εικόνα 5.5

(α) Η μεταφορά των οπών δια μέσω της ζώνης σθένους
 (β) Η μετακίνηση των οπών μέσα στο ενεργειακό χάσμα.

Ο χρόνος ημίσειας αποκατάστασης της τάσης εκτιμάται από τη σχέση:

$$t_s = t_s^0 \cdot (t_{ox})^{1/\alpha} \cdot \exp [\Delta(E_{ox})/k_B T] \quad (5.10)$$

όπου $\Delta(E_{ox}) = \Delta_0 - b \cdot E_{ox}$

Για καθαρό καλής ποιότητας SiO₂: $t_s^0 = 10^{-22}$ sec, $\alpha = 1$ nm, $\Delta_0 = 0.65$ eV, $b = 0.05$ eV/MV/cm.

Η καμπύλη αποκατάστασης $\Delta V_T(t)$ στη φάση μεταφοράς των οπών κατά μήκος του οξειδίου παρουσιάζει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

(α) Το σχήμα της δεν εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το εξωτερικό πεδίο ή το πάχος του οξειδίου. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν το πόσο γρήγορα ή αργά θα αποκατασταθεί η τάση και θα μηδενιστεί η ΔV_T .

(β) Αυτή η μεταφορά των οπών είναι άμεσο αποτέλεσμα της εφαρμογής πεδίου.

(γ) Σε θερμοκρασίες άνω των 140 K η καμπύλη έχει μια Arrhenius εξάρτηση με τη θερμοκρασία, ενώ για θερμοκρασίες κάτω των 140 K η μεταφορά θεωρείται θερμικά ανενεργή.

(δ) Ο απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς παρουσιάζει μερική εκθετική εξάρτηση με το πάχος του οξειδίου.

5.5 Οπές παγιδευμένες κοντά στη διεπιφάνεια.

Κοντά στη διεπιφάνεια SiO_2/Si υπάρχει ένα στρώμα μη στοιχειωμετρικού οξειδίου (Si_2O_3 , SiO) που οφείλεται σε ατελή οξείδωση του πυριτίου στην περιοχή αυτή.

Η ανόπτηση του παγιδευμένου κοντά στη διεπιφάνεια φορτίου εξαρτάται από το χρόνο, τη θερμοκρασία και το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο και γίνεται μέσω των δύο ακόλουθων μηχανισμών:

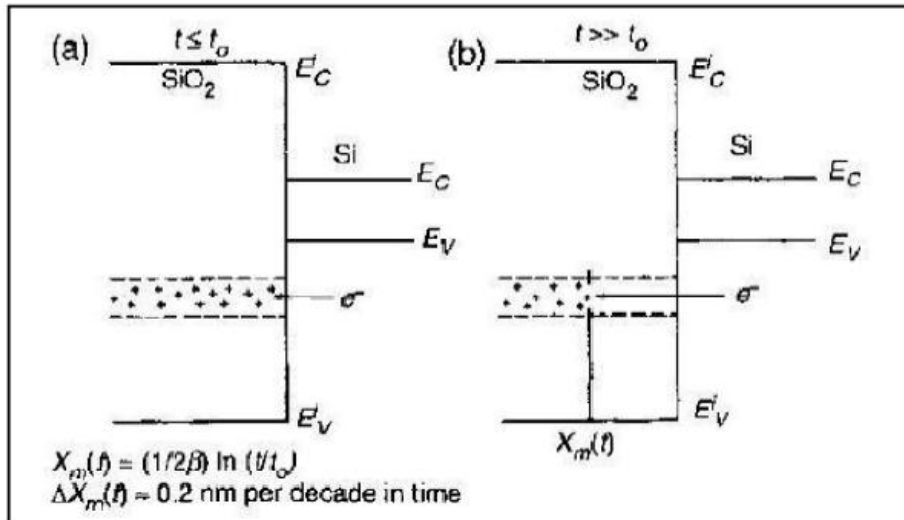
α) Φαινόμενο σήραγγας.

β) Θερμική διέγερση (thermal excitation).

- Μέσω φαινομένου σήραγγας, ηλεκτρόνια από το υπόστρωμα του πυριτίου μεταφέρονται προς το οξείδιο αδρανοποιώντας τις παγιδευμένες οπές. Η πιθανότητα σήραγγας παρουσιάζει εκθετική εξάρτηση με το βάθος του οξειδίου. Είναι σημαντικό πως για κάθε χρονική στιγμή θα υπάρχει θέση μέσα στο οξείδιο που όλες οι οπές στ' αριστερά (οπές δηλαδή που θα βρίσκονται πιο μακριά από το υπόστρωμα) δεν θα έχουν αδρανοποιηθεί. Αυτή η θέση

λέγεται μέτωπο σήραγγας (tunneling front) και παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από το $\ln t$:

$$\chi_m(t) \sim \ln(t/t_0) \quad (5.11)$$

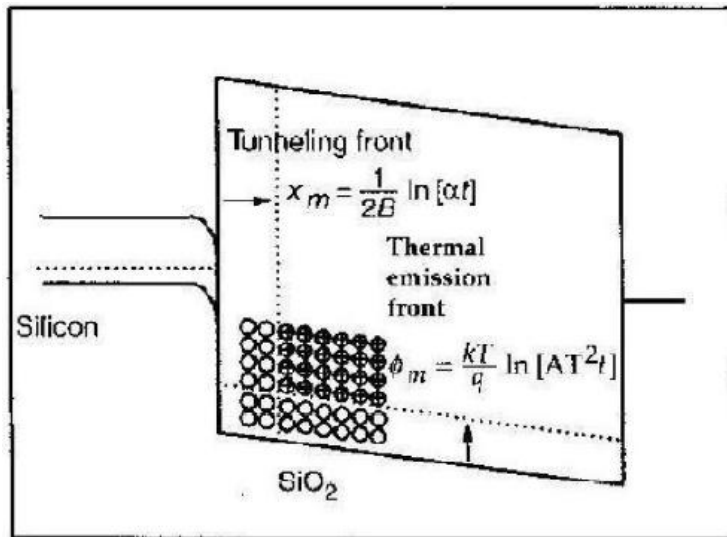


Εικόνα 5.6
Αδρανοποίηση παγιδευμένων οπών μέσω μετώπου σήραγγας.

- Λόγω της αδρανοποίησης των οπών μέσω της θερμικής διέγερσης των ηλεκτρονίων παρουσιάζεται το μέτωπο θερμικής διέγερσης (thermal excitation front). Παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από το $\ln t$, αλλά και από τη θερμοκρασία T :

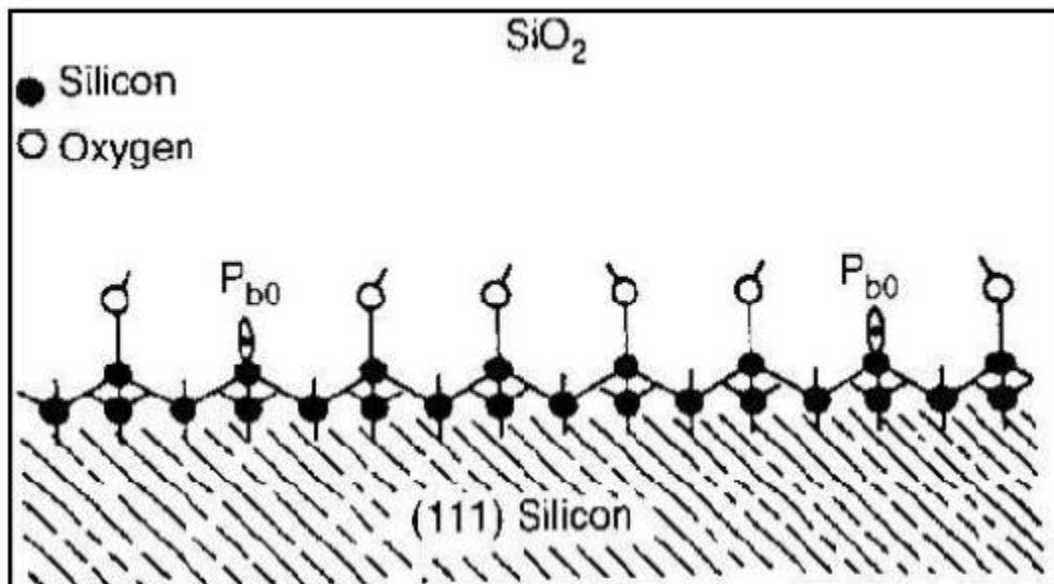
$$\phi_m(t) \sim \ln(AT^2 t) \quad (5.12)$$

Η συνολική συνεισφορά παρουσιάζεται στο σχήμα που ακολουθεί. Το φαινόμενο σήραγγας κυριαρχεί για θερμοκρασίες δωματίου μέχρι και τους 75°C , ενώ για θερμοκρασίες από $75-100^\circ\text{C}$ και άνω κυριαρχεί σημαντικά το φαινόμενο της θερμικής διέγερσης. Αρχικά παρουσιάζεται μια ταχεία αποκατάσταση της τάσης, αδρανοποίηση δηλαδή των παγίδων, ενώ για μεγάλους χρόνους της τάξεως των 10 sec επέρχεται ένα είδος κορεσμού, με αποτέλεσμα να πρόκειται για μια εξαιρετικά αργή διαδικασία.



Εικόνα 5.7
 Η συνεισφορά του μετώπου σήραγγος και του μετώπου θερμικής διέγερσης για την αδρανοποίηση των παγίδων στο οξείδιο.

Η αύξηση των διεπιφανειακών παγίδων έχει άμεση συσχέτιση με τα λεγόμενα κέντρα Pb. Τα Pb κέντρα είναι άτομα Si στη διεπιφάνεια SiO_2/Si , που είναι συνδεδεμένα με 3 άτομα Si μέσα στο υπόστρωμα και στην πλευρά του οξειδίου αντί για οξυγόνο υπάρχει ελεύθερος ένας δεσμός ηλεκτρονίου – παγίδα.

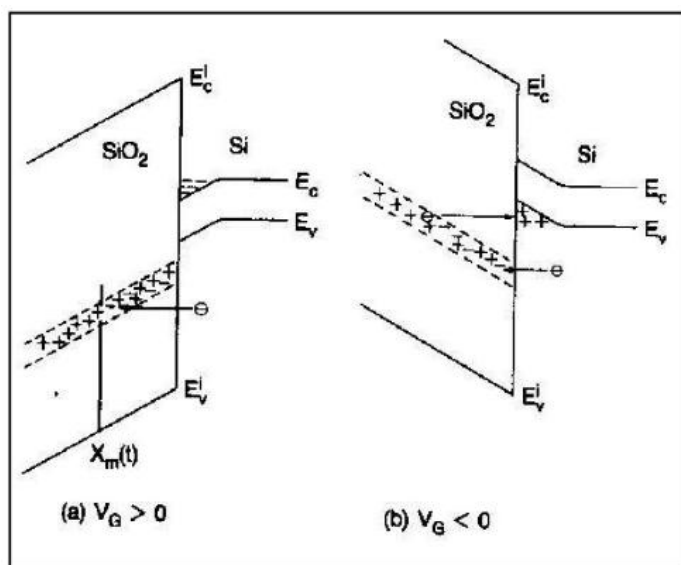


Εικόνα 5.8
 Τα Pb κέντρα στην διεπιφάνεια SiO_2/Si .

5.5.1 Το φαινόμενο της αντίστροφης ανόπτησης.

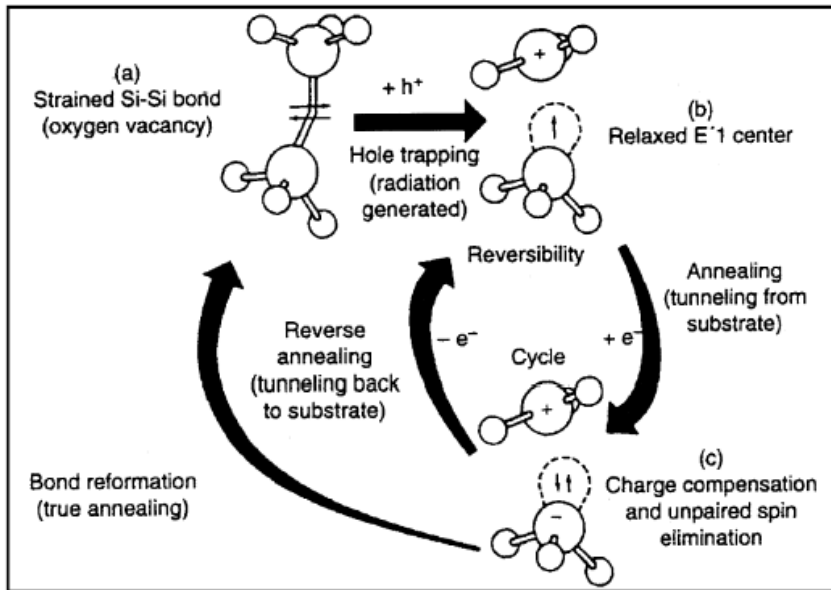
Με την επίδραση θετικής τάσης πύλης σε ακτινοβολημένο πυκνωτή MOS και σε υψηλή θερμοκρασία η τάση κατωφλίου επανέρχεται. Στη συνέχεια, με την εφαρμογή αρνητικής τάσης στο ίδιο σημείο παρατηρούμε επαναφορά των αδρανοποιημένων παγίδων με αποτέλεσμα νέα πτώση της τάσης κατωφλίου (reverse annealing).

Αυτό σημαίνει πως κατά την διαδικασία της αρχικής ανόπτησης οι παγίδες στη διεπιφάνεια δεν εξουδετερώθηκαν αλλά αδρανοποιήθηκαν ηλεκτρικά. Έτσι σε κάθε κύκλο θετικής/αρνητικής πόλωσης η μετατόπιση της τάσης διορθώνεται και επιστρέφει αν και μπορούμε να διακρίνουμε και ένα μέρος πραγματικής ανόπτησης κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας.



Εικόνα 5.9

- α) Η θετική τάση πύλης αδρανοποιεί τις παγίδες στη διεπιφάνεια προσθέτοντας ηλεκτρόνια.
- β) Με την εφαρμογή αρνητικής τάσης πύλης υπάρχει πιθανότητα να επανέλθουν οι παγίδες στη διεπιφάνεια.



Εικόνα 5.10
Μοντέλο που εξηγεί το φαινόμενο της αντίστροφης ανόπτησης.

Στην εικόνα 5.10 παρουσιάζεται το φαινόμενο της αντίστροφης ανόπτησης. Οι οπές που προκύπτουν από την ακτινοβόληση σπάνε τους ασθενείς δεσμούς Si-Si και το ένα άτομο καθίσταται θετικά φορτισμένο και το άλλο ουδέτερο. Έτσι πολώνοντας θετικά την πύλη εισάγουμε ηλεκτρόνια στο οξείδιο. Το ηλεκτρόνιο δεν συλλαμβάνεται από το θετικό άτομο της παγίδας αλλά από το ουδέτερο. Με αυτό τον τρόπο δημιουργείται ένα δίπολο το οποίο να μεν είναι ουδέτερα φορτισμένο, αλλά ο δεσμός Si-Si δεν ανασχηματίζεται αναγκαστικά. Εάν οι δύο άκρες του δίπολου είναι αρκετά κοντά τότε ο δεσμός θα ανασχηματιστεί λόγω ηλεκτροστατικής έλξης και έτσι θα έχουμε την λεγόμενη πραγματική ανόπτηση (real annealing). Σε αντίθετη περίπτωση το ασταθές αυτό σύστημα θα παραμείνει με αποτέλεσμα μια εφαρμογή αρνητικής τάσης να επιφέρει αναδημιουργία της παγίδας στο οξείδιο. Πάντα βέβαια υπάρχει και η πιθανότητα να έχουμε αποκατάσταση των παγίδων λόγω τυχαίας θερμικής κίνησης των φορέων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ Κεφάλαιο 5

- [1] T.P. Ma and P.V. Dressendorfer, “Ionizing Radiation effects in MOS devices and circuits”, Wiley, 1989.
- [2] T.R Oldham, “Ionizing Radiation effects in MOS oxides”, World Scientific, 1999.
- [3] E.Verrelli, D.Tsoukalas, M.Kokkoris, R.Vlastou, P.Dimitrakis, P.Normand, “Proton radiation effects on nanocrystal non – volatile memories”
IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 54, no.4, Aug. 2007.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Κατασκευή δειγμάτων (Μνήμες MOS με νανοσωματίδια Pt).

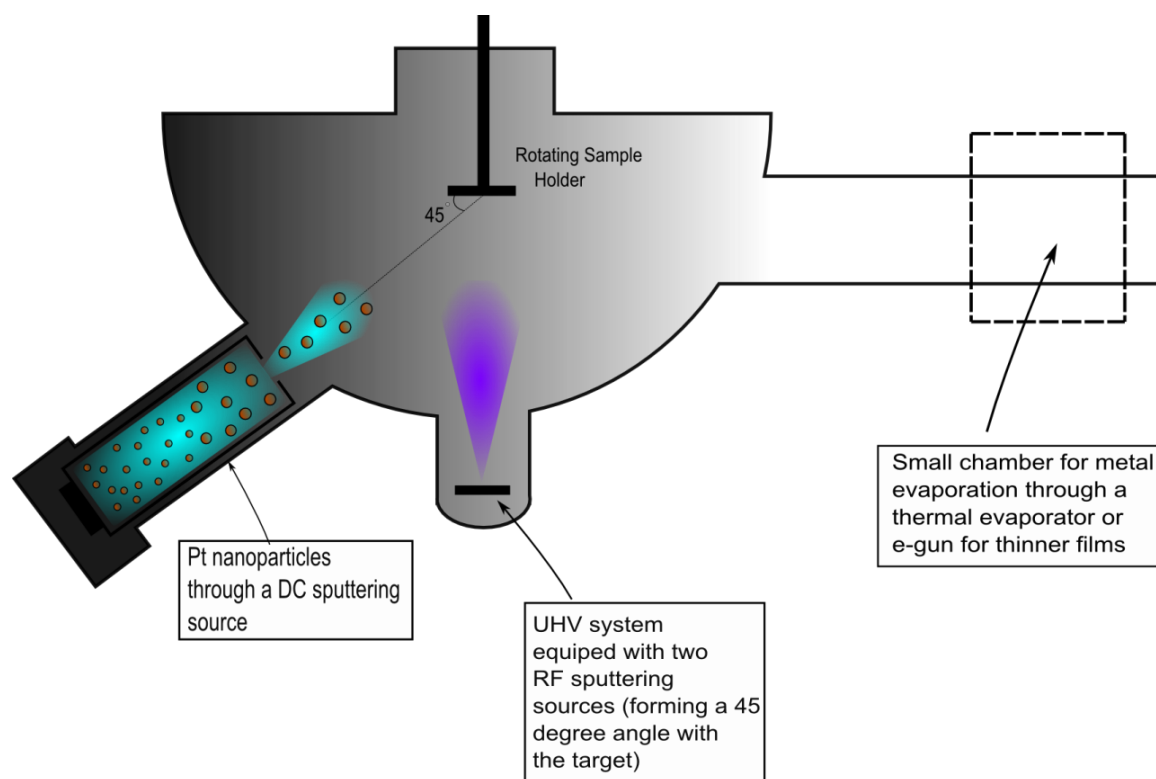
6.1 Εισαγωγή.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την κατασκευή μνημών τύπου MOS με εμφυτευμένα νανοσωματίδια πλατίνας (Pt). Το βασικό στοιχείο της κατασκευής των διατάξεων αυτών είναι πως το οξειδίο πύλης των πυκνωτών αποτελείται από δύο διαφορετικά υλικά. Το ένα είναι το SiO_2 το οποίο αποτελεί το οξειδίο σήραγγας (tunnel oxide) και το άλλο είναι το HfO_2 το οποίο αποτελεί το οξειδίο ελέγχου (control oxide). Το κίνητρο για την κατασκευή μικτού τύπου οξειδίου, είναι η ενίσχυση του ηλεκτρικού πεδίου στο οξειδίο σήραγγος, το οποίο με τη σειρά του θα βοηθήσει στο να πετύχουμε μειωμένες τάσεις εγγραφής/διαγραφής. Ένα άλλο σημαντικό κατασκευαστικό στοιχείο των διατάξεων είναι τα μεταλλικά νανοσωματίδια. Το πλεονέκτημα έναντι άλλων υλικών είναι η μεγάλη ποικιλία μετάλλων που έχουμε στη διάθεσή μας. Τα διαφορετικά έργα εξαγωγής, μας επιτρέπουν να ρυθμίζουμε το βάθος αποθήκευσης και να βελτιώσουμε τις ιδιότητες των μνημών όπως η αντοχή (endurance) και ο χρόνος κατακράτησης φορτίου (retention).

Η κατασκευή μη πτητικών μνημών με μεταλλικά νανοσωματίδια προϋποθέτει πως η εμφύτευση των νανοσωματιδίων δεν θα επιφέρει καταστροφές στην ποιότητα των άλλων υλικών της διάταξης, όπως το οξειδίο αλλά και το υπόστρωμα. Γι' αυτό το λόγο η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της εμφύτευσης δεν θα πρέπει να είναι αρκετά υψηλή (1000 °C) όπως για παράδειγμα στην κατασκευή νανοσωματιδίων Si (πχ. Δείγματα Numonyx). Τόσο υψηλές θερμοκρασίες θα μπορούσαν να μεταφέρουν τη διάχυση των νανοσωματιδίων τόσο στο στρώμα του διηλεκτρικού όσο και στο ίδιο το υπόστρωμα του Si καταστρέφοντας τη λειτουργία των μνημών.

6.2 Περιγραφή του συστήματος εναπόθεσης.

Η κατασκευή των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στον καθαρό χώρο (clean room) που βρίσκεται στο κτήριο Φυσικής του Ε.Μ.Π. Το σύστημα εναπόθεσης αποτελείται από ένα θάλαμο υψηλού κενού (UHV-Ultra High Vacuum), τρεις αντλίες (μια απλή και 2 τούρμπο) και είναι εξοπλισμένο με δύο πηγές ραδιοσυχνότητας για την διαδικασία της εναπόθεσης (RF magnetron sputtering sources). Ακόμα έχει ένα μικρό θάλαμο για την διαδικασία της επιμετάλλωσης η οποία γίνεται είτε μέσω θερμικής εξάχνωσης (thermal evaporation) είτε μέσω του e-gun για κατασκευή λεπτότερων φιλμ μετάλλου στα δείγματα. Τέλος αποτελείται από ένα μικρό θάλαμο (Nanogen source) για την κατασκευή και εμφύτευση των νανοσωματιδίων (DC sputtering source). Στην εικόνα 6.1 παρουσιάζεται σχηματικά διάταξη εναπόθεσης.



Εικόνα 6.1
Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος εναπόθεσης.

Τα δείγματα τοποθετούνται πάνω σε περιστρεφόμενη βάση (sample holder) η οποία κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης σχηματίζει γωνία 45° με την εκάστοτε πηγή ραδιοσυχνότητας και βρίσκεται σχεδόν 10cm από τους στόχους με τα υλικά της εναπόθεσης. Η βάση μπορεί να φτάσει σε θερμοκρασία μέχρι και 750°C και ο ρυθμός-διάρκεια της εναπόθεσης ρυθμίζεται από έναν κουάρντζ κοντρόλερ (QCF- Quartz Controller Monitor). Να σημειωθεί πως εκτός από Ar έχουμε τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσουμε O_2 και N_2 μέσα στο θάλαμο.



Εικόνα 6.2
Η περιστρεφόμενη βάση (sample holder) και η είσοδος του θαλάμου.



Εικόνα 6.3

Το εσωτερικό του συστήματος πολύ υψηλού κενού (UHV). Στην εικόνα φαίνονται οι δύο πηγές εναπόθεσης (RF magnetron sputtering sources) στη μια εκ των οποίων έχει τοποθετηθεί ο στόχος HfO_2 . Στην εικόνα διακρίνεται (πάνω δεξιά) ο μετρητής quartz που χρησιμοποιείται για την ακριβή μέτρηση του πάχους του υλικού της εναπόθεσης.



Εικόνα 6.4

Ο θάλαμος μέσα στον οποίο γίνεται η διαδικασία της επιμετάλλωσης είτε μέσω θερμικής εξάχνωσης είτε μέσω του e-gun.

6.3 Σύντομη περιγραφή κατασκευής δειγμάτων.

Σε αυτή την παράγραφο θα δώσουμε μια σύντομη περιγραφή της διαδικασίας κατασκευής των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας (Samples N119).

Αρχικά καθαρίζουμε το κομμάτι του Wafer Si, στο οποίο έχει ήδη αναπτυχθεί θερμικά ένα στρώμα SiO₂ πάχους 3-3.5 nm, με H₂SO₄ και H₂O₂ σε αναλογία 2:1 για περίπου 10 λεπτά (Piranha Cleaning). Με αυτή τη διαδικασία απομακρύνουμε τυχόν μικροσωματίδια, όπως σκόνη, από την επιφάνεια του wafer. Στη συνέχεια έχοντας ήδη δημιουργήσει κενό στο θάλαμο της τάξεως των 10⁻⁵ mbar ξεκινάμε τη διαδικασία της εμφύτευσης των νανοσωματιδίων μέσα στο οξειδίο SiO₂ (tunnel oxide). Χρησιμοποιήθηκαν μεταλλικά νανοσωματίδια πλατίνας και η εμφύτευση έγινε σε δύο στάδια χρονικής απόστασης 15 λεπτών, με σκοπό να καταφέρουμε να έχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ομοιομορφία στο σχήμα αλλά και στην πυκνότητα και επίσης για να δώσουμε χρόνο στον στόχο να ψυχθεί.

Στη συνέχεια, αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία της εμφύτευσης των νανοσωματιδίων προχωρήσαμε στην εναπόθεση στρώματος HfO₂ (control oxide) συνολικού πάχους 20-21nm, πάνω από το ήδη υπάρχον στρώμα SiO₂. Η διαδικασία της εναπόθεσης έγινε με ισχύ 200W κατευθείαν από στόχο HfO₂ υψηλής καθαρότητας. Να σημειωθεί πως κατά τη διάρκεια της διεργασίας η ροή του αργού Ar ήταν 60 sccm ενώ του O₂ 10 sccm. Αμέσως μετά προχωρήσαμε στην διαδικασία της επιμετάλλωσης η οποία έγινε σε συνθήκες υψηλού κενού ~ 6·10⁻⁶ mbar με σκοπό να επιτύχουμε όσο το δυνατόν μεγαλύτερη καθαρότητα στο εναποτιθέμενο αλουμίνιο.

Τέλος έγιναν οι λιθογραφίες. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε μια συσκευή με περιστρεφόμενη βάση (spinner - Εικόνα 6.5) στην οποία έχουμε τη δυνατότητα καθώς το δείγμα περιστρέφεται να προσθέτουμε τη φωτοευαίσθητη ρητίνη με σκοπό να πετύχουμε την πλήρη και όσο το δυνατόν πιο ομοιόμορφη επικάλυψη του δείγματος με το υλικό. Στη συνέχεια τα δείγματα «ψήθηκαν» στο φούρνο στους 90 °C για 10 λεπτά και ακολούθησε η τοποθέτηση της μάσκας στο δείγμα και η έκθεσή τους σε UV φώς. Αμέσως μετά την έκθεση χρησιμοποιήθηκε developer με σκοπό να

εμφανίσουμε τις δομές και τα δείγματα ψήθηκαν για 10 λεπτά στους 120 °C. Τέλος τα δείγματα εκτέθηκαν σε διάλυμα φωσφορικού οξέος (H_3PO_4) με σκοπό να απομακρυνθεί το αλουμίνιο που δεν θέλουμε και να δημιουργηθούν οι επαφές (etching) και ακολούθησε η τελική επιμετάλλωση του πίσω μέρους των δειγμάτων.



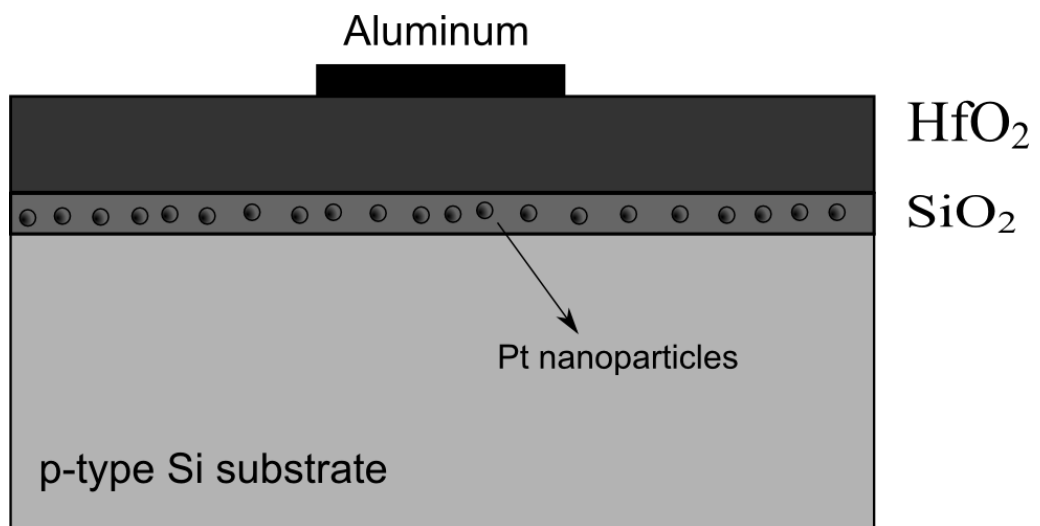
Εικόνα 6.5
Το spinner.



Εικόνα 6.6
Ο φούρνος που «ψήθηκαν» τα δείγματα.



Εικόνα 6.7
Η τελική μορφή των δειγμάτων MOS με εμφυτευμένα νανοσωματίδια πλατίνας.



Εικόνα 6.8
Κάθετη τομή των δειγμάτων που κατασκευάστηκαν.

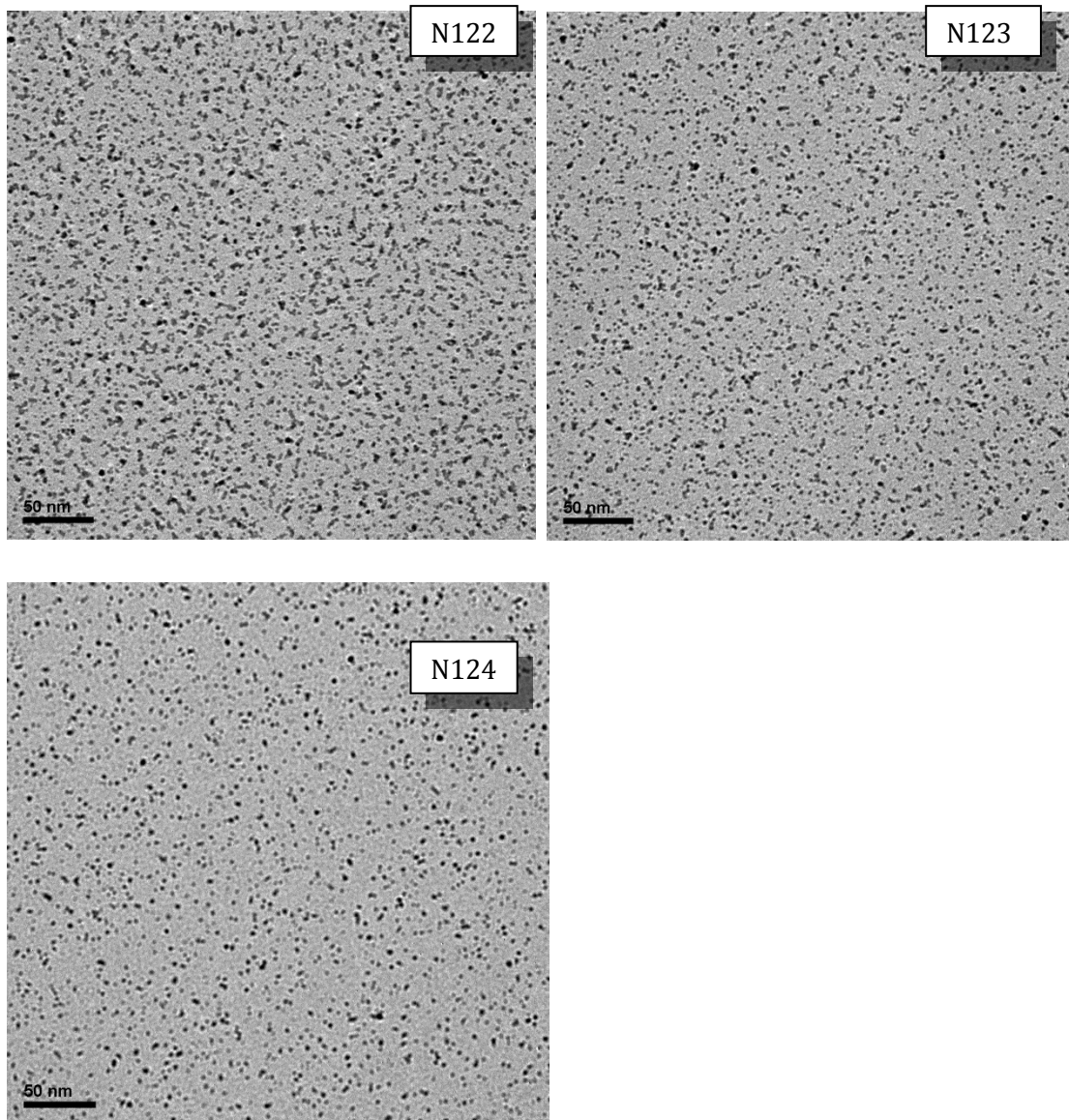
6.4 Πυκνότητα νανοσωματιδίων και παράθυρο μνήμης.

Σ' αυτή την παράγραφο μελετήθηκε η συμπεριφορά του παράθυρου μνήμης για διατάξεις με διαφορετική πυκνότητα νανοσωματιδίων. Γι' αυτό το λόγο κατασκευάστηκαν μνήμες τύπου MOS με τρεις διαφορετικές πυκνότητες νανοσωματιδίων πλατίνας. Στην εικόνα 6.9 παρουσιάζεται ο πίνακας με τα ονόματα των δειγμάτων και τις αντίστοιχες πυκνότητες.

Sample's name	Nanoparticle density (particles/cm ²)
N124	$1.8 \cdot 10^{12}$
N123	$2.3 \cdot 10^{12}$
N122	$2.8 \cdot 10^{12}$

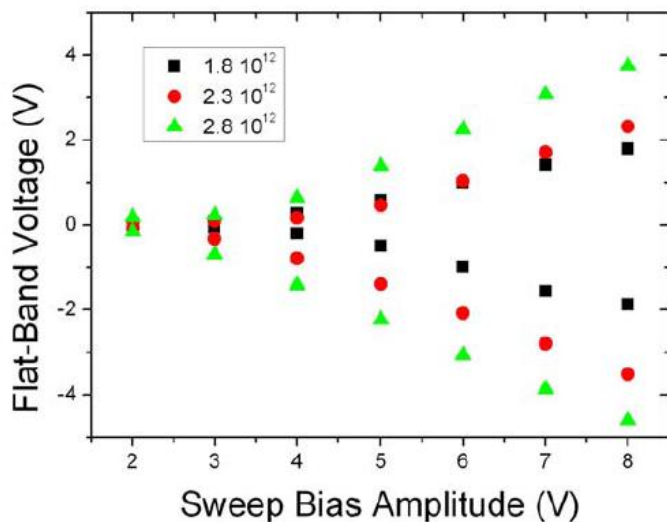
Εικόνα 6.9
Τα δείγματα και οι αντίστοιχες πυκνότητες νανοσωματιδίων.

Κατά τη διάρκεια της εμφύτευσης των νανοσωματιδίων χρησιμοποιήθηκαν carbon grids τα οποία μέσω μικροσκοπίου TEM (Transmission-Electron-Microscopy) μας έδωσαν μια εικόνα για την πυκνότητα, την κατανομή και το μέγεθος των νανοσωματιδίων μέσα στα δείγματά μας.

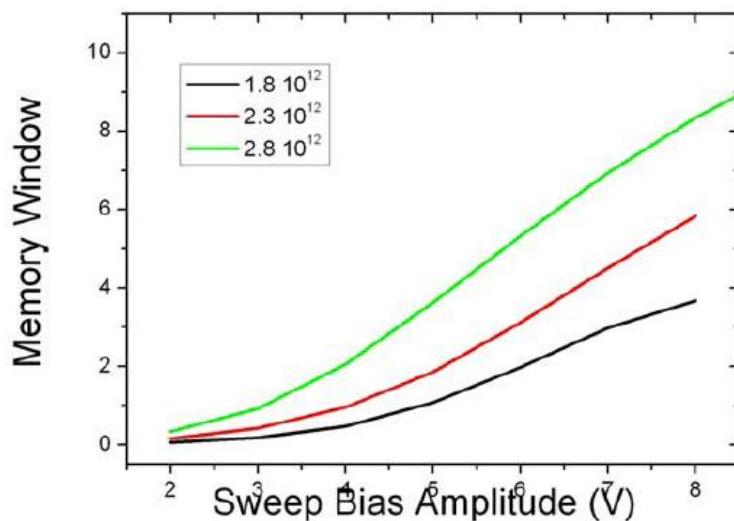


Εικόνα 6.10
Εικόνες TEM για τα δείγματα που αναφέρθηκαν.

Για μια αρχική εκτίμηση του παράθυρου μνήμης μετρήσαμε την μετατόπιση της τάσης επιπέδων ζωνών των πυκνωτών για αυξανόμενες τάσεις πύλης και στα τρία δείγματα. Τ' αποτελέσματα παρουσιάζονται στην εικόνα 6.11.



Εικόνα 6.11
 Η μετατόπιση της τάσης επιπέδων ζωνών για αυξανόμενες τάσεις πύλης για τις διαφορετικές πυκνότητες νανωσωματιδίων.



Εικόνα 6.12
 Η συμπεριφορά του παράθυρου μνήμης των δειγμάτων.

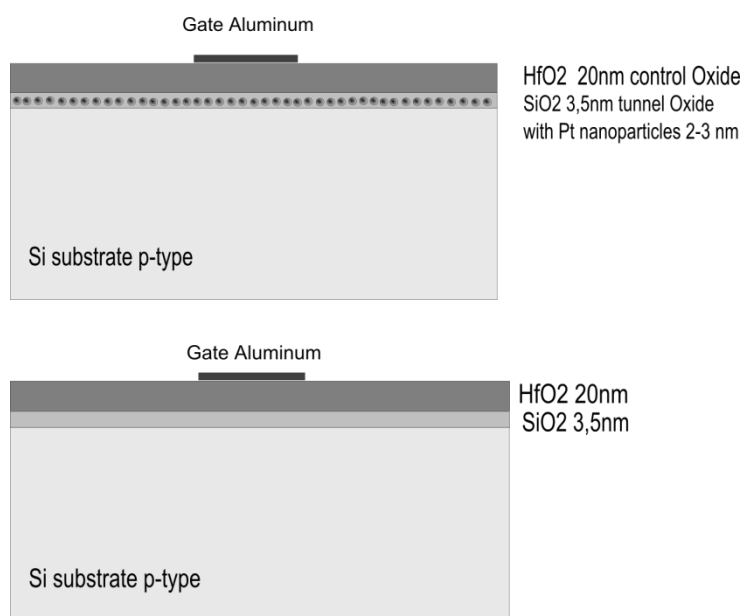
Η εξάρτηση της πυκνότητας των νανωσωματιδίων με το παράθυρο μνήμης είναι εμφανής. Παρατηρούμε πως με την αύξηση της πυκνότητας αυξάνεται και το παράθυρο μνήμης, εκδηλώνοντας μια σαφή τάση προς κορεσμό για τις υψηλότερες τιμές τάσεων, κοντά στην διηλεκτρική κατάρρευση του οξειδίου, άμεσο αποτέλεσμα του φραγμού Coulomb.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ακτινοβόληση με πρωτόνια 8MeV NC-MOS πυκνωτών.

7.1 Τα δείγματα του πειράματος.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκαν δείγματα που κατασκευάστηκαν στον καθαρό χώρο (clean room) του Ε.Μ.Π. Τα δείγματα ήταν πυκνωτές τύπου MOS με εμφυτευμένα νανοσωματίδια Pt πυκνότητας $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ διαμέτρου 2-3 nm όπως και πυκνωτές αναφοράς απλού τύπου. Το οξειδίο ελέγχου (control oxide) έχει πάχος περίπου 20nm και το οξειδίο σήραγγας (tunnel oxide) περίπου 3nm. Να σημειωθεί πως τα δείγματα που μετρήθηκαν και στη συνέχεια ακτινοβολήθηκαν δεν έχουν υποστεί την διεργασία της θερμικής ανόπτησης πράγμα που εξηγεί την ελαφρώς αυξημένη αντίσταση που παρατηρήθηκε κατά την διάρκεια των μετρήσεων.

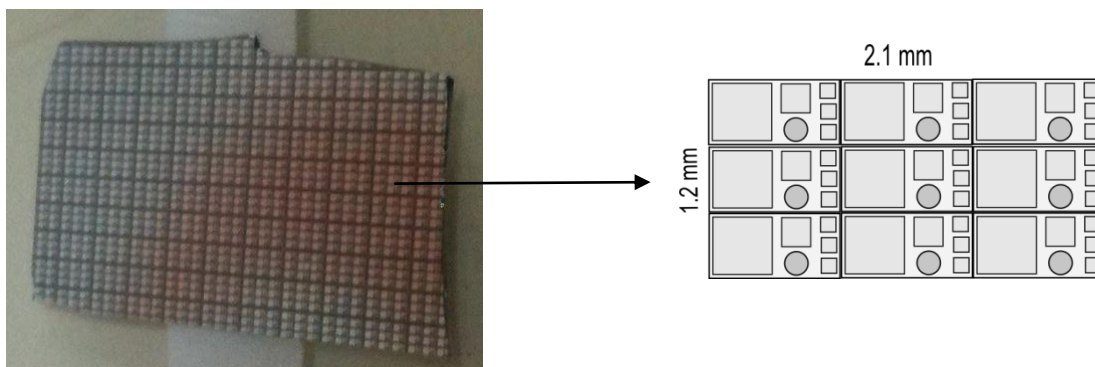


Εικόνα 7.1.

(α) Διατομή πυκνωτών MOS με νανοσωματίδια Pt.

(β) Διατομή πυκνωτών αναφοράς MOS.

Τα δείγματα χωρίζονται σε ορθογώνιες υποπεριοχές (blocks) οι οποίες με τη σειρά τους χωρίζονται σε 3x3 τετράγωνα. Στο κάθε ένα από αυτά υπάρχει ένας πυκνωτής 400x400 μm, ένας πυκνωτής 200x200μm, ένας κυκλικός πυκνωτής διαμέτρου 110μm όπως επίσης και τρεις πυκνωτές 100x100μm τους οποίους χρησιμοποιήσαμε κυρίως κατά την διάρκεια των μετρήσεών μας.



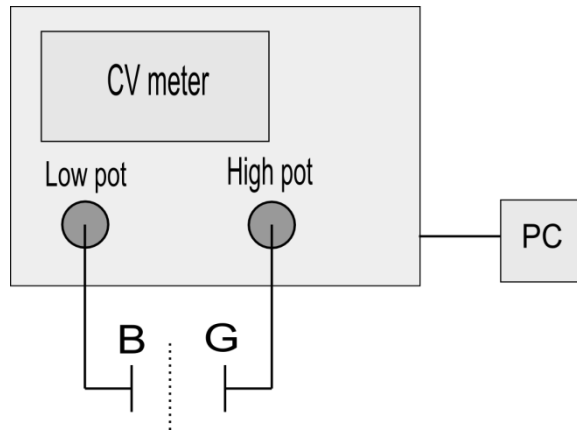
Εικόνα 7.2.

Ένα κομμάτι του Wafer του δείγματος N119 (αριστερά) και (δεξιά) ένα Block από πυκνωτές όπως περιγράφεται ανωτέρω.

7.2 Πειραματική Διάταξη Μετρήσεων

Τα πειράματα έγιναν στο εργαστήριο ηλεκτρικού χαρακτηρισμού στο υπόγειο του κτηρίου Φυσικής του Ε.Μ.Π. Χρησιμοποιήθηκε το καπασιτόμετρο, το αμπερόμετρο όπως επίσης και η παλμογεννήτρια τα οποία συνδέονταν με τον probe. Ο probe αποτελείται από μια μεταλλική βάση πάνω στην οποία τοποθετούνται τα δείγματα και από μεταλλικές βελόνες (probes) οι οποίες ακουμπούν στους ακροδέκτες (pads) του εκάστοτε δείγματος. Από εκεί κάθε βελόνα (probe) οδηγείται σε μια έξοδο μέσω της οποίας συνδέεται με το κατάλληλο μετρητικό μηχανήμα. Κάθε μηχανήμα είναι συνδεδεμένο στο Η/Υ μέσω μια θύρας GPIB μέσω της οποίας επιτυγχάνεται η επικοινωνία του υπολογιστή με τα μετρητικά μηχανήματα. Για να

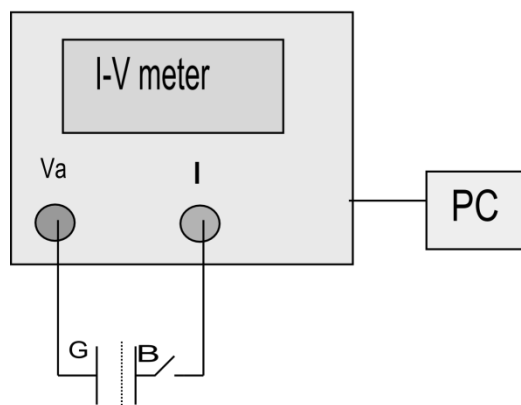
πάρουμε μια C-V (χωρητικότητα-τάση) χαρακτηριστική καμπύλη χρησιμοποιούμε το καπασιτόμετρο με την συνδεσμολογία που φαίνεται στην εικόνα 7.3.



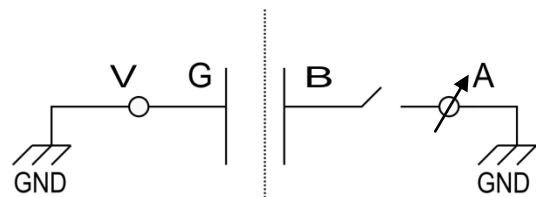
Εικόνα 6.3
Συνδεσμολογία πειραματικής διάταξης για CV μέτρηση πυκνωτή μνήμης MOS

Για να λάβουμε την καμπύλη εξάρτησης της έντασης του ρεύματος διαρροής σε συνάρτηση με την τάση που εφαρμόζεται στον πυκνωτή χρησιμοποιούμε το αμπερόμετρο όπως φαίνεται στην εικόνα 7.4 παρακάτω.

(α)



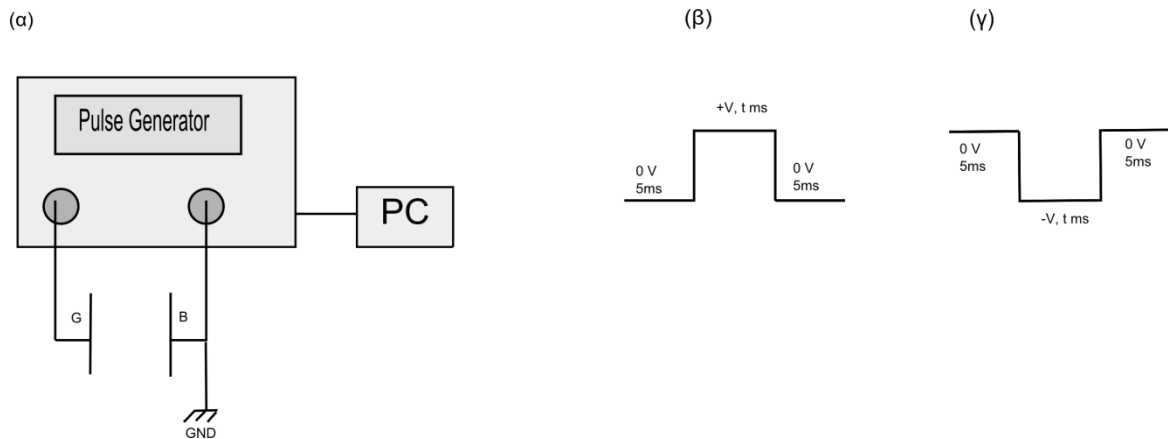
(β)



Εικόνα 7.4

(α) Η πειραματική διάταξη για I-V μέτρηση για πυκνωτή μνήμη MOS
(β) Η συνδεσμολογία του κυκλώματος για μέτρηση I-V

Για τον προγραμματισμό των μνημών χρησιμοποιήθηκαν τετραγωνικοί παλμοί (αρνητικοί ή θετικοί) οι οποίοι αποστέλλονταν μέσω της παλμογεννήτριας. Η συνδεσμολογία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 7.5

- (α) Συνδεσμολογία για την εφαρμογή παλμού στους πυκνωτές μνήμης.
 (β) Θετικός τετραγωνικός παλμός (Write).
 (γ) Αρνητικός τετραγωνικός παλμός (Erase).

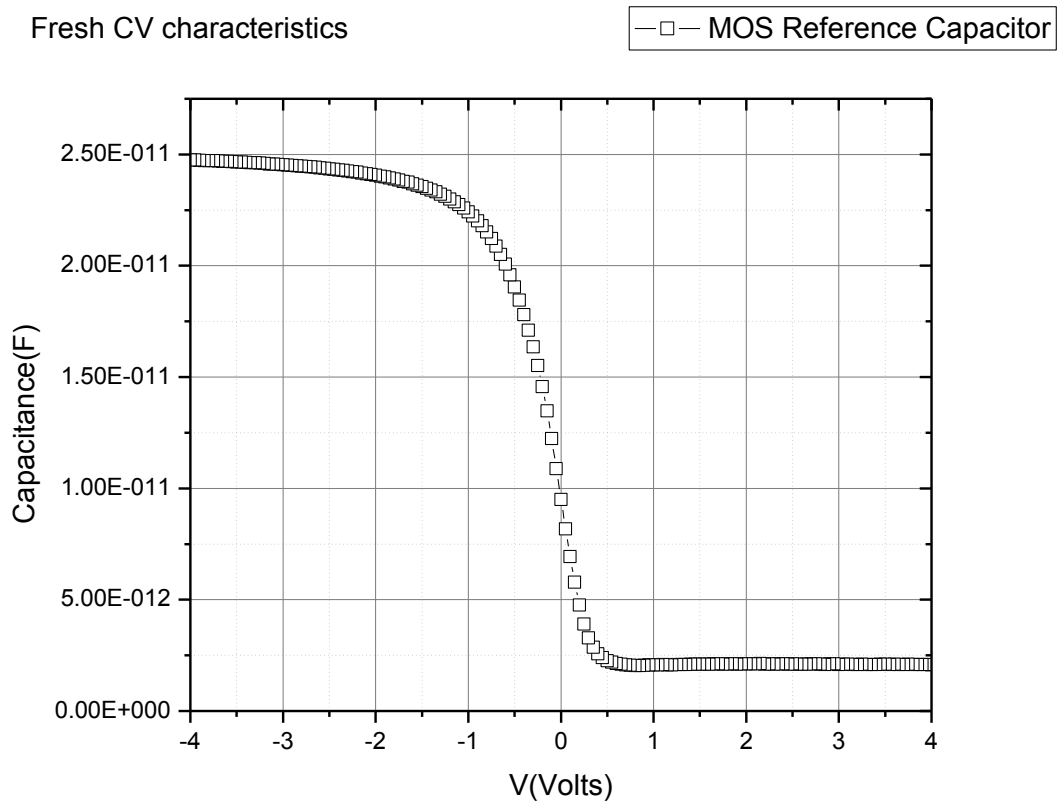
7.3 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός δειγμάτων πριν την ακτινοβόληση.

Για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των δειγμάτων χρειάστηκε να μετρήσουμε την CV χαρακτηριστική καμπύλη των πυκνωτών. Μέσω της μέγιστης χωρητικότητας του οξειδίου όπως φαίνεται στην εικόνα 6.6 μπορούμε να εκτιμήσουμε και το πάχος του οξειδίου από την σχέση:

$$d_{ox} = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r, SiO_2}{C_{ox}} \quad (\text{Σχέση 7.1})$$

Πράγματι αντικαθιστώντας τις τιμές στην σχέση 7.1 έχουμε για το εμβαδόν του πυκνωτή $A=10^{-8} \text{ m}^2$, την διηλεκτρική σταθερά του κενού $\epsilon_0=8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$, την διηλεκτρική σταθερά του SiO_2 $\epsilon_r=3,9$ και το μέγιστο της χωρητικότητας από την εικόνα 7.6 έχουμε μια πολύ καλή προσεγγιστική τιμή για $d_{ox}=13,8 \text{ nm}$. Να σημειωθεί

πως το πάχος του οξειδίου υπολογίζονταν αυτόματα από το πρόγραμμα σε κάθε μέτρηση και αποτελούσε μέτρο για το κατά πόσο το ληφθέν αποτέλεσμα συμβάδιζε με την πραγματικότητα ή όχι.



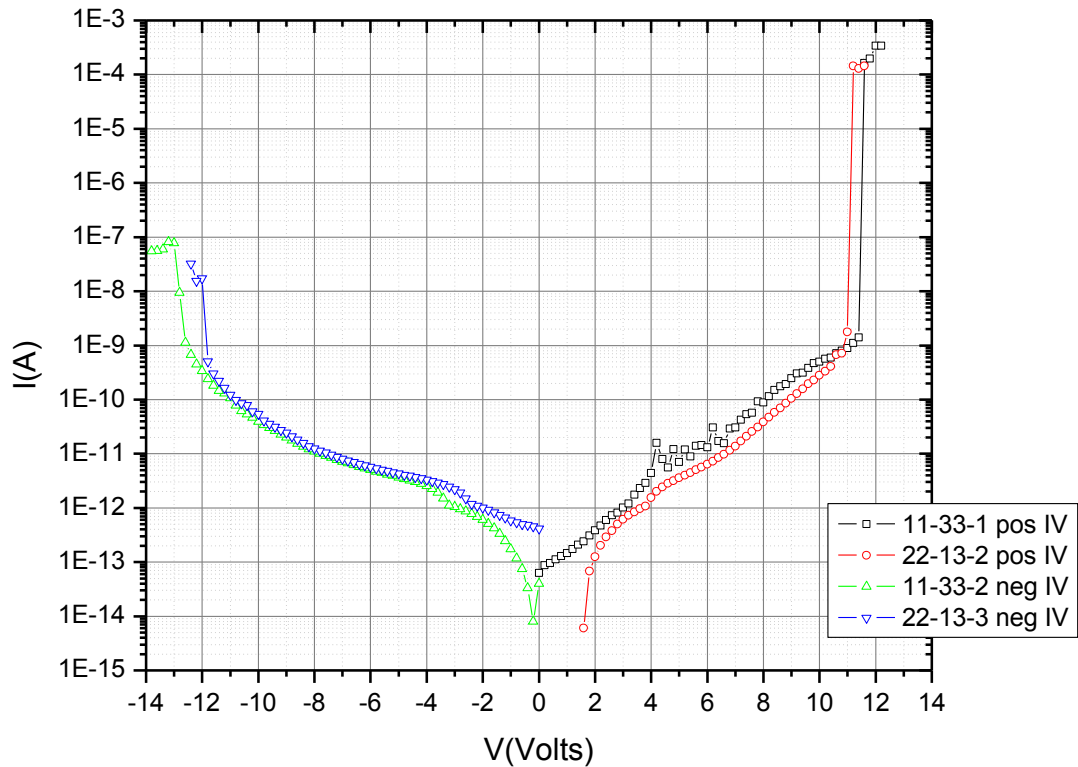
Εικόνα 7.6

Πειραματική καμπύλη για διάταξη MOS όπως μετρήθηκε στο εργαστήριο.

Άλλη μια διαδικασία η οποία είναι μέρος του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού των δειγμάτων είναι η μέτρηση του ρεύματος διαρροής. Παρακάτω παρουσιάζεται η καμπύλη I-V τόσο για αρνητικές όσο και θετικές τάσεις. Παρατηρούμε πως η τάση κατάρρευσης (Breakdown Voltage) για το οξείδιο είναι γύρω στα +/- 12 Volts με χαμηλότερο ρεύμα διαρροής για αρνητικές τάσεις και αρκετά μεγαλύτερο για θετικές.

N119-Broken- Part IV

Leackage Current

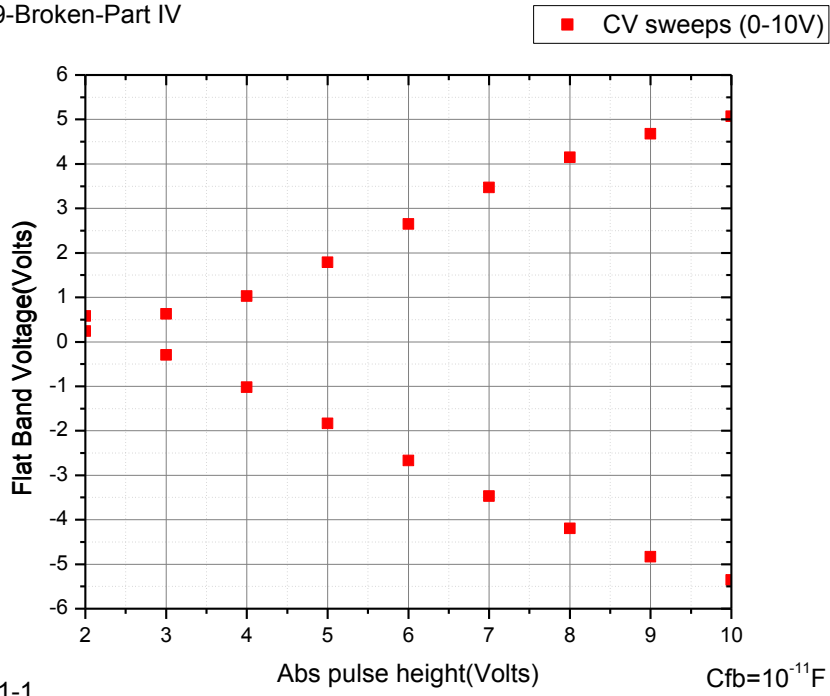


Εικόνα 7.7

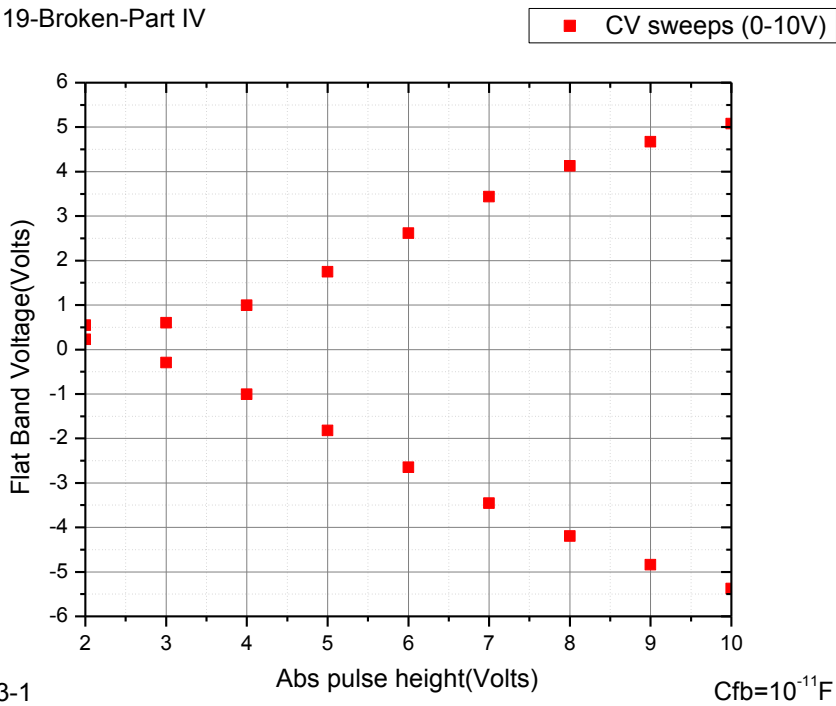
Πειραματική καμπύλη ρεύματος διαρροής για θετικές και αρνητικές τάσεις για NC MOS πυκνωτή με εμφυτευμένα νανοσωματίδια πλατίνας (Pt).

Μια τελευταία διεργασία που πραγματοποιήθηκε για τον χαρακτηρισμό των μνημών είναι τα CV sweeps. Είναι μια διεργασία η οποία μας δίνει μια πρώτη εικόνα για το κατά πόσο η μνήμη λειτουργεί ή όχι. Έχουμε δηλαδή τη δυνατότητα να καταλάβουμε τόσο την ομοιομορφία των νανοσωματιδίων στο wafer όσο και την δυνατότητα αποθήκευσης φορτίου σε αυτά. Στις καμπύλες που ακολουθούν βλέπουμε παραδείγματα από sweeps που έγιναν σε δείγματα με εμφυτευμένα νανοσωματίδια Pt αλλά και σε δείγματα αναφοράς.

N119-Broken-Part IV



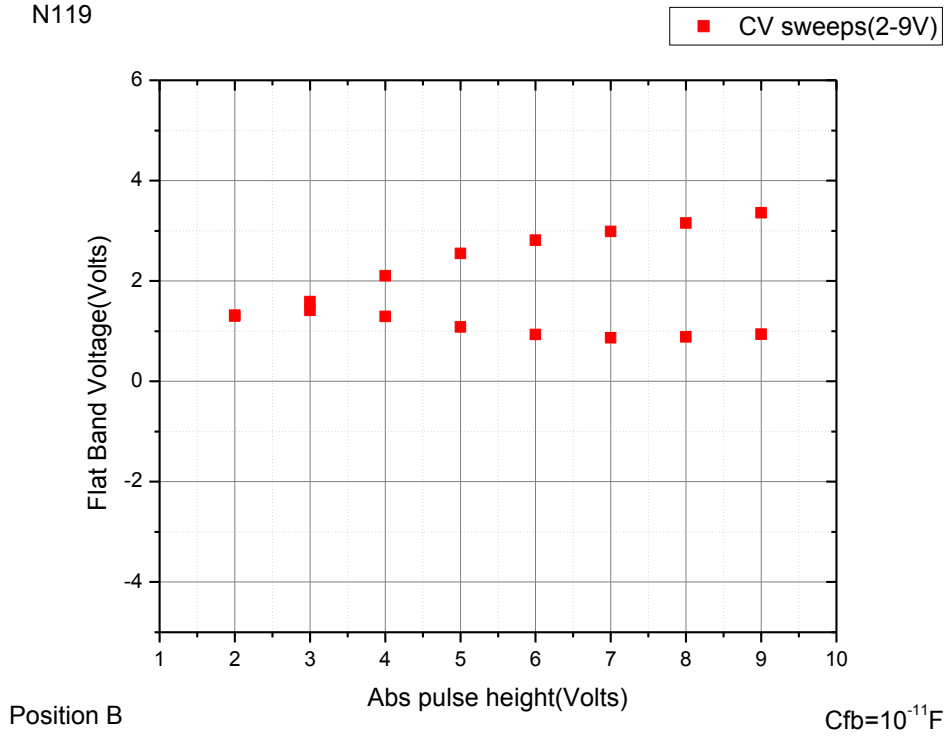
N119-Broken-Part IV



Εικόνα 7.8

Αποτελέσματα μετρήσεων CV sweep για περιοχές του wafer (του δείγματος N119 με νανοσωματίδια Pt) στις οποίες η μνήμη λειτουργεί κανονικά. Βλέπουμε ότι το παράθυρο μνήμης εκτιμάται γύρω στα 10 Volts.

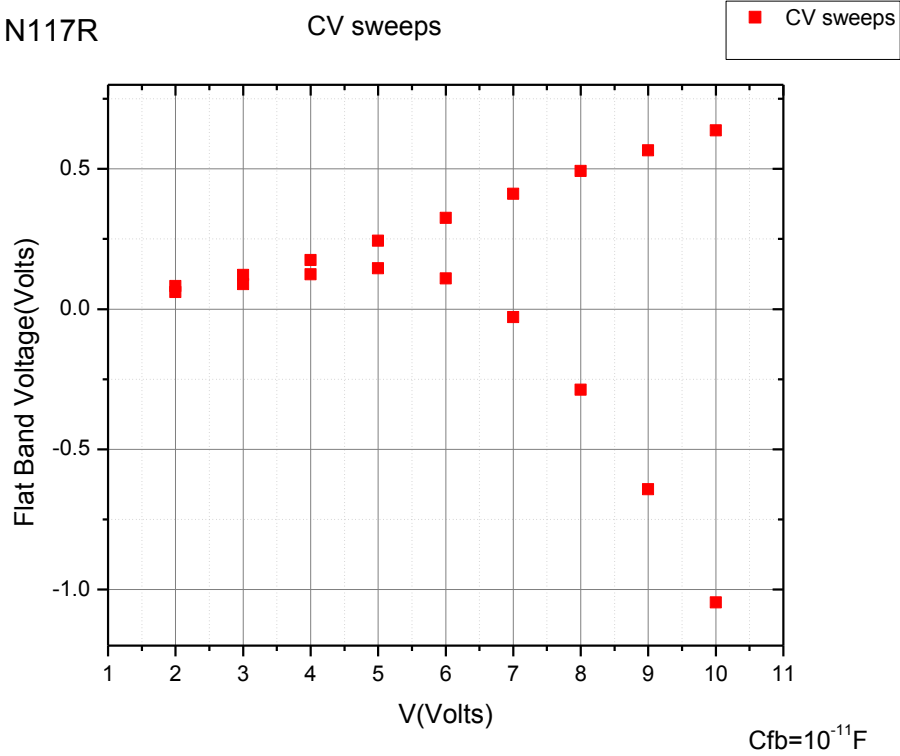
N119



Εικόνα 7.9

Αποτελέσματα μετρήσεων CV sweep για περιοχές του wafer (του δείγματος N119 με νανοσωματίδια Pt) στις οποίες η μνήμη δεν λειτουργεί κανονικά.

N117R



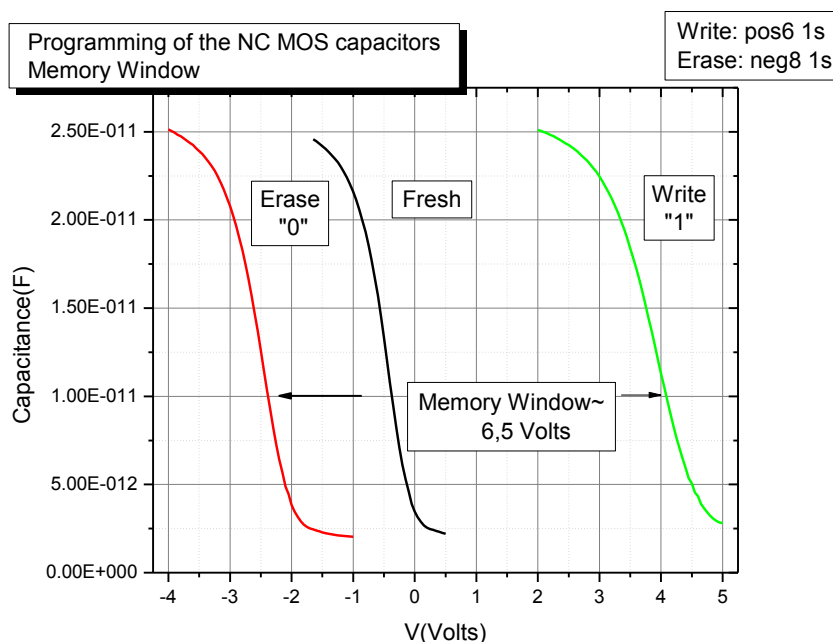
Εικόνα 7.10

Αποτελέσματα μετρήσεων CV sweep για πυκνωτές αναφοράς χωρίς εμφυτευμένα νανοσωματίδια Pt.

Στην εικόνα 7.10 παρατηρούμε μια συμπεριφορά κατακράτησης φορτίου παρόμοια με εκείνη των δειγμάτων με νανοσωματίδια πλατίνας. Είναι εμφανές ότι αυτό εμφανίζεται για μεγαλύτερες τιμές τάσης στα δείγματα αναφοράς απ' ό,τι στα δείγματα με εμφυτευμένα νανοσωματίδια και είναι αποτέλεσμα της ιδιότητας του HfO_2 να κατακρατά φορτίο κατά την διάρκεια συνεχούς εφαρμογής τάσης (Constant Voltage Stress) σε αυτό.

7.4 Προγραμματισμός μνημών και παράθυρο μνήμης.

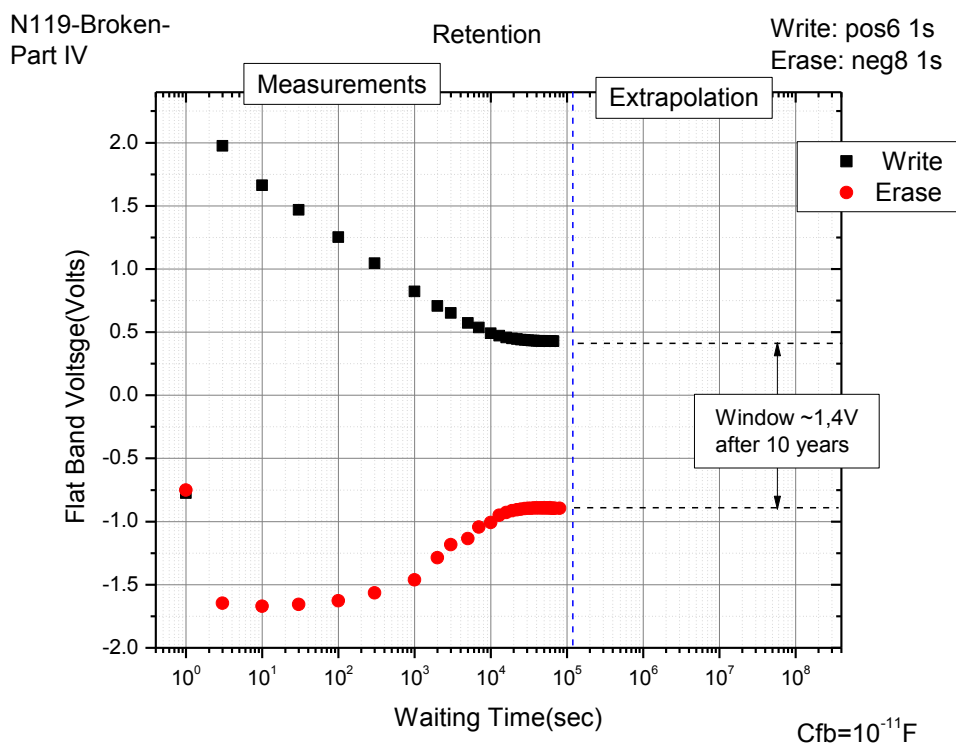
Για τον προγραμματισμό των μνημών χρειάστηκε να κάνουμε μια διεργασία για να προσδιορίσουμε το βέλτιστο παράθυρο μνήμης των δειγμάτων μας. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκαν παλμοί διαφορετικού ύψους και διάρκειας με σκοπό να βρούμε το μέγιστο δυνατό παράθυρο για όσο το δυνατόν χαμηλότερες τιμές τάσης και χρόνου. Τελικά ο προγραμματισμός έγινε με παλμούς διάρκειας 1s, ύψους 6V για το Write state και -8V για το Erase state. Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το γράφημα των χαρακτηριστικών CV καμπυλών ενός πυκνωτή, πριν τον προγραμματισμό (fresh), έπειτα από τον θετικό παλμό και έπειτα από τον αρνητικό παλμό. Βλέπουμε ότι το παράθυρο μνήμης προκύπτει γύρω στα 6,5 Volts.



Εικόνα 7.11

Το παράθυρο μνήμης που προκύπτει από τις χαρακτηριστικές CV για Write(6V,1s) και Erase(-8,1s).

Για την μελέτη της κατακράτησης φορτίου στην πάροδο του χρόνου (retention) χρησιμοποιήθηκαν παλμοί ίδιου μήκους και διάρκειας με αυτούς που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Για την πραγματοποίηση αυτής της διεργασίας φορτίσαμε τις μνήμες με θετικό ή αρνητικό παλμό (Write/Erase state) και στη συνέχεια μετρούσαμε τις fresh καμπύλες ανά λογαριθμικά χρονικά διαστήματα. Συνήθως η τελευταία μέτρηση ήταν γύρω στα 86000 sec μετά τον αρχικό προγραμματισμό.



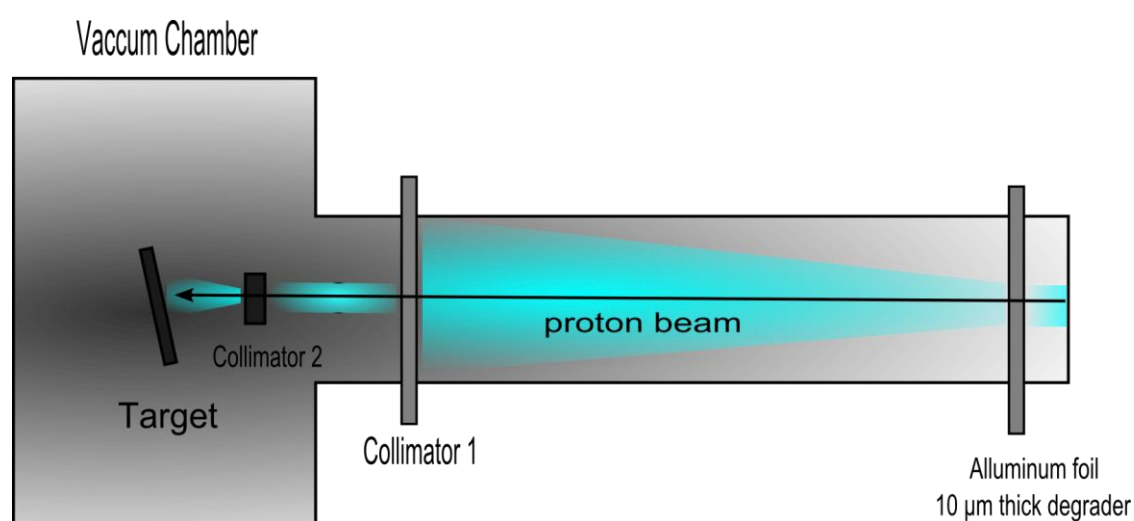
Εικόνα 7.12
Μελέτη της κατακράτησης φορτίου (Retention) για θετικούς και αρνητικούς παλμούς (Write/Erase) πριν την ακτινοβόληση.

Παρατηρούμε πως μετά από 10^4 sec περίπου σταματάμε να έχουμε απώλεια φορτίου οπότε μπορούμε να συμπεράνουμε πως έως και μετά από 10 χρόνια, που είναι ένα ασφαλές χρονικό όριο για την αξιόπιστη λειτουργία μνημών, θα έχουμε ένα σταθερό παράθυρο μνήμης γύρω στα 1,4 Volts.

7.5 Ακτινοβόληση Δειγμάτων

Η ακτινοβόληση έγινε με δέσμη πρωτονίων (^1H beam) ενέργειας 8 MeV στον επιταχυντή σωματιδίων τύπου TANDEM στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ.

Αρχικά έπρεπε να φτιάξουμε το μέγεθος της δέσμης και να βρούμε έναν τρόπο ώστε η δέσμη να είναι ορατή σε εμάς μέσω της κάμερας που είχε τοποθετηθεί μέσα στον θάλαμο όπου θα ακτινοβολούνταν τα δείγματα. Για να καταφέρουμε να δημιουργήσουμε μια αρκετά μεγάλη δέσμη και όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφη τοποθετήσαμε ένα φύλλο αλουμινίου (degrader) πάχους 10 μm σε απόσταση περίπου 1m από τον στόχο. Με αυτό τον τρόπο επιτύχαμε μέσω της σκέδασης των πρωτονίων στο φύλλο Al το «άνοιγμα» της διαμέτρου της δέσμης. Στη συνέχεια λίγο πριν τον θάλαμο είχε τοποθετηθεί ένας collimator (collimator 1) από τον οποίο περνούσε μόνο ένα μικρό κομμάτι της εισερχόμενης δέσμης. Τέλος μπροστά από τον στόχο είχαμε βάλει έναν αυτοσχέδιο collimator (collimator 2) κυκλικής διατομής ο οποίος είχε ευθυγραμμιστεί με την βοήθεια laser με το σημείο που θέλαμε να πέφτει η δέσμη. Με αυτές τις διαδικασίες καταφέραμε να δημιουργήσουμε μια ικανοποιητική, τόσο από πλευράς μεγέθους όσο και ομοιομορφίας, δέσμη για την ακτινοβόληση των δειγμάτων.



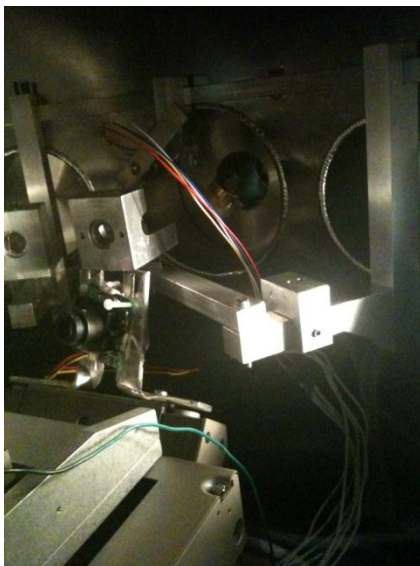
Εικόνα 7.13
Σχηματική αναπαράσταση της διαδρομής της δέσμης μέσω του foil αλουμινίου και των 2 κατά σειρά Collimator.



Εικόνα 7.14(α)
Το foil/degrader αλουμινίου.



Εικόνα 7.14(β)
Ο collimator 1 που βρίσκεται έξω από
τον θάλαμο ακτινοβολήσης.



Εικόνα 7.14(γ)
Ο collimator 2 που βρίσκεται μέσα στον
θάλαμο ακτινοβολήσης απέναντι από τον
στόχο .



Εικόνα 7.14(δ)
Ο θάλαμος ακτινοβολήσης μέσα στον
οποίο βρίσκονταν τα δείγματα.

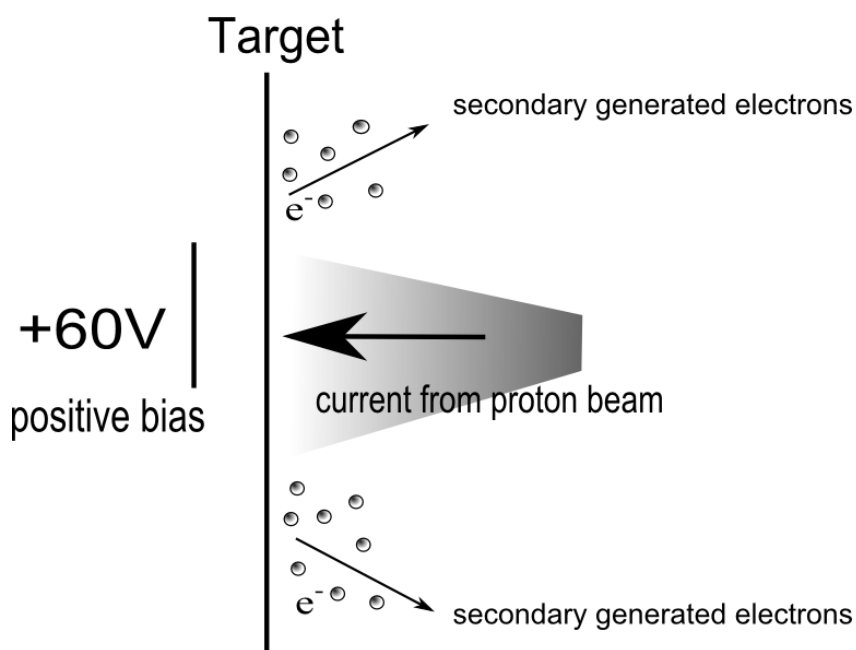
Αφού το στήσιμο της πειραματικής διάταξης είχε ολοκληρωθεί έπρεπε να δούμε το σχήμα της δέσμης των πρωτονίων. Σε παλαιότερο πείραμα είχε χρησιμοποιηθεί θερμογραφικό χαρτί στο οποίο αποτυπώνονταν το μέγεθος και το σχήμα της δέσμης μέσω της αμαύρωσής του (καψίματος) σαν αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης με την δέσμη. Στην δική μας περίπτωση επειδή το ρεύμα ήταν αρκετά χαμηλό της τάξης των 50nA θα απαιτούνταν αρκετά μεγάλος χρόνος για την πραγματοποίηση του επιθυμητού αποτελέσματος. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε ένα κομμάτι χαρτί με επικάλυψη ZnS. Αυτό το υλικό χρησιμοποιείται κυρίως σε ιατρικές εφαρμογές και με την αλληλεπίδραση με ακτινοβολία ενέργειας μεγαλύτερης ή ίσης των 500 KeV έχει την ιδιότητα να φθορίζει. Με αυτόν τον τρόπο καταφέραμε να προσδιορίσουμε την δέσμη στο συγκεκριμένο πείραμα.



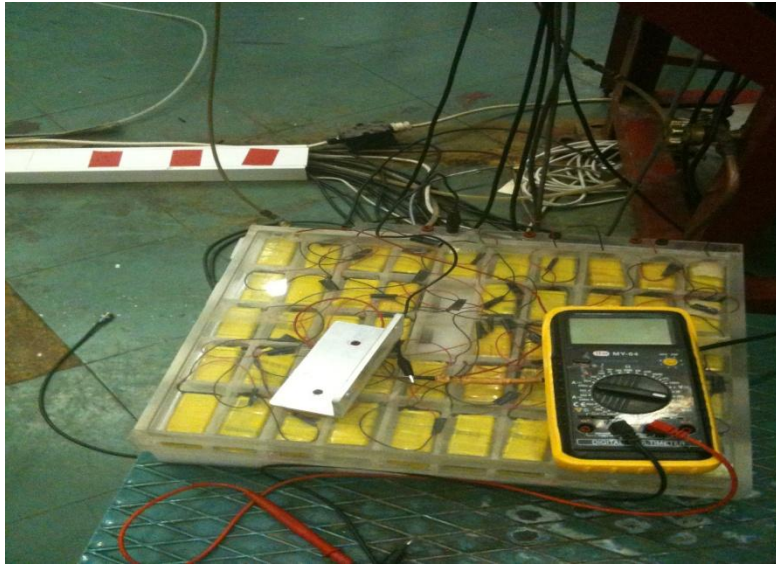
Εικόνα 7.15

Το σχήμα της δέσμης του πειράματος όπως αποτυπώθηκε στο κομμάτι ZnS που είχε τοποθετηθεί στον στόχο μέσα στον θάλαμο ακτινοβολήσης.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε ήταν η ακριβής μέτρηση του ρεύματος των πρωτονίων που έπεφτε στον στόχο (και κατά συνέπεια στα δείγματα). Το πρόβλημα εντοπίστηκε στην δημιουργία δευτερογενών ηλεκτρονίων ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης της δέσμης με τον μεταλλικό στόχο. Αυτό είχε σαν αντίκτυπο την εσφαλμένη ένδειξη ρεύματος (πιο αυξημένο από το πραγματικό). Έτσι τοποθετήθηκε μια μπαταρία μέσω της οποίας εφαρμόσαμε μια θετική τάση 60 Volts για να μπορέσουμε να «τραβήξουμε» τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια) μακριά από τον στόχο και κατά συνέπεια από τον μετρητή ρεύματος της δέσμης.



Εικόνα 7.16
Γένεση δευτερογενών ηλεκτρονίων από την δέσμη πρωτονίων.



Εικόνα 7.17
Η μπαταρία που εφαρμόστηκε στον στόχο.

Στη συνέχεια τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε μεταλλική βάση την οποία βάλαμε μέσα στον θάλαμο ακτινοβόλησης. Με την βοήθεια της κάμερας μέσα στον θάλαμο μπορέσαμε να ευθυγραμμίσουμε το spot της δέσμης με την επιθυμητή περιοχή ακτινοβόλησης στο κάθε δείγμα μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Εικόνα 7.18(α)
Τα τρία πρώτα δείγματα μαζί με το φύλλο ZnS όπως τοποθετήθηκαν στην μεταλλική βάση.



Εικόνα 7.18(β)
Το spot της δέσμης πάνω από την περιοχή προς ακτινοβόληση (εικόνα από την κάμερα μέσα στον θάλαμο).

Συνολικά ακτινοβολήθηκαν πέντε δείγματα MOS πυκνωτών με εμφυτευμένα νανοσωματίδια πλατίνας (Pt). Να σημειωθεί πως δεν ακτινοβολήσαμε πυκνωτές αναφοράς. Το κάθε δείγμα ακτινοβολήθηκε με διαφορετική δόση πρωτονίων ενέργειας 8 MeV. Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τα ονόματα των δειγμάτων και τις αντίστοιχες δόσεις ακτινοβολίας.

Ακτινοβολήση με πρωτόνια ενέργειας 8 MeV		
Πυκνωτές με NC	Δόση (p/cm²)	Ρεύμα (nA)
Part VIII-b	10 ¹¹	50
Part IX	10 ¹²	50
Part VII	3·10 ¹²	50
Part VIII-c	10 ¹³	50
Part VIII-a	10 ¹⁴	50

- ❖ **Λόγω του περιορισμένου αριθμού δειγμάτων καθώς και λόγω κάποιων τεχνικών δυσκολιών κατά τη διάρκεια της ακτινοβολητικής διαδικασίας το πείραμα δεν έδειξε σαφή συμπεράσματα και θα επαναληφθεί τον Ιανουάριο με καινούρια δείγματα.**

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ Κεφάλαιο 7

- [1] E.Verrelli, D.Tsoukalas, M.Kokkoris, R.Vlastou, P.Dimitrakis, P.Normand
“*Proton radiation effects on nanocrystal non volatile memories*”, IEEE Trans.
Nucl. Sci., Vol. 54, no.4, Aug 2007.
- [2] A.Gasperin, E.Amat, J.Martin, M.Porti, M.Nafria, Al.Paccagnella, “*Peculiar
Characteristics of nanocrystal memory cells programming window*”, J.Vac.
Sci. Technol. B27 (1) Jan/Feb 2009.
- [3] N.Wrachien, A.Cester, R.Potoghese, C.Gerardi, “*Investigation of proton and X-
Ray Irradiation Effects on Nanocrystal and Floating Gate Memory Cell Arrays*”
IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 55, no.6, Dec 2008.
- [4] N.Wrachien, A.Cester, A.Gasperin, Al.Paccagnella, C.Gerardi, V.Ankarani,
“*Ionizing Radiation And Electrical Stress on Nanocrystal memory Cell Array*”
Sci. Dir. Microel. Rel. 47 (2007) 602-605, Elsevier Ltd.
- [5] N.Wrachien, A.Cester, A.Gasperin, Al.Paccagnella, C.Gerardi, V.Ankarani,
“*Radiation induced modifications of the Electrical characteristics of Nanocrystal
Memory Cells and Arrays*” IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 53, no.6, Dec 2006.
- [6] M.Petkov, L.Douglas Bell, A H Atwater, “*High Total Dose Tolerance of
Prototype Silicon Nanocrystal Non Volatile Memory Cells*” IEEE Trans. Nucl.
Sci., Vol. 51, no.6, Dec 2004.
- [7] C.Claeys, H.Ohyama, E.Simoen, M.Nakabayashi, K.Kobayashi, “*Radiation
Damage in Flash Memory Cells*” IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 51, no.6,
Dec 2004.
- [8] G.Cellere, Al.Paccagnella, A.Visconti, M.Bonanomi, A.Candelori, S.Lora,
“*Effects of Different Total Ionizing Dose Sources on Charge Loss From
Programmed Floating Gate Cells*” IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 52, no.6,
Dec 2005.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Ακτινοβόληση NC-MOSFET με πρωτόνια 8 MeV.

8.1 Εισαγωγή

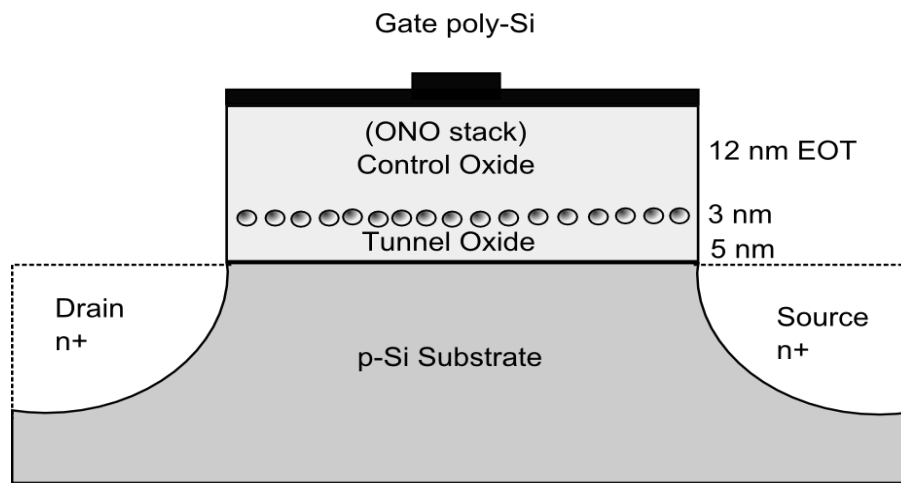
Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια ενός ερευνητικού προγράμματος που ανέλαβε ο τομέας Φυσικής του Ε.Μ.Π για την Ε.Σ.Α (European Space Agency) και έχει ως στόχο την μελέτη της συμπεριφοράς ηλεκτρονικών μνημών νανοκρυστάλλων μετά την αλληλεπίδρασή τους με φορτισμένη σωματιδιακή ακτινοβολία. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν τα προμηθευτήκαμε από την κατασκευαστική εταιρεία MICRON και ακτινοβολήθηκαν με πρωτόνια ενέργειας 8MeV σε 7 διαφορετικές δόσεις.

8.2 Τα δείγματα του πειράματος

Οι διατάξεις που μετρήθηκαν στα πλαίσια της εργασίας αυτής είναι τρανζίστορ n-MOSFET με εμφυτευμένα νανοσωματίδια πυριτίου διαμέτρου περίπου 3nm, κατανεμημένα με πυκνότητες $5 \cdot 10^{11} - 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Το κανάλι είναι τύπου p-Si με χαρακτηριστικά : $w/L = 0.08\mu\text{m} / 0.2\mu\text{m}$. Το οξείδιο σήραγγας (tunnel oxide) είναι θερμικό SiO_2 πάχους 5nm. Το οξείδιο ελέγχου (control oxide) είναι κατασκευασμένο από ONO (οξείδιο- νιτρίδιο- οξείδιο) με ισοδύναμο πάχος οξειδίου EOT = 12nm (Equivalent Oxide Thickness). Το ONO είναι σημαντικό κατασκευαστικό στοιχείο των διατάξεων όπως βλέπουμε από την σχέση:

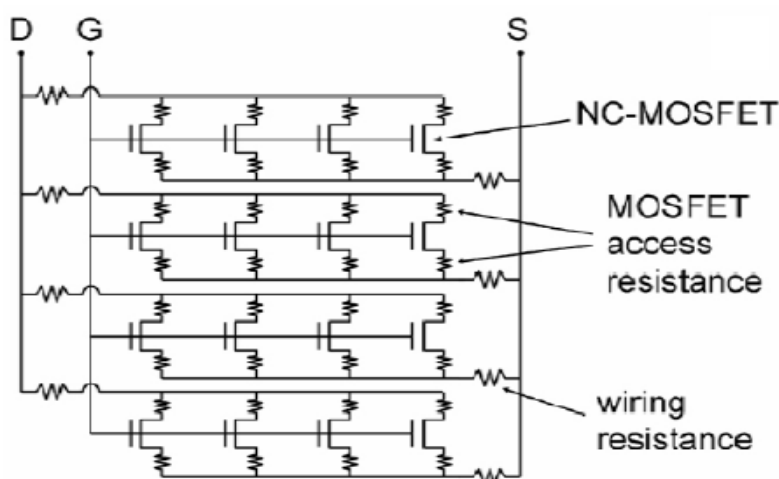
$$C = \frac{A \cdot \epsilon_{ox}}{d_{ox}} \quad (8.1)$$

Το Si_3N_4 έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά από το SiO_2 ($\epsilon_{\text{SiO}_2}=3.9$ και $\epsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4}=7.5$) με αποτέλεσμα να μπορούμε να πετύχουμε την ίδια χωρητικότητα για μικρότερα πάχη οξειδίου, άρα και μικρότερες διαστάσεις για τα τρανζίστορ.



Εικόνα 8.1.
Η δομή της μνήμης NC-MOSFET με νανοκρυστάλλους Si .

Στο πείραμα μετρήθηκαν, εκτός από διατάξεις single transistor (BL-WL), και δομές CAST (Cell Array Stress Test) οι οποίες είναι μια κατασκευή από χιλιάδες ή εκατομμύρια τρανζίστορ σε παράλληλη σύνδεση. Στην εικόνα 8.2 φαίνεται η δομή της παράλληλης σύνδεσης των τρανζίστορ μνημών όπου έχουμε κοινούς ακροδέκτες , πύλης (G), απαγωγού (D) και πηγής (S).



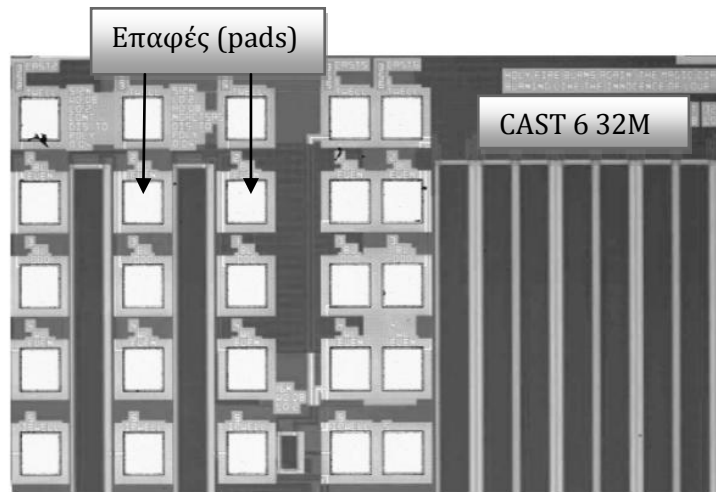
Εικόνα 8.2
Η δομή CAST μνημών NC-MOSFET συνδεδεμένων παράλληλα.

Παρακάτω παρατίθεται ένας πίνακας με τα CAST αλλά και τα single cell τρανζίστορ που μελετήθηκαν κατά την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Si NC-MOSFET, w/L=0.08/0.2		
Όνομα	Συνολικός αριθμός (1k=1024 cells)	Τύπος
BL-WL cells	24	Single cells
CAST BL-WL	512k	Common
CAST-1	2M = 2x 1M	Even / Odd Sub-casts
CAST-2, CAST-3	512k = 2x 256k	
CAST-5	16k = 2x 8k	
CAST-6	32M= 2x 16M	

Εικόνα 8.3
Τα CAST και τα single cell τρανζίστορ που μετρήθηκαν .

Στα CAST η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος καναλιού ως προς την τάση πύλης είναι η συνισταμένη της συνεισφοράς πλήθους τρανζίστορ. Πρέπει να αποσαφηνίσουμε το γεγονός πως τα τρανζίστορ σε κάθε CAST είναι χωρισμένα σε δύο υπό-ομάδες odd και even. Με αυτό τον τρόπο έχουμε την δυνατότητα να μετρήσουμε τα μισά σε αριθμό τρανζίστορ του κάθε CAST. Για παράδειγμα στο CAST1 $512k \times 4 = 2Mb$ έχουμε την δυνατότητα να προγραμματίσουμε τα ένα εκατομμύριο τρανζίστορ στην κατάσταση "1", ενώ τα υπόλοιπα ένα εκατομμύριο στην κατάσταση "0". Το ίδιο συμβαίνει και στο CAST BL-WL με την μόνη ιδιαιτερότητα πως εδώ έχουμε και την επιλογή να μετρήσουμε και να προγραμματίσουμε 24 τρανζίστορ ένα προς ένα.



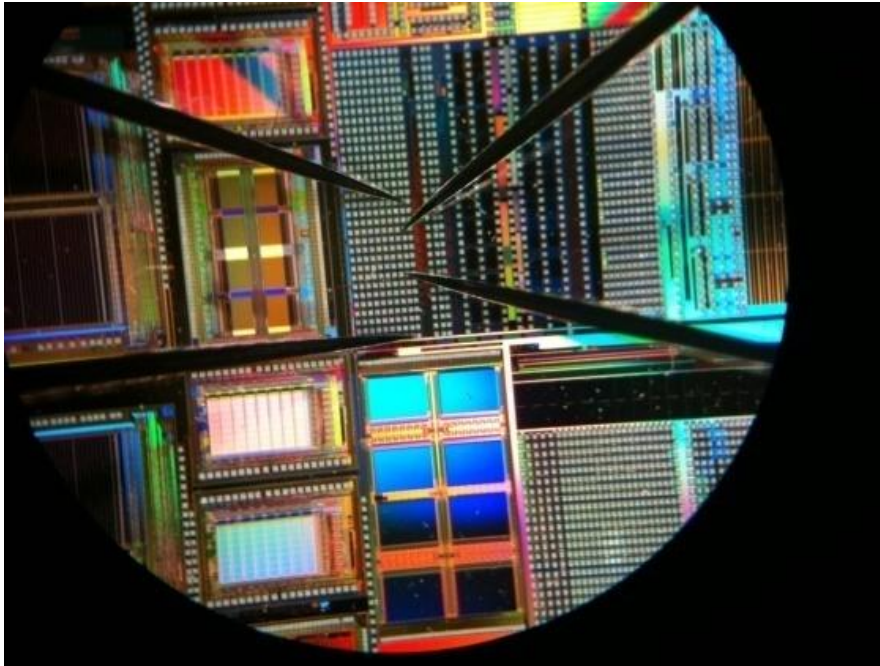
Εικόνα 8.4
Φωτογραφία μέρους των CAST ενός δείγματος. Διακρίνονται οι κάθετες μαύρες γραμμές στις οποίες βρίσκονται τα τρανζίστορ καθώς και οι επαφές για even και odd.

8.3 Συνδεσμολογία πειραματικών διατάξεων για τις ηλεκτρικές μετρήσεις.

Οι μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο ηλεκτρικού χαρακτηρισμού στο κτήριο φυσικής του Ε.Μ.Π. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε μεταλλική βάση και με βοήθεια μικροσκοπίου έγιναν οι απαραίτητες συνδέσεις ώστε να έρθουν σε επαφή οι μεταλλικές βελόνες με τους ακροδέκτες του δείγματος. Στη συνέχεια αυτή η διάταξη συνδέονταν με τα ανάλογα μετρητικά μηχανήματα.

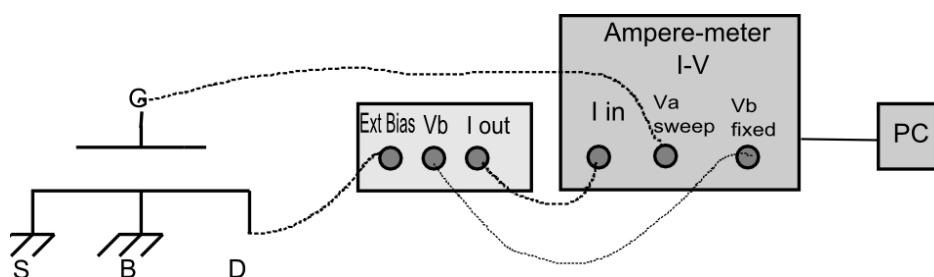


Εικόνα 8.5
Στην εικόνα διακρίνεται το μικροσκόπιο, οι μεταλλικές βελόνες καθώς και το δείγμα που είναι τοποθετημένο στην μεταλλική βάση.

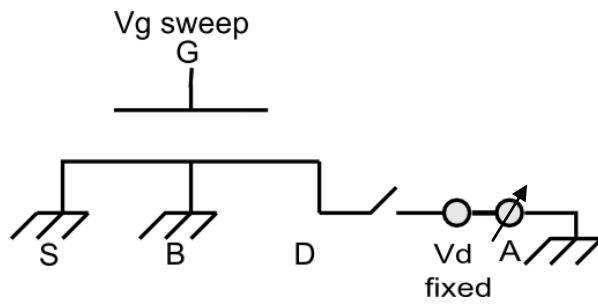


Εικόνα 8.6
Φωτογραφία ενός δείγματος και των μεταλλικών ακίδων μέσα από το μικροσκόπιο.

Για να μετρήσουμε το ρεύμα I_d του καναλιού συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης V_g στην πύλη, κρατώντας σταθερή την τάση V_d στον απαγωγό, χρησιμοποιήθηκε ένας διακόπτης που τροφοδοτεί με σταθερή τάση τον απαγωγό και παράλληλα μετράει το ρεύμα από το ίδιο σημείο (Drain), καθώς σαρώνουμε την τάση στην πύλη (Gate). Η πηγή (Source) και το υπόστρωμα (Body) είναι γειωμένα. Στην εικόνα 8.7 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία της διάταξης:

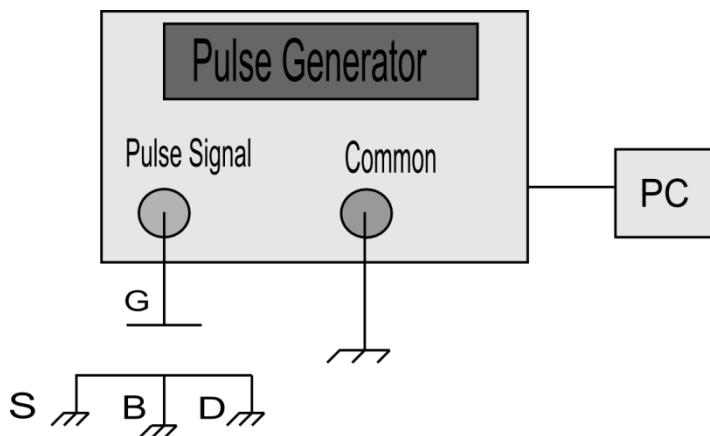


Εικόνα 8.7
Η πειραματική διάταξη για μέτρηση I_d-V_g με σταθερή τάση V_d σε MOSFET.

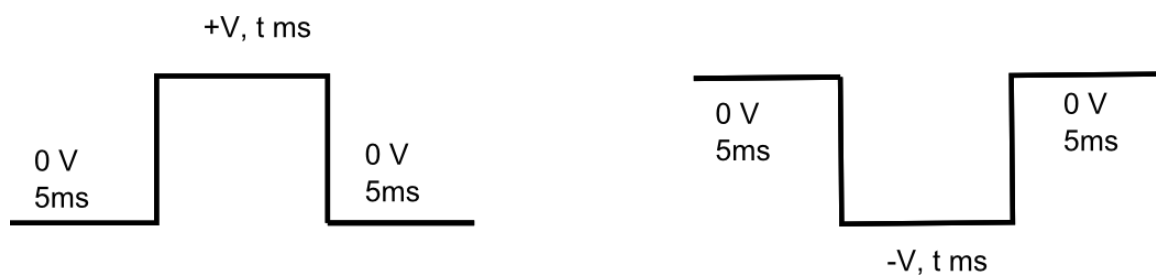


Εικόνα 8.8
Η συνδεσμολογία του κυκλώματος.

Για τον προγραμματισμό της μνήμης εφαρμόστηκαν τετραγωνικοί παλμοί, με σκοπό την θετική ή αρνητική πόλωση της πύλης και φόρτιση/αποφόρτιση των νανοσωματιδίων. Η παλμογεννήτρια χρησιμοποιήθηκε σύμφωνα με την παρακάτω συνδεσμολογία:



Εικόνα 8.9
Η πειραματική διάταξη για την εφαρμογή παλμού.



Εικόνα 8.10
Οι τετραγωνικοί παλμοί εγγραφής/διαγραφής Write και Erase.

8.4 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός πριν την ακτινοβόληση.

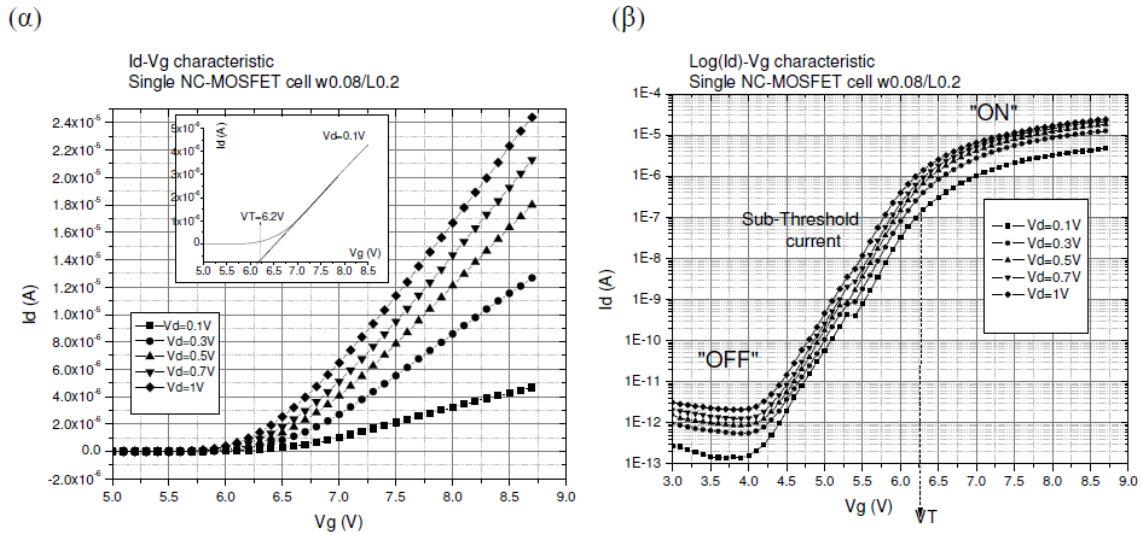
8.4.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης.

Αρχικά έπρεπε να ελέγξουμε το κατά πόσο οι διατάξεις που μας έχουν δοθεί παρουσιάζουν πράγματι χαρακτηριστικά τρανζίστορ. Γι' αυτό το λόγο μελετήθηκαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης για αφόρτιστο μονό MOSFET και για το Cast1 στο οποίο έχουμε την δυνατότητα να μετρήσουμε 1M κελιά.

Στην εικόνα 8.11(α) και (β) παρουσιάζεται η χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος καναλιού I_d – τάσης πύλης V_g για το μονό τρανζίστορ, για διαφορετικές τάσεις καναλιού V_d . Η τάση κατωφλίου $V_{Threshold}$ πριν από την οποία το τρανζίστορ είναι στην κατάσταση OFF αφού δεν άγει ρεύμα, ενώ στην συνέχεια άγει (κατάσταση ON) μπορεί να προσδιοριστεί περίπου στα 6.2 Volts. Μπορούμε να διακρίνουμε τις τρεις περιοχές λειτουργίας :

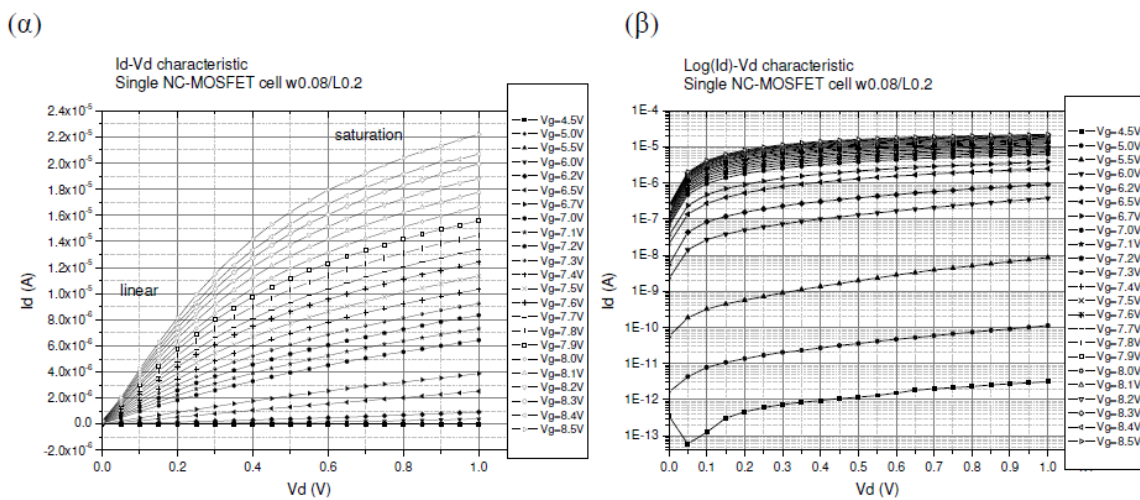
- Για τάση πύλης V_g μέχρι τα 4 Volts βρισκόμαστε στο επίπεδο του θορύβου του μετρητικού μας συστήματος.
- Από 4-6.2 Volts διακρίνουμε την καμπύλη υποκατωφλιακού ρεύματος (sub-threshold current).
- Πάνω από 6.2 Volts εντοπίζουμε την γραμμική περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ (linear current).

Τέλος βλέπουμε την αναμενόμενη συμπεριφορά για ολοένα αυξανόμενη τάση καναλιού V_d καθώς και τον κορεσμό του ρεύματος I_d .



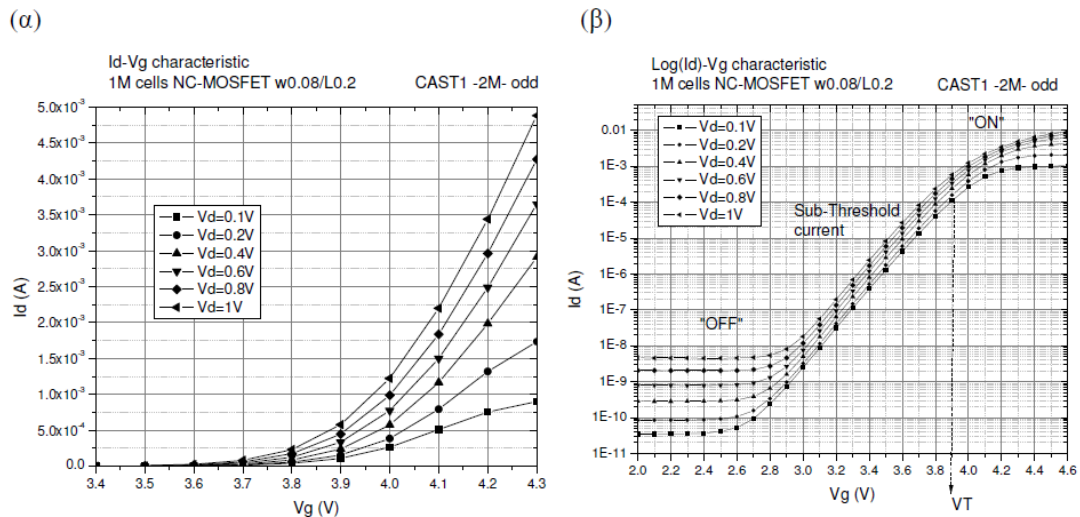
Εικόνα 8.11
 Η χαρακτηριστική καμπύλη I_d - V_g , για διαφορετικές τάσεις V_d , σε αφόρτιστο μονό NC-MOSFET.
 (α) Γραμμική κλίμακα.
 (β) Ημιλογαριθμική κλίμακα.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι μετρήσεις για τις χαρακτηριστικές ρεύματος καναλιού I_d – τάσης καναλιού V_d για διάφορες τάσεις πύλης. Επιλέχτηκαν τιμές της V_g πριν και μετά την τάση κατωφλίου V_T . Μπορούμε να διακρίνουμε την περιοχή γραμμικής αύξησης του ρεύματος καθώς και την περιοχή κορεσμού του ρεύματος (saturation) με την αύξηση της V_d . Φαίνεται επίσης πως για κάθε τιμή V_d , για V_g γύρω στα 6 με 6.5 Volts και πάνω, το κανάλι αρχίζει και άγει ρεύμα πράγμα που επαληθεύει την προηγούμενη εκτίμησή μας για την λειτουργία του τρανζίστορ.



Εικόνα 8.12
 Η χαρακτηριστική καμπύλη I_d - V_d , για διαφορετικές τάσεις V_g , σε αφόρτιστο μονό NC-MOSFET.
 (α) Γραμμική κλίμακα.
 (β) Ημιλογαριθμική κλίμακα.

Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και για την διαπίστωση της ορθής λειτουργίας τρανζίστορ για το Cast1 όπου μετράμε ένα εκατομμύριο κελιά μαζί. Οι καμπύλες ρεύματος-τάσης I_d-V_g που προκύπτουν είναι το αποτέλεσμα της συνεισφοράς των ενός εκατομμυρίου τρανζίστορ και ο λόγος για το αυξημένο ρεύμα (τόσο στην περιοχή μετά την τάση κατωφλίου, όσο και πριν) σε σχέση με τα προηγούμενα αποτελέσματα. Επίσης παρατηρούμε την διαφορετική τιμή της τάσης κατωφλίου V_T η οποία εκτιμάται γύρω στα 3.9 Volts.

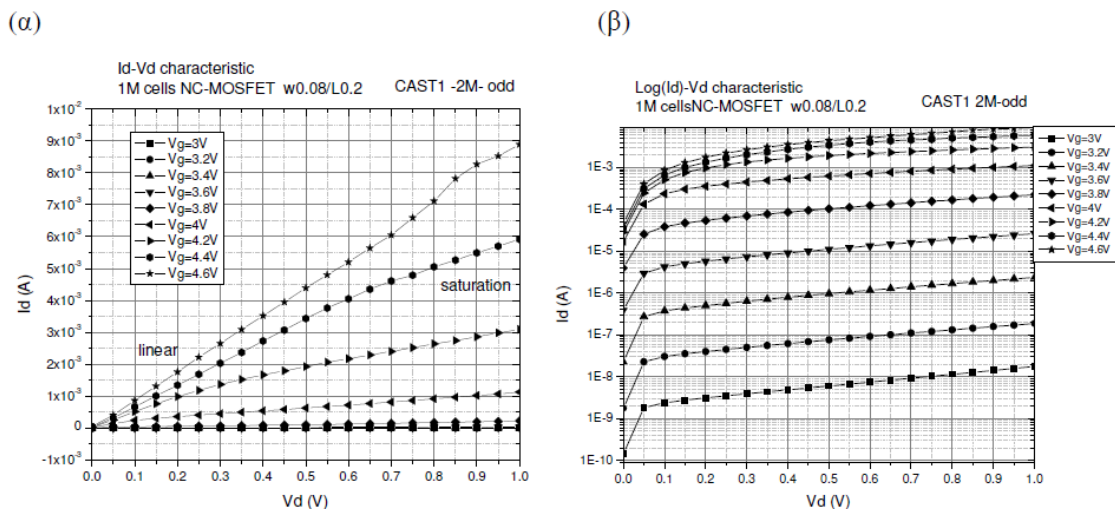


Εικόνα 8.13

Η χαρακτηριστική καμπύλη I_d-V_g , για διαφορετικές τάσεις V_d , σε αφόρτιστο Cast1, 1M κελιών.

(α) Γραμμική κλίμακα. (β) Ημιλογαριθμική κλίμακα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες I_d-V_d του Cast1 για διάφορες τιμές της τάσης πύλης V_g πριν και μετά την τάση κατωφλίου.



Εικόνα 8.13

Η χαρακτηριστική καμπύλη I_d-V_d , για διαφορετικές τάσεις V_g , σε αφόρτιστο Cast1, 1M κελιών.

(α) Γραμμική κλίμακα. (β) Ημιλογαριθμική κλίμακα.

8.4.2 Μελέτη του παραθύρου μνήμης των τρανζίστορ

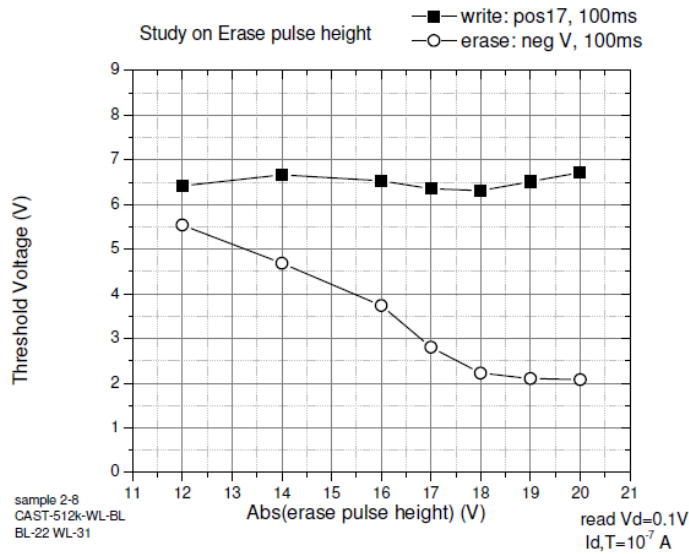
Με σκοπό να μελετήσουμε την συμπεριφορά των τρανζίστορ ως μνήμες, ακολουθήθηκε μια διαδικασία κατά την οποία επιλέγηκαν οι βέλτιστοι παλμοί για τον προγραμματισμό των μνημών. Με τον όρο βέλτιστους παλμούς εννοούμε τους παλμούς εκείνους (εγγραφής/διαγραφής), με τους οποίους έχουμε το μέγιστο παράθυρο για όσο το δυνατόν χαμηλότερες τιμές στο ύψος και την διάρκειά τους.

Οι επόμενες μετρήσεις έγιναν σε δείγμα από το κέντρο του μισού wafer που μας είχε παραχωρηθεί. Να σημειωθεί πως οι συγκεκριμένες μετρήσεις καθώς και αυτές του υποκεφαλαίου 8.4.1 έγιναν κατά την διάρκεια διεξαγωγής της διπλωματικής του συναδέλφου Αράπη Παναγιώτη.

Το παράθυρο μνήμης, η διαφορά δηλαδή ΔV_T , είναι η σχετική μετατόπιση της καμπύλης I_d-V_g ανάμεσα στις δύο καταστάσεις "0" και "1" και θα το ορίσουμε για τα single cell transistors σε ρεύμα $I = 10^{-7}$ A και για τα Cast σε $I = 10^{-4}$ A.

A) Μελέτη του παραθύρου μνήμης αλλάζοντας το ύψος του αρνητικού παλμού Erase

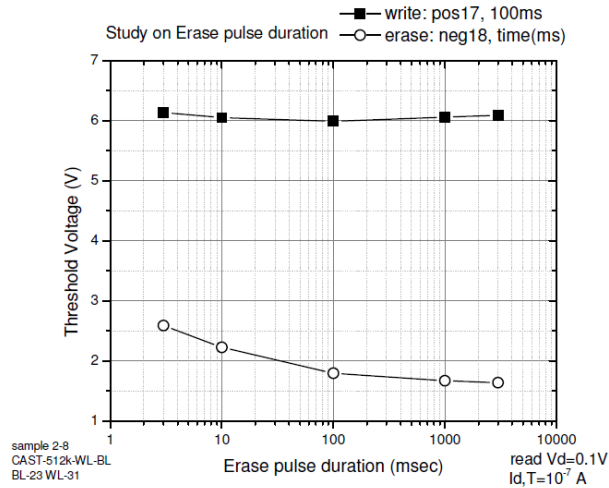
Για να μελετήσουμε την εξάρτηση του παραθύρου μνήμης από την τάση διαγραφής (το ύψος του παλμού Erase) με σταθερή διάρκεια, εφαρμόστηκαν διαδοχικοί παλμοί με σταθερό παλμό εγγραφής (Write: +17 Volts, 100ms), ενώ Erase (-V, 100ms). Στην εικόνα 8.14 παρατηρούμε την αύξηση του memory window καθώς αυξάνεται το ύψος του αρνητικού παλμού Erase από -12Volts έως τα -20 Volts. Είναι φανερό πως μετά τα -18V επέρχεται κορεσμός του παραθύρου χωρίς να έχουμε κάποια σημαντική αύξηση σε αυτό. Έτσι επιλέγηκαν ως κατάλληλη τάση για τον αρνητικό παλμό τα -18 Volts.



Εικόνα 8.14
Μελέτη του παραθύρου μνήμης μεταβάλλοντας το ύψος του αρνητικού παλμού Erase.

B) Μελέτη του παραθύρου μνήμης αλλάζοντας τη διάρκεια του παλμού Erase

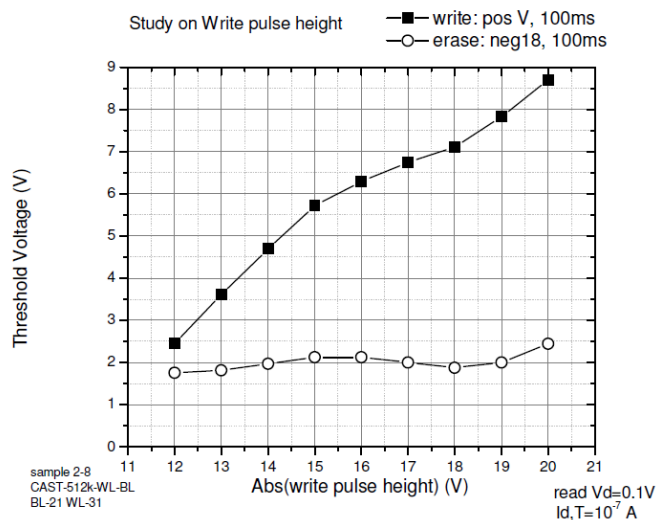
Βάσει της προηγούμενης διεργασίας καταλήξαμε για το ύψος του παλμού στα -18V. Αντίστοιχη διαδικασία πραγματοποιήθηκε για την επιλογή της διάρκειας του παλμού διαγραφής Erase. Εφαρμόσαμε σε άλλο τρανζίστορ του ίδιου δείγματος διαδοχικούς παλμούς εγγραφής (Write: +17Volts, 100ms) και διαγραφής (Erase: -18Volts, t ms). Παρατηρούμε πως μετά τα 1000ms έχουμε κορεσμό στο παράθυρο μνήμης. Επιλέγουμε για διάρκεια του παλμού τα 100ms αφού χρόνοι μεγαλύτεροι από τον επιλεγμένο θεωρούνται απαγορευτικοί για την γρήγορη λειτουργία των τρανζίστορ. Για γρηγορότερη λειτουργία θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε και τα 10ms, αφού δίνει ένα παράθυρο περίπου 0.5V μικρότερο εξίσου ικανοποιητικό.



Εικόνα 8.15
Μελέτη του παραθύρου μνήμης μεταβάλλοντας τη διάρκεια του αρνητικού παλμού Erase.

Γ) Μελέτη του παραθύρου μνήμης αλλάζοντας το ύψος του θετικού παλμού Write.

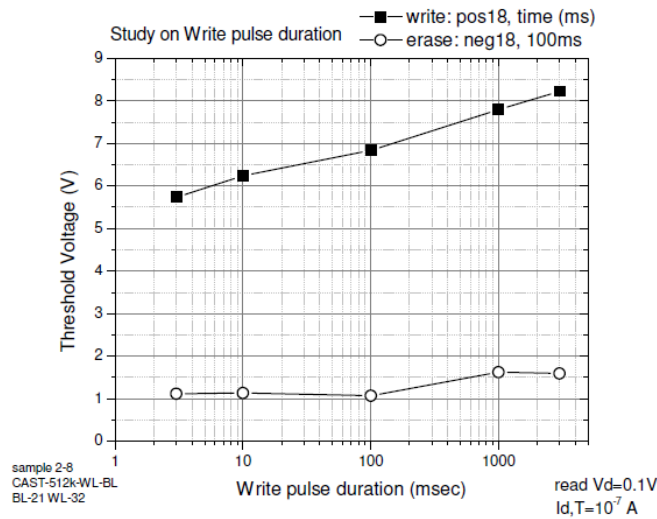
Έχοντας καταλήξει στον αρνητικό παλμό διαγραφής (Erase: -18V, 100ms), εφαρμόζουμε θετικούς παλμούς (Write: +V, 100ms) διαφορετικού ύψους και σταθερής διάρκειας. Βλέπουμε στο γράφημα πως εφαρμόστηκαν θετικοί παλμοί από +12V έως +20V και μια αυξητική τάση στο παράθυρο μνήμης. Για την επιλογή του βέλτιστου ύψους του παλμού πρέπει να έχουμε υπ' όψιν πως μετά τα +19V εισερχόμαστε σε μια επικίνδυνη περιοχή κατάρρευσης του διηλεκτρικού και γι' αυτόν τον λόγο επιλέγουμε την ασφαλή τιμή των +18V για το ύψος του παλμού εγγραφής.



Εικόνα 8.15
Μελέτη του παραθύρου μνήμης μεταβάλλοντας το ύψος του θετικού παλμού Write.

Δ) Μελέτη του παραθύρου μνήμης αλλάζοντας τη διάρκεια του θετικού παλμού Write.

Ανάλογα έχοντας επιλέξει το ύψος παλμού εγγραφής στα +18Volts εργαστήκαμε με τον ίδιο τρόπο για να εκτιμήσουμε την διάρκειά του. Φαίνεται, όπως και προηγουμένως για τον αρνητικό παλμό διαγραφής, πως η καλύτερη διάρκεια παλμού εκτιμάται στα 100ms.



Εικόνα 8.16

Μελέτη του παραθύρου μνήμης μεταβάλλοντας τη διάρκεια του θετικού παλμού Write.

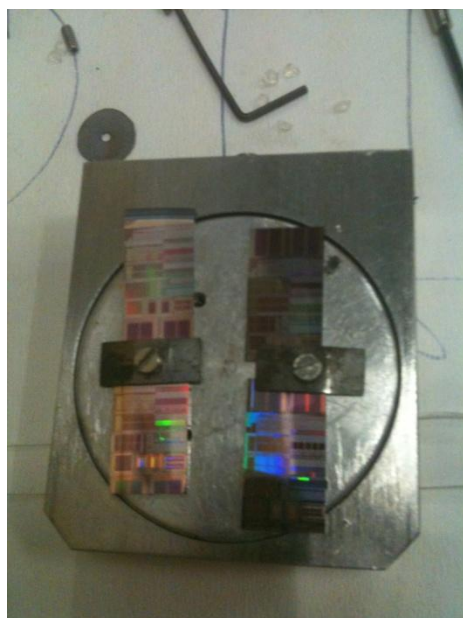
8.5 Ακτινοβόληση δειγμάτων.

Η ακτινοβόληση έγινε με δέσμη πρωτονίων (^1H beam) ενέργειας 8 MeV στον επιταχυντή σωματιδίων τύπου TANDEM στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ.

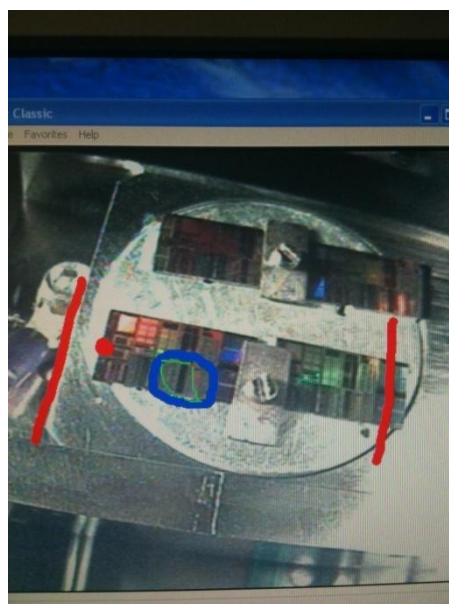
Χρησιμοποιήθηκαν 7 δείγματα από το ίδιο wafer (quarter wafer 22) καθένα από τα οποία ακτινοβολήθηκε με διαφορετική δόση. Τα δείγματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τα: PI-S20, PI-S12, PI-S6, PI-15, PI-35, PI-43, PI-S4.

Η διαδικασία κατασκευής του μεγέθους της δέσμης καθώς και η ευθυγράμμιση της με τις περιοχές που επιθυμούσαμε να ακτινοβολήσουμε περιγράφεται στο κεφάλαιο 7.5 αναλυτικά.

Πριν την ακτινοβόληση τα δείγματα στηρίχτηκαν σε μεταλλική βάση και τοποθετήθηκαν σε θάλαμο υψηλού κενού. Από εκεί, αφού προηγουμένως είχε προσδιοριστεί το μέγεθος και το σχήμα της δέσμης, μέσω της κάμερας που είχε τοποθετηθεί στον θάλαμο ευθυγραμμίσαμε τις περιοχές προς ακτινοβόληση μέσω συστήματος συντεταγμένων που δίνονταν από H/Y.



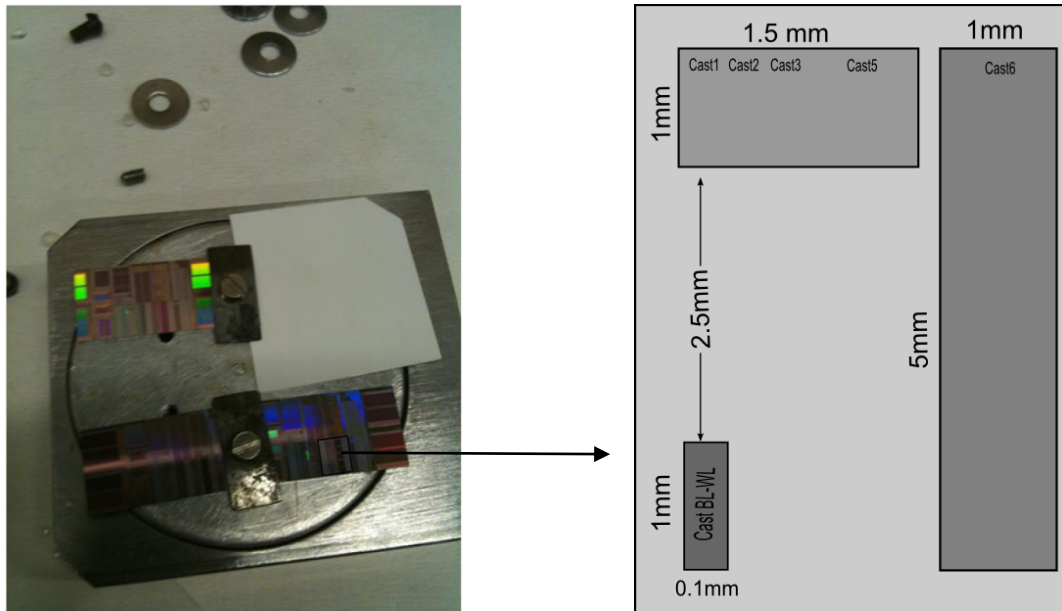
Εικόνα 8.17
4 από τα δείγματα τοποθετημένα πάνω στον μεταλλικό στόχο.



Εικόνα 8.18
Το σχήμα του beam spot (στο κέντρο έχουμε σχεδιάσει την «καρδιά» της δέσμης και εξωτερικά το halo) πάνω από την επιθυμητή περιοχή.

Οι περιοχές των δειγμάτων που ακτινοβολήθηκαν είναι:

Cast1- 2M, Cast2- 512k, Cast3- 512k, Cast5- 16k, Cast6- 32M, Cast BL-WL (common-512K and single cell transistors).



Εικόνα 8.19

Τα δείγματα PI στον στόχο και η σχηματική απεικόνιση των περιοχών που ακτινοβολήθηκαν πάνω σε κάθε δείγμα.

Αρχικά μας δόθηκε το ρεύμα πρόσπτωσης των πρωτονίων το οποίο φροντίσαμε να μείνει σταθερό καθ' όλη την διάρκεια της ακτινοβολήσης και ίσο με $I = 500\text{pA}$. Επιλέγηκε αυτό το ρεύμα, ώστε για την συγκεκριμένη επιφάνεια πρόσπτωσης, να έχουμε εύλογους χρόνους ακτινοβολήσης της τάξεως των δευτερολέπτων έως λεπτών. Από το ρεύμα που μας δόθηκε μπορέσαμε να υπολογίσουμε την επιφανειακή ροή των σωματιδίων (flux):

$$\text{Flux} = \frac{5 \cdot 10^{-10} \text{ A}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb} \cdot 0.2 \text{ cm}^2} = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ p/cm}^2 \cdot \text{sec}$$

Στη συνέχεια έχοντας υπολογίσει το flux μπορούμε να υπολογίσουμε προσεγγιστικά τον απαιτούμενο χρόνο ακτινοβολήσης.

Γνωρίζοντας βέβαια το ποσό του προσπίπτοντος φορτίου ανά 100 παλμούς σωματιδίων, αριθμός που μας δόθηκε από τους χειριστές του επιταχυντή, μπορέσαμε να υπολογίσουμε το συνολικό αριθμό παλμών ώστε να πετύχουμε την επιθυμητή δόση σε κάθε δείγμα.

Ακτινοβόληση πρωτονίων Ενέργειας 8MEV		
Proton current = 500pA Beam Spot Area = 0.2 cm ⁻² Flux = 1.5 10 ¹⁰ p/cm ² sec		
Δείγματα	Δόση (p/cm ²)	Διάρκεια (sec)
PI-S20	10 ¹⁴	6400
PI-S12	3 10 ¹³	1920
PI-S6	10 ¹³	640
PI-15	3 10 ¹²	192
PI-35	10 ¹²	64
PI-43	3 10 ¹¹	19
PI-S4	10 ¹¹	6

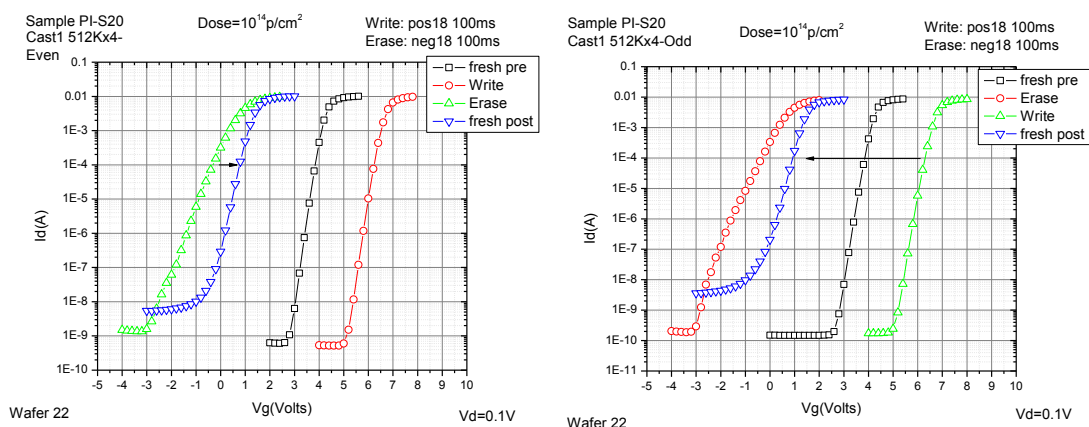
Εικόνα 8.20
Τα δείγματα ακτινοβολήθηκαν σε διαφορετικές δόσεις.

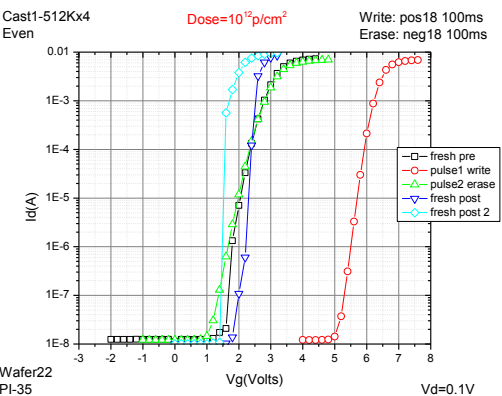
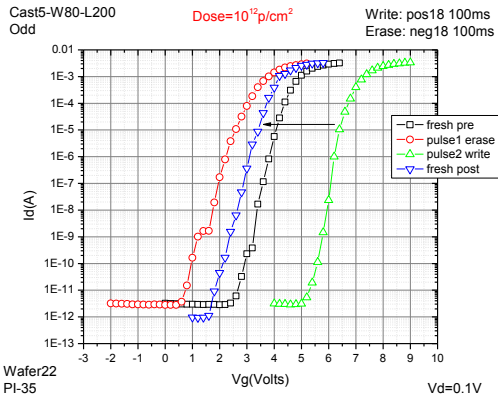
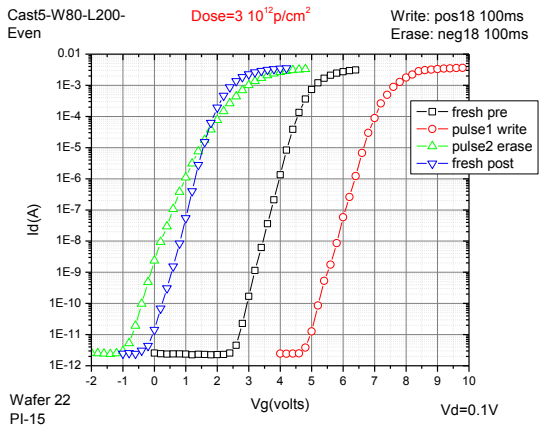
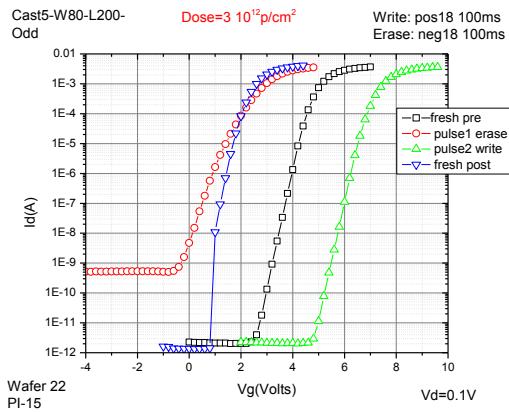
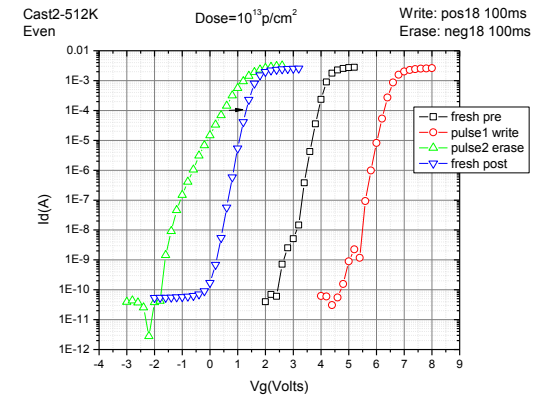
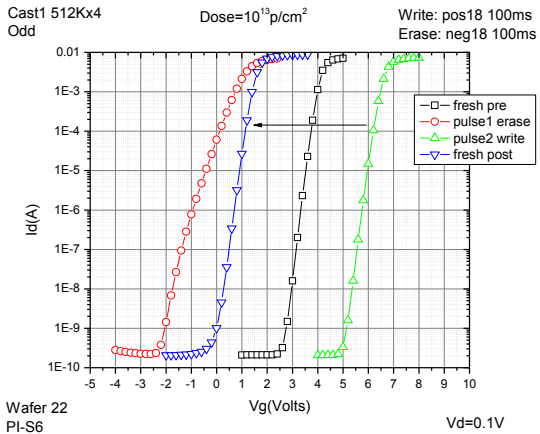
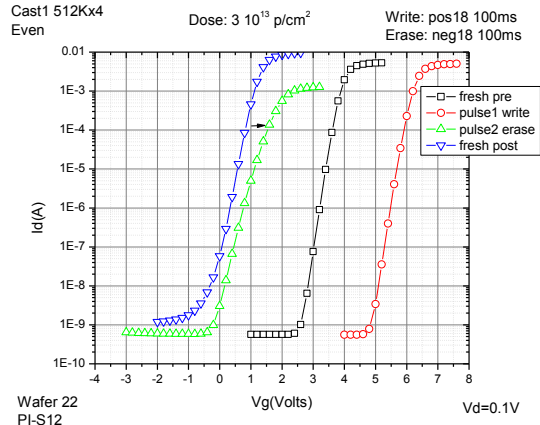
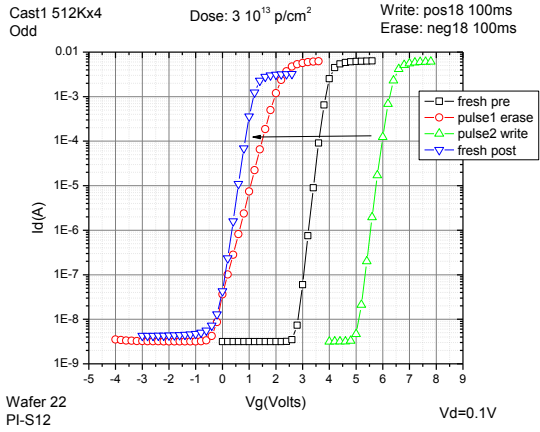
8.6 Επίδραση της ακτινοβολίας σε προγραμματισμένα Cast.

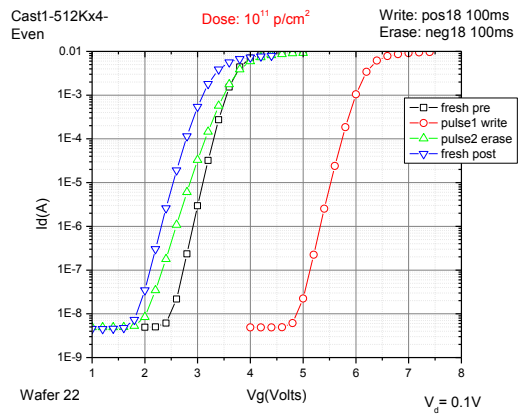
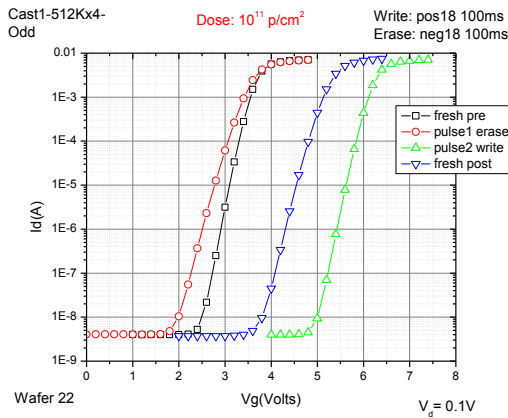
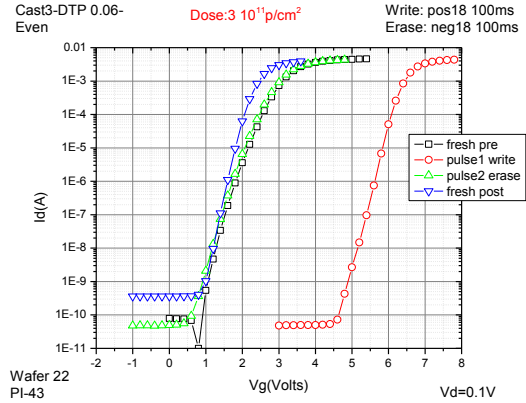
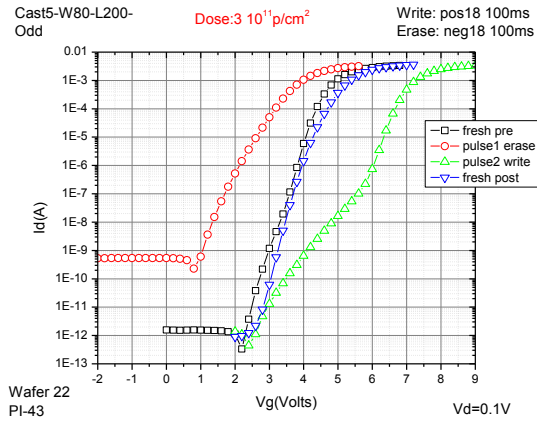
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες (για το Cast1 Odd & Even) πριν και μετά την ακτινοβολία των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν. Δυστυχώς λόγω του τεταρτοκυκλικού σχήματος της κηλίδας της δέσμης δεν καταφέραμε να ακτινοβολήσουμε τα BL-WL τρανζίστορ που βρίσκονται κάτω αριστερά της περιοχής που μας ενδιαφέρει όπως φαίνεται στην εικόνα 8.19. Γι' αυτό το λόγο ασχοληθήκαμε μόνο με τα Cast στο κομμάτι της ανάλυσης των δεδομένων.

Τα μισά τρανζίστορ από κάθε Cast (Odd) προγραμματίστηκαν στην κατάσταση Write (+18V, 100ms) «1», ενώ τα άλλα μισά (Even) στην κατάσταση Erase (-18V, 100ms) «0».

Παρατηρούμε πώς τα Cast τα οποία αρχικά είχαν προγραμματιστεί στην κατάσταση «1» (Write) έχουν μετατοπιστεί στην κατάσταση «0» (Erase), παρουσιάζεται δηλαδή το φαινόμενο του bit flit, αλλαγή δηλαδή της κατάστασης που βρισκόταν το τρανζίστορ πριν την ακτινοβολία. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται ακόμα και για την χαμηλότερη δόση 10^{11} p/cm². Αντίθετα τα τρανζίστορ που είχαν αρχικά προγραμματιστεί στην κατάσταση «0» (Erase) παρουσίασαν μια ελάχιστη έως μηδενική μετατόπιση της τάξεως των 0 – 0.5 Volts.



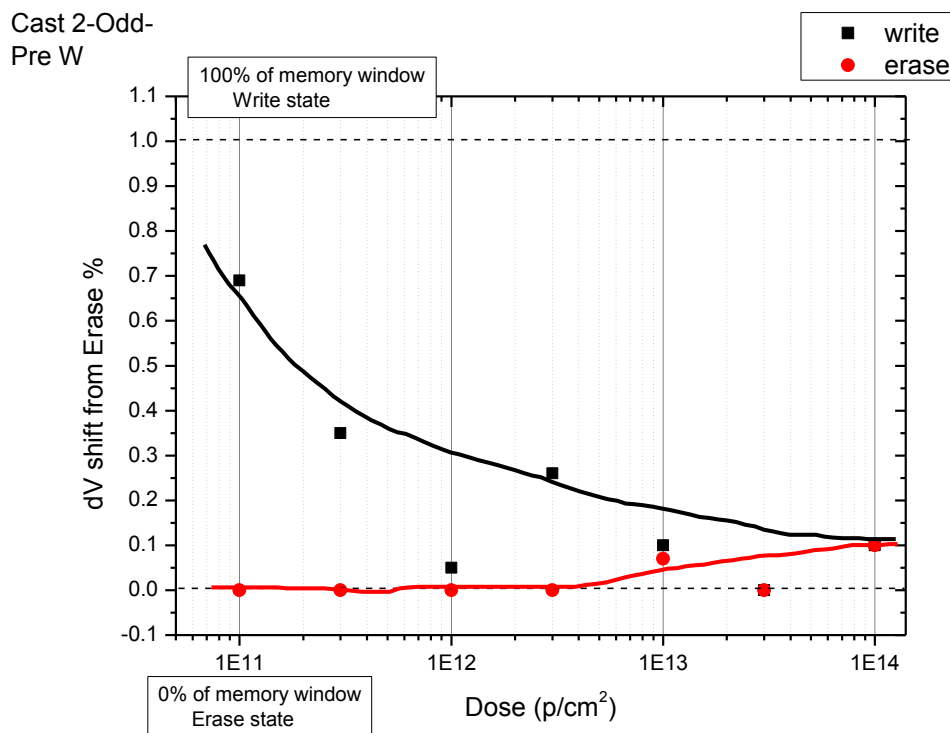




8.6.1 Επίδραση της ακτινοβολίας στην μετατόπιση της τάσης κατωφλίου V_{Th} .

Στα πλαίσια της ανάλυσης των αποτελεσμάτων ασχοληθήκαμε με την εξάρτηση της μετατόπισης της τάσης κατωφλίου V_{Th} στις χαρακτηριστικές καμπύλες $I_d - V_g$ σε σχέση με την δόση ακτινοβολίας στην οποία εκτέθηκε το κάθε δείγμα. Λάβαμε υπ' όψιν και τις δύο καταστάσεις Write, Erase. Οι περιοχές με τις οποίες ασχοληθήκαμε είναι το: *Cast1 Odd & Even*, *Cast2 Odd & Even*, *Cast5 odd & Even*. Στην εικόνα 8.22 παρουσιάζονται ενδεικτικά τα αποτελέσματα για το *Cast2 Odd & Even*. Στο διάγραμμα αναπαρίσταται το ποσοστό της μετατόπισης της κάθε κατάστασης (Write/Erase) σε σχέση με το αρχικό παράθυρο μνήμης, για την εκάστοτε δόση. Είναι εμφανής η εξάρτηση του ΔV_T σε σχέση με τη δόση.

Παρατηρούμε πως για μεγαλύτερες τιμές στην δόση ακτινοβολίας έχουμε και μεγαλύτερη μετατόπιση της τάσης κατωφλίου τόσο για το Write όσο και για το Erase και το αντίθετο ισχύει για χαμηλότερες τιμές ακτινοβολίας όπου παρουσιάζονται μικρότερες μετατοπίσεις. Επίσης είναι εμφανές πως για την κατάσταση εγγραφής οι μετατοπίσεις είναι αρκετά μεγάλες σε αντίθεση με αυτές που παρουσιάζονται για την κατάσταση διαγραφής.



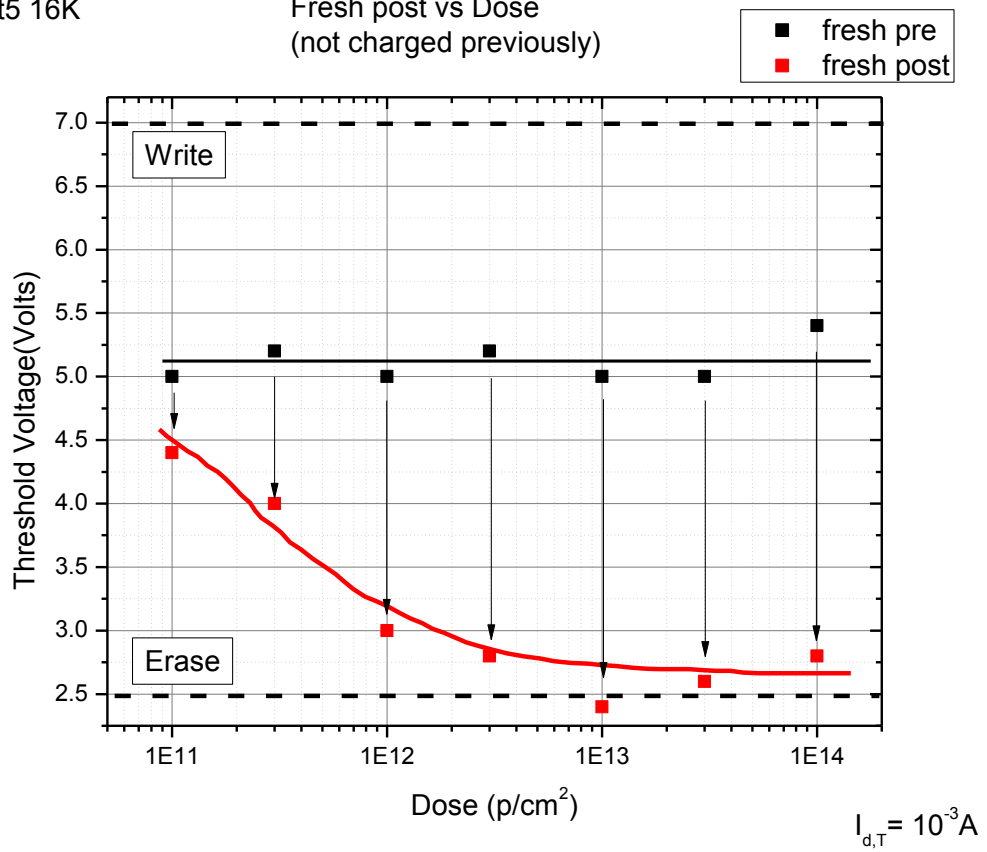
Εικόνα 8.22

Η ποσοστιαία μετατόπιση του V_T σε σχέση με το αρχικό παράθυρο μνήμης για τις καταστάσεις Write/Erase για τις διαφορετικές τιμές δόσεων ακτινοβολίας.

Τέλος ελέγξαμε και την μετατόπιση της τάσης κατωφλίου V_T ενός αφορτιστου Cast πριν και μετά την ακτινοβόληση σε σχέση με τη δόση. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στην εικόνα 8.23. Παρατηρούμε παρόμοια συμπεριφορά με αυτή ενός φορτισμένου Cast αφού για τις υψηλότερες δόσεις παρουσιάζεται μεγαλύτερη μετατόπιση της τάσης κατωφλίου

Cast5 16K

Fresh post vs Dose
(not charged previously)

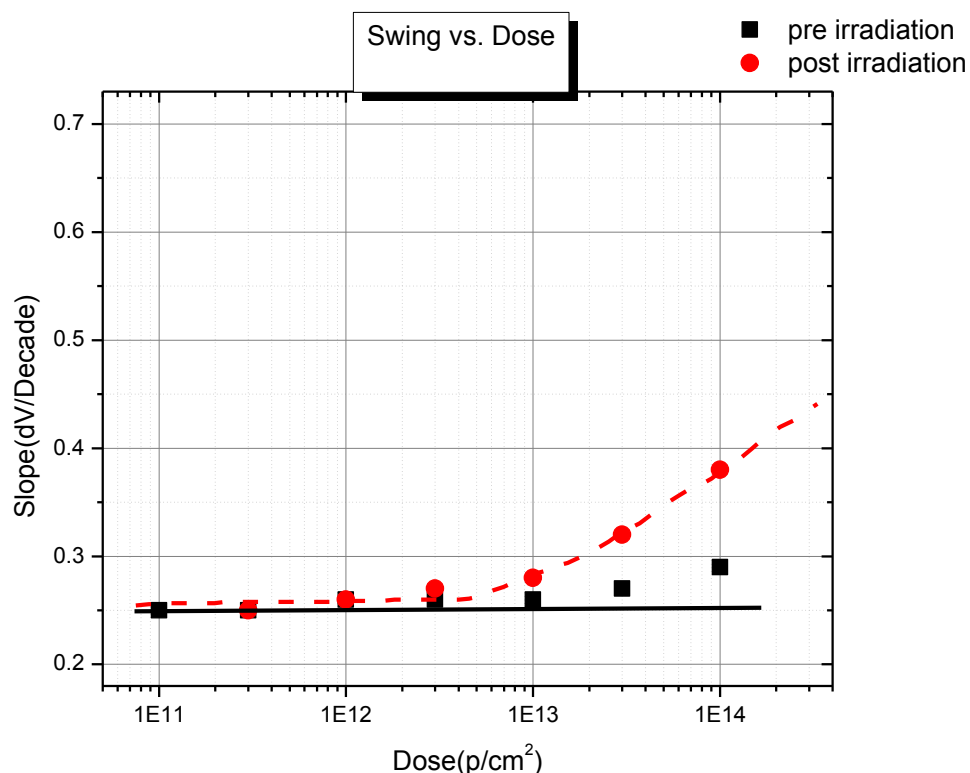


Εικόνα 8.23

Η μετατόπιση του V_T για αρχικά αφόρτιστο Cast σε σχέση με τη δόση.

8.6.2 Εξάρτηση της κλίσης της χαρακτηριστικής I_d-V_g σε σχέση με την δόση.

Για κάθε ένα από τα επτά δείγματα, δηλαδή και για τις επτά διαφορετικές δόσεις, μετρήθηκε η κλίση (dV/decade) της καμπύλης fresh μετά την ακτινοβόληση. Στην εικόνα 8.24 παρουσιάζεται η κλίση της χαρακτηριστικής καμπύλης $I_d - V_g$ για κάθε δείγμα πριν από την ακτινοβόληση, η οποία είναι πρακτικά αμετάβλητη, καθώς και μετά την ακτινοβόληση. Όπως βλέπουμε η κλίση παρουσιάζει μια αυξητική τάση για τις όλο και αυξανόμενες τιμές της ακτινοβολίας. Αυτό το αποτέλεσμα ήταν αναμενόμενο αφού το swing σχετίζεται άμεσα με την πυκνότητα διεπιφανειακών καταστάσεων (density of interface states) η οποία αυξάνεται με την αύξηση της δόσης της ακτινοβόλησης. [Emanuele Verrelli and Dimitris Tsoukalas (2011). Radiation Hardness of Flash and Nanoparticle Memories, Flash Memories, Igor Stievano (Ed.)]



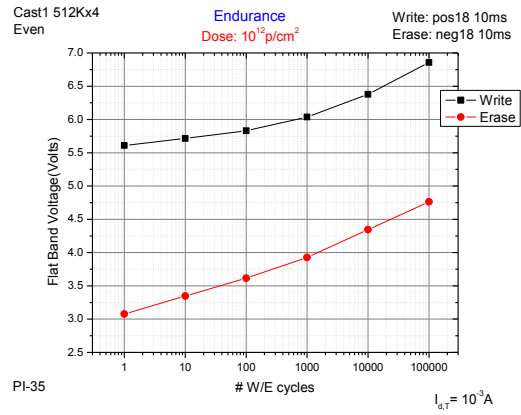
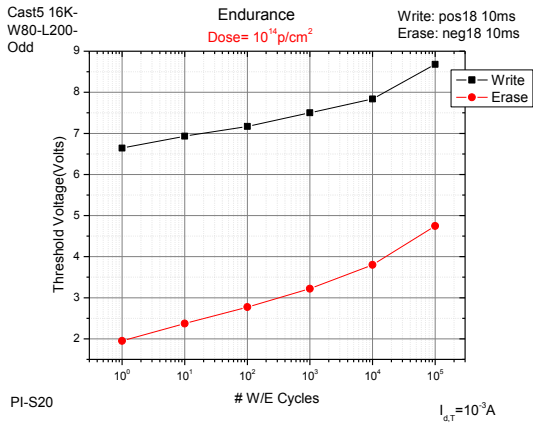
Εικόνα 8.24
Η εξάρτηση της κλίσης (slope) σε σχέση με την δόση ακτινοβολίας.

8.7 Αντοχή (Endurance) των Cast κατά τον επαναπρογραμματισμό της μνήμης.

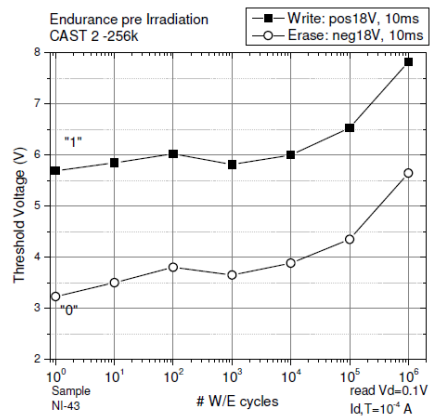
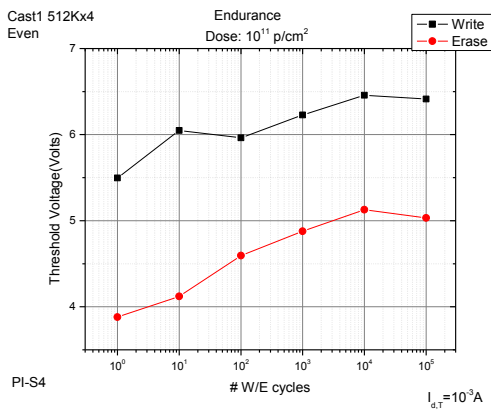
Μετράμε την αντοχή των μνημών κατά τον επαναπρογραμματισμό τους μετά από έως και 10^5 κύκλους εγγραφής/διαγραφής σε ακτινοβολημένα δείγματα. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα (εικόνες 8.25, 8.26) που αφορούν την υψηλότερη δόση 10^{14} p/cm² και μια από τις χαμηλότερες 10^{12} p/cm² καθώς και αποτελέσματα για μη ακτινοβολημένα δείγματα. Οι παλμοί που χρησιμοποιήθηκαν είναι μικρότερης διάρκειας:

Write: +18V, 10ms και Erase: -18V, 10ms.

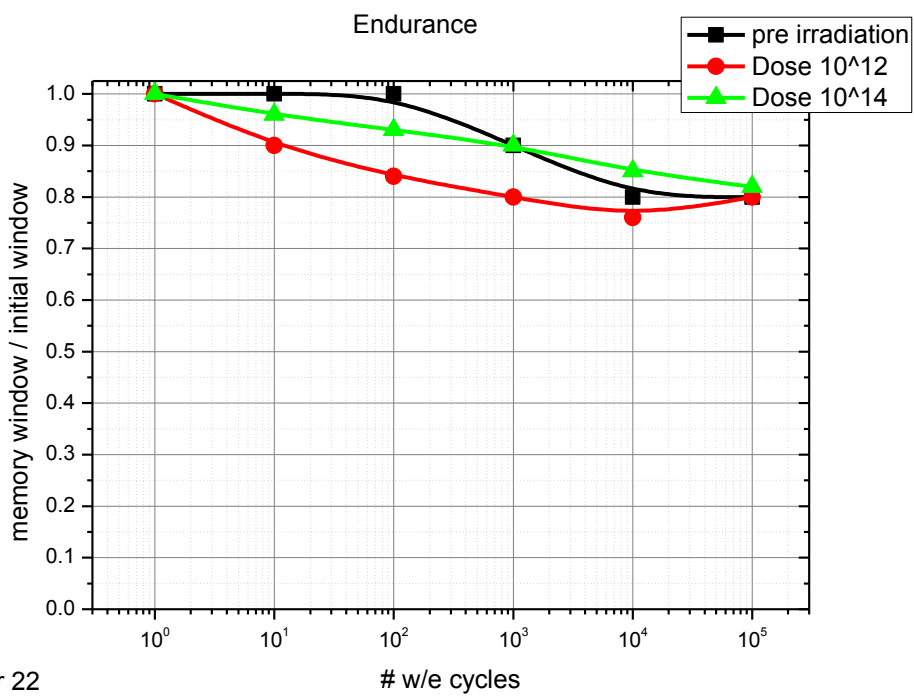
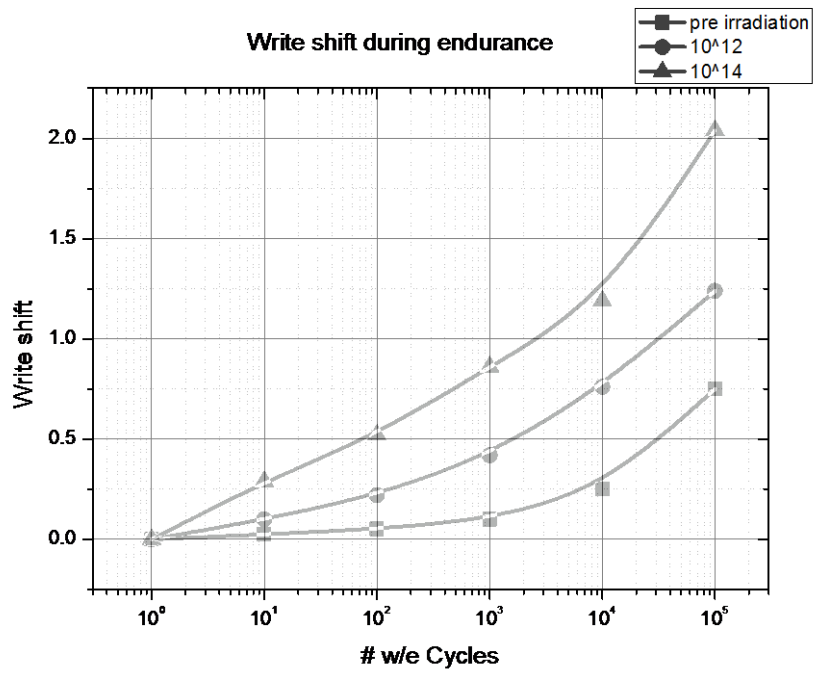
Για τις δυο δόσεις (καθώς και για όλες τις ενδιάμεσες) παρατηρούμε μια παρόμοια συμπεριφορά με αυτή του μη ακτινοβολημένου δείγματος. Βλέπουμε πως το αρχικό παράθυρο διατηρείται και στις τρεις περιπτώσεις κατά την διάρκεια των κύκλων εγγραφής/διαγραφής, με ταυτόχρονη αύξηση της V_T τόσο για την κατάσταση «1» όσο και για τη «0». Είναι φανερό επίσης πως έχουμε μια μείωση του παραθύρου μνήμης σε σχέση με το αρχικό, όπως φαίνεται στην εικόνα 8.27 (κάτω) η οποία μπορεί να θεωρηθεί ελάχιστη. Η αύξηση της τάσης κατωφλίου και στις δύο καταστάσεις οφείλεται στη δημιουργία επιπλέον παγίδων λόγω της ηλεκτρικής καταπόνησης τόσο στο στρώμα του ONO, όσο και στο οξειδίο σήραγγας. Είναι εμφανής επίσης η μετακίνηση τόσο του Write αλλά και του Erase state προς θετικές τάσεις που σχετίζεται με τη δόση όπως φαίνεται στην εικόνα 8.27 (πάνω). Αυτό οφείλεται στη δημιουργία παγίδων λόγω ακτινοβολίας που προστίθενται σε εκείνες που δημιουργούνται από την ηλεκτρική καταπόνηση του οξειδίου.



Εικόνα 8.25
 Η αντοχή της μνήμης για δόση 10^{14} p/cm² (αριστερά) και για δόση 10^{12} p/cm² (δεξιά).



Εικόνα 8.26
 Η αντοχή της μνήμης για δόση 10^{11} p/cm² (αριστερά) και για μη ακτινοβολημένο δείγμα (δεξιά).



Wafer 22

Εικόνα 8.27

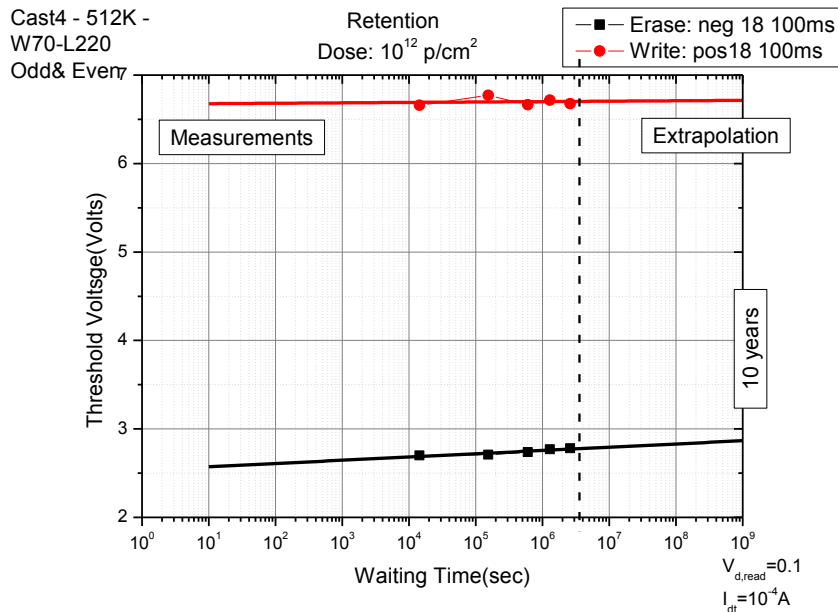
Η μετατόπιση του Write κατά την διάρκεια του endurance (πάνω) και η αλλαγή του παραθύρου μνήμης κατά τη διάρκεια του endurance (κάτω).

8.8 Χρόνος διατήρησης φορτίου σε προγραμματισμένα CAST (Retention).

Με σκοπό να μελετήσουμε το χρόνο διατήρησης του φορτίου προγραμματίσαμε ένα Cast 512K για κάθε ακτινοβολημένο δείγμα. Τα μισά τρανζίστορ Odd προγραμματίστηκαν στην κατάσταση Write και τα άλλα μισά Even στην κατάσταση Erase. Οι χρόνοι προγραμματισμού είναι Write: +18V, 100ms και Erase: -18V, 100ms. Μετρήσεις στα δείγματα λαμβάνονταν σε λογαριθμικά χρονικά διαστήματα (3 ώρες, 1 μέρα, 3 μέρες, 1 εβδομάδα κτλ.) έως και ένα μήνα μετά την αρχική φόρτιση.

Στην εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεταβολή του παραθύρου μνήμης για δόση 10^{12} p/cm². Παρατηρούμε πως η κατάσταση Write παραμένει αμετάβλητη για το χρονικό διάστημα μέχρι τα 10 χρόνια που είναι και ο επιθυμητός χρόνος διατήρησης της πληροφορίας για τις μνήμες. Για την κατάσταση Erase βλέπουμε μια μικρή μεταβολή της τάσης κατωφλίου γύρω στα 0,5 Volts για τα 10 χρόνια.

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η κατάσταση Erase "0" θα έπρεπε να μεταβάλλεται λιγότερο σε σχέση με την κατάσταση Write "1" με την πάροδο του χρόνου. Αυτό θα έπρεπε να συμβαίνει γιατί τα ηλεκτρόνια που είναι αποθηκευμένα στα νανοσωματίδια έχουν μικρότερο φράγμα δυναμικού να διαπεράσουν - 3,1 eV – και να βρεθούν στο υπόστρωμα μέσω μηχανισμού σήραγγας. Αντίθετα το θετικό φορτίο το οποίο είναι αποθηκευμένο στα νανοσωματίδια στην κατάσταση διαγραφής "0" έχει να διαπεράσει ένα φραγμό δυναμικού της τάξεως των 4,8 eV ώστε να επιστρέψει στο υπόστρωμα μέσω μηχανισμού σήραγγας. Επίσης για την κατάσταση "0" τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στη ζώνη αγωγιμότητας πυριτίου μπορούν να εισέλθουν στα νανοσωματίδια και να επανασυνδεθούν με τις οπές. Γι' αυτή την περίπτωση για μηδενική τάση πύλης το πλήθος των ηλεκτρονίων στο υπόστρωμα είναι μικρό ελαχιστοποιώντας την πιθανότητα του φαινομένου.



Εικόνα 8.28

Η διατήρηση του φορτίου ως συνάρτηση της μεταβολής του παραθύρου μνήμης στο χρόνο για NC MOSFET μνήμης για δόση ακτινοβολίας 10^{12} p/cm².

8.9 Συμπεράσματα.

Μελετήθηκαν και χαρακτηρίστηκαν ερευνητικές διατάξεις NC-MOSFET τρανζίστορ με εμφυτευμένα νανοσωματίδια μέσης διαμέτρου 3nm, πριν και μετά την ακτινοβόληση με δέσμη πρωτονίων 8MeV.

Κυρίως ασχοληθήκαμε με διατάξεις CAST που αποτελούνται από εκατομμύρια τρανζίστορ συνδεδεμένα παράλληλα τις οποίες χαρακτηρίσαμε και προγραμματίσαμε πριν και μετά την ακτινοβόληση. Διαπιστώθηκε η σωστή λειτουργία των διατάξεων τόσο ως τρανζίστορ όσο και ως μνήμες και μελετήθηκε το παράθυρο μνήμης.

Στα πειράματα επαληθεύτηκε η μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης I_d-V_g μετά την ακτινοβόληση και διαπιστώθηκε η εξάρτηση της μετατόπισης με την δόση. Στις μεγαλύτερες δόσεις παρατηρήθηκε η αλλαγή της κατάστασης "Έγγραφής" σε "Διαγραφή" το λεγόμενο bit flip.

Όσον αφορά την διαδικασία της αντοχής (endurance) δεν παρατηρήθηκε σαφής εξάρτηση του παραθύρου μνήμης με την δόση της ακτινοβολίας για τους κύκλους

εγγραφής/διαγραφής και τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά πριν την ακτινοβόληση. Το ίδιο δεν συμβαίνει και με την μετατόπιση της κατάστασης Write για διαφορετικές δόσεις κατά την διάρκεια κύκλων εγγραφής/διαγραφής, όπου παρατηρούμε μεγαλύτερη μετατόπιση για τις μεγαλύτερες δόσεις, άμεσο αποτέλεσμα της δημιουργίας παγίδων τόσο στη διεπιφάνεια Si/SiO₂ όσο και στο ίδιο το οξείδιο.

Τέλος από την μελέτη του χρόνου κατακράτησης φορτίου (retention) δεν εξάγαμε συμβατά αποτελέσματα με την βιβλιογραφία εάν και παρατηρήθηκε μια σχετική μετατόπιση της κατάστασης Erase μεγαλύτερη απο εκείνη της κατάστασης Write.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ Κεφάλαιο 8

- [1] E.Verrelli, D.Tsoukalas, M.Kokkoris, R.Vlastou, P.Dimitrakis, P.Normand
“*Proton radiation effects on nanocrystal non volatile memories*”, IEEE Trans.
Nucl. Sci., Vol. 54, no.4, Aug 2007.
- [2] A.Gasperin, E.Amat, J.Martin, M.Porti, M.Nafria, Al.Paccagnella, “*Peculiar
Characteristics of nanocrystal memory cells programming window*”, J.Vac.
Sci. Technol. B27 (1) Jan/Feb 2009.
- [3] N.Wrachien, A.Cester, R.Potoghese, C.Gerardi, “*Investigation of proton and X-
Ray Irradiation Effects on Nanocrystal and Floating Gate Memory Cell Arrays*”
IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 55, no.6, Dec 2008.
- [4] N.Wrachien, A.Cester, A.Gasperin, Al.Paccagnella, C.Gerardi, V.Ankarani,
“*Ionizing Radiation And Electrical Stress on Nanocrystal memory Cell Array*”
Sci. Dir. Microel. Rel. 47 (2007) 602-605, Elsevier Ltd.
- [5] N.Wrachien, A.Cester, A.Gasperin, Al.Paccagnella, C.Gerardi, V.Ankarani,
“*Radiation induced modifications of the Electrical characteristics of Nanocrystal
Memory Cells and Arrays*” IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 53, no.6, Dec 2006.
- [6] M.Petkov, L.Douglas Bell, A H Atwater, “*High Total Dose Tolerance of
Prototype Silicon Nanocrystall Non Volatile Memory Cells*” IEEE Trans. Nucl.
Sci., Vol. 51, no.6, Dec 2004.
- [7] C.Claeys, H.Ohyama, E.Simoen, M.Nakabayashi, K.Kobayashi, “*Radiation
Damage in Flash Memory Cells*” IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 51, no.6,
Dec 2004.
- [8] G.Cellere, Al.Paccagnella, A.Visconti, M.Bonanomi, A.Candelori, S.Lora,
“*Effects of Different Total Ionizing Dose Sources on Charge Loss From
Programmed Floating Gate Cells*” IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. 52, no.6,
Dec 2005.

