



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ακτινοβολήση με πρωτόνια 7MeV
πυκνωτών MOS και τρανζίστορ MOSFET
εμφυτευμένων με νανοσωματίδια πυριτίου

ΑΡΑΠΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέπων :
Δ. Τσουκαλάς , Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2011

*στη μνήμη
της αγαπημένης μου νονάς,
που πίστευε πάντα ότι η επιστήμη
μπορεί να βοηθήσει την ανθρωπότητα.*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα έρευνας πάνω στις συνέπειες της ακτινοβόλησης με πρωτόνια ενέργειας 7MeV ηλεκτρονικών μη πτητικών ημιαγωγικών μνημών νανοσωματιδίων πυριτίου . Ο 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 την εν γένει συμπεριφορά τους ως μνήμες. Η σωματιδιακή ακτινοβολία που διαπερνά τέτοιες διατάξεις προκαλεί ιονισμό και γενικά επιδρά επιζήμια με συγκεκριμένους μηχανισμούς . Στο πρώτο μέρος της πειραματικής έρευνας εργαζόμαστε πάνω στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό πυκνωτών Si NC-MOS, πριν και μετά την ακτινοβόληση τους με πρωτόνια. Το δεύτερο μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια προγράμματος έρευνας της E.S.A. (European Space Agency) πάνω σε διαστημικές εφαρμογές, και αφορά στην ακτινοβόληση με πρωτόνια ερευνητικών διατάξεων Si NC-MOSFET, και διατάξεων CAST (Cell Array Stress Test), δηλαδή ομάδων μεγάλου αριθμού τρανζίστορ, συνδεδεμένων παράλληλα.

ABSTRACT

We report on the results of 7MeV proton irradiation on electronic non volatile semiconductor memories with implanted Silicon nanocrystals (NCs). Our purpose is to study the changes of the memories' characteristics, before and after the irradiation, so that we can discuss issues related to their reliability, endurance, and generally their mnemonic behavior. The charged particles that transverse these kinds of devices cause ionization effects and generally malfunctions through certain mechanisms. In the first part of this work we deal with the electrical characterization of Si NC-MOS capacitors, before and after proton irradiation. The second part of this work was supported in part by a program of ESA (European Space Agency), and its object was to irradiate Si NC-MOSFET devices, and also groups of a large number of NC-MOSFETs, connected in parallel, known as CAST devices (Cell Array Stress Test).

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θέλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κύριο Δημήτριο Τσουκαλά, ο οποίος μου εμπιστεύτηκε την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και με τη επιστημονική του κατάρτιση, τη βαθιά γνώση και την πολυετή του πείρα ενέπνευσε και στήριξε τις δικές μου προσπάθειες .

Οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Δρ. Emanuele Verrelli, αφοσιωμένο εργάτη της πειραματικής Φυσικής και της έρευνας, ακούραστο δάσκαλο και πολύτιμο συνεργάτη, χωρίς τη συμβολή του οποίου δε θα είχε πραγματοποιηθεί η εργασία.

Δεν πρέπει να παραλείψω τον συνάδελφο Γιώργο Ζαχόπουλο, ο οποίος συνεργάστηκε μαζί μου στα πλαίσια της πραγματοποίησης της δικής του διπλωματικής, και βοήθησε στο δεύτερο πειραματικό μέρος, της ακτινοβόλησης των τρανζίστορ .

Ένα ευχαριστώ ανήκει σε όλους τους κοντινούς μου ανθρώπους, και ιδιαίτερα στην Αναστασία . Τέλος, θέλω να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στη μητέρα μου, για την υποστήριξη, την ενθάρρυνση και την υπομονή της.

Α.Π.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή.....	13
Κεφάλαιο 1. Η διάταξη MOS	15
1.1 Εισαγωγή.....	15
1.2 Ο ιδανικός MOS πυκνωτής.....	16
1.2.1 Η δομή του ιδανικού MOS πυκνωτή.....	16
1.2.2 Μηδενική τάση πύλης.....	17
1.2.3 Μη μηδενική τάση πύλης.....	18
1.2.4 Οι χαρακτηριστικές CV καμπύλες ιδανικού πυκνωτή MOS	20
1.3 Ο πραγματικός πυκνωτής MOS	22
1.3.1 Φορτία στο οξείδιο.....	22
1.3.2 Φορτία που διέρχονται μέσα απ' το οξείδιο.....	24
1.3.3 Διηλεκτρική κατάρρευση του οξειδίου.....	25
Βιβλιογραφία.....	26
Κεφάλαιο 2. Η διάταξη MOSFET	27
2.1 Εισαγωγή.....	27
2.2 Λειτουργία τρανζίστορ.....	28
2.2.1 Χαρακτηριστική Id-Vd καμπύλη.....	28
2.2.2 Χαρακτηριστική Id-Vg καμπύλη.....	31
Βιβλιογραφία.....	33

Κεφάλαιο 3. Ημιαγωγικές μνήμες με εμφυτευμένα νανοσωματίδια	35
3.1 Εισαγωγή.....	35
3.2 Μνήμες FG Flash με αιωρούμενη πύλη.....	36
3.3 Μνήμες NC-MOS / NC-MOSFET.....	38
3.3.1 Δομή και γενικά χαρακτηριστικά.....	38
3.3.2 Μηχανισμός αποθήκευσης φορτίου... ..	39
3.3.3 Προγραμματισμός παράθυρου μνήμης	41
3.4 Απαιτήσεις στα χαρακτηριστικά λειτουργίας ημιαγωγικών μνημών.....	42
3.5 Σύγκριση NC με FG μνήμες.	43
Βιβλιογραφία.....	44
Κεφάλαιο 4. Η ακτινοβολία στο διάστημα.	45
Βιβλιογραφία.....	48
Κεφάλαιο 5. Επίδραση της ακτινοβολίας στο οξειδίο πυκνωτή MOS	49
5.1 Συνέπειες απ' την ακτινοβολία πυκνωτή MOS.	49
5.1.1 Οι διαδοχικές φάσεις μετά την ακτινοβολία του πυκνωτή MOS.....	49
5.1.2 Μετατόπιση της τάσης κατωφλίου.....	52
5.2 Δημιουργία ζευγών e/h.....	54
5.2.1 Πυκνότητα των οπών που επιζούν	54
5.2.2 Μοντέλα δύο ακραίων περιπτώσεων.	55
5.2.3 Εκτίμηση της αρχικής μέγιστης μετατόπισης τάσης V_T	56
5.3 Μεταφορά φορτίων	58
5.4 Οπές παγιδευμένες κοντά στην διεπιφάνεια	59
5.4.1 Το φαινόμενο της αντίστροφης ανόπτησης.....	61
Βιβλιογραφία.....	63

Κεφάλαιο 6. Ακτινοβόληση NC-MOS πυκνωτών με πρωτόνια 7MeV.	65
6.1 Τα δείγματα του πειράματος.	65
6.2 Συνδεσμολογίες για τις ηλεκτρικές μετρήσεις.	66
6.3 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός και προγραμματισμός πριν την ακτινοβόληση	68
6.4 Ακτινοβόληση δειγμάτων.	73
6.5 Προσομοίωση της διεξόδου των πρωτονίων στα δείγματα.	75
6.6 Πειραματική μέθοδος εντοπισμού των ακτινοβολημένων πυκνωτών.	77
6.7 Επίδραση της ακτινοβολίας σε αφόρτιστες μνήμες.	79
6.8 Επίδραση της ακτινοβολίας σε αρχικά προγραμματισμένες μνήμες.	81
6.9 Υπολογισμός του παγιδευμένου στο οξείδιο φορτίου.	84
6.10 Η αντοχή (endurance) της μνήμης κατά τον επαναπρογραμματισμό	87
6.11 Χρόνος διατήρησης φορτίου (retention) σε προγραμματισμένες μνήμες	88
6.12 Συμπεράσματα.	91
Κεφάλαιο 7. Ακτινοβόληση NC-MOSFET με πρωτόνια 7MeV.	93
7.1 Εισαγωγή.	93
7.2 Τα δείγματα του πειράματος.	93
7.3 Συνδεσμολογίες για τις ηλεκτρικές μετρήσεις	96
7.4 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός πριν την ακτινοβόληση.	98
7.4.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος – τάσης.	98
7.4.2 Εξάρτηση του ρεύματος απ' τον αριθμό των κελιών σε κάθε CAST.	102
7.4.3 Μελέτη του προγραμματισμού των μνημών.	104
7.4.4 Παράθυρο μνήμης για γραμμική και υπο-κατωφλιακή περιοχή	112
7.5 Ακτινοβόληση δειγμάτων.	114
7.6 Επίδραση της ακτινοβολίας πρωτονίων σε προγραμματισμένα CAST.	117
7.7 Αντοχή (endurance) των CAST κατά τον επαναπρογραμματισμό	120
7.8 Χρόνος διατήρησης φορτίου (retention) σε προγραμματισμένα CAST.	121
7.9 Συμπεράσματα.	123
Βιβλιογραφία	124

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα έρευνας πάνω στις συνέπειες της ακτινοβόλησης με πρωτόνια ενέργειας 7MeV ηλεκτρονικών μη πτητικών ημιαγωγικών μνημών με νανοσωματίδια Πυριτίου . Η ακτινοβόληση έγινε στον επιταχυντή TANDEM που βρίσκεται στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ», και οι ηλεκτρικές μετρήσεις στο εργαστήριο ηλεκτρικού χαρακτηρισμού, στον Τομέα Φυσικής του ΕΜΠ.

Ως μη πτητικές μνήμες ημιαγωγών θεωρούμε τις ημιαγωγικές διατάξεις που μπορεί ο χρήστης να αποθηκεύει την πληροφορία ως φορτίο, αρνητικό ή θετικό, το οποίο θα παραμένει χωρίς την εφαρμογή κάποιας τάσης, και έπειτα να υπάρχει η δυνατότητα ανάγνωσης αυτής της δυαδικής πληροφορίας. Τα φορτισμένα σωματίδια της ακτινοβολίας που διαπερνά τέτοιες διατάξεις προκαλούν φαινόμενα ιονισμού και υποβάθμιση της ποιότητας του οξειδίου. Ο σκοπός μας είναι να μελετήσουμε την επίδραση της ακτινοβόλησης στα χαρακτηριστικά τους, ποσοτικά και ποιοτικά, και να βγάλουμε συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία τους, την αντοχή τους, και γενικά τη συμπεριφορά τους ως μνήμες.

Στο πρώτο μέρος της πειραματικής έρευνας εργαζόμαστε πάνω στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό και προγραμματισμό πυκνωτών MOS, πριν και μετά την ακτινοβόληση τους με πρωτόνια. Οι πυκνωτές αυτοί έχουν κατασκευαστεί στο τμήμα Μικροηλεκτρονικής του Δημόκριτου . Κάποιοι από αυτούς αποθηκεύουν το φορτίο σε ένα στρώμα νανοσωματιδίων πυριτίου, εμφυτευμένο στο οξείδιο της πύλης, και κάποιοι άλλοι χρησιμοποιήθηκαν ως πυκνωτές αναφοράς, χωρίς νανοσωματίδια .

Το δεύτερο μέρος της εργασίας πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια προγράμματος της E.S.A. (European Space Agency) και αφορά στην ακτινοβόληση με πρωτόνια ηλεκτρονικών μνημών νανοσωματιδίων, ώστε να τα αποτελέσματα να βρουν εφαρμογή στη διαστημική τεχνολογία. Χρησιμοποιήθηκαν ερευνητικές διατάξεις της κατασκευαστικής εταιρείας MICRON, στα οποία βασικό ηλεκτρονικό στοιχείο είναι το τρανζίστορ MOSFET με νανοσωματίδια πυριτίου στο οξείδιο της πύλης. Επίσης, πάνω στα δείγματα αυτά βρίσκονται ομάδες μεγάλου αριθμού τρανζίστορ MOSFET με νανοσωματίδια, συνδεδεμένων παράλληλα, οι λεγόμενες διατάξεις CAST (Cell Array Stress Test). Απ' τη μελέτη των CAST εξάγουμε συμπεράσματα για τη στατιστική συμπεριφορά χιλιάδων ή εκατομμυρίων μνημών, έπειτα από την ακτινοβόληση τους με την ιοντίσουςα ακτινοβολία.

Η εργασία αποτελείται συνολικά από 7 Κεφάλαια, που προσπαθούν κατά το δυνατόν να αναδείξουν τα ζητήματα αυτά με μεθοδολογική και επιστημονική συνέπεια, συνδέοντας το θεωρητικό μέρος μαζί με τα πειραματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα :

Στο 1^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά της δομής και λειτουργίας του πυκνωτή MOS, τόσο στην ιδανική του συμπεριφορά όσο και στην πραγματική . Αναλύονται, επίσης, οι χαρακτηριστικές καμπύλες χωρητικότητας – τάσης που αφορούν στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό του .

Στο 2^ο Κεφάλαιο εξηγείται και αναλύεται η δομή και ο τρόπος λειτουργίας του τρανζίστορ MOSFET, μαζί με τις χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος – τάσης που μπορούμε να μετρήσουμε σε αυτό, κατά τον ηλεκτρικό του χαρακτηρισμό.

Στο 3^ο Κεφάλαιο παρουσιάζονται δύο βασικά είδη μη πτητικών ημιαγωγικών μνημών, η FG μνήμη με αιωρούμενη πύλη, και η NC μνήμη με εμφυτευμένα νανοσωματίδια . Η παρουσίαση επικεντρώνεται στις NC μνήμες MOS και MOSFET, εξηγώντας τον μηχανισμό φόρτισης τους, τα χαρακτηριστικά του προγραμματισμού, τις απαιτήσεις αξιοπιστίας λειτουργίας τους, και τα συγκριτικά πλεονεκτήματα που έχουν απέναντι στις συμβατικές FG μνήμες.

Στο 4^ο Κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη αναφορά στα είδη της ακτινοβολίας που εντοπίζονται στο διάστημα, ως προς την προέλευσή τους, τη σωματιδιακή τους φύση και την ενέργεια τους.

Το 5^ο Κεφάλαιο επιχειρεί να αναδείξει τις βασικότερες συνέπειες από την ακτινοβόληση πυκνωτή MOS. Αναλύεται η κάθε φάση έπειτα απ' τον ιονισμό του οξειδίου της πύλης του πυκνωτή λόγω ακτινοβολίας, και σημειώνονται οι κύριες μεταβολές στα χαρακτηριστικά τόσο των απλών ημιαγωγικών διατάξεων, όσο και των μνημών.

Το 6^ο Κεφάλαιο ασχολείται με τα πειραματικά αποτελέσματα της μελέτης πάνω σε ακτινοβόληση με πρωτόνια 7MeV μνημών NC-MOS πυκνωτών. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι μετρήσεις που αφορούν στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό και τον προγραμματισμό πριν και μετά την ακτινοβόληση, και επίσης μετρήσεις που σχετίζονται με την αξιοπιστία των μνημών, όπως αντοχή στον επαναπρογραμματισμό και διατήρηση φορτίου. Επιπλέον, γίνονται κάποιοι υπολογισμοί και εκτιμήσεις που έχουν να κάνουν με το παγιδευμένο, λόγω ακτινοβολίας, φορτίο.

Το 7^ο Κεφάλαιο αφορά στη μελέτη και τον χαρακτηρισμό ερευνητικών διατάξεων NC-MOSFET, πριν και μετά την ακτινοβόλησή τους με πρωτόνια 7MeV. Παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν, και συζητούνται τα συμπεράσματα σχετικά με την αξιοπιστία αυτών των μνημών, την αντοχή τους στον επαναπρογραμματισμό και τη διατήρηση φορτίου .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΔΙΑΤΑΞΗ MOS

1.1 Εισαγωγή.

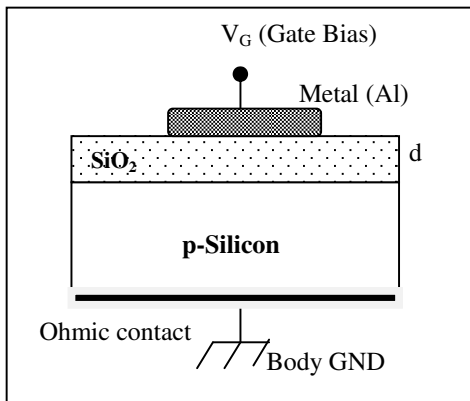
Ένα από τα σημαντικότερα ηλεκτρονικά στοιχεία, που βρίσκουν εφαρμογή τόσο στους σύγχρονους τομείς έρευνας και τεχνολογίας, όσο και στην ίδια την μελέτη των ημιαγωγικών διατάξεων, είναι η ομάδα πυκνωτών τύπου MIS (metal-insulator-semiconductor), η δομή των οποίων αποτελείται γενικά από μέταλλο-μονωτή-ημιαγωγό. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε στα κύρια χαρακτηριστικά και στη λειτουργία μιας ειδικής περίπτωσης MIS που χρησιμοποιείται ευρέως σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, του πυκνωτή MOS (metal-oxide-silicon), όπου στο ενδιάμεσο στρώμα του μονωτή βρίσκεται οξείδιο (συνήθως SiO_2), ενώ ο ημιαγωγός είναι πυρίτιο, p ή n τύπου.

Η δομή MIS προτάθηκε πρώτη φορά το 1959 απ' τους Moll, Pfann και Garrett. Τα χαρακτηριστικά του αναλύθηκαν έπειτα από τους Frankl, Lindner και η πρώτη επιτυχημένη κατασκευή MOS έγινε το 1960, απ' τους Ligenza και Spitzer.

1.2 Ο ιδανικός MOS πυκνωτής.

1.2.1 Η δομή του MOS πυκνωτή.

Η δομή ενός πυκνωτή MOS φαίνεται στην εικόνα 1-1. Το υπόστρωμα (body) τύπου p-Si γειώνεται μέσω ωμικής επαφής, το οξείδιο είναι SiO_2 πάχους d , ενώ στο μέταλλο (π.χ. Al) εφαρμόζεται η τάση της πύλης (Gate) του πυκνωτή.



Εικόνα 1-1.

Η δομή πυκνωτή MOS.

Ένας ιδανικός MOS πυκνωτής ορίζεται ως εκείνος στον οποίο :

- 1) Τα μόνα φορτία που μπορούν να υπάρξουν κάτω από οποιαδήποτε συνθήκες τάσης πόλωσης τα συναντάμε στον ημιαγωγό και τα αντίθετα φορτία στην επιφάνεια του μετάλλου, ενώ δεν υπάρχουν καθόλου φορτία στο οξείδιο.
- 2) Δεν πραγματοποιείται καμία μεταφορά φορτίου μέσα απ' το οξείδιο για συνεχή τάση ($V_G > 0$ ή $V_G < 0$), αφού θεωρείται άπειρη η αντίστασή του.
- 3) Για μηδενική τάση πόλωσης ισχύει η συνθήκη επίπεδων ζωνών, όπου η ζώνη Fermi του μετάλλου βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με αυτή του ημιαγωγού, όπως εξηγείται παρακάτω αναλυτικά, για την περίπτωση ενός p-type MOS.

1.2.2 Μηδενική τάση πύλης.

Στην εικόνα 1-2 φαίνεται το ενεργειακό διάγραμμα ενός ιδανικού πυκνωτή p-MOS, για μηδενική τάση πόλωσης στην πύλη. Ως έργο εξόδου $q\phi_m$ και $q\phi_s$ συμβολίζεται η διαφορά ενέργειας του επιπέδου του κενού απ' το επίπεδο Fermi του μετάλλου και αντίστοιχα του ημιαγωγού, για τα οποία ιδανικά πρέπει να ισχύει ότι:

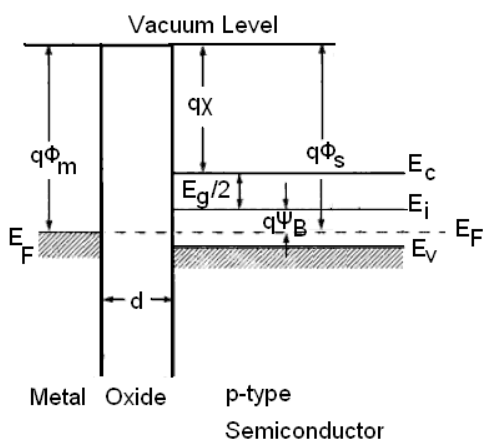
$$q\phi_m = q\phi_s \quad (1.1)$$

Για το αλουμίνιο : $q\phi_m = 4.1 \text{ eV}$.

Ως ηλεκτρονική συγγένεια (affinity) $q\chi$ συμβολίζεται η ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στη ζώνη αγωγιμότητας του ημιαγωγού και το επίπεδο του κενού, ενώ $q\psi_B$ η διαφορά ($E_i - E_F$) . Το ενδογενές επίπεδο Fermi E_i του p-ημιαγωγού απέχει βέβαια απόσταση $E_g/2$ τόσο απ' τη ζώνη σθένους, όσο κι απ' τη ζώνη αγωγιμότητας, όπου E_g είναι το ενεργειακό χάσμα του.

Στην περίπτωση μη πολωμένου ιδανικού πυκνωτή MOS, λοιπόν, οι ζώνες πρέπει να είναι επίπεδες (flat band), και να ισχύει η σχέση :

$$q\phi_{ms} = q\phi_m - q\phi_s = q\phi_m - (q\chi + E_g/2 + q\psi_B) = 0 \quad (1.2)$$

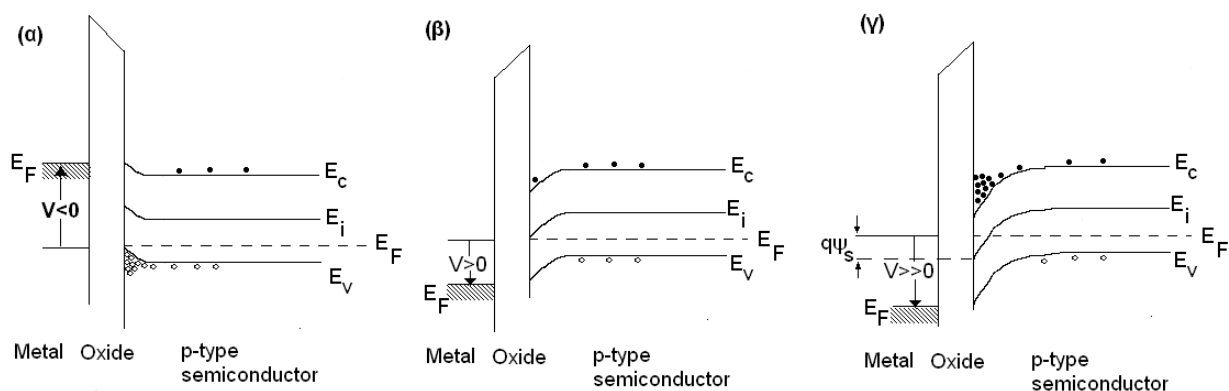


Εικόνα 1-2.

Ενεργειακό διάγραμμα ιδανικού MOS πυκνωτή, για μηδενική τάση πόλωσης ($V_G=0$) .

1.2.3 Μη μηδενική τάση πόλωσης.

Στην περίπτωση μη μηδενικής τάσης πόλωσης της πύλης, έχουμε την διάκριση τριών περιπτώσεων, τα ενεργειακά διαγράμματα των οποίων φαίνονται στην εικόνα 1-3.



Εικόνα 1-3.

Ενεργειακά διαγράμματα ιδανικού πυκνωτή MOS, υπό μη μηδενική τάση, στη περίπτωση :

(α) Συσσώρευσης, (β) Απογύμνωσης, (γ) Αναστροφής.

A) $V_G < 0$: Συσσώρευση (accumulation).

Όταν εφαρμόζεται αρνητική τάση πόλωσης της πύλης, οι ζώνες του ημιαγωγού στρέφονται προς τα πάνω, με αποτέλεσμα τη συσσώρευση οπών στην περιοχή ακριβώς κάτω απ' το οξείδιο. Τότε εμφανίζονται ακριβώς αντίθετα φορτία (ηλεκτρόνια και οπές αντίστοιχα) εντοπιζόμενα τοπικά πάνω και κάτω απ' το οξείδιο.

B) $V_G > 0$: Απογύμνωση (depletion)

Όταν εφαρμόζεται μικρή θετική τάση πόλωσης της πύλης, οι ζώνες του ημιαγωγού στρέφονται προς τα κάτω, αλλά η ζώνη E_i παραμένει ακόμα πάνω τη ζώνη E_F , με αποτέλεσμα την εμφάνιση περιοχής απογύμνωσης απ' τις οπές κάτω απ' το οξείδιο, πλάτους w . Το επιφανειακό φορτίο στην περιοχή απογύμνωσης προκύπτει αρνητικό λόγω ηλεκτρονίων και ισούται με $-qN_A w$, αφού N_A είναι η συγκέντρωση νόθευσης του υποστρώματος.

Γ) $V_G \gg 0$: Αναστροφή (inversion)

Όταν εφαρμόζεται ακόμα μεγαλύτερη θετική τάση στην πύλη, οι ζώνες κάμπτονται περισσότερο, όσπου το επίπεδο Fermi πηγαίνει πάνω απ' το ενδογενές επίπεδο Fermi E_i . Τοπικά, τότε, εμφανίζονται ηλεκτρόνια κάτω απ' το οξειδίου συνολικού φορτίου Q_n , το πλήθος των οποίων όταν ξεπεράσει τη συγκέντρωση N_A θα αυξάνεται καθώς αυξάνεται η τάση, χωρίς να μεγαλώνει η περιοχή της απογύμνωσης. Το πλάτος της τότε θα έχει γίνει μέγιστο w_{max} , και το συνολικό φορτίο του ημιαγωγού θα δίνεται απ' τη σχέση :

$$Q_s = Q_n - qN_A w_{max} = Q_s - \sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\psi_B)} \quad (1.3)$$

Στο σημείο εκείνο, ένα άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος πρέπει να αναφερθεί (εικόνα 1.3γ), το δυναμικό ψ_s , το οποίο ορίζεται ως η απόσταση του επιπέδου E_i πριν την εφαρμογή της τάσης, από το επίπεδο E_i που έχει καμφθεί λόγω της εφαρμογής της τάσης. Ισχύει προφανώς πως όταν $\psi_s=0$ έχουμε συνθήκη επιπέδων ζωνών, και ορίζουμε πως για $\psi_s < 0$ έχουμε συσσώρευση οπών, για $\psi_s > 0$ έχουμε απογύμνωση οπών, ενώ όταν $\psi_s > \psi_B$ εμφανίζεται η αναστροφή. Ισχυρή αναστροφή θα εμφανιστεί όταν :

$$\psi_s = 2\psi_B = \frac{2kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (1.4)$$

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

1.2.4 Οι χαρακτηριστικές CV καμπύλες ιδανικού πυκνωτή MOS

Στον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό ενός πυκνωτή MOS περιλαμβάνεται η μελέτη της εξάρτησης της χωρητικότητας από την εφαρμοζόμενη τάση . Η τάση πύλης V_G μοιράζεται εν μέρει στο οξειδίο, και εν μέρει στον ημιαγωγό :

$$V_G = V_{ox} + \psi_s \quad (1.5)$$

Για τη χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του οξειδίου θα ισχύει :

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} \quad (1.6)$$

Για τη χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας της περιοχής απογύμνωσης(depletion's capacitance):

$$C_d = \frac{\epsilon_s}{w} \quad (1.7)$$

Η συνολική χωρητικότητα C του πυκνωτή τότε, θα δίνεται ως η ισοδύναμη σε σειρά των χωρητικοτήτων του οξειδίου και της απογύμνωσης :

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d} \quad (1.8)$$

Στην περίπτωση της συσσώρευσης, λοιπόν, που έχουμε αρνητική τάση πύλης ($V_G < 0$), δεν έχει εμφανιστεί περιοχή απογύμνωσης, άρα έχουμε την μέγιστη συνολική χωρητικότητα :

$$C_{max} = C_{ox} \quad (1.9)$$

Στην περίπτωση της απογύμνωσης, όπου έχουμε αυξανόμενη θετική τάση ($V_G > 0$), η συνολική χωρητικότητα μειώνεται μέχρι μια ελάχιστη τιμή, η οποία οφείλεται στη μέγιστη τιμή του πλάτους $w = w_{max}$ της περιοχής απογύμνωσης (ισχυρή αναστροφή) :

$$C_{min} = \frac{C_{ox} \cdot C_{d,max}}{C_{ox} + C_{d,max}} \quad (1.10)$$

Για να φτάσει την παραπάνω ελάχιστη τιμή η συνολική τιμή της χωρητικότητας, πρέπει να εφαρμοστεί μια ελάχιστη τάση, η λεγόμενη τάση κατωφλίου V_T (Threshold Voltage) :

$$V_T = V_{ox} + \psi_{s(inversion)} = \frac{Q_s}{C_{ox}} + 2 \cdot \psi_B \cong \frac{\sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\psi_B)}}{C_{ox}} + \frac{2kT}{q} \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (1.11)$$

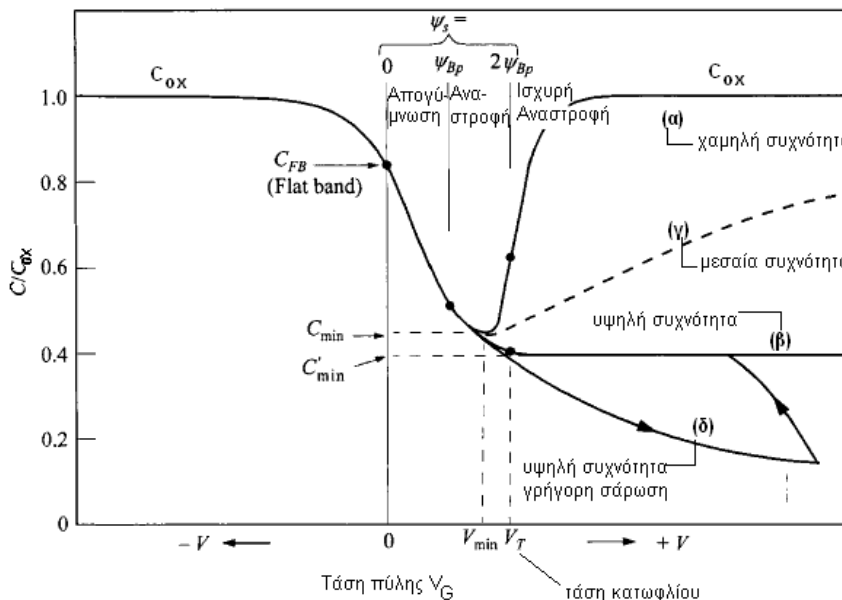
Όσο αφορά στην επίδραση της συχνότητας στην καμπύλη εξάρτησης της χωρητικότητας απ' την τάση (εικόνα 1-4), στην περιοχή συσσώρευσης ($V < 0$) η συνολική χωρητικότητα ισούται με την χωρητικότητα του οξειδίου (σχέση 1.6), ενώ για την περιοχή της ισχυρής αναστροφής ($V > V_T$), έχουμε διαφορετική συμπεριφορά, και πρέπει να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

(α) Στην περίπτωση της χαμηλής συχνότητας (5-100 Hz), το πλήθος των ηλεκτρονίων στο επίπεδο της αναστροφής (inversion layer) προλαβαίνει να αυξομειώνεται ανάλογα με τις μεταβολές στην τάση.

(β) Στην περίπτωση της υψηλής συχνότητας (1 MHz), το πλήθος των ηλεκτρονίων στο επίπεδο της αναστροφής δεν προλαβαίνει να αυξομειώνεται ανάλογα με τις μεταβολές στην τάση, με αποτέλεσμα η συνολική χωρητικότητα να φτάσει μια ελάχιστη τιμή (σχέση 1.10), όταν η περιοχή απογύμνωσης φτάσει στο μέγιστο πλάτος.

(γ) Για την περίπτωση μεσαίων συχνοτήτων, η καμπύλη παρουσιάζει μια ενδιάμεση εικόνα.

(δ) Στην περίπτωση που έχουμε γρήγορη σάρωση με υψηλή συχνότητα, εμφανίζεται το φαινόμενο της βαθιάς απογύμνωσης (deep depletion). Η γρήγορη σάρωση δεν επιτρέπει να προλάβουν να δημιουργηθούν ηλεκτρόνια αναστροφής, με αποτέλεσμα η αύξηση της τάσης πύλης να αυξάνει περεταίρω το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης, συνεπώς και την επι πλέον μείωση της χωρητικότητας. Σε κάποια τιμή τάσης, τελικά, δημιουργείται το στρώμα αναστροφής, το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης επανέρχεται στη μέγιστη τιμή του, άρα και η χωρητικότητα αυξάνεται στην αναμενόμενη ελάχιστη τιμή της.



Εικόνα 1-4.

Η καμπύλη χωρητικότητας – τάσης, σε έναν ιδανικό MOS πυκνωτή.

1.3 Ο πραγματικός πυκνωτής MOS

1.3.1 Φορτία στο οξείδιο.

Στον πραγματικό πυκνωτή MOS δεν πληρούνται οι συνθήκες ιδανικού πυκνωτή που έχουν διατυπωθεί. Κατ' αρχήν, η διαφορά των έργων εξόδου δεν είναι μηδέν :

$$q\phi_{ms} \neq 0, \quad (1.12)$$

αλλά εξαρτάται απ' το επίπεδο της νόθευσης του ημιαγωγού, όπως επίσης και απ' το μέταλλο της πύλης. Επίσης, στον πραγματικό πυκνωτή υπάρχουν φορτία εντός του οξειδίου, τα οποία ανήκουν στις εξής κατηγορίες :

- 1) Διεπιφανειακά παγιδευμένα φορτία (Q_{it} , interface trapped charge), που βρίσκονται στην διεπιφάνεια Si/ SiO₂, και οφείλονται σε ενεργειακές καταστάσεις μέσα στο ενεργειακό χάσμα του πυριτίου, οι οποίες μπορούν να φορτίζονται και να εκφορτίζονται. Οι καταστάσεις αυτές διακρίνονται σε τύπου δότη εάν είναι φορτισμένες θετικά όταν είναι άδειες και ουδέτερα κατειλημένες, ή τύπου αποδέκτη, αν είναι φορτισμένες αρνητικά όταν είναι άδειες και ουδέτερα κατειλημένες. Το πλήθος D_{it} (cm⁻²·eV⁻¹) των παγίδων διεπιφάνειας δίνεται απ' τη σχέση :

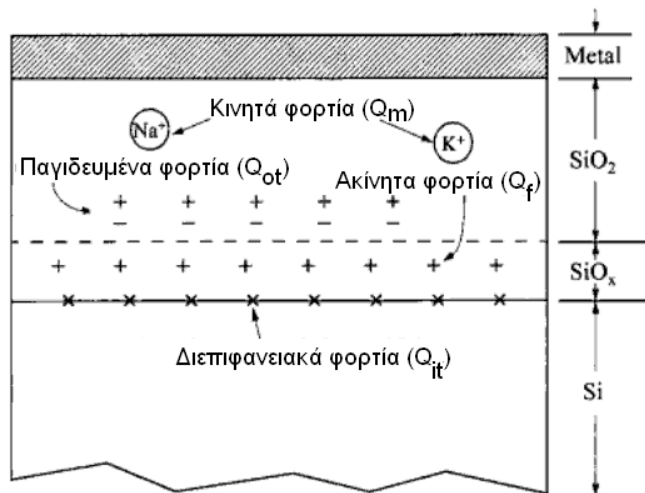
$$D_{it} = \frac{1}{q} \frac{dQ_{it}}{dE} \quad (1.13)$$

- 2) Ακίνητα φορτία κοντά στην διεπιφάνεια (Q_f , fixed oxide charge), που οφείλονται στην ύπαρξη μη στοιχειομετρικού SiO_x, και είναι σταθερά.
- 3) Κινητά φορτία (Q_m , mobile charge), τα οποία οφείλονται σε ιόντα Na⁺, K⁺, που μολύνουν το οξείδιο κατά την ανάπτυξή του. Αν $\rho_m(x)$ είναι η κατανομή της πυκνότητας του φορτίου αυτού, τότε το φορτίο θα δίνεται απ' τη σχέση :

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

- 4) Άλλα παγιδευμένα φορτία (Q_{ot} , oxide trapped charge), που προήλθαν, για παράδειγμα, από εξωτερική ακτινοβολία, και τα οποία βρίσκονται στο επίκεντρο της συγκεκριμένης εργασίας. Αν $\rho_{ot}(x)$ είναι η κατανομή της πυκνότητας του φορτίου αυτού, τότε το φορτίο θα δίνεται απ' τη σχέση :

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

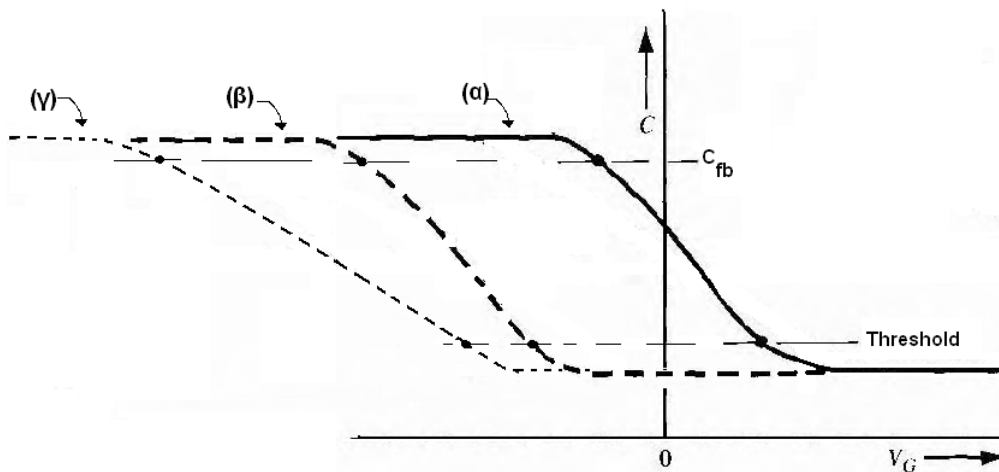


Εικόνα 1-5.

Η ύπαρξη φορτίων παγιδευμένων μέσα στο οξείδιο ενός πραγματικού MOS πυκνωτή.

Οι παραπάνω αποκλίσεις απ' την ιδανική συμπεριφορά ενός MOS πυκνωτή, δεν επιτρέπουν να πληρείται η συνθήκη επιπέδων ζωνών για μηδενική τάση πύλης, οι ενεργειακές ζώνες στον ημιγώγο έχουν καμφθεί, οπότε πρέπει να εφαρμοστεί η λεγόμενη τάση επιπέδων ζωνών (flat-band Voltage), ώστε να εξουδετερωθεί το παγιδευμένο φορτίο, μαζί και η διαφορά $q\phi_{ms}$.

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



Εικόνα 1-6.

Η χαρακτηριστική CV ενός p-MOS πυκνωτή.

(α) ιδανική, (β) μετατοπισμένη λόγω φορτίων στο οξείδιο και $\phi_{ms} \neq 0$, (γ) με την παρουσία διεπιφανειακών παγίδων, το σχήμα της καμπύλης τεντώνεται.

1.3.2 Φορτία που διέρχονται μέσα απ' το οξείδιο.

Στον ιδανικό πυκνωτή MOS δεν μεταφέρονται φορτία μέσα απ' το οξείδιο, αφού θεωρείται το οξείδιο ως ένας μονωτής θεωρητικά άπειρης αντίστασης. Όμως η αντίσταση δεν είναι άπειρη (τάξεως $10^5 \Omega \cdot \text{cm}$), γι αυτό εφαρμόζοντας τάση στην πύλη, θα μπορούσαν κάποια ηλεκτρόνια να υπερνικήσουν το φραγμό δυναμικού του οξειδίου (3.1 eV), περίπτωση, όμως, που είναι σπάνια για μικρές τάσεις. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος διαρροής ηλεκτρονίων μέσα απ' το φραγμό δυναμικού του οξειδίου, πραγματοποιείται κβαντομηχανικά (εικόνα 1.7), είτε μέσω του μηχανισμού άμεσης σήραγγας (direct tunneling), είτε μέσω του μηχανισμού Fowler-Nordheim (F-N).

Κάποιοι φορείς μπορούν να διαπεράσουν το οξείδιο μέσω ορθογώνιας άμεσης σήραγγας, αν πολωθεί ο πυκνωτής MOS με τάση τέτοια ώστε για την τάση V_{ox} που εφαρμόζεται στο οξείδιο να ισχύει η σχέση :

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

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

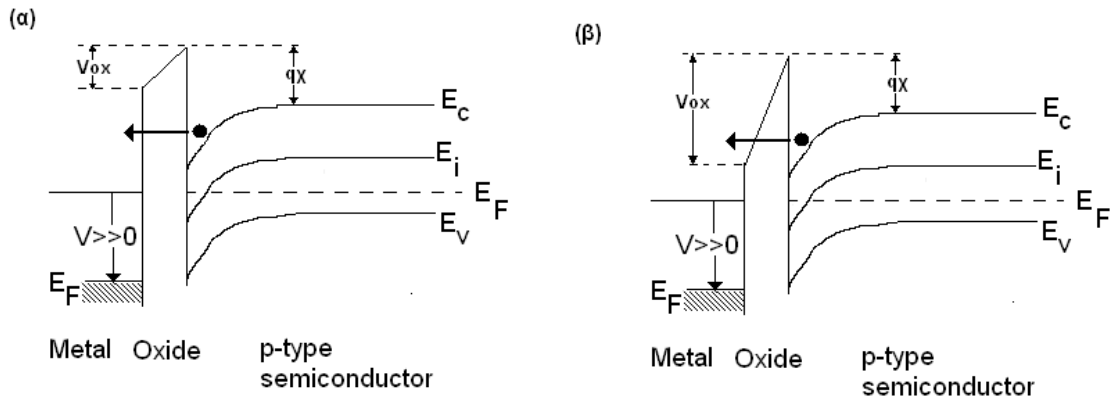
$$V_{ox} > q\chi \quad (1.18)$$

Γι αυτές τις δύο περιπτώσεις, η πυκνότητες ρεύματος διαρροής δίνονται απ' τις περίπλοκες σχέσεις :

$$J_{FN} = \frac{q^3 E_{ox}^2}{8\pi h \Phi_{ox}} \exp\left(-\frac{8\pi\sqrt{2m^*}\Phi_{ox}^{3/2}}{3hqE_{ox}}\right) \quad (1.19)$$

$$J_{air-tun} = A_G \frac{q^3 m/m_{ox} E_{ox}^2}{8\pi h B} \exp\left(-\frac{8\pi\sqrt{2m_{ox}\Phi_B^3}\left[1-\left(1-\frac{qV_{ox}}{\Phi_B}\right)^{1.5}\right]}{3hqE_{ox}}\right) \quad (1.20)$$

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



Εικόνα 1-7.

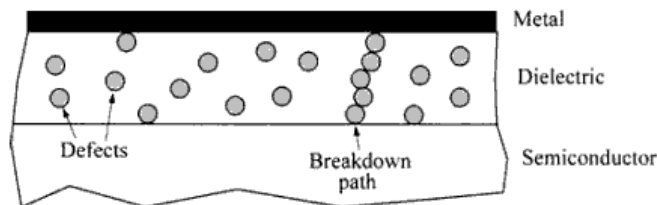
Οι κβαντομηχανικοί μηχανισμοί διέλευσης των φορτίων μέσα απ' το οξειδίο:

(α) Άμεση σήραγγα – direct tunneling, (β) Fowler-Nordheim.

1.3.3 Διηλεκτρική κατάρρευση του οξειδίου.

Υπό υψηλή τάση πύλης, το οξειδίο θα άγει κάποιο ρεύμα, κυρίως μέσω μηχανισμού σήραγγας, με αποτέλεσμα αυτοί οι φορείς να προκαλέσουν ατέλειες (defects) στο διηλεκτρικό. Όταν αυτές οι καταπονήσεις φτάσουν κάποιο κρίσιμο σημείο, θα προκληθεί διηλεκτρική κατάρρευση (dielectric breakdown). Μικροσκοπικά, μπορούμε να πούμε ότι όταν οι φορτισμένοι φορείς στο πέρασμα τους μέσα απ' το οξειδίο δημιουργήσουν μια αλυσίδα ατελειών, δημιουργείται τότε αγωγίμος δρόμος (breakdown conduction path), με αποτέλεσμα το υλικό να χάσει τις μονωτικές του ιδιότητες.

Η τάση κατάρρευσης εξαρτάται κυρίως απ' το πάχος του οξειδίου και την ποιότητα του. Σε γενικές γραμμές, η διηλεκτρική κατάρρευση ενός καλής ποιότητας οξειδίου πάχους της τάξης των 100 nm, επέρχεται για εντάσεις μεγαλύτερες των 10-15 MV/cm.



Εικόνα 1-8.

Οι ατέλειες που δημιουργούνται απ' το ρεύμα διαρροής, προκαλούν αγωγή μονοπάτια, που οδηγούν στη διηλεκτρική κατάρρευση του οξειδίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

- [1] S.M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices”, Wiley 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 του 8^{ου} εξαμήνου «Φυσική των Ηλεκτρονικών Διατάξεων», ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ, 2008.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

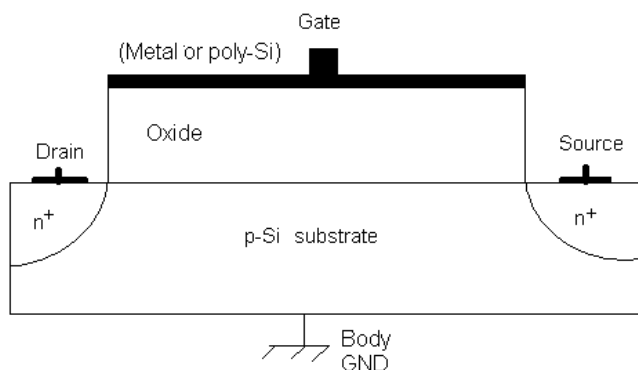
Διάταξη MOSFET

2.1 Εισαγωγή.

Το τρανζίστορ MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα ηλεκτρονικά στοιχεία για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Ανήκει στη γενική κατηγορία των τρανζίστορ επίδρασης πεδίου (FET), και δημιουργήθηκε το 1960 απ' τους Kahng και Atalla. Η αξία του βρίσκεται στο γεγονός ότι σε σχέση με τα συνήθη διπολικά τρανζίστρος καταναλώνει μικρή ισχύ και έχει μικρότερες διαστάσεις, συνεπώς συμφέρει στην ανάπτυξη χαμηλού κόστους κυκλωμάτων, με ταυτόχρονη αύξηση της πυκνότητας των διατάξεων πάνω σε αυτά .

Η βασική του δομή ενός n-MOSFET φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 2-1. Αποτελείται από έναν πυκνωτή τύπου n-MOS, στο οποίο το p-υποστρώμα έχεις άκρες που έχουν σχηματισθεί n⁺-περιοχές. Το τρανζίστορ MOSFET έχει τέσσερις ακροδέκτες : την πύλη (Gate), το υπόστρωμα (Body), την εκροή ή απαγωγό (Drain), και την πηγή (Source).

Περιγράφοντας με λίγα λόγια τη λειτουργία του, μπορούμε να πούμε ότι το κάθετο πεδίο μιας θετικής τάσης ανάμεσα στην πύλη και στο υπόστρωμα μπορεί από μια τιμή και μετά να αντιστρέψει το υπόστρωμα δημιουργώντας n-κανάλι ηλεκτρονίων, έτσι ώστε να διέλθει ρεύμα ανάμεσα στην εκροή και την πηγή, οι οποίες βρίσκονται σε διαφορά δυναμικού.

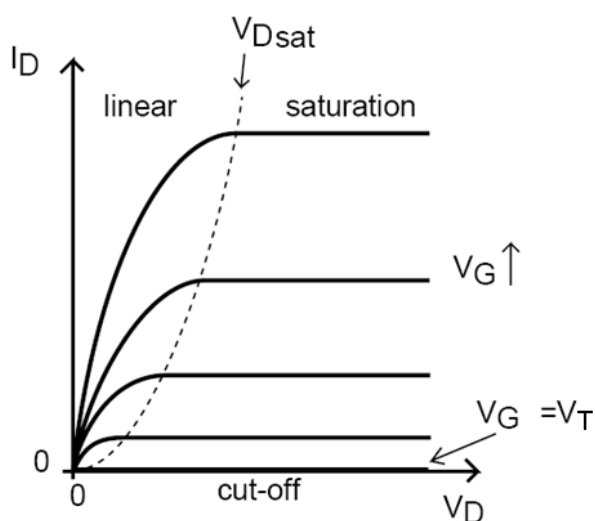


Εικόνα 2-1.
Η δομή ενός τρανζίστορ n-MOSFET.

2.2 Λειτουργία τρανζίστορ

2.2.1 Χαρακτηριστική Id-Vd καμπύλη

Σε ένα τρανζίστορ n-MOSFET εφαρμόζουμε θετική τάση στην πύλη V_g με γειωμένο το υπόστρωμα, και σαρώνοντας την τάση καναλιού V_d ανάμεσα στην εκροή και στη γειωμένη πηγή μετράμε το ρεύμα I_d . Η χαρακτηριστική καμπύλη I_d - V_d που θα προκύψει φαίνεται στην εικόνα 2-2.



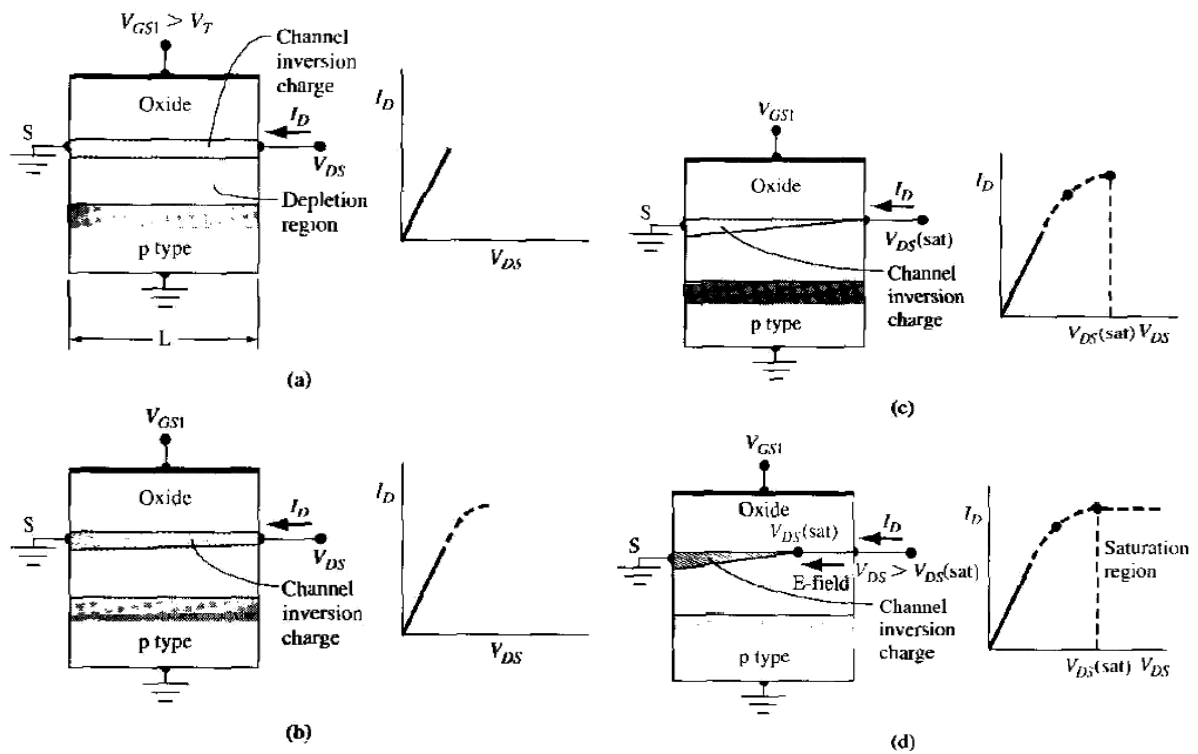
Εικόνα 2-2.

Η χαρακτηριστική I_d - V_d MOSFET για αυξανόμενες τιμές της τάσης πύλης V_g .

Η τάση του κατωφλίου του τρανζίστορ είναι η ίδια με εκείνη του πυκνωτή MOS της πύλης :

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

Τα διάφορα στάδια που οδηγούν στην μορφή της καμπύλης I_d - V_d , καθώς αυξάνεται η τάση V_g της πύλης, φαίνονται στην παρακάτω εικόνα 2-3, και στη συνέχεια εξηγούνται και αναλύονται.



Εικόνα 2-3.

Η απόκριση του n-MOSFET κατά την εφαρμογή κάθετης θετικής τάσης πύλης, με αύξηση της διαφοράς δυναμικού του καναλιού.

Όταν η τάση V_g είναι μεγαλύτερη από την τάση κατωφλίου V_T (εικόνα 2-3a), τότε δημιουργείται στρώμα αντιστροφής στο υποστρώμα του πυριτίου, δηλαδή n-κανάλι ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα μέσω μια μικρής τάσης V_d ανάμεσα σε εκροή και πηγή να άγεται ρεύμα I_d . Τότε το κανάλι λειτουργεί ως αντίσταση, και λέμε ότι βρισκόμαστε στη γραμμική περιοχή του ρεύματος (linear).

Το ρεύμα στη γραμμική περιοχή δίνεται απ' τη σχέση :

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

Όπου Z: το πλάτος του καναλιού, L:το μήκος του καναλιού, μ_n : η ευκινησία των ηλεκτρονίων.

Για μεγαλύτερες τιμές της τάσης V_d αυξάνεται η ανάστροφη πόλωση μεταξύ της εκροής και του υποστρώματος, συνεπώς το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης, και άρα το φορτίο των φορέων μειονότητας (ηλεκτρονίων) μειώνεται (εικόνα 2-3b).

Στο άκρο του καναλιού που βρίσκεται η εκροή παρουσιάζεται η μέγιστη μείωση της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων, με αποτέλεσμα τη μείωση της αγωγιμότητας του καναλιού. Το ρεύμα τότε δεν αυξάνει γραμμικά, αλλά σε παραβολική καμπύλη, μέχρι να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή του $I_{d,sat}$ (εικόνα 2-3c). Το σημείο αυτό όπου η τάση $V_d=V_{d,sat}$ ονομάζεται σημείο στραγγαλισμού (pinch-off). Το μη γραμμικό ρεύμα σ' αυτή την περιοχή ανάμεσα στη γραμμική και στον κορεσμό δίνεται απ' τη σχέση:

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

όπου m ο συντελεστής επίδρασης σώματος : $m = 1 + \frac{\sqrt{\varepsilon q N_A / 4\psi_B}}{C_{ox}}$ (2.4)

Αν αυξηθεί επιπλέον η $V_d > V_{d,sat}$, το σημείο στραγγαλισμού μετακινείται μειώνοντας το μήκος του καναλιού, βρισκόμενο όμως στο ίδιο δυναμικό $V_{d,sat}$, αφού μεταξύ εκείνου και της εκροής βρίσκεται πια περιοχή απογύμνωσης (εικόνα 2-3d). Στην περιοχή κορεσμού (saturation) δεν αλλάζει το μέγιστο ρεύμα $I_{d,sat}$, το οποίο δεν εξαρτάται πια από την τάση V_d , συνεπώς ισχύει :

$$\partial I_d / \partial V_d = 0 \quad (2.5)$$

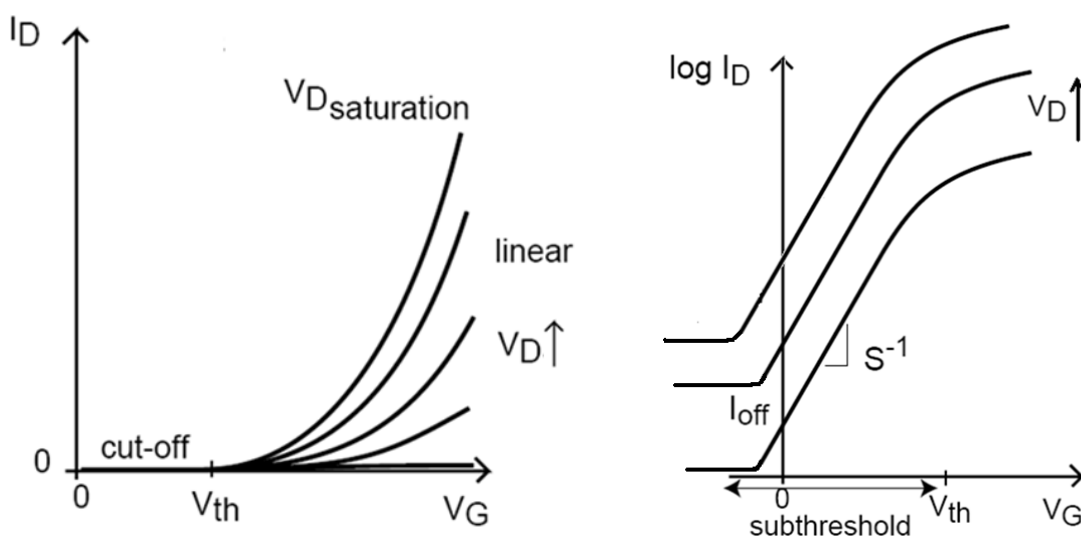
Από τις σχέσεις (2.3) και (2.5) βρίσκουμε την τάση $V_{d,sat}$ και το ρεύμα $I_{d,sat}$:

$$V_{d,sat} = \frac{V_g - V_T}{m} \quad (2.6)$$

$$I_{d,sat} = \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{Z}{L} \cdot \frac{(V_g - V_T)^2}{2m} \quad (2.7)$$

2.2.2 Χαρακτηριστική I_D - V_g καμπύλη.

Εφαρμόζουμε μια μικρή τάση καναλιού στην εκροή V_d , με την πηγή και το υπόστρωμα γειωμένα, και σαρώνοντας την θετική τάση πύλης V_g , μετράμε το ρεύμα καναλιού I_d . Η χαρακτηριστική καμπύλη I_d - V_g που θα προκύψει φαίνεται στην εικόνα 2-4 .



Εικόνα 2-4.

Η χαρακτηριστική I_d - V_g MOSFET, για αυξανόμενες τιμές τάσης V_d .

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

Όταν η τάση πύλης είναι πολύ μικρότερη της τάσης κατωφλίου ($V_g \ll V_T$), τότε πρακτικά δεν διέρχεται ρεύμα I_d απ' το κανάλι για καμία τάση V_d , αφού στο υπόστρωμα έχουν συσσωρευτεί οπές. Τότε λέμε ότι το τρανζίστορ βρίσκεται στην κατάσταση "OFF". Για μεγαλύτερες τάσεις πύλης, πέρα της τάσης κατωφλίου ($V_g \gg V_T$), κυριαρχεί το ρεύμα ολίσθησης I_d , που αυξάνεται γραμμικά με την τάση πύλης. Τότε το τρανζίστορ βρίσκεται στην κατάσταση "ON". Την V_T μπορούμε να την εκτιμήσουμε απ' το σημείο τομής της εφαπτόμενης στην καμπύλη IV ευθείας με τον οριζόντιο άξονα.

Για να μεταβεί απ' τη μία κατάσταση στην άλλη, στην περιοχή λίγο κάτω απ' την τάση κατωφλίου ($V_g < V_T$), παρατηρείται ένα εκθετικά αυξανόμενο ρεύμα διάχυσης, το λεγόμενο υποκατωφλιακό ρεύμα (sub-threshold current). Η εκθετική εξάρτηση του δίνεται βασικά απ' τη θερμοκρασία T , τις τάσεις V_g , V_T , από την προσεγγιστική σχέση :

$$I_{d,sub-thr} \cong e^{q(V_g - V_T)/kT} \quad (2.8)$$

Μία παράμετρος που είναι χρήσιμη για την περιγραφή του sub-threshold ρεύματος, γιατί αυξάνεται καθώς αυξάνονται οι παγίδες στη διεπιφάνεια πυριτίου – οξειδίου, είναι η αντίστροφη κλίση S της ευθείας καμπύλης $\log I-V$, το λεγόμενο sub-threshold swing :

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

Για τάσεις πύλης πολύ μικρότερες της τάσης κατωφλίου, και για αυξανόμενες τάσεις καναλιού, παρατηρείται ένα ρεύμα διαρροής επαγόμενο από την πύλη στην εκροή, το λεγόμενο GIDL (Gate Induced Drain Leakage). Καθώς η πύλη γίνεται περισσότερη αρνητική και η εκροή θετική, δημιουργούνται στενές ζώνες απογύμνωσης στν περιοχή n^+ της εκροής, με αποτέλεσμα να υπάρχει πιθανότητα δημιουργίας ζεύγους οπής-ηλεκτρονίου, λόγω σήραγγας μέσα απ' το ενεργειακό χάσμα του πυριτίου. Το ηλεκτρόνιο τότε κατευθύνεται προς τη θετική εκροή, ενώ η οπή προς το γειωμένο υπόστρωμα του πυριτίου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

- [1] S.M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices”, Wiley 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.Δρίτσα, εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2^η έκδοση, 2004.
- [5] Δ.Τσουκαλάς, Απόσπασμα σημειώσεων του μαθήματος του 8^{ου} εξαμήνου «Φυσική των Ηλεκτρονικών Διατάξεων», ΣΕΜΦΕ ΕΜΠ, 2008.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ημιαγωγικές μνήμες με εμφυτευμένα νανοσωματίδια

3.1 Εισαγωγή.

Η τεχνολογία των ημιαγωγικών διατάξεων έχει συμβάλει καθοριστικά στην ανάπτυξη και εξέλιξη των ηλεκτρονικών υπολογιστικών συστημάτων, όσο αφορά στην κατασκευή και βελτίωση συσκευών μνήμης για την αποθήκευση αλλά και ανάγνωση πληροφοριών.

Γενικά, η λειτουργία μιας συσκευής αποθήκευσης πληροφορίας 1 bit βασίζεται κατ' αρχήν στον προγραμματισμό της σε δύο διακριτές μεταξύ τους λογικές καταστάσεις, "1" ή "0", και έπειτα στη δυνατότητα ανάγνωσης αυτής της πληροφορίας.

Οι ημιαγωγικές μνήμες συγκρινόμενες με τις μαγνητικές και τις οπτικές μνήμες, πληρούν σε μεγαλύτερο βαθμό τις απαιτήσεις της υψηλής αξιοπιστίας, απόδοσης και τάχυντας, του χαμηλού κόστους, της χαμηλής κατανάλωσης ισχύος, όπως επίσης και της συμβατότητας με τις υπάρχουσες τεχνολογικές μεθόδους εμπορικής κατασκευής τους.

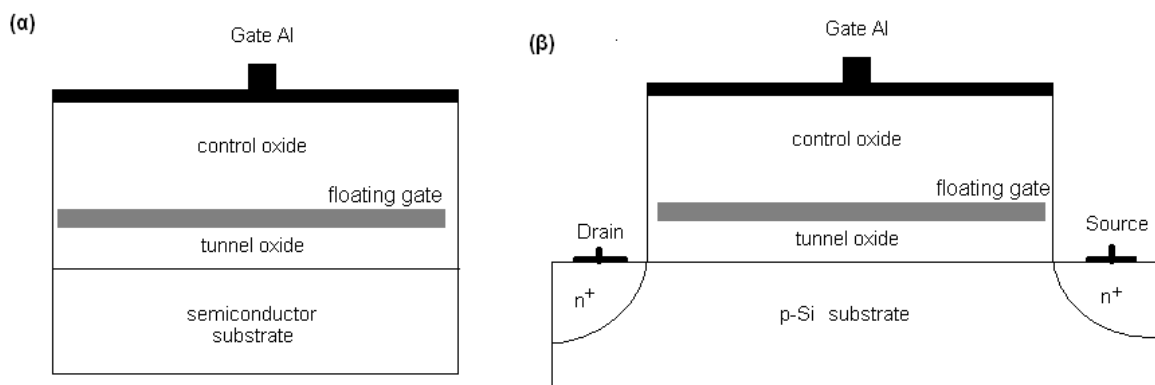
Οι ημιαγωγικές μνήμες που θα συζητηθούν εδώ, ανήκουν στην κατηγορία των μη πτητικών μνημών (NV – Non Volatile), με την έννοια ότι το φορτίο που αποθηκεύουν το διατηρούν ακόμα και χωρίς εφαρμογή τάσης. Ειδικότερα μας ενδιαφέρουν οι NV μνήμες ανάγνωσης μόνο, ηλεκτρικά διαγραφόμενες - εγγραφόμενες, ή αλλιώς EEPROM (Electrically Erasable –Programmable Read Only Memories).

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με μνήμες EEPROM τύπου Flash με αιωρούμενη πύλη, οι οποίες λόγω κάποιων περιορισμών και απαιτήσεων εξελίχθηκαν σε τροποποιημένες μνήμες με εμφυτευμένα νανοσωματίδια Si. Το βασικό κύτταρο αυτών των μνημών είναι ένας πυκνωτής MOS ή ένα τρανζίστορ MOSFET, που στην πύλη τους περιέχουν ένα επίπεδο νανοσωματιδίων ημιαγωγού ή μετάλλου, στο οποίο έπειτα από εγγραφή ή διαγραφή αποθηκεύεται το ανάλογο φορτίο.

3.2 Μνήμες FG Flash με αιωρούμενη πύλη.

Οι πρώτες μνήμες Flash κατασκευάστηκαν πρώτη φορά το 1984, και είναι τύπου NV-EEPROM. Πρόκειται για μια μη πτητική μνήμη, έναν πυκνωτή MOS ή τρανζίστορ MOSFET, στο οξείδιο πύλης του οποίου είναι εμφυτευμένο ένα λεπτό στρώμα αγώγιμου υλικού, η λεγόμενη αιωρούμενη πύλη (FG - floating gate).

Η δομή μιας μνήμης FG MOS / MOSFET με αιωρούμενη πύλη φαίνεται στην εικόνα 3-1. Μέσα στο οξείδιο έχει εμφυτευθεί ένα λεπτό στρώμα αγώγιμης πλάκας. Πάνω απ' το επίπεδο αυτό βρίσκεται το λεγόμενο οξείδιο ελέγχου (control oxide), ενώ κάτω το οξείδιο σήραγγας (tunnel oxide).



Εικόνα 3-1.

Ημιαγωγικές μνήμες Flash με αιωρούμενη πύλη.

(α) FG MOS πυκνωτής, (β) FG n-MOSFET τρανζίστορ.

Ο προγραμματισμός της μνήμης στηρίζεται γενικά στην μεταφορά φορτίων μέσα και έξω απ' το στρώμα της αιωρούμενη πύλης. Κατά την εγγραφή (Write) της μνήμης, ένας θετικός τετραγωνικός παλμός που εφαρμόζεται στην πύλη μεταφέρει ηλεκτρόνια όταν πρόκειται για p-υπόστρωμα και τα αποθηκεύει στην FG, αφήνοντας την μνήμη στην κατάσταση με bit "1". Η μεταφορά των φορτίων πραγματοποιείται κυρίως μέσω του μηχανισμού Fowler – Nordheim. Κατά τη διαγραφή (Erase), ο τετραγωνικός παλμός είναι αρνητικός και οι αποθηκευμένοι φορείς απομακρύνονται πάλι πίσω στο υπόστρωμα με την αντίθετη διαδικασία του FN, αφήνοντας την μνήμη στην κατάσταση με bit "0".

Ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η μνήμη, το αποτέλεσμα είναι η μετατόπιση είτε της τάσης V_{FB} για πυκνωτές, είτε της τάσης κατωφλίου V_T για τα τρανζίστορ. Όταν η μνήμη βρίσκεται στη κατάσταση “1”, τα αποθηκευμένα ηλεκτρόνια μετατοπίζονται σε υψηλότερες τιμές τις παραπάνω τάσεις, αφού με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται μεν η χωρητικότητα του πυκνωτή p-MOS, ενώ για την περίπτωση του τρανζίστορ n-MOSFET εμποδίζεται η κίνηση των ηλεκτρονίων του καναλιού, μειώνοντας την αγωγιμότητά τους. Κατά την διαγραφή στην κατάσταση “0” συμβαίνει το αντίθετο, η μετατόπιση σε μικρότερες τιμές των χαρακτηριστικών τάσεων των συσκευών. Ειδικότερα, κατά την αποθήκευση φορτίου Q_{FG} σε αιωρούμενη πύλη, η τάση κατωφλίου μετατοπίζεται κατά ΔV_T :

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

C_{CG} είναι η χωρητικότητα μεταξύ της πύλης ελέγχου και της αιωρούμενης, με A το εμβαδόν της επιφάνειας του πυκνωτή και ϵ τη διηλεκτρική σταθερά, δίνεται απ’ τη σχέση :

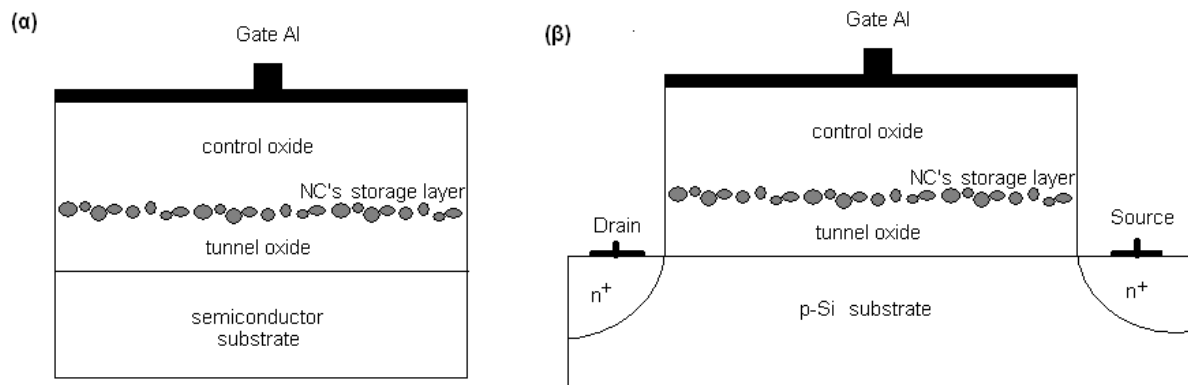
$$C_{CG} = \frac{\epsilon \cdot A}{t_{CO}} \quad (3.2)$$

Για να γίνει η ανάγνωση (read) της πληροφορίας της μνήμης, επιλέγεται μια τιμή τάσης ανάμεσα στις δύο καταστάσεις, ώστε αν η μνήμη βρίσκεται στην κατάσταση “1” να μη μετρηθεί ρεύμα I_{DS} στο κανάλι του n-MOSFET, ή να μετρηθεί η μέγιστη χωρητικότητα C_{ox} στον πυκνωτή p-MOS. Αντίθετα, στην κατάσταση “0” βρίσκουμε κάποια υψηλή τιμή ρεύματος για τη μία συσκευή, ή αντίστοιχα ελάχιστη τιμή χωρητικότητας για την άλλη.

3.3 Μνήμες NC-MOS / NC-MOSFET.

3.3.1 Δομή και γενικά χαρακτηριστικά.

Η δομή μιας μνήμης MOS / MOSFET με εμφυτευμένα νανοσωματίδια φαίνεται στην εικόνα 3-2. Η λειτουργία του προγραμματισμού αυτών των μνημών είναι παρόμοια με αυτή της FG, μόνο που η αιωρούμενη πύλη μέσα στο οξειδίο έχει αντικατασταθεί από ένα λεπτό στρώμα αγώγιμων νανοσωματιδίων (Nanocrystal's storage layer), μεταλλικών (π.χ. χρυσός) ή ημιαγωγικών (π.χ. πυρίτιο). Πάνω απ' το επίπεδο αυτό βρίσκεται και σ' αυτή την περίπτωση οξειδίο ελέγχου (control oxide), και κάτω το οξειδίο σήραγγας (tunnel oxide).



Εικόνα 3-2.

Ημιαγωγικές μνήμες με εμφυτευμένα νανοσωματίδια.

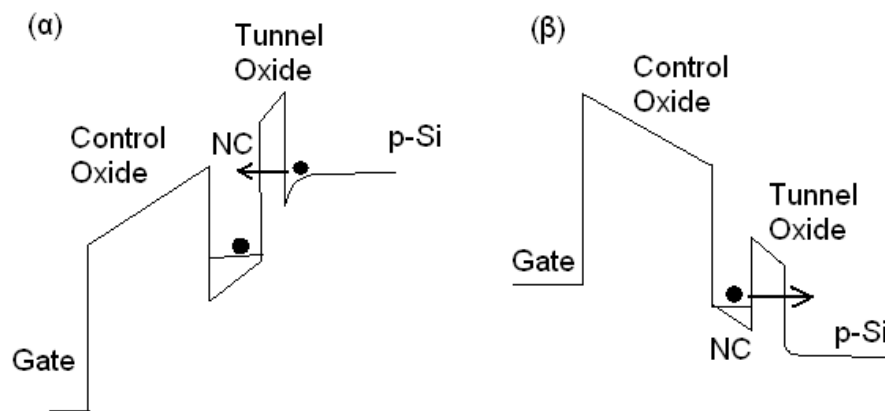
(α) NC MOS πυκνωτής, (β) NC MOSFET τρανζίστορ.

Γενικά, όλο το οξειδίο πρέπει να είναι αρκετά λεπτό (π.χ. 20nm), ώστε να μην χρειάζονται μεγάλες τάσεις προγραμματισμού, ούτε μεγάλη κατανάλωση. Ειδικότερα, το οξειδίο ελέγχου πρέπει να είναι πιο παχύ απ' το οξειδίο σήραγγας, αφού το πρώτο έτσι απομονώνει ηλεκτρικά τα νανοσωματίδια από την πύλη, ώστε να μην ανταλλάζουν φορτία. Το δεύτερο, αντιθέτως, πρέπει να είναι τόσο λεπτό ώστε να δίνει τη δυνατότητα στα φορτία να διέρχονται μέσω σήραγγας και να αποθηκεύονται στα νανοσωματίδια. Μάλιστα αν γίνει αρκετά λεπτό (<3nm), η μεταφορά των φορτίων μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μηχανισμού άμεσης σήραγγας και όχι FN, με αποτέλεσμα την περεταίρω μείωση των τάσεων και χρόνων προγραμματισμού, αφού αυξάνεται το ρεύμα των φορτίων.

Όσο αφορά στα ίδια τα νανοσωματίδια, ο τρόπος εναπόθεσής τους χρειάζεται να τους επιτρέπει να πληρούν κάποιες σημαντικές απαιτήσεις. Να έχουν τοποθετηθεί σε στρώμα κατά το δυνατόν διδιάστατο, να είναι αρκετά μικρά (2-6nm) χωρίς σημαντικές αποκλίσεις στο σχήμα και στο μέγεθος μεταξύ τους. Επίσης, η επιφανειακή πυκνότητά τους πρέπει να είναι ομοιόμορφη και τόσο ώστε η μεταξύ τους απόσταση να μεγαλύτερη απ' το πάχος του οξειδίου σήραγγας. Αυτή η απαίτηση θα επιτρέψει στα νανοσωματίδια να ανταλλάσσουν φορτία μόνο με το υπόστρωμα δια μέσου του οξειδίου σήραγγας, και όχι μεταξύ τους.

3.3.2 Μηχανισμός αποθήκευσης φορτίου.

Ο μηχανισμός αποθήκευσης φορτίου μέσα στα νανοσωματίδια φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 3-3, με τα διαγράμματα των ενεργειακών ζωνών της πύλης. Κατά την εφαρμογή θετικής τάσης πύλης (εικόνα 3-3(α)), με γειωμένη την εκροή και την πηγή, οι ζώνες κάμπτονται ώστε να εισέλθουν ηλεκτρόνια μέσω FN ή σήραγγας απ' το υπόστρωμα προς το νανοσωματίδιο, τα οποία και παραμένουν. Αντίθετα, κατά την εφαρμογή αρνητικής τάσης πύλης (εικόνα 3-3(β)), τα ηλεκτρόνια εξέρχονται ξανά προς το υπόστρωμα.



Εικόνα 3-3.

Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών μιας μνήμης με νανοσωματίδια πυριτίου .

(α) Εγγραφή – Write, με εφαρμογή θετικού παλμού.

(β) Διαγραφή – Erase, με εφαρμογή αρνητικού παλμού.

Μετά την αποθήκευση ενός ηλεκτρονίου από το υπόστρωμα στο νανοσωματίδιο, δημιουργείται απωστικό πεδίο λόγω φράγματος Coulomb, και απαιτείται επι πλέον ηλεκτροστατική ενέργεια E_c για να μεταφερθεί ακόμα ένα ηλεκτρόνιο, που δίνεται απ' τη σχέση :

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

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που παρουσιάζουν οι μνήμες νανοσωματιδίων είναι η αποθήκευση φορτίου σε κβαντικές τελείες . Επειδή το μήκος κύματος των φορέων (ηλεκτρονίων ή οπών) είναι συγκρίσιμο με το μέγεθος των νανοσωματιδίων, εμφανίζονται φαινόμενα κβαντισμού της ενέργειας. Η ενέργεια που απαιτείται για τη μεταφορά ενός ηλεκτρονίου σε μια κβαντική τελεία δίνεται απ' το άθροισμα της ηλεκτροστατικής ενέργειας E_c , και τη διαφορά ενέργειας ΔE_n μεταξύ δύο διαδοχικών ενεργειακών σταθμών, που οφείλεται στον κβαντικό περιορισμό :

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

Λόγω των περιορισμών του φράγματος Coulomb και των κβαντικών περιορισμών, κάθε νανοσωματίδιο μπορεί να αποθηκεύσει συγκεκριμένο αριθμό φορέων, με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται τόσο μικρός χρόνος αλλά και μικρή τάση προγραμματισμού της μνήμης. Λόγω θερμικής ενέργειας σε θερμοκρασία δωματίου, η συνολική ενέργεια προγραμματισμού θα πρέπει να ξεπερνά τα $kT=26 \text{ meV}$. , με αποτέλεσμα τα νανοσωματίδια να πρέπει να έχουν διαστάσεις μέχρι το πολύ 10nm διάμετρο.

Η τάση φόρτισης που απαιτείται για να εγγραφεί ένα ηλεκτρόνιο στο νανοσωματίδιο μέσω σήραγγας δίνεται απ' την προσεγγιστική σχέση :

$$V_W = \frac{E_c}{e} \cdot \left(1 + \frac{d_{CO}}{d_{TO}}\right) + V_T \quad (3.5)$$

Όπου d_{CO} , d_{TO} είναι τα πάχη του οξειδίου ελέγχου και σήραγγας αντίστοιχα, και V_T η τάση κατωφλίου .

Η αποθήκευση των φορτίων μετατοπίζει την τάση V_{fb} του πυκνωτή MOS, σύμφωνα με τη σχέση :

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

Όπου το αποθηκευμένο φορτίο Q υπολογίζεται προφανώς απ' το πλήθος N_d των φορτίων που βρίσκεται σε κάθε νανοσωματίδιο, μέσα στην επιφανειακή πυκνότητα N νανοσωματιδίων :

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

Οι παραπάνω τύποι μας δείχνουν ότι μεγαλύτερη πυκνότητα νανοσωματιδίων μας δίνει μεγαλύτερο παράθυρο μνήμης ΔV_{fb} , αλλά δεν πρέπει να είναι υπερβολικά μεγάλη, ώστε τα νανοσωματίδια να βρίσκονται σε μια απόσταση ασφάλειας 5nm, για να μειώνεται η πιθανότητα πλευρικής εκφόρτισης μέσω γειτονικών κρυστάλλων.

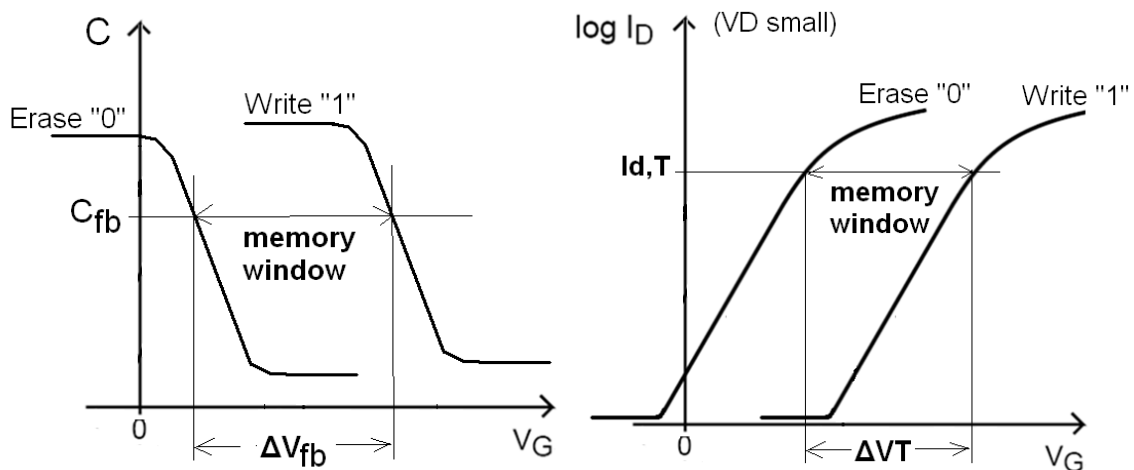
3.3.3 Προγραμματισμός παράθυρου μνήμης .

Κατά τον προγραμματισμό είτε πυκνωτή NC-MOS, είτε τρανζίστορ NC-MOSFET, εφαρμόζουμε τετραγωνικό παλμό θετικής ή αρνητικής τάσης ανάμεσα στην πύλη και στο υπόστρωμα.

Ο προγραμματισμός χαρακτηρίζεται από το ύψος του παλμού (pulse height) και τη διάρκεια του παλμού (pulse duration) . Οι θετικοί παλμοί της κατάστασης “1”-Write εγγράφουν ηλεκτρόνια στα νανοσωματίδια, ενώ οι αρνητικοί της κατάστασης “0”-Erase απομακρύνουν τα ηλεκτρόνια και τα αντικαθιστούν με οπές .

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, κατά τον προγραμματισμό ενός πυκνωτή NC-MOS (π.χ. n-MOS με p-Si υπόστρωμα), η χαρακτηριστική C-V καμπύλη του μετατοπίζεται, προς τις θετικές τάσεις για την κατάσταση “1” και αρνητικές για την “0”. Το παράθυρο μνήμης ορίζεται ως η σχετική μετατόπιση της τάσης V_{FB} των δύο καμπυλών, για μια συγκεκριμένη τιμή C_{FB} , την οποία μπορούμε να την θεωρήσουμε κάπως αυθαίρετα.

Κατά τον προγραμματισμό μιας μνήμης τρανζίστορ NC-MOSFET (π.χ. n-MOSFET), η χαρακτηριστική I_d-V_g καμπύλη του μετατοπίζεται, με την ίδια λογική. Στην περίπτωση αυτή, την καμπύλη την μετράμε με μια σταθερή μικρή τάση V_d , ώστε να είμαστε στη γραμμική περιοχή του ρεύματος, κι όχι στον κορεσμό. Το παράθυρο μνήμης ορίζεται και εδώ ως η σχετική μετατόπιση της τάσης V_T των δύο καμπυλών, για μια συγκεκριμένη τιμή $I_{d,T}$, την οποία επίσης μπορούμε να τη θεωρήσουμε αυθαίρετα, αφού θεωρητικά οι καμπύλες μετατοπίζονται παράλληλα .



Εικόνα 3-4.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες για το παράθυρο μνήμης μνήμης, (α) MOS και (β) MOSFET.

3.4 Απαιτήσεις στα χαρακτηριστικά λειτουργίας ημιαγωγικών μνημών.

Οι ημιαγωγικές μνήμες, MOS ή MOSFET, αιωρούμενης πύλης ή νανοσωματιδίων, πρέπει να πληρούν ορισμένα χαρακτηριστικά τα οποία στη συνέχεια περιγράφουμε.

Κατ' αρχήν, σε μια μνήμη μπορούμε να ελέγξουμε τη λειτουργία της από το παράθυρο μνήμης που μπορεί να μας δώσει. Αν μπορούσαμε να μιλήσουμε για ιδανικό προγραμματισμό, θα λέγαμε ότι εννοούμε αυτόν για τον οποίο έχουμε παλμούς με μικρές τάσεις ώστε να έχουμε μικρή κατανάλωση κι επίσης μικρής χρονικής διάρκειας ώστε να προγραμματίζονται γρήγορα. Μικρές τάσεις εννοούμε λίγα Volts, ενώ μικρή διάρκεια θα λέγαμε ότι σημαίνει ίσως κάποια ms. Τέλος, βέβαια, το παράθυρο της μνήμης ($\Delta V_{\text{1} \rightarrow \text{0}}$) πρέπει να προκύψει ικανοποιητικά μεγάλο (π.χ. πάνω από 2-3V), με την έννοια της σαφούς διάκρισης ανάμεσα στις δύο καταστάσεις.

Η μνήμη, επίσης, χρειάζεται να είναι αντέχει κατά τον επαναπρογραμματισμό της, τουλάχιστον μετά από 10^6 κύκλους εγγραφής/διαγραφής (προδιαγραφές εμπορικών μνημών), με την έννοια πάντα του κατά το δυνατόν σταθερού παραθύρου μνήμης. Αυτό το χαρακτηριστικό της λέγεται αλλιώς "Endurance" και σχετίζεται με το πόσο καλά είναι κατασκευασμένο το οξειδίο της πύλης, ώστε να αντέχει την ηλεκτρική καταπόνηση. Συνήθως οι κύκλοι W/E εισάγουν παγίδες στο οξειδίο ή στη διεπιφάνεια με το υπόστρωμα, με αποτέλεσμα να μετατοπίζεται η τάση V_T ή V_{fb} , άρα να έχουμε αλλαγές στο παράθυρο μνήμης.

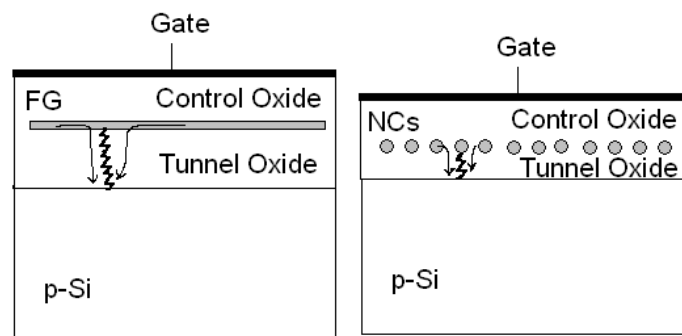
Όταν εγγράψουμε κάποια πληροφορία στη μνήμη, "1" ή "0", έχουμε την απαίτηση να παραμένει αποθηκευμένη για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε μετά να μπορούμε να την διαβάσουμε. Το χαρακτηριστικό αυτό έχει να κάνει με την κατακράτηση του φορτίου στο εμφυτευμένο στρώμα της πύλης (αρνητικό ή θετικό). Ο χρόνος διατήρησης της πληροφορίας λέγεται αλλιώς "Data Retention Time", και οι προδιαγραφές των εμπορικών μνημών δίνουν ως ελάχιστη απαίτηση τα 10 έτη. Και εδώ πάλι, ως ικανοποιητική διατήρηση του φορτίου εννοείται το παράθυρο μνήμης να παραμείνει ακόμα τόσο μεγάλο, ώστε να μπορούμε μετά από 10 χρόνια να διακρίνουμε τις δύο καταστάσεις.

3.5 Σύγκριση NC με FG μνήμες.

Επειδή οι συμβατικές Flash FG μνήμες έχουν ένα ενιαίο στρώμα αποθήκευσης φορτίου, η οποιοδήποτε ατέλεια στο οξειδίο της πύλης θα οδηγούσε στην πλήρη εκφόρτιση της μνήμης (εικόνα 3-5) . Γι αυτό το λόγο οι FG μνήμες δεν επιτρέπεται να σμικρυνθούν κάτω από 8-10nm στο πάχος του οξειδίου σήραγγας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα για να επιτυγχάνεται η μεταφορά των φορτίων να πρέπει να εφαρμόζονται σχετικά μεγάλες τάσεις και χρόνοι προγραμματισμού. Έτσι, όμως, το οξειδίο της πύλης καταπονείται περισσότερο, με αποτέλεσμα να μην παρουσιάζουν οι μνήμες αυτές καλά χαρακτηριστικά αντοχής (endurance έως 10^5 W/E cycles). Όσον αφορά στην ακτινοβόληση τέτοιων μνημών, όπως θα συζητηθεί και στο σχετικό κεφάλαιο, το εισαγόμενο απ' την ακτινοβολία θετικό φορτίο είτε η οποιαδήποτε ατέλεια στο οξειδίο οδηγεί στην εκφόρτιση ολόκληρης της μνήμης.

Σε αντίθεση με τις συμβατικές μνήμες αιωρούμενης πύλης, οι ημιαγωγικές μνήμες νανοσωματιδίων παρουσιάζουν σαφώς πιο βελτιωμένα χαρακτηριστικά. Επειδή το φορτίο αποθηκεύεται σε μεμονωμένα νανοσωματίδια, κάποια ενδεχόμενη ατέλεια στο οξειδίο της πύλης θα οδηγήσει σε εκφόρτιση μόνο του συγκεκριμένου νανοσωματιδίου, μαζί ίσως και με κάποια γειτονικά του. Αυτό το πλεονέκτημα οδήγησε σε δημιουργία NC μνημών με λεπτότερα οξειδία σήραγγας, μικρότερα των 3nm. Συνεπώς έτσι επιτυγχάνονται μικρότερες τάσεις λειτουργίας με μικρότερης διάρκειας παλμούς. Το οξειδίο με αυτό τον τρόπο καταπονείται λιγότερο κατά τον επαναπρογραμματισμό (endurance έως 10^6 W/E cycles). Τέλος, πάνω στο θέμα της ακτινοβόλησης, η ακτινοβολία που θα προκαλέσει κάποιες ατέλειες στο οξειδίο ή θα προκαλέσει παγίδευση φορτίου, θα εκφορτίσει μια μικρή περιοχή της μνήμης, και όχι όλη την πληροφορία.

Πρέπει να αναφέρουμε κάποια μειονεκτήματα που εντοπίζονται στις μνήμες νανοσωματιδίων, όπως η δυσκολία βιομηχανικής μαζικής παραγωγής τέτοιων μνημών, χωρίς αποκλίσεις στην ομοιομορφία του σχήματος, της θέσης και της πυκνότητας των νανοσωματιδίων. Επίσης, λόγω του μικρού πάχους στο οξειδίο σήραγγας, αντιμετωπίζονται προβλήματα στον χρόνο διατήρησης της πληροφορίας.



Εικόνα 3-5.

Η ατέλεια στο οξειδίο σήραγγας οδηγεί σε εκφόρτιση ολόκληρης της μνήμης για FG-MOS, ενώ σε εκφόρτιση λίγων νανοσωματιδίων για NC-MOS.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

- [1] S.M. Sze, “Physics of Semiconductor Devices” , Wiley 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, «Νανοδομημένα 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 νανοδομημένα Si», Διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία, ΕΜΠ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Η ακτινοβολία στο διάστημα.

Τα υψηλοενεργειακά σωματίδια που αποτελούν την ακτινοβολία που βρίσκεται στο διάστημα είναι ηλεκτρόνια με ενέργειες μεγαλύτερες από 40 keV, πρωτόνια ή νετρόνια με ενέργειες μεγαλύτερες από 1 MeV, και βαριά ιόντα με ενέργειες πάνω από 1MeV/πυρήνα. Η ακτινοβολία αυτή δημιουργεί προβλήματα στα ηλεκτρονικά συστήματα των διαστημικών αποστολών, των δορυφόρων, των διαστημικών σταθμών, και μελετώντας την ίδια όπως και τις επιπτώσεις της, μπορούμε να σχεδιάζουμε τα κατάλληλα συστήματα προστασίας.

Το κάθε τέτοιο είδος ακτινοβολίας χαρακτηρίζεται με βάση τη σύνθεση της, το φορτίο της, και την κινητική ενέργεια των συστατικών της. Σε αντίθεση με τα φωτόνια που κινούνται με την ταχύτητα του φωτός, τα σωματίδια κινούνται με ταχύτητες από μερικά m/s, έως και ένα σημαντικό κλάσμα της ταχύτητας του φωτός.

Η ακτινοβολία αυτή μπορεί να διαιρεθεί στις εξής κατηγορίες :

1. Κοσμική ακτινοβολία.
2. Διαστρικά αέρια.
3. Ηλιακές καταγίδες.
4. Παγιδευμένα σωματίδια απ' την Γη.

1. Κοσμική ακτινοβολία

Η διαγαλαξιακή κοσμική ακτινοβολία (Galactic cosmic rays – GCR) προέρχεται από το εξωτερικό του ηλιακού μας συστήματος, αποτελείται περίπου κατά 85% από πρωτόνια, 14% από σωματίδια άλφα, και περίπου 1% από βαριά ιόντα. Η GCR περιλαμβάνει τα πιο ενεργητικά βαριά ιόντα και πρωτόνια, με ενέργειες από 10MeV μέχρι και 10 GeV/πυρήνα. Το είδος αυτό της διαγαλαξιακής ακτινοβολίας επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό απ' τις φάσεις της ηλιακής δραστηριότητας, κι αυτό επειδή ο ήλιος δημιουργεί μαγνητικές διαταραχές στην ηλιόσφαιρα, με αποτέλεσμα κάποια κοσμικά σωματίδια μικρότερης ενέργειας να μην καταφέρνουν να εισέλθουν στο ηλιακό μας σύστημα.

2. Διαστρικά αέρια.

Μια άλλη πηγή σωματιδίων η οποία μερικές φορές εμφανίζεται και άλλες όχι., αποτελείται από σωματίδια άλφα και άλλα βαριά ιόντα (N, O, Ne, Ar) με ενέργειες μικρότερες των 50 MeV/πυρήνα, και ονομάζεται «anomalous component», Πιστεύεται ότι προέρχεται από ουδέτερα διαστρικά αέρια, που διαχέονται στην ηλιόσφαιρα, ιονίζονται απ' την ηλιακή UV ακτινοβολία ή ανταλλάσσουν φορτία με τα πρωτόνια των ηλιακών ανέμων, κι έπειτα εκτοξεύονται στην εξωτερική ηλιόσφαιρα απ' τον ηλιακό άνεμο, κατευθυνόμενα προς τους πλανήτες του συστήματος και την Γη.

3. Ηλιακές καταιγίδες.

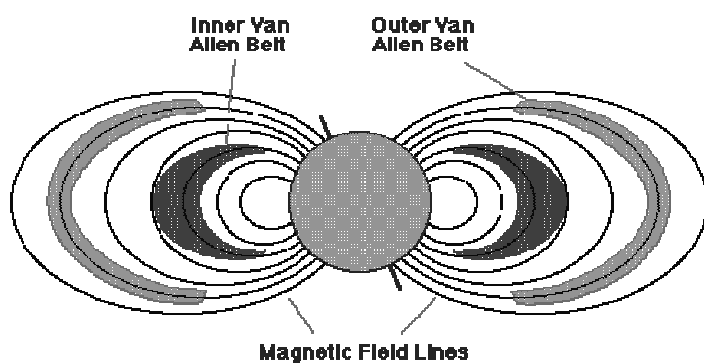
Ο Ήλιος σποραδικά εκπέμπει ποσότητες φορτισμένων σωματιδίων προς το διάστημα, κυρίως πρωτονίων και βαρέων ιόντων. Το φαινόμενο αυτό εξαρτάται από τη φάση των έντεκα ετών του ηλιακού κύκλου, σημειώνοντας ότι είναι πιο πιθανό να συμβεί κατά το ηλιακό μέγιστο, παρά κατά το ελάχιστο. Το πιο σημαντικό γεγονός ηλιακής καταιγίδας έγινε τον Αύγουστο του 1972, όπου τα εκπεμπόμενα, απ' τον Ήλιο, πρωτόνια, έφτασαν ενέργειες μέχρι τα 10MeV. Όσο αφορά στη δόση εκείνου του γεγονότος, αξίζει να σημειωθεί ότι αντιστοιχούσε με δόση κοσμικής ακτινοβολίας σε διάρκεια 200 ετών.

4. Παγιδευμένα σωματίδια απ' την Γη.

Τα ηλεκτρονικά συστήματα των δορυφόρων, που περιορίζονται στην περιφορά τους γύρω απ' τη Γη, η ακτινοβολία που έχει σημαντική επίδραση αποτελείται από ηλεκτρόνια και πρωτόνια, παγιδευμένα στο μαγνητικό πεδίο της Γης. Παγιδεύονται, επίσης, και βαριά ιόντα, αλλά οι ενέργειες τους είναι τόσο μικρές, ώστε να μπορούν να αντιμετωπίζονται εύκολα από τις τυπικές ασπίδες προστασίας που διαθέτουν οι δορυφόροι. Αντιθέτως, τα ηλεκτρόνια και τα πρωτόνια μπορούν να διαπεράσουν την ασπίδα και να προκαλέσουν προβλήματα στα ηλεκτρονικά στοιχεία.

Οι περιοχές που παγιδεύονται τα σωματίδια είναι κυρίως δύο, οι ονομαζόμενες ζώνες Van Allen. Η εσωτερική ζώνη βρίσκεται σε υψόμετρο που έχει εύρος από εκατοντάδες χιλιόμετρα έως 6000 km και συγκεντρώνει υψηλοενεργειακά πρωτόνια (δεκάδων MeV) και μεσαίας ενέργειας ηλεκτρόνια (50-1000 keV). Η εξωτερική ζώνη βρίσκεται σε υψόμετρο 60000 km και καταλαμβάνεται κυρίως από ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας.

Η ροή εισόδου των σωματιδίων εξαρτάται απ' το υψόμετρο, αλλά ενδεικτικά μπορεί να αναφερθεί ότι η ροή των ηλεκτρονίων με ενέργειες μεγαλύτερες των 100 keV φτάνουν μέχρι τα $10^8 \text{ p/cm}^2 \cdot \text{sec}$, ενώ των πρωτονίων με ενέργειες μεγαλύτερες των 500keV μπορούν να φτάσουν επίσης μέχρι τα $10^8 \text{ p/cm}^2 \cdot \text{sec}$.



Εικόνα 4-1.

Οι δύο ζώνες Van Allen, που οφείλονται στο μαγνητικό πεδίο της Γης, στις οποίες παγιδεύονται τα εισερχόμενα σωματίδια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

- [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

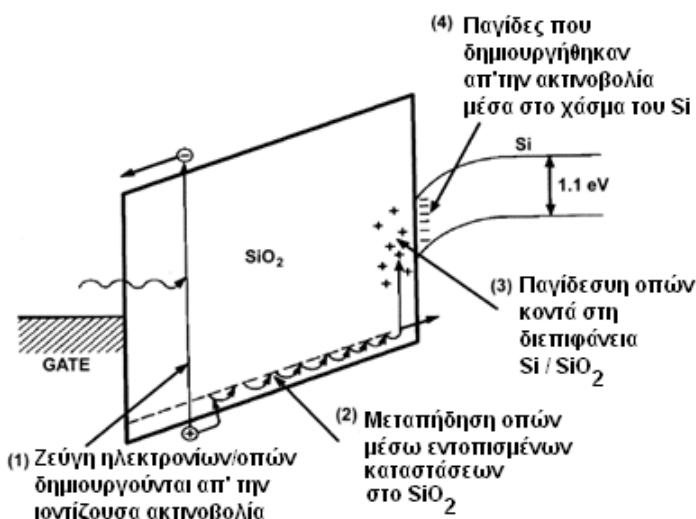
Επίδραση της ακτινοβολίας στο οξειδίο πυκνωτή MOS

5.1 Συνέπειες από την ακτινοβόληση πυκνωτή MOS

Ένα στοιχείο MOS προσβάλλεται από φορτισμένη ακτινοβολία ενέργειας ικανής να ιονίσει το οξειδίο του πυριτίου. Το φαινόμενο ονομάζεται “Total Dose Ionizing Effect” και το φορτίο που θα προκύψει μετά τον ιονισμό μέσα στον πυκνωτή, θα μεταβάλλει τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του, όπως η CV καμπύλη χωρητικότητας-τάσης και η τάση κατωφλίου.

5.1.1 Οι διαδοχικές φάσεις μετά την ακτινοβόληση του MOS

Ο ιονισμός του οξειδίου της πύλης του πυκνωτή απ’ την εισερχόμενη ακτινοβολία προκαλεί μια σειρά από γεγονότα, τα οποία φαίνονται στην εικόνα 5-1 και εξηγούνται αναλυτικά στη συνέχεια.



Εικόνα 5-1.

Οι διαδοχικές φάσεις μετά τον ιονισμό λόγω ακτινοβόλησης πυκνωτή MOS

- Φάση 1 : Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων/οπών .

Όταν η ιοντίζουσα ακτινοβολία διαπεράσει το οξείδιο, η ενέργεια που εναποτίθεται δημιουργεί ζεύγη ηλεκτρονίων/οπών (e/h pairs generation) . Η απαιτούμενη, αυτή, προσπίπτουσα ενέργεια ανά ζεύγος έχει μετρηθεί ότι είναι : $E_{\text{pair}} = 17 \pm 1 \text{ eV}$. Τα πρώτα ένα ή δύο picoseconds , ένα ποσοστό από τα ζεύγη ηλεκτρονίων/οπών επανασυνδέονται (recombination) . Αυτό το ποσοστό εξαρτάται κυρίως απ' το εφαρμοζόμενο πεδίο, επίσης απ' την ενέργεια και το είδος του προσπίπτοντος σωματιδίου . Στο SiO_2 , τα ηλεκτρόνια που δημιουργούνται είναι πιο ευκίνητα από τις οπές, και συλλέγονται από το ηλεκτρόδιο της πύλης σε χρόνους της τάξης των picoseconds . Οι οπές που δεν επανασυνδέονται είναι σχετικά λιγότερο ευκίνητες, και παραμένουν κοντά στις θέσεις δημιουργίας, προκαλώντας αρνητική μετατόπιση τάσης, για παράδειγμα στην τάση επίπεδων πλακών V_{FB} (flatband voltage) του MOS, ή στην τάση κατωφλίου V_{T} σε MOSFET . Αυτή η αρχική διαδικασία γέννησης ζευγών ηλεκτρονίων/οπών, άμεσης μερικής επανασύνδεσης και εξαγωγής ηλεκτρονίων, που καθορίζει το αρχικό θετικό φορτίο στο οξείδιο και συνεπώς την αρχική μέγιστη μετατόπιση της τάσης, αποτελεί τον πρώτο κύριο παράγοντα που θα διαμορφώσει τη συμπεριφορά του πυκνωτή MOS .

- Φάση 2 : Μετακίνηση οπών στο οξείδιο .

Σε θερμοκρασία δωματίου και στα επόμενα 10^{-7} sec έως και seconds, οι οπές που δεν επανασυνδέθηκαν μετακινούνται μέσα στο οξείδιο (hopping transport) προς το υπόστρωμα του πυριτίου. Αυτή η σύντομη διαδικασία μεταφοράς οπών είναι το δεύτερο φαινόμενο που θα επηρεάσει τα χαρακτηριστικά του πυκνωτή MOS. Βραχυπρόθεσμα, έχει ως ακόλουθο μια σύντομη ανάκτηση της τάσης, και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το εξωτερικά εφαρμοζόμενο πεδίο, τη θερμοκρασία, το πάχος του οξειδίου, και σε μικρότερο βαθμό την προϊστορία του οξειδίου . Ειδικότερα για τη θερμοκρασία, σε χαμηλότερες θερμοκρασίες ο χρόνος ολοκλήρωσης της μεταφοράς των οπών αυξάνεται .

- Φάση 3 : Παγίδευση οπών μέσα στο οξειδίο, κοντά στη διεπιφάνεια .

Όταν οι οπές φτάσουν κοντά στην διεπιφάνεια SiO_2/Si , ένα ποσοστό από αυτές συλλαμβάνονται από παγίδες, που παραμένει για μεγάλα χρονικά διαστήματα, από ώρες μέχρι χρόνια, προκαλώντας αρνητική μετατόπιση της τάσης . Αυτή η διαδικασία παγίδευσης των οπών κοντά στην διεπιφάνεια (deep hole trapping near SiO_2/Si interface) και η επακόλουθη χρονοβόρα ανόπτηση (annealing), αποτελεί την τρίτη συνέπεια της ακτινοβόλησης του MOS, η οποία εξαρτάται από την ποιότητα του οξειδίου, το εφαρμοζόμενο πεδίο και τη θερμοκρασία .

- Φάση 4 : Παγίδες διεπιφάνειας .

Τέταρτος και τελευταίος παράγοντας που επηρεάζει τις ηλεκτρικές ιδιότητες του πυκνωτή είναι η δημιουργία παγίδων στην ίδια την διεπιφάνεια SiO_2/Si . Αυτές είναι τοπικές καταστάσεις με ενεργειακές στάθμες μέσα στο χάσμα του πυριτίου . Η κατάληψή τους καθορίζεται από το επίπεδο Fermi στη διεπιφάνεια, αυξάνοντας την τάση, που εξαρτάται από το δυναμικό της επιφάνειας του πυριτίου. Γενικά, μπορεί να εμφανιστούν παγίδες είτε αμέσως μετά την πρόσπτωση της ακτινοβολίας, είτε με καθυστέρηση να δημιουργούνται παγίδες, για τα επόμενα χιλιάδες ή δεκάδες χιλιάδες δευτερόλεπτα, σε θερμοκρασία δωματίου. Το μέγεθος και το είδος των παγίδων διεπιφάνειας εξαρτώνται από την ποιότητα του οξειδίου, το εφαρμοζόμενο πεδίο και τη θερμοκρασία .

5.1.2 Μετατόπιση τάσης κατωφλίου

Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η σημαντικότερη συνέπεια των φορτίων που παραμένουν μέσα στο οξείδιο στον πυκνωτή MOS μετά την ακτινοβόληση είναι η μετατόπιση της τάσης κατωφλίου $V_T(t)$:

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

V_T^0 : είναι η τάση κατωφλίου πριν την ακτινοβόληση, που δίνεται από τη σχέση :

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

$\Delta V_T(t)$: είναι η μετατόπιση της τάσης κατωφλίου μετά την ακτινοβόληση, μεταβάλλεται με τον χρόνο και οφείλεται στο άθροισμα τριών συνεισφορών :

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

$\Delta V_{st}(t)$: η συνεισφορά της σύντομης (Short-Term) διαδικασίας μετακίνησης των οπών μέσα στο οξείδιο, αμέσως μετά τη δημιουργία τους .

$\Delta V_{OT}(t)$: η συνεισφορά των παγιδευμένων φορτίων μέσα στο οξείδιο (Oxide Trapped charge) .

$\Delta V_{IT}(t)$: η συνεισφορά των παγίδων διεπιφάνειας SiO₂/Si (Interface Trapped charge)

Ειδικότερα, οι παραπάνω συνεισφορές προκύπτουν απ' τις σχέσεις :

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

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

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

t_{ox} : το πάχος του οξειδίου

$C_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox}$: χωρητικότητα οξειδίου (ϵ_{ox} : διηλεκτρική σταθερά οξειδίου)

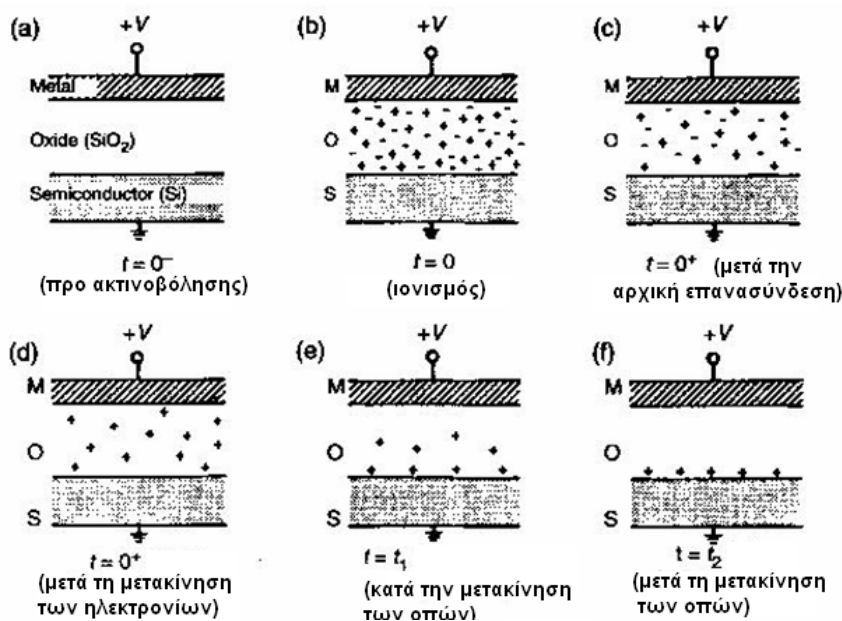
$n_h(x,t)$: η πυκνότητα των μεταφερόμενων οπών στο οξείδιο, που εξαρτάται από τη θέση και τον χρόνο .

$\Delta N_{OT}(t)$: η πυκνότητα των παγιδευμένων οπών στο οξείδιο, που εξαρτάται από το χρόνο .

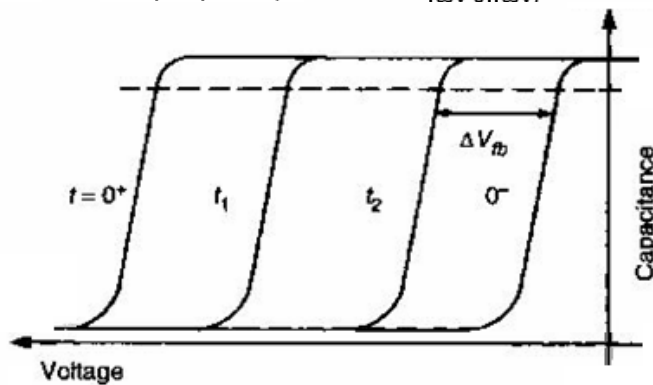
$\Delta Q_{IT}(t)$: το φορτίο που βρίσκεται παγιδευμένο στην διεπιφάνεια .

Στην εικόνα 5-2 παρουσιάζεται σε σχηματοποίηση το χρονικά εξελισσόμενο φαινόμενο της δημιουργίας και μεταφοράς οπών μέσα στο οξείδιο, μετά τον ιονισμό του απ' την προσπίπτουσα ακτινοβολία, όπως επίσης και η μετατοπιζόμενη χαρακτηριστική καμπύλη C-V (εικόνα 5-3).

- a) $t=0^-$: πριν την ακτινοβολία του πυκνωτή .
- b) $t=0$: η στιγμή που ακτινοβολείται ο πυκνωτής και δημιουργούνται τα ζεύγη ηλεκτρονίων/οπών.
- c) $t=0^+$: μετά από χρονικό διάστημα της τάξεως picoseconds, κάποια ζεύγη έχουν επανασυνδεθεί.
- d) $t=0^+$: τα ηλεκτρόνια έχουν συλλεχθεί από τη πύλη . Η καμπύλη C-V έχει μετατοπιστεί προς τα αριστερά, παρουσιάζοντας τη μέγιστη αρνητική μετατόπιση .
- e) $t=t_1$: στη μικρής διάρκειας φάση όπου οπές μετακινούνται προς το υπόστρωμα Si, ενώ κάποιες άλλες παγιδεύονται μέσα στο οξείδιο . Η καμπύλη C-V μετατοπίζεται προς τα δεξιά .
- f) $t=t_2$: στη μεγάλης διάρκειας φάση όπου οπές βρίσκονται παγιδευμένες κοντά στην διεπιφάνεια . Η καμπύλη C-V μετατοπίζεται περαιτέρω δεξιά .



Εικόνα 5-2. Σχηματοποίηση των φαινομένων που προκύπτουν μετά τον ιονισμό του οξειδίου MOS.



Εικόνα 5-3. Η χρονικά μεταβαλλόμενη μετατόπιση της τάσης V_{fb} του πυκνωτή MOS μετά την ακτινοβολία.

5.2 Δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων/οπών.

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

Το ποσοστό των οπών που διαφεύγουν από την επανασύνδεση, το οποίο καθορίζει και την τελική συνεισφορά των οπών εξαρτάται από δύο παράγοντες :

(α) το μέτρο του εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου μέσα στο οξείδιο, το οποίο προσπαθεί να διαχωρίσει τα φορτία, και (β) την αρχική γραμμική πυκνότητα (line density) των ζευγών ηλεκτρονίων/οπών . Η γραμμική πυκνότητα καθορίζεται από τη γραμμική μεταφορά ενέργειας – ΓΜΕ – της ακτινοβολίας (LET : Linear Energy Transfer), η οποία, προφανώς, είναι συνάρτηση της ενέργειας και του είδους της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, και είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη μέση απόσταση ανάμεσα στα ζεύγη . Όσο πιο μικρή είναι η μέση απόσταση μεταξύ των ζευγών, τόσο πιο μεγάλη η πιθανότητα να συμβεί επανασύνδεση, και συνεπώς τόσο μικρότερο το ποσοστό των οπών που θα επιβιώσουν τελικά μέσα στο οξείδιο .

5.2.1 Πυκνότητα οπών που επιζούν.

Η ενέργεια που χρειάζεται για τη γέννηση ενός ζεύγους αναφέραμε ότι έχει μετρηθεί :

$$E_{\text{pair}} = 17 \pm 1 \text{ eV} .$$

Για την απαιτούμενη δόση χρησιμοποιούμε την μονάδα μέτρησης :

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

Η πυκνότητα του οξειδίου του πυριτίου είναι περίπου : $d_{\text{SiO}_2} = 2.2 \text{ g/cm}^3$.

Μπορούμε να υπολογίσουμε την αρχική πυκνότητα των οπών που προκύπτουν απ' τον ιονισμό, ανά μονάδα δόσης, ως εξής :

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

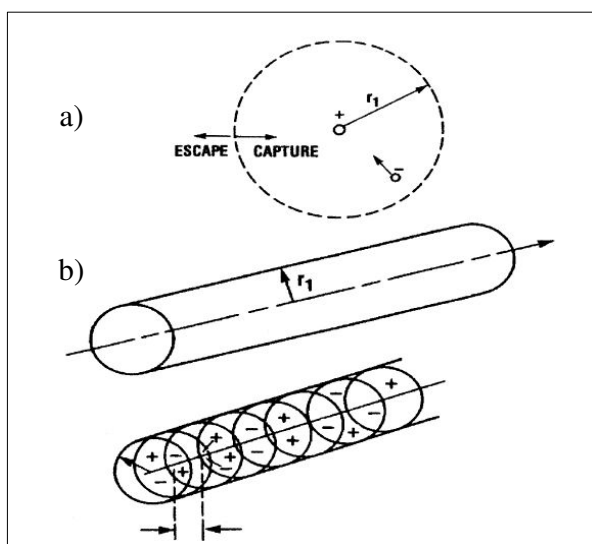
Δηλαδή $(8.1 \cdot 10^{12})$ οπές ανά κυβικό εκατοστό ανά δόση $\text{rad}(\text{SiO}_2)$ δημιουργούνται αρχικά μέσα στο οξείδιο . Αυτή η αρχική πυκνότητα, βέβαια, αμέσως μειώνεται ραγδαία, λόγω της άμεσης επανασύνδεσης κάποιων ηλεκτρονίων, προτού προλάβουν να συλληθούν από το ηλεκτρόδιο της πηγής και να εξαχθούν απ' το οξείδιο .

5.2.2 Μοντέλα δύο ακραίων περιπτώσεων

Υπάρχουν δύο ακραίες περιπτώσεις στην κατανομή των ζευγών αμέσως μετά τη δημιουργία τους, που περιγράφονται από τα ανάλογα μοντέλα :

- α) το μοντέλο των απομακρυσμένων ζευγών (geminate – separated e/h pairs – model) , και
- β) το μοντέλο των αλληλεπικαλυπτόμενων ζευγών (columnar – overlapping e/h pairs model)

Το χαρακτηριστικό μέγεθος που διακρίνει αυτές τις δύο περιπτώσεις είναι η μέση θερμική απόσταση (thermalization distance) μεταξύ του ηλεκτρονίου και της οπής, αφού έχουν χάσει την υπερβολική κινητική τους ενέργεια και έχουν έρθει σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας . Για το SiO_2 , η απόσταση αυτή είναι 8 nm .



Εικόνα 5-4.
Μοντέλα που περιγράφουν την κατανομή των ζευγών e/h αμέσως μετά τη δημιουργία τους στο οξείδιο.

α) Στο μοντέλο των απομακρυσμένων ζευγών, η απόσταση μεταξύ των ζευγών είναι πολύ μεγαλύτερη από τη μέση θερμική απόσταση ηλεκτρονίου/οπής . Τότε, το πρόβλημα της επανασύνδεσης το αντιμετωπίζουμε ως ενδεχόμενο μεταξύ ηλεκτρονίου/οπής του ίδιου ζεύγους . Η πιθανότητα να επανασυνδεθούν είναι ανάλογη της ελκτικής δύναμης Coulomb, αντιστρόφως ανάλογη του εφαρμοζόμενου εξωτερικού πεδίου που προσπαθεί να τα διαχωρίσει, όπως επίσης και μιας τυχαίας κίνησης λόγω θερμικών διακυμάνσεων στο περιβάλλον .

β) Στο μοντέλο των αλληλεπικαλυπτόμενων ζευγών, η μέση απόσταση μεταξύ των ζευγών είναι κατά πολύ μικρότερη της μέσης θερμικής απόστασης μεταξύ ηλεκτρονίου/οπής . Τότε, θεωρούμε τα ηλεκτρόνια και τις οπές σε μια κυλινδρική κατανομή γύρω από το ίχνος του διερχόμενου σωματιδίου. Η πιθανότητα να επανασυνδεθεί ένα φορτίο, σε αυτή την περίπτωση, γίνεται μεγαλύτερη από το πρώτο μοντέλο, αφού εδώ κάθε ξεχωριστό φορτίο αλληλεπιδρά με πολλά γειτονικά του αντίθετα φορτία .

Αυτά τα μοντέλα έχουν βρει πειραματικές επιβεβαιώσεις σε φιλμ οξειδίου του πυριτίου, όπου όπως έχει ήδη αναφερθεί η μέση θερμική απόσταση μεταξύ του ηλεκτρονίου και της οπής είναι 8nm .

Για παράδειγμα, μικρής ΓΜΕ (low-LET) σωματίδια, όπως μεγάλης ενέργειας ηλεκτρόνια, δημιουργούν αραιή κατανομή ζευγών κατά μήκος της τροχιάς τους . Ταιριάζει, έτσι, το μοντέλο των απομακρυσμένων ζευγών, αφού για ηλεκτρόνιο 1 MeV, η μέση απόσταση μεταξύ ζευγών προκύπτει κοντά στα 50 nm . (50 nm >> 8 nm)

Μεγάλης ΓΜΕ (high-LET) σωματίδια, όπως μικρής ενέργειας πρωτόνια, σωματίδια άλφα, ή βαριά ιόντα, δημιουργούν πυκνή κατανομή ζευγών κατά μήκος της τροχιάς τους . Ταιριάζει, έτσι, το μοντέλο των αλληλεπικαλυπτόμενων ζευγών, αφού για πρωτόνιο 1 MeV, η μέση απόσταση μεταξύ ζευγών προκύπτει κοντά στα 0.3 nm . (0.3 nm << 8nm)

5.2.3 Εκτίμηση της αρχικής μέγιστης μετατόπισης της τάσης V_T .

Έχουν μελετηθεί και οι ενδιάμεσες περιπτώσεις, ανάμεσα στα δύο ακραία μοντέλα που αφορούν στο ποσοστό $f_y(E_{ox})$ των οπών που επιβιώνουν από την αρχική επανασύνδεση (fractional yield) . Παρατηρείται η εξάρτηση αυτή από το είδος του σωματιδίου, όπως στις ακραίες περιπτώσεις των υψηλό-ενεργειακών ηλεκτρονίων (12 MeV), όπου το ποσοστό αυτό φτάνει το 100% , ενώ στα χαμηλό-ενεργειακά σωματίδια άλφα (2 MeV), το ποσοστό είναι εξαιρετικά μικρό. Επίσης, για τις ενδιάμεσες καταστάσεις, το ποσοστό αυξάνεται για μεγάλες εντάσεις πεδίου, αφού σε αυτό οφείλεται ο διαχωρισμός των φορτίων μεταξύ τους .

Γνωρίζοντας το ποσοστό $f_y(E_{ox})$, των οπών που επιβιώνουν της αρχικής επανασύνδεσης, και επίσης την αρχική πυκνότητα g_o των οπών που προκύπτουν απ' τον ιονισμό, ανά μονάδα δόσης, μπορούμε να υπολογίσουμε την αρχική (μέγιστη) μετατόπιση της τάσης κατωφλίου ΔV_T , τη χρονική στιγμή $t=0^+$. Υποθέτοντας ομοιόμορφη κατανομή των οπών που επιζούν μέσα στο οξειδίο, έχουμε ότι η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου θα είναι :

$$\Delta Q_h = q \cdot g_o \cdot t_{ox} \cdot f_y(E_{ox}) \cdot D \quad (\text{Coulomb} \cdot \text{cm}^{-2}) \quad (5.8)$$

όπου D : η δόση σε $\text{rad}(\text{SiO}_2)$

Έτσι, η αρχική μετατόπιση της τάσης προκύπτει ως εξής :

$$\begin{aligned} \Delta V_T(0^+) &= -\Delta Q_h / 2C_{ox} \\ &= - [q \cdot g_o \cdot t_{ox} \cdot f_y(E_{ox}) \cdot D] / 2C_{ox} \\ &= - 1.9 \cdot 10^{-8} \cdot t_{ox}^2 \cdot f_y(E_{ox}) \cdot D \end{aligned} \quad (5.9)$$

Παρατηρήσεις :

- Η μονάδα μέτρησης της ΔV_T είναι τα Volts, αν το πάχος t_{ox} είναι σε nm, και βέβαια η δόση D σε $\text{rad}(\text{SiO}_2)$.
- Το αρνητικό πρόσημο (-) οφείλεται στο ότι $\Delta Q_h > 0$, ενώ η τάση μετατοπίζεται προς τα αριστερά.
- $C_{ox} = \epsilon_{ox} / t_{ox}$, ενώ ο παράγοντας 2 έρχεται ως συνέπεια του κέντρου της κατανομής στο $t_{ox}/2$.
- Για το αριθμητικό αποτέλεσμα, οι παράγοντες : $g_o = 8.1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{rad}^{-1}$ και $q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.
- Η εξίσωση αυτή δείχνει την εξάρτηση της ΔV_T από το τετράγωνο του πάχους του οξειδίου, πράγμα που σημαίνει ότι λεπτότερο οξειδίο επιφέρει λιγότερο δραματικές αλλαγές στη συμπεριφορά της διάταξης, μετά την πρόσπτωση της ακτινοβολίας.

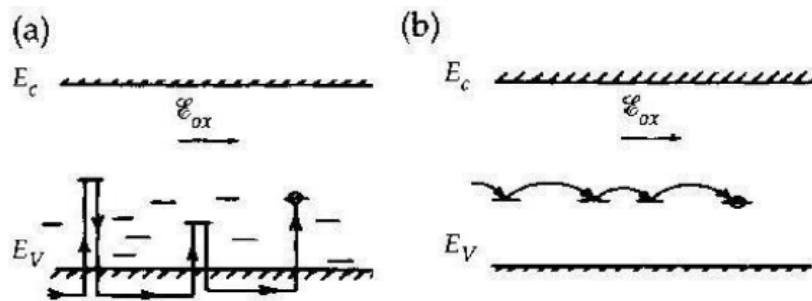
5.3 Μεταφορά φορτίων

Κατά τη φάση της μεταφοράς των οπών μέσα από το οξειδίο, η θετική τάση της πύλης τις κατευθύνει προς το υπόστρωμα του πυριτίου .

Οι μηχανισμοί αυτής της διαδικασίας έχουν μελετηθεί και είναι δύο :

α) Μεταφορά δια μέσου της ζώνης σθένους με ενδιάμεσες παγιδεύσεις (trap-mediated transport via valence band hole conduction) , και

β) Μεταφορά μέσα στο ενεργειακό χάσμα, μεταπηδώντας σε εντοπισμένες ενεργειακές καταστάσεις μέσω φαινόμενου σήραγγας (hopping transport via direct hole tunneling between localized trap sites within SiO₂ bandgap) .



Εικόνα 5-5.

Η μεταφορά των φορτίων.
(α) Δια μέσου της Ζ.Σ. με ενδιάμεσες παγίδες.

(β) Μέσα στο ενεργ. χάσμα μεταπηδώντας σε ενεργειακές καταστάσεις μέσω σήραγγας.

Ο χρόνος ημίσειας αποκατάστασης τάσης εκτιμάται απ' τη σχέση :

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

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

Για καθαρό, καλής ποιότητας SiO₂ : $t_s^0 = 10^{-22}$ s., $a=1$ nm, $\alpha=0.25$, $\Delta_0=0.65$ eV , $b= 0.05$ eV/MV/cm

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

(1) Το σχήμα της δεν εξαρτάται από μεταβολές στη θερμοκρασία, το εξωτερικό πεδίο ή το πάχος του οξειδίου . Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν μόνο το πόσο σύντομα ή αργά θα αποκατασταθεί η τάση και θα μηδενιστεί η ΔV_T .

(2) Η μεταφορά αυτή ενεργοποιείται βασικά από το εφαρμοζόμενο πεδίο .

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

(4) Ο απαιτούμενος χρόνος μεταφοράς παρουσιάζει κάποια εκθετική εξάρτηση με το πάχος του οξειδίου .

5.4 Οπές παγιδευμένες κοντά στην διεπιφάνεια

Κοντά στην διεπιφάνεια SiO₂/Si υπάρχει ένα στρώμα μη στοιχειομετρικού οξειδίου (Si₂O₃, SiO), που οφείλεται σε ατελή οξείδωση του πυριτίου σε εκείνη την περιοχή .

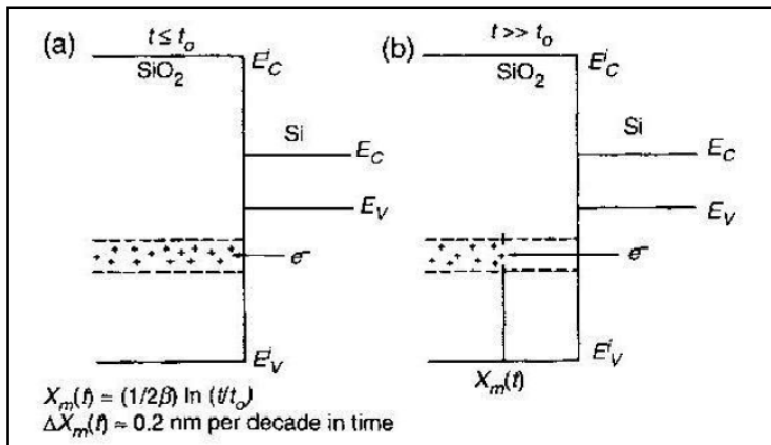
Η ανόπτηση του παγιδευμένου, κοντά στην διεπιφάνεια, φορτίου, εξαρτάται από το χρόνο, τη θερμοκρασία, και το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο .

Η μηχανισμοί είναι δύο :

- α) Φαινόμενο σήραγγας (tunneling), και
- β) Θερμική διέγερση (thermal excitation)

α) Μέσω φαινομένου σήραγγας, ηλεκτρόνια από το υπόστρωμα του πυριτίου μετακινούνται στο οξείδιο, αδρανοποιώντας τις παγιδευμένες οπές . Η πιθανότητα σήραγγας είναι εκθετική συνάρτηση του βάθους στο οξείδιο. Θα υπάρχει θέση μέσα στο οξείδιο για κάθε χρονική στιγμή, όπου όλες οι οπές στα αριστερά δεν θα έχουν αδρανοποιηθεί . Αυτή η θέση λέγεται **μέτωπο σήραγγας** (tunneling front), και παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από $\ln t$:

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

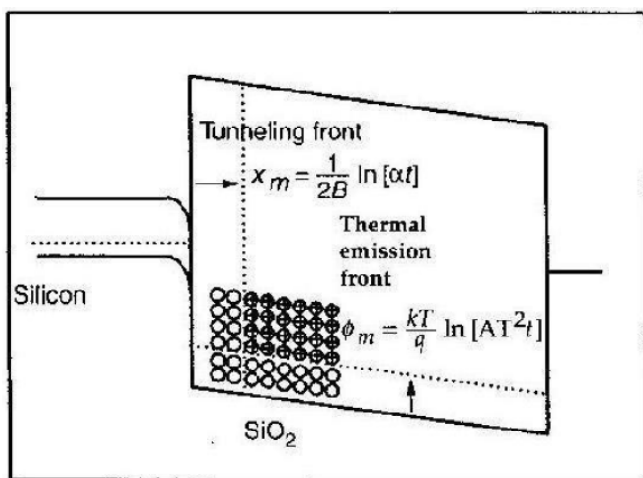


Εικόνα 5-6.
Αδρανοποίηση παγιδευμένων οπών μέσω μετώπου σήραγγας.

β) Αδρανοποίηση οπών μέσω θερμικής διέγερσης ηλεκτρονίων : **μέτωπο θερμικής διέγερσης** (thermal excitation front) . Παρουσιάζει γραμμική εξάρτηση από $\ln t$, αλλά και εξάρτηση από θερμοκρασία T :

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

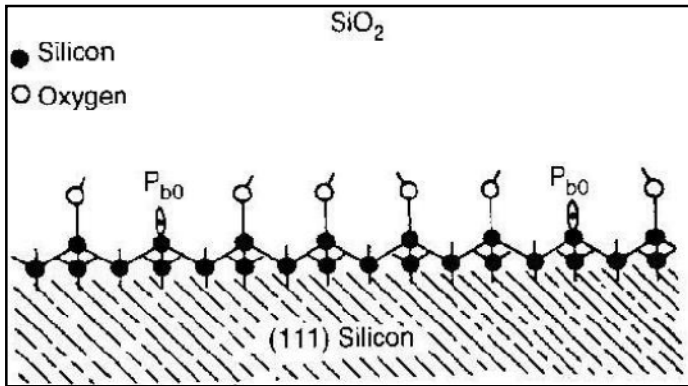
Τελικά, έχουμε τη συνολική συνεισφορά και των δύο μετώπων, η οποία παρουσιάζεται στο σχήμα της εικόνας 5-7. Κοντά στη θερμοκρασία δωματίου (RmT) έως και 75°C , το φαινόμενο σήραγγας κυριαρχεί, και η αποκατάσταση ΔV_T της τάσης παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά. Για μεγαλύτερες θερμοκρασίες, από τους $75-100^\circ\text{C}$ και πάνω αρχίζει να γίνεται σημαντικός ο μηχανισμός της θερμικής διέγερσης. Γενικά, στην αρχή παρατηρείται μια ταχύτατη αποκατάσταση της τάσης (άρα αδρανοποίηση των παγίδων), ενώ για μεγάλους χρόνους (μετά τα 1-10 sec) έρχεται ένα είδους κορεσμού, συνεπώς καταλαβαίνει κανείς ότι πρόκειται για μια εξαιρετικά αργή διαδικασία .



Εικόνα 5-7.

Η συνεισφορά των δύο μετώπων αδρανοποίησης των παγιδευμένων στο οξείδιο παγίδων, του μετώπου σήραγγας και του μετώπου θερμικής διέγερσης.

Οι αύξηση των διεπιφανειακών παγίδες έχει, επι πλέον, σχετιστεί με τα λεγόμενα P_b κέντρα . Τα P_b κέντρα είναι άτομα Si στη διεπιφάνεια Si/SiO₂, που είναι συνδεδεμένα με 3 άτομα Si μέσα στο υπόστρωμα, και στην πλευρά του οξειδίου αντί για Οξυγόνο, υπάρχει ελεύθερος ένα δεσμός ηλεκτρονίου – παγίδα .



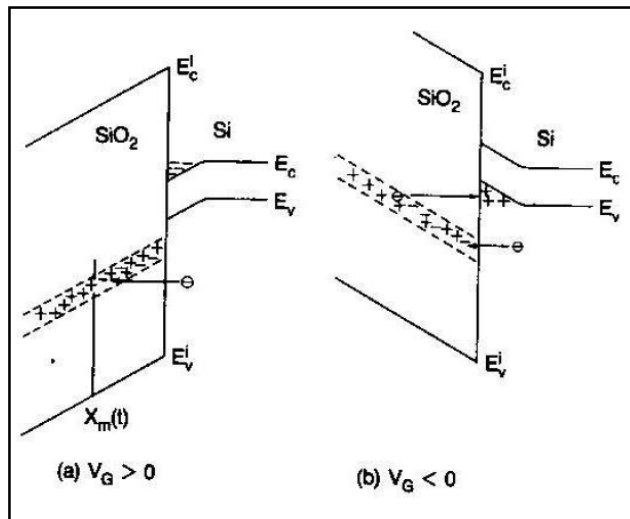
Εικόνα 5-8.

Τα P_b κέντρα - παγίδες στη διεπιφάνεια Si/SiO₂.

5.4.1 Το φαινόμενο της αντίστροφης ανόπτησης.

Ένας πυκνωτής MOS ακτινοβολείται, και έπειτα, υπό θετική τάση πύλης σε κάποια υψηλή θερμοκρασία επαναφέρεται η τάση κατωφλίου. Αν, στη συνέχεια, εφαρμόσουμε αρνητική τάση πύλης, παρατηρείται επιστροφή κάποιου σημαντικού ποσοστού πρώην “αδρανοποιημένων” παγίδων, σε σύντομο χρονικό διάστημα, με επακόλουθο την εκ νέου πτώση της τάσης κατωφλίου (reverse annealing) .

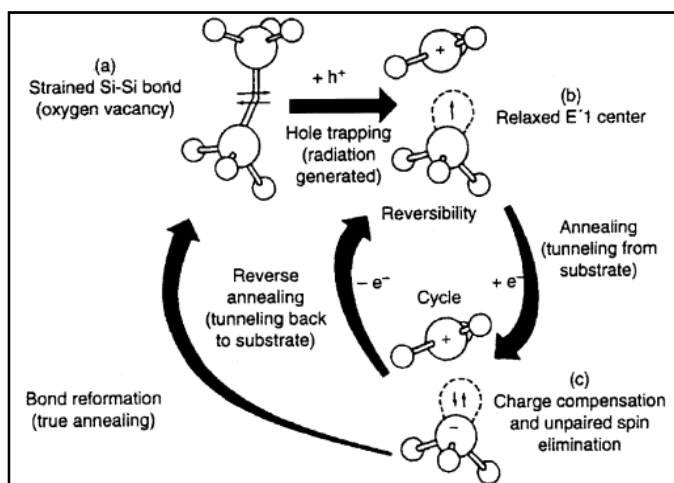
Αυτό σημαίνει ότι η αρχική ανόπτηση δεν ήταν “πραγματική”, με την έννοια ότι οι παγίδες δεν εξαφανίστηκαν, αλλά ουδετεροποιήθηκαν ηλεκτρικά. Σε κάθε κύκλο θετικής/αρνητικής πόλωσης πύλης η μετατόπιση της τάσης διορθώνεται και επιστρέφει, αν και σε κάθε κύκλο φαίνεται να πραγματοποιείται ένα σημαντικό μέρος “πραγματικής” ανόπτησης. Δεν παρουσιάζουν, όμως, την ίδια ασταθή συμπεριφορά όλα τα δείγματα οξειδίου στην αρνητική πόλωση της πύλης, εξαρτάται από την ποιότητα και άλλα χαρακτηριστικά του υλικού . Η μεταφορά του φορτίου δείχνει να έχει εξάρτηση με το $\ln t$, πράγμα που σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια που κατέλαβαν τις παγίδες, επιστρέφουν πίσω στο οξείδιο μέσω φαινομένου σήραγγας .



Εικόνα 5-9.

(α) Η θετική τάση πύλης αδρανοποιεί τα θετικά παγιδευμένα φορτία προσθέτοντας ηλεκτρόνια .

(β) Η αρνητική τάση πύλης ενδέχεται να επαναφέρει τα θετικά παγιδευμένα φορτία – reverse annealing.



Εικόνα 5-10

Μοντέλο που εξηγεί το φαινόμενο της «αντίστροφης ανόπτησης» - “Reverse annealing” (Lelis et al)

Το μοντέλο που εξηγεί το φαινόμενο της «αντίστροφης ανόπτησης» παρουσιάζεται στην εικόνα 5-10. Η οπή που προκύπτει απ’ την ακτινοβολία έχει σπάσει τον ασθενή δεσμό Si-Si , και το ένα άτομο του Si καθίσταται ουδέτερο, ενώ το άλλο θετικά φορτισμένο. Πολώνοντας θετικά την πύλη, εισάγουμε ηλεκτρόνια στο οξειδίο, όπως εξηγήθηκε, κατά την ανόπτηση. Το ηλεκτρόνιο δεν συλλαμβάνεται από το θετικό άτομο της παγίδας, αλλά από το ουδέτερο. Έτσι, δημιουργείται ένα δίπολο, όπου βέβαια το συνολικό φορτίο του συστήματος γίνεται ουδέτερο, αλλά ο δεσμός Si-Si δεν ανασχηματίζεται αναγκαστικά. Αν οι άκρες του διπόλου, δηλαδή τα δύο άτομα Si είναι αρκετά κοντά, ο σπασμένος δεσμός θα επανασυνδεθεί λόγω ηλεκτροστατικής έλξης, κι έτσι θα προκύψει η λεγόμενη “πραγματική ανόπτηση” (real annealing). Αλλιώς, το ασταθές αυτό διπολικό σύστημα θα παραμείνει, με αποτέλεσμα σε αρνητική τάση να επιστρέψει το ασύζευκτο ηλεκτρόνιο μέσω φαινομένου σήραγγας πίσω στο οξειδίο, και να επανεμφανιστεί το παγιδευμένο θετικό φορτίο. Υπάρχει, βέβαια, και η πιθανότητα λόγω τυχαίας θερμικής κίνησης μεταξύ των δύο ατόμων, να προκύψει σταθερό σύστημα και αποκατάσταση .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

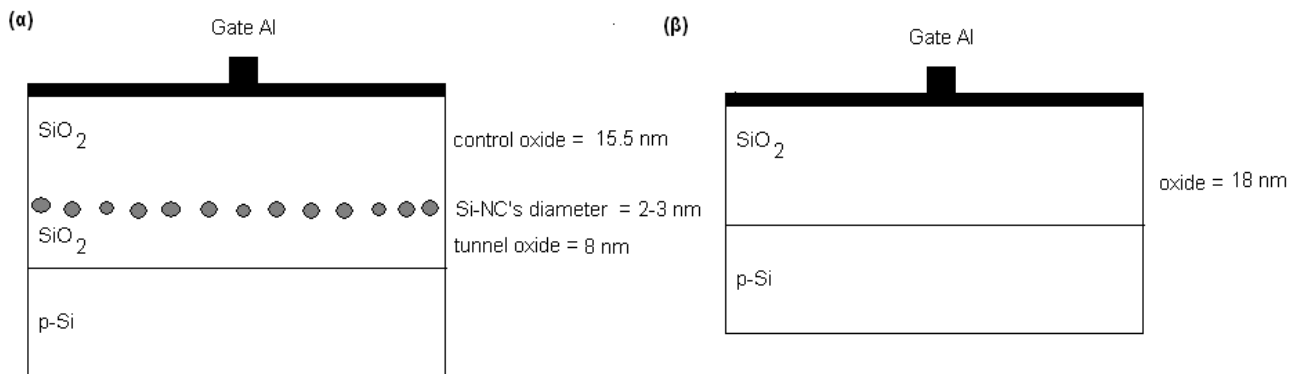
- [1] T.P. Ma and P. V. Dressendorfer , “Ionizing radiation effects in MOS devices and circuits”, Wiley, 1989
- [2] T.R. Oldham, “Ionizing radiation effects in MOS oxides” , World Scientific, 1999.
- [3] E.Verrelli, D.Tsoukalas, M.Kokkoris, R.Vlastou, P.Dimitrakis, P.Normand, “*Proton radiation effects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

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Ακτινοβολήση με πρωτόνια 7 MeV NC-MOS πυκνωτών.

6.1 Τα δείγματα του πειράματος .

Για την εργασία αυτή χρησιμοποιήθηκαν πυκνωτές MOS που είχαν ήδη κατασκευαστεί στο τμήμα Μικροηλεκτρονικής του Δημόκριτου., με εμφυτευμένα νανοσωματίδια Si, και απλοί πυκνωτές MOS αναφοράς, χωρίς νανοσωματίδια . Ο ημιαγωγός του υποστρώματος των πυκνωτών αυτών είναι p-type Si με προσανατολισμό (100) . Στους εμφυτευμένους πυκνωτές, το οξείδιο ελέγχου (control oxide) έχει πάχος περίπου 15.5nm , τα νανοσωματίδια διάμετρο 2-3nm σε πυκνότητα $1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$, το οξείδιο σήραγγας (tunnel oxide) 8nm και το μέταλλο της πύλης είναι αλουμίνιο πάχους 500nm περίπου . Στους πυκνωτές αναφοράς το συνολικό θερμικό οξείδιο που αναπτύχθηκε έχει πάχος 18nm .

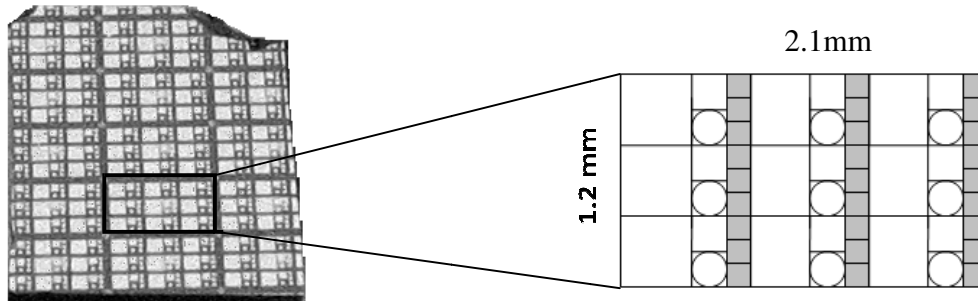


Εικόνα 6-1.

(α) Η διατομή των πυκνωτών MOS με εμφυτευμένα νανοσωματίδια Si .

(β) Η διατομή των πυκνωτών αναφοράς MOS .

Τα δισκία των MOS χωρίζονται σε blocks , και κάθε block αποτελείται από 3x3 τετράγωνα. Στο κάθε τετράγωνο βρίσκεται ένας πυκνωτής 400x400 μm , ένας πυκνωτής 200x200 μm , ένας κυκλικός διαμέτρου 110 μm και τρεις μικροί πυκνωτές 100x100 μm , τους οποίους και χρησιμοποιήσαμε για τις μετρήσεις στην εργασία αυτή .

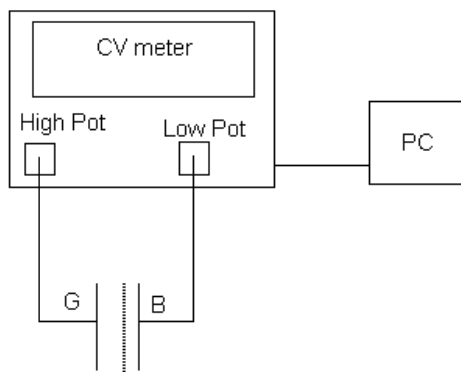


Εικόνα 6-2.

Το δισκίο με τους πυκνωτές MOS . Κάθε block αποτελείται από 27 πυκνωτές 100 μm x 100 μm .

6.2 Συνδεσμολογίες πειραματικών διατάξεων για τις ηλεκτρικές μετρήσεις.

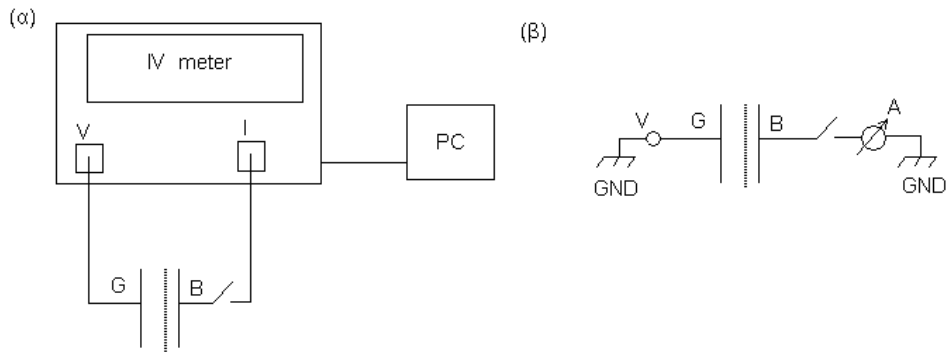
Οι μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο ηλεκτρικού χαρακτηρισμού που βρίσκεται στο κτήριο Φυσικής του Ε.Μ.Π. Κάθε δείγμα τοποθετείται σε μια μεταλλική βάση και με τη βοήθεια μικροσκοπίου γίνονται οι απαραίτητες συνδέσεις, ώστε να έρθουν σε επαφή οι ακροδέκτες των πυκνωτών με ειδικές μεταλλικές βελόνες, οι οποίες οδηγούν στα ανάλογα μετρητικά όργανα. Για να λάβουμε την καμπύλη εξάρτησης της χωρητικότητας C του πυκνωτή σε συνάρτηση με την τάση V που εφαρμόζεται στα άκρα του, χρησιμοποιήσαμε καπασιτόμετρο με την παρακάτω συνδεσμολογία :



Εικόνα 6-3.

Συνδεσμολογία πειραματικής διάταξης για CV μέτρηση πυκνωτή μνήμης MOS.

Για να λάβουμε την καμπύλη εξάρτησης της έντασης του ρεύματος διαρροής I του πυκνωτή σε συνάρτηση με την τάση V που εφαρμόζεται στα άκρα του, χρησιμοποιήσαμε αμπερόμετρο σε σειρά με τον πυκνωτή, σύμφωνα με την παρακάτω συνδεσμολογία :

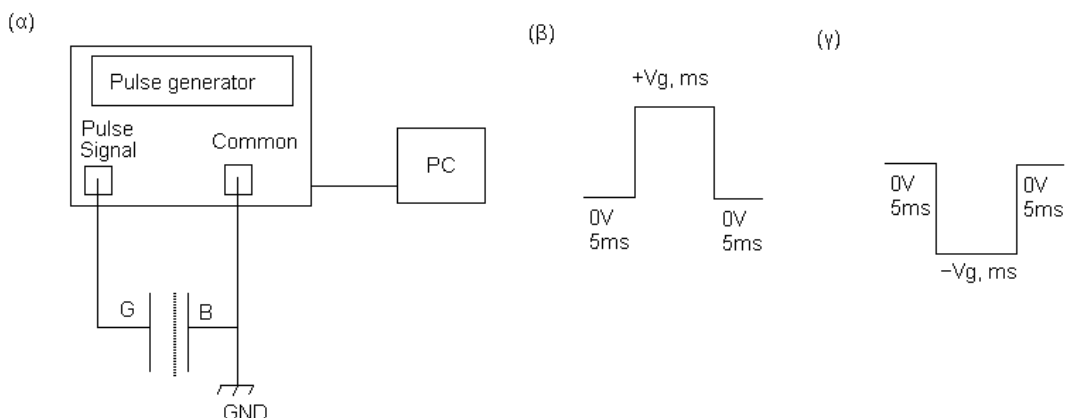


Εικόνα 6-4.

(α) Η πειραματική διάταξη για IV μέτρηση πυκνωτή μνήμης MOS.

(β) Η αντίστοιχη συνδεσμολογία του κύκλωματος για μέτρηση IV.

Για να προγραμματίσουμε τη μνήμη, εφαρμόζουμε έναν τετραγωνικό παλμό, ώστε να πολώσουμε θετικά ή αρνητικά την πύλη. Χρησιμοποιούμε παλμογεννήτρια, σύμφωνα με την παρακάτω συνδεσμολογία :



Εικόνα 6-5.

(α) Η πειραματική διάταξη για εφαρμογή παλμού προγραμματισμού της μνήμης NC-MOS.

(β) Ο τετραγωνικός παλμός εγγραφής – Write .

(γ) Ο τετραγωνικός παλμός διαγραφής – Erase.

6.3 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός και προγραμματισμός πριν την ακτινοβόληση .

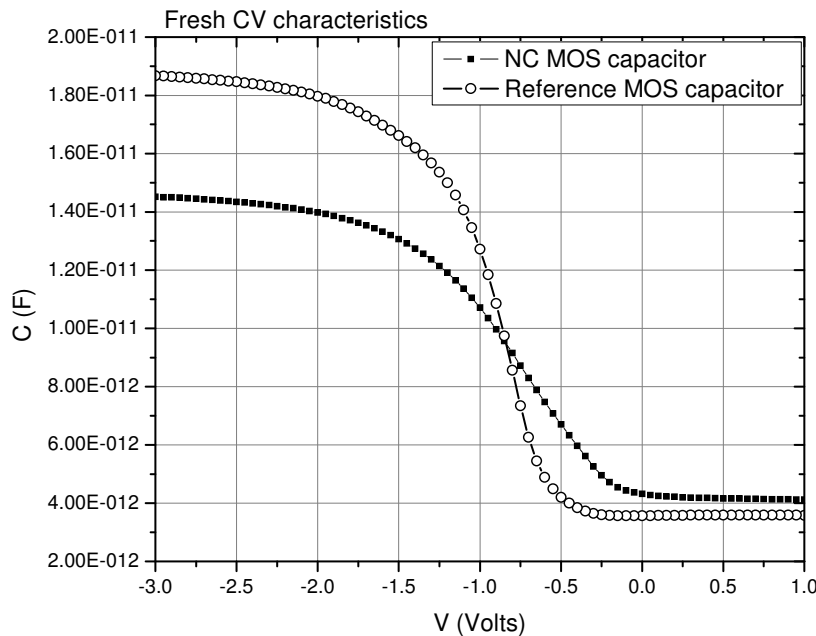
Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των πυκνωτών των δειγμάτων περιλαμβάνει κυρίως την μέτρηση της CV καμπύλης με την εκτίμηση του πάχους του οξειδίου απ' την τιμή της χωρητικότητας, την μέτρηση της IV καμπύλης και μαζί την εκτίμηση της τάσης κατάρρευσης του οξειδίου.

Απ' την χαρακτηριστική καμπύλη CV (εικόνα 6-6) των εμφυτευμένων με νανοσωματίδια πυκνωτών (δείγματα XI – NC MOS) και των πυκνωτών αναφοράς (δείγματα XR – Ref MOS) , εκτιμούμε τη χωρητικότητα του οξειδίου: $C_{ox,NC-MOS}=14.5 \text{ pF}$ κι αντίστοιχα $C_{ox,Ref-MOS}= 18.5\text{pF}$.

Μπορούμε, έτσι, να επαληθεύσουμε το πάχος του οξειδίου και για τα δύο δείγματα (το οποίο έχει ήδη αναφερθεί ότι κατασκευάστηκε να είναι περίπου $d_{XI}=25.5\text{nm}$ και $d_{XR}=18\text{nm}$), απ' την σχέση:

$$d_{ox} = \frac{A \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot SiO_2}{C_{ox}} \quad (6.1)$$

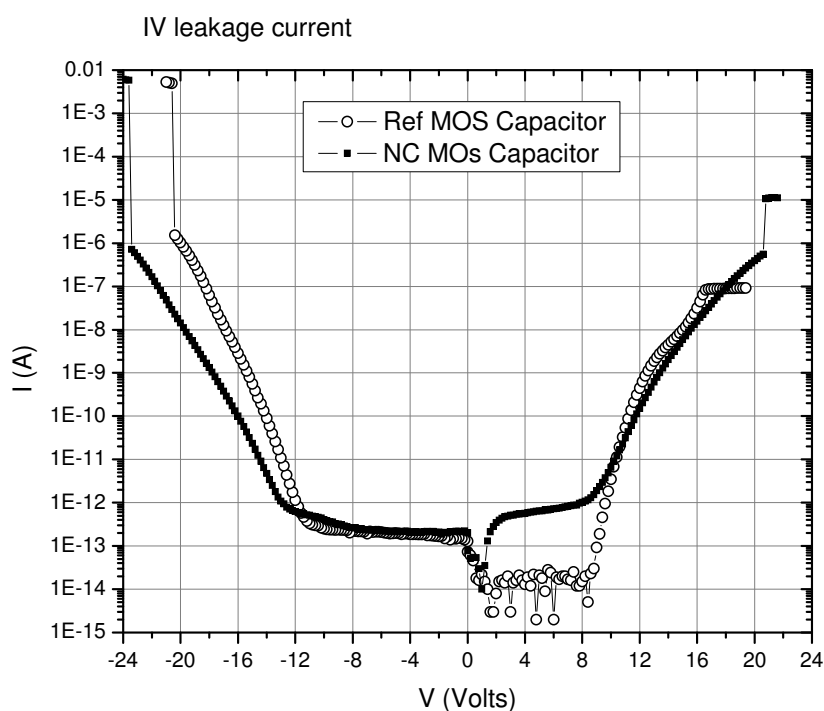
Αντικαθιστώντας το εμβαδόν του πυκνωτή: $A=10^{-8} \text{ m}^2$, τη διηλεκτρική σταθερά του κενού: $\epsilon_0=8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$, τη διηλεκτρική σταθερά του SiO_2 : $\epsilon_r = 3.9$, και υπολογίζουμε ότι το πάχος του οξειδίου θα πρέπει να είναι περίπου : $d_{ox-XI}=24 \text{ nm}$. και $d_{ox-XR}= 18.5 \text{ nm}$, τιμές που πράγματι πλησιάζουν τις αναμενόμενες.



Εικόνα 6-6.

Η χαρακτηριστική CV καμπύλη NC MOS πυκνωτή και MOS αναφοράς χωρίς εμφυτευμένα νανοσωματίδια Si.

Στην εικόνα 6-7 παρουσιάζεται η καμπύλη IV των πυκνωτών με τα νανοσωματίδια Si, και αυτών χωρίς, τόσο για θετικές, όσο και για αρνητικές τάσεις πόλωσης της πύλης. Παρατηρούμε ότι ρεύμα διαρροής αρχίζουμε να μετράμε κοντά στα +/-10V, και μπορούμε να εκτιμήσουμε την τάση κατάρρευσης του οξειδίου (break down Voltage) γύρω στα +/-20V . Η τιμή αυτή επαληθεύει την θεωρητική αναμενόμενη προσέγγιση των 10-15 MV/cm που συζητήθηκε στο (κεφάλαιο), η οποία αντιστοιχεί περίπου σε μια τάση κατάρρευσης 1-1.5 Volt ανά 1 nm πάχος οξειδίου.

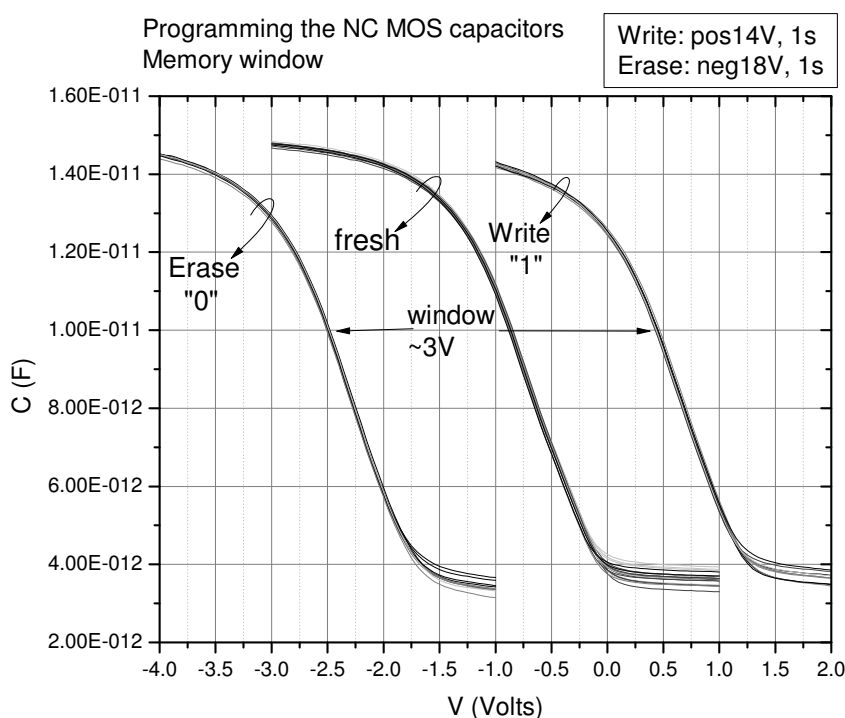


Εικόνα 6-7.

Η καμπύλη IV (ρεύματος διαρροής – τάσης) για NC MOS πυκνωτή και MOS αναφοράς χωρίς εμφυτευμένα νανοσωματίδια Si, για θετικές και αρνητικές τιμές τάσης της πύλης, μέχρι τη διηλεκτρική κατάρρευση του οξειδίου.

Όσο αφορά στον προγραμματισμό των μνημών, το παράθυρο μνήμης είχε ήδη βρεθεί για τις ίδιες μνήμες από προηγούμενη μελέτη που δημοσιεύτηκε [1]. Εμείς χρησιμοποιήσαμε ξεχωριστό προγραμματισμό για κάθε πειραματική έρευνα, συγκεκριμένα :

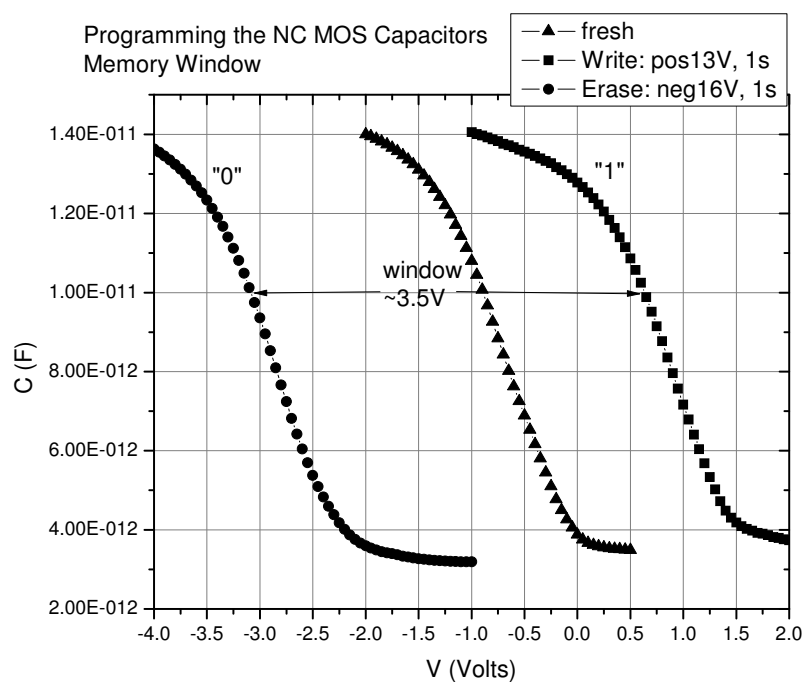
(A) Στο κομμάτι της έρευνας πάνω στην μετατόπιση της τάσης V_{fb} , για αρχικά προγραμματισμένες μνήμες, που ακτινοβολούνται έπειτα από τη δέσμη πρωτονίων, προτιμήθηκαν οι παλμοί προγραμματισμού : Write (+14V, 1s) και Erase (-18V, 1s) . Στην εικόνα 6-8 φαίνεται το γράφημα των χαρακτηριστικών CV καμπυλών, πριν τον προγραμματισμό (fresh), έπειτα από τον θετικό παλμό και έπειτα από τον αρνητικό παλμό. Το παράθυρο μνήμης προκύπτει περίπου 3V. Έχουν παρουσιαστεί οι καμπύλες 20 συνολικά πυκνωτών, οι 10 απ' αυτούς προγραμματίστηκαν στην κατάσταση "1", οι υπόλοιποι 10 στην κατάσταση "0" .



Εικόνα 6-8.

Το παράθυρο μνήμης που προκύπτει απ' τις χαρακτηριστικές CV. Προγραμματισμός 20 πυκνωτών στην κατάσταση W: (+14V, 1s) και στην E: (-18V, 1s).

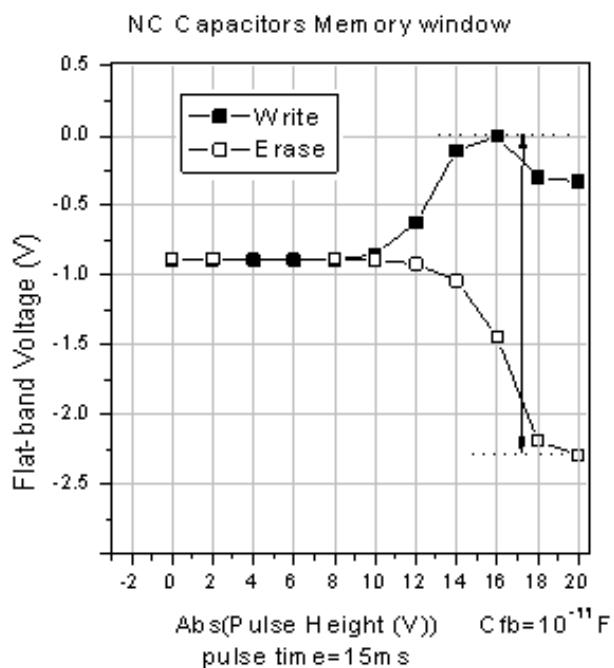
(B) Για το μέρος της έρευνας πάνω στον χρόνο κατακτάτησης φορτίου (retention time), χρησιμοποιήθηκε άλλος προγραμματισμός της μνήμης, με λίγο μεγαλύτερο παράθυρο γύρω στα 3.5V. Ο παλμός +13V έδωσε την κατάσταση εγγραφής “1”, και ο αρνητικός παλμός -16V την κατάσταση διαγραφής “0”.



Εικόνα 6-9.

Παράθυρο μνήμης για παλμούς διάρκειας 1 s. Ο προγραμματισμός έγινε με παλμό εγγραφής +13V, και παλμό διαγραφής -16V.

(Γ) Για να πραγματοποιήσουμε τη μελέτη της αντοχής της μνήμης κατά τον επαναπρογραμματισμό (endurance), θέλαμε μικρούς χρόνους διάρκειας παλμών. Έτσι, δοκιμάσαμε παλμούς διάρκειας 15ms, οπότε ερευνήσαμε από την αρχή το παράθυρο μνήμης, και τα αποτελέσματα φαίνονται στο γράφημα 6-10. Παρατηρούμε ότι ικανοποιητικό παράθυρο 2V-2.5V έχουμε για τάση εγγραφής +14V και τάση διαγραφής -20V.



Εικόνα 6-10.

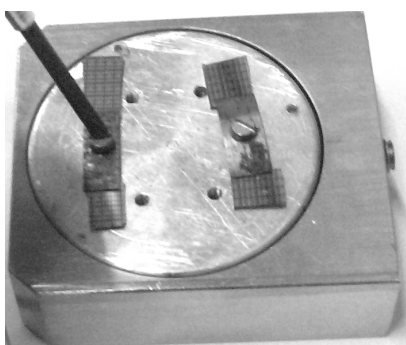
Μελέτη του παράθυρου μνήμης με παλμούς διάρκειας 15 ms., για διαφορετικές τιμές τάσης W/E παλμών. Επιλέγουμε για εγγραφή: $V_W = +16V$ και διαγραφή: $V_E = -20V$, που θα μας δώσει ένα παράθυρο γύρω στα 2V-2.5V.

6.4 Ακτινοβολήση δειγμάτων .

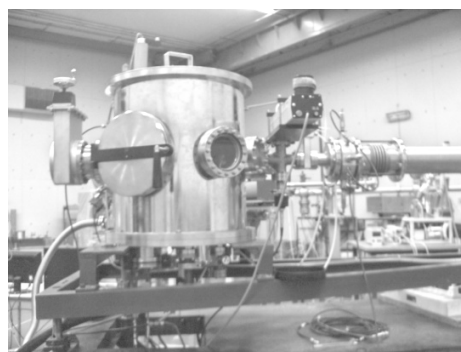
Τα δείγματα ακτινοβολήθηκαν με δέσμη πρωτονίων (^1H beam) στον επιταχυντή σωματιδίων τύπου TANDEM στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ».

Πριν την ακτινοβολήση τα δισκία προσαρμόστηκαν επάνω σε μια μεταλλική βάση (εικόνα 6-11(α)), η οποία στη συνέχεια τοποθετήθηκε ως στόχος, μέσα στο θάλαμο που προσπίπτει η δέσμη (εικόνα 6-11(β)). Προηγουμένως δε, είχαμε μετρήσει τις διαστάσεις της κηλίδας, αφού πρώτα την κατευθύνουμε ώστε να αλλοιώσει ένα κομμάτι ειδικού θερμογραφικού χαρτιού.

(α)



(β)



Εικόνα 6-11.

(α) Η τοποθέτηση των δισκίων στη βάση του στόχου .

(β) Ο θάλαμος - στόχος της δέσμης πρωτονίων, σε υψηλό κενό .

Ο τρόπος για να κατευθυνθεί κάθε φορά η δέσμη στην επιθυμητή περιοχή των δειγμάτων έγινε με τη βοήθεια ηλεκτρονικού συστήματος οριζόντιας και κάθετης μετατόπισης του στόχου, και ανακλώμενης σε αυτό ακτίνας Laser, ώστε να ελεγχθεί με το μάτι το σημείο ακτινοβολήσης.

Ύστερα, έχοντας γνώση του ποσού του προσπίπτοντος φορτίου ανά 100 παλμούς σωματιδίων, όπως επίσης και το εμβαδό επιφάνειας της κηλίδας της δέσμης, μπορέσαμε να ρυθμίσουμε την επιθυμητή δόση, δηλαδή το ποσό των προσπίπτοντων σωματιδίων ανά μονάδα επιφάνειας (p/cm^2).

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δείγματα των πυκνωτών MOS που λειτουργούν ως μνήμες νανοσωματιδίων, μαζί με τους αντίστοιχους πυκνωτές αναφοράς . Κάθε ζευγάρι ακτινοβολήθηκε με την ίδια δόση ($10^{12} - 10^{15} \text{ p}/\text{cm}^2$) , ενώ πρέπει να σημειωθεί ότι η κηλίδα της δέσμης για τα δείγματα 17, 18 ήταν 1.5 περίπου φορά μεγαλύτερη απ' αυτή των δειγμάτων 15, 16.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που πρέπει να ληφθεί υπόψη, και καθιστά τα αποτελέσματα μεταξύ των δόσεων επισφαλώς συγκρίσιμα, είναι ο διαφορετικός ρυθμός ακτινοβολήσεως των δειγμάτων. Τεχνικοί λόγοι δεν μας επέτρεψαν να έχουμε το ίδιο ρεύμα πρόσπτωσης των πρωτονίων (Rate), ενώ θα έπρεπε να είναι σταθερό, και αυτή η διαφορά καθιστά προβληματική την σύγκριση των μετρήσεων των δειγμάτων μεταξύ τους. Για τα μεν δείγματα 15, 16 το ρεύμα πρωτονίων ήταν $3\text{nA} = 3 \cdot 10^{-9} \text{ p/sec}$, ενώ για τα δείγματα 17, 18 το ρεύμα πρωτονίων ήταν $10 \text{ nA} = 10 \cdot 10^{-9} \text{ p/sec}$. Παρ' όλα αυτά, κάποια συγκριτικά ποιοτικά συμπεράσματα αλλά και ποσοτικά μεγέθη μπορούν να συζητηθούν στα πλαίσια του ερευνητικού ενδιαφέροντος, αλλά με κάθε επιφύλαξη.

Ακτινοβολήση με πρωτόνια ενέργειας 7 MeV					
πυκνωτές με NC	πυκνωτές αναφοράς	Δόση (p/cm²)	Δόση (Mrad(SiO₂))	Ρεύμα (nA)	Διαστάσεις κηλίδας δέσμης
XI 15	XR 15	$1 \cdot 10^{12}$	2.46	3	0.6cm x 0.6cm = 0.36 cm ²
XI 16	XR 16	$1 \cdot 10^{13}$	24.6		
XI 17	XR 17	$1 \cdot 10^{14}$	246	10	0.8cm x 0.7cm = 0.56 cm ²
XI 18	XR 18	$1 \cdot 10^{15}$	2460		

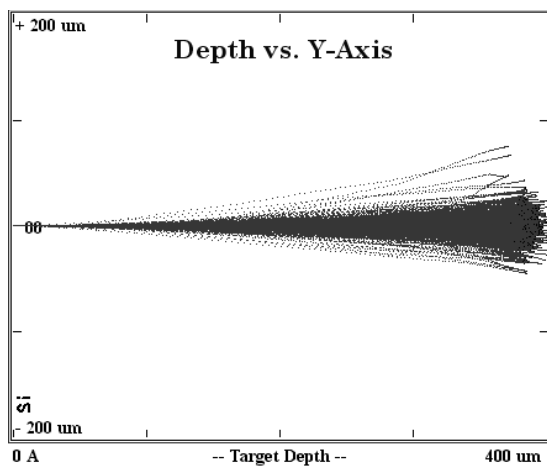
Πίνακας 6.12:

Τα δείγματα που ακτινοβολήθηκαν σε διαφορετικές δόσεις .

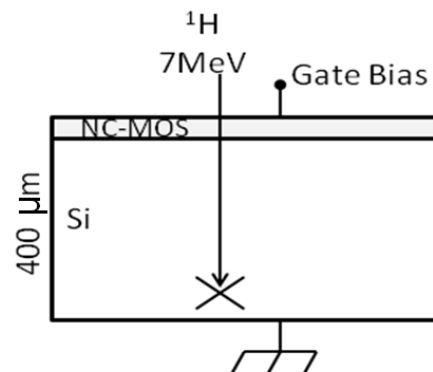
6.5 Προσομοίωση της διείσδυσης των πρωτονίων στα δείγματα.

Η προσομοίωση της διαμήκουσ πορείας της δέσμης μέσα στο πυρίτιο φαίνεται στις εικόνες 6-13, 6-14, 6-15, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα SRIM-TRIM . Βλέπουμε, λοιπόν, ότι τα πρωτόνια ενέργειας 7MeV μέσα στο πυρίτιο παρουσιάζουν ένα μέγιστο βάθος διείσδυσης (range) περίπου 386 μm . Τα δείγματα, όμως, που χρησιμοποιήθηκαν έχουν συνολικό πάχος περίπου 400 μm . Για περισσότερο αξιόπιστες μετρήσεις δεν θα έπρεπε τα πρωτόνια να εγκλωβίζονται μέσα στα δισκία, αλλά να τα διαπερνούν, αφού η διαφορά δυναμικού πύλης εφαρμόζεται κάθετα στην τομή τους. Υπάρχει περίπτωση κάποια δόση να προκαλέσει ενδεχομένως μια εκτεταμένη καταστροφή του Si στα 386 μm , όπου και ακινητοποιήθηκαν τα πρωτόνια, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να εφαρμοστεί τάση ανάμεσα στα δύο ηλεκτρόδια πύλης των ακτινοβολημένων πυκνωτών.

(α)

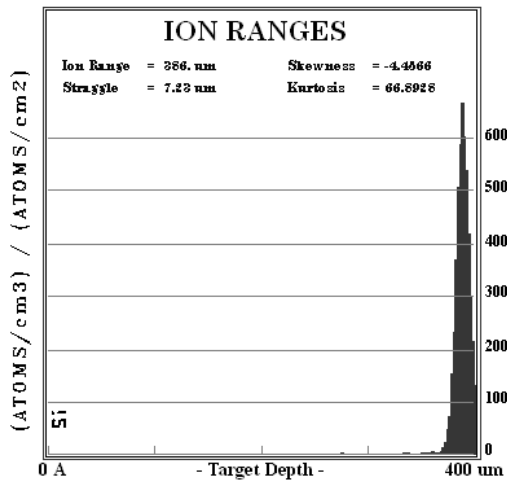


(β)



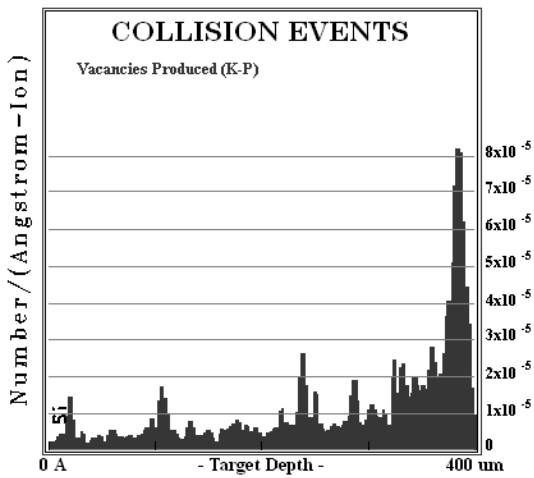
Εικόνα 6.13.

(α) Προσομοίωση SRIM-TRIM και (β) σχηματοποίηση της διαμήκουσ πορεία δέσμης πρωτονίων 7MeV σε πυρίτιο πάχους 400 μm .



Εικόνα 6-14.

Προσομοίωση SRIM-TRIM. Η κατανομή της εμβέλειας των φορτισμένων σωματιδίων. Τα πρωτόνια 7MeV εγκλωβίζονται μέσα στο δείγμα Si σε βάθος διείσδυσης περίπου 386 μm .

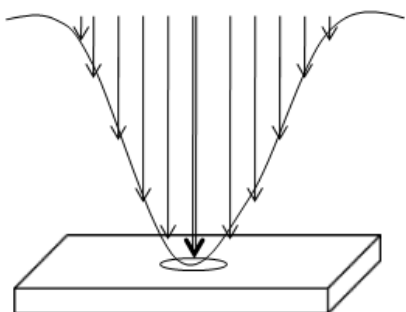


Εικόνα 6-15.

Προσομοίωση SRIM-TRIM. Συγκρούσεις πρωτονίων 7MeV με τα άτομα του Si μέσα στο δείγμα. Το βάθος διείσδυσης φαίνεται καθαρά λίγο πριν τα 400 μm , απ' την κορυφή στην κατανομή των εκτοπίσεων.

6.6 Πειραματική μέθοδος εντοπισμού των ακτινοβολημένων πυκνωτών.

Επειδή η κατανομή της έντασης της δέσμης των πρωτονίων είναι γκαουσιανή, το μέγιστο της παρουσιάζεται στο κέντρο (εικόνα 6-16), οπότε είναι αναγκαίο να βρεθεί η περιοχή του κέντρου της κατανομής, άρα και οι πυκνωτές με την ζητούμενη δόση, ακολουθώντας την παρακάτω πειραματική διαδικασία.



Εικόνα 6-16.

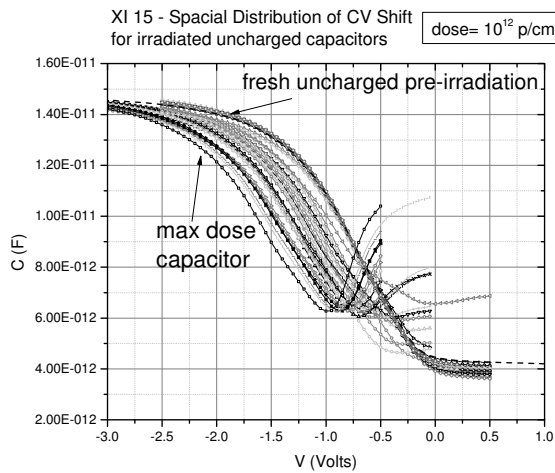
Σχηματοποίηση της κανονικής κατανομής της έντασης της προσπίπτουσας δέσμης των πρωτονίων. Η επιθυμητή δόση επιτυγχάνεται στο κέντρο της κηλίδας.

Έχοντας ως καμπύλη αναφοράς την CV χαρακτηριστική πριν την ακτινοβολήση, δεχόμαστε ότι οι πυκνωτές που έχουν ακτινοβοληθεί με την υπολογισθείσα δόση παρουσιάζουν τη μέγιστη μετατόπιση απ' όλες τις χαρακτηριστικές. Με αυτό τον τρόπο, απορρίπτουμε απ' την μελέτη μας τους υπόλοιπους πυκνωτές, αφού συμφωνούμε ότι βρίσκονται εκτός του κέντρου της κανονικής κατανομής, άρα έχουν δεχθεί μικρότερη και άγνωστης τιμής δόση.

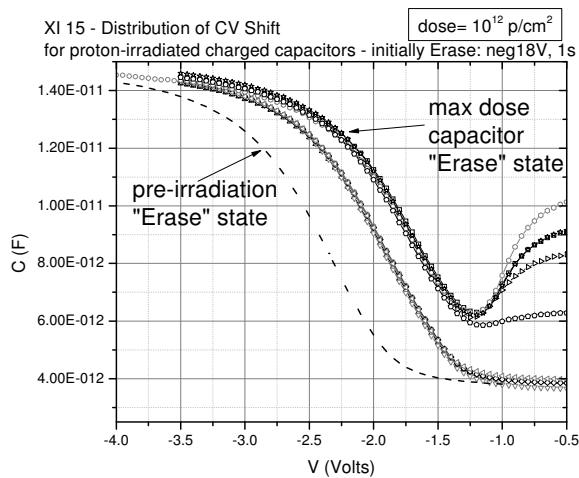
Με αυτή την πειραματική μέθοδο, για την περίπτωση των δειγμάτων XI-18, XR-18, διαπιστώθηκε ότι αυτοί που δέχθηκαν τη δόση των 10^{15} p/cm², είχαν εντελώς κατεστραμμένες CV καμπύλες. Όπως εξηγήθηκε στην ενότητα 6.5 της προσομοίωσης, αυτή η αχρήστευση των πυκνωτών μπορεί να εξηγηθεί από το βάθος διείσδυσης των πρωτονίων 7MeV μέσα στα δείγματα πυριτίου, τα οποία έχουν συνολικό πάχος περίπου 400 μm. Η μέγιστη δόση των 10^5 p/cm² προφανώς προκάλεσε την ανεπανόρθωτη φθορά του κρυσταλλικού πλέγματος Si στα 386 μm, όπου και ενσωματώθηκαν τα πρωτόνια, και εν τέλει την οριστική καταστροφή των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των εν λόγω ακτινοβολημένων διατάξεων, με αποτέλεσμα να είναι αδύνατο να εφαρμοστεί διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα ηλεκτρόδια τους.

Ενδεικτικά παραδείγματα της μεθόδου αυτής παρουσιάζονται στα γραφήματα της εικόνας 6-17, για το δείγμα XI-15, που δέχθηκε μέγιστη δόση 10^{12} p/cm². Η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε τόσο για τους υπόλοιπους XI εμφυτευμένους με νανοσωματίδια πυκνωτές (αφόρτιστους ή φορτισμένους στις δύο καταστάσεις “1” ή “0”), όσο και για τους πυκνωτές αναφοράς XR.

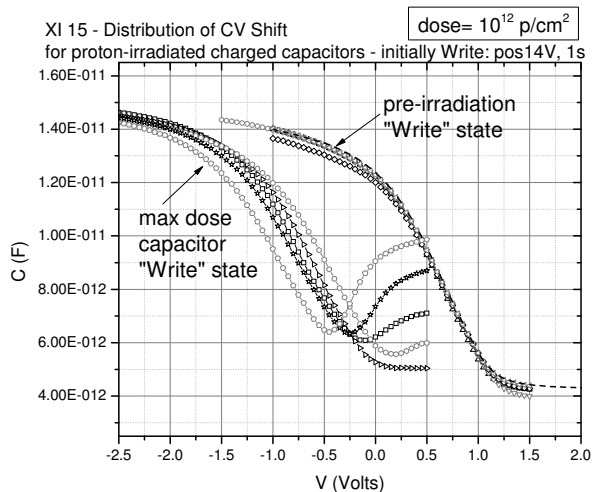
(α)



(β)



(γ)



Εικόνα 6.17.

Η κατανομή των χαρακτηριστικών CV εμφυτευμένων πυκνωτών του δείγματος XI-15, ως συνέπεια της κανονικής κατανομής της έντασης της δέσμης πρωτονίων. Η καμπύλη με τη μεγαλύτερη απομάκρυνση από εκείνη της προ-ακτινοβόλησης δεχόμαστε ότι αντιστοιχεί στον πυκνωτή που έχει δεχθεί την δόση 10^{12} p/cm².

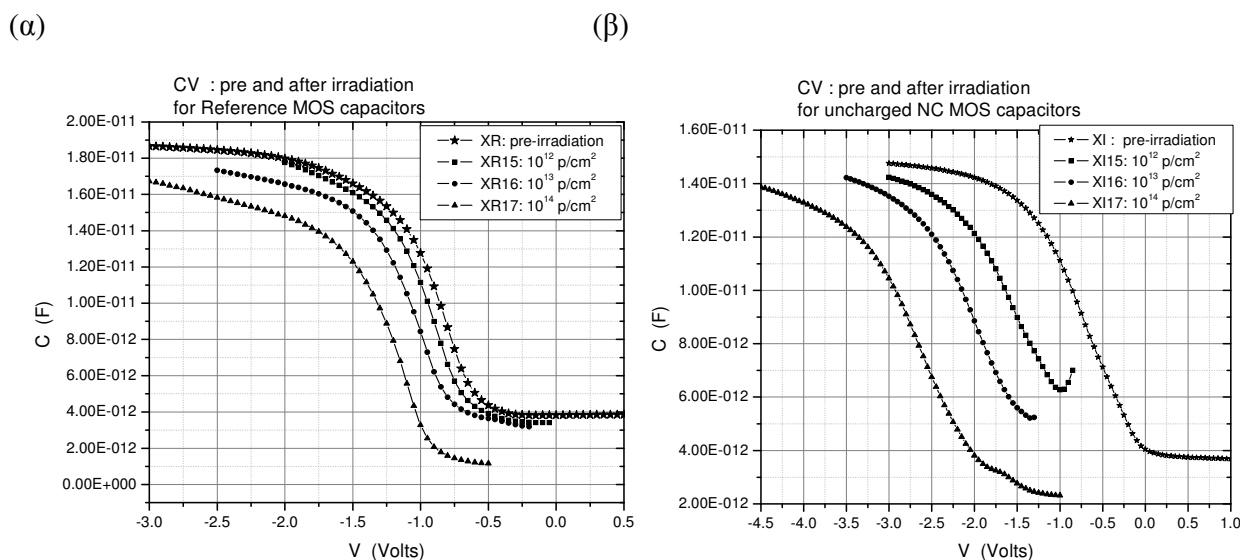
(α) για αφόρτιστους πυκνωτές, (β) σε κατάσταση "0", (γ) σε κατάσταση "1".

6.7 Επίδραση της ακτινοβολίας σε αφόρτιστες μνήμες.

Έχοντας εντοπίσει τους ακτινοβολημένους πυκνωτές, η επόμενη εργασία μας αφορά στη σύγκριση των συνεπειών της ακτινοβόλησης με δέσμη πρωτονίων σε αφόρτιστες μνήμες και σε πυκνωτές αναφοράς. Αυτό που μας ενδιαφέρει τελικά είναι να αποφανθούμε σχετικά με την μετατόπιση της τάσης V_{fb} , και εν τέλει τον υπολογισμό του εισαγόμενου απ' την ακτινοβολία παγιδευμένου θετικού φορτίου, μετρήσεις που εξαρτώνται τόσο από τη δόση, όσο και από την παρουσία ή μη νανοσωματιδίων στο οξειδίο.

Στα γραφήματα της εικόνας 6-18 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές fresh CV, που μετρήθηκαν σε αφόρτιστους πυκνωτές πριν και μετά την ακτινοβόληση, για κάθε δόση. Παρατηρούμε αυτήν ακριβώς την μετατόπιση προς τις αρνητικές τιμές τάσης πύλης, για την οποία έχει γίνει αναφορά, και για τις δύο περιπτώσεις ηλεκτρονικών στοιχείων. Στη συνέχεια (εικόνα 6-19) παρουσιάζεται σε γράφημα με επίπεδο αναφοράς τα 0V της χαρακτηριστικής πριν την ακτινοβόληση, η μετατόπιση:

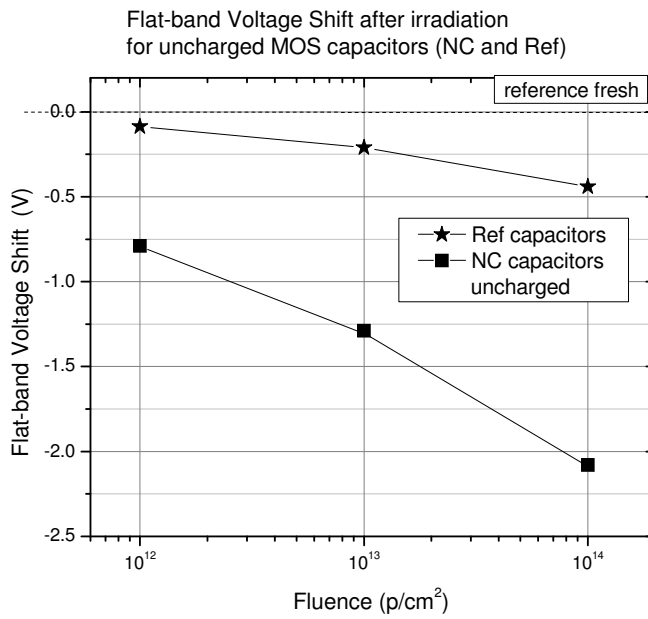
$$\Delta V_{fb} = V_{fb(irrad)} - V_{fb(non-irrad)}. \quad (6.2)$$



Εικόνα 6-18.

Fresh CV χαρακτηριστικές, πριν και μετά την ακτινοβόληση, για κάθε δόση, (α) για τους MOS πυκνωτές αναφοράς XR, (β) για τους αφόρτιστους NC MOS πυκνωτές XI

(α)



(β)

$\Delta V_{fb} = V_{fb(IRRAD)} - V_{fb(NON IRRAD)}$			
	10^{12} p/cm^2	10^{13} p/cm^2	10^{14} p/cm^2
Reference MOS capacitors	-0.086 V	-0.21 V	-0.44 V
NC MOS capacitors uncharged	-0.790 V	-1.29 V	-2.08 V

Εικόνα 6-19.

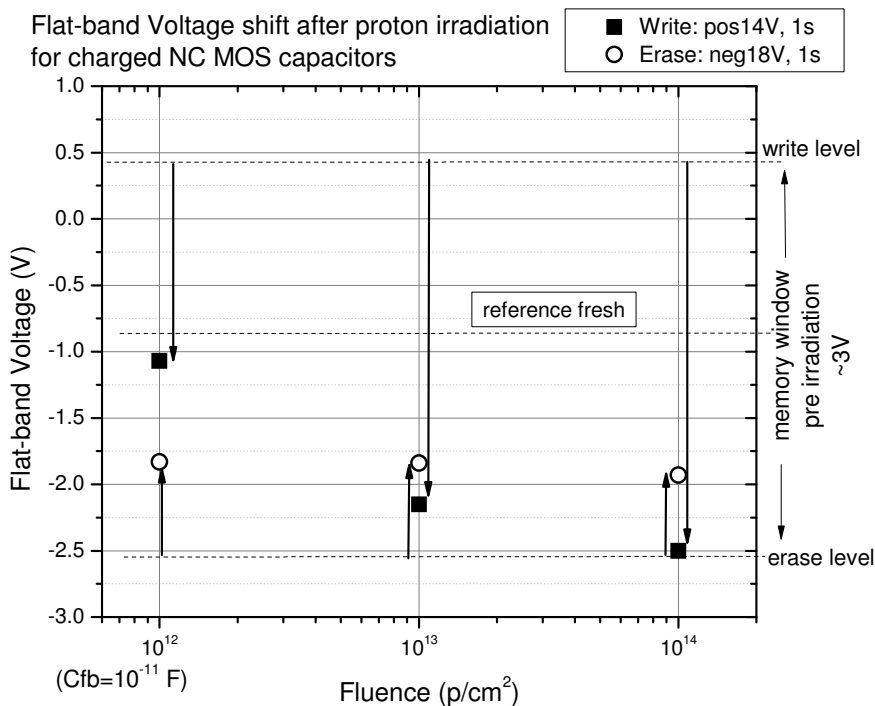
(α) Η μετατόπιση της V_{fb} για κάθε δόση ακτινοβολίας, για εμφυτευμένους αφόρτιστους πυκνωτές και πυκνωτές αναφοράς, με σημείο αναφοράς τα 0V της χαρακτηριστικής CV πριν την ακτινοβόληση.

(β) Ο αντίστοιχος πίνακας τιμών της ΔV_{fb} , για κάθε δόση.

6.8 Επίδραση της ακτινοβολίας σε αρχικά προγραμματισμένες μνήμες .

Με σκοπό να μελετήσουμε την επίδραση της ακτινοβολίας πρωτονίων σε αρχικά προγραμματισμένες μνήμες, πραγματοποιήθηκε η επόμενη εργασία . Πριν την ακτινοβολήση είχαν εγγραφεί ή διαγραφεί κάποιοι εμφυτευμένοι NC MOS πυκνωτές, και στη συνέχεια ελέγχθηκε η μετατόπιση της CV χαρακτηριστικής καμπύλης . Η “εγγραφή” (Write) έγινε με παλμό : (+14V, 1s), ενώ η “διαγραφή” (Erase) με παλμό : (-18V, 1s). Στην (εικόνα) παρουσιάζεται η μετατόπιση της V_{fb} που αντιστοιχεί στις δύο καταστάσεις “1” ή “0”, για κάθε δόση. Το αρχικό παράθυρο μνήμης (πριν την ακτινοβολήση) προκύπτει περίπου ίσο με 3V.

Στο γράφημα της εικόνας 6-20 παρατηρούμε ότι στην κατάσταση “Erase”, ανεξάρτητα απ’ την προσπίπτουσα δόση, η V_{fb} έχει μετατοπιστεί περίπου 0.7V, ενώ στην κατάσταση “Write” η V_{fb} έχει μετατοπιστεί σε τιμές κάτω απ’ την τιμή ανάγνωσης της μνήμης, συνεπώς έχει επέλθει λανθασμένη αλλαγή της κατάστασης σε “Erase” (bit flip “1”→“0”). Γενικά βέβαια φαίνεται, ότι όσο πιο μεγάλη είναι η δόση τόσο μεγαλύτερη ζημιά προκαλείται στην κατάσταση “εγγραφής”, λόγω του εισαγόμενου απ’ την ακτινοβολία θετικού φορτίου.

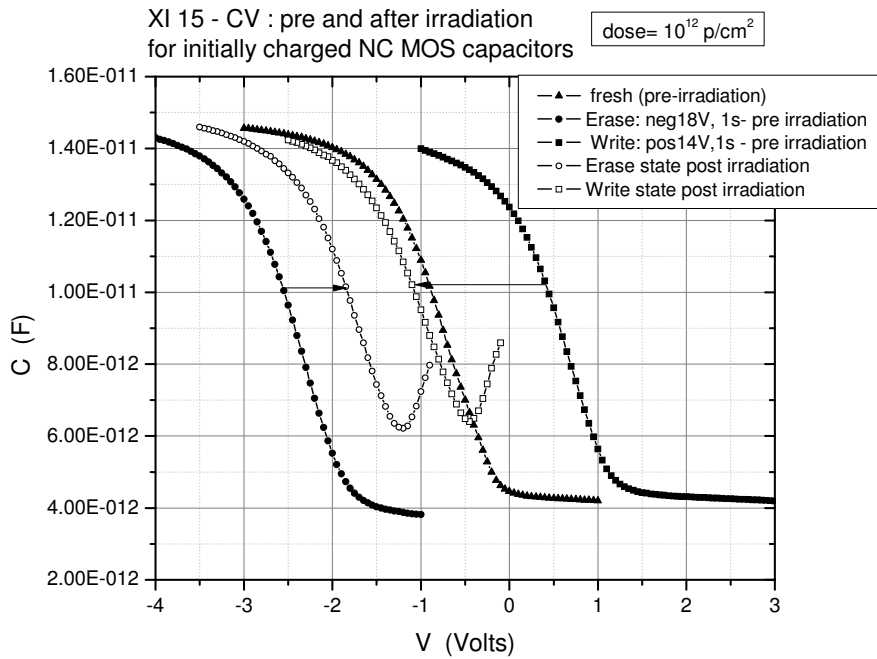


Εικόνα 6-20.

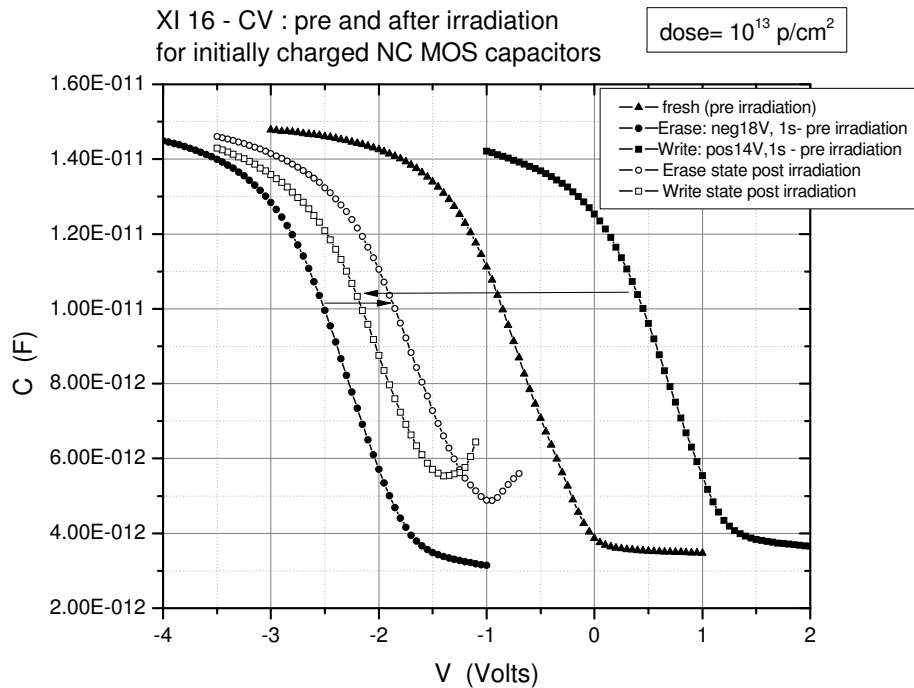
Η μετατόπιση της V_{fb} , υπό την επίδραση διαφορετικής δόσης ακτινοβολίας, για αρχικά φορτισμένες μνήμες. Ο προγραμματισμός έγινε για την κατάσταση “Write”: (+14V, 1s) ή “Erase”: (-18V, 1s).

Αξίζει να παρουσιαστούν οι CV καμπύλες, από τις οποίες προέκυψε το παραπάνω γράφημα, και δείχνουν εκτός από την μετατόπιση της κάθε χαρακτηριστικής, επίσης την μορφή της και προφανώς τις τιμές της χωρητικότητας.

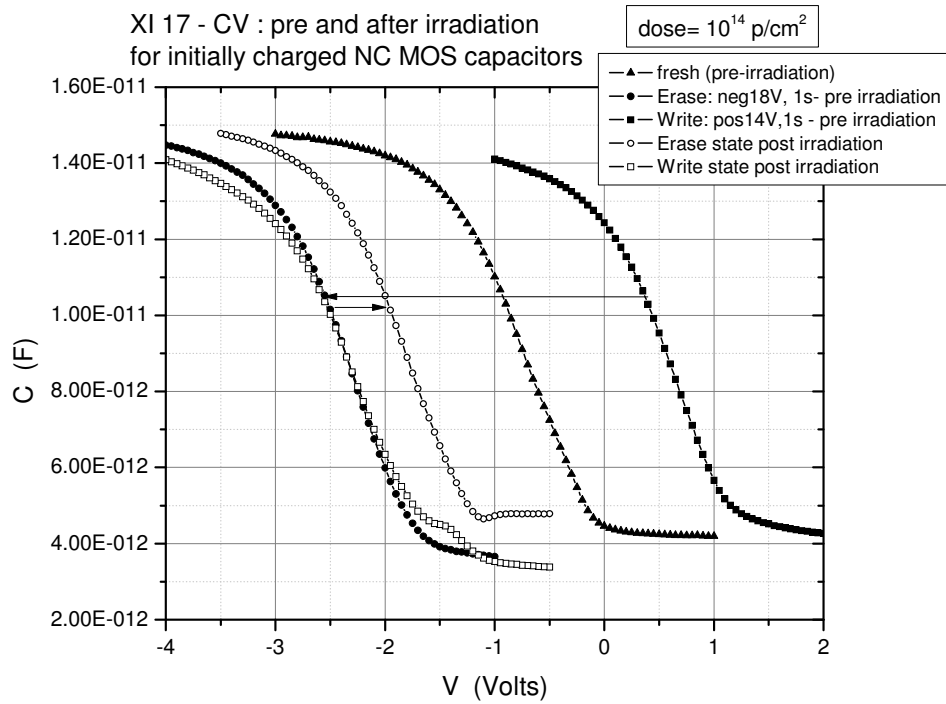
(α)



(β)



(γ)



Εικόνα 6-21:

Οι CV καμπύλες πριν και μετά την ακτινοβόληση, για αρχικά προγραμματισμένες μνήμες .
(α) δόση 10^{12} p/cm² , (β) δόση 10^{13} p/cm² , (γ) δόση 10^{14} p/cm² .

6.9 Υπολογισμός του παγιδευμένου στο οξείδιο φορτίου.

Σε αυτή την ενότητα θα συγκεντρώσουμε τα προηγούμενα αποτελέσματα των πινάκων, ώστε να υπολογίσουμε το θετικό φορτίο που λόγω της δέσμης πρωτονίων δημιουργήθηκε (αρχικά ζεύγη ηλεκτρονίων/οπών) κι ύστερα ένα μέρος του παγιδεύθηκε μέσα στο οξείδιο (παγιδευμένο φορτίο Q_{ot}). Οι υπολογισμοί που μας ενδιαφέρουν αφορούν στα ακτινοβολημένα δείγματα με αφόρτιστες μνήμες, με πυκνωτές αναφοράς και με μνήμες που είχαν αρχικά προγραμματιστεί στην κατάσταση “1” με παλμό εγγραφής : (+14V, 1s).

Ο παρακάτω συγκεντρωτικός πίνακας παρουσιάζει, για κάθε περίπτωση, την μετατόπιση της τάσης V_{fb} , που οφείλεται στο εισαγόμενο, απ’ την ακτινοβολία, παγιδευμένο φορτίο. Το ζητούμενο, λοιπόν, φορτίο Q_{ot} (oxide trapped charge), όπως έχει ήδη συζητηθεί στο Κεφάλαιο ..., υπολογίζεται απ’ τη σχέση :

$$Q_{ot} = - \Delta V_{fb} \cdot C_{ox} \quad (6.3)$$

Για τα δείγματα που αντιστοιχούν σε NC MOS πυκνωτές-μνήμες και MOS πυκνωτές αναφοράς, η χωρητικότητα του οξειδίου έχει εκτιμηθεί (ενότητα). Με σκοπό να μετατρέψουμε το υπολογιζόμενο φορτίο (που έχει μονάδες Cb) σε επιφανειακή πυκνότητα παγιδευμένων οπών (h/cm^2), διαιρούμε το αποτέλεσμα της σχέσης με το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο: $q=1.6 \cdot 10^{-19}$ Cb και επίσης με την επιφάνεια του πυκνωτή : $A=10^{-4} cm^2$.

Επειδή, όμως, το παγιδευμένο φορτίο που υπολογίστηκε, είναι το παραμένον φορτίο μέσα στο οξείδιο, πρέπει να υπολογίσουμε και το φορτίο που δημιουργήθηκε αρχικά κατά τη διάρκεια της πορείας της δέσμης πρωτονίων. Για να δημιουργηθεί λόγω ιονισμού του πυριτίου ένα τουλάχιστον ζεύγος οπών/ηλεκτρονίων έχει ήδη αναφερθεί ότι απαιτούνται 17eV. Χρησιμοποιώντας το υπολογιστικό πρόγραμμα προσομοίωσης TRIM, εκτιμούμε ότι η ενέργεια dE/dx που χάνουν τα πρωτόνια ενέργειας 7MeV κατά την διείσδυσή τους στο οξείδιο είναι 11.42keV/ μm . Το πάχος του SiO_2 είναι γνωστό, οπότε βρίσκουμε ότι η ενέργεια που εναποτίθεται και προκαλεί τη γέννηση των ζευγών είναι αντίστοιχα: $E_{pairs, NC-MOS} = 0.291$ keV. και $E_{pairs, Ref-MOS} = 0.205$ keV.

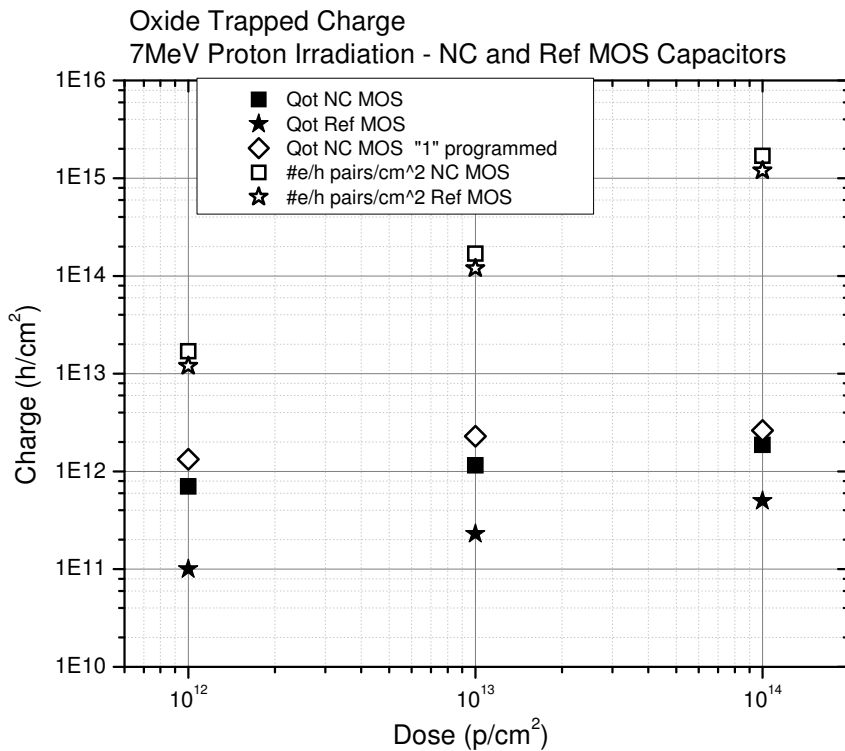
Γνωρίζοντας, λοιπόν, τη δόση για κάθε δείγμα, όπως επίσης και την ενέργεια E_{pairs} που εναποθέτουν τα πρωτόνια μέσα στο οξείδιο, υπολογίζουμε το αρχικό πλήθος των ζευγών h/e :

$$\#h/e \text{ pairs } (cm^{-2}) = \text{dose}(p/cm^2) \cdot E_{pairs}(eV) / 17 \text{ eV}. \quad (6.4)$$

Μετά τους παραπάνω υπολογισμούς, συμπληρώνουμε τον πίνακα 6-22 και παρουσιάζουμε τα πειραματικά μας σημεία στο γράφημα της εικόνας 6-23, ώστε να μπορέσουμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα .

	Samples	Dose (p/cm ²)	ΔV_{fb} (V)	Trapped Charge ($\cdot 10^{-11}$ Cb)	Q_{ot} ($\cdot 10^{12}$ h/cm ²)	#h/e pairs ($\cdot 10^{12}$ pairs/cm ²)
NC MOS capacitors uncharged	XI 15	10 ¹²	-0.790	1.13	0.70	17
	XI 16	10 ¹³	-1.29	1.85	1.12	170
	XI 17	10 ¹⁴	-2.08	2.99	1.87	1700
Reference MOS capacitors	XR 15	10 ¹²	-0.086	0.16	0.10	12
	XR 16	10 ¹³	-0.21	0.38	0.23	120
	XR 17	10 ¹⁴	-0.44	0.81	0.50	1200
NC MOS capacitors "1" programmed	XI 15	10 ¹²	-1.48	2.13	1.33	
	XI 16	10 ¹³	-2.56	3.68	2.30	
	XI 17	10 ¹⁴	-2.92	4.20	2.62	

Πίνακας 6-22.



Εικόνα 6-23.

Η επιφανειακή πυκνότητα των οπών που παγιδεύτηκαν στο οξείδιο, και ο αρχικός αριθμός ζευγών ηλεκτρονίων/οπών, σε NC MOS πυκνωτές και MOS πυκνωτές αναφοράς, σε εξάρτηση με τη δόση ακτινοβολίας πρωτονίων 7MeV.

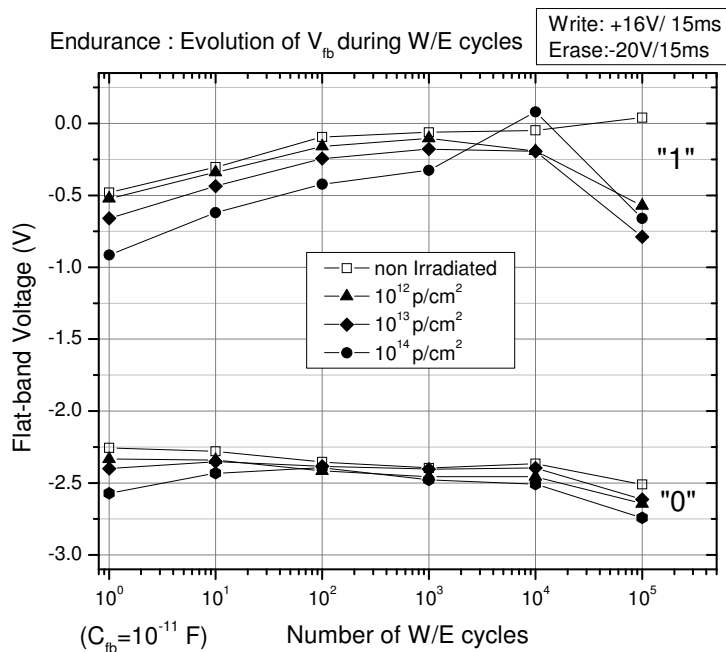
Μπορούμε να καταλήξουμε στα παρακάτω συμπεράσματα, που αφορούν στο γράφημα της εικόνας 6-23:

- 1) $Q_{ot} \ll e/h$ pairs : Σε όλες τις περιπτώσεις, το παγιδευμένο φορτίο είναι μικρότερο του πλήθους των ζευγών οπών/ηλεκτρονίων που δημιουργήθηκαν αρχικά, το οποίο αποδεικνύει ότι σχετικά μικρός αριθμός οπών επιβιώνει από την αρχική γρήγορη φάση της επανασύνδεσης.
- 2) Q_{ot} saturation : Ενώ το πλήθος των αρχικών ζευγών αυξάνει ανάλογα με τη δόση κατά τάξη μεγέθους, το παγιδευμένο φορτίο που παραμένει δεν έχει αντίστοιχη συμπεριφορά, αλλά παρουσιάζει ένα είδος κορεσμού.
- 3) $Q_{ot}("1") > Q_{ot}(\text{uncharged})$: Στις προγραμματισμένες στην κατάσταση "1" μνήμες NC MOS πυκνωτών, το Q_{ot} προκύπτει περίπου 1.5 με 2 φορές μεγαλύτερο απ' τις αφόρτιστες . Αυτό σχετίζεται με το εσωτερικό ηλεκτρικό πεδίο που παράγεται από τα αρνητικά φορτισμένα νανοσωματίδια, το οποίο μειώνει την πιθανότητα επανασύνδεσης των οπών με τα ηλεκτρόνια.
- 4) $Q_{ot}(\text{NC-MOS}) > Q_{ot}(\text{Ref MOS})$: Το ποσό του φορτίου που παγιδεύτηκε μέσα στο οξειδίο των αφόρτιστων μνημών NC MOS πυκνωτών είναι μεγαλύτερο από εκείνο των MOS πυκνωτών αναφοράς. Αυτό μπορεί να σχετιστεί με τις επιπλέον ενεργειακές καταστάσεις παγίδευσης που εντοπίζονται στο οξειδίο πύλης των πρώτων, λόγω της ύπαρξης επιπλέον ατόμων Si στα νανοσωματίδια, αφού αυτή η μεταβολή της στοιχειομετρίας του οξειδίου οδηγεί στην περεταίρω μείωση του ύψους του FN φράγματος δυναμικού.
- 5) $Q_{ot}("1") \rightarrow \text{bit flip "0"}$: Το θετικό φορτίο που παγιδεύτηκε στο οξειδίο των προγραμματισμένων μνημών ήταν αυτό που οδήγησε και στις τρεις περιπτώσεις στην αλλαγή της κατάστασης από "1" σε "0" .

6.10 Η αντοχή (endurance) της μνήμης κατά τον επαναπρογραμματισμό.

Όπως έχει ήδη συζητηθεί, οι ηλεκτρονικές μνήμες έχουν στις προδιαγραφές τους να λειτουργούν σωστά έπειτα μέχρι και 10^6 κύκλους “εγγραφής”/“διαγραφής”, με την έννοια της διατήρησης ενός ικανοποιητικού παραθύρου μνήμης, και κατά συνέπεια της δυνατότητας σαφούς διάκρισης των δύο καταστάσεων. Αυτή η εργασία έγινε για μη ακτινοβολημένη μνήμη, όπως επίσης και για πυκνωτές που έχουν δεχθεί τη δέσμη πρωτονίων, μέχρι όμως 10^5 κύκλους W/E. Η κατάσταση “εγγραφής” έγινε με παλμό : (+16V,15ms), ενώ η “διαγραφή” έγινε με παλμό : (-20V, 15ms).

Στο γράφημα της εικόνας 6-24 που παρουσιάζεται το αποτέλεσμα της έρευνας αυτής φαίνεται ότι το αρχικό παράθυρο μνήμης προκύπτει περίπου 2V, ενώ κατά τον επαναπρογραμματισμό οι μνήμες παρουσιάζουν ικανοποιητική συμπεριφορά λειτουργίας, τόσο για τις ακτινοβολημένες, όσο και για την μη, αν και γενικά παρατηρούμε ότι η κατάσταση “διαγραφής” έχει καλύτερη επαναφορά απ’ την “εγγραφή”. Μπορούμε, όμως, να αποφανθούμε ότι οι δύο καταστάσεις είναι σαφώς διακρίσιμες κατά την ανάγνωση της μνήμης, συνεπώς αποδεικνύεται η ζητούμενη αξιοπιστία κατά τον επαναπρογραμματισμό των ηλεκτρονικών μνημών με νανοσωματίδια, υπό την επίδραση ή όχι της ακτινοβολίας πρωτονίων.



Εικόνα 6-24.

Αντοχή NC-MOS πυκνωτών κατά τον επαναπρογραμματισμό, μέχρι 10^5 κύκλους W/E πριν και μετά από ακτινοβολία πρωτονίων διαφορετικής δόσης. “Write”:(+16V, 15ms), “Erase”:(-20V, 15ms).

6.11 Χρόνος διατήρησης του φορτίου (retention) σε προγραμματισμένες μνήμες,

Με σκοπό να μελετήσουμε τον χρόνο διατήρησης του φορτίου στις μνήμες των πυκνωτών με εμφυτευμένα νανοσωματίδια Si, πριν και μετά την ακτινοβολήση τους με πρωτόνια, πραγματοποιήθηκε η παρακάτω εργασία.

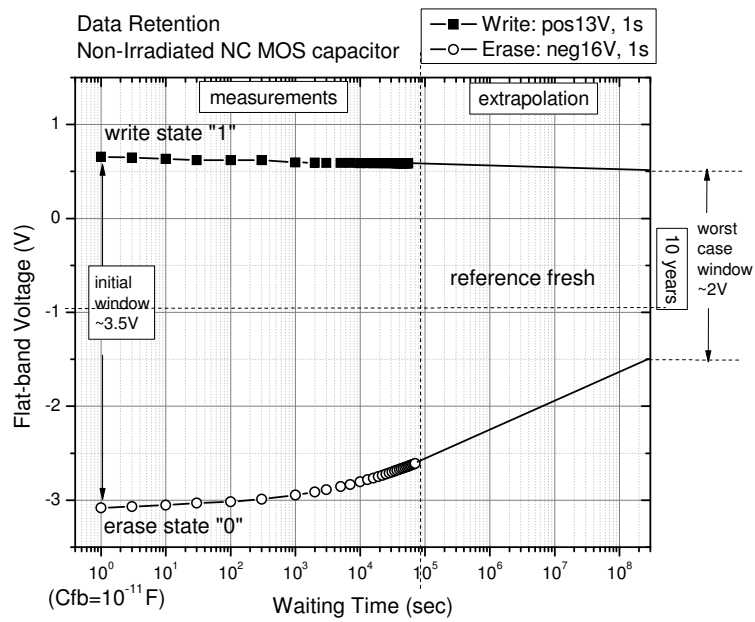
Στα γραφήματα της εικόνας 6-25 και 6-26 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του παράθυρου μνήμης, για μη ακτινοβολημένη μνήμη, όπως επίσης και για ακτινοβολημένο πυκνωτή του δείγματος XI 17 που δέχθηκε δόση 10^{14} p/cm². Επιλέξαμε να μελετήσουμε μόνο το συγκεκριμένο δείγμα, ώστε να βγάλουμε κάποιο συμπέρασμα απ' την περίπτωση της μεγαλύτερης δόσης που χρησιμοποιήθηκε στο πείραμα.

Ο προγραμματισμός της μνήμης έγινε στην κατάσταση "Write" με παλμό: (+13V, 1s) και στην "Erase" : (-16V, 1s). Το αρχικό παράθυρο προκύπτει γύρω στα 3.5V, ενώ οι μετρήσεις της V_{fb} και για τις δύο καταστάσεις πάρθηκαν μέχρι τα πρώτα 10^5 sec περίπου.

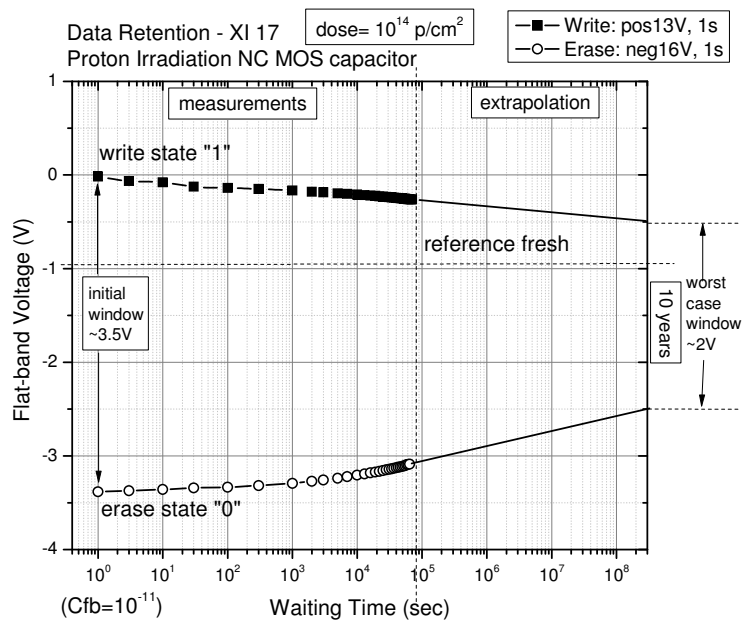
Επειδή οι προδιαγραφές των μνημών αυτών απαιτούν την διάκριση των δύο καταστάσεων μετά από χρόνο μέχρι 10 έτη απ' τη στιγμή προγραμματισμού, δεχόμαστε προσεγγιστικά την γραμμική προέκταση την μεταβολής της V_{fb} σε συνάρτηση με τον λογαριθμικό άξονα του χρόνου. Με αυτή τη μέθοδο εκτιμούμε ότι μετά από χρόνο 10years = 3×10^8 sec, και για τις δύο περιπτώσεις, το χειρότερο ενδεχόμενο θα μας δώσει το παράθυρο μνήμης να έχει μειωθεί στα 2V, δηλαδή στα 57% του αρχικού.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ενώ συγκριτικά ο μη ακτινοβολημένος και ο ακτινοβολημένος πυκνωτής παρουσιάζουν την ίδια ικανοποιητική συμπεριφορά στην διατήρηση του φορτίου, θα έπρεπε να πραγματοποιηθούν κι άλλες ανάλογες μετρήσεις, στατιστικά επαρκείς, ώστε τα συμπεράσματα να είναι περισσότερο αξιόπιστα.

(α)



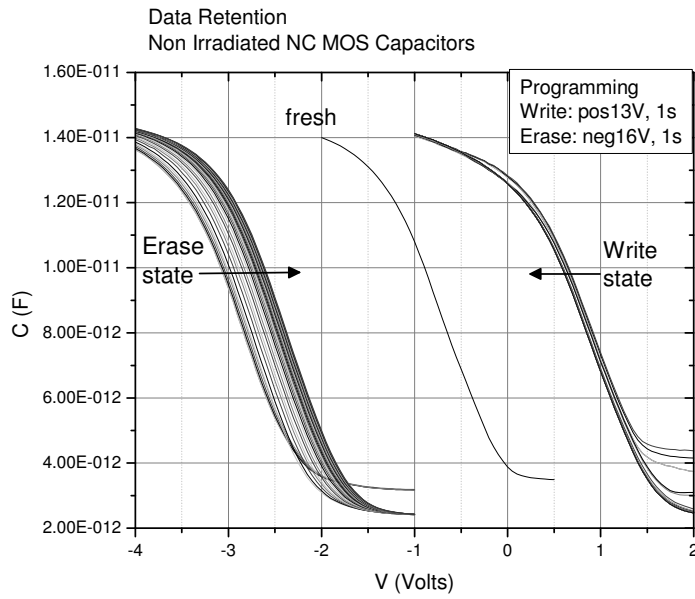
(β)



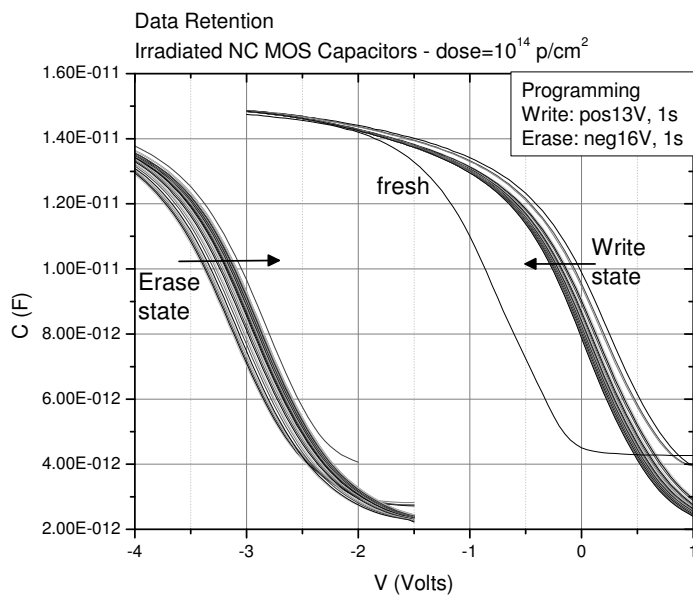
Εικόνα 6-25.

Η διατήρηση του φορτίου ως συνάρτηση της μεταβολής του παράθυρου μνήμης στο χρόνο, σε NC MOS πυκνωτή, (α) σε μη ακτινοβολημένη μνήμη, (β) σε ακτινοβολημένη μνήμη με πρωτόνια δόσης 10¹⁴ p/cm².

(α)



(β)



Εικόνα 6-26.

Η μελέτη της διατήρησης του φορτίου ως συνάρτηση της μεταβολής του παράθρου μνήμης στο χρόνο, από τη μετατόπιση των CV καμπυλών σε NC MOS πυκνωτή μέχρι χρόνους της τάξης των 10^5 sec, (α) σε μη ακτινοβολημένη μνήμη, (β) σε ακτινοβολημένη μνήμη με πρωτόνια δόσης 10^{14} p/cm².

6.12 Συμπεράσματα.

Μελετήσαμε και χαρακτηρίσαμε πυκνωτές MOS με νανοσωματίδια πυριτίου μέσης διαμέτρου 2nm στο οξείδιο της πύλης τους (SiO_2) και πυκνωτές χωρίς νανοσωματίδια, πριν και μετά την ακτινοβόλησή τους με πρωτόνια ενέργειας 7MeV . Μελετήσαμε τις τάσεις και τους χρόνους προγραμματισμού, το παράθυρο μνήμης και το ρεύμα διαρροής .

Τόσο στους αρχικά προγραμματισμένους πυκνωτές, όσο και στους αφόρτιστους, αλλά και στους αναφοράς, διαπιστώσαμε την μετατόπιση της τάσης V_{FB} λόγω παγίδευσης θετικού φορτίου απ' την ακτινοβόληση, μετά τον ιονισμό του οξειδίου. Η μετατόπιση αυτή βρέθηκε ανάλογη της δόσης και μεγαλύτερη στους πυκνωτές-μνήμες παρά στους αναφοράς, λόγω της ύπαρξης των νανοσωματιδίων. Επίσης, βρέθηκε ότι το παγιδευμένο φορτίο είναι πολύ μικρότερο του αρχικού ιονισμού, γεγονός που μας δείχνει το μεγάλο ποσοστό επανασύνδεσης των ζευγών ηλεκτρονίων/οπών που δημιουργήθηκαν.

Η κατάσταση "1" που αντιστοιχεί στην εγγραφή ηλεκτρονίων στη μνήμη μετατοπίστηκε στην "0" για κάθε δόση, ενώ η κατάσταση "0" παρέμεινε πρακτικά αμετάβλητη. Το παράθυρο μνήμης επανήλθε στο αρχικό, γεγονός που σήμαινε την αφαίρεση του παγιδευμένου φορτίου με την εφαρμογή θετικής τάσης στην πύλη.

Τα χαρακτηριστικά αξιοπιστίας της μνήμης, όπως η αντοχή στον επαναπρογραμματισμό (endurance) και ο χρόνος διατήρησης των δεδομένων (data retention time), παρουσίασαν την ίδια ικανοποιητική συμπεριφορά τόσο για μη ακτινοβολημένες, όσο και ακτινοβολημένες μνήμες .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

Ακτινοβολήση NC-MOSFET με πρωτόνια 7 MeV

7.1 Εισαγωγή

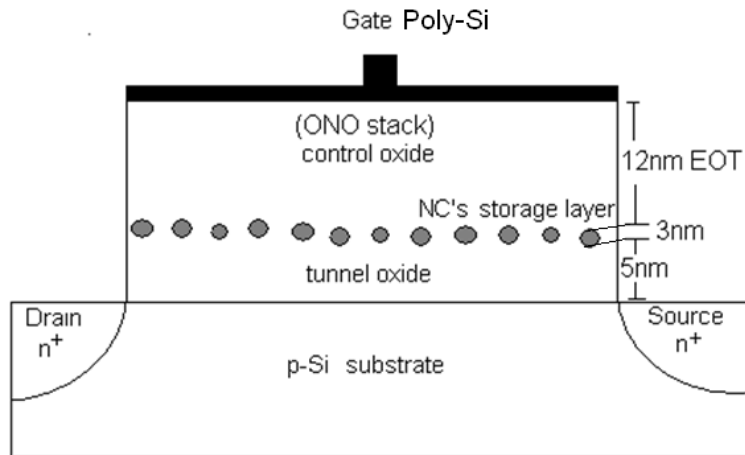
Το πείραμα αυτό πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια μιας σειράς εργασιών που ανέλαβε ο τομέας Φυσικής του Ε.Μ.Π. για την Ε.Σ.Α. (European Space Agency), και έχει ως στόχο τη μελέτη της συμπεριφοράς ηλεκτρονικών μνημών νανοκρυστάλλων μετά την αλληλεπίδρασή τους με φορτισμένη σωματιδιακή ακτινοβολία. Χρησιμοποιήθηκαν δείγματα που προμηθευτήκαμε από την κατασκευαστική εταιρεία MICRON και ακτινοβολήθηκαν με πρωτόνια ενέργειας 7MeV σε διάφορες δόσεις .

7.2 Τα δείγματα του πειράματος.

Το βασικό κύτταρο ηλεκτρονικής μνήμης που μας ενδιαφέρει για την εργασία αυτή 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 οξειδίο σήραγγας (tunnel oxide) είναι θερμικό SiO₂ πάχους 5nm. Το οξειδίο ελέγχου (control oxide) είναι κατασκευασμένο από ONO (Οξειδίο-Νιτρίδιο-Οξειδίο), το πάχος του οποίου αν ήταν SiO₂ θα αντιστοιχούσε στο ισοδύναμο EOT=12nm (Equivalent Oxide Thickness) . Τη σημασία της χρήσης του στρώματος ONO την καταλαβαίνουμε απ' τη γνωστή σχέση που μας δίνει τη χωρητικότητα :

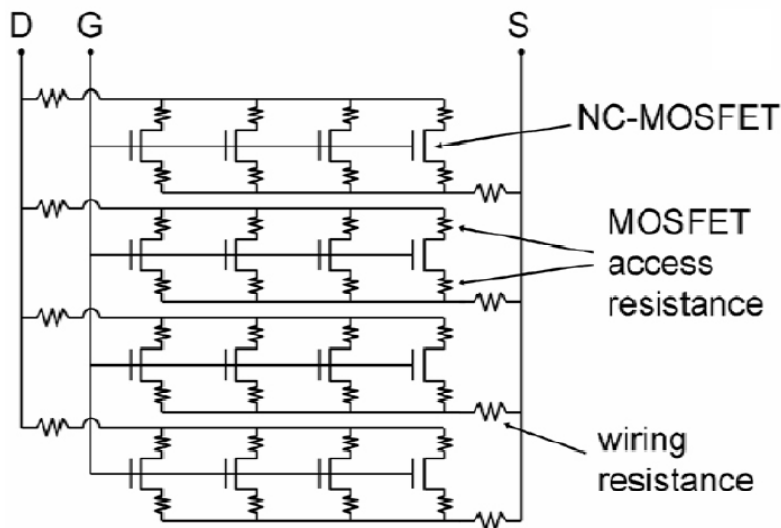
$$C = \frac{A \cdot \epsilon_{\text{ox}}}{d_{\text{ox}}} \quad (7.1)$$

Επειδή το Si₃N₄ έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική σταθερά απ' το SiO₂ (αφού $\epsilon_{\text{SiO}_2}=3.9$ και $\epsilon_{\text{Si}_3\text{N}_4}=7.5$), μπορούμε να πετυχαίνουμε την ίδια χωρητικότητα για μικρότερα πάχη, άρα μείωση των διαστάσεων του τρανζίστορ.



Εικόνα 7-1.
Η δομή της μνήμης NC-MOSFET με νανοκρυστάλλους Si.

Εκτός από τα απλά κύτταρα μνήμης, μετρήθηκαν και δομές τύπου CAST (Cast Array Cell Stress), οι οποίες αποτελούν μια κατασκευή που προκύπτει απ' την παράλληλη σύνδεση χιλιάδων ή εκατομμυρίων τρανζίστορ. Στην εικόνα φαίνεται μια τέτοια δομή CAST παράλληλα συνδεδεμένων μνημών, όπου φαίνεται ότι τελικά έχουμε τη δυνατότητα να προσπελάσουμε σε από κοινού ακροδέκτες, πύλη (G), απαγωγό (D) και πηγή (S).



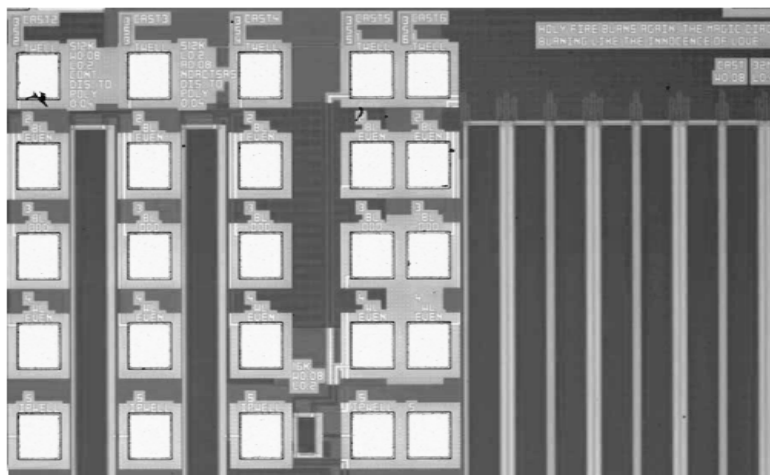
Εικόνα 7-2.
Η δομή CAST μνημών NC-MOSFET συνδεδεμένων παράλληλα.

Πιο συγκεκριμένα, οι ηλεκτρονικές μνήμες που μελετήθηκαν και ακτινοβολήθηκαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα 7-3.

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	

Πίνακας 7-3.

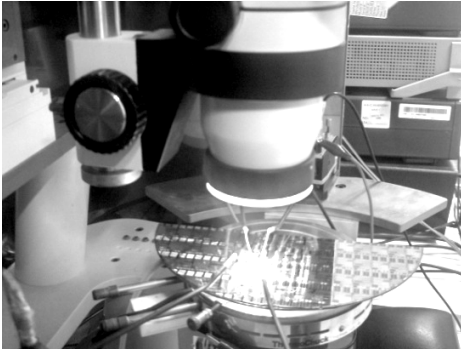
Για να γίνει σαφής ο πίνακας, να εξηγήσουμε ότι σε κάθε δείγμα μετράμε και προγραμματίζουμε 24 τρανζίστορ ένα προς ένα, ενώ στα CAST η χαρακτηριστική καμπύλη του ρεύματος καναλιού ως προς την τάση πύλης προκύπτει ως συνισταμένη της συνεισφοράς πλήθους τρανζίστορ. Συγκεκριμένα, το CAST BL-WL αποτελείται από 512k συνολικά, ενώ τα υπόλοιπα CAST έχουν χωριστεί σε δύο υπο-ομάδες (even/odd), ώστε να μπορούμε να έχουμε τον έλεγχο των μισών σε αριθμό τρανζίστορ. Έτσι, μπορούμε για παράδειγμα στο CAST-2 να προγραμματίσουμε σε κατάσταση “1” τα 256k , ενώ τα υπόλοιπα 256k να τα προγραμματίσουμε στο “0”.



Εικόνα 7-4. Ασπρόμαυρη φωτογραφία της επιφάνειας ενός δείγματος. Διακρίνονται οι κάθετες στήλες κάποιων CAST, και μέρος του μεγαλύτερου CAST-6 32M, στα δεξιά.

7.3 Συνδεσμολογίες πειραματικών διατάξεων για τις ηλεκτρικές μετρήσεις.

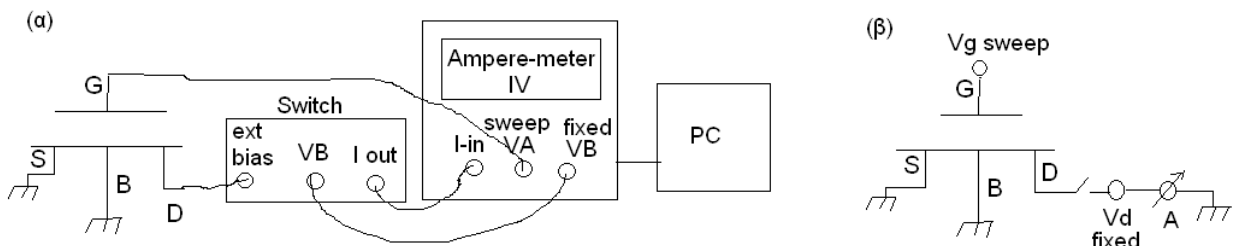
Οι μετρήσεις έγιναν στο εργαστήριο ηλεκτρικού χαρακτηρισμού που βρίσκεται στο κτήριο Φυσικής του Ε.Μ.Π. Κάθε δείγμα τοποθετείται σε μια μεταλλική βάση και με τη βοήθεια μικροσκοπίου γίνονται οι απαραίτητες συνδέσεις, ώστε να έρθουν σε επαφή οι ακροδέκτες των τρανζίστορ με ειδικές μεταλλικές βελόνες, οι οποίες οδηγούν στα ανάλογα μετρητικά όργανα.



Εικόνα 7-5.

Το σύστημα του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού. Διακρίνεται η βάση πάνω στην οποία τοποθετείται το δείγμα, οι βελόνες επαφής που συνδέονται με τους ακροδέκτες και τα όργανα, και το μικροσκόπιο.

Για να λάβουμε την καμπύλη εξάρτησης της έντασης του ρεύματος I_d του καναλιού με την τάση V_g που εφαρμόζεται στην πύλη, κρατώντας σταθερή V_d , χρησιμοποιούμε έναν διακόπτη που συνδέει την σταθερή τάση και το αμπερόμετρο στο ίδιο σημείο, την εκροή D, ενώ σαρώνουμε την πύλη G. Η πηγή S και το υπόστρωμα B είναι γειωμένα. Η συνδεσμολογία φαίνεται στο παρακάτω σχήμα :

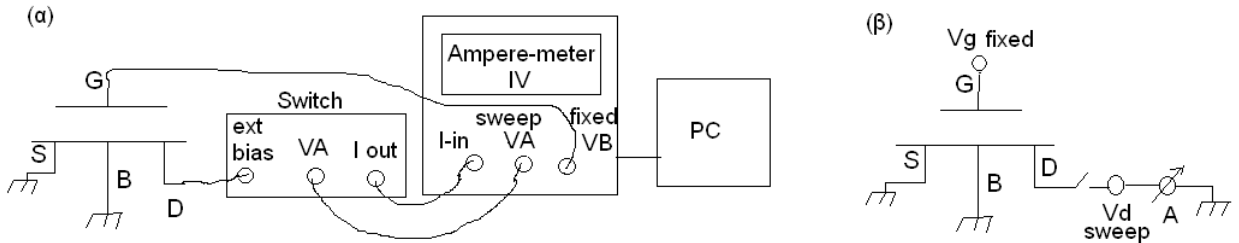


Εικόνα 7-6.

(α) Η πειραματική διάταξη για μέτρηση I_d - V_g με σταθερή V_d , σε MOSFET.

(β) Η αντίστοιχη συνδεσμολογία του κύκλωματος.

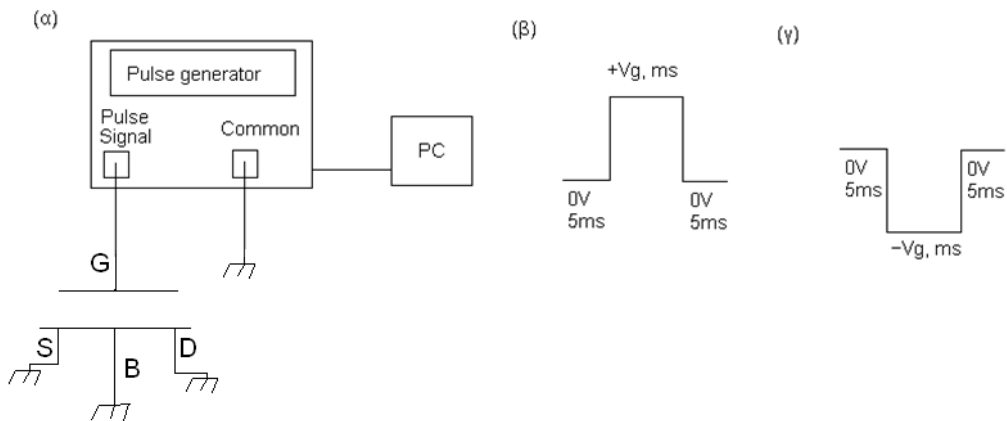
Για να μετρήσουμε την καμπύλη εξάρτησης της έντασης του ρεύματος I_d του καναλιού με την τάση V_d , εφαρμόζουμε σταθερή τάση πύλης V_g , ενώ σαρώνουμε την τάση του καναλιού μετρώντας ρεύμα απ' το ίδιο σημείο, την εκροή D. Η πηγή S και το υπόστρωμα B είναι γειωμένα. Το σχήμα παρουσιάζει τη συνδεσμολογία αυτής της μέτρησης :



Εικόνα 7-7.

(α) Η πειραματική διάταξη για μέτρηση I_d - V_d με σταθερή V_g , σε MOSFET.
 (β) Η αντίστοιχη συνδεσμολογία του κύκλωματος.

Για να προγραμματίσουμε τη μνήμη, εφαρμόζουμε έναν τετραγωνικό παλμό, ώστε να πολώσουμε θετικά ή αρνητικά την πύλη. Η εκροή D, η πηγή S και υπόστρωμα B είναι γειωμένα. Χρησιμοποιούμε παλμογεννήτρια, σύμφωνα με την παρακάτω συνδεσμολογία :



Εικόνα 7-8.

(α) Η πειραματική διάταξη για εφαρμογή παλμού προγραμματισμού της μνήμης NC-MOSFET.
 (β) Ο τετραγωνικός παλμός εγγραφής – Write .
 (γ) Ο τετραγωνικός παλμός διαγραφής – Erase.

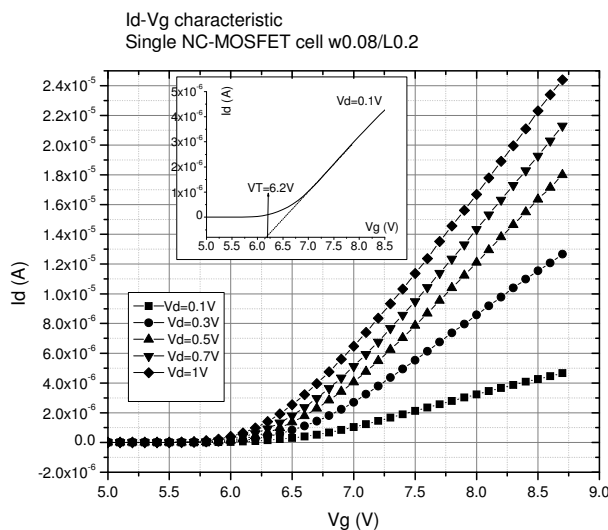
7.4 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός πριν την ακτινοβόληση.

7.4.1 Χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος-τάσης.

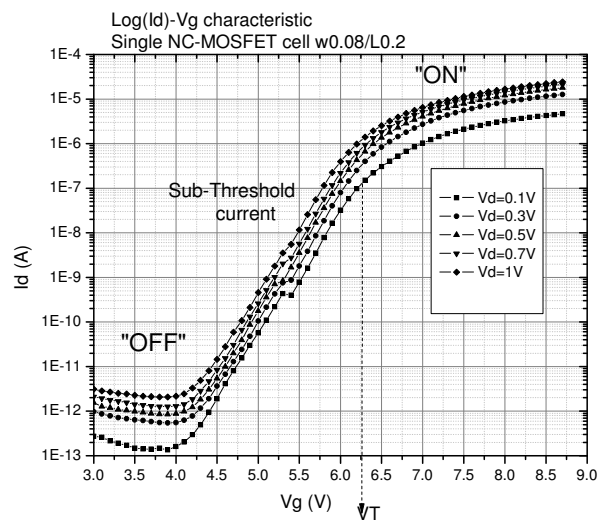
Με σκοπό να ελέγξουμε ότι τα ηλεκτρονικά στοιχεία που διαθέτουμε παρουσιάζουν πράγματι τα χαρακτηριστικά ενός τρανζίστορ, μελετάμε τις χαρακτηριστικές καμπύλες ρεύματος - τάσης για το αφόρτιστο μονό MOSFET και στη συνέχεια ενδεικτικά για το CAST-1, στο οποίο μπορούμε να μετρήσουμε 1M κελιά.

Για το μονό τρανζίστορ, στην εικόνα δείχνουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων μας για τη χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος καναλιού (I_d) – τάσης πύλης (V_g), με εφαρμογή διαφορετικής τάσης καναλιού V_d . Η ίδια καμπύλη παρουσιάζεται τόσο σε ημιλογαριθμική όσο και σε γραμμική κλίμακα. Η τάση κατωφλίου V_T πριν απ' την οποία το τρανζίστορ είναι πρακτικά "OFF" αφού δεν άγει ρεύμα, ενώ στη συνέχεια άγει "ON", μπορεί να προσδιοριστεί κοντά στα 6.2V. Παρατηρούμε τις τρεις περιοχές της χαρακτηριστικής: για V_g μέχρι τα 4V βρισκόμαστε στο επίπεδο του θορύβου του μετρητικού μας συστήματος με αύξηση ρεύματος διαρροής της εκροής για αύξηση της τάσης V_d . Από 4-6.2V βρισκόμαστε στην καμπύλη του λεγόμενου υποκατωφλιακού ρεύματος (sub-threshold current), ενώ από 6.2V και πάνω εντοπίζουμε τη γραμμική περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ (linear current). Διαπιστώνουμε, τέλος, την αναμενόμενη συμπεριφορά της κάθε καμπύλης για αυξανόμενη τάση V_d , καθώς επίσης και τον κορεσμό του I_d .

(α)



(β)



Εικόνα 7-9.

Η χαρακτηριστική καμπύλη I_d - V_g , για διάφορες τάσεις V_d , σε αφόρτιστο μονό NC-MOSFET.

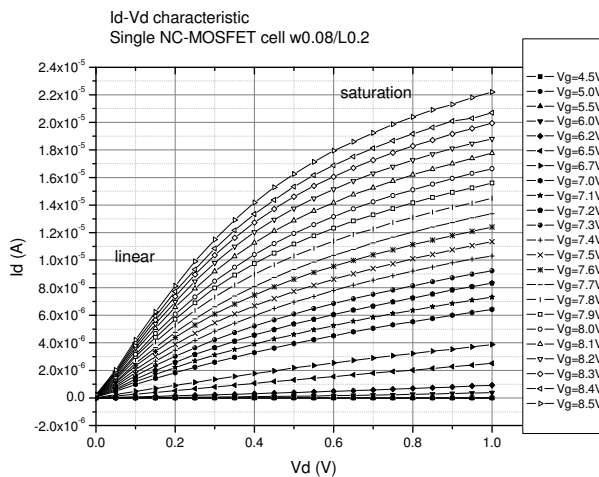
(α) γραμμική κλίμακα, (β) ημιλογαριθμική κλίμακα.

Για το ίδιο τρανζίστορ μετράμε τις χαρακτηριστικές ρεύματος καναλιού (I_d) - τάσης καναλιού (V_d), για διάφορες τιμές τάσης πύλης. Θα επιλέξουμε τιμές της V_g από την περιοχή πριν και μετά απ' το κατώφλι V_T . Οι καμπύλες και εδώ παρουσιάζονται σε γραμμική αλλά και σε ημιλογαριθμική κλίμακα, για καλύτερη εποπτεία των πειραματικών σημείων.

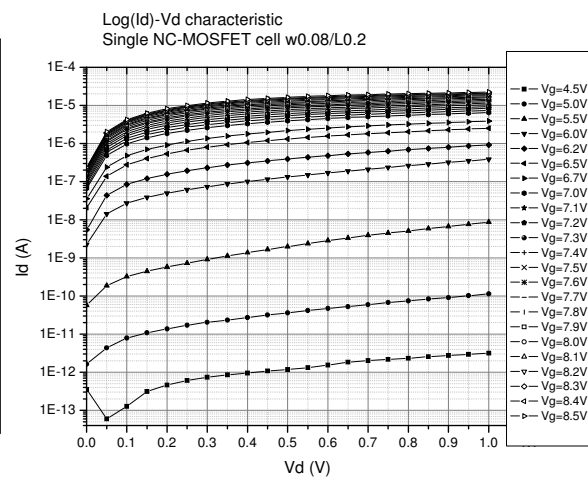
Μπορούμε, κατ' αρχήν, να διακρίνουμε την περιοχή γραμμικής αύξησης του ρεύματος (linear), ενώ στη συνέχεια την αναμενόμενη τάση κορεσμού του ρεύματος με την αύξηση της τάσης V_d (saturation). Για κάθε τιμή της V_d βλέπουμε και εδώ ότι εκεί γύρω στα $V_g=6V$ με $6.5V$ και πάνω αρχίζει το κανάλι να άγει ρεύμα, επιβεβαιώνοντας την προηγούμενη μας εκτίμηση για την τιμή της V_T .

Επίσης, μπορούμε γενικά να συγκρίνουμε και να επαληθεύσουμε κατά πόσο οι καμπύλες I_d - V_g , και I_d - V_d είναι μεταξύ τους συνεπείς, «διαβάζοντας» κάποια σημεία. Για παράδειγμα, το σημείο όπου $V_g=8.5V$ και $V_d=0.6V$ μας δίνει και στις δύο καμπύλες το ίδιο ρεύμα $I=1.8 \cdot 10^{-5} A$.

(α)



(β)



Εικόνα 7-10.

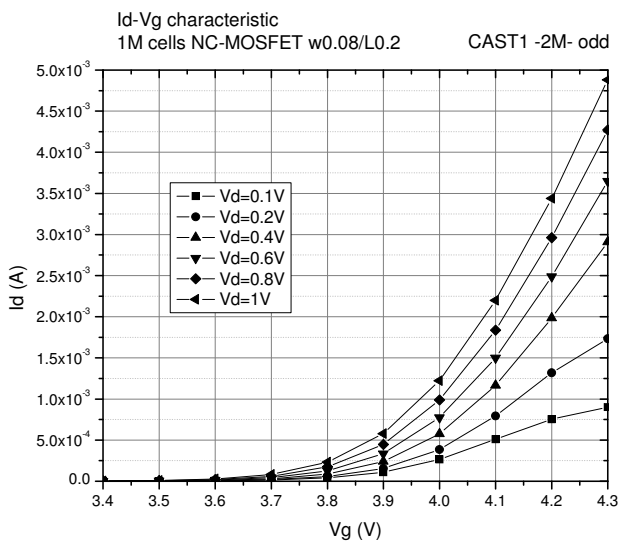
Η χαρακτηριστική καμπύλη I_d - V_d , για διάφορες τάσεις V_g , σε αφόρτιστο μονό NC-MOSFET.

(α) γραμμική κλίμακα, (β) ημιλογαριθμική κλίμακα

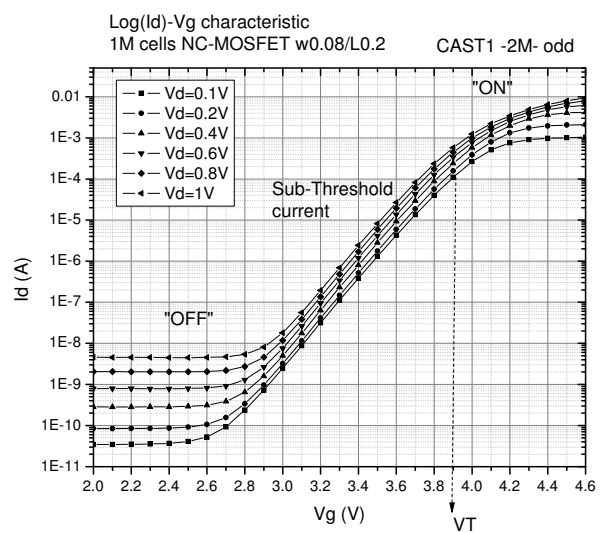
Αφού έχουμε διαπιστώσει την ορθή συμπεριφορά των μονών κελιών ως τρανζίστορ, στη συνέχεια παρουσιάζουμε τις χαρακτηριστικές ρεύματος - τάσης για αφόρτιστο CAST-1, όπου μετράμε 1M κελιά ίδιων NC-MOSFET συνδεδεμένων παράλληλα .

Λόγω συνεισφοράς συνολικά ενός εκατομμυρίου τρανζίστορ, διαπιστώνουμε απ' την καμπύλη I_d - V_g της εικόνας το αναμενόμενα αυξημένο ρεύμα σε σχέση με του ενός κελιού, τόσο στην περιοχή μετά την τάση κατωφλίου, όσο και πριν. Εκτιμούμε την τάση $V_T=3.9V$.

(α)



(β)



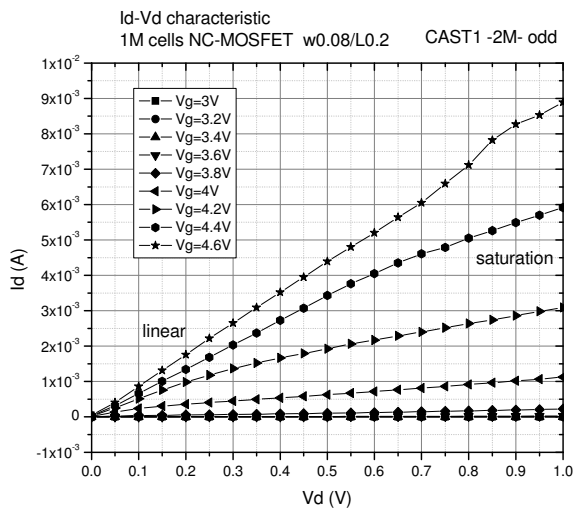
Εικόνα 7-11.

Η χαρακτηριστική καμπύλη I_d - V_g , για διάφορες τάσεις V_d , στο αφόρτιστο CAST-1, 1M κελιών.

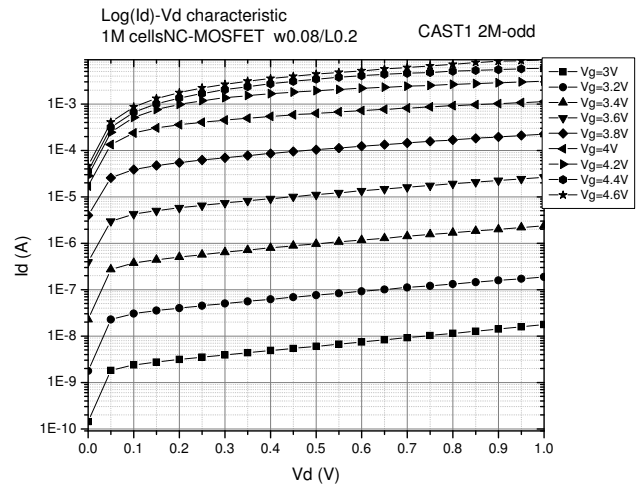
(α) γραμμική κλίμακα, (β) ημιλογαριθμική κλίμακα

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε τις καμπύλες I_d - V_d , για διάφορες τιμές τάσης πύλης V_g , πριν και μετά απ' την τάση κατωφλίου. Διαπιστώνουμε την αναμενόμενη γραμμική αυξητική συμπεριφορά του ρεύματος του CAST καθώς σαρώνουμε την τάση του καναλιού, και επίσης την κάμψη του ρεύματος προς την περιοχή κορεσμού (εικόνα α). Απ' την καμπύλη (β) με την ημιλογαριθμική κλίμακα επαληθεύουμε ότι πράγματι για τάση V_g πάνω από 3.8V-4V αρχίζει το CAST να λειτουργεί "ON" με το ρεύμα του συνόλου των κελιών του.

(α)



(β)

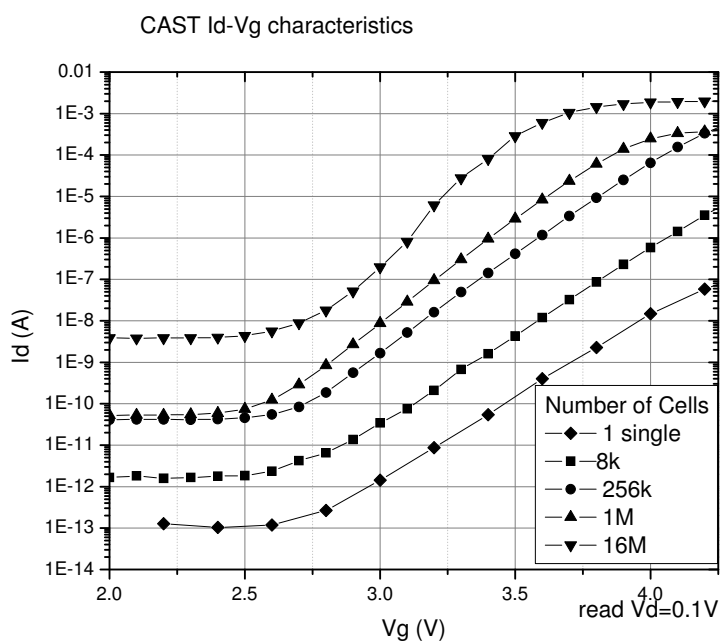


Εικόνα 7-12.

Η χαρακτηριστική καμπύλη I_d - V_d , για διάφορες τάσεις V_g , στο αφόρτιστο CAST-1, 1M κελιών. (α) γραμμική κλίμακα, (β) ημιλογαριθμική κλίμακα

7.4.2 Εξάρτηση του ρεύματος απ' τον αριθμό των κελιών σε κάθε CAST.

Κάθε CAST που μελετάμε αποτελείται από διαφορετικό αριθμό ίδιων τρανζίστορ ($w/L=0.08/0.2$), από τα οποία προκύπτει διαφορετική συνεισφορά στο συνολικό ρεύμα, ανάλογη με το ίδιο το πλήθος τους. Στο γράφημα της εικόνας παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες I_d-V_g για καθένα απ' τα 4 CAST που διαθέτουμε. Ως σημείο αναφοράς για να συγκρίνουμε τις τιμές του ρεύματος, θεωρούμε τις καμπύλες σχεδόν παράλληλες, τοποθετούμε τις χαρακτηριστικές ώστε το υπο-κατωφλιακό «γόνατο» να ξεκινάει κοντά στα 2.5V και σημειώνουμε το ρεύμα στα 3V. Παρατηρούμε κατ' αρχήν ότι πράγματι καθώς αυξάνεται ο αριθμός των κελιών αυξάνεται και η τιμή του ρεύματος.



Εικόνα 7-13.

Οι χαρακτηριστικές I_d-V_g καμπύλες για τα CAST και το απλό NC-MOSFET.

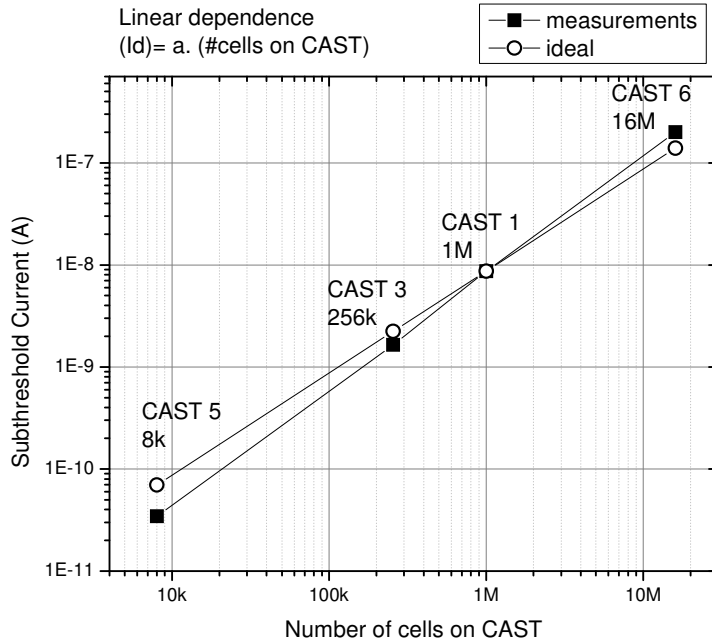
Οι αριθμοί των κελιών που έχουν σημειωθεί αφορούν στο even (ή odd) κομμάτι του κάθε CAST.

Για να ελέγξουμε την υπόθεση της γραμμικής εξάρτησης ανάμεσα στο ρεύμα του καναλιού και στο πλήθος των στοιχείων, σχεδιάζουμε τη γραφική παράσταση της τιμής του ρεύματος που σημειώσαμε συναρτήσει του αριθμού των κελιών (εικόνα). Θεωρώντας αυθαίρετα, έπειτα, ότι η πειραματική τιμή για τα 1M τρανζίστορς ταυτίζεται με την αναμενόμενη, σχεδιάζουμε την ιδανική ευθεία:

$$I_d \text{ current} = a \cdot (\text{Number of cells}) \quad (7.2)$$

Διαπιστώνουμε ότι τα πειραματικά σημεία όχι μόνο επαληθεύουν τη γραμμική εξάρτηση που περιμέναμε, αλλά επίσης οι δύο ευθείες σχεδόν ταυτίζονται, στα πλαίσια των πειραματικών σφαλμάτων. Μπορούμε να σημειώσουμε και την κλίση των δύο ευθειών, για τη μεν πειραματική : $a_{\text{meas}} = 1.2 \cdot 10^{-14} \text{ Amp/cell}$, ενώ για την ιδανική : $a_{\text{ideal}} = 0.87 \cdot 10^{-14} \text{ Amp/cell}$.

Όσον αφορά στο ρεύμα ενός τρανζίστορ (single cell), δεν παρουσιάζεται εδώ, επειδή η πειραματική τιμή που παίρνουμε για εκείνο το σημείο είναι της τάξης των 10^{-12} A , ενώ ιδανικά θα αναμέναμε ρεύμα $10^{-15} - 10^{-14} \text{ A}$. Η αιτία βρίσκεται στο επίπεδο του θορύβου του συστήματός μας, το οποίο δε μας επιτρέπει να έχουμε τέτοιες μετρήσιμες τιμές, αλλά από $10^{-13} - 10^{-12} \text{ A}$ και πάνω.

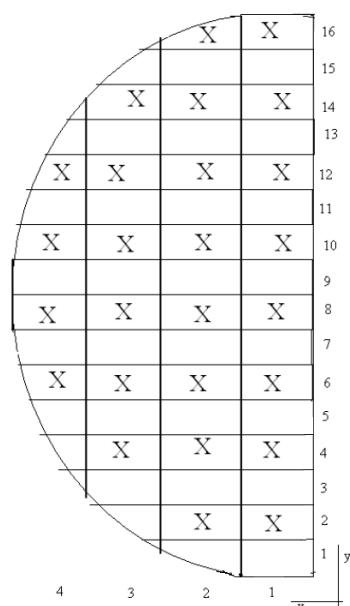


Εικόνα 7-14.

Τα πειραματικά και τα ιδανικά σημεία που δείχνουν την γραμμική εξάρτηση του ρεύματος καναλιού από τον αριθμό των τρανζίστορς στα CAST.

7.4.3 Μελέτη του προγραμματισμού των μνημών.

Έχουμε στη διάθεση μας το μισό κομμάτι ενός μεγάλου δισκίου (wafer), χωρισμένο σε πλαίσια που αντιστοιχούν στα δείγματα που μας ενδιαφέρουν. Στην εικόνα φαίνεται το δισκίο με σημειωμένες τις θέσεις των δειγμάτων που μπορούμε να μελετήσουμε. Θέλοντας να ονομάσουμε τα δείγματα σε σχέση με τη θέση τους στο δισκίο, έχουμε ορίσει τις συντεταγμένες με τον προσανατολισμό που φαίνεται στο σχέδιο. Έτσι, θα μπορέσουμε να συμπεράνουμε αν και εφόσον εξαρτάται η προγραμματιστική συμπεριφορά των μνημών από τη θέση τους στο wafer. Αυτό που περιμένουμε να ισχύει, απ' τις προδιαγραφές της εταιρείας που μας το προμήθευσε, είναι να συναντήσουμε μεγαλύτερα παράθυρα μνήμης προς το κέντρο του wafer, τα οποία να μειώνονται καθώς κινούμαστε ακτινικά στην περιφέρεια του κύκλου. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην όχι ομοιόμορφη, αλλά κανονική κατανομή των εμφυτευμένων νανοσωματιδίων στις μνήμες, που σημαίνει μείωση της επιφανειακής τους πυκνότητας απ' το κέντρο προς τα άκρα.



Εικόνα 7-15.

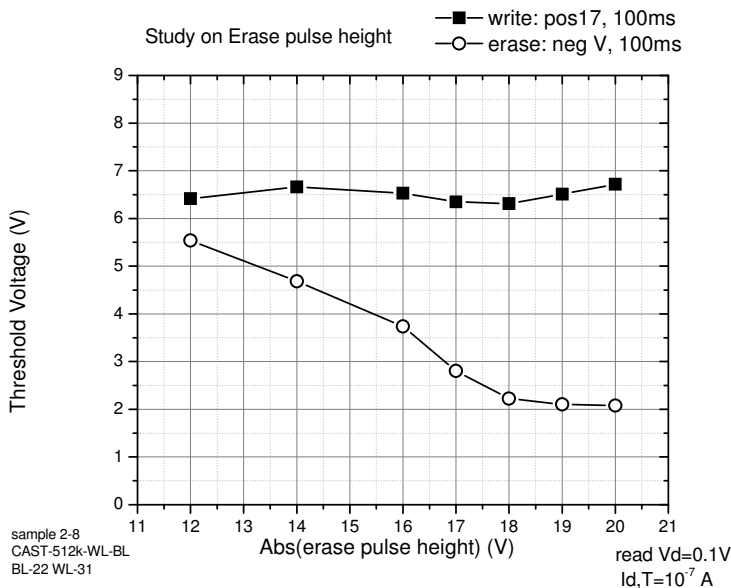
Συντεταγμένες θέσης των δειγμάτων στο μισό wafer. Τα δείγματα που μας ενδιαφέρουν είναι σημειωμένα με X. Το κέντρο του κυκλικού δισκίου βρίσκεται γύρω απ' τη θέση $(x,y) = (1,8)$.

Για να μελετήσουμε τη συμπεριφορά των τρανζίστορ ως μνήμες, πρέπει να ακολουθήσουμε τη διαδικασία η οποία θα μας επιτρέψει να επιλέξουμε τους καλύτερους παλμούς προγραμματισμού, που σημαίνει ένα ικανοποιητικό παράθυρο μνήμης, με σχετικά μικρές τάσεις και μικρούς χρόνους.

Τα επόμενα βήματα πραγματοποιήθηκαν στο δείγμα 2-8, που βρίσκεται σε κεντρική περιοχή του μισού wafer που περιγράψαμε. Τη διαφορά ΔV_T κατά την σχετική μετατόπιση της καμπύλης I_d-V_g ανάμεσα στις δύο καταστάσεις “1” και “0”, δηλαδή το παράθυρο μνήμης, θα το ορίσουμε για τα μεν single NC-MOSFET απ’ το ρεύμα 10^{-7} A, για τα δε CAST απ’ το ρεύμα 10^{-4} A.

A) Μελέτη του παράθυρου μνήμης μεταβάλλοντας το ύψος του αρνητικού παλμού “Erase”

Με σκοπό να μελετήσουμε την εξάρτηση του παράθυρου μνήμης από την τάση “Διαγραφής” με σταθερή διάρκεια, εφαρμόσαμε διαδοχικούς παλμούς, κρατώντας ίδιο τον παλμό “Εγγραφής”. Συγκεκριμένα, για “Write” : (+17V, 100ms), ενώ για “Erase”: (-V, 100ms). Το παρακάτω γράφημα μας δείχνει μια σαφή αύξηση του παράθυρου της μνήμης καθώς αυξάνεται ο αρνητικός παλμός “0”, από -12V έως -20V, με το επίπεδο της V_T για την κατάσταση “1” να παραμένει πρακτικά σταθερό. Διαπιστώνοντας ότι αρχίζει κορεσμός γύρω στις τιμές -18V με -20V, επιλέγουμε ως κατάλληλη τάση για τον αρνητικό παλμό τα -18V.

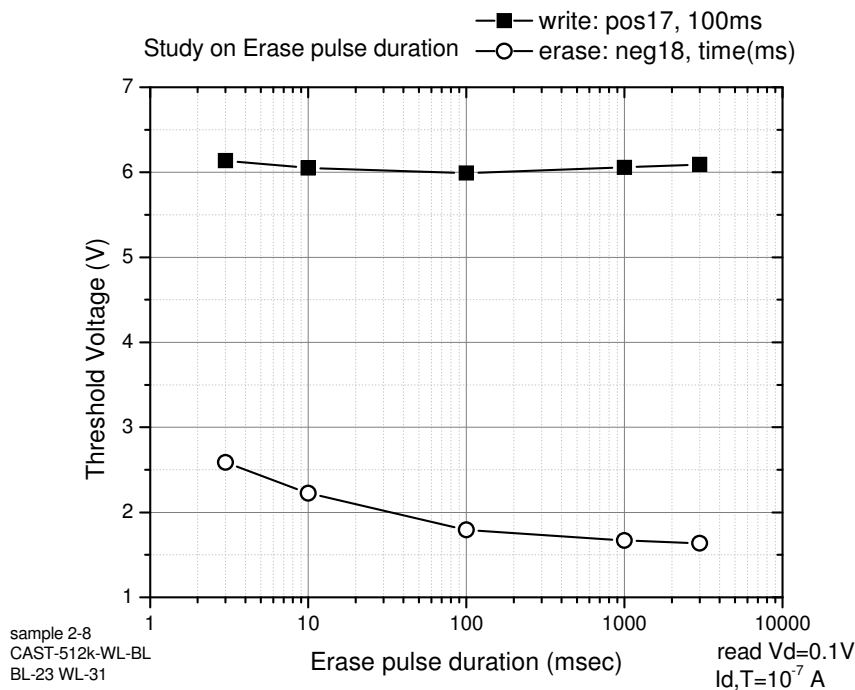


Εικόνα 7-16

Η μελέτη του παράθυρου μνήμης μεταβλητού ύψους παλμού διαγραφής.

B) Μελέτη του παράθυρου μνήμης μεταβάλλοντας τη διάρκεια του αρνητικού παλμού “Erase”

Αφού επιλέξαμε για τάση της “διαγραφής” τα -18V , πρέπει να βρούμε την εξάρτηση του παράθυρου μνήμης απ’ τη διάρκεια του παλμού. Εφαρμόζουμε σε άλλο τρανζίστορ του ίδιου δείγματος διαδοχικούς παλμούς, για “Write”: $(+17\text{V}, 100\text{ms})$, ενώ για “Erase”: $(-18\text{V}, t(\text{ms}))$. Στο γράφημα διαπιστώνουμε την αύξηση του παραθύρου με την αύξηση της διάρκειας του παλμού “διαγραφής”, ενώ η τάση V_T της κατάστασης “1” διατηρείται σταθερή. Η επιλογή του πιο κατάλληλου χρόνου θα γίνει παρατηρώντας έναν κορεσμό μετά τα 100ms , και επιπλέον θεωρώντας ότι χρόνοι μεγαλύτεροι των 100ms είναι απαγορευτικοί για τη γρήγορη λειτουργία μιας μνήμης. Συνεπώς, η επιλογή των 100ms για τον αρνητικό παλμό θεωρείται η καλύτερη, αλλά πρέπει να σημειωθεί για ακόμα γρηγορότερη λειτουργία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και η διάρκεια των 10ms , αφού δίνει εξίσου ικανοποιητικά μεγάλο παράθυρο.

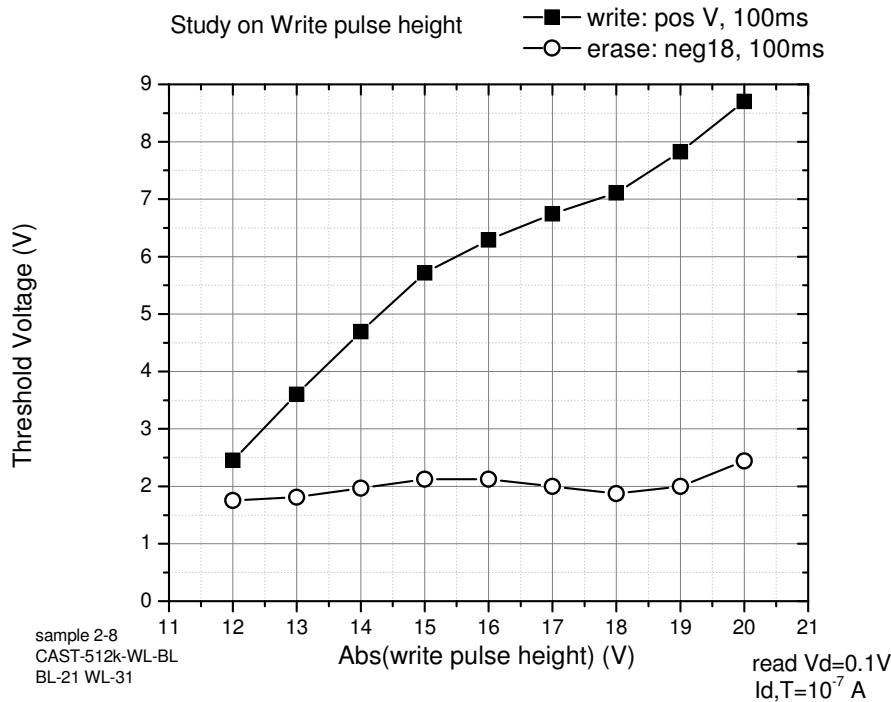


Εικόνα 7-17

Η μελέτη του παράθυρου μνήμης μεταβλητής διάρκειας παλμού διαγραφής.

Γ) Μελέτη του παράθρου μνήμης μεταβάλλοντας το ύψος του θετικού παλμού “Write”

Αφού έχουμε από πριν καταλήξει στην επιλογή ενός κατάλληλου αρνητικού παλμού, μελετάμε το ύψος της τάσης του θετικού παλμού, με διαδοχικούς παλμούς “Erase”: (-18V, 100ms) και “Write”: (+V, 100ms). Παρατηρούμε το γράφημα που δείχνει την αύξηση του παράθρου της μνήμης, μεταβάλλοντας την θετική τάση της κατάστασης “1” από +12V έως +20V, με σταθερό το επίπεδο επαναφοράς στην κατάσταση “0”. Έχοντας υπόψη μας ότι από τα +19V και πάνω εισερχόμαστε στην επικίνδυνη περιοχή της κατάρρευσης του διηλεκτρικού (break down Voltage), επιλέγουμε ως προτιμότερη τιμή τάσης του θετικού παλμού τα +18V.

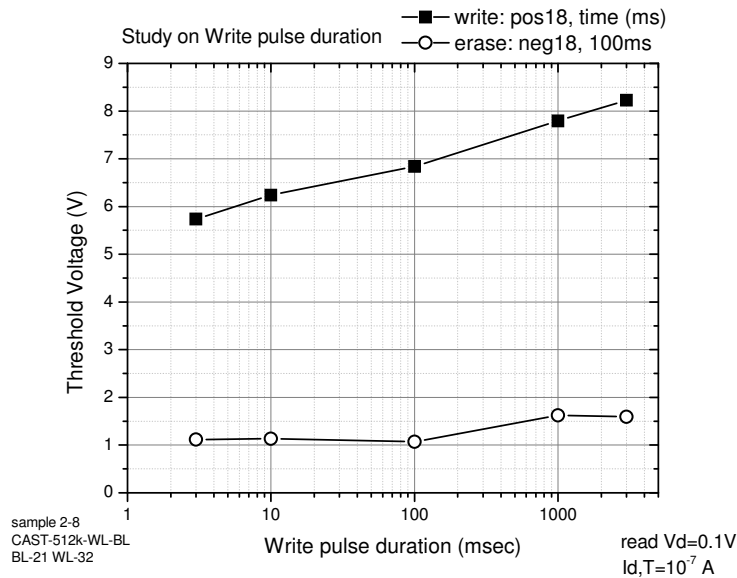


Εικόνα 7-16

Η μελέτη του παράθρου μνήμης μεταβλητού ύψους παλμού εγγραφής.

Γ) Μελέτη του παράθυρου μνήμης μεταβάλλοντας τη διάρκεια του θετικού παλμού “Write”

Έχοντας επιλέξει και την τάση “Εγγραφής”, βρίσκουμε την εξάρτηση του παράθυρου μνήμης από τη διάρκεια του θετικού παλμού. Οι διαδοχικοί παλμοί που εφαρμόζονται είναι για το “Erase”:(-18V,100ms), και για το “Write”:(+18V, t (ms)). Στο γράφημα της εικόνας παρατηρούμε την αυξητική συμπεριφορά του παραθύρου, με πρακτικά αμετάβλητο το επίπεδο αναφοράς για την κατάσταση “0”. Διαπιστώνοντας και σε αυτή την περίπτωση ικανοποιητικά μεγάλο παράθυρο για διάρκειες παλμού 100ms αλλά και 10ms, και επισημαίνοντας πάλι την ανάγκη γρήγορου προγραμματισμού της μνήμης, καταλήγουμε στα 100ms ως τη βέλτιστη περίπτωση.



Εικόνα 7-17

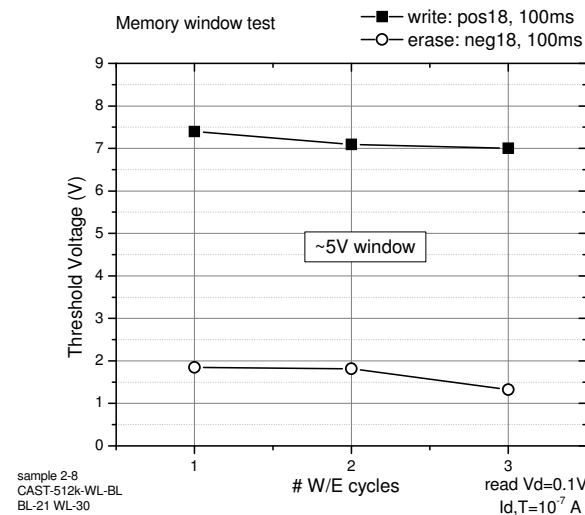
Η μελέτη του παράθυρου μνήμης μεταβλητής διάρκειας παλμού εγγραφής.

Δ) Έλεγχος του παράθυρου μνήμης .

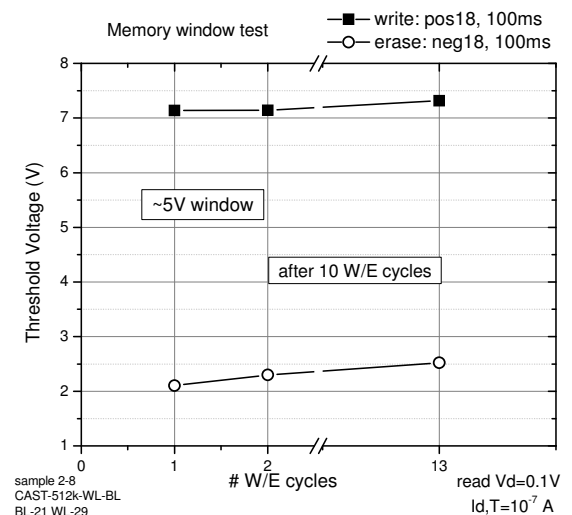
Έχουμε επιλέξει από την προηγούμενη μελέτη τον προγραμματισμό των μνημών με παλμούς “Write”: (+18V, 100ms) και “Erase”: (-18V, 100ms). Στη συνέχεια ελέγχουμε κατά πόσο αυτός ο προγραμματισμός μας δίνει ένα σταθερό και συνεπές με την παραπάνω μελέτη παράθυρο μνήμης στο ίδιο δείγμα, και επίσης κατά πόσο όλα τα δείγματα που διαθέτουμε παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά.

Στα παρακάτω γραφήματα ελέγχουμε ενδεικτικά δύο μνήμες απ’ το ίδιο δείγμα (διαφορετικά BL-WL single cells), για μια σειρά κύκλων των επιλεγμένων παλμών Write/Erase, και διαπιστώνουμε ότι πράγματι το παράθυρο μνήμης είναι σταθερό γύρω στα 5V.

(α)



(β)

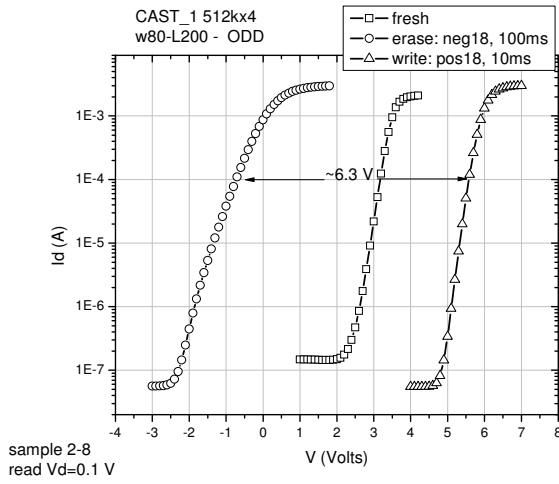


Εικόνα 7-18.

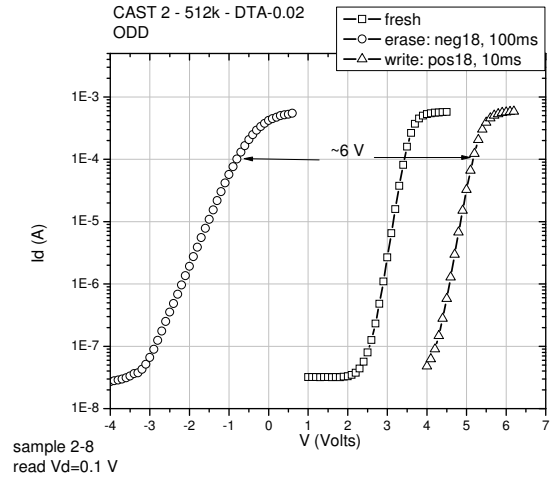
Παράθυρο μνήμης για δύο μνήμες του ίδιου δείγματος, με Write: +18V, 100ms, Erase: -18V, 100ms

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε το παράθυρο μνήμης για τα CAST τα οποία βρίσκονται στο ίδιο πάντα δείγμα με τις παραπάνω μνήμες (εικόνα) . Πρέπει να σημειωθεί ότι το σχετικό υψηλό υπο-κατωφλιακό ρεύμα (sub-threshold current) οφείλεται σε ένα υψηλό επίπεδο θορύβου, που δεν επηρεάζει το παράθυρο, αλλά διορθώθηκε στη συνέχεια των εργασιών, και οφειλόταν σε αστοχίες του μετρητικού συστήματος. Παρατηρούμε ότι πετυχαίνουμε ένα παράθυρο μνήμης γύρω στα 6V, λίγο μεγαλύτερο δηλαδή από τα μονά NC-MOSFET .

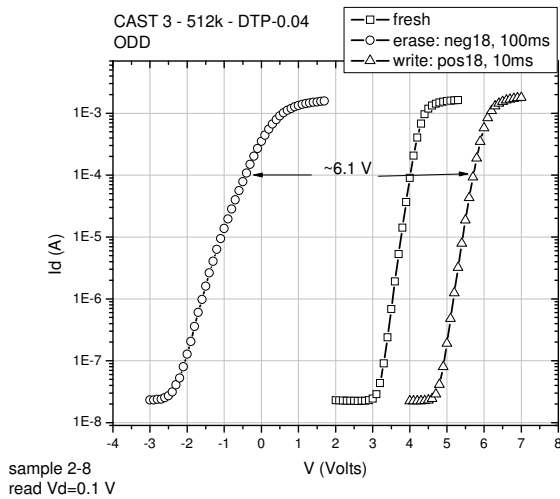
(α)



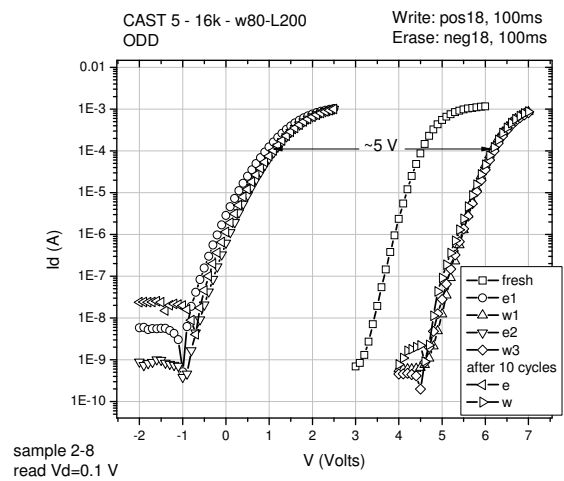
(β)



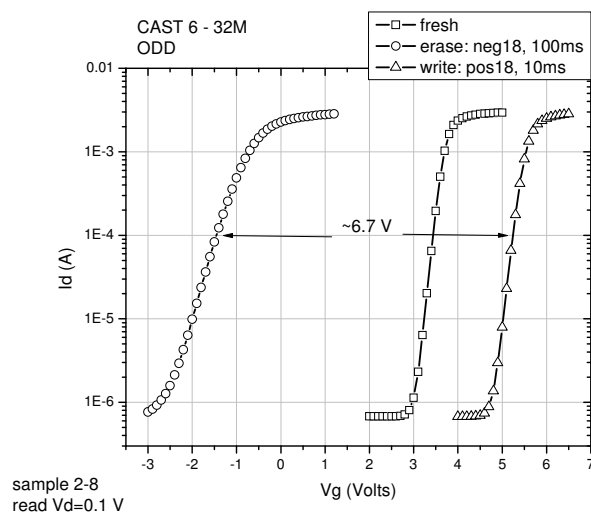
(γ)



(δ)



(ε)



Εικόνα 7-19.

Το παράθυρο μνήμης για τα CAST με παλμούς προγραμματισμού

Write: +18V, 100ms, Erase: -18V, 100ms.

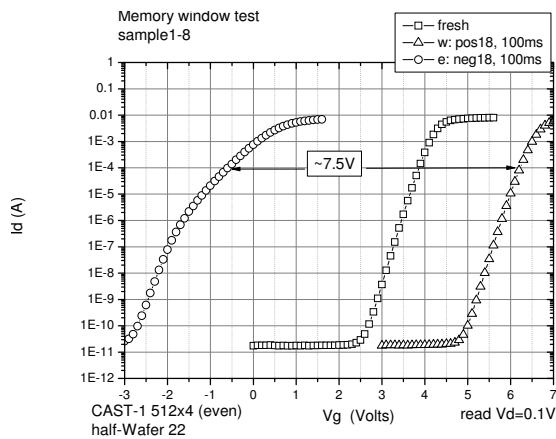
α) CAST-1, β) CAST-2, γ) CAST-3,

δ) CAST-5, ε) CAST-6.

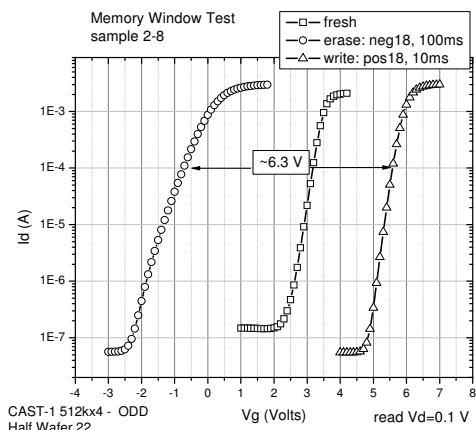
Ε) Το παράθυρο μνήμης σε σχέση με τη θέση του δείγματος στο δισκίο.

Για τους επιλεγμένους παλμούς προγραμματισμού μελετάμε το παράθυρο μνήμης για δείγματα που βρίσκονται σε διαφορετικές θέσεις πάνω στο μισό wafer του σχήματος. Διαπιστώνουμε ότι πράγματι μεταβάλλεται το παράθυρο της μνήμης, άρα η κατανομή των νανοσωματιδίων δεν είναι ίδια παντού, απ' την κατασκευή του δισκίου. Απ' τα γραφήματα της εικόνας μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι κοντά στο κέντρο το παράθυρο προκύπτει γύρω στα 6-7V (για τα CAST), και 2-4V για περιοχές κοντά στην περιφέρεια. Πρέπει, βέβαια, να τονιστεί, ότι διαπιστώσαμε και περιμένουμε παρόμοια παράθυρα για μνήμες του ίδιου δείγματος, αφού η πυκνότητα των νανοσωματιδίων είναι πρακτικά ίδια.

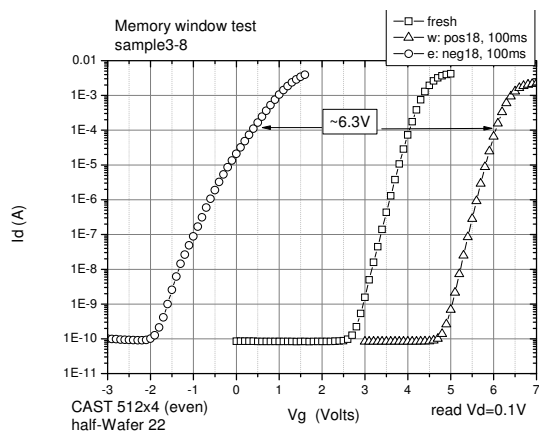
(α)



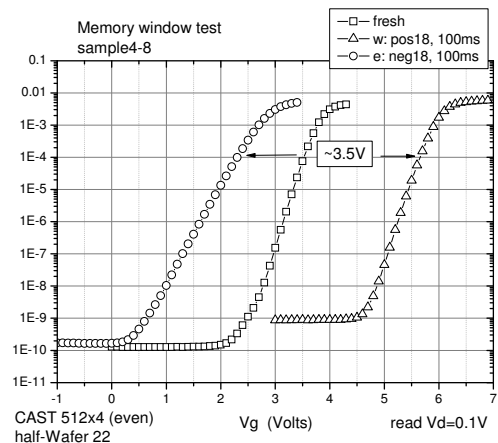
(β)



(γ)



(δ)



Εικόνα 7-20.

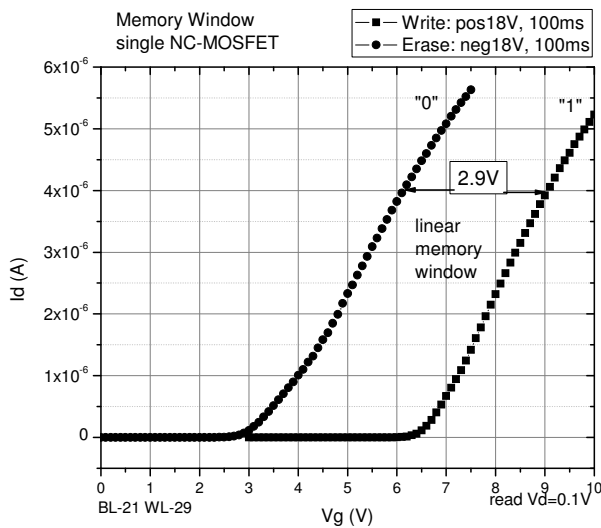
Το παράθυρο μνήμης (εδώ ενδεικτικά του CAST-1-even) μεταβάλλεται για διαφορετικά δείγματα, ανάλογα με τη θέση τους στο δισκίο. α) δείγμα 1-8, β) δείγμα 2-8, γ) δείγμα 3-8, δ) δείγμα 4-8.

7.4.4 Παράθυρο μνήμης για γραμμική και υπο-κατωφλιακή περιοχή.

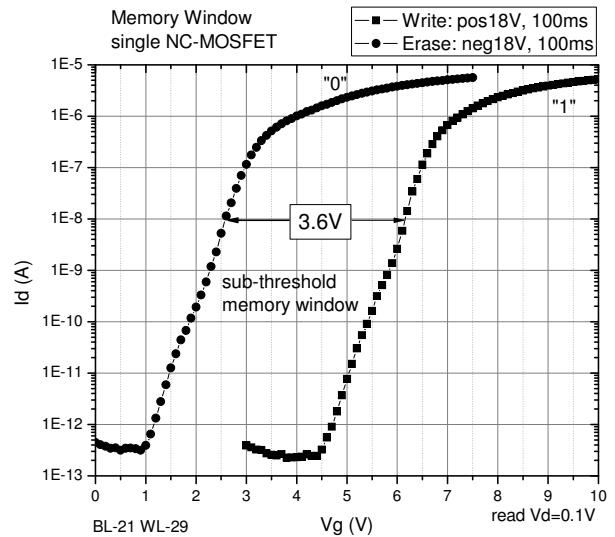
Έχει ενδιαφέρον να δείξουμε ότι αν δεχτούμε διαφορετικό ρεύμα αναφοράς $I_{d,T}$, απ' το οποίο βρίσκουμε το παράθυρο μνήμης, μεταβάλλεται ελάχιστα η ίδια η διαφορά ΔV_T . Συγκεκριμένα θα δείξουμε ότι το παράθυρο μνήμης στη περιοχή sub-threshold είναι κατά τι μεγαλύτερο από εκείνο στη γραμμική – linear περιοχή, ενώ γενικά δε θα έπρεπε να βρεθούν διαφορές, αφού στις μνήμες FG δεν παρατηρείται κάτι τέτοιο.

Στην εικόνα παρουσιάζουμε ενδεικτικά το παράθυρο μνήμης για ένα single NC-MOSFET. Σε γραμμική κλίμακα σημειώνουμε τη διαφορά ΔV_T (linear memory window) για ρεύμα $I_{d,T}=4 \cdot 10^{-6}$ A, κι επίσης σε ημιλογαριθμική (sub-threshold memory window), για ρεύμα $I_{d,T}=1 \cdot 10^{-8}$ A. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο παράθυρα είναι 0.7V.

(α)



(β)



Εικόνα 7-21.

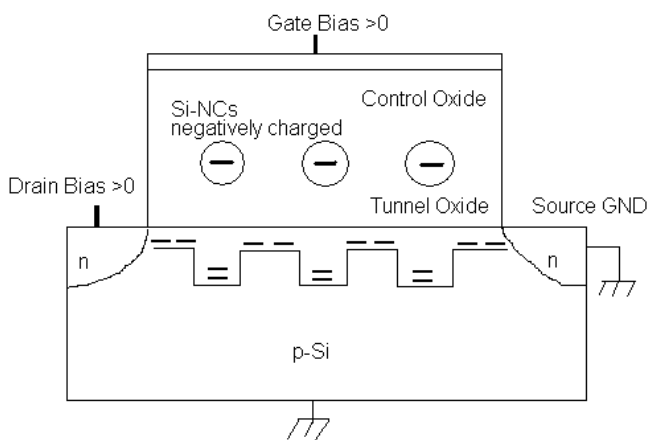
Κατά 0.7V διαφορετικό παράθυρο μνήμης NC-MOSFET στην (α) γραμμική περιοχή του ρεύματος, και στη (β) υπο-κατωφλιακή περιοχή.

Το φαινόμενο και οι αιτίες αυτού έχουν συζητηθεί στο [2]. Ο βασικός λόγος ύπαρξης αυτής της διαφοράς βρίσκεται στα ίδια τα νανοσωματίδια και στην κατανομή τους, σε αντίθεση με τις κλασικές FG μνήμες αιωρούμενης ενιαίας πύλης. Μια πρώτη αιτία βρίσκεται στο γεγονός της διαφορετικής διηλεκτρικής σταθεράς του οξειδίου και του πυριτίου των νανοσωματιδίων, κάτι που δημιουργεί τοπικά μεταβολές στη χωρητικότητα του πυκνωτή της πύλης, άρα και στο δυναμικό του καναλιού καθώς αυξάνεται η τάση της πύλης.

Μια δεύτερη αιτία : Στην κατάσταση “1”, όπου τα νανοδοματίδια είναι φορτισμένα αρνητικά και εφαρμόζουμε θετική τάση πύλης, στην επιφάνεια του υποστρώματος Si δεν υπάρχει ομοιόμορφη αντιστροφή (inversion). Λόγω του αρνητικού φορτίου μέσα στα νανοδοματίδια, το p-κανάλι από κάτω τους είναι λιγότερο αντεστραμμένο, ενώ η αντιστροφή είναι ισχυρότερη κάτω απ’ τις περιοχές που βρίσκονται ανάμεσα σε αυτά. Στην κατάσταση “0” απ’ την άλλη, τα νανοδοματίδια είναι φορτισμένα θετικά, και εφαρμόζοντας θετική τάση πύλης συμβαίνει ισχυρότερη αντιστροφή στις περιοχές του καναλιού κάτω από αυτά, κι ασθενέστερη ανάμεσα.

Κατά την εφαρμογή της τάσης καναλιού V_d , λοιπόν, για να περάσει ρεύμα I_d , τα ηλεκτρόνια για την μεν περίπτωση “1” πρέπει να υπερνικήσουν τα εντοπισμένα φράγματα δυναμικού κάτω από τα αρνητικά νανοδοματίδια (γι αυτό και προκύπτει μεγαλύτερη τάση V_T), ενώ στην περίπτωση “0” έχουμε ένα ισχυρά αντεστραμμένο κανάλι, ώστε χρειαζόμαστε μικρότερη τάση V_T για να διέλθει ρεύμα. Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα να δημιουργείται και για τις δύο περιπτώσεις ένα μη ομοιόμορφο δίκτυο αγωγίων καναλιών που εξαρτάται άμεσα απ’ την κατανομή των νανοδοματιδίων μέσα στο οξειδίο, κάτι που δεν συμβαίνει στην αιωρούμενη πύλη, όπου το πεδίο είναι ομοιόμορφο .

Ειδικότερα όμως στην κατάσταση “1”, στο υπο-κατωφλιακό ρεύμα, όπου η source-to-drain διάχυση ηλεκτρονίων κυριαρχεί, τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται μέσα στα πηγάδια δυναμικού κάτω από τα αρνητικά φορτισμένα νανοδοματίδια κρατάνε χαμηλό το ρεύμα διάχυσης, αφού δυσκολεύονται να ξεπεράσουν το τοπικό φράγμα . Κατά την ισχυρή αντιστροφή, όμως, για μεγαλύτερες θετικές τάσεις πύλης, ηλεκτρόνια έχουν συσσωρευτεί μέσα σε αυτά τα πηγάδια δυναμικού, και έτσι η θερμική τους ενέργεια αρκεί για να ξεπεράσουν εύκολα το φράγμα. Έτσι, λοιπόν, έχουμε μια επιπλέον αύξηση στο ήδη αυξημένο ρεύμα της γραμμικής περιοχής για την κατάσταση “1”, συνεπώς μείωση του παράθυρου μνήμης.

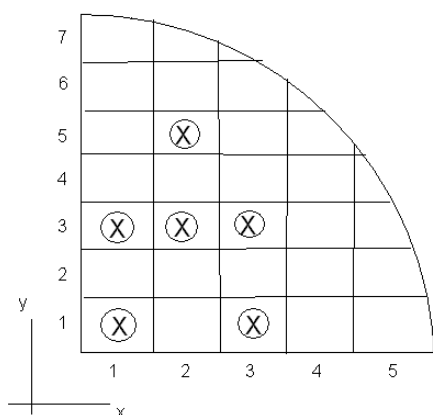


Εικόνα 7-22.

Μνήμη NC-MOSFET με αρνητικά φορτισμένα νανοδοματίδια Si, κάτω από τα οποία δημιουργούνται πηγάδια δυναμικού, μεταβάλλοντας διαφορετικά το ρεύμα καθώς αυξάνεται η θετική τάση πύλης.

7.5 Ακτινοβολήση δειγμάτων .

Τα δείγματα που χρησιμοποιήσαμε για την ακτινοβολήση με πρωτόνια διαφορετικών δόσεων τα επιλέξαμε από το κομμάτι ενός τετάρτου κυκλικού δισκίου (σχήμα wafer στην εικόνα). Επιλέξαμε τα δείγματα PI-11, PI-31, PI-13, PI-23, PI-33, PI-25, και ένα έβδομο PI-S10 από άλλο κομμάτι του αρχικού wafer. Τα ονόματα των δειγμάτων δόθηκαν από τις συντεταγμένες της θέσης που είχαν αρχικά απ' την κατασκευή τους . Έτσι, όπως έχουμε ήδη εξηγήσει, μπορούμε να ερμηνεύσουμε τα διαφορετικά παράθυρα μνήμης που ενδεχομένως θα προκύψουν για διαφορετικά δείγματα, μιας και έχουν διαφορετική κατανομή στην πυκνότητα των εμφυτευμένων νανοσωματιδίων, σχετιζόμενη με την αρχική τους θέση .



Εικόνα 7-23.

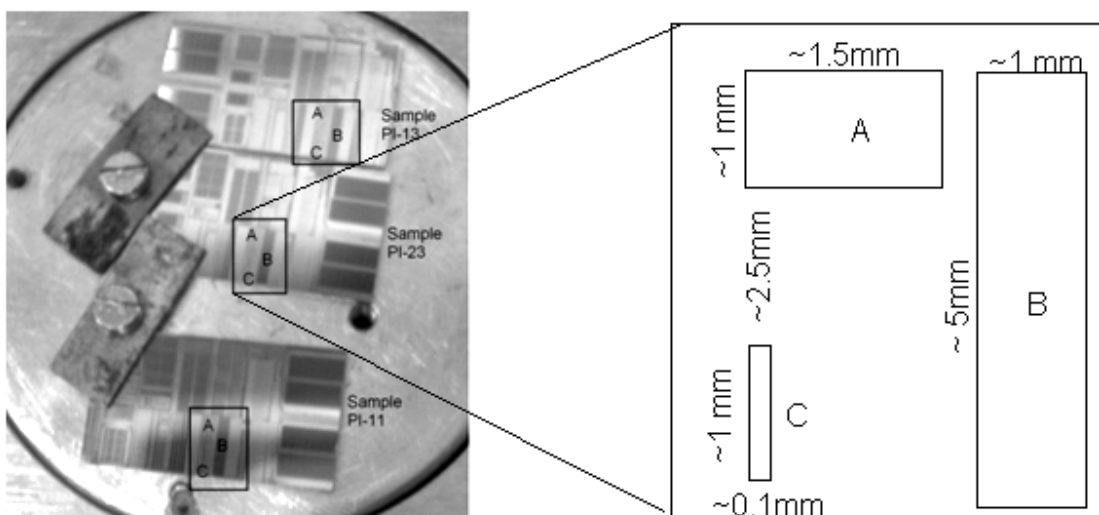
Συντεταγμένες θέσης των PI (Proton-Irradiation) δειγμάτων στο αρχικό $\frac{1}{4}$ wafer. Τα δείγματα είναι σημειωμένα με X. Το κέντρο του κυκλικού δισκίου βρίσκεται γύρω απ' τη θέση (1,1).

Τα δείγματα αυτά που επιλέξαμε να ακτινοβοληθούν έπρεπε προηγουμένως να κοπούν και να αποσπαστούν από το μητρικό δισκίο, ώστε να μπορέσουμε να τα τοποθετήσουμε ως στόχο στον επιταχυντή. Την ειδική και απαιτητική αυτή διαδικασία ανέλαβε το τμήμα Μικροηλεκτρονικής IMEL στον «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟ» .

Τα δείγματα ακτινοβολήθηκαν με δέσμη πρωτονίων (^1H beam 7MeV) στον επιταχυντή σωματιδίων τύπου TANDEM στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ». Η μέθοδος που ακολουθήθηκε ήταν ίδια με εκείνη της ακτινοβολήσης των πυκνωτών που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 6.

Τα δισκία τοποθετήθηκαν στη μεταλλική βάση, που προσαρμόστηκε στο θάλαμο-στόχο υπό συνθήκες υψηλού κενού. Η κάθε περιοχή ακτινοβολήσης εντοπίστηκε με το μάτι μέσω ανακλώμενης ακτίνας Laser, οι συντεταγμένες της οποίας καθόρισαν και το σημείο πρόσπτωσης της δέσμης πρωτονίων. Αρχικά, βέβαια, είχαμε αφήσει τη δέσμη να «κάψει» ένα κομμάτι θερμογραφικού χαρτιού, ώστε να μπορούμε να εκτιμήσουμε το μέγεθος των διαστάσεων της κηλίδας, το οποίο μπορούμε να αναφέρουμε ότι ήταν $1.7\text{mm} \times 1.7\text{mm} = 2.89\text{mm}^2$.

Στην εικόνα φαίνεται σε φωτογραφία η τοποθέτηση τριών δειγμάτων στο στόχο, όπου έχουμε σημειώσει με ένα πλαίσιο τις περιοχές που μας ενδιαφέρουν και ειδικότερα τα σημεία ακτινοβολήσης με τα γράμματα : (A) CAST1-2M, CAST2-512k, CAST3-512k, CAST5-16k, (B) CAST6-32M, (C) CAST- 512k.



Εικόνα 7-24.

Ασπρόμαυρη φωτογραφία των δειγμάτων PI στο στόχο της δέσμης πρωτονίων. Διακρίνονται στα πλαίσια οι περιοχές ακτινοβολήσης και στο σχέδιο έχουν σημειωθεί οι διαστάσεις των περιοχών.

Από την εικόνα φαίνεται ότι η κηλίδα της δέσμης $1.7\text{mm} \times 1.7\text{mm}$ έχει τις διαστάσεις εκείνες ώστε να ακτινοβοληθεί πρώτα όλη η περιοχή (A), έπειτα η (C), αποφεύγοντας την ταυτόχρονη επικάλυψη άλλων περιοχών. Όσο αφορά στην (B), το CAST-6, πρέπει να σημειωθεί ότι ακτινοβολώντας το σχεδόν στο κέντρο πετυχαίνουμε σχεδόν το $1/3$ των κελιών του (αφού $5\text{mm}/1.7\text{mm} \cong 3$). Συνεπώς, για κάθε odd/even μέτρηση του CAST-6 θα μπορούμε να ισχυριστούμε ότι έχουν ακτινοβοληθεί $16\text{M} : 3 \cong 5.3\text{M}$ τρανζίστορς.

Το ρεύμα πρόσπτωσης των πρωτονίων φροντίσαμε να παραμένει σταθερό καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, ίσο με $500 \text{ pA} = 5 \cdot 10^{-10} \text{ p/sec}$. Επιλέχθηκε αυτό το ρεύμα, ώστε για τη συγκεκριμένη επιφάνεια πρόσπτωσης και για τις δόσεις που θα επιλέγαμε, να προκύψουν εύλογοι χρόνοι ακτινοβολήσης, της τάξεως των δευτερολέπτων έως λεπτών. Για να εκτιμήσει κανείς προσεγγιστικά τον απαιτούμενο χρόνο ακτινοβολήσης, χρειάζεται να υπολογίσει πρώτα την επιφανειακή ροή των σωματιδίων, το λεγόμενο flux :

$$\text{flux} = \frac{5 \cdot 10^{-10} \text{ A}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Cb} \cdot 2.89 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2} = 1 \cdot 10^{11} \text{ p/cm}^2 \cdot \text{sec} \quad (7.3)$$

Γνωρίζοντας, βέβαια, το ποσό του προσπίπτοντος φορτίου ανά 100 παλμούς σωματιδίων, αριθμός που μας δόθηκε απ' τους χειριστές του επιταχυντή, όπως επίσης και το εμβαδό της κηλίδας της δέσμης, μπορέσαμε να πετύχουμε την επιθυμητή δόση (p/cm^2), ρυθμίζοντας τον συνολικό αριθμό παλμών. Έτσι, δεν στηριχθήκαμε στην αρκετά επίφοβη μέθοδο της ακτινοβολήσης με βάση την χρονική διάρκεια, αλλά με βάση το συνολικό προσπίπτον φορτίο.

Ακτινοβολήση με πρωτόνια ενέργειας 7 MeV			
Protons I= 500 pA = $5 \cdot 10^{-10}$ Cb/sec.			
Beam spot area= 0.17cm x 0.17cm			
Flux= $1 \cdot 10^{11}$ p/cm².sec			
Δείγματα	Δόση (p/cm²)	Δόση (Mrad(SiO₂))	Διάρκεια (sec)
PI-11	$1 \cdot 10^{11}$	0.24	1
PI-23	$3 \cdot 10^{11}$	0.73	3
PI-13	$1 \cdot 10^{12}$	2.46	10
PI-31	$3 \cdot 10^{12}$	7.38	30
PI-25	$1 \cdot 10^{13}$	24.6	100
PI-S10	$3 \cdot 10^{13}$	73.8	300
PI-33	$1 \cdot 10^{14}$	246	1000

Πίνακας 7-25:

Τα δείγματα που ακτινοβολήθηκαν σε διαφορετικές δόσεις .

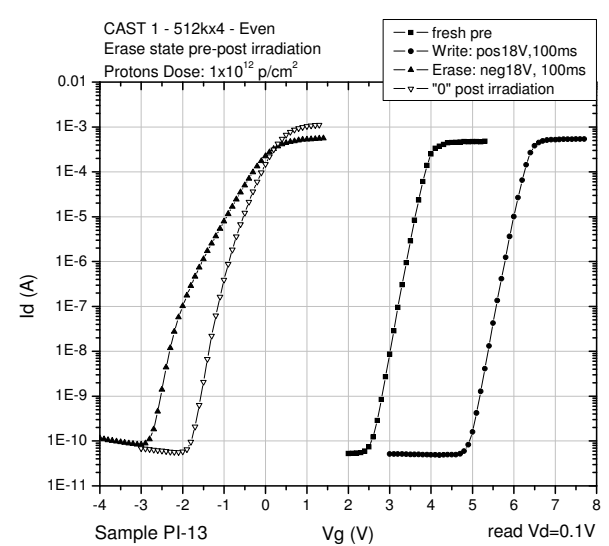
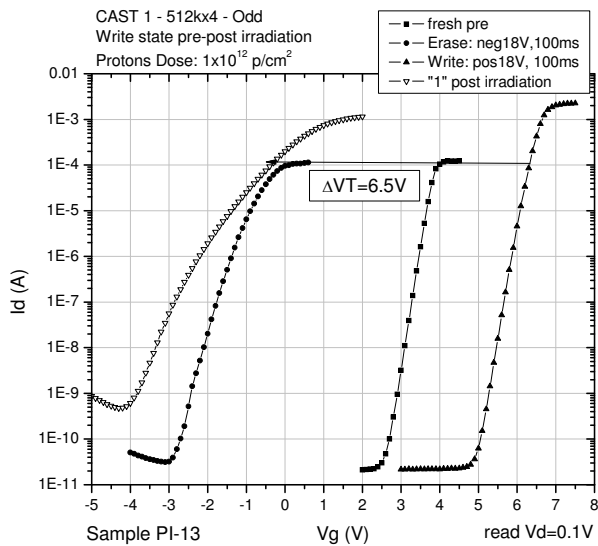
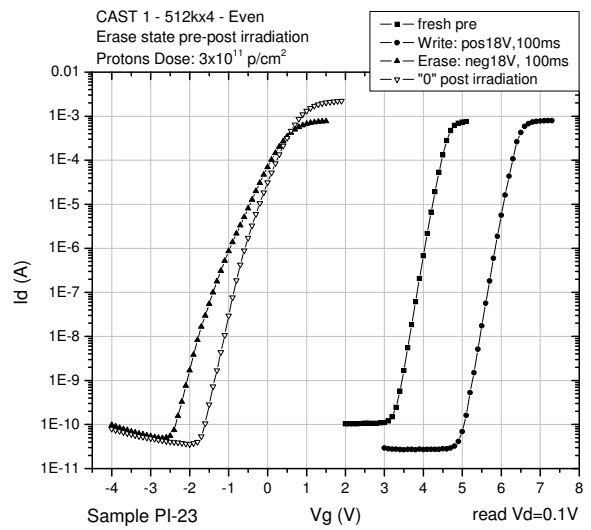
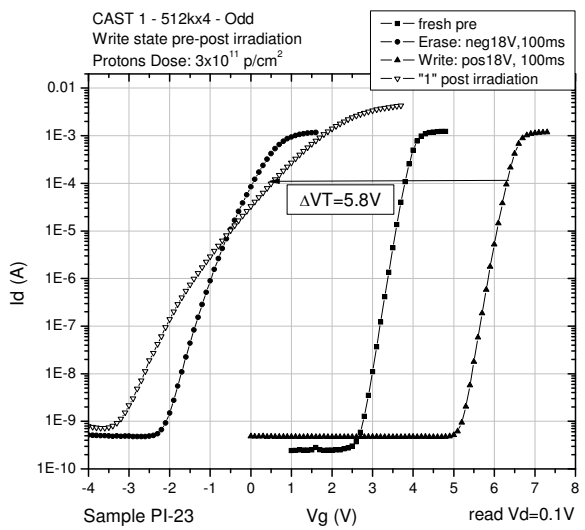
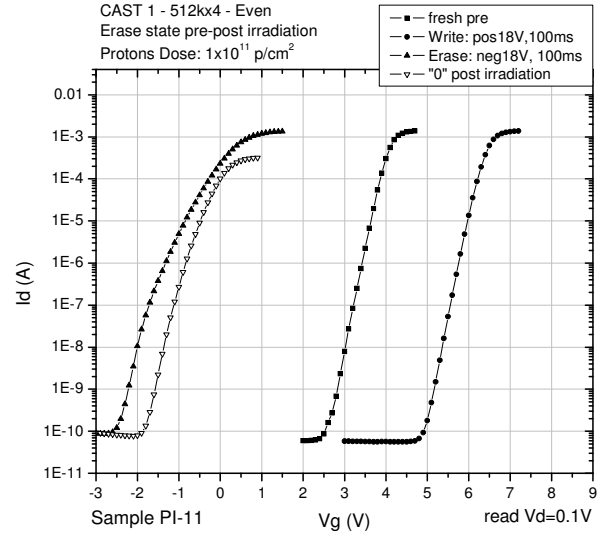
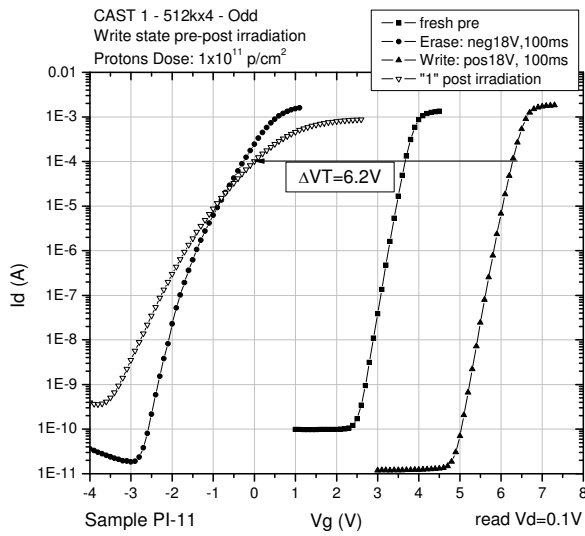
7.6 Επίδραση της ακτινοβολίας πρωτονίων σε προγραμματισμένα CAST.

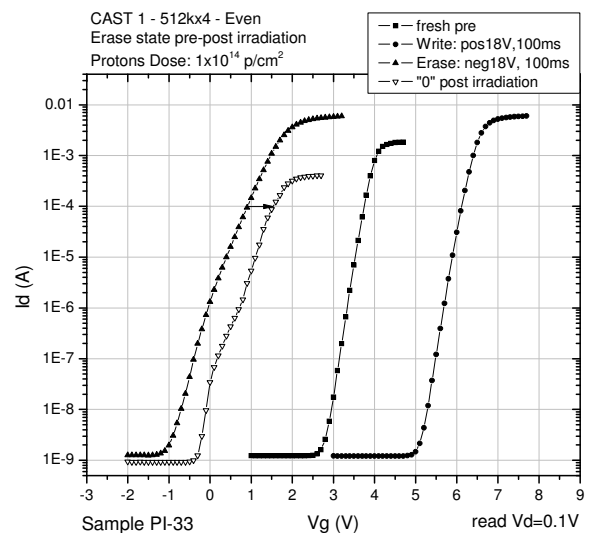
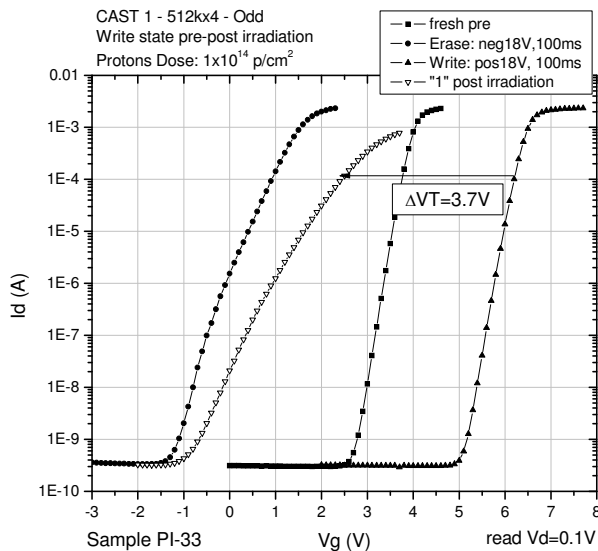
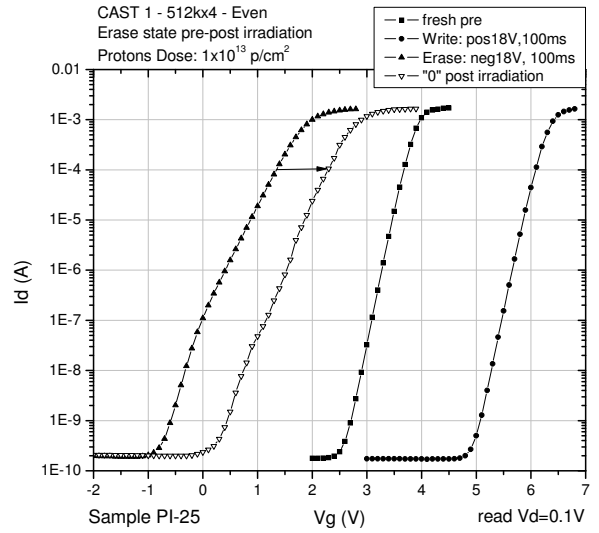
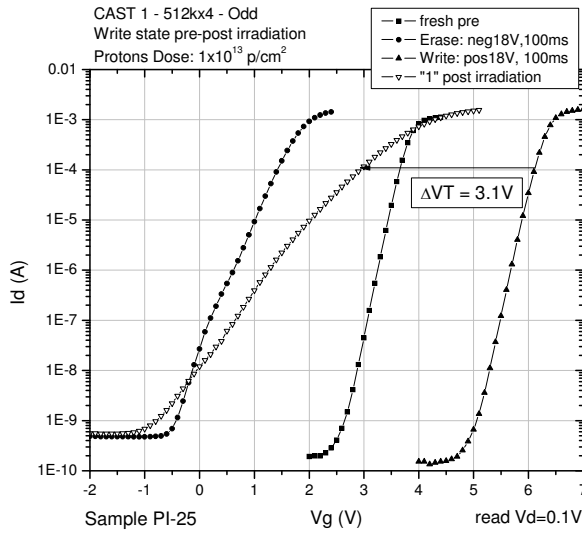
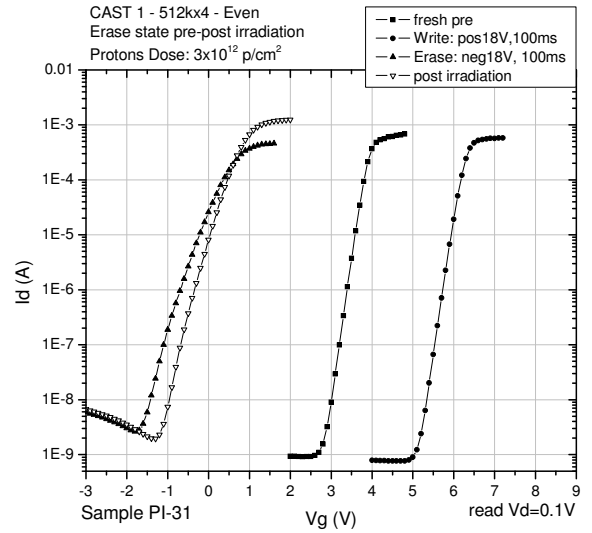
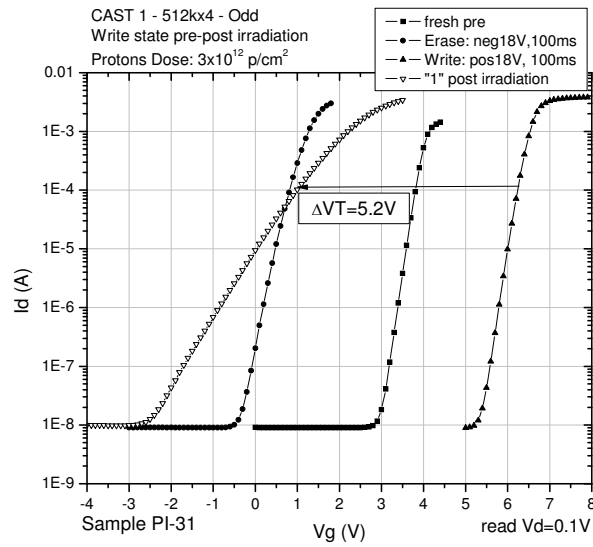
Στην εικόνα 7-26 παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα των χαρακτηριστικών I_d-V_g για αρχικά προγραμματισμένες μνήμες, ενδεικτικά για το CAST-1. Το “odd” μισό του CAST-1, που αποτελείται από 1M κελιά NC-MOSFET, είχε αρχικά προγραμματιστεί στην κατάσταση “1”, ενώ το άλλο μισό “even” στην κατάσταση “0”. Ο αρχικός προγραμματισμός για ένα παράθυρο μνήμης γύρω στα 5-6V έγινε με παλμούς “Write”: (+18V, 100ms), “Erase”: (-18V, 100ms).

Γενικά παρατηρούμε και εδώ ότι το CAST στην κατάσταση “1” μετά την ακτινοβόληση έχει μετατοπιστεί στο “0”, παρουσιάζεται δηλαδή το φαινόμενο του “bit flip”. Το CAST που ήταν στο “0” παρέμεινε στην ίδια κατάσταση μετά την ακτινοβόληση, με μια μικρή θετική μετατόπιση από 0.2-0.5V. Επίσης, ειδικά για τις μνήμες που είχαν αρχικά “εγγραφεί”, παρατηρούμε μεταβολή στην κλίση της καμπύλης I_d-V_g , γεγονός που οφείλεται στη κατανομή διαφορετικών μετατοπίσεων των μνημών.

Πρέπει να σημειώσουμε ότι δεν παρατηρούμε σαφή εξάρτηση της μετατόπισης της V_T από την δόση της δέσμης, όπως θα περιμέναμε, αλλά από την πρώτη κιάλας δόση ($1 \cdot 10^{11}$ p/cm²) μια δραματικά αυξημένη μετατόπιση των 6V, που αλλάζει την κατάσταση “1” → “0”. Στις υπόλοιπες δόσεις διαπιστώνουμε ένα είδος κορεσμού με αυξομειώσεις, με λεπτομέρειες που θα έπρεπε να διερευνηθούν σε επόμενες εργασίες. Σε πειραματικό επίπεδο, θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι ίσως η ένταση της προσπίπτουσας δέσμης να είχε μια κατανομή τέτοια που να μην ακτινοβόλησε με την ίδια δόση όλη την επιφάνεια του κάθε CAST, και να προσθέτει μια μεγάλη αβεβαιότητα στη συνέπεια των μετρήσεων μας.

Στην παρούσα εργασία, πάντως, επικεντρωνόμαστε στην αντιμετώπιση του CAST ως μία μνήμη της οποίας το συνολικό ρεύμα προκύπτει απ’ το άθροισμα εκατομμυρίων μνημών, συνεπώς θεωρούμε τη τάση V_T τη μέση συμπεριφορά όλων των επι μέρους κελιών. Όμως θα μπορούσε κανείς να προεκτείνει τη μελέτη των χαρακτηριστικών καμπυλών εξάγοντας συμπεράσματα για την ίδια την στατιστική κατανομή των τρανζίστορς.



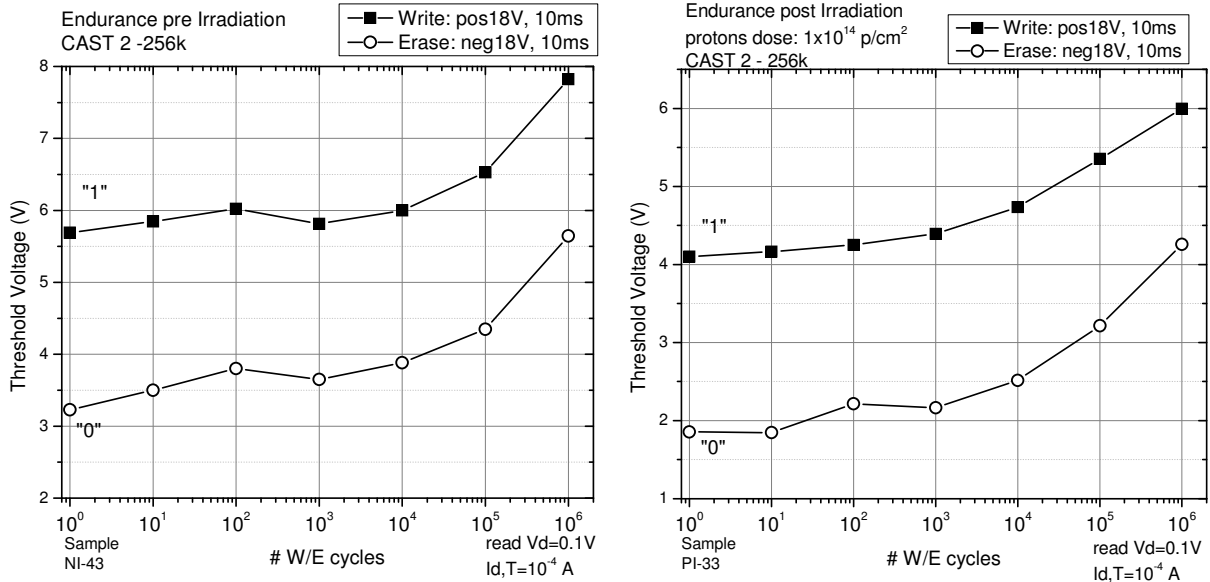


Εικόνα 7-26. Η μετατόπιση της I_d - V_g για "1" ή "0" μετά την ακτινοβόληση, για CAST1, 1M-cells.

7.7 Αντοχή (Endurance) των CAST κατά τον επαναπρογραμματισμό.

Μελετάμε την αντοχή των μνημών μετά από έως και 10^6 κύκλους W/E, πριν και μετά την ακτινοβολήση τους με πρωτόνια 7MeV. Παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα για το CAST-2 (even-256k), για μη ακτινοβολημένο δείγμα, και για το δείγμα που δέχθηκε τη μεγαλύτερη δόση $1 \cdot 10^{14} \text{ p/cm}^2$. Ο προγραμματισμός έγινε με παλμούς μικρότερης χρονικής διάρκειας, συγκεκριμένα “Write”: (+18V, 10ms) και “Erase”: (-18V, 10ms)

Και στις δύο περιπτώσεις έχουμε ένα αρχικό παράθυρο γύρω στα 2V, το οποίο κατα την εφαρμογή διαδοχικών κύκλων παλμών “εγγραφής”/ “διαγραφής” παραμένει μεν πρακτικά σχεδόν αμετάβλητο, με ταυτόχρονη δε αύξηση τόσο της V_T της κατάστασης “1”, όσο και της “0”. Πρέπει να σημειώσουμε, όμως, μια ελαφριά μείωση του παραθύρου, γύρω στα 0.2-0.4 V. Η αύξηση της τάσης κατωφλίου και στις δύο καταστάσεις οφείλεται σε επι πλέον παγίδες που προστίθενται λόγω της ηλεκτρικής καταπόνησης τόσο στο στρώμα του ONO, όσο και στο οξείδιο σήραγγας. Πάντως, αυτή η συμπεριφορά παρατηρείται όχι μόνο στη μη ακτινοβολημένη, αλλά και στην ακτινοβολημένη μνήμη.



Εικόνα 7-27.

Η αντοχή (endurance) των μνημών NC-MOSFET κατά τον επαναπρογραμματισμό, μέχρι και 10^6 κύκλων W/E, (α) μη ακτινοβολημένο CAST 256k, (β) ακτινοβολημένο CAST 256k, δόση 10^{14} p/cm^2 .

7.8 Χρόνος διατήρησης φορτίου (data retention time) σε προγραμματισμένα CAST.

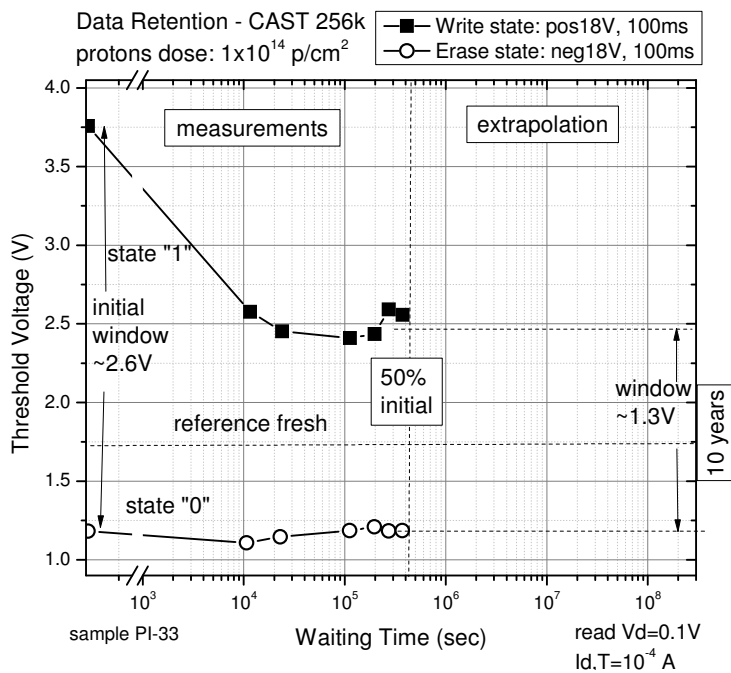
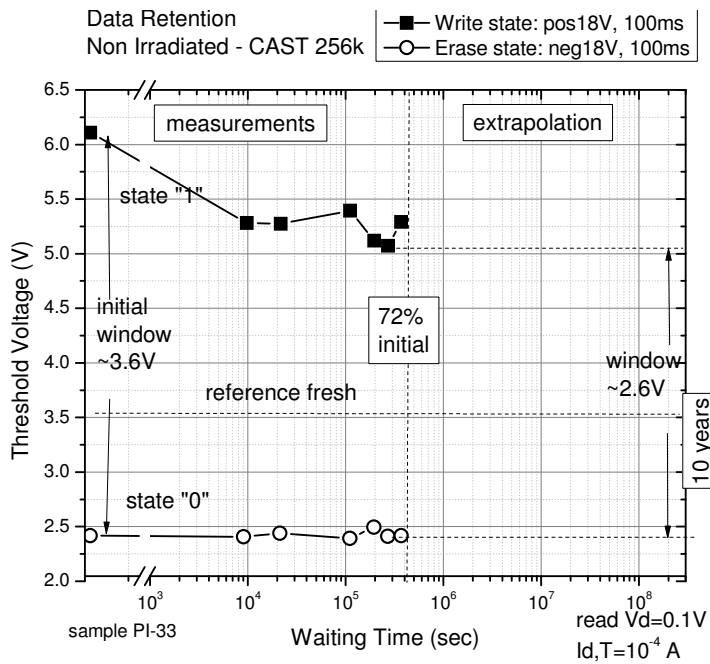
Με σκοπό να μελετήσουμε τον χρόνο διατήρησης του φορτίου, προγραμματίζουμε ένα CAST 512k για ένα ακτινοβολημένο και μη ακτινοβολημένο δείγμα, τα μεν odd-256k κελιά στην κατάσταση “1”, και τα υπόλοιπα even-256k κελιά στην κατάσταση “0”. Οι παλμοί προγραμματισμού ήταν για Write: (+18V, 100ms) , Erase: (-18V, 100ms). Μετά από τη φόρτιση μετράμε την τάση κατωφλίου επί μια βδομάδα, μια φορά την μέρα (εώς περίπου τα $4 \cdot 10^5$ sec) .

Παρακάτω, στην εικόνα παρουσιάζουμε την εξέλιξη του παράθυρου μνήμης για μη ακτινοβολημένη μνήμη, και για την μνήμη που έχει δεχθεί την μεγαλύτερη δόση $1 \cdot 10^{14}$ p/cm² . Τις πρώτες 3 ώρες (10^4 sec) παρατηρούμε τη μεγαλύτερη μείωση του αρνητικού φορτίου, και ύστερα με κάποιες αυξομειώσεις το φορτίο διατηρείται στα ίδια επίπεδα. Η κατάσταση “0” φαίνεται ότι πρακτικά παραμένει αμετάβλητη με τον χρόνο. Η μείωση του παράθυρου μνήμης για την μη ακτινοβολημένη μνήμη φτάνει το 28%, με αποτέλεσμα το προκύπτον παράθυρο να είναι στο 72% του αρχικού . Στην άλλη μνήμη διαπιστώνουμε μια σημαντική επίδραση της ακτινοβολήσης, αφού το παράθυρο μειώθηκε στο 50% του αρχικού . Γενικά, όμως, και στις δύο περιπτώσεις, οι δύο καταστάσεις εκτιμούμε ότι θα είναι διακρίσιμες μετά από 10 έτη απ’ τη στιγμή του προγραμματισμού τους.

Η κατάσταση “0” παρουσιάζει μικρότερες μεταβολές σε σχέση με την “1” με την πάροδο του χρόνου. Αυτό δείχνει ότι η κατάσταση εγγραφής έχει σημαντικότερο ρόλο στη διατήρηση του παράθυρου μνήμης, αφού τα ηλεκτρόνια που έχουν αποθηκευτεί στα νανοσωματίδια μπορούν να γυρίσουν στο υπόστρωμα μέσω της σήραγγας του φραγμού των 3.1eV.

Αντιθέτως, στην κατάσταση διαγραφής, το θετικό φορτίο που βρίσκεται στα νανοσωματίδια μπορεί να ουδετεροποιηθεί με δύο τρόπους: 1) οι αποθηκευμένες οπές μπορούν να γυρίσουν στο υπόστρωμα μέσω σήραγγας, και 2) τα ηλεκτρόνια απ’ τη ζώνη αγωγιμότητας του πυριτίου μπορούν να εισέλθουν στα νανοσωματίδια και να συνδεθούν με τις οπές.

Για την πρώτη περίπτωση, το ύψος του φράγματος των οπών είναι 4.8 eV, πολύ μεγαλύτερο από εκείνο των ηλεκτρονίων στην εγγραφή. Για τη δεύτερη περίπτωση, όταν δεν εφαρμόζεται τάση πύλης ($V_g=0$), το πλήθος των ηλεκτρονίων στο υπόστρωμα είναι ασήμαντο, έτσι υπάρχουν λίγα ηλεκτρόνια να μπορούν να εισέλθουν μέσα στα νανοσωματίδια.



Εικόνα 7-28.

Η διατήρηση του φορτίου ως συνάρτηση της μεταβολής του παράθυρου μνήμης στο χρόνο, σε NC-MOSFET μνήμη, (α) μη ακτινοβολημένη, (β) ακτινοβολημένη με πρωτόνια δόσης $10^{14} p/cm^2$.

7.9 Συμπεράσματα.

Μελετήσαμε και χαρακτηρίσαμε ερευνητικές διατάξεις NC-MOSFET τρανζίστορ, με εμφυτευμένα νανοσωματίδια πυριτίου μέσης διαμέτρου 3nm. , πριν και μετά από ακτινοβόληση με δέσμη πρωτονίων 7MeV, σε διάφορες δόσεις .

Ειδικότερα ασχοληθήκαμε με διατάξεις CAST, τρανζίστορ συνδεδεμένων παράλληλα, τις οποίες χαρακτηρίσαμε και προγραμματίσαμε πριν και μετά την ακτινοβόληση. Διαπιστώσαμε τη σωστή λειτουργία τους τόσο ως τρανζίστορ όσο και ως μνήμες, απ' τις χαρακτηριστικές τους καμπύλες και το παράθυρο μνήμης.

Η συμπεριφορά τους πριν και μετά απ' την ακτινοβόληση με πρωτόνια μας επαλήθευσε κατ' αρχήν την μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπυλών, που οφείλεται σε παγίδευση θετικού φορτίου. Παρατηρήσαμε την αναμενόμενη αλλαγή της κατάστασης “Εγγραφή” σε “Διαγραφή” μετά την ακτινοβόληση, χωρίς, όμως, να διαπιστωθεί σαφής εξάρτηση με τη δόση.

Όσο αφορά στην αντοχή τους κατά τον επαναπρογραμματισμό (endurance), βρήκαμε ότι παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά. Το παράθυρο μνήμης παραμένει πρακτικά ίδιο με ταυτόχρονη αύξηση και των δύο καταστάσεων, γεγονός που το αποδώσαμε σε παγίδες που η ηλεκτρική καταπόνηση προκαλεί στο στρώμα ONO του οξειδίου ελέγχου .

Οι μετρήσεις που αφορούσαν στον χρόνο διατήρησης του φορτίου (data retention time) μας έδειξαν ότι υπάρχει μια σημαντική μείωση του παράθυρου μνήμης ανάμεσα σε μη ακτινοβολημένη και ακτινοβολημένη μνήμη, αλλά η εκτίμηση των 10 ετών μας έδειξε ότι το παράθυρο θα είναι τέτοιο, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα να διακριθούν οι δύο καταστάσεις.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

➤ ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο , 7ο

- [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, A.Paccagnella, “*Peculiar characteristics of nanocrystal memory cells programming window*” , J.Vac. Sci. Technol. B 27(1) Jan/Feb 2009.
- [3] N.Wranchien, A.Cester, R.Portoghese, C.Gerardi, “*Investigation of Proton and X-Ray Irradiation Effects on Nanocrystal and Floating Gate Memory Cell Arrays*” , IEEE Trans. Nucl. Sc. , Vol55., No.6, Dec 2008.
- [4] A.Cester, A.Gasperin, N.Wranchien, A.Paccagnella, V.Ancarani, G.Gerardi, “*Ionising radiation and electrical stress on nanocrystal memory cell array*” , Sci. Dir., Microel. Rel. 47 (2007) 602-605, Elsevier Ltd.
- [5] A.Gasperin, A.Cester, N.Wranchien, A.Paccagnella, V.Ancarani, C.Gerardi, “*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, H.A.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*” , Nucl. Instrum. Phys. Research B 186 (2002) 392-400.
- [8] G.Cellere, A.Paccagnella, A.Visconti, M.Bonanomi, A.Candelori, S.Lora, “*Effect of Different Total Ionizing Dose Sources on Charge Loss From Programmed Floating Gate Cells*” , IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol.52, no.6, Dec. 2005