



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΟΠΤΙΚΗΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ
ΥΛΙΚΩΝ

Μελέτη ιδιοτήτων μνήμης διατάξεων νιτριδίου
του πυριτίου τροποποιημένων με ιοντική
εμφύτευση χαμηλής ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Π. ΣΙΜΑΤΟΥ

Επιβλέπων: Δημήτριος Τσαμάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΟΤΕΧΝΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ
ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΕΚΕΦΕ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ
Αθήνα, Ιούλιος 2013



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών Ηλεκτροοπτικής και Ηλεκτρονικών Υλικών
Εργαστήριο Ηλεκτροτεχνικών Υλικών
Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος
Εργαστήριο Ηλεκτρικού Χαρακτηρισμού

Μελέτη ιδιοτήτων μνήμης διατάξεων νιτριδίου του πυριτίου τροποποιημένων με ιοντική εμφύτευση χαμηλής ενέργειας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Π. ΣΙΜΑΤΟΥ

Επιβλέπων: Δημήτριος Τσαμάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 11η Ιουλίου 2013.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Δημήτριος Τσαμάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Βασίλειος Ιωάννου
ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

.....

Δημήτριος Τσουκαλάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

(Υπογραφή)

.....

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΣΙΜΑΤΟΣ

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

© 2013 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρομαγνητικών Εφαρμογών Ηλεκτροοπτικής και Ηλεκτρονικών Υλικών

Εργαστήριο Ηλεκτροτεχνικών Υλικών

Ινστιτούτο Μικροηλεκτρονικής ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

Εργαστήριο Ηλεκτρικού Χαρακτηρισμού

Copyright © Δημήτριος Σιμάτος, 2013.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

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

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

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον ερευνητή του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος Δρ. Ιωάννου-Σουγλερίδη για την επίβλεψη αυτής της διπλωματικής εργασίας και για την ευκαιρία που μου έδωσε να την εκπονήσω στο εργαστήριο Ηλεκτρικού Χαρακτηρισμού του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Επίσης ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Δρ. Τσαμάκη για την καθοδήγησή του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Οι διατάξεις μνήμης τύπου SONOS αποτελούν μία πολλά υποσχόμενη εναλλακτική επιλογή των μνημών αιωρούμενης πύλης, ειδικά σε ότι αφορά τα ενσωματωμένα συστήματα. Όμως, αυτή η κατηγορία μη πτητικών μνημών, που χρησιμοποιούν συνήθως διηλεκτρικές στοιβές οξειδίου-νιτρίδιου του πυριτίου-οξειδίου, απαιτεί βελτιώσεις, κυρίως σε ότι αφορά τη λειτουργία της διαγραφής. Μία μέθοδος βελτίωσης των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των διατάξεων αυτών είναι μέσω ιοντικής εμφύτευσης χαμηλής ενέργειας στο νιτρίδιο του πυριτίου και στη συνέχεια υγρή οξείδωση[9]. Διατάξεις οξειδίου-νιτρίδιου του πυριτίου (2.5 nm/ 6 nm) κατασκευάστηκαν σε υπόστρωμα πυριτίου τύπου n. Στη συνέχεια εμφυτεύθηκαν ιόντα πυριτίου, αζώτου και αργού με δόση $1E16 \text{ ions/cm}^2$ σε χαμηλή ενέργεια 1keV και ακολούθησε υγρή οξείδωση στους 850°C για 15 λεπτά. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των τελικών διατάξεων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας συνηθισμένους πυκνωτές MONOS με πύλη αλουμινίου. Ο δομικός χαρακτηρισμός τύπου TEM έδειξε ότι το πάχος του οξειδίου φραγής επηρεάζεται σημαντικά από την ιοντική εμφύτευση και κυμαίνεται από 1nm (για το μη εμφυτευμένο δείγμα), 4-5nm (για N και Ar) μέχρι 10nm (για Si). Οι διατάξεις εμφυτευμένες με ιόντα πυριτίου παρουσίασαν το μεγαλύτερο δυνατό παράθυρο (περίπου 9V). Οι μετρήσεις διατήρησης φορτίου σε θερμοκρασία δωματίου αποκάλυψαν ότι ο ρυθμός απώλειας ηλεκτρονίων είναι πιο μεγάλος στα δείγματα εμφυτευμένα με Si, παρά με N, πράγμα που οδηγεί σε ένα παράθυρο της τάξης των 1.7V και 2.5V αντίστοιχα μετά από 10 χρόνια. Αυτή η διαφορά στη διατήρηση φορτίου πιστώνεται κυρίως στη διαφορετική φύση των παγίδων που δημιουργούνται.

Λέξεις Κλειδιά

μνήμη, ιοντική εμφύτευση, διηλεκτρικό, SONOS, οξείδωση, νιτρίδιο του πυριτίου, μη πτητική

Abstract

The SONOS type memory devices constitute a promising scaling alternative to the conventional floating-gate cells, especially for embedded applications. However, this class of non-volatile memory cells, which typically make use of oxide-nitride-oxide (ONO) charge-trapping stacks, requires improvements mainly in regards of the erase operation. A method to accomplish significant advances in device performance is via low-energy silicon ion implantation into oxide-nitride stacks followed by a low-thermal budget wet-oxidation[9]. Typical oxide-nitride stacks (2.5 nm/ 6 nm) were formed on n-type silicon substrates. The stacks were implanted with 1keV Si, N and Ar to a dose of $1E16$ ions/ cm^2 , and further wet oxidized at $850^{\circ}C$ for 15 min. Electrical characterization of the final structures was performed using standard aluminum gate MONOS capacitors. TEM imaging showed that the thickness of the blocking oxide layer is strongly affected by the implantation process going from 1nm (non-implanted sample), 4-5nm (N and Ar) and 10nm (Si). Si implanted stacks showed the highest attainable memory window (ca 9V). Room temperature charge retention measurements of the programming state revealed that the electron loss rate is faster in samples implanted with Si than N, allowing for a memory window of 1.7V and 2.5V respectively after ten years extrapolation. This retention behavior is mainly attributed to the different nature of the traps generated in these materials.

Keywords

memory, ion implantation, dielectric properties, SONOS, oxidation of silicon nitride, SRAM, DRAM, non volatile

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	7
Κατάλογος Σχημάτων	9
Κατάλογος Πινάκων	13
Κατάλογος Συμβόλων	15
1 Εισαγωγή	19
1.1 Οργάνωση του τόμου	19
1.2 Μνήμη	20
1.3 Χαρακτηριστικά μνημών	23
1.4 Αντικείμενο της διπλωματικής	28
2 Θεωρητικό υπόβαθρο	31
2.1 Διαφορές συμβολισμών από την H/M θεωρία	31
2.1.1 Εισαγωγή	31
2.1.2 Ηλεκτρομαγνητική θεωρία	32
2.1.2.1 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου	32
2.1.2.2 Προσέγγιση στο πεδίο του χρόνου για απλά μέσα	33
2.1.2.3 Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας	36
2.1.3 Υλικά	38
2.2 Δίοδος MOS	40
2.2.1 Ιδανική δίοδος MOS	41
2.2.2 Πραγματική δίοδος MOS	47
2.2.3 Υπολογισμός του φορτίου Q_s	50
2.3 Τρανζίστορ MOSFET	55

2.4	Κύτταρο μνήμης	58
2.4.1	Τεχνολογία αιωρούμενης πύλης	60
2.4.2	Τεχνολογία παγίδευσης φορτίων	62
2.4.3	Αρχιτεκτονική μνήμης	65
3	Μαθηματική μοντελοποίηση	67
3.1	Ηλεκτροστατική ανάλυση	67
4	Περιγραφή θέματος	77
4.1	Δημοσιεύσεις ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος	77
4.2	Θέμα εργασίας	82
5	Χαρακτηρισμός δειγμάτων	85
5.1	Δομικός χαρακτηρισμός	85
5.2	Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός	88
5.2.1	Μέθοδοι	88
5.2.2	Αποτελέσματα	105
6	Επίλογος	123
6.1	Συμπεράσματα	123
6.2	Μελλοντικές Επεκτάσεις	123
	Μεταφράσεις ξένων όρων	125
	Βιβλιογραφία	127

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Οικονομικά δεδομένα [17]	20
1.2	Κατηγορίες μνημών	21
1.3	Μπλοκ διάγραμμα μνήμης	21
1.4	Χαρακτηριστική καμπύλη αντοχής φορτίου μνήμης με αιωρούμενη πύλη	21
1.5	Χαρακτηριστικές καμπύλες αξιολόγησης της ενδογενούς διατήρησης φορτίου	28
2.1	Γεωμετρία συνοριακών συνθηκών για εφαπτομενικές και κάθετες συνιστώσες	34
2.2	Δίοδος MOS	41
2.3	Ιδανική δίοδος MOS χωρίς πόλωση	43
2.4	Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών διόδου MOS	43
2.5	Χαρακτηριστική C-V ιδανικής διόδου MOS	47
2.6	Μετατόπιση της χαρακτηριστικής C-V λόγω των διαφόρων ειδών φορτίου	50
2.7	Παγιδευμένα φορτία διόδου MOS	51
2.8	Φορτίο $ Q_s $ συναρτήσει του ψ_s για $N_A = 4 \cdot 10^{15} \text{cm}^{-3}$	54
2.9	Τρανζίστορ MOSFET	56
2.10	Χαρακτηριστικές $I - V$ του τρανζίστορ MOSFET	56
2.11	Είδη τρανζίστορ MOSFET	57
2.12	Καταστάσεις διόδου MOS	57
2.13	Καταστάσεις τρανζίστορ MOSFET	58
2.14	Αρχικό μοντέλο κυττάρου μνήμης	59
2.15	Κατάσταση προγραμματισμού και διαγραφής	59
2.16	Κύτταρο μνήμης με αιωρούμενη πύλη	60
2.17	Απώλειες φορτίου με ρεύμα Poole Frenkel	60
2.18	Κύτταρα αιωρούμενης πύλης κατά την διεύθυνση της	61
2.19	ΔV_T συναρτήσει του πάχους της αιωρούμενης πύλης	61
2.20	Πρόβλημα scaling στα διηλεκτρικά μεταξύ των πολυπυριτίων	61
2.21	Επίδραση των παρασιτικών χωρητικότητας στην κατάσταση πλήρους εγγραφής	62
2.22	Αριθμός ηλεκτρονίων συναρτήσει του scaling	63
2.23	Εμφάνιση tailbits	63
2.24	Εξέλιξη των διατάξεων παγίδευσης φορτίου	63
2.25	Κύτταρο SONOS	64
2.26	Scaling του SONOS στα διηλεκτρικά μεταξύ των πολυπυριτίων	64

2.27 Σύγκριση αρχιτεκτονικών	65
2.28 Αρχιτεκτονική NOR	66
2.29 Αρχιτεκτονική NAND	66
3.1 Διατομή ενός πυκνωτή SONOS	67
3.2 Ενεργειακές στάθμες ενός πυκνωτή SONOS	67
3.3 Προσέγγιση κεντροειδούς	74
4.1 Προφίλ TEM διατομής του δείγματος II	78
4.2 Προφίλ ToF SIMS του μη εμφυτευμένου C2 (αριστερά) και εμφυτευμένου II (δεξιά) με ιόντα δείγματος	78
4.3 Προφίλ ToF SIMS του δειγμάτων C1, C2 και II	79
4.4 Χαρακτηριστικές C-V των δειγμάτων C1, C2 και II	80
4.5 I-V	80
4.6 $\Delta V_{FB}-V_G$	80
4.7 Χαρακτηριστική διατήρησης φορτίου V_{FB} -Baking Time εμφυτευμένου δείγματος	81
5.1 Προφίλ TEM διατομής του μη εμφυτευμένου με ιόντα δείγματος NOR	85
5.2 Προφίλ TEM διατομής του εμφυτευμένου με ιόντα πυριτίου δείγματος NO	86
5.3 Προφίλ TEM διατομής του εμφυτευμένου με ιόντα αζώτου δείγματος NR	86
5.4 Προφίλ TEM διατομής του εμφυτευμένου με ιόντα αργού δείγματος NP	87
5.5 Micromanipulator	89
5.6 Πάνω:HP 8110A, Μέση:HP 4284A, Κάτω:HP 4140B	89
5.7 Φούρνος Binder	90
5.8 Λογισμικό Labview	90
5.9 Παράμετροι λογισμικού Labview	91
5.10 Ένα από τα τέσσερα δείγματα όπως φαίνεται κάτω από το μικροσκόπιο του Micromanipulator	92
5.11 Παράμετροι λογισμικού Origin	94
5.12 Control Sample Dispersion C-V	105
5.13 Control Sample I-V	106
5.14 Control Sample Maserjian Plot	106
5.15 Control Sample C-V	107
5.16 Control Sample G-V	108
5.17 NOR (Unimplanted) Sample Dispersion C-V	109
5.18 NO (Si-implanted) Sample Dispersion C-V	109
5.19 NR (N-implanted) Sample Dispersion C-V	109
5.20 NP (Ar-implanted) Sample Dispersion C-V	110
5.21 Χαρακτηριστικές I-V των 4 δειγμάτων	110
5.22 NOR (Unimplanted) Sample C-V	111
5.23 NO (Si-implanted) Sample C-V	111
5.24 NR (N-implanted) Sample C-V	111

5.25 NP (Ar-implanted) Sample C-V	112
5.26 Χαρακτηριστικές C-V των 4 δειγμάτων στο 1MHz	112
5.27 NOR (Unimplanted) Sample G-V	113
5.28 NO (Si-implanted) Sample G-V	113
5.29 NR (N-implanted) Sample G-V	113
5.30 NP (Ar-implanted) Sample G-V	114
5.31 NOR (Unimplanted) Sample Quasi-Static C-V	114
5.32 NO (Si-implanted) Sample Quasi-Static C-V	115
5.33 NR (N-implanted) Sample Quasi-Static C-V	115
5.34 NP (Ar-implanted) Sample Quasi-Static C-V	115
5.35 NOR (Unimplanted) Sample $\Delta V_{FB} - V_G $	116
5.36 NO (Si-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - V_G $	116
5.37 NR (N-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - V_G $	117
5.38 NP (Ar-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - V_G $ Positive	117
5.39 NP (Ar-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - V_G $ Negative	117
5.40 NOR (Unimplanted) Sample $\Delta V_{FB} - T_{width}$	118
5.41 NO (Si-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - T_{width}$	118
5.42 NR (N-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - T_{width}$	119
5.43 NP (Ar-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - T_{width}$	119
5.44 NO (Si-implanted) Sample Endurance	121
5.45 NR (N-implanted) Sample Endurance	121
5.46 NP (Ar-implanted) Sample Endurance	122
5.47 Χαρακτηριστικές καμπύλες διατήρησης φορτίου	122

Κατάλογος Πινάκων

1.1	Κατηγορίες μνημών [17]	22
1.2	Μηχανισμοί απώλειας φορτίου και ενέργειες ενεργοποίησης	28
2.1	Σύγκριση αρχιτεκτονικών	66
4.1	Ρυθμός αποπαγίδευσης φορτίου συναρτήσει της θερμοκρασίας για το εμφυτευμένο δείγμα	82
4.2	Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά δειγμάτων	83
5.1	Πάχη δειγμάτων	87
5.2	Ρυθμίσεις παραμέτρων Labview για C-V	95
5.3	Ρυθμίσεις παραμέτρων Labview για I-V	96
5.4	Ρυθμίσεις παραμέτρων Labview για Quasi-Static	100
5.5	Παλμοί Full-Write και Full-Erase	101
5.6	Υπολογισμός χρόνων χρονομέτρησης για Endurance	104

Κατάλογος Συμβόλων

A	Διατομή πυκνωτή.....	107
B	Πυκνότητα μαγνητικής ροής	32
C_{FB}	Συνολική χωρητικότητα ανα επιφάνεια στην κατάσταση επίπεδης ζώνης ...	46
C_j	Χωρητικότητα απογύμνωσης ανα επιφάνεια	45
C_{ONO}	Ισοδύναμη χωρητικότητα SONOS ανα επιφάνεια	75
C_{ox}	Χωρητικότητα οξειδίου ανα επιφάνεια	45
D	Πυκνότητα ηλεκτρικής ροής	32
D_n	Σταθερά διάχυσης ηλεκτρονίων	39
D_p	Σταθερά διάχυσης οπών	39
D_{it}	Πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων ανα επιφάνεια	49
d_N	Πάχος νιτριδίου	70
d_{OXB}	Πάχος οξειδίου φραγής	70
d_{OXT}	Πάχος οξειδίου σήραγγος	70
E_A	Ενέργεια ενεργοποίησης	26
E_C	Ενεργειακή στάθμη ζώνης αγωγιμότητας	44
E_F	Ενεργειακή στάθμη Fermi	42
E_g	Ενεργειακό χάσμα	42
E_i	Ενέργεια Fermi ενδογενούς ημιαγωγού στη διεπιφάνεια	44
$E_{i,bulk}$	Ενέργεια Fermi ενδογενούς ημιαγωγού στο εσωτερικό	42
E_o	Ενέργεια στο επίπεδο του κενού (vacuum level)	42
E_{OXT}	Ηλεκτρικό πεδίο στο οξείδιο σήραγγος	68
E_V	Ενεργειακή στάθμη ζώνης σθένους	44
\mathcal{E}	Ηλεκτρικό πεδίο	32
\mathcal{E}_{ox}	Ηλεκτρικό πεδίο στο οξείδιο	45
\mathcal{E}_s	Ηλεκτρικό πεδίο στον ημιαγωγό	53
G	Ρυθμός γέννησης ζευγών οπών-ηλεκτρονίων	38
\mathcal{H}	Μαγνητικό πεδίο	32
\mathcal{J}_c	Πυκνότητα ρεύματος αγωγιμότητας	32
\mathcal{J}_d	Πυκνότητα ρεύματος μετατόπισης	32
\mathcal{J}_i	Πυκνότητα ρεύματος των επιβαλλόμενων πηγών	32
\mathcal{K}_c	Πυκνότητα επιφανειακού ρεύματος αγωγιμότητας	34
\mathcal{K}_i	Πυκνότητα επιφανειακού ρεύματος των επιβαλλόμενων πηγών	34

k	Σταθερά Boltzmann	39
L	Μήκος διάταξης	40
L_D	Μήκος Debye	46
M	Μαγνητική πόλωση	35
M_d	Πυκνότητα "μαγνητικού ρεύματος" μετατόπισης	32
μ	Μαγνητική σταθερά του μέσου	33
μ_n	Ευκινησία οπών	39
μ_p	Ευκινησία ηλεκτρονίων	39
μ_r	Σχετική μαγνητική σταθερά του μέσου	35
μ_o	Μαγνητική σταθερά του κενού	35
N_A	Συγκέντρωση αποδεκτών	38
N_B	Συγκέντρωση αποδεκτών ή δοτών	42
N_D	Συγκέντρωση δοτών	38
n	Συγκέντρωση ηλεκτρονίων	38
n_i	Συγκέντρωση φορέων σε ενδογενή ημιαγωγό	42
p	Συγκέντρωση οπών	38
\mathcal{P}	Ηλεκτρική πόλωση	35
Q_G	Φορτίο πύλης ανα επιφάνεια	72
Q_f	Ακίνητο φορτίο ανα επιφάνεια εντός του οξειδίου	48
Q_M	Φορτίο μετάλλου ανα επιφάνεια	44
Q_m	Ευκίνητο φορτίο ανα επιφάνεια εντός του οξειδίου	48
Q_N	Φορτίο νιτριδίου ανα επιφάνεια	72
Q_{NO}	Φορτίο διαχωριστικής επιφάνειας νιτριδίου-οξειδίου φραγής	72
Q_{inv}	Φορτίο καναλιού ανα επιφάνεια	44
Q_{it}	Παγιδευμένα φορτία ανα επιφάνεια εντός του οξειδίου	48
Q_{ON}	Φορτίο διαχωριστικής επιφάνειας οξειδίου σήραγγος-νιτριδίου	72
Q_{OXB}	Φορτίο αποθηκευμένο στο οξείδιο φραγής	72
Q_{OXT}	Φορτίο αποθηκευμένο στο οξείδιο σήραγγος	72
Q_{ot}	Φορτίο ανα επιφάνεια παγιδευμένο στην διεπιφάνεια	48
Q_{ox}	Φορτίο οξειδίου ανα επιφάνεια	45
Q_{SO}	Φορτίο διαχωριστικής επιφάνειας υποστρώματος-οξειδίου σήραγγος	72
Q_s	Φορτίο ημιαγωγού ανα επιφάνεια	44
Q_{Si}	Φορτίο ημιαγωγού ανα επιφάνεια	72
Q_{sc}	Φορτίο περιοχής απογύμνωσης ανα επιφάνεια	45
Q_{ss}	Ακίνητο διεπιφανειακό φορτίο ανα επιφάνεια	48
q	Φορτίο ηλεκτρονίου-οπής	38
R	Ρυθμός επανασύνδεσης ζευγών οπών-ηλεκτρονίων	38
s	Κλίση Maserjian Plot	107
T	Θερμοκρασία σε Kelvin	39
τ_n	Χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων	40
τ_p	Χρόνος ζωής των οπών	40

V_{FB}	Τάση επίπεδης ζώνης	23
V_{ox}	Πτώση τάσης στο οξειδίο	45
V_p	Τάση προγραμματισμού	23
V_T	Τάση κατωφλιού	23
V_t	Θερμική τάση	42
W	Πλάτος διάταξης	40
ϵ	Διηλεκτρική σταθερά του μέσου	33
ϵ_r	Σχετική διηλεκτρική σταθερά του μέσου	35
ϵ_o	Διηλεκτρική σταθερά του κενού	35
ϵ_{ox}	Διηλεκτρική σταθερά του οξειδίου	45
ϵ_N	Διηλεκτρική σταθερά του νιτριδίου	70
ϵ_s	Διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού	45
ρ_b	Χωρική πυκνότητα ακίνητου ηλεκτρικού φορτίου ανα επιφάνεια	32
ρ_f	Χωρική πυκνότητα ελεύθερου ηλεκτρικού φορτίου ανα επιφάνεια	32
ρ_i	Χωρική πυκνότητα επιβαλλόμενων πηγών ηλεκτρικού φορτίου ανα επιφάνεια	32
ρ_{OXT}	Χωρική πυκνότητα φορτίου στο οξειδίο σήραγγος	68
ρ_{ot}	Χωρική πυκνότητα φορτίου τύπου Q_{ot} ανα επιφάνεια	49
ρ_s	Χωρική πυκνότητα φορτίου στον ημιαγωγό ανα επιφάνεια	52
ϕ_m	Διαφορά δυναμικού που αντιστοιχεί στο έργο εξόδου του μετάλλου	41
ϕ_{ms}	Διαφορά έργων εξόδου μετάλλου-ημιαγωγού	41
ϕ_s	Διαφορά δυναμικού που αντιστοιχεί στο έργο εξόδου του ημιαγωγού	41
x	Διάσταση βάρους	40
x_N	Όριο μεταξύ νιτριδίου και οξειδίου φραγής	68
\bar{x}_N	Κεντροειδές νιτριδίου	70
x_{ONO}	Ισοδύναμο πάχος του SONOS	75
x_{ox}	Πάχος οξειδίου	45
x_{OXB}	Όριο μεταξύ οξειδίου φραγής και πύλης	68
\bar{x}_{OXB}	Κεντροειδές οξειδίου φραγής	70
x_{OXT}	Όριο μεταξύ οξειδίου σήραγγος και νιτριδίου	68
\bar{x}_{OXT}	Κεντροειδές οξειδίου σήραγγος	70
x_{sc}	Πάχος περιοχής απογύμνωσης	44
σ	Αγωγιμότητα	33
σ_f	Επιφανειακή πυκνότητα επιβαλλόμενων πηγών ηλεκτρικού φορτίου	34
σ_i	Επιφανειακή πυκνότητα ελεύθερου ηλεκτρικού φορτίου	33
σ_n	Αγωγιμότητα ηλεκτρονίων	39
σ_p	Αγωγιμότητα οπών	39
χ	Διαφορά δυναμικού μεταξύ E_o και E_c	42
χ_e	Ηλεκτρική δεκτικότητα του μέσου	35
χ_m	Μαγνητική δεκτικότητα του μέσου	35
ψ	Διαφορά δυναμικού μεταξύ σημείου της διάταξης και της $E_{i,bulk}$	52
ψ_B	Διαφορά δυναμικού μεταξύ $E_{i,bulk}$ και E_F	42

ψ_s	Διαφορά δυναμικού μεταξύ $E_{i,bulk}$ και E_i (επιφανειακό δυναμικό)	44
----------	--	----

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Οργάνωση του τόμου

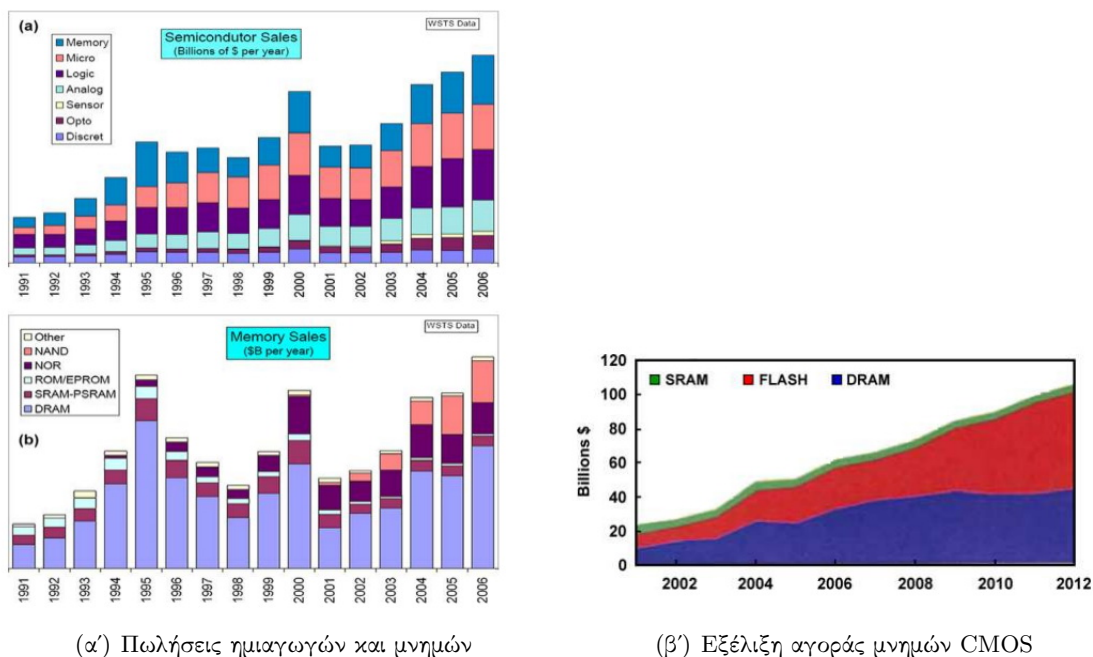
Η εργασία αυτή είναι οργανωμένη σε έξι κεφάλαια: Το Κεφάλαιο 1 είναι εισαγωγικό και περιγράφει τις διάφορες διατάξεις μνήμης καθώς και τους παράγοντες αξιολόγησης των μνημών. Στο Κεφάλαιο 2 δίνεται το θεωρητικό υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας και περιγράφεται η μετάβαση από τον πυκνωτή MOS στο κυττάρο μνήμης. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται τα μαθηματικά μοντέλα που περιγράφουν την λειτουργία των διατάξεων τύπου SONOS και στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μέχρι τώρα επιστημονική πρόοδος στις διατάξεις αυτές. Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται παρουσιάζεται ο δομικός και ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων αυτών, μαζί με την αντίστοιχη μεθοδολογία. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 παρουσιάζεται η συνεισφορά αυτής της διπλωματικής εργασίας, καθώς και οι μελλοντικές της επεκτάσεις.

- Ο αναγνώστης που είναι ήδη εξοικειωμένος με το θεωρητικό υπόβαθρο των διατάξεων SONOS μπορεί να μεταβεί απ'ευθείας στο Κεφάλαιο 5 και να διαβάσει τα αποτελέσματα της έρευνας.
- Ο αναγνώστης που συναντά για πρώτη φορά μπροστά του την έννοια της μη πτητικής μνήμης πρέπει να αρχίσει από το Κεφάλαιο 1, διαβάζοντας οπωσδήποτε και από τις πηγές [3], [20] και [2].
- Ο αναγνώστης που δεν είναι εξοικειωμένος με το θεωρητικό υπόβαθρο των διατάξεων SONOS, αλλά γνωρίζει τα βασικά των μη πτητικών μνημών, πρέπει να μεταβεί απ'ευθείας στο Κεφάλαιο 3.
- Ο αναγνώστης που ξεκινά την διπλωματική ή το διδακτορικό του και αναμένεται να προβεί σε ηλεκτρικό ή/και δομικό χαρακτηρισμό διάταξης πρέπει να δώσει προτεραιότητα στις μεθόδους που αναλύονται στο Κεφάλαιο 5.

1.2 Μνήμη

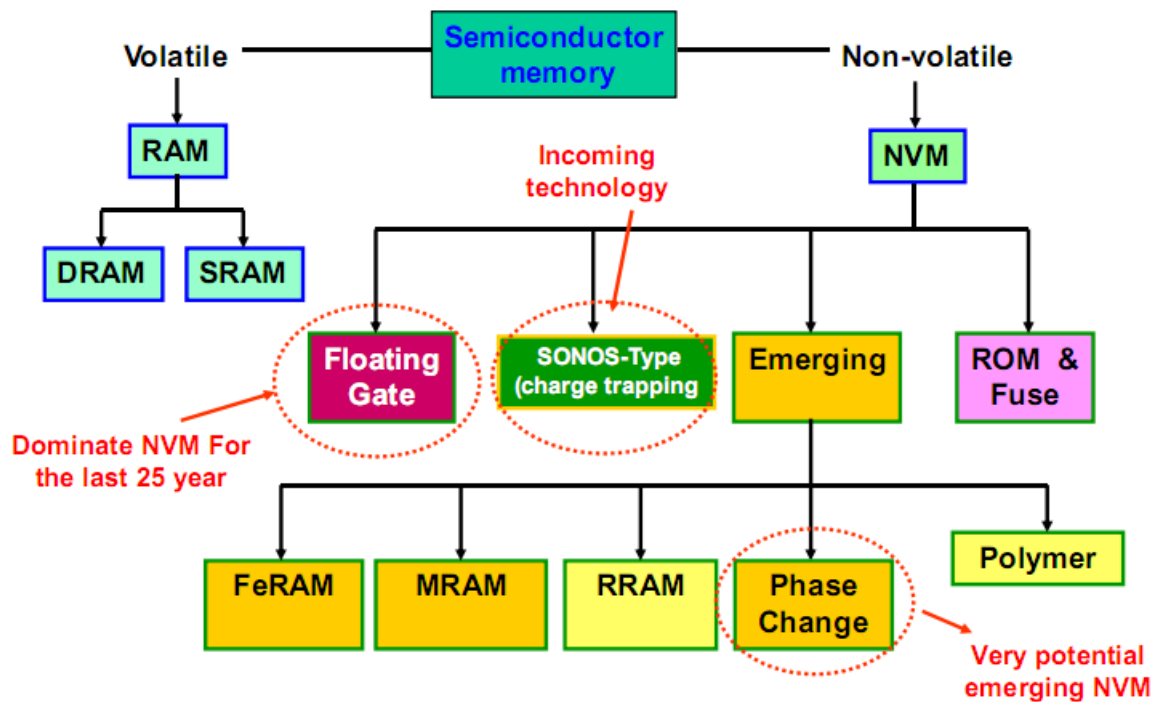
Η μνήμη αποτελεί μία απαραίτητη δομική μονάδα μίας ευρείας κλίμακας συστημάτων. Ηλεκτρονικοί υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, φορητά MP3 Players και πολλά άλλα σύγχρονα ηλεκτρονικά συστήματα απαιτούν την αποθήκευση και μετέπειτα ανάκληση δεδομένων για να εξυπηρετήσουν τις ανάγκες του χρήστη. Χωρίς αυτή τη δυνατότητα, η αποθήκευση ενός προγράμματος, η εμφάνιση μιας προηγούμενης τηλεφωνικής κλήσης και πολλά άλλα πράγματα που σήμερα θεωρούνται δεδομένα θα ήταν αδύνατον να υλοποιηθούν.

Φυσικό επακόλουθο των παραπάνω ήταν η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας των μνημών, η αύξηση των πωλήσεων και η ακόμα μεγαλύτερη διείσδυση των μνημών στα διάφορα συστήματα. Μερικά ενδιαφέροντα οικονομικά μεγέθη μπορούν να παρατηρηθούν στο Σχήμα 1.1.

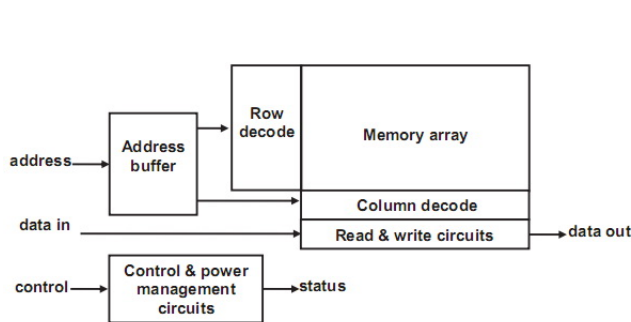


Σχήμα 1.1: Οικονομικά δεδομένα [17]

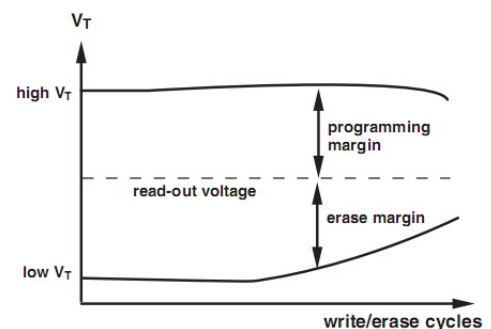
Οι μνήμες χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, στις πτητικές (volatile) και στις μη πτητικές (non-volatile). Η θεμελιώδης διαφορά μεταξύ τους είναι ότι τα δεδομένα των πτητικών μνημών χάνονται μόλις διακοπεί η τροφοδοσία. Όσον αφορά τις υποκατηγορίες αυτών των δύο κατηγοριών, στις πτητικές μνήμες περιλαμβάνονται η στατική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (Static Random Access Memory - SRAM) και η δυναμική μνήμη τυχαίας προσπέλασης (Dynamic Random Access Memory - DRAM), ενώ στις μη πτητικές μνήμες η κατηγοριοποίηση γίνεται είτε με βάση την δυνατότητα εγγραφής, οδηγώντας στις υποκατηγορίες των μνημών μόνο ανάγνωσης (Read Only Memory - ROM) και των μνημών τυχαίας προσπέλασης (Random Access Memory - RAM), είτε με βάση τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, οδηγώντας στις υποκατηγορίες των μνημών με αιωρούμενη (απομονωμένη) πύλη (floating gate memories)



Σχήμα 1.2: Κατηγορίες μνημών



Σχήμα 1.3: Μπλοκ διάγραμμα μνήμης



Σχήμα 1.4: Χαρακτηριστική καμπύλη αντοχής φορτίου μνήμης με αιωρούμενη πύλη

και των μνημών με παγίδευση φορτίων (charge-trapping memories).

Εδώ πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι η ιδιότητα της παγίδευσης φορτίου δεν είναι προνόμιο μόνο των μνημών παγίδευσης φορτίου. Όλες οι μη πτητικές μνήμες αποθηκεύουν φορτίο. Ο όρος "μνήμη παγίδευσης φορτίου" χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει την κατηγορία εκείνη των μη πτητικών μνημών στις οποίες το φορτίο αποθηκεύεται σε ένα διηλεκτρικό στρώμα.

Ο Πίνακας 1.1 παρέχει μία περιληπτική περιγραφή των πτητικών και μη πτητικών μνημών. Η ίδια περιγραφή παρουσιάζεται επίσης σε οπτικοποιημένη μορφή στο Σχήμα 1.2. Η πηγή [3] περιέχει και μία σύντομη ιστορική αναδρομή των μη πτητικών ημιαγωγικών μνημών.

Περισσότερες πληροφορίες για τα διάφορα είδη πτητικών και μη πτητικών μνημών μπορεί να βρει κανείς στις πηγές [20],[21],[15],[3],[2].

Πίνακας 1.1: Κατηγορίες μνημών [17]

Αρχιτιχόλεξο	Όνομα	Περιγραφή
DRAM	Δυναμική μνήμη τυχαίας προσπέλασης	Χρησιμοποιεί ένα MOSFET και έναν πυκνωτή MOS ανά κελί (1T/1C cell). Τα δεδομένα αποθηκεύονται στον πυκνωτή. Λόγω ενός μικρού ρεύματος διαρροής τα δεδομένα πρέπει να ανανεώνονται κάθε 2-50ms, εξ' ου και το πρόθεμα "δυναμική". Έχει υψηλή πυκνότητα και χαμηλό κόστος.
SRAM	Στατική μνήμη τυχαίας προσπέλασης	Χρησιμοποιεί μία δισταθή δομή flip-flop που περιλαμβάνει έξι MOSFET ανά κελί (6T cell). Δεν είναι απαραίτητη η ανανέωση δεδομένων. Έχει υψηλή ταχύτητα.
RAM	Μνήμη τυχαίας προσπέλασης	Μνήμη με δυνατότητα ανάγνωσης και εγγραφής.
ROM	Μνήμη μόνο ανάγνωσης	Μνήμη επίσης τυχαίας προσπέλασης, της οποίας το όνομά υποδηλώνει ότι τα δεδομένα αλλάζουν κατασκευαστικά. Όμως πλέον οι ROM περιλαμβάνουν και δυνατότητες εγγραφής και η διαφορά με την RAM έγκειται στην ευκολία και την συχνότητα των εγγραφών, μεγέθη στα οποία υπερέρχει η RAM.
Mask-programmed ROM	ROM προγραμματιζόμενη με μάσκα	Τα δεδομένα ορίζονται κατασκευαστικά και δεν αλλάζουν.
PROM	Προγραμματιζόμενη μνήμη μόνο ανάγνωσης	Τα δεδομένα ορίζονται κατασκευαστικά και δεν αλλάζουν αλλά αυτό γίνεται μετά την κατασκευή της διάταξης.
EPROM	Ηλεκτρικά προγραμματιζόμενη μνήμη μόνο ανάγνωσης	Προγραμματίζεται ηλεκτρικά με μία ειδική συσκευή, τον προγραμματιστή EPROM και σβήνει με έκθεση σε UV ακτινοβολία για 20 λεπτά. 1T cell
EEPROM	Ηλεκτρικά διαγράψιμη προγραμματιζόμενη μνήμη μόνο ανάγνωσης	Μνήμη με δυνατότητα ηλεκτρικής ανάγνωσης και εγγραφής σε επίπεδο block. Απαιτεί ένα τρανζίστορ αιωρούμενης πύλης και ένα τρανζίστορ επιλογής ανά κελί (2T cell). Έχουν υψηλό κόστος και χαμηλή πυκνότητα.
E ² PROM	Ηλεκτρικά διαγράψιμη προγραμματιζόμενη μνήμη μόνο ανάγνωσης	Όπως η EEPROM αλλά με δυνατότητα ηλεκτρικής ανάγνωσης και εγγραφής σε επίπεδο byte.
Flash EEPROM	Μνήμη φλας	Ονομάστηκαν έτσι γιατί επιτρέπουν την ταυτόχρονη διαγραφή σε μεγάλο αριθμό κελιών με ένα βήμα (block erasing). Αυτό γίνεται σε επίπεδο block. 1T cell
FF-EEPROM	Full Featured EEPROMs	Έτσι ονομάζονται οι μνήμες EEPROM που δεν είναι τύπου flash.
NOVRAM-nvSRAM	Μη πτητική μνήμη τυχαίας προσπέλασης	Μη πτητική μνήμη SRAM.
FRAM	Φερροηλεκτρική μνήμη τυχαίας προσπέλασης	RAM με φερροηλεκτρικό στρώμα.

1.3 Χαρακτηριστικά μνημών

Από την παρουσίαση των διαφόρων ειδών πτητικών και μη μνημών αποκαλύπτονται κάποιες παράμετροι με βάση τις οποίες γίνεται η αξιολόγηση των μνημών ώστε να διαπιστωθούν τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της καθεμίας. Αυτές οι παράμετροι καθώς και άλλες που δεν έχουν αναφερθεί παρουσιάζονται παρακάτω.

Δυναμικά χαρακτηριστικά: Αυτά περιλαμβάνουν γραφικές παραστάσεις I-V, C-V και άλλες, από τις οποίες μπορούν να εξαχθούν μία σειρά από δεδομένα, όπως για παράδειγμα το πάχος κάποιου οξειδίου ή οι τάσεις προγραμματισμού V_p , που εφαρμόζονται στην πύλη. Αυτά θα γίνουν περισσότερο κατανοητά κατά τον υπολογισμό τους στην παρούσα εργασία. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί στο σημείο αυτό είναι ότι οι πιο σημαντικές παράμετροι στις ημιαγωγικές διατάξεις μη πτητικών μνημών είναι η τάση κατωφλιού V_T και η τάση επίπεδης ζώνης V_{FB} καθώς αντανακλούν την αποθηκευμένη πληροφορία σε ένα κύτταρο μνήμης. Επομένως η σωστή εξαγωγή τους είναι μεγάλης σημασίας. Η V_T εξάγεται από την χαρακτηριστική I-V, ενώ η V_{FB} από την C-V με μεθόδους που παρατίθενται αργότερα. Συνήθως όταν η διάταξη είναι τρανζίστορ εξετάζεται περισσότερο η V_T , ενώ όταν είναι πυκνωτής η V_{FB} [23].

Μηχανισμοί αποθήκευσης φορτίου: Ο πυρήνας της λειτουργίας των μη πτητικών μνημών είναι η μεταφορά και αποθήκευση κάποιου φορτίου σε ένα μέρος από όπου δεν θα μπορεί να φύγει όταν διακοπεί η τροφοδοσία. Αυτό το μέρος είναι είτε ένα διηλεκτρικό στρώμα (τεχνολογία παγίδευσης φορτίου), είτε ένα αγωγικό στρώμα πολυκρυσταλλικού πυριτίου το οποίο περιβάλλεται από διηλεκτρικό (τεχνολογία αιωρούμενης πύλης). Οι μηχανισμοί, είτε έγχυσης είτε φαινομένου σήραγγας, με τους οποίους το φορτίο μπορεί να μεταβεί στον αποθηκευτικό χώρο πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε να είναι ενεργειακά αποδοτικοί ώστε η τάση V_p και άρα τα ηλεκτρικά πεδία να είναι μικρά, και να μην αυξάνεται η κατανάλωση ισχύος ή ο κίνδυνος διάτρησης κάποιου οξειδίου. Ταυτόχρονα όμως πρέπει να έχουν τη δυνατότητα να οδηγήσουν ένα ικανοποιητικό αριθμό φορέων διαμέσου ή πάνω από κάποια φράγματα δυναμικού. Αυτό που στην πραγματικότητα γίνεται είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ αυτών των απαιτήσεων.

Αντοχή φορτίου (endurance): Κάθε μνήμη φθείρεται από τις διαρκείς εγγραφές και διαγραφές και επομένως αντέχει μέχρι έναν συγκεκριμένο αριθμό εγγραφών. Ο αριθμός αυτός ονομάζεται αντοχή και είναι συνάρτηση τόσο των εγγενών σχεδιαστικών ιδιοτήτων της διάταξης όσο και της ποιότητας ελέγχου στη γραμμή παραγωγής του εργοστασίου. Η βελτιστοποίηση της σχεδίασης μιας διάταξης μνήμης ώστε να μεγιστοποιηθεί η αντοχή της προϋποθέτει πολύ καλή γνώση των φυσικών ιδιοτήτων της.

Ποσοτικά, η παράμετρος που χρησιμοποιείται για την μέτρηση και αξιολόγηση της αντοχής μιας διάταξης είναι το λεγόμενο "παράθυρο μνήμης", δηλαδή η διαφορά μεταξύ της V_{FB} (ή της V_T αντίστοιχα για τρανζίστορ) στην προγραμματισμένη κατάσταση και της ίδιας τάσης στην κατάσταση διαγραφής. Η φθορά της μνήμης επέρχεται όταν το παράθυρο μικραίνει τόσο πολύ ώστε πλέον δεν μπορεί να γίνει διαχωρισμός μεταξύ των

καταστάσεων προγραμματισμού και διαγραφής. Στη βιομηχανία, το ελάχιστο όριο αντοχής για τις μη πτητικές μνήμες ήταν για πολλά χρόνια 10^6 κύκλοι[2].

Οι φυσικοί παράγοντες που καθορίζουν την αντοχή μιας μνήμης είναι η πιθανή κατάρρευση ενός εκ των οξειδίων της διάταξης καθώς και η ύπαρξη ή μη παγίδων εντός των οξειδίων. Παγίδα ονομάζεται μία χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη μέσα στο ενεργειακό διάκενο του οξειδίου που δημιουργείται λόγω κατασκευαστικών ατελειών. Εάν ένα φορτίο πέσει μέσα σε αυτήν παγιδεύεται και είναι δύσκολο να αποπαγιδευτεί. Αυτό το φαινόμενο λέγεται trap-up[3]. Το ηλεκτρικό φορτίο των παγιδευμένων φορτίων μεταβάλλει την ποσότητα των φορτίων που μετακινούνται κατά τον προγραμματισμό ή την διαγραφή της μνήμης με αποτέλεσμα την μεταβολή του παραθύρου. Αυτά τα ηλεκτρικά πεδία μπορούν επίσης να προκαλέσουν ρεύματα διαρροής του αποθηκευμένου φορτίου μέσω ενός μηχανισμού σήραγγος ο οποίος ονομάζεται φαινόμενο σήραγγος υποβοηθούμενο από παγίδες (trap-assisted tunneling - TAT). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι μηχανισμοί αποθήκευσης φορτίου που βασίζονται στο φαινόμενο σήραγγος προκαλούν μικρότερη φθορά από τους μηχανισμούς έγχυσης καθώς οι περισσότερες διατάξεις χρησιμοποιούν μία συγκεκριμένη περιοχή για το φαινόμενο σήραγγος, αφήνοντας έτσι την υπόλοιπη διάταξη ανεπηρέαστη κατά την διαδικασία του προγραμματισμού. Σε μία σειρά από πηγές ([12], [16], [3]) αναφέρεται ότι η παγίδευση οπών οδηγεί σε διεύρυνση του παραθύρου, ενώ η παγίδευση ηλεκτρονίων σε ελάττωσή του. Στις διατάξεις παγίδευσης φορτίου η φθορά στο οξείδιο προκαλείται από την έγχυση οπών [3], [22].

Για να μην υπάρξει σύγχυση, πρέπει να αναφερθεί στο σημείο αυτό ότι η παγίδευση φορτίων μέσα στις παγίδες που πιθανόν να έχουν κάποια οξείδια είναι ένα εντελώς ανεπιθύμητο φαινόμενο το οποίο δεν αποτελεί σε καμία περίπτωση την θεμελιώδη λειτουργία αποθήκευσης φορτίων των μη πτητικών μνημών. Όπως προαναφέρθηκε, ο χώρος αποθήκευσης φορτίων μιας μη πτητικής μνήμης είναι είτε ένα διηλεκτρικό στρώμα, είτε μία αιωρούμενη πύλη. Ο ρόλος των οξειδίων σε μία μνήμη είναι καθαρά μονωτικός, ώστε να εμποδίζεται η διαφυγή των αποθηκευμένων φορτίων. Τα οξείδια δεν πρέπει να παγιδεύουν φορτία στο εσωτερικό τους.

Ο κίνδυνος της κατάρρευσης ενός οξειδίου είναι πολύ πιθανότερος σε ένα οξείδιο λεπτού πάχους (1-3nm), ενώ τα οξείδια μεγάλου πάχους (>3nm) αντιμετωπίζουν κυρίως το πρόβλημα του trap-up. Επίσης, η κατάρρευση ενός λεπτού οξειδίου όταν η μνήμη βρίσκεται εν λειτουργία διαφέρει από αυτήν που παρατηρείται όταν το ίδιο φαινόμενο εξετάζεται σε εργαστηριακές δοκιμές. Σύμφωνα με την πηγή [12], το διαθέσιμο ποσό ενέργειας μέσα σε ένα κελί μνήμης που βρίσκεται εν λειτουργία είναι υπερβολικά μικρό για να προκαλέσει άμεση κατάρρευση του οξειδίου. Επομένως η κατάρρευση του οξειδίου μπορεί να θεωρηθεί ως η "ενεργοποίηση" κάποιας κατασκευαστικής ατέλειας του οξειδίου από κάποιο ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο που προκαλεί τόσο μεγάλη διαρροή φορτίων ώστε να καθίσταται αδύνατη η διατήρηση του φορτίου. Έτσι, η κατάρρευση του οξειδίου ανιχνεύεται από τον παράγοντα της διατήρησης φορτίου που περιγράφεται παρακάτω.

Η αντοχή διαχωρίζεται σε ενδογενή και εξωγενή [2]. Ενδογενής αντοχή είναι αυτή που

παρατηρείται στο επίπεδο του κυττάρου μνήμης, ενώ εξωγενής είναι αυτή που παρατηρείται στο επίπεδο του κυκλώματος (circuit-level) και διαφέρει από την πρώτη καθώς εξαρτάται επιπλέον από την αρχιτεκτονική της μνήμης. Για την ποσοτική αξιολόγηση της ενδογενούς αντοχής χρησιμοποιούνται δύο χαρακτηριστικές καμπύλες. Η πρώτη αναπαριστά την τάση κατωφλιού ως συνάρτηση του αριθμού των κύκλων εγγραφής/διαγραφής. Περιλαμβάνει δύο καμπύλες, μία για την κατάσταση εγγραφής και μία για την κατάσταση διαγραφής έτσι ώστε να γίνεται εμφανής η μεταβολή του παραθύρου. Η δεύτερη χαρακτηριστική καμπύλη είναι αυτή της αθροιστικής συνάρτησης κατανομής της πιθανότητας κατάρρευσης ενός οξειδίου ως συνάρτηση του αριθμού των κύκλων εγγραφής/διαγραφής [3]. Η αξιολόγηση της εξωγενούς αντοχής απαιτεί εξέταση της λειτουργίας των περιφερειακών κυκλωμάτων του κυττάρου μνήμης. Σε γενικές γραμμές η ενδογενής αντοχή πάντα υποεκτιμά τις πραγματικές δυνατότητες του κυττάρου μνήμης [2].

Διατήρηση φορτίου (retention): Το μέγεθος αυτό δηλώνει για πόσο χρόνο μπορεί μια διάταξη μνήμης να συγκρατήσει το αποθηκευμένο φορτίο χωρίς επιπρόσθετο προγραμματισμό. Για την ακρίβεια αποτελεί τον χρόνο που μεσολαβεί από την αποθήκευση του φορτίου στην μνήμη μέχρι την πρώτη φορά που η αποθηκευμένη πληροφορία διαβάζεται λάθος. Η διατήρηση ονομάζεται ενδογενής εάν ο χρόνος αυτός μετράται χωρίς εφαρμογή εξωτερικών τάσεων στο κύτταρο μνήμης και εξωγενής εάν μετράται με το κύτταρο εν λειτουργία. Τη στιγμή που γράφονται αυτές οι γραμμές οι περισσότερες διατάξεις μνημών στο εμπόριο μπορούν να εγγυηθούν ενδογενή και εξωγενή διατήρηση φορτίου για 10 χρόνια [2], [3], [23].

Οι μηχανισμοί απώλειας του φορτίου είναι οι ακόλουθοι:

- backtunneling του φορτίου πίσω στο υπόστρωμα. Ο μηχανισμός αυτός είναι TAT και επομένως εξαρτάται πολύ από την πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων στην επιφάνεια μεταξύ του οξειδίου και του υποστρώματος. Ένας τρόπος μείωσης των παγίδων αυτών είναι η ανόπτηση του δείγματος με υδρογόνο κατά την διαδικασία παρασκευής, όπως έχει γίνει και για τα δείγματα της παρούσας εργασίας.
- έγχυση αποθηκευμένων ηλεκτρονίων και διαφυγή τους από το ηλεκτρόδιο της πύλης (γνωστή και ως ενδογενής απώλεια φορτίου [2])
- έγχυση στο διηλεκτρικό φορτίων αντίθετου τύπου από τους αποθηκευμένους είτε από το υπόστρωμα είτε από την πύλη με συνέπεια την επανασύνδεση
- ανακατανομή φορτίων μέσα στο διηλεκτρικό στρώμα [3]
- σε διατάξεις με διηλεκτρικά στρώματα τύπου ONO υπάρχει διαρροή φορτίου από το νιτρίδιο με αγωγιμότητα Poole-Frenkel καθώς και με έγχυση, όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Η θεωρία του ONO αναλύεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 3.
- ιοντικές προσμίξεις που εξουδετερώνουν μέρος του φορτίου. Αυτός ο μηχανισμός εμφανίζεται κυρίως σε υψηλές θερμοκρασίες.
- νέοι μηχανισμοί που δημιουργούνται από επαναλαμβανόμενες εγγραφές/διαγραφές [2].

Για την ποσοτική αξιολόγηση της ενδογενούς διατήρησης χρησιμοποιούνται δύο χαρακτηριστικές καμπύλες. Η πρώτη αναπαριστά την τάση κατωφλιού ως συνάρτηση του χρόνου. Η καμπύλη αυτή συνήθως είναι γραμμική και φθίνουσα. Η δεύτερη χαρακτηριστική καμπύλη λέγεται διάγραμμα Arrhenius και πρόκειται για το ημιλογαριθμικό διάγραμμα του χρόνου ως συνάρτηση του αντιστρόφου της θερμοκρασίας (σε Kelvin). Με εργαστηριακές δοκιμές υπολογίζεται η διαρροή φορτίου σε υψηλές θερμοκρασίες και μετά υπολογίζεται η ίδια διαρροή σε θερμοκρασίες λειτουργίας με παρεμβολή. Περιγράφεται από την σχέση:

$$t_{\Delta V_i} \sim \exp(E_A/kT) \quad (1.1)$$

όπου E_A είναι η ενέργεια ενεργοποίησης του επικρατούντος μηχανισμού απώλειας φορτίου στην κάθε θερμοκρασιακή περιοχή. Η κλίση του διαγράμματος ισούται με την E_A . Η εξωγενής διατήρηση θεωρείται ίση με την διατήρηση του χειρότερου κυττάρου μνήμης σε ένα κύκλωμα [2].

Πυκνότητα: Συνδέεται με την έννοια της σμίκρυνσης (scaling) του κυττάρου μνήμης. Καθώς ο στόχος είναι η αύξηση της πυκνότητας της μνήμης, οι διαστάσεις του κυττάρου διαρκώς μειώνονται. Κατά συνέπεια υπάρχει διαρκής μείωση της διατομής, του μήκους καναλιού καθώς και των παχών των διαφόρων διηλεκτρικών στρωμάτων. Το τελευταίο έχει ως συνέπεια την πιο πιθανή διάτρησή τους από το ηλεκτρικό πεδίο μίας τάσης προγραμματισμού και επομένως επιβάλλει την ελάττωση των τάσεων προγραμματισμού. Στον τομέα αυτό υπερέχουν οι μνήμες παγίδευσης φορτίου, καθώς το διηλεκτρικό στρώμα στο οποίο αποθηκεύονται τα φορτία εξουδετερώνει ως ένα βαθμό το ηλεκτρικό πεδίο του αποθηκευμένου φορτίου. Στις μνήμες αιωρούμενης πύλης αυτό δεν γίνεται, με συνέπεια το ηλεκτρικό πεδίο του αποθηκευμένου φορτίου να προγραμματίζει ή να σβήνει διπλανά κελιά μνήμης χωρίς την εφαρμογή τάσης προγραμματισμού.

Κόστος κατασκευής: Είναι μία παράμετρος η οποία, αν και δεν επηρεάζει την απόδοση της μνήμης, πρέπει να ληφθεί υπόψη.

Πολυπλοκότητα κατασκευής: Ορισμένες τεχνολογίες απαιτούν περισσότερα κατασκευαστικά βήματα από άλλες. Η αύξηση των βημάτων δεν αυξάνει μόνο το κόστος κατασκευής αλλά και τον κύκλο παραγωγής, καθώς και την απόδοση του κύκλου παραγωγής. Στον τομέα αυτόν υπερέχουν ξεκάθαρα οι μνήμες αποθήκευσης φορτίου που απαιτούν 6 βήματα, έναντι περίπου 14 που απαιτούν οι μνήμες αιωρούμενης πύλης[13].

Κατανάλωση ισχύος: Η σμίκρυνση των διατάξεων οδηγεί σε διαρκή σμίκρυνση του κυττάρου μνήμης ώστε να επιτευχθεί αύξηση της πυκνότητας της μνήμης. Αυτό το γεγονός αυξάνει κατά πολύ τις απαιτήσεις για μικρή και αποδοτική κατανάλωση ισχύος αφενός για λόγους κόστους και αφετέρου γιατί οι απώλειες είναι συνήθως ωμικές, με συνέπεια την υπερθέρμανση της διάταξης. Οι απαιτήσεις για χαμηλή κατανάλωση ισχύος μεταφράζεται σε χαμηλές τάσεις προγραμματισμού καθώς και σε ελαχιστοποίηση των ρευμάτων

διαρροής και των μερών της διάταξης που μπορούν να λειτουργήσουν ως ισοδύναμες ωμικές αντιστάσεις.

Ταχύτητα ανάγνωσης/εγγραφής/διαγραφής: Για την καλύτερη κατανόηση του παράγοντα αυτού παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3 το μπλοκ διάγραμμα μιας μνήμης. Η κύρια δυναμική παράμετρος μιας μνήμης σε ότι αφορά την ανάγνωση είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ του χρόνου της εισόδου της διεύθυνσης της μνήμης και του χρόνου της εξόδου των δεδομένων από την μνήμη. Ο υπολογισμός αυτού του χρονικού διαστήματος γίνεται μόνο μεταξύ ευσταθών λογικών καταστάσεων των flip-flops και των καταχωρητών του ψηφιακού αυτού κυκλώματος. Σε ότι αφορά την εγγραφή, η κύρια παράμετρος είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ του χρόνου της εισόδου της διεύθυνσης της μνήμης και των δεδομένων προς εγγραφή και του χρόνου που το σύστημα μπορεί να δεχτεί ξανά δεδομένα στην είσοδό του. Προφανώς όμως αυτός ο παράγοντας επηρεάζεται και από την αρχιτεκτονική της μνήμης, δηλαδή με την συνδεσμολογία των κυττάρων μνήμης. Περισσότερες πληροφορίες μπορεί να βρει κανείς στην πηγή [2].

Αντοχή στη ραδιενέργεια (radiation hardness): Το χαρακτηριστικό αυτό απαιτείται κυρίως για τις μνήμες που προορίζονται για στρατιωτικού τύπου εφαρμογές. Εδώ οι διατάξεις αποθήκευσης φορτίου έχουν πολύ καλύτερες επιδόσεις από τις διατάξεις μνημών με αιωρούμενη πύλη.

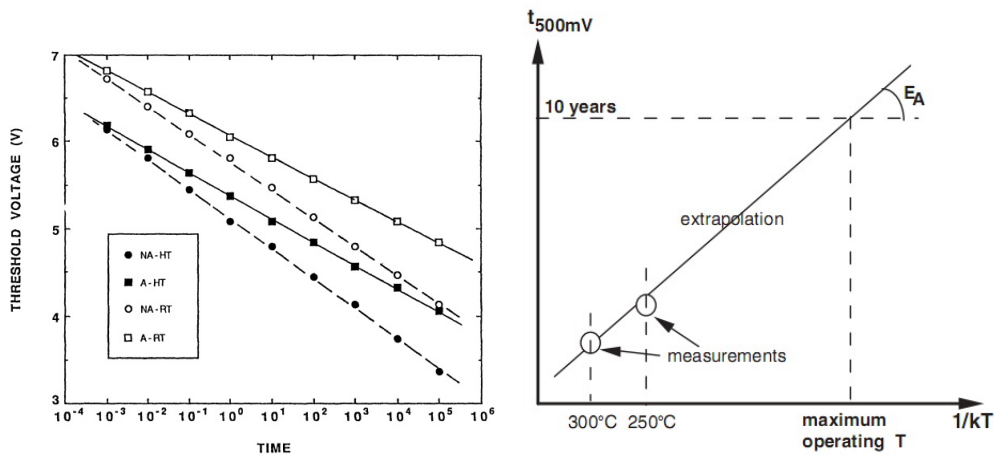
Εγγενείς σχεδιαστικές αδυναμίες: Ορισμένες τεχνολογίες μνημών ενέχουν κάποιες εγγενείς σχεδιαστικές αδυναμίες οι οποίες αργά ή γρήγορα γίνονται η αιτία εγκατάλειψής των τεχνολογιών αυτών. Κάτι τέτοιο συμβαίνει με τις μνήμες αιωρούμενης πύλης, όπου ενδεχόμενο ελάττωμα στο οξειδίο που βρίσκεται μεταξύ του υποστρώματος και της αιωρούμενης πύλης οδηγεί σε άμεση απώλεια του αποθηκευμένου φορτίου και στην ολική αχρήστευση του κελιού.

Συμβατότητα με ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες: Είναι μία παράμετρος που πρέπει οπωσδήποτε να ληφθεί υπόψη καθώς οι μνήμες δεν θα λειτουργήσουν αυτόνομα αλλά ως μέρος ενός ευρύτερου ηλεκτρονικού συστήματος και τις περισσότερες φορές θα κληθούν να αντικαταστήσουν διατάξεις μνημών παλαιότερης τεχνολογίας. Είναι σημαντικό λοιπόν οι καινούριες μνήμες να μην απαιτήσουν κάποια αλλαγή στο υπόλοιπο σύστημα ώστε να μπορέσουν να εξυπηρετηθούν.

Φαινόμενα παρεμβολών (disturb effects): Φαινόμενα παρεμβολών συμβαίνουν όταν το φορτίο ενός κυττάρου μνήμης εν λειτουργία αλλάζει ακούσια εξαιτίας των τάσεων που εφαρμόζονται. Τα φαινόμενα αυτά εξαρτώνται κυρίως από την αρχιτεκτονική της μνήμης και από την σχεδίαση του κυττάρου. Περισσότερα μπορεί να βρει κανείς στην πηγή [2]. Το πιο σημαντικό από αυτά είναι το φαινόμενο αργής εγγραφής (Slow write - Soft write) το οποίο περιγράφει την κατα λάθος εγγραφή στην μνήμη κατά την ανάγνωση.

Πίνακας 1.2: Μηχανισμοί απώλειας φορτίου και ενέργειες ενεργοποίησης

Μηχανισμός απώλειας	E_A σε eV
ενδογενής απώλεια φορτίου	1.4
ατέλειες οξειδίου - backtunneling	0.6
κατάρρευση οξειδίου	0.3
διαρροή από δομή ONO	0.35
ιοντικές προσμίξεις	1.2
απώλεια φορτίου από συνεχόμενους κύκλους εγγραφής/διαγραφής	1.1



(α') Χαρακτηριστική καμπύλη διατήρησης φορτίου (β') Διάγραμμα Arrhenius διάταξης μνήμης με αιωρούμενη πύλη

Σχήμα 1.5: Χαρακτηριστικές καμπύλες αξιολόγησης της ενδογενούς διατήρησης φορτίου

1.4 Αντικείμενο της διπλωματικής

Η διπλωματική εργασία επικεντρώνεται πάνω στις μνήμες SONOS. Οι μνήμες αυτές αποτελούνται από πολυπυρίτιο/ $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ υπόστρωμα. Το φορτίο αποθηκεύεται στο Si_3N_4 . Πρόκειται για τεχνολογία αιχμής που παρουσιάζει τα εξής πλεονεκτήματα:

- Χαμηλές τάσεις προγραμματισμού 5-10V
- Υψηλή πυκνότητα
- Πολύ υψηλή αντοχή φορτίου (10^7 κύκλοι)
- Υψηλή αντοχή στη ραδιενέργεια
- Συμβατότητα με την τεχνολογία CMOS

Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη των ιδιοτήτων παγίδευσης φορτίου δομών οξειδίου του πυριτίου-νιτρίδιου του πυριτίου-οξειδίου του πυριτίου ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$)

που έχουν δεχθεί τροποποίηση με ιοντική εμφύτευση ιόντων αζώτου. Μετά την εμφύτευση οι δομές θα υποστούν οξείδωση ώστε να σχηματιστεί ένα οξείδιο του πυριτίου στο άνω μέρος της διατάξης και στη συνέχεια θα κατασκευαστούν πυκνωτές ώστε να μελετηθούν:

1. οι χαρακτηριστικές I-V και C-V
2. οι ιδιότητες παγίδευσης φορτίου υπό συνθήκες ηλεκτρικών παλμών
3. οι ιδιότητες σταθερότητας του παγιδευμένου φορτίου
4. η αντοχή των διατάξεων στην ηλεκτρική καταπόνηση

Η ιδέα αυτή στηρίζεται σε προηγούμενη ερευνητική δραστηριότητα όπου επιτεύχθηκε η σύνθεση δομών οξειδίου του πυριτίου-νιτριδίου του πυριτίου-οξειδίου του πυριτίου ($\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$) μετά από εμφύτευση πυριτίου υψηλής δόσης και χαμηλής ενέργειας σε δομές $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ και στη συνέχεια υγρή οξείδωση χαμηλής θερμοκρασίας (850°C). Τα χαρακτηριστικά μνήμης των δομών αυτών αποδείχθηκαν εξαιρετικά.

Κεφάλαιο 2

Θεωρητικό υπόβαθρο

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο των μη πτητικών μνημών. Αρχικά παρουσιάζεται η δίοδος MOS και οι ιδιότητές της. Έπειτα περιγράφεται η συλλογιστική διαδικασία που οδήγησε στο κύτταρο μνήμης, που αποτελεί τη δομική μονάδα όλων των σύγχρονων μνημών.

2.1 Διαφορές συμβολισμών από την H/M θεωρία

2.1.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτροστατική ανάλυση των διατάξεων στον τομέα των Υλικών βασίζεται στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Οι μαθηματικές σχέσεις που θεμελιώνουν την ηλεκτρομαγνητική θεωρία είναι οι τέσσερις εξισώσεις του Maxwell (Maxwell-Farraday, Maxwell-Ampere και οι δύο νόμοι του Gauss) που μπορούν να γραφούν σε ολοκληρωτική ή διαφορική μορφή, η εξίσωση συνέχειας του ρεύματος, η εξίσωση που περιγράφει τη δύναμη Lorenz και οι συντακτικές σχέσεις που περιγράφουν τη συμπεριφορά του μέσου διάδοσης. Επιπλέον, όλες οι προηγούμενες σχέσεις μπορούν να εξεταστούν είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας και παίρνουν διαφορετική μορφή στο κάθε πεδίο. Είναι πολύ σημαντικό ο αναγνώστης να έχει αποκτήσει ένα στέρεο υπόβαθρο στην ηλεκτρομαγνητική θεωρία ώστε να μπορεί να έχει υπόψη του κάθε φορά ποια σχέση εφαρμόζεται και τι προϋποθέσεις ισχύουν για την εφαρμογή της.

Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι ότι στον τομέα των Υλικών γίνεται χρήση ελαφρώς διαφορετικών συμβολισμών από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, οι οποίοι αν και διευκολύνουν ορισμένες διαδικασίες υπολογισμού, εισάγουν τη δική τους δυσκολία σε ότι αφορά την κατανόηση και εφαρμογή των εξισώσεων που προαναφέρθηκαν. Ο στόχος αυτής της ενότητας δεν θα μπορούσε να είναι η παρουσίαση όλης της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Αυτό που παρουσιάζεται και αναλύεται είναι αφενός η διαφορά συμβολισμών μεταξύ των Υλικών και της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας και αφετέρου ο θεωρητικός συνδετικός κρίκος μεταξύ των δύο αυτών θεωριών, όπως αυτός εκφράζεται από διαφορές στις εξισώσεις ή στις παραδοχές που γίνονται.

2.1.2 Ηλεκτρομαγνητική θεωρία

2.1.2.1 Ανάλυση στο πεδίο του χρόνου

Η ανάλυση που ακολουθεί βασίζεται στην πηγή [1], που κατά τον συγγραφέα αποτελεί μία εξαιρετική ανάλυση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας. Σύμφωνα με την ορολογία που ακολουθείται στο βιβλίο αυτό, χρησιμοποιούνται καλλιγραφικά σύμβολα όταν γίνεται αναφορά στο πεδίο του χρόνου και μη καλλιγραφικά για το πεδίο της συχνότητας. Στην ανάλυση που ακολουθεί δεν θα συμπεριληφθεί η ολοκληρωτική μορφή των εξισώσεων καθώς τα προβλήματα των Υλικών είναι μη συμμετρικά και επομένως η μορφή αυτή δεν έχει μεγάλη χρησιμότητα.

Στο πεδίο του χρόνου οι εξισώσεις Maxwell μπορούν να γραφούν σε διαφορική μορφή ως εξής:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{E}} = -\frac{\partial \vec{\mathcal{B}}}{\partial t} = -\vec{\mathcal{M}}_d \quad (2.1.2.1.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{H}} = \vec{\mathcal{J}}_i + \vec{\mathcal{J}}_c + \frac{\partial \vec{\mathcal{D}}}{\partial t} = \vec{\mathcal{J}}_i + \vec{\mathcal{J}}_c + \vec{\mathcal{J}}_d \quad (2.1.2.1.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{D}} = \rho_i + \rho_f \quad (2.1.2.1.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{B}} = 0 \quad (2.1.2.1.4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{\mathcal{J}}_i + \vec{\mathcal{J}}_c) = -\frac{\partial(\rho_i + \rho_f)}{\partial t} \quad (2.1.2.1.5)$$

όπου:

$\mathcal{E}, \mathcal{H}, \mathcal{D}, \mathcal{B}, \mathcal{J}, \mathcal{M}$: $f(\vec{r}, t)$

\mathcal{E} : το ηλεκτρικό πεδίο [Volts/m]

\mathcal{H} : το μαγνητικό πεδίο [Amperes/m]

\mathcal{D} : η πυκνότητα της ηλεκτρικής ροής [Coulombs/m²]

\mathcal{B} : η πυκνότητα της μαγνητικής ροής [Webers/m²]

\mathcal{J}_i : η πυκνότητα ρεύματος των ανεξάρτητων-επιβαλλόμενων πηγών [Amperes/m²]

$\mathcal{J}_c \equiv \mathcal{J}_f$: η πυκνότητα ελευθερων, εξαρτημένων πηγών ρεύματος αγωγιμότητας [Amperes/m²]

\mathcal{J}_b : η πυκνότητα ρεύματος των ακίνητων πηγών [Amperes/m²]

\mathcal{J}_d : η πυκνότητα ρεύματος μετατόπισης [Amperes/m²]

\mathcal{M}_d : η πυκνότητα "μαγνητικού ρεύματος" μετατόπισης [Volts/m²]

ρ_i : χωρική πυκνότητα ανεξάρτητων-επιβαλλόμενων πηγών ηλεκτρικού φορτίου [Coulombs/m³]

ρ_f : χωρική πυκνότητα εξαρτημένου-ελεύθερου ηλεκτρικού φορτίου (ηλεκτρόνια-οπές) [Coulombs/m³]

ρ_b : χωρική πυκνότητα ακίνητου ηλεκτρικού φορτίου (ακίνητα ιόντα) [Coulombs/m³]

Στην παραπάνω μορφή των εξισώσεων δεν παρατηρείται κάποια φανερή εξάρτηση από τα ακίνητα φορτία και ρεύματα. Στην πραγματικότητα η εξάρτηση υπάρχει αλλά είναι κρυφή. Η

συνεισφορά των κρυφών φορτίων και ρευμάτων περιέχεται στα \mathcal{D} και \mathcal{H} , τα οποία συνδέονται με τα \mathcal{E} και \mathcal{B} μέσω των εξής συντακτικών σχέσεων:

$$\vec{\mathcal{D}} = \epsilon * \vec{\mathcal{E}} \quad (2.1.2.1.6)$$

$$\vec{\mathcal{B}} = \mu * \vec{\mathcal{H}} \quad (2.1.2.1.7)$$

$$\vec{\mathcal{J}}_c = \sigma * \vec{\mathcal{E}} \quad (2.1.2.1.8)$$

όπου:

ϵ : απόλυτη διηλεκτρική σταθερά στο πεδίο του χρόνου

μ : απόλυτη μαγνητική σταθερά στο πεδίο του χρόνου

σ : αγωγιμότητα στο πεδίο του χρόνου

το σύμβολο * αναπαριστά τη συνέλιξη

Ο χαρακτηρισμός "απόλυτη" γίνεται για να διαχωρίσει αυτές τις σταθερές από τις "σχετικές", οι οποίες θα παρουσιαστούν στη συνέχεια. Συνήθως, αυτός ο χαρακτηρισμός παραλείπεται. Όποτε δεν γίνεται λόγος για το αν η σταθερά είναι απόλυτη ή σχετική, εννοείται ότι είναι απόλυτη.

2.1.2.2 Προσέγγιση στο πεδίο του χρόνου για απλά μέσα

Οι συντακτικές παράμετροι ϵ , μ και σ είναι διαφορετικές στο πεδίο του χρόνου από ότι στο πεδίο της συχνότητας. Επίσης διαφέρουν ανάλογα με το αν τα πεδία μεγάθη είναι σταθερά (DC) ή μεταβάλλονται με το χρόνο (συνήθως ημιτονοειδώς, δηλαδή AC)

Στις διαχωριστικές επιφάνειες μεταξύ διαφορετικών μέσων ισχύουν οι παρακάτω συνοριακές σχέσεις αντι των σημειακών εξισώσεων Maxwell:

$$\hat{n} \times (\vec{\mathcal{E}}_2 - \vec{\mathcal{E}}_1) = 0 \quad (2.1.2.2.1)$$

$$\hat{n} \times (\vec{\mathcal{H}}_2 - \vec{\mathcal{H}}_1) = \vec{K}_i + \vec{K}_c \quad (2.1.2.2.2)$$

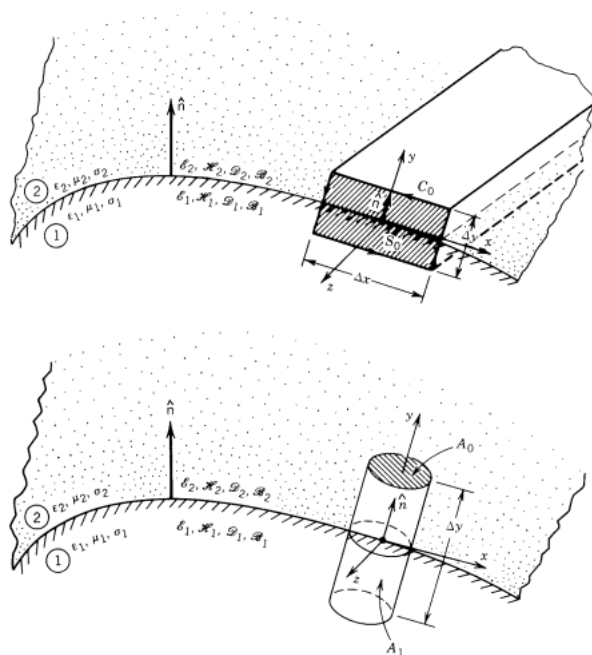
$$\hat{n} \cdot (\vec{\mathcal{D}}_2 - \vec{\mathcal{D}}_1) = \sigma_i + \sigma_f \quad (2.1.2.2.3)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{\mathcal{B}}_2 - \vec{\mathcal{B}}_1) = 0 \quad (2.1.2.2.4)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{\mathcal{J}}_2 - \vec{\mathcal{J}}_1) = -\frac{\partial(\sigma_i + \sigma_f)}{\partial t} - \vec{\nabla} \cdot (\vec{K}_i + \vec{K}_c) \quad (2.1.2.2.5)$$

όπου[24]:

σ_i : επιφανειακή πυκνότητα ανεξάρτητων-επιβαλλόμενων πηγών ηλεκτρικού φορτίου [Coulombs/m³]



Σχήμα 2.1: Γεωμετρία συνοριακών συνθηκών για εφαπτομενικές και κάθετες συνιστώσες

Αρκετές φορές παρατηρείται η χρησιμοποίηση συνθηκών και σχέσεων από το πεδίο της συχνότητας στο πεδίο του χρόνου, κυρίως σε ότι αφορά τις συντακτικές σχέσεις. Αυτό γίνεται επειδή αφενός οι συντακτικές σχέσεις στο πεδίο της συχνότητας είναι γινόμενα και όχι συνελίξεις και κατά συνέπεια οι πράξεις απλουστεύονται πάρα πολύ, αφετέρου όμως οι συγγραφείς δεν δείχνουν πρόθυμοι να εισάγουν την πολυπλοκότητα των μιγαδικών μεγεθών που απαιτεί το πεδίο της συχνότητας. Ο αναγνώστης πρέπει να έχει στο μυαλό του ότι για να εφαρμοστούν οι σχέσεις που ακολουθούν το μέσο πρέπει τουλάχιστον να είναι γραμμικό, ιστροπικό και να μην εμφανίζει διασπορά.

σ_f : επιφανειακή πυκνότητα εξαρτημένου-ελεύθερου ηλεκτρικού φορτίου (ηλεκτρόνια-οπές) [Coulombs/m³]

\mathcal{K}_i : πυκνότητα επιφανειακού ρεύματος των ανεξάρτητων-επιβαλλόμενων πηγών

\mathcal{K}_c : πυκνότητα ελευθερων, εξαρτημένων πηγών ρεύματος αγωγιμότητας

\mathbf{n} : μοναδιαίο διάνυσμα με φορά από το μέσο 1 στο μέσο 2, όπως στο Σχήμα 2.1.

Τα μεγέθη \mathbf{D} και \mathbf{H} συνδέονται με τα ακίνητα φορτία και ρεύματα σύμφωνα με τους τύπους:

$$\rho_b = -\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{P}} = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{\mathcal{D}} - \epsilon_o \vec{\mathcal{E}}) \quad (2.1.2.2.6)$$

$$\vec{\mathcal{J}}_b = \vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{M}} + \frac{\partial \vec{\mathcal{P}}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times \left(\frac{\vec{\mathcal{B}}}{\mu_o} - \vec{\mathcal{H}} \right) + \frac{\partial \vec{\mathcal{P}}}{\partial t} \quad (2.1.2.2.7)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 2.1.2.2.6 και 2.1.2.2.7 στις εξισώσεις 2.1.2.1.2 και 2.1.2.1.3, οι τελευταίες μετατρέπονται στην εξής μορφή:

$$\frac{1}{\mu_o} \vec{\nabla} \times \vec{\mathcal{B}} = \vec{\mathcal{J}}_i + \vec{\mathcal{J}}_c + \vec{\mathcal{J}}_b + \epsilon_o \frac{\partial \vec{\mathcal{E}}}{\partial t} \quad (2.1.2.2.8)$$

$$\epsilon_o \vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{E}} = \rho_i + \rho_f + \rho_b \quad (2.1.2.2.9)$$

όπου:

\mathcal{P} : η ηλεκτρική πόλωση του υλικού

\mathcal{M} : η μαγνητική πόλωση του υλικού

ϵ_o : η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού

μ_o : η απόλυτη μαγνητική σταθερά του κενού

Επομένως, μπορεί κανείς να εργαστεί είτε με τις εξισώσεις που περιλαμβάνουν τα \mathcal{D} και \mathcal{H} , είτε με τις εξισώσεις που περιλαμβάνουν τα ρ_b και J_b . Οι υπόλοιπες εξισώσεις παραμένουν ίδιες.

Στις εξισώσεις 2.1.2.2.6 και 2.1.2.2.7 έχουν χρησιμοποιηθεί οι εξής συντακτικές σχέσεις που περιγράφουν την συμπεριφορά του μέσου διάδοσης:

$$\vec{\mathcal{D}} = \epsilon_o \vec{\mathcal{E}} + \vec{\mathcal{P}} \quad (2.1.2.2.10)$$

$$\vec{\mathcal{B}} = \mu_o (\vec{\mathcal{H}} + \vec{\mathcal{M}}) \quad (2.1.2.2.11)$$

Αν ένα μέσο είναι γραμμικό, ιστροπικό και δεν εμφανίζει διασπορά τότε ισχύει:

$$\vec{\mathcal{P}} = \epsilon_o \chi_e \vec{\mathcal{E}} \quad (2.1.2.2.12)$$

$$\vec{\mathcal{M}} = \chi_m \vec{\mathcal{H}} \quad (2.1.2.2.13)$$

και οι συντακτικές σχέσεις 2.1.2.2.10 και 2.1.2.2.11 γίνονται:

$$\vec{\mathcal{D}} = \epsilon_o \vec{\mathcal{E}} + \vec{\mathcal{P}} = \epsilon_o (1 + \chi_e) \vec{\mathcal{E}} = \epsilon_o \epsilon_r \vec{\mathcal{E}} = \epsilon \vec{\mathcal{E}} \quad (2.1.2.2.14)$$

$$\vec{\mathcal{B}} = \mu_o (\vec{\mathcal{H}} + \vec{\mathcal{M}}) = \mu_o (1 + \chi_m) \vec{\mathcal{H}} = \mu_o \mu_r \vec{\mathcal{H}} = \mu \vec{\mathcal{H}} \quad (2.1.2.2.15)$$

$$\vec{\mathcal{J}}_c = \sigma \vec{\mathcal{E}} \quad (2.1.2.2.16)$$

όπου:

χ_e : η ηλεκτρική δεκτικότητα του μέσου

χ_m : η μαγνητική δεκτικότητα του μέσου

ϵ_r : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του μέσου στο πεδίο του χρόνου

μ_r : η σχετική μαγνητική σταθερά του μέσου στο πεδίο του χρόνου

2.1.2.3 Ανάλυση στο πεδίο της συχνότητας

Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γραφούν και στο πεδίο της συχνότητας. Η μερική παράγωγος ως προς το χρόνο αντικαθίσταται με το γινόμενο $i\omega$ και τα πεδία με τα αντίστοιχα phasors.

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -i\omega\vec{B} = -\vec{M}_d \quad (2.1.2.3.1)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_i + \vec{J}_c + i\omega\vec{D} = \vec{J}_i + \vec{J}_c + \vec{J}_d \quad (2.1.2.3.2)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_i + \rho_f \quad (2.1.2.3.3)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.1.2.3.4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_i + \vec{J}_c) = -i\omega(\rho_i + \rho_f) \quad (2.1.2.3.5)$$

όπου όλα τα μεγέθη αποτελούν τους μετασχηματισμούς στο πεδίο της συχνότητας των μεγεθών του πεδίου του χρόνου:

$E, H, D, B, J, M, K, P, M: f(\vec{r})$

$\rho_i, \rho_f, \rho_b, \sigma_i, \sigma_f$: χωρικές και επιφανειακές κατανομές μετασχηματισμένες στο πεδίο της συχνότητας

ϵ, μ, σ : απόλυτες σταθερές στο πεδίο της συχνότητας

Η σχέση μεταξύ των πεδίων στο πεδίο του χρόνου και των αντίστοιχων phasors είναι:

$$\mathcal{E}(\vec{r}, t) = \text{Re}[E(\vec{r})e^{i\omega t}] \quad (2.1.2.3.6)$$

Οι συνοριακές συνθήκες γράφονται ως εξής:

$$\hat{n} \times (\vec{E}_2 - \vec{E}_1) = 0 \quad (2.1.2.3.7)$$

$$\hat{n} \times (\vec{H}_2 - \vec{H}_1) = \vec{K}_i + \vec{K}_c \quad (2.1.2.3.8)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{D}_2 - \vec{D}_1) = \sigma_i + \sigma_f \quad (2.1.2.3.9)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{B}_2 - \vec{B}_1) = 0 \quad (2.1.2.3.10)$$

$$\hat{n} \cdot (\vec{J}_2 - \vec{J}_1) = -i\omega(\sigma_i + \sigma_f) - \vec{\nabla} \cdot (\vec{K}_i + \vec{K}_c) \quad (2.1.2.3.11)$$

Στην παραπάνω μορφή των εξισώσεων επίσης δεν παρατηρείται κάποια φανερή εξάρτηση από τα ακίνητα φορτία και ρεύματα. Στην πραγματικότητα η εξάρτηση υπάρχει αλλά είναι

κρυφή. Οι συντακτικές σχέσεις στο πεδίο της συχνότητας δεν είναι πλέον συνελιζεις αλλά γινόμενα, κάτι που απλουστεύει πολύ τους υπολογισμούς και οδηγεί σε πολύ ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

Τα μεγέθη D και H συνδέονται με τα ακίνητα φορτία και ρεύματα σύμφωνα με τους τύπους:

$$\rho_b = -\vec{\nabla} \cdot \vec{P} = -\vec{\nabla} \cdot (\vec{D} - \epsilon_o \vec{E}) \quad (2.1.2.3.12)$$

$$\vec{J}_b = \vec{\nabla} \times \vec{M} + \omega \vec{P} = \vec{\nabla} \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu_o} - \vec{H} \right) + \omega \vec{P} \quad (2.1.2.3.13)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 2.1.2.3.12 και 2.1.2.3.13 στις εξισώσεις 2.1.2.3.2 και 2.1.2.3.3, οι τελευταίες μετατρέπονται στην εξής μορφή:

$$\frac{1}{\mu_o} \vec{\nabla} \times \vec{B} = \vec{J}_i + \vec{J}_c + \vec{J}_b + \epsilon_o \omega \vec{E} \quad (2.1.2.3.14)$$

$$\epsilon_o \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho_i + \rho_f + \rho_b \quad (2.1.2.3.15)$$

Επομένως, στο πεδίο της συχνότητας μπορεί κανείς να εργαστεί είτε με τις εξισώσεις που περιλαμβάνουν τα D και H, είτε με τις εξισώσεις που περιλαμβάνουν τα ρ_b και J_b . Οι υπόλοιπες εξισώσεις παραμένουν ίδιες.

Στις εξισώσεις 2.1.2.3.12 και 2.1.2.3.13 έχουν χρησιμοποιηθεί οι εξής συντακτικές σχέσεις που περιγράφουν την συμπεριφορά του μέσου διάδοσης:

$$\vec{D} = \epsilon_o \vec{E} + \vec{P} \quad (2.1.2.3.16)$$

$$\vec{B} = \mu_o (\vec{H} + \vec{M}) \quad (2.1.2.3.17)$$

Αν ένα μέσο είναι γραμμικό, ισοτροπικό και δεν εμφανίζει διασπορά τότε ισχύει:

$$\vec{P} = \epsilon_o \chi_e \vec{E} \quad (2.1.2.3.18)$$

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (2.1.2.3.19)$$

και οι συντακτικές σχέσεις 2.1.2.3.16 και 2.1.2.3.17 γίνονται:

$$\vec{D} = \epsilon_o \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_o (1 + \chi_e) \vec{E} = \epsilon_o \epsilon_r \vec{E} = \epsilon \vec{E} \quad (2.1.2.3.20)$$

$$\vec{B} = \mu_o (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_o (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_o \mu_r \vec{H} = \mu \vec{H} \quad (2.1.2.3.21)$$

$$\vec{J}_c = \sigma \vec{E} \quad (2.1.2.3.22)$$

2.1.3 Υλικά

Στα Υλικά ισχύουν όλα όσα περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα, εκτός από ορισμένες διαφορές. Το θεωρητικό πλαίσιο των Υλικών συνοψίζεται στα εξής:

- Η ανάλυση γίνεται στο πεδίο του χρόνου.
- Επειδή γίνεται αναφορά σε ημιαγωγούς, υπάρχουν πλέον δύο φορείς που συνεισφέρουν στο ρεύμα: οι οπές και τα ηλεκτρόνια. Αυτό σημαίνει ότι για μία σειρά από παραμέτρους όπως η αγωγιμότητα και η κινητικότητα θα υπάρχουν πλέον δύο συντακτικές παράμετροι, μία για τον κάθε φορέα.
- Ισχύουν όλες οι απλουστευτικές προσεγγίσεις των συντακτικών σχέσεων του πεδίου της συχνότητας, με τους περιορισμούς που προαναφέρθηκαν.
- Οι εξισώσεις του πεδίου του χρόνου ισχύουν, εκτός από τις εξισώσεις 2.1.2.1.5 και 2.1.2.2.16, οι οποίες αλλάζουν.
- Τα ηλεκτρικά φορτία και οι χωρητικότητες αντιμετωπίζονται όχι ως απόλυτα μεγέθη αλλά ως μεγέθη ανα επιφάνεια. Αυτό έχει ως συνέπεια την ταύτιση ως προς τα σύμβολα των φορτίων και των αντιστοιχων επιφανειακών κατανομών τους ($Q \equiv \sigma$).
- Δεν γίνεται διάκριση μεταξύ DC και AC συντακτικών παραμέτρων.

Η εξίσωση συνέχειας μετατρέπεται έτσι ώστε να περιλαμβάνει τα φαινόμενα της γέννησης και επανασύνδεσης φορέων που είναι συνηθισμένα στους ημιαγωγούς. Έτσι, αντί της εξίσωσης 2.1.2.1.5 ισχύει η παρακάτω εξίσωση:

$$\vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_i + \vec{J}_c) = -\frac{\partial(\rho_i + \rho_f)}{\partial t} + (G - R)q \quad (2.1.3.0.23)$$

όπου:

G: ο ρυθμός γέννησης φορέων

R: ο ρυθμός επανασύνδεσης

Επίσης, επειδή στον τομέα των Υλικών γίνεται αναφορά συνήθως σε ημιαγωγούς τα ρ_f και ρ_b μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$\rho_f = q(p - n) \quad (2.1.3.0.24)$$

$$\rho_b = q(N_D - N_A) \quad (2.1.3.0.25)$$

όπου:

q: το φορτίο ενός ηλεκτρονίου

p: η συγκέντρωση οπών

n: η συγκέντρωση ηλεκτρονίων

N_A : η συγκέντρωση αποδεκτών

N_D : η συγκέντρωση δοτών

Εκτός από τις αλλαγές που υποδεικνύουν οι παραπάνω εξισώσεις, υπάρχει και μία μεταβολή στην απλουστευμένη εξίσωση 2.1.2.2.16 η οποία κατά προσέγγιση χρησιμοποιείται στο πεδίο του χρόνου. Η μεταβολή έγκειται στο γεγονός ότι στα ημιαγωγία υλικά το ρεύμα αγωγιμότητας έχει δύο συνιστώσες: το ρεύμα ολίσθησης (δηλαδή αυτό που εκφράζεται από την εξίσωση 2.1.2.2.16) και το ρεύμα διάχυσης, που περιγράφεται από τον 1ο Νόμο του Fick [20]:

$$\vec{J}_{p,diff} = -qD_p \frac{dp}{dx} = -qV_t \mu_p \frac{dp}{dx} = -q \frac{kT}{q} \mu_p \frac{dp}{dx} \quad (2.1.3.0.26)$$

για τις οπές και:

$$\vec{J}_{n,diff} = qD_n \frac{dn}{dx} = qV_t \mu_n \frac{dn}{dx} = q \frac{kT}{q} \mu_n \frac{dn}{dx} \quad (2.1.3.0.27)$$

για τα ηλεκτρόνια

όπου:

μ_p : η ευκινησία των οπών

μ_n : η ευκινησία των ηλεκτρονίων

k : η σταθερά Boltzmann

T : η θερμοκρασία σε Kelvin

D_p : η σταθερά διάχυσης των οπών

D_n : η σταθερά διάχυσης των ηλεκτρονίων

Οι σταθερές διάχυσης ισούνται με το γινόμενο της θερμικής τάσης επί την κινητικότητα για κάθε τύπο φορέων, όπως φαίνεται στις προηγούμενες εξισώσεις. Τα ρεύματα ηλεκτρονίων και οπών δρουν προσθετικά μεταξύ τους και όχι αφαιρετικά. Έτσι, το συνολικό ρεύμα αγωγιμότητας θα δοθεί από το άθροισμα των ρευμάτων ολίσθησης και διάχυσης και για τους δύο φορείς. Δηλαδή αν:

σ_p : η αγωγιμότητα των οπών

σ_n : η αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων

τότε η σχέση 2.1.2.2.16 γίνεται:

$$\begin{aligned} \vec{J}_c &= \vec{J}_{p,drift} + \vec{J}_{n,drift} + \vec{J}_{p,diff} + \vec{J}_{n,diff} \\ &= \sigma_p \vec{E} + \sigma_n \vec{E} - qD_p \frac{dp}{dx} + qD_n \frac{dn}{dx} \\ &= q\mu_p p \vec{E} + q\mu_n n \vec{E} - qD_p \frac{dp}{dx} + qD_n \frac{dn}{dx} \end{aligned} \quad (2.1.3.0.28)$$

Παρατηρεί κανείς ότι υπάρχουν δύο κινητικότητες και δύο αγωγιμότητες, μία για κάθε τύπο φορέων.

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις 2.1.3.0.24 και 2.1.3.0.28 στην 2.1.3.0.23 προκύπτει (εξετάζονται οι οπές σε ημιαγωγό τύπου n και οι ανεξάρτητες πηγές φορτίου και ρεύματος

θεωρούνται μηδενικές):

$$\begin{aligned}
& -\frac{\partial(\rho_i + \rho_f)}{\partial t} + (G - R)q = \vec{\nabla} \cdot (\vec{J}_i + \vec{J}_c) \quad (2.1.3.0.29) \\
& \Rightarrow -\frac{\partial\rho_f}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \mathcal{J}_c - (G - R)q \\
& \Leftrightarrow -q \frac{\partial p_n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (p_n \mu_p \mathcal{E}) + \frac{\partial}{\partial x} (-q D_p \frac{dp}{dx}) - (G_p - R_p)q \\
& \Leftrightarrow -q \frac{\partial p_n}{\partial t} = q \mu_p \mathcal{E} \frac{\partial p_n}{\partial x} + q \mu_p p_n \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} - q D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} - (G_p - R_p)q \\
& \Leftrightarrow \frac{\partial p_n}{\partial t} = -\mu_p \mathcal{E} \frac{\partial p_n}{\partial x} - \mu_p p_n \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} + D_p \frac{d^2 p_n}{dx^2} + G_p - \frac{p_n - p_{no}}{\tau_p}
\end{aligned}$$

και αντιστοίχως για τα ηλεκτρόνια σε ημιαγωγό τύπου p:

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \mu_n \mathcal{E} \frac{\partial n_p}{\partial x} + \mu_n n_p \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x} + D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2} + G_n - \frac{n_p - n_{po}}{\tau_n} \quad (2.1.3.0.30)$$

όπου:

τ_p : ο χρόνος ζωής των οπών

τ_n : ο χρόνος ζωής των ηλεκτρονίων

ο δείκτης "p" υποδηλώνει ότι ο ημιαγωγός είναι τύπου p

ο δείκτης "n" υποδηλώνει ότι ο ημιαγωγός είναι τύπου n

ο δείκτης "o" υποδηλώνει συγκεντρώσεις σε θερμική ισορροπία

2.2 Δίοδος MOS

Η δίοδος MOS είναι μια διάταξη μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού που αποτέλεσε τη βάση των σύγχρονων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Ο ακροδέκτης του ημιαγωγού (γνωστό και ως "υπόστρωμα") είναι συνήθως γειωμένος. Οι όποιες τάσεις εφαρμόζονται στον ακροδέκτη του μετάλλου (γνωστό και ως "πύλη"). Για την μαθηματική και φυσική περιγραφή της χρησιμοποιούνται δύο μοντέλα: η ιδανική δίοδος MOS και η πραγματική δίοδος MOS.

Στο Σχήμα 2.2 απεικονίζεται μία δίοδος MOS. Οι διαστάσεις της ορίζονται ως εξής:

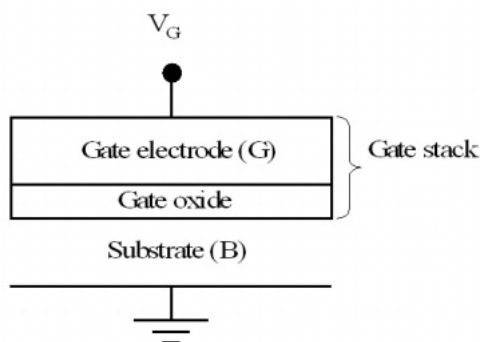
L: το μήκος της διόδου MOS

W: το πλάτος της διόδου MOS

x: το "πάχος" ή "βάθος" της διόδου MOS.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το σημείο μηδενικού πάχους τις περισσότερες φορές δεν συμπίπτει με το σημείο του χώρου στο οποίο μηδενίζονται οι άλλες δύο διαστάσεις (ώστε να σχηματίζεται μία ενιαία "αρχή των αξόνων") αλλά συνήθως ορίζεται αυθαίρετα από κάποιο σημείο που ενδιαφέρει. Αυτό το σημείο είναι συνήθως η διεπιφάνεια οξειδίου-ημιαγωγού.

Οι διαστάσεις W και L χρησιμοποιούνται σπανίως σε τύπους ως αντικαθιστώμενα μεγέθη. Συνήθως η χρησιμότητά τους είναι να πολλαπλασιάζονται μεταξύ τους, δίνοντας την επιφάνεια της διόδου MOS, η οποία μετά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των διαφόρων μεγεθών ανα επιφάνεια. Γι'αυτό πολλές φορές χρησιμοποιούνται μονοδιάστατες διαφορικές εξισώσεις, παρ'ολο που οι μελετούμενες διατάξεις είναι τρισδιάστατες.



Σχήμα 2.2: Δίοδος MOS

2.2.1 Ιδανική δίοδος MOS

Μία δίοδος MOS θεωρείται ιδανική όταν ικανοποιεί τα εξής κριτήρια:

1. Για μηδενική εφαρμοζόμενη τάση στην πύλη ($V_G=0$) η διαφορά δυναμικού ($q\phi_{ms}$) μεταξύ του έργου εξόδου του μετάλλου ($q\phi_m$) και του έργου εξόδου του ημιαγωγού ($q\phi_s$) είναι μηδενική. Σύμφωνα με το Σχήμα 2.3 αυτό σημαίνει ότι:

$$q\phi_{ms} \equiv q\phi_m - q\phi_s = 0 \quad (2.2.1.0.31)$$

Με άλλα λόγια όταν $V_G = 0$ οι ενεργειακές ζώνες είναι επίπεδες (flat-band condition).

2. Δεν υπάρχουν παγιδευμένα φορτία στο εσωτερικό του οξειδίου.
3. Δεν υπάρχουν ενεργειακές καταστάσεις στη διεπιφάνεια SiO_2/Si . Με άλλα λόγια, η αντίσταση του οξειδίου είναι άπειρη και κατά συνέπεια το ρεύμα πύλης είναι μηδενικό ($I_G = 0$).

Σε μία ιδανική δίοδο MOS το ρεύμα πύλης είναι μηδενικό για όλες τις τιμές της εφαρμοζόμενης τάσης στην πύλη. Κατά συνέπεια η στάθμη Fermi στον ημιαγωγό θα παραμείνει σταθερή[20].

Οι πιθανές καταστάσεις μίας ιδανικής διόδου MOS είναι οι ακόλουθες:

1. Κατάσταση μηδενικής πόλωσης ($V_G = 0$)

Το ενεργειακό διάγραμμα μίας ιδανικής διόδου MOS υπο μηδενική πόλωση φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Ο ημιαγωγός μπορεί να είναι τύπου p ή τύπου n. Λόγω του πρώτου κριτηρίου της ιδανικής διόδου ισχύει ότι:

$$q\phi_{ms} = q\phi_m - q\phi_s = q\phi_m - \left(q\chi + \frac{E_g}{2} + q\psi_{Bp}\right) = 0 \quad (2.2.1.0.32)$$

για ημιαγωγούς τύπου p (δηλαδή NMOS) και

$$q\phi_{ms} = q\phi_m - q\phi_s = q\phi_m - (q\chi + \frac{E_g}{2} - q\psi_{Bn}) = 0 \quad (2.2.1.0.33)$$

για ημιαγωγούς τύπου n (δηλαδή PMOS), όπου:

$q\chi$: η ηλεκτροσυγγένεια του ημιαγωγού

E_g : το ενεργειακό χάσμα

E_o : η ενέργεια στο επίπεδο του κενού και

$q\psi_B$: η ενεργειακή απόσταση μεταξύ της στάθμης Fermi (E_F) και της στάθμης Fermi του ενδογενούς ημιαγωγού στο εσωτερικό του και όχι στην διεπιφάνεια με το οξείδιο ($E_{i,bulk}$). Δηλαδή ισχύει:

$$-q\psi_{Bp} = E_F - E_{i,bulk} \quad (2.2.1.0.34)$$

$$q\psi_{Bn} = E_F - E_{i,bulk} \quad (2.2.1.0.35)$$

με:

$$\psi_{Bp} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (2.2.1.0.36)$$

$$\psi_{Bn} = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} \quad (2.2.1.0.37)$$

όπου

n_i : η συγκέντρωση φορέων στον ενδογενή ημιαγωγό. Οι φορείς αυτοί μπορεί να είναι είτε οπές είτε ηλεκτρόνια, καθώς στον ενδογενή ημιαγωγό ο αριθμός των οπών είναι ίσος με αυτόν των ηλεκτρονίων.

Ο όρος $V_t = \frac{kT}{q} = 0.025V$ είναι γνωστός ως θερμοκή τάση.

Το σημείο αναφοράς του δυναμικού στην δίοδο MOS είναι η ενεργειακή στάθμη $E_{i,bulk}$.

Για υπόστρωμα τύπου p ισχύει $\psi_{Bp} > 0$, ενώ για υπόστρωμα τύπου n ισχύει $\psi_{Bn} < 0$

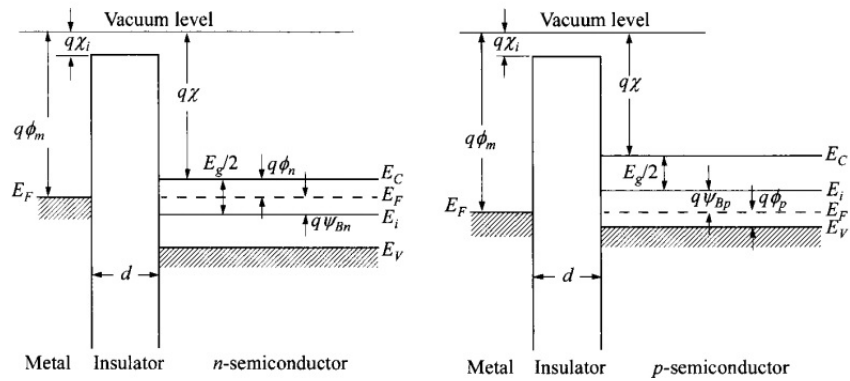
Αρκετές φορές, αντί των εξισώσεων 2.2.1.0.36 και 2.2.1.0.37 χρησιμοποιείται η παρακάτω γενική εξίσωση:

$$\psi_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_B}{n_i} \quad (2.2.1.0.38)$$

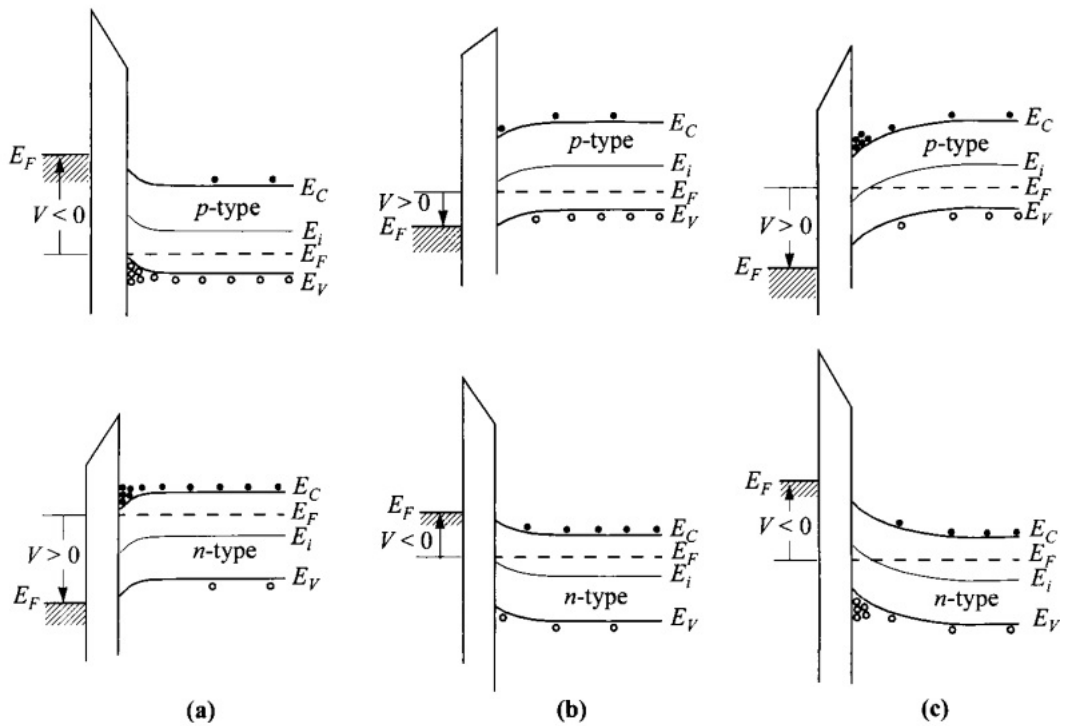
όπου

$$N_B = |N_A - N_D| \quad (2.2.1.0.39)$$

N_B : η συνολική συγκέντρωση αποδεκτών ή δοτών



Σχήμα 2.3: Ιδανική δίοδος MOS χωρίς πόλωση



Σχήμα 2.4: Διαγράμματα ενεργειακών ζωνών δίοδου MOS

2. Κατάσταση πόλωσης ($V_G \neq 0$)

Εαν εφαρμοστεί DC τάση στην πύλη τότε η τάση αυτή κατανέμεται στο οξειδίο και στον ημιαγωγό (Εξίσωση 2.1.1.6), εφόσον τα δύο αυτά στρώματα είναι κυκλωματικά συνδεδεμένα εν σειρά. Ταυτόχρονα όμως ισχύει $I_G = 0$, όπως προαναφέρθηκε, λόγω της άπειρης αντίστασης του οξειδίου. Κατά συνέπεια οι ενεργειακές ζώνες E_V , E_C , E_i θα παρουσιάσουν μια καμπυλότητα στην διεπιφάνεια SiO_2/Si και η συνθήκη επίπεδης ζώνης θα πάψει να ισχύει. Στην περίπτωση αυτή η δίοδος MOS μπορεί να βρεθεί σε τέσσερις πιθανές καταστάσεις (Σχήμα 2.3): συσσώρευση, απογύμνωση, αντιστροφή και ισχυρή αντιστροφή. Εξαιτίας της καμπυλότητας των ενεργειακών ζωνών, θα αλλάξει και η διαφορά δυναμικού στην διεπιφάνεια, η οποία πλέον πρέπει με όρους συμβολισμού να διαφοροποιηθεί από την διαφορά δυναμικού στο εσωτερικό του ημιαγωγού. Ορίζεται επομένως:

E_i : η στάθμη Fermi του ενδογενούς ημιαγωγού στην διεπιφάνεια με το οξειδίο

$q\psi_s$: η ενεργειακή απόσταση μεταξύ της στάθμης $E_{i,bulk}$ και της E_i . Το ψ_s ονομάζεται επιφανειακό δυναμικό και είναι το δυναμικό στην διεπιφάνεια SiO_2/Si .

Παρακάτω εξετάζεται συνοπτικά μία δίοδος MOS με ημιαγωγό τύπου p υπό πόλωση. Η αναφορά του δυναμικού εξακολουθεί να είναι η $E_{i,bulk}$.

- $\psi_s < 0 \Leftrightarrow V_G < V_{FB} = 0 \Leftrightarrow$ συσσώρευση φορέων πλειονότητας (οπών για ημιαγωγό τύπου p) στην διεπιφάνεια λόγω έλξης από την τάση: Ισχύει $|Q_M|=Q_s$, καθώς το αρνητικό φορτίο ανα επιφάνεια στο μέταλλο είναι ίσο κατά απόλυτη τιμή με το θετικό φορτίο ανα επιφάνεια στον ημιαγωγό.
- $\psi_s = 0 \Leftrightarrow V_G = V_{FB} = 0 \Leftrightarrow$ συνθήκη επίπεδων ζωνών: Στην ιδανική δίοδο MOS δεν χρειάζεται να εφαρμοστεί κάποια τάση στην πύλη ώστε οι ενεργειακές ζώνες να είναι επίπεδες.
- $\psi_{Bp} > \psi_s > 0 \Leftrightarrow V_G > V_{FB} = 0 \Leftrightarrow E_i > E_F \Leftrightarrow$ κατάσταση απογύμνωσης οπών: Η θετική τάση απωθεί τους φορείς πλειονότητας από το κομμάτι του ημιαγωγού που βρίσκεται κοντά στη διεπιφάνεια.
- $\psi_{Bp} = \psi_s \Leftrightarrow V_G > V_{FB} = 0 \Leftrightarrow E_i = E_F$: η απογύμνωση είναι τόσο έντονη ώστε ο ημιαγωγός στην διεπιφάνεια είναι πλέον ενδογενής, δηλαδή περιέχει ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων και οπών. Ισχύει $Q_M = |Q_s| = |Q_{sc}| = -qN_Ax_{sc}$, όπου x_{sc} είναι το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης.
- $\psi_s > \psi_{Bp} \Leftrightarrow V_G \gg V_{FB} = 0 \Leftrightarrow E_i < E_F \Leftrightarrow$ ασθενής αντιστροφή: Τα ηλεκτρόνια (φορείς μειονότητας) πλέον είναι περισσότερα από τις οπές και η επιφάνεια αντιστρέφεται.
- $\psi_s \geq 2\psi_{Bp} \Leftrightarrow V_G \gg V_{FB} = 0$: η ισχυρή αντιστροφή συμβαίνει όταν η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων κοντά στη διεπιφάνεια ισούται με την νόθευση του υποστρώματος. Από αυτό το σημείο και έπειτα το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης φτάνει σε μια μέγιστη τιμή και το επιπλέον αρνητικό φορτίο (Q_{inv}) σχηματίζει

ένα πολύ λεπτό στρώμα κοντά στη διεπιφάνεια με το οξειδίο το οποίο είναι αντίθετου τύπου από το υπόστρωμα, το λεγόμενο "κανάλι". Η τάση πύλης για την οποία συμβαίνει ο σχηματισμός του καναλιού ($\psi_s = 2\psi_B, Q_{inv} = 0, x_{sc} = x_{sc,max}$) λέγεται τάση κατωφλιού (V_T). Ισχύει:

$$Q_M = |Q_s| = |Q_{inv}| + |Q_{sc}| = |Q_{inv}| - qN_A x_{sc,max} = |Q_{inv}| - \sqrt{2q\epsilon_s N_A (2\psi_B)} \quad (2.2.1.0.40)$$

Υπενθυμίζεται ότι η καμπυλότητα των ζωνών είναι το κριτήριο για να καταλάβει κανείς σε ποια κατάσταση βρίσκεται η δίοδος. Η "κατάσταση αναφοράς" για την καμπυλότητα είναι η κατάσταση επίπεδης ζώνης. Η σύγκριση, επομένως, της τάσης πύλης με το μηδέν γίνεται επειδή στην ιδανική δίοδο MOS ισχύει ότι $V_{FB} = 0$. Στην πραγματική δίοδο MOS η παραπάνω ανάλυση θα παραμείνει ίδια με την διαφορά ότι η τάση πύλης θα συγκρίνεται με την V_{FB} , όποια τιμή και αν έχει αυτή.

Ο τύπος για την μέγιστη τιμή του πλάτους της περιοχής απογύμνωσης είναι [20]:

$$x_{sc,max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(2\psi_{Bp})}{qN_A}} = 2\sqrt{\frac{\epsilon_s kT \ln(\frac{N_A}{n_i})}{q^2 N_A}} \quad (2.2.1.0.41)$$

Η χαρακτηριστική C-V της ιδανικής διόδου MOS μπορεί να εξαχθεί ως εξής: ισχύει ότι

$$V_G = V_{FB} + V_{ox} + \psi_s = V_{ox} + \psi_s \quad (2.2.1.0.42)$$

όπου από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία:

$$V_{ox} = \mathcal{E}_{ox} x_{ox} = \frac{|Q_M| x_{ox}}{\epsilon_{ox}} = \frac{|Q_s| x_{ox}}{\epsilon_{ox}} = \frac{|Q_s|}{C_{ox}} = \frac{|Q_{inv}| + |Q_{sc}|}{C_{ox}} \quad (2.2.1.0.43)$$

V_{ox} : η πτώση τάσης στο οξειδίο

\mathcal{E}_{ox} : το ηλεκτρικό πεδίο στο οξειδίο

Q_{ox} : το αποθηκευμένο φορτίο ανα επιφάνεια στο οξειδίο

Q_{sc} : το φορτίο ανα επιφάνεια στην περιοχή απογύμνωσης

x_{ox} : το πάχος του οξειδίου

ϵ_s : η διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού

ϵ_{ox} : η διηλεκτρική σταθερά του οξειδίου και

C_{ox} : η χωρητικότητα του οξειδίου ανα επιφάνεια που υπολογίζεται από τον τύπο:

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{x_{ox}} \quad (2.2.1.0.44)$$

Η χωρητικότητα απογύμνωσης ανα επιφάνεια C_j είναι:

$$C_j = \begin{cases} \frac{\epsilon_s}{L_D} & \text{αν } V_G \geq V_{FB} = 0, \\ \frac{\epsilon_s}{x_{sc}} & \text{αν } V_G < V_{FB} = 0. \end{cases} \quad (2.2.1.0.45)$$

όπου L_D είναι το μήκος Debye [21] το οποίο ορίζεται ως εξής:

$$L_D = \sqrt{\frac{kT\epsilon_s}{NAq^2}} \quad (2.2.1.0.46)$$

Η συνολική χωρητικότητα ανα επιφάνεια της ιδανικής διόδου MOS είναι

$$C = \frac{C_{ox}C_j}{C_{ox} + C_j} \quad (2.2.1.0.47)$$

καθώς οι δύο αυτές χωρητικότητες είναι συνδεδεμένες εν σειρά.

Τελικά, απαλοίφοντας το x_{sc} , η προηγούμενη σχέση γίνεται:

$$\frac{C}{C_{ox}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2\epsilon_{ox}^2 V_G}{qNA\epsilon_s x_{ox}^2}}} \quad (2.2.1.0.48)$$

Στη συνέχεια η εξίσωση 2.2.1.0.48 εξετάζεται για τις διάφορες καταστάσεις πόλωσης.

1. Κατάσταση συσσώρευσης: στην κατάσταση αυτή δεν υπάρχει περιοχή απογύμνωσης και έτσι η συνολική χωρητικότητα θα ισούται περίπου με την C_{ox} . Από τις εξισώσεις 2.2.1.0.47, 2.2.1.0.44 και 2.2.1.0.45 για $V_G > V_{FB} = 0$ προκύπτει ότι

$$C = \frac{C_{ox}C_j}{C_{ox} + C_j} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_s}{\epsilon_s x_{ox} + \epsilon_{ox}L_D} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_s}{\epsilon_s x_{ox} + \epsilon_{ox}\sqrt{\frac{kT\epsilon_s}{NAq^2}}} \simeq C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{x_{ox}} \quad (2.2.1.0.49)$$

2. Κατάσταση επίπεδης ζώνης: από τις εξισώσεις 2.2.1.0.47, 2.2.1.0.44 και 2.2.1.0.45 για $V_G = V_{FB} = 0$ προκύπτει ότι

$$C_{FB} = \frac{C_{ox}C_j}{C_{ox} + C_j} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_s}{\epsilon_s x_{ox} + \epsilon_{ox}L_D} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_s}{\epsilon_s x_{ox} + \epsilon_{ox}\sqrt{\frac{kT\epsilon_s}{NAq^2}}} \quad (2.2.1.0.50)$$

όπου C_{FB} η συνολική χωρητικότητα ανα επιφάνεια στην κατάσταση επίπεδης ζώνης.

3. Κατάσταση απογύμνωσης: από τις εξισώσεις 2.2.1.0.47, 2.2.1.0.44 και 2.2.1.0.45 για $V_G < V_{FB} = 0$ προκύπτει ότι

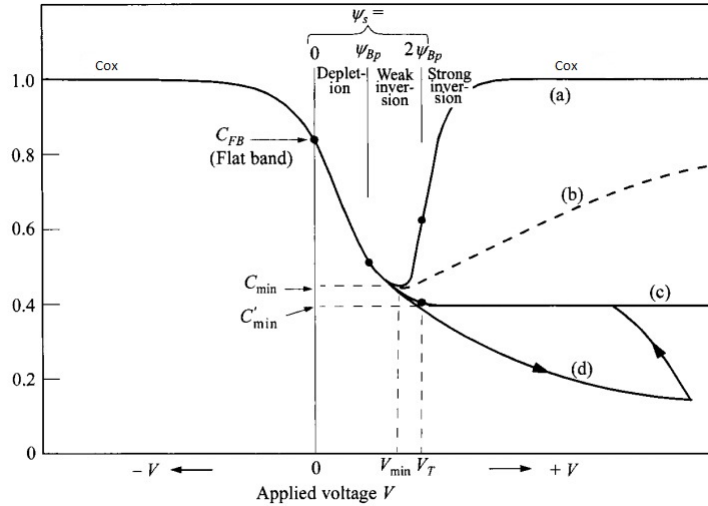
$$C = \frac{C_{ox}C_j}{C_{ox} + C_j} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_s}{\epsilon_s x_{ox} + \epsilon_{ox}x_{sc}} = \sqrt{\frac{1}{C_{ox}^2} + \frac{2V_G}{qNA\epsilon_s}} \quad (2.2.1.0.51)$$

4. Κατάσταση αντιστροφής: με παρόμοιο τρόπο προκύπτει ότι

$$C = \frac{C_{ox}C_j}{C_{ox} + C_j} = \frac{\epsilon_{ox}\epsilon_s}{\epsilon_s x_{ox} + \epsilon_{ox}x_{sc,max}} \quad (2.2.1.0.52)$$

και η τάση κατωφλιού από την εξίσωση 2.2.1.0.42 για $V_{FB} = 0$:

$$\begin{aligned} V_T &= V_{FB} + \frac{-Q_{sc}}{C_{ox}} + \psi_s(inv) = \frac{-Q_{sc}}{C_{ox}} + \psi_s(inv) \\ &= \frac{qNAx_{sc,max}}{C_{ox}} + 2\psi_{Bp} \simeq \frac{\sqrt{2\epsilon_s qNA(2\psi_{Bp})}}{C_{ox}} + 2\psi_{Bp} \end{aligned} \quad (2.2.1.0.53)$$



Σχήμα 2.5: Χαρακτηριστική C-V ιδανικής διόδου MOS

Για υπόστρωμα τύπου n αντικαθίσταται το N_A από το $-N_D$ και γίνονται όλες οι συνεπαγόμενες αλλαγές προσήμων, εκτός των περιπτώσεων όπου η αντικατάσταση γίνεται εντός τετραγωνικής ρίζας, οπότε χρησιμοποιείται η απόλυτη τιμή. Έτσι, οι εξισώσεις 2.2.1.0.41 και 2.2.1.0.53 γράφονται ως εξής:

$$x_{sc,max} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(2|\psi_{Bn}|)}{qN_D}} = 2\sqrt{\frac{\epsilon_s kT \ln(\frac{N_D}{n_i})}{q^2 N_D}} \quad (2.2.1.0.54)$$

$$V_T = -\frac{qN_D x_{sc,max}}{C_{ox}} - 2|\psi_{Bn}| \simeq -\frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_D (2|\psi_{Bn}|)}}{C_{ox}} - 2|\psi_{Bn}| \quad (2.2.1.0.55)$$

Η κανονικοποιημένη χαρακτηριστική $\frac{C}{C_{ox}} - V_G$ παρατίθεται στο Σχήμα 2.5 για χαμηλές (a), μεσαίες (b) και υψηλές (c),(d) συχνότητες. Από την χαρακτηριστική αυτή παρατηρείται μία διαφοροποίηση στην περιοχή της αντιστροφής για AC τάσεις πύλης. Όταν η συχνότητα της εφοροζόμενης τάσης είναι χαμηλή, οι ρυθμοί δημιουργίας και επανασύνδεσης φορέων μπορούν να συμβαδίσουν με την συχνότητα λειτουργίας και επομένως η συνολική χωρητικότητα πλησιάζει την C_{ox} . Όταν όμως η συχνότητα της τάσης πύλης είναι υψηλή τότε αυτό δεν μπορεί να γίνει με αποτέλεσμα η συνολική χωρητικότητα να πέφτει δραματικά.

2.2.2 Πραγματική δίοδος MOS

Εαν τα τρία κριτήρια της ιδανικής διόδου MOS δεν ικανοποιούνται τότε η δίοδος λέγεται πραγματική. Κατ'αντιστοιχία με τα τρία κριτήρια της ιδανικής διόδου MOS ισχύει ότι:

1. Διέρχεται μη μηδενικό ρεύμα από την πύλη με μηχανισμούς φαινομένου σήραγγος ή έγχυσης.

2. Για μηδενική εφαρμοζόμενη τάση στην πύλη ($V_G=0$) η διαφορά δυναμικού μεταξύ του έργου εξόδου του μετάλλου ($q\phi_m$) και του έργου εξόδου του ημιαγωγού ($q\phi_s$) είναι μη μηδενική. Δηλαδή:

$$q\phi_{ms} \equiv q\phi_m - q\phi_s \neq 0 \quad (2.2.2.0.56)$$

3. Υπάρχουν αποθηκευμένα φορτία εντός του οξειδίου και ενεργειακές καταστάσεις στη διεπιφάνεια SiO_2/Si . Τα φορτία αυτά είναι τεσσάρων ειδών Q_f , Q_m , Q_{it} και Q_{ot} . Η μονάδα μέτρησης των φορτίων αυτών είναι είτε $\frac{\text{Coulomb}}{\text{cm}^{-2}}$, είτε cm^{-2} . Στην δεύτερη περίπτωση τα φορτία έχουν διαφευγεί με την απόλυτη τιμή του φορτίου του ηλεκτρονίου που είναι $q \simeq 1.6 \cdot 10^{-19}$:

Ακίνητο φορτίο ανα επιφάνεια εντός του οξειδίου (Q_f): Πρόκειται για φορτίο επιφανειακής κατανομής, παγιδευμένο εντός του οξειδίου σε απόσταση συνήθως $3nm$ από την διεπιφάνεια. Σε κάποιες όμως περιπτώσεις βρίσκεται ακριβώς πάνω στην διεπιφάνεια, οπότε και συμβολίζεται ως Q_{ss} . Αυτό το φορτίο είναι ακίνητο και δεν μπορεί να απομακρυνθεί με την εφαρμογή κάποιας τάσης. Γενικά το Q_f είναι θετικό φορτίο και εξαρτάται από τις διαδικασίες οξείδωσης και ανόπτησης αλλά και από τον προσανατολισμό του πυριτίου. Η επικρατούσα εξήγηση είναι ότι οφείλεται σε ιόντα που εισχωρούν στο οξείδιο κατά την ανάπτυξη (growth) ή την εναπόθεση (deposition), όταν όμως βρίσκεται στην διεπιφάνεια μπορεί και να οφείλεται στους μη συμπληρωμένους δεσμούς μεταξύ των ατόμων του πυριτίου. Η ύπαρξή του προκαλεί παράλληλη μετατόπιση της C-V χαρακτηριστικής προς την αντίθετη κατεύθυνση από αυτήν που θα προκαλούσε μία τάση προγραμματισμού με πρόσημο ίδιο με του Q_f . Το φορτίο αυτό είναι της τάξης του 10^{10}cm^{-2} .

Ευκίνητο φορτίο ανα επιφάνεια εντός του οξειδίου (Q_m): Πρόκειται για ιόντα τα οποία κινούνται εντός του οξειδίου υπο συνθήκες αυξημένης θερμοκρασίας ($\simeq 300^\circ\text{C}$) και ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου. Το φορτίο αυτό ανιχνεύεται από την υστέρηση που παρατηρείται στην χαρακτηριστική C-V με την τεχνική μέτρησης "sweep", όταν δηλαδή η τάση πύλης "σαρώνεται" πάνω-κάτω με ένα σταθερό βήμα. Προκαλούν και αυτά παράλληλη μετατόπιση της C-V αλλά με τον ακριβώς αντίθετο τρόπο από το φορτίο Q_f [27]. Τα ιόντα νατρίου είναι μία συνηθισμένη αιτία του φορτίου αυτού. Για την αποφυγή ύπαρξης τέτοιων φορτίων η βιομηχανία ελέγχει πολύ αυστηρά την καθαρότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών. Το φορτίο αυτό είναι της τάξης του 10^9cm^{-2} , δηλαδή πολύ μικρό.

Παγιδευμένο φορτίο ανα επιφάνεια εντός του οξειδίου (Q_{ot}): Πρόκειται για παγίδες που οφείλονται σε κατασκευαστικά ελαττώματα του οξειδίου και φορτίζονται με την παγίδευση οπών ή ηλεκτρονίων. Ελαχιστοποιούνται με την διαδικασία της ανόπτησης. Προκαλούν παράλληλη μετατόπιση της C-V όπως ακριβώς το φορτίο Q_f . Οι σύγχρονες διαδικασίες παρασκευής των διατάξεων έχουν μειώσει δραματικά το φορτίο αυτό.

Φορτίο ανα επιφάνεια παγιδευμένο στη διεπιφάνεια (Q_{it}): Προκειται για φορτίο παγιδευμένο σε διεπιφανειακές παγίδες και συγκεκριμένα στο ενεργειακό διάκενο του πυριτίου το οποίο εξαρτάται από τις ιδιότητες και την χημική σύσταση της διεπιφάνειας. Η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων ανα επιφάνεια (D_{it}) εξαρτάται από τον προσανατολισμό του πυριτίου. Στον προσανατολισμό $\langle 100 \rangle$ η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων είναι μία τάξη μικρότερη από ότι στον προσανατολισμό $\langle 111 \rangle$. Τα φορτία αυτά προκαλούν μία αλλαγή κλίσης της χαρακτηριστικής C-V, κάνοντας τη μετάβαση από την αντιστροφή στην συσσώρευση πιο βαθμιαία. Το φορτίο αυτό είναι της τάξης του 10^{10}cm^{-2} .

4. Όταν $V_G = 0$ οι ενεργειακές ζώνες δεν είναι επίπεδες και πρέπει να εφαρμοστεί κάποια τάση στην πύλη ώστε να γίνουν. Αυτή η τάση είναι η τάση επίπεδης ζώνης V_{FB} . Σύμφωνα με τα παραπάνω, η τάση επίπεδης ζώνης διαμορφώνεται από δύο συνιστώσες: την διαφορά δυναμικού ϕ_{ms} και τα παγιδευμένα φορτία Q_f , Q_m , Q_{it} και Q_{ot} . Ισχύει επομένως (ανεξαρτήτως τύπου υποστρώματος):

$$\begin{aligned} V_{FB} &= \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_m + Q_{it} + Q_{ot}}{C_{ox}} & (2.2.2.0.57) \\ &= \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_{it}}{C_{ox}} - \frac{1}{C_{ox}} \int_0^{x_{ox}} \frac{x}{x_{ox}} \rho_m(x) dx - \frac{1}{C_{ox}} \int_0^{x_{ox}} \frac{x}{x_{ox}} \rho_{ot}(x) dx \end{aligned}$$

ρ_m : χωρική πυκνότητα φορτίου τύπου Q_m ανα επιφάνεια

ρ_{ot} : χωρική πυκνότητα φορτίου τύπου Q_{ot} ανα επιφάνεια

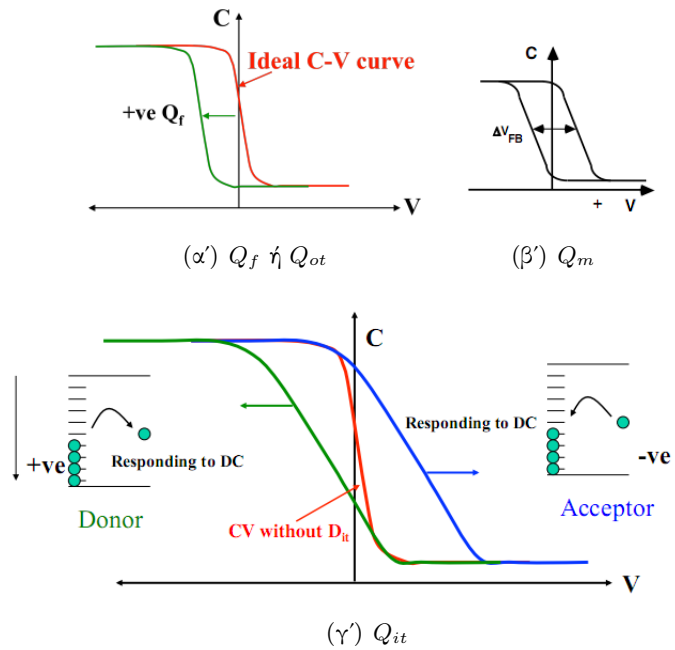
Και από την εξίσωση 2.2.1.0.42:

$$\begin{aligned} V_T &= V_{FB} + \frac{-Q_{sc}}{C_{ox}} + \psi_s(inv) & (2.2.2.0.58) \\ &= 2\psi_{Bp} + \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_m + Q_{it} + Q_{ot} + Q_{sc}}{C_{ox}} \\ &= 2\psi_{Bp} + \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_m + Q_{ot}}{C_{ox}} + \frac{qN_A x_{sc,max}}{C_{ox}} + \frac{q}{C_{ox}} \int_{E_F}^{E_F + 2q\psi_{Bp}} D_{it}(E) dE \\ &\simeq 2\psi_{Bp} + \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_m + Q_{ot}}{C_{ox}} + \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_A (2\psi_{Bp})}}{C_{ox}} \end{aligned}$$

Ομοίως, για υπόστρωμα τύπου n θα ισχύει:

$$V_T \simeq -2|\psi_{Bn}| + \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_m + Q_{ot}}{C_{ox}} - \frac{\sqrt{2\epsilon_s q N_D (2|\psi_{Bn}|)}}{C_{ox}} \quad (2.2.2.0.59)$$

Από τις εξισώσεις 2.2.2.0.57 και 2.2.2.0.58 προκύπτει ένα πολύ ενδιαφέρον συμπέρασμα: Μία τάση στην πύλη μπορεί να αλλάξει κάποιο από τα φορτία της διόδου MOS και αυτή η διαφορά θα γίνει αισθητή ως μία μετατόπιση της V_{FB} ή της V_T . Ορίζεται επομένως ως "προγραμματισμός" η αποθήκευση φορτίων στο οξειδίο μίας διόδου MOS και ως "διαγραφή" η απομάκρυνση των φορτίων αυτών. Για ευκολία γίνεται η υπόθεση ότι το μεταβαλλόμενο φορτίο είναι το Q_{ot} , αλλά θα μπορούσε να είναι και ένα εκ των Q_f , Q_m . Τα φορτία Q_{it} και Q_{sc} δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν καθώς το Q_{it} οφείλεται σε ατέλειες του υλικού και είναι ένα εντελώς



Σχήμα 2.6: Μετατόπιση της χαρακτηριστικής C-V λόγω των διαφόρων ειδών φορτίου

ανεπιθύμητο φορτίο και το Q_{sc} δεν μπορεί να αποθηκευτεί καθώς βρίσκεται στον ημιαγωγό και δεν περιβάλλεται από κάποιο διηλεκτρικό. Επομένως:

Στην κατάσταση προγραμματισμού θα ισχύει η εξίσωση 2.2.2.0.58.

Στην κατάσταση διαγραφής θα ισχύει η ίδια εξίσωση αλλά με $Q_{ot} = 0$:

$$V_T = 2\psi_{Bp} + \phi_{ms} - \frac{Q_f + Q_m + Q_{it} + Q_{sc}}{C_{ox}} \quad (2.2.2.0.60)$$

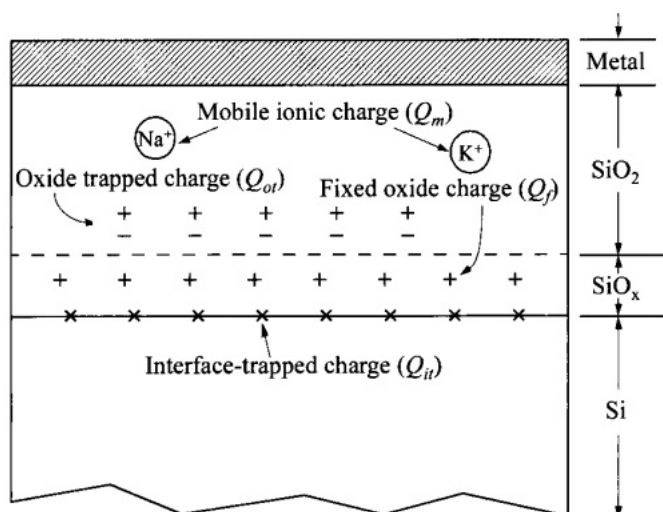
Επομένως από τις 2.2.1.0.42 και 2.2.2.0.60:

$$\Delta V_T = \Delta V_{FB} = \frac{-Q_{ot}}{C_{ox}} \simeq V_p \quad (2.2.2.0.61)$$

όπου η εφαρμοζόμενη τάση στην πύλη V_p ορίζεται πλέον ως τάση προγραμματισμού. Επομένως με την τάση πύλης (προγραμματισμού) είναι δυνατή η αποθήκευση και η απομάκρυνση φορτίων από το οξειδίο. Αυτή η απλή σχέση θεμελίωσε την έννοια της μη πτητικότητας και αποτέλεσε την βάση για την ανάπτυξη του πρώτου κυττάρου μνήμης το 1967.

2.2.3 Υπολογισμός του φορτίου Q_s

Κατά την μελέτη των ημιαγωγικών διατάξεων προκύπτει ένα μείζον πρόβλημα το οποίο είναι συχνό ζητούμενο στα προβλήματα της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας: ο προσδιορισμός όλων των μεγεθών που χαρακτηρίζουν την λειτουργία της διάταξης (δυναμικά, ηλεκτρικά πεδία, φορτία, ρεύματα, χωρητικότητες κλπ) σε ηλεκτροστατικές συνθήκες λειτουργίας. Με άλλα λόγια, απαιτείται μία ηλεκτροστατική ανάλυση της διάταξης. Κάποια από αυτά τα μεγέθη



Σχήμα 2.7: Παγιδευμένα φορτία διόδου MOS

προκύπτουν από τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό της διάταξης (Κεφάλαιο 7). Κάποια άλλα όμως πρέπει να υπολογιστούν.

Ανατρέχοντας κανείς στα κλασικά συγγράματα ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας θα θυμηθεί ότι μια διάταξη υπο μελέτη συνήθως χωρίζεται σε διάφορες υποπεριοχές στις οποίες οι ιδιότητες είναι κοινές. Για να λύσει κανείς το ηλεκτροστατικό πρόβλημα συνήθως αρχίζει να υπολογίζει μεγέθη από την υποπεριοχή για την οποία διαθέτει τις περισσότερες πληροφορίες και σιγά σιγά επεκτείνει τους υπολογισμούς του και στις υπόλοιπες. Η δίοδος MOS μπορεί να χωριστεί σε τρεις υποπεριοχές: μέταλλο, οξείδιο και ημιαγωγός. Η περιοχή που προσφέρεται για το ξεκίνημα των υπολογισμών είναι η περιοχή του ημιαγωγού, καθώς το ένα άκρο της είναι γειωμένο και το άλλο (η διεπιφάνεια) περιέχει φορτίο το οποίο μπορεί να προκύψει από τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό. Επιπλέον, η νόθευση N_B που έχει χρησιμοποιηθεί κατά την παρασκευή της διάταξης είναι γνωστό μέγεθος. Με αυτά τα δεδομένα μπορεί να εφαρμόσει κανείς την μονοδιάστατη εξίσωση Poisson και τον νόμο του Gauss ώστε να υπολογίσει το συνολικό φορτίο στον ημιαγωγό Q_s . Υπενθυμίζεται ότι $Q_s = Q_{inv} + Q_{sc}$, δηλαδή το υπολογιζόμενο φορτίο είναι το άθροισμα των φορτίων του καναλιού και της περιοχής απογύμνωσης, αλλά προφανώς τα φορτία αυτά αλλάζουν ανάλογα με την πόλωση και μπορεί να μηδενίζονται κιόλας.

Ο αναγνώστης πρέπει να έχει κάθε στιγμή υπόψη του ότι ισχύουν οι συνηθισμένες συμβάσεις που γίνονται στον τομέα των Υλικών και οι οποίες περιγράφονται στην αρχή του Κεφαλαίου 2. Ο υπολογισμός θα γίνει για ημιαγωγό τύπου p.

Εφαρμόζεται η μονοδιάστατη εξίσωση Poisson στον ημιαγωγό (χωρίς να γίνεται σε πρώτη φάση διάκριση μεταξύ του εσωτερικού και της διεπιφάνειας) η οποία έχει προκύψει από την μορφή εκείνη των εξισώσεων Maxwell που περιλαμβάνει μόνο τα \mathcal{E} , \mathcal{B} και κατά συνέπεια όπου υπάρχουν πηγές φορτίων και ρευμάτων πρέπει να συμπεριληφθούν και οι δεσμευμένες πηγές:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{\rho_s(x)}{\epsilon_s} \quad (2.2.3.0.62)$$

όπου:

ψ : δυναμικό κάποιου σημείου της διάταξης με δυναμικό αναφοράς αυτό της $E_{i,bulk}$

ρ_s : χωρική πυκνότητα φορτίου στον ημιαγωγό ανα επιφάνεια

η επιφάνεια με $x = 0$ είναι η διεπιφάνεια οξειδίου-ημιαγωγού, με τα x να αυξάνονται καθώς απομακρύνεται κανείς από την διεπιφάνεια και εισέρχεται στον ημιαγωγό. Αυτό είναι καθαρά μία σύμβαση. Στο Κεφάλαιο 3 τα x θα αυξάνονται κατά την αντίθετη φορά.

Ισχύει ότι:

$$\rho_s(x) = \rho_f(x) + \rho_b(x) = q(N_D - N_A + p_p - n_p) \quad (2.2.3.0.63)$$

όπου ο δείκτης p μπαίνει για να υποδηλώσει ότι το υπόστρωμα είναι τύπου p . Όπως προαναφέρθηκε, γίνεται η παραδοχή ότι το δυναμικό και το ηλεκτρικό πεδίο στα ενδότερα του υποστρώματος είναι μηδεν.

Έτσι λοιπόν, οι συγκεντρώσεις των φορέων p_p και n_p , λόγω των εξισώσεων 2.2.1.0.34 και 2.2.1.0.35 μπορούν να γραφούν ως εξής [20]:

$$p_p(x) = n_i e^{\frac{E_i(x) - E_F}{kT}} = n_i e^{\frac{q(\psi_{Bp} - \psi(x))}{kT}} = n_i e^{\frac{\psi_{Bp} - \psi(x)}{V_t}} \simeq N_A \quad (2.2.3.0.64)$$

$$n_p(x) = n_i e^{\frac{E_F - E_i(x)}{kT}} = n_i e^{\frac{q(\psi(x) - \psi_{Bp})}{kT}} = n_i e^{\frac{\psi(x) - \psi_{Bp}}{V_t}} = \frac{n_i^2}{p_p(x)} \quad (2.2.3.0.65)$$

Υπενθυμίζεται ότι τα E_i και ψ εξαρτώνται από το x λόγω της καμπυλότητας των ενεργειακών ζωνών. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο με την στάθμη Fermi. Το ψ_{Bp} θεωρητικά είναι ανεξάρτητο του x , καθώς οι στάθμες E_F και $E_{i,bulk}$ δεν παρουσιάζουν καμπυλότητα και όντως οι μέχρι τώρα υπολογισμοί έγιναν με βάση αυτήν την παραδοχή. Όμως, αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι ο αχροδέκτης του υποστρώματος στο κάτω άκρο της διάταξης είναι γειωμένος, αυτό σημαίνει ότι από κάποιο σημείο και μετά θα υπάρχει ουδετερότητα φορτίων. Γίνεται λοιπόν μία επιπλέον παραδοχή:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \psi_{Bp}(x) = 0 \Rightarrow \lim_{x \rightarrow \infty} \rho_s(x) = 0 \quad (2.2.3.0.66)$$

Για μεγάλα x επομένως, εξαιτίας του ορίου 2.2.3.0.66 και της εξίσωσης 2.2.3.0.63 ισχύει ότι:

$$\rho_s(x \rightarrow \infty) = 0 \Rightarrow N_D - N_A = n_{p0} - p_{p0} = -2n_i \sinh\left(\frac{\psi_{Bp}}{V_t}\right) \quad (2.2.3.0.67)$$

όπου το "0" στον δείκτη προστέθηκε για να καταδείξει ότι οι συγκεντρώσεις στα μεγάλα x αντιστοιχούν σε θερμική ισορροπία. Ο όρος "θερμική ισορροπία" σημαίνει πρακτικά "χωρίς την επιβολή τάσης στην πύλη". Εάν στην διάταξη επιβληθεί τάση στην πύλη τότε τα μεγέθη $p_p(x)$ και $n_p(x)$ θα μεταβληθούν, ενώ τα p_{p0} n_{p0} θα παραμείνουν αμετάβλητα καθώς βρίσκονται πολύ βαθιά μέσα στον ημιαγωγό. Τα μεγέθη $p_p(x)$ και $n_p(x)$ μπορούν να γραφούν ως συνάρτηση των p_{p0} και n_{p0} ως εξής [20], [21]:

$$p_p(x) = p_{po} e^{-\frac{q\psi(x)}{kT}} = p_{po} e^{-\frac{\psi(x)}{V_t}} \quad (2.2.3.0.68)$$

$$n_p(x) = n_{po} e^{\frac{q\psi(x)}{kT}} = n_{po} e^{\frac{\psi(x)}{V_t}} \quad (2.2.3.0.69)$$

Από τις εξισώσεις 2.2.3.0.62, 2.2.3.0.67, 2.2.3.0.68 και 2.2.3.0.69 ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\psi}{dx^2} &= -\frac{-q}{\epsilon_s} (n_{po} - p_{po} + p_p - n_p) \\ &= -\frac{q}{\epsilon_s} [p_{po}(e^{-\frac{\psi(x)}{V_t}} - 1) - n_{po}(e^{\frac{\psi(x)}{V_t}} - 1)] \\ &= -\frac{2qn_i}{\epsilon_s} [\sinh(\frac{\psi(x) - \psi_{Bp}}{V_t}) + \sinh(\frac{\psi_{Bp}}{V_t})] \end{aligned} \quad (2.2.3.0.70)$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της 2.2.3.0.70 με $2\frac{d\psi(x)}{dx}$ και ολοκληρώνοντας ως προς $\frac{d\psi(x)}{dx}$ με όρια 0 και $\frac{d\psi(x)}{dx}$ το ηλεκτρικό πεδίο εντός του ημιαγωγού, $\mathcal{E}_s(\psi) = -\frac{d\psi(x)}{dx}$, προκύπτει [21], [27]:

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_s(\psi) &= \text{sign}(\psi(x)) \sqrt{\frac{4qn_i V_t}{\epsilon_s} [\cosh(\frac{\psi(x) - \psi_{Bp}}{V_t}) + \frac{\psi(x)}{V_t} \sinh(\frac{\psi_{Bp}}{V_t}) - \cosh(\frac{\psi_{Bp}}{V_t})]} \\ &= \text{sign}(\psi(x)) \frac{\sqrt{2kT}}{qL_D} \sqrt{[e^{-\frac{\psi_{Bp}}{V_t}} + \frac{\psi_{Bp}}{V_t} - 1] + \frac{n_i^2}{N_A} [e^{\frac{\psi_{Bp}}{V_t}} - \frac{\psi_{Bp}}{V_t} - 1]} \end{aligned} \quad (2.2.3.0.71)$$

Όπου $\text{sign}(\psi(x))$ είναι η συνάρτηση που δίνει το πρόσημο του $\psi(x)$, δηλαδή:

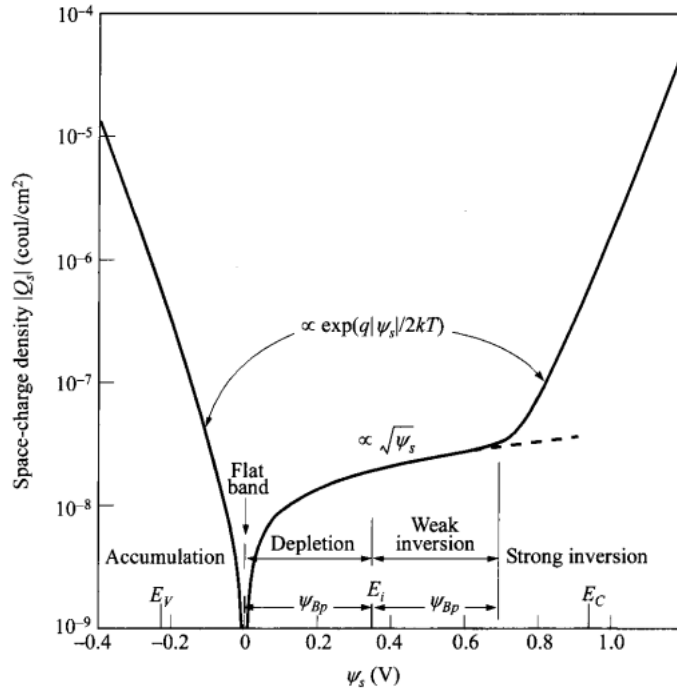
$$\text{sign}(\psi(x)) = \begin{cases} +1 & \text{αν } \psi(x) > 0, \\ 0 & \text{αν } \psi(x) = 0. \\ -1 & \text{αν } \psi(x) < 0. \end{cases} \quad (2.2.3.0.72)$$

Για να συσχετιστεί το ηλεκτρικό πεδίο με το φορτίο του υποστρώματος χρησιμοποιείται ο νόμος του Gauss στην περιοχή του υποστρώματος. Η ανάλυση θα γίνει στο πεδίο του χρόνου και ο ημιαγωγός θα θεωρηθεί κατά προσέγγιση απλό μέσο, ώστε να εφαρμοστεί η εξίσωση 2.1.2.2.14:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{D}}_s &= \rho_s(x) \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_s \mathcal{E}_s(x)) = \rho_s(x) \Leftrightarrow \int_0^x \frac{\partial}{\partial x} (\epsilon_s \mathcal{E}_s(x)) dx = \int_0^x \rho_s(x) dx \\ \Leftrightarrow \mathcal{E}_s(x) - \mathcal{E}_s(0) &= \frac{1}{\epsilon_s} \int_0^x \rho_s(x) dx \end{aligned} \quad (2.2.3.0.73)$$

Εαν υποτευθεί ότι από το σημείο $x = x_s$ γίνεται η μετάβαση στην περιοχή του ουδέτερου φορτίου και το ηλεκτρικό πεδίο μηδενίζεται, η εξίσωση 2.2.3.0.73 γίνεται:

$$\mathcal{E}_s(x_s) - \mathcal{E}_s(0) = \frac{Q_s}{\epsilon_s} \Rightarrow Q_s = -\mathcal{E}_s(0)\epsilon_s \quad (2.2.3.0.74)$$



Σχήμα 2.8: Φορτίο $|Q_s|$ συναρτήσει του ψ_s για $N_A = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Όμως, εξ' ορισμού το δυναμικό στην διεπιφάνεια είναι γνωστό ως επιφανειακό δυναμικό. Δηλαδή $\psi(0) \equiv \psi_s$. Άρα:

$$Q_s = -\epsilon_s \mathcal{E}_s(\psi_s) \quad (2.2.3.0.75)$$

όπου το $\mathcal{E}_s(\psi_s)$ υπολογίζεται από την εξίσωση 2.2.3.0.71. Παρατηρεί κανείς ότι τα πρόσημα κατά τον υπολογισμό του Q_s δεν έχουν τόσο μεγάλη σημασία. Εάν είχε υιοθετηθεί η σύμβαση ότι η διάσταση x αυξάνεται προς την κατεύθυνση του οξειδίου και του μετάλλου τότε τα όρια των ολοκληρωμάτων της εξίσωσης 2.2.3.0.73 θα ήταν ανάποδα και το πρόσημο $-$ δεν θα υπήρχε στην εξίσωση 2.2.3.0.75. Τα πρόσημα των διαφόρων μεγεθών πρέπει κάθε φορά να ελέγχονται με τη λογική, σύμφωνα με τις συμβάσεις που έχουν υιοθετηθεί για το κάθε μοντέλο. Στο Σχήμα 2.8 ([21]) απεικονίζεται η γραφική παράσταση της απόλυτης τιμής του φορτίου Q_s συναρτήσει του ψ_s για $N_A = 4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Παρατηρεί κανείς ότι για αρνητικά ψ_s το Q_s είναι θετικό και αντιστοιχεί στην περιοχή συσσώρευσης. Αυτό σημαίνει ότι στην εξίσωση 2.2.3.0.71 επικρατεί ο πρώτος προσθετέος. Αντίθετα, για θετικά ψ_s το Q_s είναι αρνητικό και αντιστοιχεί στις περιοχές απογύμνωσης και ασθενούς αντιστροφής. Αυτό σημαίνει ότι στην εξίσωση 2.2.3.0.71 επικρατεί ο δεύτερος προσθετέος. Στην περιοχή ισχυρής αντιστροφής επικρατεί ο τέταρτος προσθετέος.

Εαν αντί του SiO_2 χρησιμοποιηθεί άλλο οξειδίο τότε οι τύποι που προαναφέρθηκαν ισχύουν, με τη διαφορά ότι το καινούριο x_{ox} δεν θα αντικατασταθεί στις εξισώσεις από την πραγματική τιμή του, όπως γινόταν πριν, αλλά από την ισοδύναμη τιμή, δηλαδή την πραγματική τιμή πολλαπλασιασμένη με τον λόγο των διηλεκτρικών σταθερών [21]. Ισχύει δηλαδή:

$$x_{ox,insulator,equivalent} = x_{ox,insulator,real} \cdot \frac{\epsilon_{ox,\text{SiO}_2}}{\epsilon_{ox,insulator}} \quad (2.2.3.0.76)$$

2.3 Τρανζίστορ MOSFET

Γίνεται επομένως κατανοητό ότι η λειτουργία της διόδου MOS μπορεί να συνοψιστεί στο ότι η τάση πύλης ελέγχει την συμπεριφορά της περιοχής του υποστρώματος που βρίσκεται κοντά στη διεπιφάνεια. Μία επέκταση της διόδου MOS έγινε προσθέτοντας δύο επιπλέον νοθεύσεις στην διόδο MOS εκατέρωθεν του καναλιού (πηγή και υποδοχή) που οδήγησε στο λεγόμενο τρανζίστορ MOSFET. Πρόκειται για μία πηγή ρεύματος που ελέγχεται από τάση. Η τάση ελέγχου είναι η τάση της πύλης που ρυθμίζει τον σχηματισμό του καναλιού και το ελεγχόμενο ρεύμα είναι το ρεύμα που διέρχεται από το κανάλι, με δεδομένη την εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού μεταξύ πηγής και υποδοχής (V_D). Η πηγή συνήθως συνδέεται με το υπόστρωμα και γειώνεται. Οι χαρακτηριστικές I-V του τρανζίστορ MOSFET φαίνονται στο Σχήμα 2.10.

Ανάλογα με την εφαρμοζόμενη τάση στην πύλη η λειτουργία του τρανζίστορ MOSFET μπορεί να θεωρηθεί ότι βρίσκεται σε μία από τις παρακάτω καταστάσεις (ή "περιοχές"):

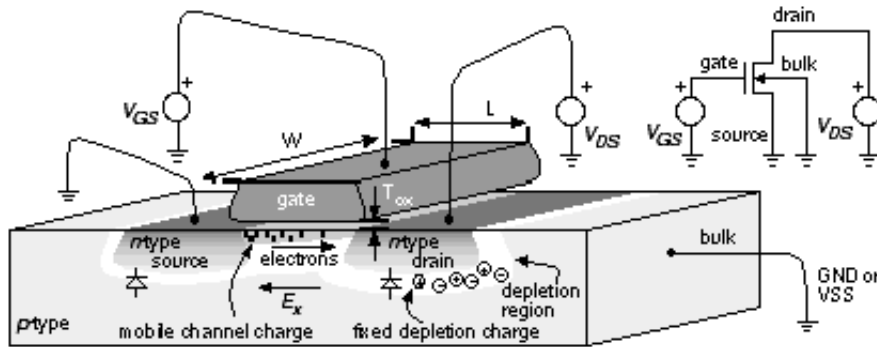
- $V_G < V_T \Leftrightarrow$ κατάσταση αποκοπής: Στην κατάσταση αυτή το κανάλι δεν είναι σχηματισμένο και επομένως δεν μπορεί να υπάρξει ροή ρεύματος, ανεξαρτήτως της τάσης V_D .
- $V_G < V_T$ και $\psi_s > \psi_{Bp} \Leftrightarrow$ περιοχή υποκατωφλιού: Εάν η διάταξη βρίσκεται στην ασθενή αντιστροφή τότε υπάρχει μία εκθετική εξάρτηση του I_D από την V_D . Δηλαδή:

$$I_D \sim e^{\frac{V_G - V_T}{V_t}} \quad (2.3.0.0.77)$$

- $V_G \geq V_T$ και $V_D < V_{D,sat} \Leftrightarrow$ γραμμική περιοχή ή τριόδος: Στην κατάσταση αυτή το κανάλι είναι σχηματισμένο και το ρεύμα I_D που το διαρρέει μεταβάλλεται γραμμικά με την τάση V_D σύμφωνα με την εξίσωση [20]:

$$I_D = \frac{W}{L} \mu_n C_{ox} (V_G - V_T) V_D \quad (2.3.0.0.78)$$

- $V_G \geq V_T$ και $V_D \geq V_{D,sat} \Leftrightarrow$ κορεσμός: Όταν η τάση V_D αυξηθεί πέρα από ένα ορισμένο σημείο τότε τα σημεία του καναλιού που βρίσκονται κοντά στην υποδοχή αρχίζουν να έχουν τάση $V_G - V_D < V_T$. Κατά συνέπεια το κανάλι αρχίζει να "σβήνει" σταδιακά, αρχίζοντας από την υποδοχή. Όμως το ρεύμα στην περιοχή εκείνη παραμένει σταθερό ως προς την V_D , φτάνοντας σε έναν κορεσμό. Αυτό λέγεται "στραγγαλισμός" του

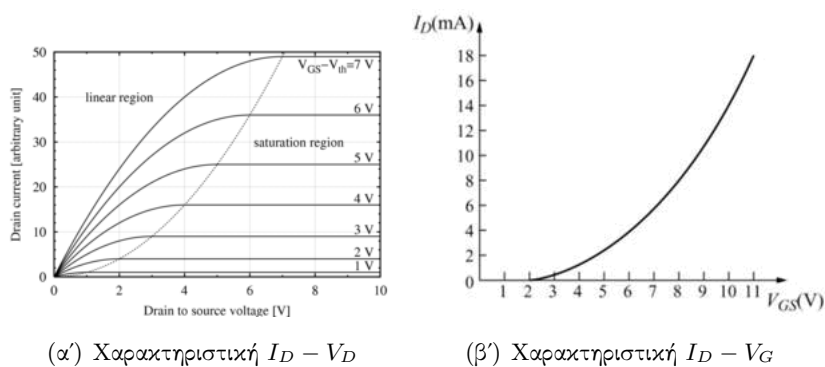


Σχήμα 2.9: Τρανζίστορ MOSFET

καναλιού. Η σχέση $I_D - V_D$ είναι η εξής [20]:

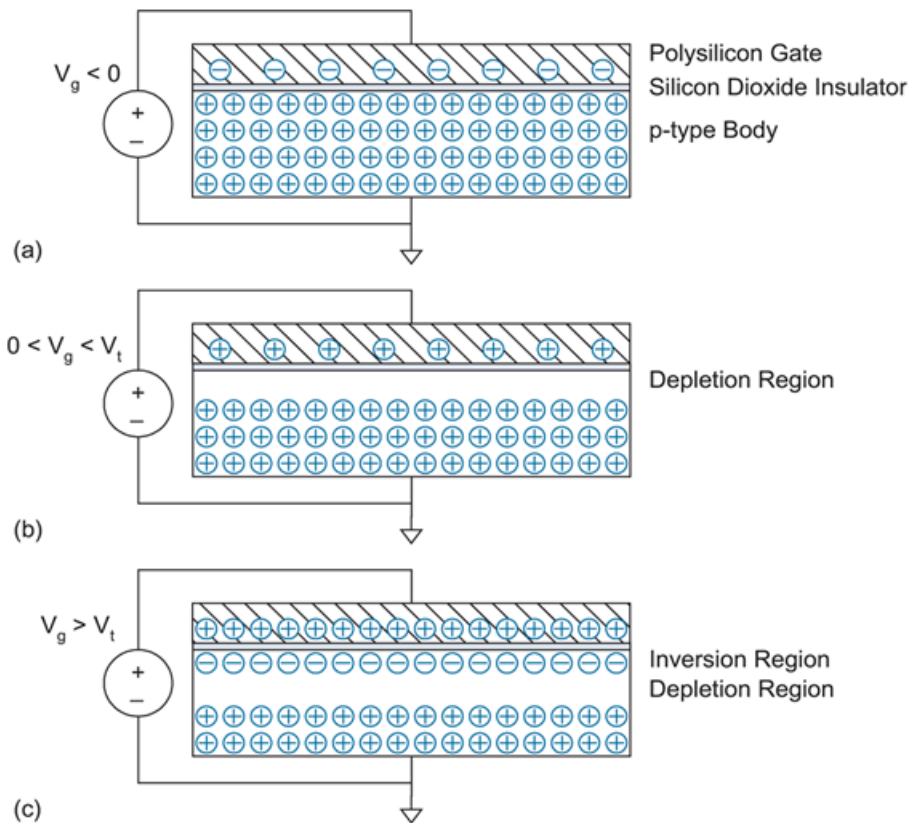
$$I_D = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} (V_G - V_T)^2 \quad (2.3.0.0.79)$$

Η απόδειξη των παραπάνω τύπων δεν παρατίθεται γιατί το τρανζίστορ MOSFET είναι ένα αντικείμενο που δεν βρίσκεται στις θεματικές ενότητες της παρούσας εργασίας. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να βρει μία εξαιρετική περιγραφή των MOSFET στην πηγή [20]. Τα τρανζίστορ MOSFET που συζητήθηκαν μέχρι τώρα ονομάζονται MOSFET πύκνωσης (enhancement) γιατί η τάση πύλης χρησιμοποιείται για να πυκνώσουν οι φορείς στην κορυφή του υποστρώματος και να σχηματιστεί το κανάλι. Υπάρχει μία άλλη κατηγορία τρανζίστορ MOSFET στα οποία το κανάλι είναι εκ κατασκευής σχηματισμένο πάνω στο υπόστρωμα. Αυτά λέγονται MOSFET απογύμνωσης (depletion) γιατί η τάση κατωφλιού είναι αρνητική με συνέπεια το κανάλι να είναι σχηματισμένο σε μηδενική πόλωση. Η εφαρμογή μίας αρνητικής τάσης πύλης μπορεί να εξαφανίσει-απογυμνώσει το κανάλι. Λαμβάνοντας υπ' όψη και το γεγονός ότι το υπόστρωμα μπορεί να είναι είτε τύπου p, είτε τύπου n, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν συνολικά τέσσερα διαφορετικά είδη τρανζίστορ MOSFET. Αυτά φαίνονται στο Σχήμα 2.11.

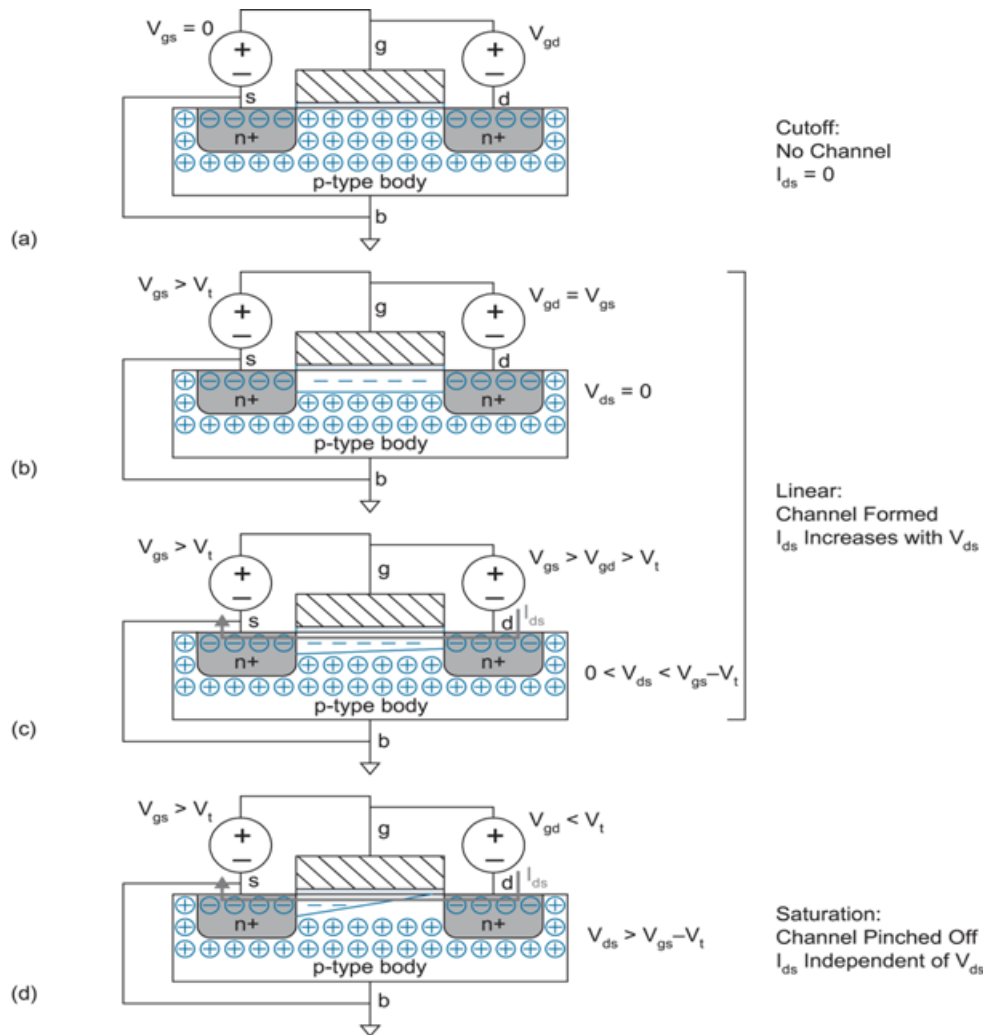
(α') Χαρακτηριστική $I_D - V_D$ (β') Χαρακτηριστική $I_D - V_G$ Σχήμα 2.10: Χαρακτηριστικές $I - V$ του τρανζίστορ MOSFET

Type	Cross section	Output characteristics	Transfer characteristics
n-channel enhancement (normally off)			
n-channel depletion (normally on)			
p-channel enhancement (normally off)			
p-channel depletion (normally on)			

Σχήμα 2.11: Είδη τρανζίστορ MOSFET



Σχήμα 2.12: Καταστάσεις διόδου MOS



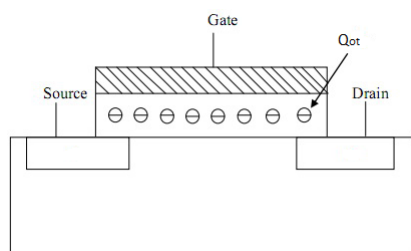
Σχήμα 2.13: Καταστάσεις τρανζίστορ MOSFET

2.4 Κύτταρο μνήμης

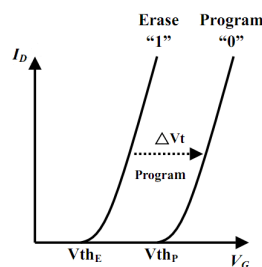
Στην περιγραφή που οδήγησε στην έννοια της μη πτητικότητας και στην εξίσωση 2.2.2.0.61 πρέπει να γίνουν δύο επισημάνσεις:

- Το αρχικό μοντέλο του κυττάρου μνήμης (Σχήμα 2.14) θεωρούσε ότι το φορτίο αποθηκεύεται στο οξείδιο. Όμως, όπως αναφέρθηκε περιληπτικά στο Κεφάλαιο 1, το φορτίο στο κύτταρο μνήμης αποθηκεύεται σε ένα κομμάτι μέταλλο ή διηλεκτρικό στρώμα που περιβάλλεται από μονωτή. Το οξείδιο παίζει το ρόλο του μονωτή και όχι του αποθηκευτικού χώρου.
- Η εξίσωση 2.2.2.0.61, δηλαδή η σχέση μεταξύ ΔV_{FB} και V_p , φαινομενικά είναι γραμμική. Όμως, στην πραγματικότητα, είναι αρχικά γραμμική αλλά καθώς αυξάνεται η V_p , η ΔV_{FB} καταλήγει σε κορεσμό ή ακόμα και διαγραφή της μνήμης.

Στο Σχήμα 2.15 απεικονίζεται η χαρακτηριστική $I_D - V_G$ στις καταστάσεις προγραμματισμού και διαγραφής. Μπορεί να παρατηρήσει κανείς τα εξής:



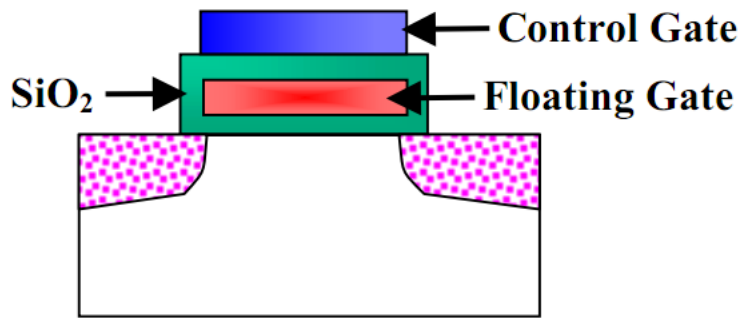
Σχήμα 2.14: Αρχικό μοντέλο κυττάρου μνήμης



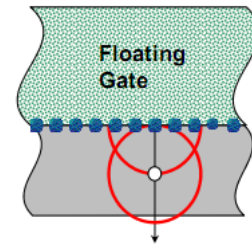
Σχήμα 2.15: Κατάσταση προγραμματισμού και διαγραφής

- Το αποθηκευμένο φορτίο στο κύτταρο οδηγεί στην απαίτηση επιπλέον τάσης στην πύλη ώστε να σχηματιστεί το κανάλι, δηλαδή σε μετατόπιση της τάσης κατωφλιού. Η διαφορά μεταξύ των τάσεων κατωφλιού ΔV_T μεταξύ προγραμματισμένης κατάστασης (full-write) και κατάστασης διαγραφής (full-erase) ονομάζεται παράθυρο της μνήμης.
- Η αποθήκευση ενός bit σε ένα κύτταρο μνήμης συνίσταται στην αντιστοίχιση της προγραμματισμένης κατάστασης στο bit 1 και της κατάστασης διαγραφής στο bit 0.
- Ανάγνωση του περιεχομένου της μνήμης, δηλαδή ανίχνευση της κατάστασης του κυττάρου, γίνεται με την εφαρμογή μιας τάσης πύλης με τιμή εντός του παραθύρου και ανίχνευση του ρεύματος καναλιού. Εάν υπάρχει ρεύμα τότε το κύτταρο μνήμης περιέχει το bit 0. Εάν $I_D = 0$ τότε περιέχει το bit 1.
- Η διαφορά μεταξύ των τάσεων κατωφλιού, ΔV_T , μεταξύ κατάστασης προγραμματισμού και διαγραφής δεν είναι απαραίτητα ίση με το μέγιστο φυσικό παράθυρο του κυττάρου. Με άλλα λόγια, εάν για κάποιο λόγο εφαρμοστεί μία λίγο μεγαλύτερη τάση προγραμματισμού, τότε η $I - V$ χαρακτηριστική δεν θα βρεθεί στην "συνηθισμένη" κατάσταση του λεγόμενου πλήρους προγραμματισμού (full-write) αλλά λίγο πιο δεξιά. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε το φαινόμενο της υπερεγγραφής (over-write). Όπως καταλαβαίνει κανείς, εάν στη συνέχεια εφαρμοστεί στην πύλη η κανονική τάση διαγραφής, το κύτταρο δεν θα μεταβεί στην κατάσταση πλήρους διαγραφής (full-erase) και κατά συνέπεια δεν θα σβήσει τελείως. Αντίστοιχα, το κύτταρο μπορεί να βρεθεί σε μία κατάσταση με χαρακτηριστική $I - V$ πιο αριστερά από το (full-erase). Αυτό σημαίνει ότι όχι μόνο το κύτταρο έχει σβήσει αλλά έχουν αποθηκευτεί σε αυτό φορείς αντίθετου τύπου με αυτούς που αποθηκεύονται κατά τον προγραμματισμό. Έχει γίνει δηλαδή "αντίθετος προγραμματισμός". Αυτή η κατάσταση ονομάζεται υπερδιαγραφή (over-erase).

Το κύτταρο μνήμης μπορεί να κατασκευαστεί είτε με την τεχνολογία αιωρούμενης πύλης, είτε με την τεχνολογία παγίδευσης φορτίων. Οι δύο αυτές τεχνολογίες αναλύονται στις ενότητες που ακολουθούν.



Σχήμα 2.16: Κύτταρο μνήμης με αιωρούμενη πύλη



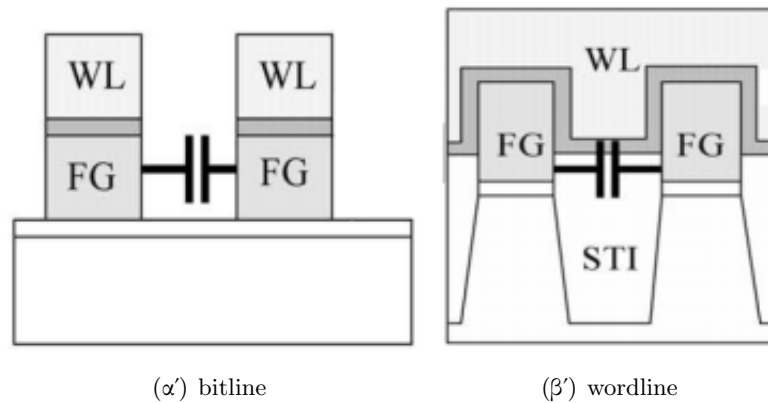
Σχήμα 2.17: Απώλειες φορτίου με ρεύμα Poole Frenkel

2.4.1 Τεχνολογία αιωρούμενης πύλης

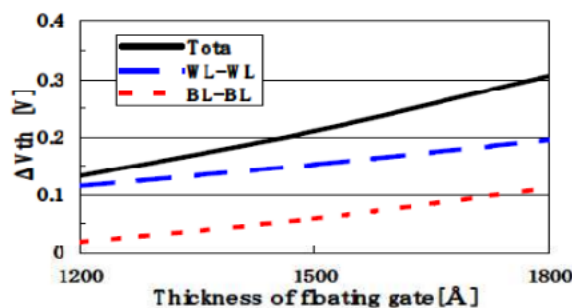
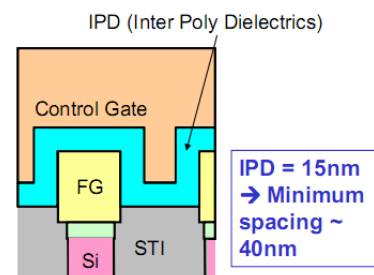
Στην τεχνολογία αυτή το φορτίο αποθηκεύεται σε ένα κομμάτι μετάλλου που περιβάλλεται από οξείδιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.16. Το μέταλλο αυτό ονομάζεται "αιωρούμενη πύλη", καθώς δεν έχει καμία απολύτως ηλεκτρική σύνδεση με κάποιο άλλο μέρος του κυττάρου μνήμης. Η πύλη του κυττάρου, δηλαδή ο ακροδέκτης στον οποίο εφαρμόζεται η τάση, ονομάζεται πλέον "πύλη ελέγχου" (control gate) για να διαχωριστεί εννοιολογικά από την αιωρούμενη πύλη. Ένας άλλος εννοιολογικός διαχωρισμός που γίνεται είναι στο οξείδιο. Το κομμάτι του οξειδίου μεταξύ της πύλης ελέγχου και της αιωρούμενης πύλης ονομάζεται οξείδιο ελέγχου (control oxide) ή οξείδιο φραγής (blocking oxide) ενώ το κομμάτι του οξειδίου μεταξύ της αιωρούμενης πύλης και του υποστρώματος ονομάζεται οξείδιο σήραγγος (tunnel oxide) ή οξείδιο διέλευσης. Μία μνήμη αιωρούμενης πύλης προγραμματίζεται με (CHI) ή FN και σβήνει με FN. Το οξείδιο σήραγγος είναι συνήθως 8-12nm, δηλαδή αρκετά παχύ.

Η τεχνολογία αιωρούμενης πύλης αποτελεί την κυρίαρχη τεχνολογία κατασκευής μνημών την ώρα που γράφονται αυτές οι γραμμές. Όλες οι μνήμες τύπου Flash είναι τεχνολογίας αιωρούμενης πύλης. Αυτό συμβαίνει γιατί το οξείδιο που περιβάλλει την αιωρούμενη πύλη προσφέρει προστασία του αποθηκευμένου φορτίου από διαταραχές στα ηλεκτρικά πεδία ή στην θερμοκρασία. Επίσης, λόγω του μεγάλου πάχους του οξειδίου σήραγγος, η διατήρηση του φορτίου είναι πολύ καλή. Δυστυχώς όμως η τεχνολογία αιωρούμενης πύλης φτάνει πλέον στα όριά της καθώς αντιμετωπίζει μία σειρά από μειονεκτήματα τα οποία οφείλονται στην ίδια την τεχνολογία. Με άλλα λόγια, η χρησιμοποίηση ενός διαφορετικού υλικού ή μίας άλλης παρασκευαστικής μεθόδου δεν πρόκειται να λύσει το πρόβλημα. Το πρόβλημα θα λυθεί μόνο από την χρησιμοποίηση μιας διαφορετικής σχεδίασης του κυττάρου μνήμης, δηλαδή μίας άλλης τεχνολογίας. Τα μειονεκτήματα αυτά παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω:

- Το μεγαλύτερο ίσως μειονέκτημα της τεχνολογίας αιωρούμενης πύλης είναι αυτό που έχει κωδικοποιηθεί με την φράση "ένα ελάττωμα (ισούται με) απώλεια μνήμης" (single defect memory loss). Εάν δηλαδή λόγω κάποιου ελαττώματος δημιουργηθεί αγωγή μεταξύ της αιωρούμενης πύλης και του υποστρώματος τότε είναι αδύνατη πλέον η αποθήκευση φορτίου και το κύτταρο μνήμης αχρηστεύεται. Ακόμα όμως και αν δεν



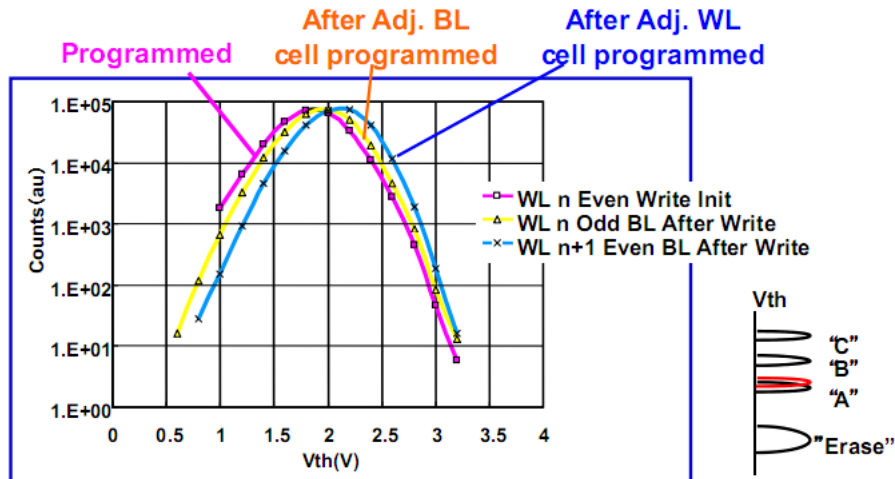
Σχήμα 2.18: Κύτταρα αιωρούμενης πύλης κατά την διεύθυνση της

Σχήμα 2.19: ΔV_T συναρτήσει του πάχους της αιωρούμενης πύλης

Σχήμα 2.20: Πρόβλημα scaling στα διηλεκτρικά μεταξύ των πολυπυριτίων

δημιουργηθεί βραχυκύκλωμα, τα ελαττώματα μπορεί να προκαλέσουν σημαντική απώλεια φορτίου μέσω ρεύματος TAT ή μέσω ρεύματος Poole Frenkel. Κάτι τέτοιο εμποδίζει το πάχος του οξειδίου σήραγγος από το να μικρύνει και επομένως εισάγονται σημαντικοί περιορισμοί στη σμίκρυνση των παχών της διηλεκτρικής στοιβάς και επομένως στην πυκνότητα της μνήμης. Αυτή τη στιγμή η τεχνολογία αιωρούμενης πύλης έχει σταματήσει σε πάχος οξειδίου σήραγγος 8nm. Για την αποφυγή των ελαττωμάτων έχει μειωθεί η τάση προγραμματισμού και έχουν αυξηθεί τα βοηθητικά κυκλώματα του κυττάρου, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα την χαμηλή απόδοση της μνήμης [4].

- Το γεγονός ότι ο αποθηκευτικός χώρος του φορτίου, δηλαδή η αιωρούμενη πύλη, είναι μέταλλο εισάγει παρασιτικές αμοιβαίες χωρητικότητες όταν πολλά κύτταρα μνήμης τοποθετηθούν το ένα δίπλα στο άλλο. Στο σχήμα 2.18 φαίνονται οι δύο πιθανοί τρόποι συνδεσμολογίας και εμφάνισης παρασιτικών χωρητικότητων. Αυτό, εκτός από τους περιορισμούς που εισάγει στη σμίκρυνση των παχών της διηλεκτρικής στοιβάς, δημιουργεί και μία επιπλέον διαταραχή: δυσκολεύει την ομοιόμορφη λειτουργία των κυττάρων μνήμης. Κατά συνέπεια, απαιτούνται αλγόριθμοι διόρθωσης λαθών και βοηθητικά κυκλώματα για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο [11]. Υπολογίζεται ότι η μετατόπιση της V_T



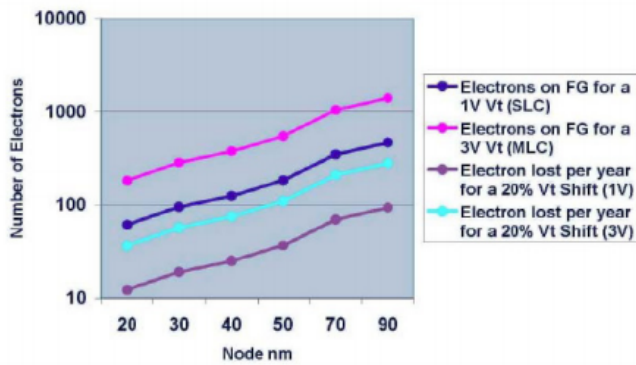
Σχήμα 2.21: Επίδραση των παρασιτικών χωρητικότητων στην κατάσταση πλήρους εγγραφής

εξαιτίας των αμοιβαίων χωρητικότητων εξαρτάται από το ύψος της αιωρούμενης πύλης (Σχήμα 2.19).

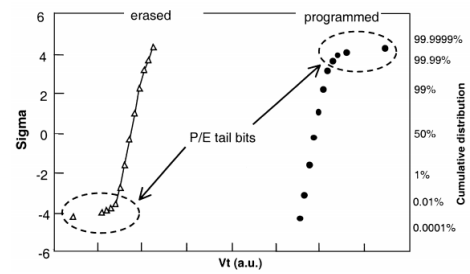
- Σε όλες τις προηγούμενες δυσκολίες σχετικά με τη σμίκρυνση των παχών της διηλεκτρικής στοίβας έρχεται να προστεθεί και μία ακόμα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.25, το οποίο αναπαριστά τον αριθμό ηλεκτρονίων συναρτήσει του scaling, όσο πιο μεγάλη είναι η πυκνότητα της μνήμης τόσο λιγότερα ηλεκτρόνια αντιστοιχούν σε ένα bit. Όμως η χρησιμοποίηση όλο και λιγότερων ηλεκτρονίων, καθώς και η χρησιμοποίηση νανοκρυστάλλων οδηγούν στην εμφάνιση στοχαστικών συμπεριφορών τόσο στην διατήρηση φορτίου όσο και στον προσδιορισμό του παραθύρου με αποτέλεσμα να υπάρχει διασπορά στις καμπύλες [14]. Αυτά λέγονται φαινόμενα λίγων ηλεκτρονίων (few electron phenomena). Ένα από τα πιο χαρακτηριστικά είναι το φαινόμενο των tailbits, δηλαδή bits των οποίων η τάση κατωφλιού συστηματικά αποκλίνει κατά πολύ σε σχέση με αυτές των υπολοίπων [19] (Σχήμα 2.23).
- Είναι δύσκολο να επιτευχθούν κύτταρα μνήμης με μεγάλη αντοχή στην ραδιενέργεια. Οι κρούσεις με ιόντα μεγάλου ατομικού αριθμού μπορούν να απομακρύνουν ταχύτατα το φορτίο από την αιωρούμενη πύλη.

2.4.2 Τεχνολογία παγίδευσης φορτίων

Για να δοθεί λύση στα προβλήματα της τεχνολογίας της αιωρούμενης πύλης κατασκευάστηκε το 1967 από τον Wenegeer το πρώτο κύτταρο μνήμης που χρησιμοποίησε ένα διηλεκτρικό στρώμα ως αποθηκευτικό χώρο. Από τότε μέχρι τώρα η τεχνολογία παγίδευσης φορτίου συνεχώς εξελίσσεται με αποτέλεσμα να είναι πλέον ορατό το ενδοχόμενο να αντικαταστήσει την τεχνολογία αιωρούμενης πύλης. Στο Σχήμα 2.24 απεικονίζεται η εξέλιξη των διατάξεων παγίδευσης φορτίου και ακολουθεί μία σύντομη ανάλυση της κάθε διάταξης.



Σχήμα 2.22: Αριθμός ηλεκτρονίων συναρτήσει του scaling



Σχήμα 2.23: Εμφάνιση tailbits

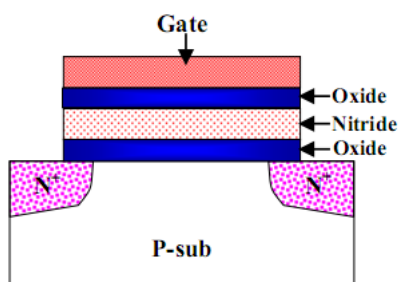


Σχήμα 2.24: Εξέλιξη των διατάξεων παγίδευσης φορτίου

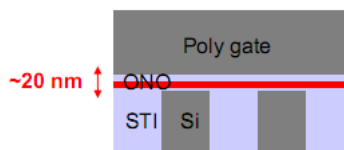
MNOS: Ήταν η αρχική διάταξη παγίδευσης φορτίου και αποτελείτο από μέταλλο, νιτρίδιο του πυριτίου, διοξείδιο του πυριτίου και ημιαγωγό. Το διηλεκτρικό στρώμα αποθήκευσης του φορτίου είναι το νιτρίδιο του πυριτίου Si_3N_4 και το διοξείδιο του πυριτίου SiO_2 αναλαμβάνει το ρόλο του μονωτή σήραγγος. Οξειδίο ελέγχου δεν υπάρχει στην συγκεκριμένη διάταξη. Τα MNOS ήταν διατάξεις p καναλιού με ηλεκτρόδιο αλουμινίου στην πύλη, εξαιρετικά παχύ στρώμα νιτρίδιου και τάσεις προγραμματισμού-διαγραφής γύρω στα 25-30V. Αυτές οι διατάξεις αντιμετώπιζαν προβλήματα χαμηλής ταχύτητας και περιορισμένης πυκνότητας λόγω της πύλης αλουμινίου.

SNOS: Διατάξεις n καναλιού με τάσεις προγραμματισμού-διαγραφής 14-18V και σημαντικά μικρότερες διαστάσεις. Αντί αλουμινίου χρησιμοποιήθηκε πολυπυρίτιο στην πύλη, όμως η διεπιφάνεια πολυπυριτίου/ Si_3N_4 αποδείχθηκε ασταθής [17]. Επιπλέον, υπήρχε πρόβλημα διατήρησης φορτίου λόγω ρεύματος διαρροής από την πύλη. Ο προγραμματισμός γινόταν με MFN ηλεκτρονίων και η διαγραφή με DT οπών.

SONOS: Η βελτιωμένη μορφή των SNOS, με την προσθήκη του οξειδίου ελέγχου που



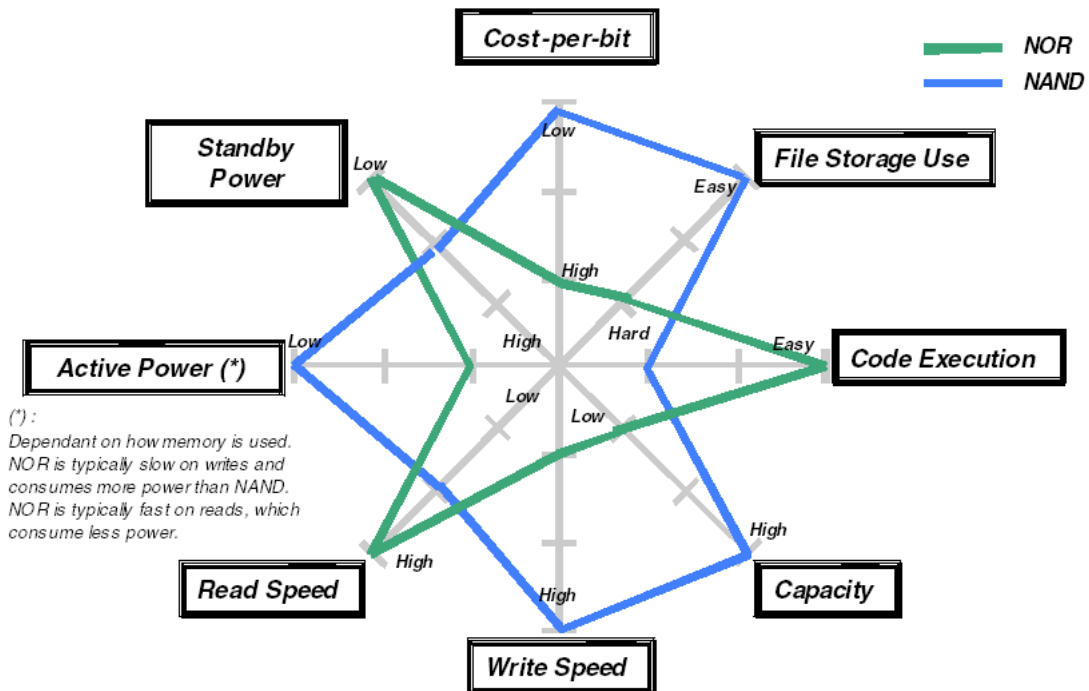
Σχήμα 2.25: Κύτταρο SONOS



Σχήμα 2.26: Scaling του SONOS στα διηλεκτρικά μεταξύ των πολυπυριτίων

μείωσε σε μεγάλο βαθμό την διαρροή από την πύλη και αύξησε την διατήρηση του φορτίου. Επιπλέον εξαλείφθηκε η αστάθεια των SNOS και αντιμετωπίστηκαν πολλά από τα προβλήματα της τεχνολογίας αιωρούμενης πύλης. Ο προγραμματισμός διαφέρει ανάλογα με το πάχος του οξειδίου σήραγγος και είναι MFN, DT ή FN ηλεκτρονίων. Η διαγραφή γίνεται συνήθως με FN οπών ή backtunneling ηλεκτρονίων λόγω της αρνητικής τάσης στην πύλη. Επιπροσθέτως υπάρχει TAT για μικρά ηλεκτρικά πεδία. Τα SONOS συνεχίζουν να ερευνώνται μέχρι σήμερα και όλα δείχνουν ότι αργά ή γρήγορα θα αντικαταστήσουν την τεχνολογία αιωρούμενης πύλης. Τα πλεονεκτήματα των SONOS παρουσιάζονται παρακάτω [26]:

- Χαμηλές τάσεις προγραμματισμού/διαγραφής 5-10V.
- Υψηλή αντοχή (10^7 κύκλοι εγγραφής/διαγραφής) και διατήρηση φορτίου (10 χρόνια).
- Υψηλή ταχύτητα εγγραφής (100μsec) και διαγραφής (10msec).
- Μεγάλη αντοχή στη ραδιενέργεια (300krad), λόγω του ότι το αποθηκευτικό μέσο είναι νιτρίδιο και όχι αιωρούμενη πύλη.
- Μεγάλη συμβατότητα με την τεχνολογία CMOS.
- Δεν υφίσταται πλέον το (single defect memory loss), κάτι που οδήγησε σε πάχη οξειδίου σήραγγος μεταξύ 2 και 3nm. Αυτό είχε ως συνέπεια την δραματική βελτίωση του κάθετου scaling και την αύξηση της πυκνότητας ($6F^2$).
- Δεν υφίστανται προβλήματα παρασιτικών χωρητικότητων.
- Εξάλειψη few electron phenomena και αντοχή στο SILC.
- Το SONOS περιλαμβάνει λιγότερα παρασκευαστικά βήματα από την τεχνολογία αιωρούμενης πύλης. Αυτό έχει ως συνέπεια και χαμηλότερο κόστος.
- Πολύ καλή ενεργειακή απόδοση λόγω του ότι ο προγραμματισμός και η διαγραφή γίνονται με μηχανισμούς φαινομένου σήραγγος και όχι με έγχυση.

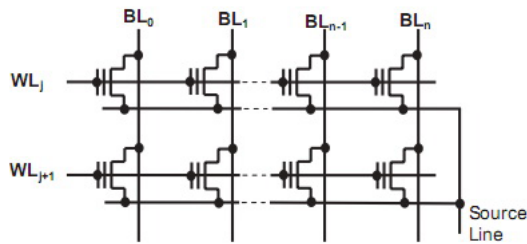


Σχήμα 2.27: Σύγκριση αρχιτεκτονικών

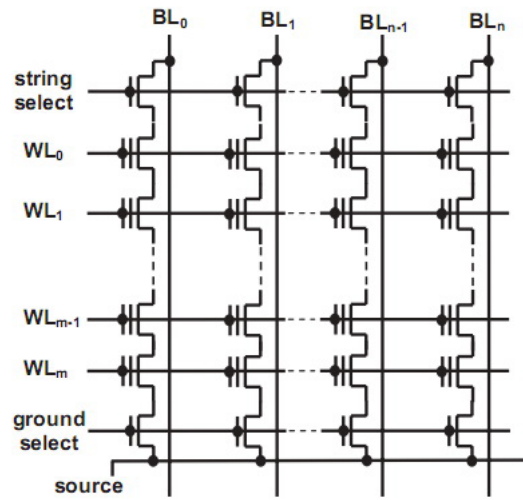
2.4.3 Αρχιτεκτονική μνήμης

Τα κύτταρα μνήμης οργανώνονται σε έναν ορθογώνιο πίνακα με δύο μεθόδους, που ονομάζονται αρχιτεκτονικές. Αυτός ο πίνακας περιλαμβάνει τα κύτταρα μνήμης και τους αγωγούς που επιτρέπουν την πρόσβαση σε κάθε κύτταρο. Οι αγωγοί κατά τον οριζόντιο άξονα (γραμμές) ονομάζονται wordlines και χρησιμοποιούνται για να επιλεγεί μία γραμμή κυττάρων κατά την ανάγνωση ή την εγγραφή. Οι wordlines συνδέονται στις πύλες των κυττάρων της γραμμής. Οι αντίστοιχες στήλες του πίνακα ονομάζονται bitlines και συνδέονται στην τροφοδοσία και σε μία ή περισσότερες υποδοχές (drains), ανάλογα με την αρχιτεκτονική.

Υπάρχουν δύο αρχιτεκτονικές, η NOR και η NAND και κάθε μία έχει τα δικά της πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που φαίνονται στο Σχήμα 2.27. Η αρχιτεκτονική NOR, που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.28, ουσιαστικά αποτελεί την παράλληλη σύνδεση των κυττάρων μνήμης, με τις υποδοχές να συνδέονται στις bitlines, οι πύλες στις wordlines και οι πηγές σε κάποιους άλλους αγωγούς που ονομάζονται source lines και οι οποίοι γειώνονται. Στην αρχιτεκτονική NOR είναι σημαντικό να αποφεύγεται το φαινόμενο της υπερδιαγραφής, καθώς τότε η τάση κατωφλιού γίνεται αρνητική και το κύτταρο μνήμης γίνεται από τύπου πύκνωσης τύπου απογύμνωσης. Αντίθετα, η αρχιτεκτονική NAND, που απεικονίζεται στο Σχήμα 2.29, ουσιαστικά αποτελεί την εν σειρά σύνδεση των κυττάρων μνήμης, με την κάθε υποδοχή να συνδέεται στην πηγή του επόμενου κυττάρου μνήμης. Παρακάτω παρατίθενται επιγραμματικά μερικές διαφορές μεταξύ των δύο αρχιτεκτονικών:



Σχήμα 2.28: Αρχιτεκτονική NOR



Σχήμα 2.29: Αρχιτεκτονική NAND

Πίνακας 2.1: Σύγκριση αρχιτεκτονικών

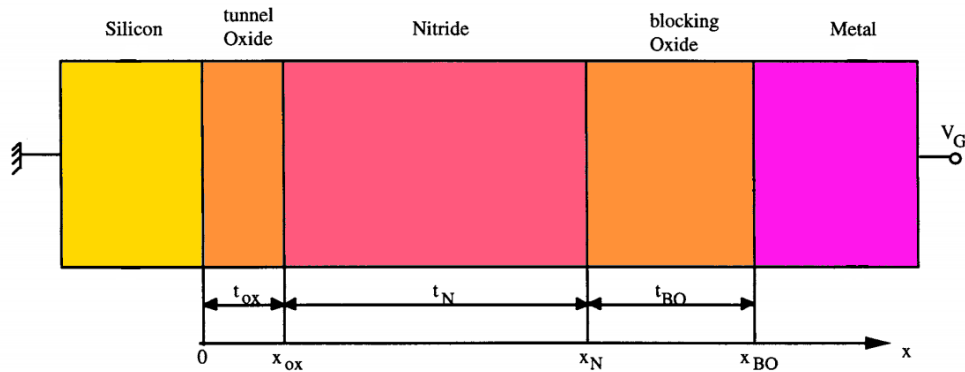
Παράμετρος	NAND	NOR
XIP (eXecute In Place, δηλαδή εκτέλεση κώδικα κατευθείαν από τη μνήμη)	Όχι	Ναι
Δυνατότητα scaling	Ναι	Περιορισμένη
Μέγεθος κυττάρου μνήμης	$4F^2$	$8 - 10F^2$
Multi-Level Cell	Ναι	Ναι
Κύκλοι διαγραφής	10^5	10^6
Διαγραφή	Γρήγορη (3msec)	Πολύ αργή (5sec)
Εγγραφή	Γρήγορη	Αργή
Ανάγνωση	Γρήγορη	Γρήγορη
Αξιοπιστία	Χαμηλή	Αποδεκτή
Διαρκεια ζωής	10 φορές μεγαλύτερη από αυτή της NOR	
Κόστος	Χαμηλό	Υψηλό
Προσπέλαση	Ακολουθιακή	Τυχαία
Μηχανισμός προγραμματισμού	FN	CHE
Χρήση	Αποθήκευση δεδομένων	Αποθήκευση προγραμμάτων

Κεφάλαιο 3

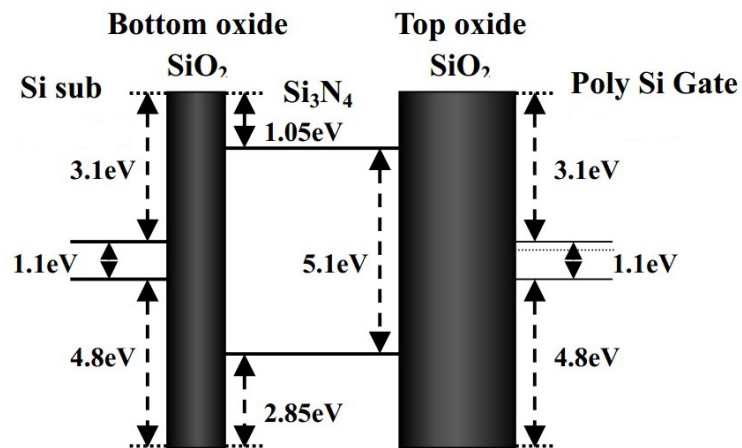
Μαθηματική μοντελοποίηση

3.1 Ηλεκτροστατική ανάλυση

Η διατομή ενός πυκνωτή SONOS απεικονίζεται στο Σχήμα 3.1. Παρατηρεί κανείς ότι αποτελείται από πέντε συστατικά: υπόστρωμα πυριτίου, οξειδίο σήραγγος, νιτρίδιο του πυριτίου, οξειδίο αποκλεισμού και μέταλλο.



Σχήμα 3.1: Διατομή ενός πυκνωτή SONOS



Σχήμα 3.2: Ενεργειακές στάθμες ενός πυκνωτή SONOS

τίου, οξειδίου φραγής και μεταλλική πύλη. Στο Σχήμα 3.2 απεικονίζονται οι ενεργειακές του στάθμες.

Εξισώσεις Poisson

Το πρώτο στάδιο της ηλεκτροστατικής ανάλυσης του μοντέλου αυτού γίνεται γράφοντας τις εξισώσεις Poisson για το δυναμικό, καθώς και τις συνοριακές συνθήκες στα όρια. Η διάταξη χωρίζεται σε πέντε περιοχές, για κάθε μία εκ των οποίων γράφεται και η αντίστοιχη εξίσωση Poisson και τελικά τα αποτελέσματα συνδυάζονται.

Η εξίσωση Poisson μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial x} \left(-\frac{\partial V}{\partial x} \right) = \frac{\rho}{\epsilon} \Leftrightarrow \frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon} \quad (3.1.0.0.1)$$

Επομένως λοιπόν εφαρμόζοντας την εξίσωση 3.1.0.0.1 σε κάθε μία από τις περιοχές του πυκνωτή SONOS προκύπτει:

Περιοχή οξειδίου σήραγγος:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{OXT}}{\partial x} &= \frac{\rho_{OXT}}{\epsilon_{ox}} \Leftrightarrow E_{OXT}(x) - E_{OXT}(0) = \int_0^x \frac{\rho_{OXT}}{\epsilon_{ox}} dx \\ &\Leftrightarrow E_{OXT}(x) = E_{OXT}(0) + \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_0^x \rho_{OXT} dx \end{aligned} \quad (3.1.0.0.2)$$

όπου:

E_{OXT} : το ηλεκτρικό πεδίο στο οξειδίο σήραγγος

ρ_{OXT} : το ηλεκτρικό φορτίο στο οξειδίο σήραγγος

Η σχέση 3.1.0.0.2 και οι αντίστοιχές της για τις υπόλοιπες περιοχές θα πρέπει να ολοκληρωθούν σε κάποια όρια. Μπορούμε να ορίσουμε ένα μονοδιάστατο σύστημα συντεταγμένων με μοναδική μεταβλητή την x , όπου το μηδέν βρίσκεται στην οριακή επιφάνεια υποστρώματος και οξειδίου σήραγγος. Στο σύστημα αυτό ορίζουμε τις μεταβλητές:

x_{OXT} : το όριο μεταξύ οξειδίου σήραγγος και νιτριδίου

x_N : το όριο μεταξύ νιτριδίου και οξειδίου φραγής

x_{OXB} : το όριο μεταξύ οξειδίου φραγής και πύλης

Στη συνέχεια ολοκληρώνουμε:

$$\begin{aligned}
\int_0^{x_{OXT}} E_{OXT}(x) dx &= E_{OXT}(0) \cdot x_{OXT} + \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_0^{x_{OXT}} \int_0^x \rho_{OXT} dx dx \\
\Rightarrow V_{OXT}(0) - V_{OXT}(x_{OXT}) &= E_{OXT}(0) \cdot x_{OXT} + \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_0^{x_{OXT}} \int_0^x \rho_{OXT} dx dx \\
\Leftrightarrow \Delta V_{OXT} &= -E_{OXT}(0) \cdot x_{OXT} - \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_0^{x_{OXT}} \int_0^x \rho_{OXT} dx dx \\
\Leftrightarrow \Delta V_{OXT} &= -E_{OXT}(0) \cdot x_{OXT} - \frac{Q_{OXT}}{\epsilon_{ox}} \cdot \overline{x_{OXT}} \tag{3.1.0.0.3}
\end{aligned}$$

Περιοχή νιτριδίου:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial E_N}{\partial x} = \frac{\rho_N}{\epsilon_N} &\Leftrightarrow E_N(x) - E_N(x_{OXT}) = \int_{x_{OXT}}^x \frac{\rho_N}{\epsilon_N} dx \\
&\Leftrightarrow E_N(x) = E_N(x_{OXT}) + \frac{1}{\epsilon_N} \int_{x_{OXT}}^x \rho_N dx \tag{3.1.0.0.4}
\end{aligned}$$

Στη συνέχεια ολοκληρώνουμε:

$$\begin{aligned}
\int_{x_{OXT}}^{x_N} E_N(x) dx &= E_N(x_{OXT}) \cdot d_N + \frac{1}{\epsilon_N} \int_{x_{OXT}}^{x_N} \int_{x_{OXT}}^x \rho_N dx dx \\
\Rightarrow V_N(x_{OXT}) - V_N(x_N) &= E_N(x_{OXT}) \cdot d_N + \frac{1}{\epsilon_N} \int_{x_{OXT}}^{x_N} \int_{x_{OXT}}^x \rho_N dx dx \\
\Leftrightarrow \Delta V_N &= -E_N(x_{OXT}) \cdot d_N - \frac{1}{\epsilon_N} \int_{x_{OXT}}^{x_N} \int_{x_{OXT}}^x \rho_N dx dx \\
\Leftrightarrow \Delta V_N &= -E_N(x_{OXT}) \cdot d_N - \frac{Q_N}{\epsilon_N} \cdot \overline{x_N} \tag{3.1.0.0.5}
\end{aligned}$$

Περιοχή οξειδίου φραγής:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial E_{OXB}}{\partial x} = \frac{\rho_{OXB}}{\epsilon_{ox}} &\Leftrightarrow E_{OXB}(x) - E_{OXB}(x_N) = \int_{x_N}^x \frac{\rho_{OXB}}{\epsilon_{ox}} dx \\
&\Leftrightarrow E_{OXB}(x) = E_{OXB}(x_N) + \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_{x_N}^x \rho_{OXB} dx \tag{3.1.0.0.6}
\end{aligned}$$

Στη συνέχεια ολοκληρώνουμε:

$$\begin{aligned}
\int_{x_N}^{x_{OXB}} E_{OXB}(x) dx &= E_{OXB}(x_N) \cdot d_{OXB} + \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_{x_N}^{x_{OXB}} \int_{x_N}^x \rho_{OXB} dx dx \\
\Rightarrow V_{OXB}(x_N) - V_{OXB}(x_{OXB}) &= E_{OXB}(x_N) \cdot d_{OXB} + \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_{x_N}^{x_{OXB}} \int_{x_N}^x \rho_{OXB} dx dx \\
\Leftrightarrow \Delta V_{OXB} &= -E_{OXB}(x_N) \cdot d_{OXB} - \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_{x_N}^{x_{OXB}} \int_{x_N}^x \rho_{OXB} dx dx \\
\Leftrightarrow \Delta V_{OXB} &= -E_{OXB}(x_N) \cdot d_{OXB} - \frac{Q_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \cdot \overline{x_{OXB}} \tag{3.1.0.0.7}
\end{aligned}$$

όπου:

ϵ_N : διηλεκτρική σταθερά νιτριδίου

d_N : πάχος νιτριδίου

$$d_N = x_N - x_{OXT} \quad (3.1.0.0.8)$$

d_{OXB} : πάχος οξειδίου φραγής

$$d_{OXB} = x_{OXB} - x_N \quad (3.1.0.0.9)$$

Προφανώς αν ορίσουμε ως d_{OXT} το πάχος του οξειδίου σήραγγος:

$$d_{OXT} = x_{OXT} - 0 \Leftrightarrow d_{OXT} \equiv x_{OXT} \quad (3.1.0.0.10)$$

Στις εξισώσεις 3.1.0.0.3, 3.1.0.0.5 και 3.1.0.0.7 παρουσιάζεται και η προσέγγιση του λεγόμενου "κεντροειδούς" ή "κέντρου βάρους" του φορτίου. Όπως μπορεί να δει κανείς στις πηγές [10], [6] και [25] αντί να θεωρηθεί ότι το όποιο φορτίο των περιοχών είναι χωρικό και ακολουθεί κάποια κατανομή, θεωρείται ότι είναι επιφανειακό και κατά συνέπεια βρίσκεται όλο σε μια απείρως λεπτή επιφάνεια, η συντεταγμένη της οποίας προσδιορίζεται ως \bar{x} . Επομένως:

\bar{x}_N : κεντροειδές νιτριδίου

\bar{x}_{OXT} : κεντροειδές οξειδίου σήραγγος

\bar{x}_{OXB} : κεντροειδές οξειδίου φραγής

Εξισώσεις Gauss

Το δεύτερο στάδιο της ηλεκτροστατικής ανάλυσης του μοντέλου αυτού γίνεται γράφοντας τις σημειακές εξισώσεις Gauss για το δυναμικό, καθώς και τις συνοριακές συνθήκες στα όρια. Η διάταξη χωρίζεται σε πέντε περιοχές, για κάθε μία εκ των οποίων γράφεται και η αντίστοιχη εξίσωση Gauss και τελικά τα αποτελέσματα συνδυάζονται.

Περιοχή υποστρώματος (πυριτίου):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D}_s = \rho_{Si} \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_s E_s = \rho_{Si} \Rightarrow \int_{-x}^0 \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_s E_s dx = \int_{-x}^0 \rho_{Si} dx \Rightarrow E_s(0) - E_s(-x) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_{-x}^0 \rho_{Si} dx \quad (3.1.0.0.11)$$

Εαν ορίσουμε ως x_s το αριστερό άκρο του υποστρώματος, στο οποίο από το Κεφάλαιο 2 γνωρίζουμε ότι ο ημιαγωγός είναι ενδογενής τότε η συνοριακή συνθήκη γράφεται ως εξής:

$$x = -x_s : E_s(0) - E_s(-x_s) = \frac{Q_{Si}}{\epsilon_s} \xrightarrow{E_s(-x_s)=0} E_s(0) = \frac{Q_{Si}}{\epsilon_s} \quad (3.1.0.0.12)$$

Το πρόσημο – μπαίνει αν ο x_s θεωρηθεί θετικός. Σε κάθε περίπτωση, το σημείο αυτό βρίσκεται αριστερά του μηδενός και επομένως στην εξίσωση πρέπει να αντικατασταθεί με αρνητικό αριθμό.

Εκτός από την 3.1.0.0.12 πρέπει να γραφεί και η συνοριακή συνθήκη στο άλλο άκρο του υποστρώματος, δηλαδή στο όριο μεταξύ υποστρώματος και οξειδίου σήραγγος:

$$\epsilon_{ox} E_{OXT}(0) - \epsilon_s E_s(0) = Q_{SO} \stackrel{3.1.0.0.12}{\Leftrightarrow} E_{OXT}(0) = \frac{Q_{SO} + Q_{Si} \text{ [5]}}{\epsilon_{ox}} \frac{Q_{ss} + Q_{it} + Q_{Si}}{\epsilon_{ox}} \quad (3.1.0.0.13)$$

Περιοχή οξειδίου σήραγγος:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot D_{OXT} &= \rho_{OXT} \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_{ox} E_{OXT} = \rho_{OXT} \\ \Rightarrow \int_0^x \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_{ox} E_{OXT} dx &= \int_0^x \rho_{OXT} dx \Rightarrow E_{OXT}(x) - E_{OXT}(0) = \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_0^x \rho_{OXT} dx \end{aligned} \quad (3.1.0.0.14)$$

Και με αντικατάσταση προκύπτει:

$$x = x_{OXT} : E_{OXT}(x_{OXT}) = E_{OXT}(0) + \frac{Q_{OXT}}{\epsilon_{ox}} \stackrel{3.1.0.0.13}{=} \frac{Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT}}{\epsilon_{ox}} \quad (3.1.0.0.15)$$

Η συνοριακή συνθήκη στο όριο μεταξύ οξειδίου σήραγγος και νιτριδίου είναι:

$$\epsilon_N E_N(x_{OXT}) - \epsilon_{ox} E_{OXT}(x_{OXT}) = Q_{ON} \stackrel{3.1.0.0.15}{\Leftrightarrow} E_N(x_{OXT}) = \frac{Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON}}{\epsilon_N} \quad (3.1.0.0.16)$$

Περιοχή νιτριδίου:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot D_N &= \rho_N \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_N E_N = \rho_N \\ \Rightarrow \int_{x_{OXT}}^x \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_N E_N dx &= \int_{x_{OXT}}^x \rho_N dx \Rightarrow E_N(x) - E_N(x_{OXT}) = \frac{1}{\epsilon_N} \int_{x_{OXT}}^x \rho_N dx \end{aligned} \quad (3.1.0.0.17)$$

Και με αντικατάσταση προκύπτει:

$$x = x_N : E_N(x_N) = E_N(x_{OXT}) + \frac{Q_N}{\epsilon_N} \stackrel{3.1.0.0.13}{=} \frac{Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON} + Q_N}{\epsilon_N} \quad (3.1.0.0.18)$$

Η συνοριακή συνθήκη στο όριο μεταξύ νιτριδίου και οξειδίου φραγής είναι:

$$\epsilon_{ox} E_{OXB}(x_N) - \epsilon_N E_N(x_N) = Q_{NO} \stackrel{3.1.0.0.18}{\Leftrightarrow} E_{OXB}(x_N) = \frac{Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON} + Q_N + Q_{NO}}{\epsilon_{ox}} \quad (3.1.0.0.19)$$

Περιοχή οξειδίου φραγής:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot D_{OXB} \vec{E} &= \rho_{OXB} \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_{ox} E_{OXB} = \rho_{OXB} \\ \Rightarrow \int_{x_N}^x \frac{\partial}{\partial x} \epsilon_{ox} E_{OXB} dx &= \int_{x_N}^x \rho_{OXB} dx \Rightarrow E_{OXB}(x) - E_{OXB}(x_N) = \frac{1}{\epsilon_{ox}} \int_{x_N}^x \rho_{OXB} dx \end{aligned} \quad (3.1.0.0.20)$$

Και με αντικατάσταση προκύπτει:

$$\begin{aligned} x = x_{OXB} : E_{OXB}(x_{OXB}) &= E_{OXB}(x_N) + \frac{Q_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \\ \stackrel{3.1.0.0.19}{\Leftrightarrow} \frac{Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON} + Q_N + Q_{NO} + Q_{OXB}}{\epsilon_{ox}} & \end{aligned} \quad (3.1.0.0.21)$$

Αυτό ολοκληρώνει την ανάλυση των πέντε περιοχών. Απομένει μία συνοριακή συνθήκη στο όριο μεταξύ οξειδίου φραγής και μετάλλου:

$$\begin{aligned} E_M(x_{OXB}) - \epsilon_{ox} E_{OXB}(x_{OXB}) &= Q_{OM} \equiv Q_M \equiv Q_G \\ \stackrel{3.1.0.0.21}{\Leftrightarrow} Q_G &= Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON} + Q_N + Q_{NO} + Q_{OXB} \end{aligned} \quad (3.1.0.0.22)$$

όπου:

Q_G : το φορτίο της πύλης ή φορτίο μετάλλου (Q_M) όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2

Q_{SO} : το φορτίο της διαχωριστικής επιφάνειας υποστρώματος-οξειδίου σήραγγος

Q_{Si} : το φορτίο υποστρώματος ή Q_s όπως ορίστηκε στο Κεφάλαιο 2

Q_{OXT} : το φορτίο που είναι αποθηκευμένο στο οξείδιο σήραγγος

Q_{ON} : το φορτίο της διαχωριστικής επιφάνειας οξειδίου σήραγγος-νιτριδίου

Q_N : το φορτίο του νιτριδίου

Q_{NO} : το φορτίο της διαχωριστικής επιφάνειας νιτριδίου-οξειδίου φραγής

Q_{OXB} : το φορτίο που είναι αποθηκευμένο στο οξείδιο φραγής

Νόμος Τάσεων Kirchoff

Τελικά, εφαρμόζοντας τον Νόμο Τάσεων του Kirchoff και συνδυάζοντας όλες τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$\begin{aligned}
V_G &= \Delta V_{OXB} + \Delta V_N + \Delta V_{OXT} + \psi_s + \phi_{ms} \\
&= \psi_s + \phi_{ms} - E_{OXT}(0) \cdot d_{OXT} - \frac{Q_{OXT}}{\epsilon_{ox}} \overline{x_{OXT}} - E_N(x_{OXT}) \cdot d_N - \frac{Q_N}{\epsilon_N} \overline{x_N} \\
&\quad - E_{OXB}(x_N) \cdot d_{OXB} - \frac{Q_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \overline{x_{OXB}} \\
&\stackrel{ap'oex.Gauss}{=} \psi_s + \phi_{ms} - (Q_{SO} + Q_{Si}) \frac{d_{OXT}}{\epsilon_{ox}} - Q_{OXT} \frac{\overline{x_{OXT}}}{\epsilon_{ox}} - (Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON}) \frac{d_N}{\epsilon_N} \\
&\quad - Q_N \frac{\overline{x_N}}{\epsilon_N} - (Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON} + Q_N + Q_{NO}) \frac{d_{OXB}}{\epsilon_{ox}} - Q_{OXB} \frac{\overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} \\
&= \psi_s + \phi_{ms} - Q_{SO} \left(\frac{d_{OXT}}{\epsilon_{ox}} + \frac{d_N}{\epsilon_N} + \frac{d_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \right) - Q_{Si} \left(\frac{d_{OXT}}{\epsilon_{ox}} + \frac{d_N}{\epsilon_N} + \frac{d_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \right) \\
&\quad - Q_{OXT} \left(\frac{\overline{x_{OXT}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{d_N}{\epsilon_N} + \frac{d_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \right) - Q_{ON} \left(\frac{d_N}{\epsilon_N} + \frac{d_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \right) \\
&\quad - Q_N \left(\frac{\overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{d_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \right) - Q_{NO} \left(\frac{d_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \right) - Q_{OXB} \left(\frac{\overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} \right) \tag{3.1.0.0.23}
\end{aligned}$$

Η εξίσωση 3.1.0.0.23 είναι η πιο γενική μορφή της τάσης πύλης του SONOS και βρίσκεται στην πηγή [7].

Στις Αμερικάνικες εργασίες πολύ συχνά χρησιμοποιείται μια διαφορετική προσέγγιση, η οποία έχει ως σκοπό την κατάλληλη εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων Simpson στην εξίσωση για τον υπολογισμό του κεντροειδούς. Ισχύει λοιπόν η αρχική μορφή της 3.1.0.0.23, όμως στη συνέχεια θεωρείται ότι:

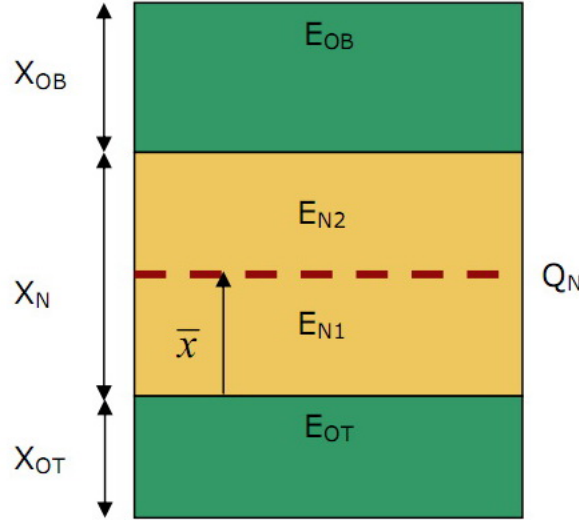
$$\Delta V_{OXT} = -E_{OXT}(0) \cdot \overline{x_{OXT}} - E_{OXT}(x_{OXT})(x_{OXT} - \overline{x_{OXT}}) \tag{3.1.0.0.24}$$

$$\Delta V_N = -E_N(x_{OXT}) \cdot \overline{x_N} - E_N(x_N)(x_N - \overline{x_N}) \tag{3.1.0.0.25}$$

$$\Delta V_{OXB} = -E_{OXB}(x_N) \cdot \overline{x_{OXB}} - E_{OXB}(x_{OXB})(x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}) \tag{3.1.0.0.26}$$

Ουσιαστικά δηλαδή θεωρείται διαφορετική κατανομή ηλεκτρικών πεδίων, αφού π.χ στην εξίσωση 3.1.0.0.23 θεωρούμε πεδίο $E_{OXT}(0)$ σε όλο το d_{OXT} , ενώ στην εξίσωση 3.1.0.0.24 θεωρούμε πεδίο $E_{OXT}(0)$ στο $\overline{x_{OXT}}$ και $E_{OXT}(x_{OXT})$ στο $x_{OXT} - \overline{x_{OXT}}$. Αυτή η προσέγγιση δεν είναι περιέργη, αν συνυπολογίσει κανείς το γεγονός ότι η θεώρηση του κεντροειδούς ως απείρως λεπτού επιφανειακού στρώματος φορτίου προέρχεται από τις ίδιες αυτές εργασίες και είναι αυτή η προσέγγιση που απαιτεί διαφορετικό μαθηματικό χειρισμό.

Έτσι λοιπόν, η εξίσωση γίνεται:



Σχήμα 3.3: Προσέγγιση κεντροειδούς

$$\begin{aligned}
V_G &= \Delta V_{OXB} + \Delta V_N + \Delta V_{OXT} + \psi_s + \phi_{ms} \\
&= \psi_s + \phi_{ms} - E_{OXT}(0)\overline{x_{OXT}} - E_{OXT}(x_{OXT})(x_{OXT} - \overline{x_{OXT}}) - \frac{Q_{OXT}}{\epsilon_{ox}}\overline{x_{OXT}} \\
&\quad - E_N(x_{OXT})\overline{x_N} - E_N(x_N)(x_N - \overline{x_N}) - \frac{Q_N}{\epsilon_N}\overline{x_N} - E_{OXB}(x_N)\overline{x_{OXB}} \\
&\quad - E_{OXB}(x_{OXB})(x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}) - \frac{Q_{OXB}}{\epsilon_{ox}}\overline{x_{OXB}} \\
&= \psi_s + \phi_{ms} - (Q_{SO} + Q_{Si})\frac{\overline{x_{OXT}}}{\epsilon_{ox}} - (Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT})\left(\frac{x_{OXT} - \overline{x_{OXT}}}{\epsilon_{ox}}\right) \\
&\quad - (Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON})\frac{\overline{x_N}}{\epsilon_N} - (Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON} + Q_N)\frac{x_N - \overline{x_N}}{\epsilon_N} \\
&\quad - (Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON} + Q_N + Q_{NO})\frac{\overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} \\
&\quad - (Q_{SO} + Q_{Si} + Q_{OXT} + Q_{ON} + Q_N + Q_{NO} + Q_{OXB})\frac{x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} \\
&= \psi_s + \phi_{ms} - Q_{SO}\left(\frac{\overline{x_{OXT}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_{OXT} - \overline{x_{OXT}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{\overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{x_N - \overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{\overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}}\right) \\
&\quad - Q_{Si}\left(\frac{\overline{x_{OXT}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_{OXT} - \overline{x_{OXT}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{\overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{x_N - \overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{\overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}}\right) \\
&\quad - Q_{OXT}\left(\frac{x_{OXT} - \overline{x_{OXT}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{\overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{x_N - \overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{\overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}}\right) \\
&\quad - Q_{ON}\left(\frac{\overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{x_N - \overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{\overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}}\right) \\
&\quad - Q_N\left(\frac{x_N - \overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{\overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}}\right) \\
&\quad - Q_{NO}\left(\frac{\overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}}\right) - Q_{OXB}\left(\frac{x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}}\right) \\
&= \psi_s + \phi_{ms} - Q_{SO}\left(\frac{x_{OXT}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_N}{\epsilon_N} + \frac{x_{OXB}}{\epsilon_{ox}}\right) - Q_{Si}\left(\frac{x_{OXT}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_N}{\epsilon_N} + \frac{x_{OXB}}{\epsilon_{ox}}\right) \\
&\quad - Q_{OXT}\left(\frac{x_{OXT} - \overline{x_{OXT}}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_N}{\epsilon_N} + \frac{x_{OXB}}{\epsilon_{ox}}\right) - Q_{ON}\left(\frac{x_N}{\epsilon_N} + \frac{x_{OXB}}{\epsilon_{ox}}\right) - Q_N\left(\frac{x_N - \overline{x_N}}{\epsilon_N} + \frac{x_{OXB}}{\epsilon_{ox}}\right) \\
&\quad - Q_{NO}\frac{x_{OXB}}{\epsilon_{ox}} - Q_{OXB}\frac{x_{OXB} - \overline{x_{OXB}}}{\epsilon_{ox}} \tag{3.1.0.0.27}
\end{aligned}$$

Η σχέση 3.1.0.0.27 είναι η πιο δημοφιλής στη βιβλιογραφία σε ότι αφορά τον προσδιορισμό της τάσης πύλης του SONOS. Παρατηρεί κανείς ότι σε αντίθεση με την 3.1.0.0.23 η 3.1.0.0.27 χρησιμοποιεί τις συντεταγμένες x και όχι τα πάχη d .

Θεωρώντας ορισμένα φορτία ως μηδενικά η σχέση 3.1.0.0.27 μπορεί να απλοποιηθεί σημαντικά και να πάρει τη μορφή:

$$\begin{aligned} V_G &= \psi_s + \phi_{ms} - (Q_{SO} + Q_{Si}) \left(\frac{x_{OXT}}{\epsilon_{ox}} + \frac{x_N}{\epsilon_N} + \frac{x_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \right) - Q_N \left(\frac{x_N - \bar{x}_N}{\epsilon_N} + \frac{x_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \right) \\ &= \psi_s + \phi_{ms} - \frac{Q_{SO} + Q_{Si}}{C_{ONO}} - Q_N \left(\frac{x_N - \bar{x}_N}{\epsilon_N} + \frac{x_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \right) \end{aligned} \quad (3.1.0.0.28)$$

όπου:

C_{ONO} ή C_{eff} ή CET (Capacitive Equivalent Thickness): η ισοδύναμη χωρητικότητα ανα επιφάνεια του SONOS

Κατά τον ίδιο τρόπο μπορεί να οριστεί και το εξής μέγεθος:

x_{ONO} ή x_{eff} ή EOT (Equivalent Oxide Thickness): το ισοδύναμο πάχος του SONOS

Δηλαδή ισχύει:

$$C_{ONO} = \frac{\epsilon_{ox}}{x_{ONO}} \quad (3.1.0.0.29)$$

και επομένως:

$$x_{ONO} = x_{OXT} + \frac{\epsilon_{ox}}{\epsilon_N} x_N + x_{OXB} \quad (3.1.0.0.30)$$

Με βάση την Σχέση 3.1.0.0.28 μπορεί να υπολογιστεί τόσο η V_{FB} , όσο και η V_T .

Όταν το επιφανειακό δυναμικό γίνει μηδέν, η V_{FB} θα είναι:

$$V_{FB} = \phi_{ms} - \frac{Q_{SO}}{C_{ONO}} - Q_N \left(\frac{x_N - \bar{x}_N}{\epsilon_N} + \frac{x_{OXB}}{\epsilon_{ox}} \right) \quad (3.1.0.0.31)$$

Στην ισχυρή αντιστροφή λοιπόν η V_T θα είναι:

$$V_T = V_{FB} + 2\psi_B - \frac{Q_{Si}}{C_{ONO}} = V_{FB} + 2\psi_B - \frac{\sqrt{4\epsilon_s N_B \psi_B q}}{C_{ONO}} \quad (3.1.0.0.32)$$

Κεφάλαιο 4

Περιγραφή θέματος

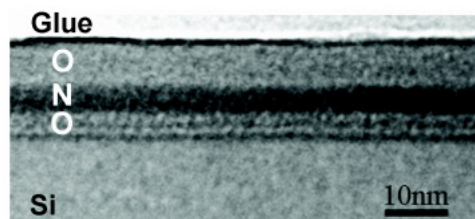
4.1 Δημοσιεύσεις ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

Η παρούσα διπλωματική εργασία έρχεται να επεκτείνει τα συμπεράσματα των δημοσιεύσεων [9] και [8]. Πιο συγκεκριμένα, η ομάδα του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος παρασκεύασε δείγματα SONOS βομβαρδίζοντας το νιτρίδιο του πυριτίου με ιόντα πυριτίου χαμηλής ενέργειας (1keV) και στη συνέχεια κατασκευάζοντας το στρώμα οξειδίου φραγής με υγρή οξείδωση χαμηλής θερμοκρασίας (850°C για 15 λεπτά). Το αποτέλεσμα ήταν πιο ισχυρά χαρακτηριστικά παγίδευσης φορτίου και ένα παράθυρο διατήρησης φορτίου της τάξης του 1.5V στους 125°C σε περίοδο 10 χρόνων.

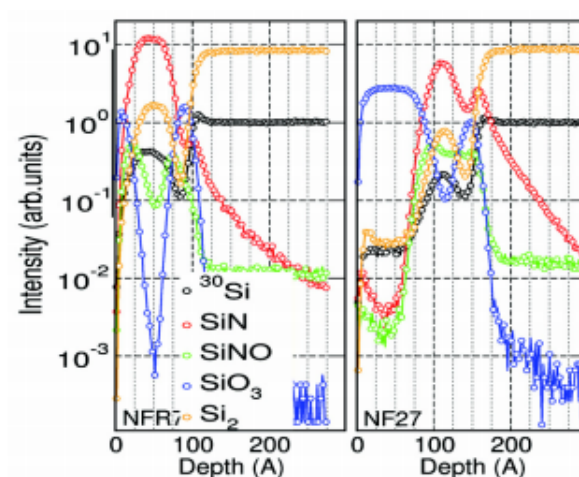
Αναλυτικότερα, πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου τύπου n (100) κατασκευάστηκε το οξείδιο σήραγγος πάχους 2.9nm με χρήση ξηρής οξείδωσης στους 850°C. Το επόμενο βήμα ήταν η εναπόθεση του στρώματος νιτρίδιου του πυριτίου πάχους 6nm που έγινε με LPCVD στους 800°C χρησιμοποιώντας ένα μίγμα διχλωροσιλάνης (SiH₂Cl₂) και αερίων αμμωνίας (NH₃). Περισσότερες πληροφορίες για τις διαδικασίες αυτές μπορεί να βρει κανείς σε οποιοδήποτε βιβλίο μικροηλεκτρονικής κατασκευής.

Το wafer μετά χωρίστηκε σε 4 δείγματα, τα οποία ονομάστηκαν Π, C1, C2 και C3. Το δείγμα Π υπέστη εμφύτευση ιόντων πυριτίου 1keV, $1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-2}$, πράγμα που εισήγαγε μια πληθώρα ατόμων πυριτίου στο νιτρίδιο. Έπειτα ακολούθησε η υγρή οξείδωση στους 850°C για 15 λεπτά που αναφέρθηκε προηγουμένως για τον σχηματισμό του οξειδίου φραγής. Τέλος, υπήρξε και θερμική ανόπτηση σε θάλαμο αζώτου για την μείωση των δομικών ανωμαλιών και κατά συνέπεια των ενεργειακών παγίδων εκτός του νιτρίδιου.

Τα τρία δείγματα ελέγχου C1, C2, C3 δεν είχαν ιόντα πυριτίου εμφυτευμένα στο νιτρίδιο τους. Το δείγμα C1 δεν υπέστη υγρή οξείδωση. Το δείγμα C2 υπέστη υγρή οξείδωση και διέφερε από το Π μόνο στο στάδιο της ιοντικής εμφύτευσης. Τέλος, στο δείγμα C3 κατασκευάστηκε οξείδιο φραγής με LPCVD στους 700°C χρησιμοποιώντας ένα μίγμα τετραεθυλωροσιλάνης και αερίων αμμωνίας, ακολουθούμενο από το τελευταίο βήμα της ανόπτησης



Σχήμα 4.1: Προφίλ TEM διατομής του δείγματος II

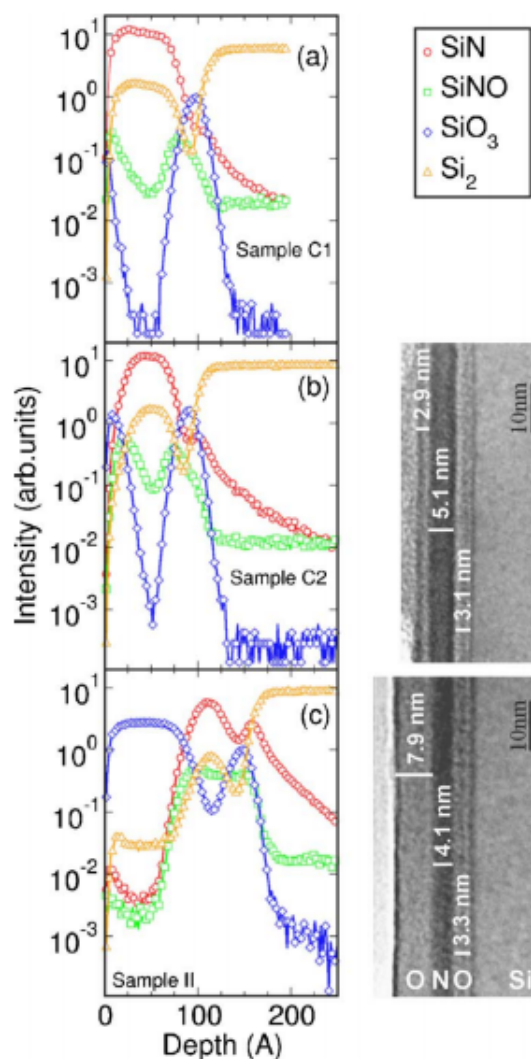


Σχήμα 4.2: Προφίλ ToF SIMS του μη εμφυτευμένου C2 (αριστερά) και εμφυτευμένου II (δεξιά) με ιόντα δείγματος

όπως προηγουμένως.

Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ο δομικός χαρακτηρισμός με χρήση Transmission Electron Microscopy που έγινε στο εμφυτευμένο με ιόντα δείγμα. Το οξειδίο φραγής που προέκυψε με την διαδικασία της υγρής οξείδωσης είναι πάχους 8nm. Όμως, στα μη εμφυτευμένα δείγματα η υγρή οξείδωση οδήγησε σε οξειδία φραγής πάχους μόνο 3nm. Έτσι, τα βελτιωμένα χαρακτηριστικά διατήρησης φορτίου των εμφυτευμένων δειγμάτων σχετίζονται άμεσα με το αυξημένο πάχος του οξειδίου φραγής, το οποίο εμποδίζει την διαρροή παγιδευμένου φορτίου προς το ηλεκτρόδιο της πύλης. Το δε αυξημένο πάχος σχετίζεται άμεσα με την ιοντική εμφύτευση, καθώς τα πλεονάζοντα άτομα πυριτίου στο εμφυτευμένο δείγμα συμμετέχουν στην χημική αντίδραση της υγρής οξείδωσης που ακολουθεί.

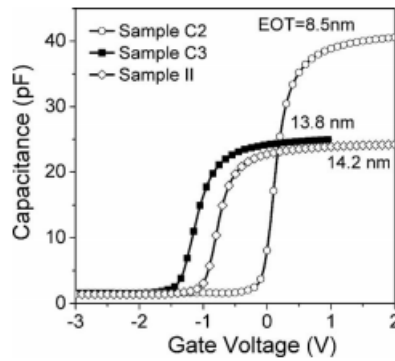
Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται ο δομικός χαρακτηρισμός με χρήση Time of Flight SIMS που έγινε στο μη εμφυτευμένο (C2) και εμφυτευμένο με ιόντα (II) δείγμα. Στο Σχήμα 4.3 [9] παρουσιάζονται ενοποιημένα όλα τα προφίλ TEM και ToF SIMS για τα δείγματα C1, C2 και II. Παρατηρεί κανείς τα σήματα SiN, SiON, SiO₃ και το σήμα δευτερευόντων ιόντων πυριτίου Si₂. Η κατανομή των σημάτων ως προς το βάθος προσδιορίζει αφενός μεν τη σύσταση των τριών στρωμάτων της δομής, αφετέρου δε το πάχος των στρωμάτων της διηλεκτρικής στοιβας.



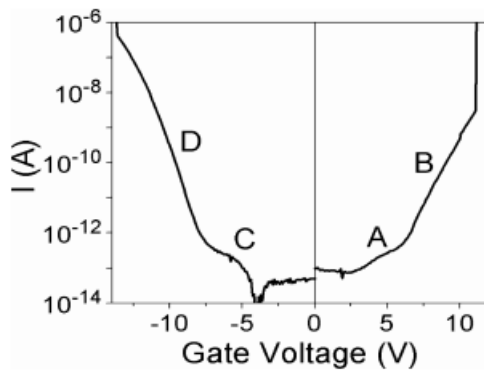
Σχήμα 4.3: Προφίλ ToF SIMS του δειγμάτων C1, C2 και II

Κατάρχας παρατηρείται μια αντιστοιχία μεταξύ των προφίλ TEM και ToF SIMS. Στο δείγμα C1, που δεν υπέστη υγρή οξειδωση, παρατηρεί κανείς μια διπλή δομή και όχι τριπλή καθώς λείπει το οξείδιο φραγής. Αντιθέτως, στο δείγμα C2 τα σήματα SiON και SiO₃ υποδηλώνουν την παρουσία οξειδίου φραγής. Σε ότι αφορά το εμφυτευμένο δείγμα II το σήμα SiO₃ δείχνει ότι υπάρχει οξείδιο φραγής και ότι αποτελείται από διοξείδιο του πυριτίου. Σε σύγκριση με το δείγμα C2 το σήμα SiON είναι πιο έντονο στην περιοχή του νιτριδίου του πυριτίου και εκτείνεται μέχρι το υπόστρωμα. Αυτό υποδηλώνει ότι το νιτρίδιο του πυριτίου είναι εμπλουτισμένο με οξυγόνο και ότι υπάρχει μια συγκέντρωση αζώτου στην διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ οξειδίου σήραγγος και υποστρώματος. Το τελευταίο χαρακτηριστικό μάλιστα γίνεται πιο εμφανές από την χαρακτηριστική κορυφή που εμφανίζει το σήμα SiN στην διαχωριστική επιφάνεια.

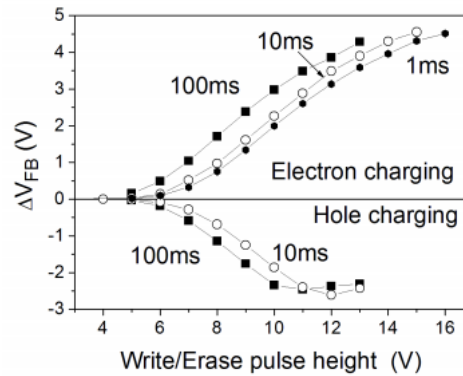
Το συμπέρασμα του δομικού χαρακτηρισμού είναι ότι η εμφύτευση ιόντων πυριτίου χαμη-



Σχήμα 4.4: Χαρακτηριστικές C-V των δειγμάτων C1, C2 και II



Σχήμα 4.5: I-V

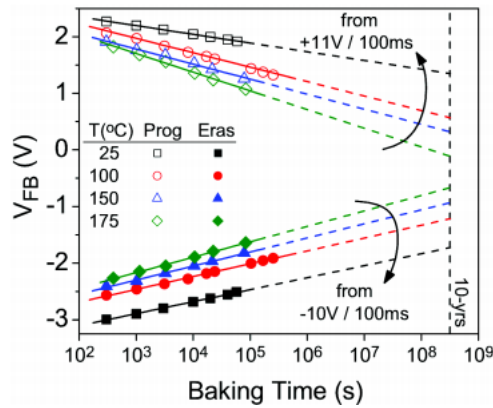


Σχήμα 4.6: $\Delta V_{FB}-V_G$

λής ενέργειας σε λεπτά στρώματα νιτρίδιου του πυριτίου παράγει μια ουσία που οξειδώνεται πολύ εύκολα και κατά συνέπεια είναι δυνατός ο σχηματισμός οξειδίων μεγάλου πάχους σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το οξυγόνο στο νιτρίδιο του πυριτίου αναφέρεται σε διάφορες πηγές [18] ως βελτιωτικός παράγοντας των ιδιοτήτων παγίδευσης φορτίου, ενώ το άζωτο που συγκεντρώνεται στο όριο του υποστρώματος θα μπορούσε να οδηγήσει σε βελτιωμένα χαρακτηριστικά αντοχής της μνήμης [8].

Σε ότι αφορά τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό εξετάζονται αρχικά στο Σχήμα 4.4 οι χαρακτηριστικές C-V των δειγμάτων C1, C2 και II. Από την μέγιστη τιμή της χωρητικότητας προκύπτει το EOT για κάθε δείγμα το οποίο παρατίθεται επίσης στο ίδιο Σχήμα. Παρατηρεί κανείς ότι το εμφυτευμένο με ιόντα δείγμα II έχει πολύ μεγαλύτερο EOT από το C2. Επίσης, σε σύγκριση με το δείγμα C3, οι V_{FB} των δειγμάτων C2 και II είναι μετατοπισμένες σε πιο θετικές τιμές, κάτι που υποδεικνύει αρνητικό φορτίο τύπου Q_f .

Στο Σχήμα 4.5 παρατηρεί κανείς την I-V χαρακτηριστική του εμφυτευμένου δείγματος II. Στις περιοχές χαμηλής πόλωσης A και C παρατηρεί κανείς μια μικρή αύξηση του ρεύματος και στις δύο πολικότητες. Η αιτία του φαινομένου αυτού εικάζεται ότι είναι μια αρχική έγχυση φορτίου από το υπόστρωμα στο νιτρίδιο και η μετέπειτα παγίδευσή του. Παρατηρεί κανείς ότι πάνω από τα 6.5V επικρατεί το φαινόμενο της έγχυσης ηλεκτρονίων από το υπόστρωμα



Σχήμα 4.7: Χαρακτηριστική διατήρησης φορτίου V_{FB} -Baking Time εμφυτευμένου δείγματος

στο νιτρίδιο λόγω του ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου που αναπτύσσεται κατά μήκος του οξειδίου σήραγγος. Για τάσεις μικρότερες των $8V$ επικρατεί η έγχυση ηλεκτρονίων από την πύλη, με ταυτόχρονη έγχυση οπών από το υπόστρωμα.

Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται η μετατόπιση της τάσης επίπεδης ζώνης του εμφυτευμένου δείγματος ως συνάρτηση του πλάτους της εφαρμοζόμενης τάσης εγγραφής/διαγραφής στην πύλη. Η απεικόνιση γίνεται για έναν μοναδικό τετραγωνικό παλμό διάρκειας 100, 10 και $1ms$ αντίστοιχα. Η εφαρμογή των παλμών ήταν διαδοχική, δηλαδή η διάταξη διατηρούσε το φορτίο της προηγούμενης εγγραφής όταν γινόταν η επόμενη. Παρατηρείται ότι η διάταξη παγιδεύει και ηλεκτρόνια και οπές και το παράθυρο υπερβαίνει τα $4V$. Παρατηρεί επίσης κανείς τον κορεσμό των καμπυλών, κάτι που οφείλεται στα φαινόμενα over-write και over-erase αντίστοιχα, δηλαδή την διαρροή οπών και ηλεκτρονίων από την πύλη αντίστοιχα, η οποία εξουδετερώνει το όποιο επιπλέον φορτίο του υποστρώματος καταφέρνει να παγιδεύσει στο νιτρίδιο ο μεγαλύτερος παλμός.

Στο Σχήμα 4.7 φαίνονται τα χαρακτηριστικά διατήρησης φορτίου των δειγμάτων σε διάφορες θερμοκρασίες. Αρχικά οι διατάξεις τροφοδοτήθηκαν με παλμούς $+11V/100ms$ για φορτίο ηλεκτρονίων (προγραμματισμός) και $-10V/100ms$ για φορτίο οπών (διαγραφή) και μετά τοποθετήθηκαν σε φούρνο συγκεκριμένης θερμοκρασίας ώστε να παρατηρηθεί η εξέλιξη του αποθηκευμένου φορτίου. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.1, ο ρυθμός αποπαγίδευσης ηλεκτρονίων αυξάνεται από $0.15V/decade$ στους $25^{\circ}C$ σε $0.33V/decade$ στους $175^{\circ}C$, ενώ στην περιοχή $100-150^{\circ}C$ παραμένει αμετάβλητος. Στην περίπτωση των οπών ο ρυθμός αποπαγίδευσης αυξάνεται ελαφρά από $0.21V/decade$ στους $25^{\circ}C$ σε $0.27V/decade$ στους $175^{\circ}C$. Η τάση κατωφλιού στην αποπαγίδευση οπών παραμένει αμετάβλητη με τη θερμοκρασία λόγω της αποθήκευσης των οπών σε βαθιές ενεργειακές παγίδες μέσα στο νιτρίδιο. Η ανεξαρτησία του ρυθμού αποπαγίδευσης οπών από την θερμοκρασία υποδηλώνει ότι ο μηχανισμός αποπαγίδευσης δεν ενεργοποιείται θερμικά, κάτι που παραπέμπει σε φαινόμενο σήραγγος. Το τελικό συμπέρασμα είναι ότι η παγίδευση ηλεκτρονίων και οπών γίνεται τόσο σε βαθιές όσο και σε ρηχές ενεργειακές παγίδες. Με γραμμική παρεμβολή μπορεί να υπολογιστεί ότι το παράθυρο

Πίνακας 4.1: Ρυθμός αποπαγίδευσης φορτίου συναρτήσει της θερμοκρασίας για το εμφυτευμένο δείγμα

Θερμοκρασία (°C)	Ρυθμός αποπαγίδευσης ηλεκτρονίων (V/decade)	Ρυθμός αποπαγίδευσης οπών (V/decade)
25	0.15	0.21
100	0.25	0.23
125	0.25	0.24
150	0.26	0.25
175	0.33	0.27

σε 10 χρόνια θα είναι της τάξης των $3V$ στους $25^{\circ}C$ και $1.5V$ στους $125^{\circ}C$.

Σαν συμπέρασμα μπορεί κανείς να κατανοήσει ότι αυτό που στην ουσία επιτυγχάνει η έρευνα του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος είναι να παρουσιάσει έναν τρόπο σχηματισμού ενός αξιόπιστου οξειδίου φραγής σε χαμηλές θερμοκρασίες. Συνήθως το οξείδιο φραγής κατασκευάζεται είτε με τεχνικές εναπόθεσης είτε με υγρή οξείδωση σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των $1000^{\circ}C$. Η τελευταία μέθοδος είναι αυτή που προτιμάται συνήθως γιατί παράγει ένα οξείδιο φραγής καλύτερης ποιότητας και επίσης οδηγεί στον σχηματισμό ενός στρώματος οξυνιτρίδιου μεταξύ του οξειδίου φραγής και του νιτρίδιου, το οποίο έχει μεγάλο αριθμό παγίδων. Το πρόβλημα είναι ότι η απαίτηση για τόσο υψηλές θερμοκρασίες δημιουργεί πρόβλημα στην χρησιμοποίηση της μεθόδου καθώς οι διαστάσεις μικραίνουν. Όμως η ιοντική εμφύτευση με ιόντα πυριτίου επιτρέπει την δημιουργία ενός αξιόπιστου οξειδίου φραγής ακόμα και σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

4.2 Θέμα εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία επεκτείνει το προηγούμενο σκεπτικό και διερευνά την επίδραση του παράγοντα των ιόντων προς εμφύτευση στα δομικά και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά της διάταξης. Ειδικότερα, επανεξετάζεται η εμφύτευση του νιτρίδιου με ιόντα πυριτίου, παράλληλα όμως εξετάζονται και δείγματα εμφυτευμένα με ιόντα αζώτου και αργού. Η τελική σύγκριση των αποτελεσμάτων οδηγεί σε μία σειρά από συμπεράσματα για τον τρόπο με τον οποίο η κάθε εμφύτευση επηρεάζει την απόδοση της διάταξης.

Αναλυτικότερα, πάνω σε υπόστρωμα πυριτίου τύπου n (100) κατασκευάστηκε το οξείδιο σήραγγος πάχους $2.5nm$ με χρήση ξηρής οξείδωσης στους $800^{\circ}C$. Το επόμενο βήμα ήταν η εναπόθεση του στρώματος νιτρίδιου του πυριτίου πάχους $6.5-7nm$ που έγινε με LPCVD στους $800^{\circ}C$ χρησιμοποιώντας ένα μίγμα διχλωροσιλάνης (SiH_2Cl_2) και αερίων αμμωνίας (NH_3). Το wafer μετά χωρίστηκε σε 4 δείγματα, τα οποία ονομάστηκαν NOR, NO, NR και NP. Το δείγμα NO υπέστη εμφύτευση ιόντων πυριτίου, το NR ιόντων αζώτου και το NP ιόντων αργού. Το δείγμα NOR δεν είχε καμία ιοντική εμφύτευση, όπως ακριβώς και το C2 της προηγούμενης

Πίνακας 4.2: Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά δειγμάτων

Sample	Substrate type	SiO ₂ Thick.	Si ₃ N ₄ Thick.	Implantation dose and energy (20Jan2008)	Post Implantation Cleaning	Wet Oxidation (850°C/15min)	Post Oxidation Annealing (950°C/30min)
NOR	n (1-2 Ohm/cm)	2.5nm	6.5-7nm	NO	YES	YES	YES
NO	n (1-2 Ohm/cm)	2.5nm	6.5-7nm	Si1.0 × 10 ¹⁶ cm ⁻² 1keV	YES	YES	YES
NR	n (1-2 Ohm/cm)	2.5nm	6.5-7nm	N1.0 × 10 ¹⁶ cm ⁻² 0.65keV	YES	YES	YES
NP	n (1-2 Ohm/cm)	2.5nm	6.5-7nm	Ar1.0 × 10 ¹⁶ cm ⁻² 1keV	YES	YES	YES

έρευνας. Όλες οι εμφυτεύσεις είχαν ενέργεια και δόση αντίστοιχα 1keV και $1.0 \times 10^{16} \text{cm}^{-2}$. Έπειτα ακολούθησε υγρή οξείδωση στους 850°C για 15 λεπτά για τον σχηματισμό του οξειδίου φραγής. Τέλος, υπήρξε και θερμική ανόπτηση σε θάλαμο αζώτου (950°C για 30 λεπτά) για την μείωση των δομικών ανωμαλιών και κατά συνέπεια των ενεργειακών παγίδων εκτός του νιτριδίου. Αναλυτικότερα, ο Πίνακας 4.2 συνοψίζει τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των δειγμάτων.

Ο δομικός και ηλεκτρικός χαρακτηρισμός στον οποίο υποβλήθηκαν τα δείγματα αναλύεται διεξοδικά στο επόμενο Κεφάλαιο.

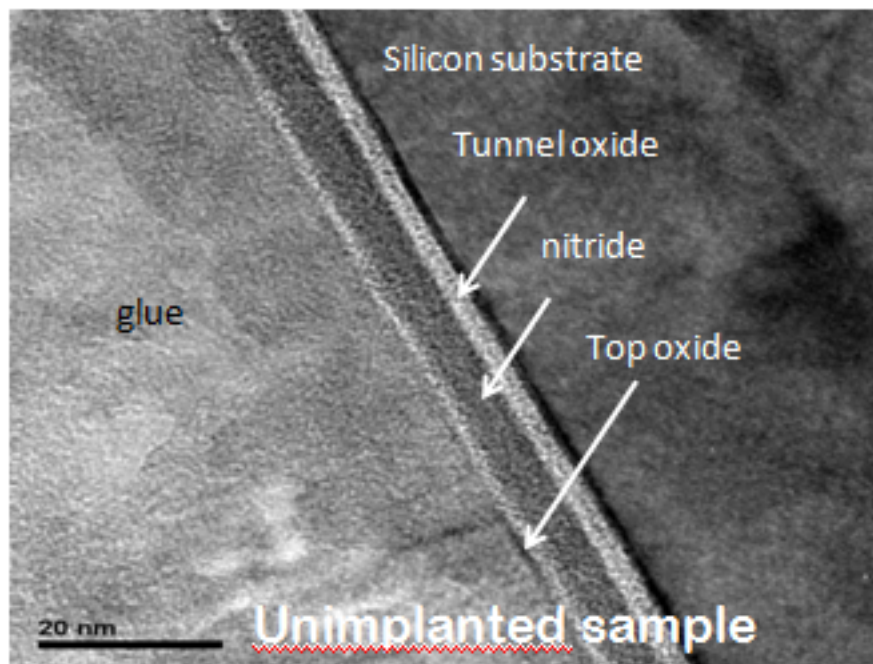
Κεφάλαιο 5

Χαρακτηρισμός δειγμάτων

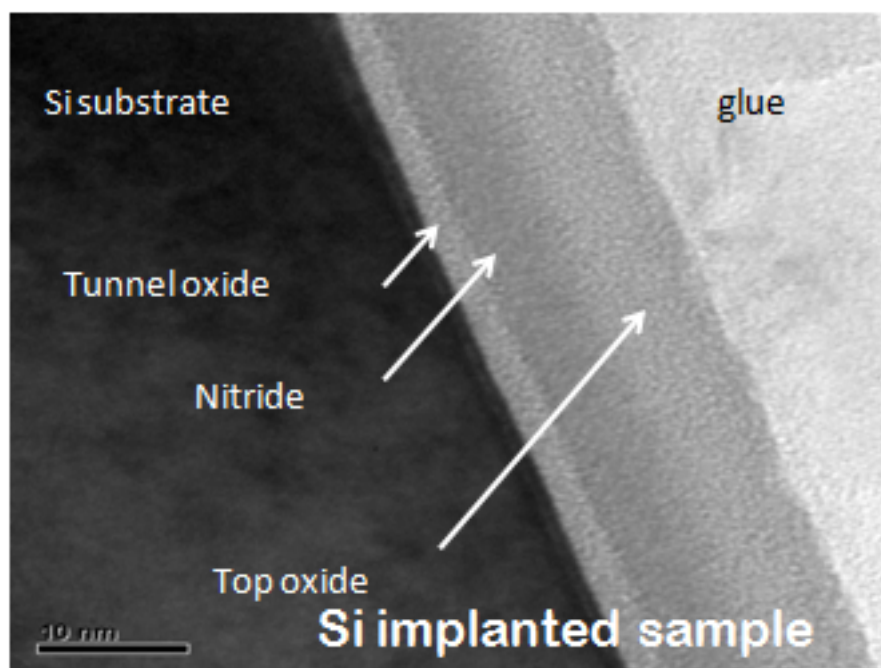
5.1 Δομικός χαρακτηρισμός

Ο δομικός χαρακτηρισμός διενεργήθηκε από τον κ. Γιαννακόπουλο στο Ινστιτούτο Επιστήμης Υλικών του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Τα τέσσερα δείγματα κόπηκαν σε κομμάτια και εξετάστηκαν με Transmission Electron Microscopy.

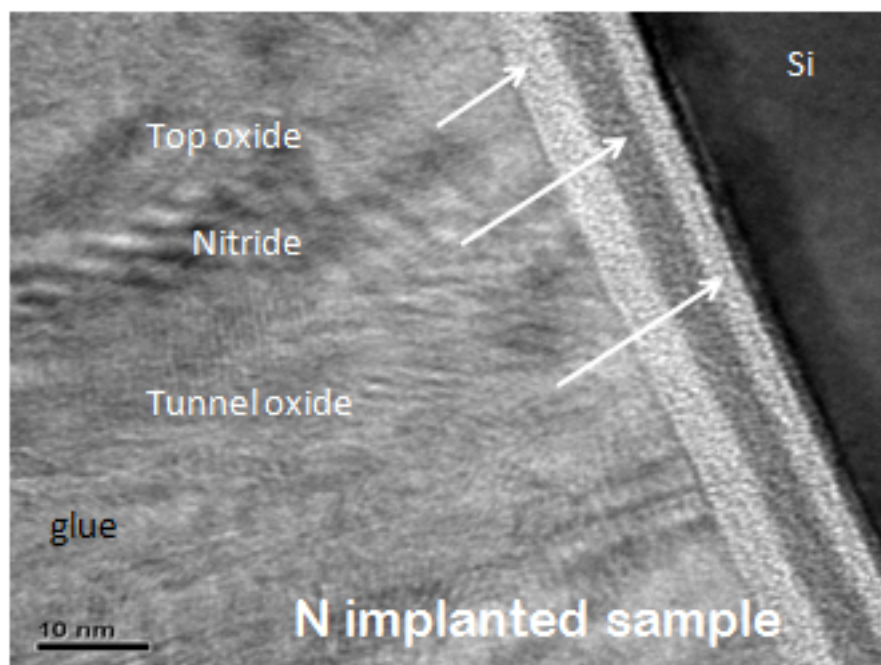
Στα Σχήματα 5.1, 5.2, 5.3 και 5.4 φαίνονται κατά σειρά τα προφίλ TEM των τεσσάρων δειγμάτων που μελετήθηκαν. Μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι και τα τέσσερα δείγματα παρουσιάζουν μία τριπλή δομή ONO με στρώματα που είναι ομοιόμορφα σε πάχος. Τα πάχη που προέκυψαν από τον δομικό χαρακτηρισμό αναφέρονται στον Πίνακα 5.1. Σε ότι αφορά το μη εμφυτευμένο με ιόντα δείγμα NOR παρατηρεί κανείς ότι, απουσία ιόντων, η χαμηλή



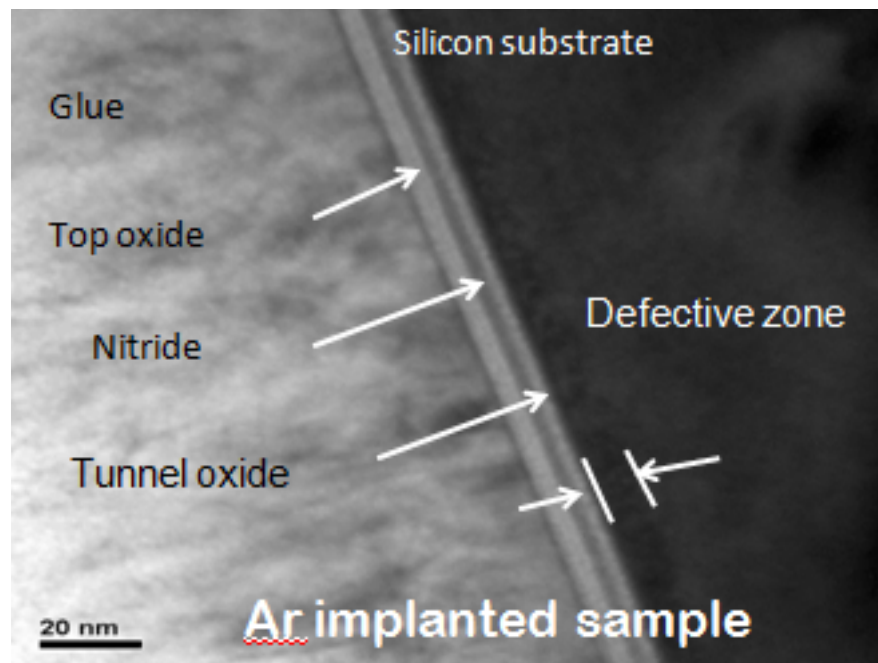
Σχήμα 5.1: Προφίλ TEM διατομής του μη εμφυτευμένου με ιόντα δείγματος NOR



Σχήμα 5.2: Προφίλ TEM διατομής του εμφυτευμένου με ιόντα πυριτίου δείγματος NO



Σχήμα 5.3: Προφίλ TEM διατομής του εμφυτευμένου με ιόντα αζώτου δείγματος NR



Σχήμα 5.4: Προφίλ TEM διατομής του εμφυτευμένου με ιόντα αργού δείγματος NP

Πίνακας 5.1: Πάχη δειγμάτων

Sample	Tunnel Oxide Thickness (nm)	Nitride Layer Thickness (nm)	Control Oxide Thickness (nm)	EOT (nm)
NOR (Unimplanted)	2.5	6	1-1.5	9.2
NO (Si-implanted)	2.5	7	7.5	15.2
NR (N-implanted)	2.5	4.5	4.2	10
NP (Ar-implanted)	2.2	3.5	5	10.8

θερμοκρασία στην οποία έγινε η υγρή οξειδωση (850°C) δεν ήταν αρκετή για να δημιουργήσει οξειδίο φραγής ικανού πάχους. Αυτό οδήγησε σε εξαιρετικά λεπτό οξειδίο φραγής, πάχους μόλις $1 - 1.5\text{nm}$. Το εμφυτευμένο με ιόντα πυριτίου δείγμα NO επαναλαμβάνει τη συμπεριφορά που έδειξε και στις προηγούμενες μελέτες [9], [8]. Τα πλεονάζοντα άτομα πυριτίου στο εμφυτευμένο δείγμα, σε συνδυασμό με τις δομικές ανωμαλίες που προέκυψαν στο νιτρίδιο λόγω της ιοντικής εμφύτευσης οδήγησαν σε εξαιρετικά παχύ οξειδίο φραγής (7.5nm). Οι δομικές αυτές ανωμαλίες εικάζεται ότι μειώνουν την ενέργεια ενεργοποίησης της υγρής οξειδωσης.

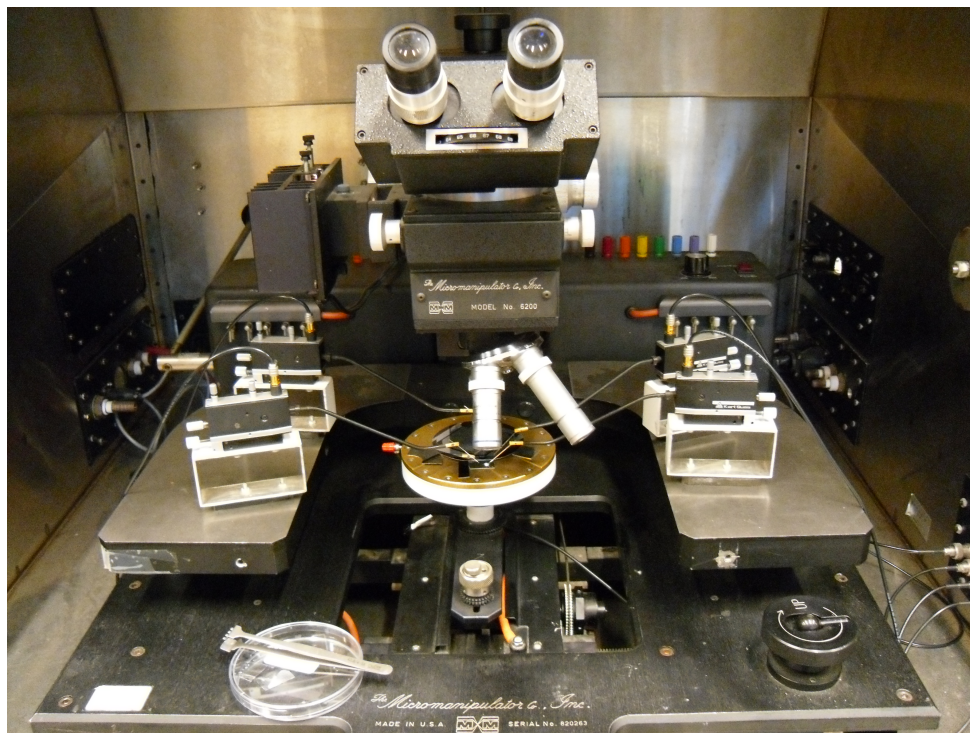
Σε ότι αφορά τα δύο δείγματα που εξετάζονται για πρώτη φορά και είναι εμφυτευμένα με ιόντα αζώτου (NR) και αργού (NP) αντίστοιχα το πρώτο πράγμα που παρατηρεί κανείς είναι ότι το νιτρίδιο του πυριτίου είναι μικρότερο σε πάχος από αυτό του μη εμφυτευμένου δείγματος. Αυτό σημαίνει ότι κατά τη διάρκεια της υγρής οξειδωσης που ακολουθεί ένα μέρος του νιτρίδιου καταναλώνεται ως τμήμα της χημικής αντίδρασης. Επιπροσθέτως, οι ιοντικές αυτές εμφυτεύσεις, όπως και στην περίπτωση του πυριτίου, εισάγουν μια σειρά από δομικά ελαττώματα στο νιτρίδιο όπως κενές θέσεις, σπασμένοι δεσμοί κλπ που μειώνουν την ενέργεια ενεργοποίησης της υγρής οξειδωσης. Μάλιστα, στην περίπτωση του αργού, επειδή ο ατομικός αριθμός του στοιχείου είναι πολύ μεγάλος, οι δομικές αυτές ανωμαλίες είναι τόσο μαζικές σε έκταση ώστε έχουν δημιουργήσει μια ελαττωματική περιοχή στην διάταξη, η οποία ξεκάθαρα φαίνεται στο Σχήμα 5.4.

5.2 Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός

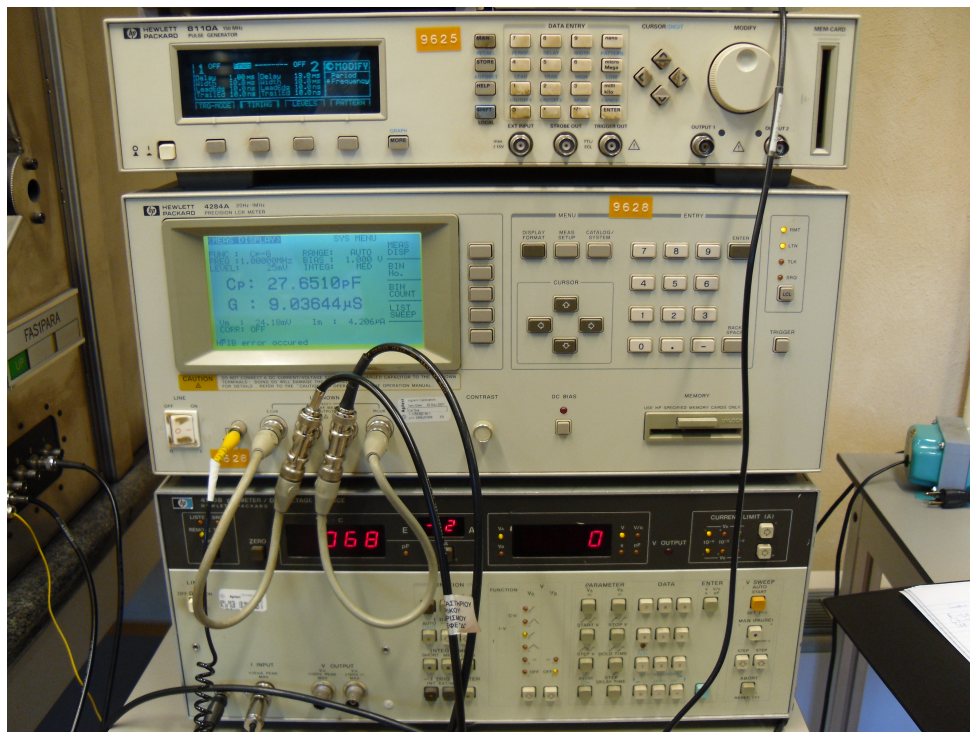
5.2.1 Μέθοδοι

Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός διενεργήθηκε από τον συγγραφέα στο Εργαστήριο Ηλεκτρικού Χαρακτηρισμού του Ινστιτούτου Μικροηλεκτρονικής του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε έναν Micromanipulator που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.5. Για την διενέργεια του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού χρησιμοποιήθηκε ένα "καपाσιτόμετρο" Hewlett Packard 4284A LCR Meter, ένα αμπερόμετρο με πηγή τάσης Hewlett Packard 4140B pA Meter / Voltage Source, μία γεννήτρια παλμών Hewlett Packard 8110A Pulse Generator, ένας φούρνος Binder και το λογισμικό Labview εγκατεστημένο σε έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Με την έναρξη των πειραμάτων το δείγμα τοποθετείται πάνω στην στρογγυλή βάση του Micromanipulator και γίνονται οι κατάλληλες ρυθμίσεις στον μηχανισμό της βάσης ώστε να μπορεί κανείς να δει καθαρά την επιφάνεια του δείγματος. Σε αυτή την περίπτωση θα παρατηρήσει κανείς ότι η επιφάνεια του δείγματος αποτελείται από μερικά επαναλαμβανόμενα σχήματα. Τα σχήματα είναι ένα τετράγωνο μεγάλου μεγέθους, ένα μεσαίου μεγέθους, ένας κύκλος και τρία μικρά τετράγωνα. Τα τρία τελευταία μικρά τετράγωνα είναι οι πυκνωτές στην κορυφή των οποίων πρέπει να τοποθετηθεί η ακίδα του Micromanipulator. Πολύ προσεκτικά λοιπόν επιλέγεται μία από τις τέσσερις ακίδες και ακουμπά σε ένα μικρό τετράγωνο. Η ακί-



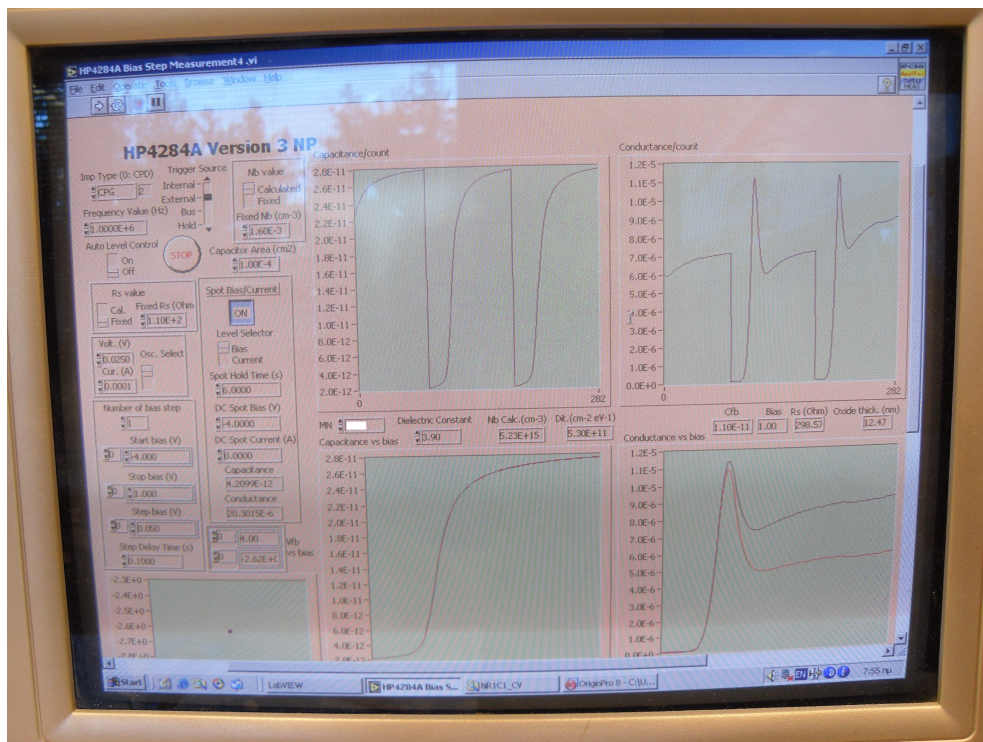
Σχήμα 5.5: Micromanipulator



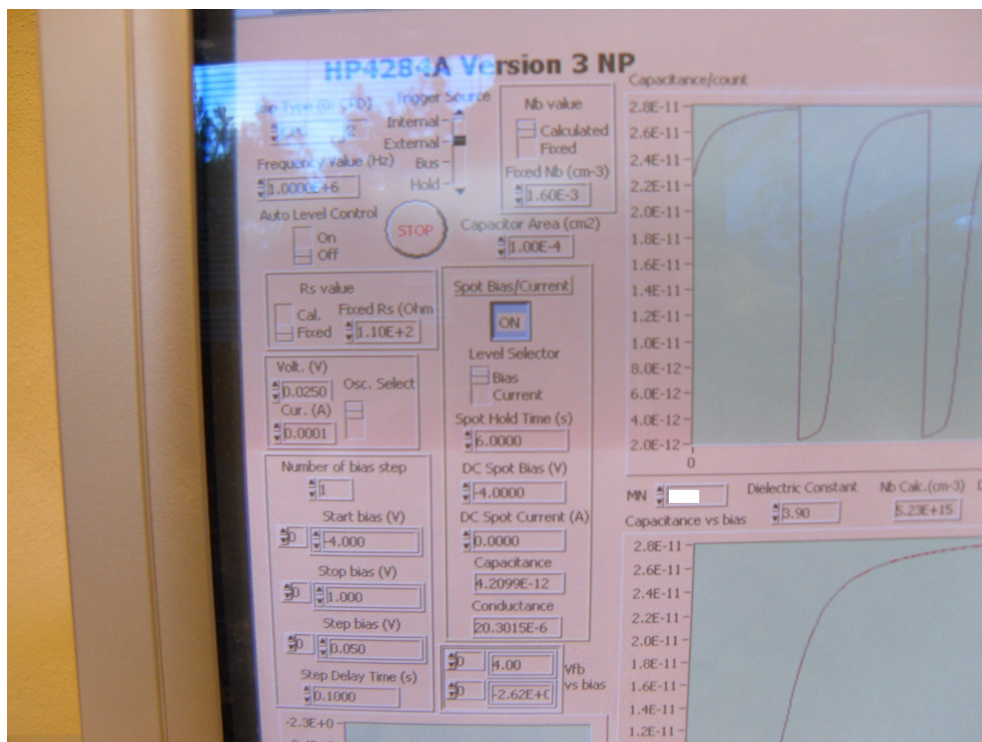
Σχήμα 5.6: Πάνω:HP 8110A, Μέση:HP 4284A, Κάτω:HP 4140B



Σχήμα 5.7: Φούρνος Binder



Σχήμα 5.8: Λογισμικό Labview

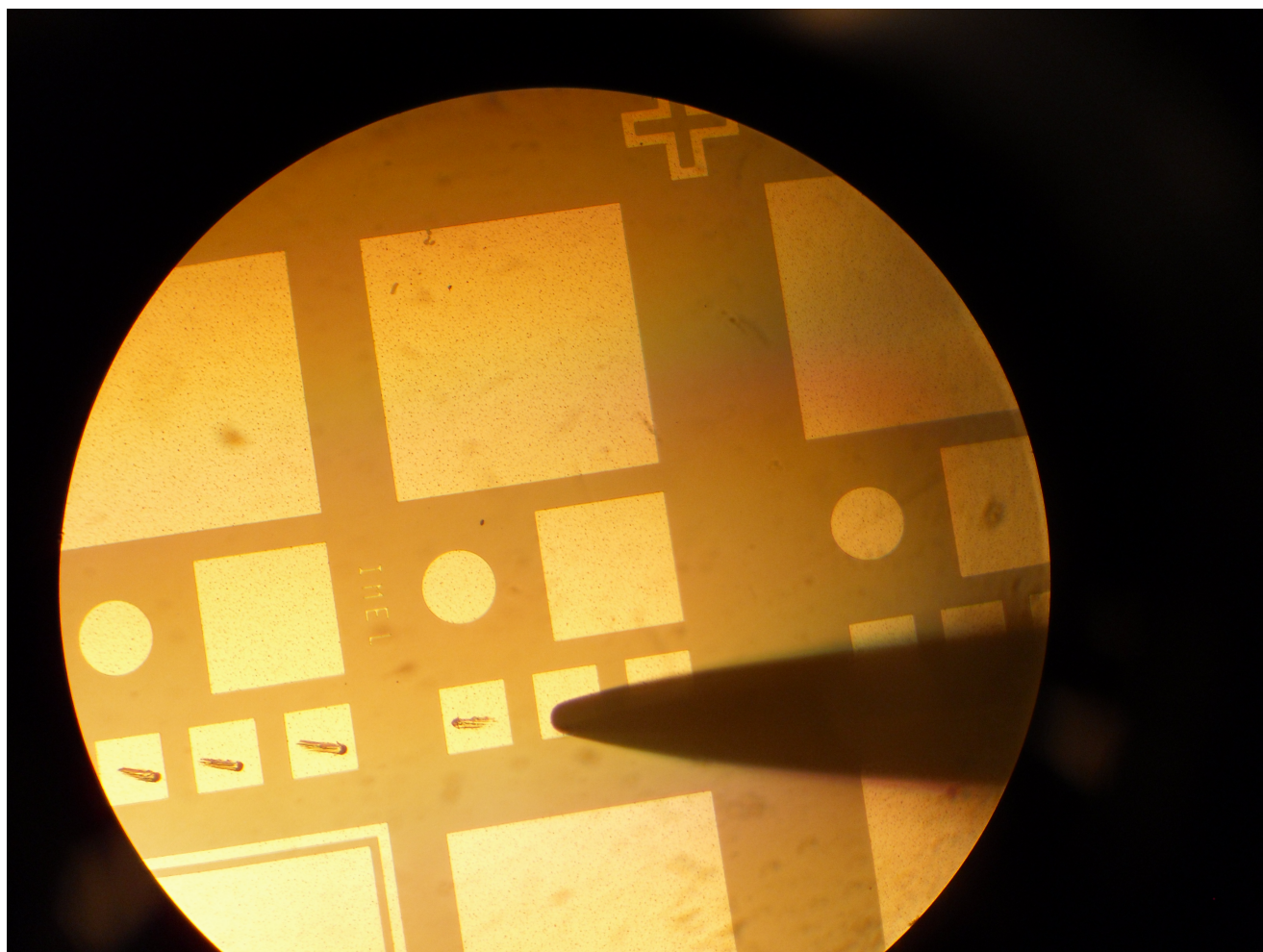


Σχήμα 5.9: Παράμετροι λογισμικού Labview

δα δεν πρέπει απλώς να ακουμπήσει αλλά και να "σκάψει" λίγο την επιφάνει του δείγματος, χωρίς όμως να προξενήσει ανεπανόρθωτη ζημιά στον πυκνωτή. Το τελικό αποτέλεσμα που παρατηρείται από τον Micromanipulator φαίνεται στο Σχήμα 5.10. Παρατηρεί κανείς την ακίδα, που κάτω από το μικροσκόπιο μοιάζει σαν ένα στυλό, να ακουμπά σε έναν πυκνωτή για να παρθεί μια μέτρηση, τους τέσσερις "σκαμμένους" πυκνωτές αριστερά, στους οποίους σε κάποια προηγούμενη στιγμή ακούμπησε η ακίδα για να παρθεί μια μέτρηση και τους πυκνωτές δεξιά που είναι ανέπαφοι. Πριν παρθεί μια οποιαδήποτε "επίσημη" μέτρηση είναι απαραίτητο να γίνουν πρώτα δοκιμαστικές μετρήσεις πάνω σε πράγματα που είναι γνωστά και να συγκριθούν τα αποτελέσματα με αυτά του παρελθόντος ώστε να διαπιστωθεί σε τι κατάσταση βρίσκονται τα όργανα και τα καλώδια.

Αυτά πρέπει να γίνουν σε ότι αφορά τον Micromanipulator. Το επόμενο βήμα είναι οι ρυθμίσεις του Labview. Για να είμαστε πιο συγκεκριμένοι εδώ, το Labview δεν είναι το λογισμικό που φαίνεται στο Σχήμα 5.8. Το Labview επιτρέπει στον χρήστη να φτιάξει πάρα πολλά γραφικά περιβάλλοντα σαν αυτό του Σχήματος 5.8. Το Σχήμα 5.8 απλώς απεικονίζει το γραφικό περιβάλλον που έφτιαξαν στο Labview οι ερευνητές του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος. Κάποιος άλλος θα μπορούσε να φτιάξει κάτι εντελώς διαφορετικό.

Οι συχνότητες στις οποίες μελετήθηκαν τα δείγματα είναι οι ακόλουθες κατά φθίνουσα σειρά: 1MHz, 200kHz, 40kHz, 16kHz, 8kHz, 320Hz. Αυτές πρέπει να τοποθετηθούν στο πεδίο "Frequency Value (Hz)". Για παράδειγμα το 1MHz είναι $10^6 Hz$ και επομένως στο



Σχήμα 5.10: Ένα από τα τέσσερα δείγματα όπως φαίνεται κάτω από το μικροσκόπιο του Micromanipulator

πεδίο θα πρέπει να γραφεί "1E6". Στην ένδειξη "Capacitor Area (cm^2)" τοποθετείται η διατομή του πυκνωτή, η οποία είναι $100 \times 100 \mu m^2$ ή $1 \times 10^{-4} cm^2$. Άρα λοιπόν θα πρέπει να γραφεί "1E-4". Στα πεδία "Start Bias (V)", "Stop Bias (V)" και "Step Bias (V)" πρέπει να εισαχθούν η αρχική και τελική τιμή της τάσης πύλης, καθώς και το βήμα με το οποίο θα γίνει η μετάβαση από την αρχική στην τελική τιμή. Οι τιμές των πεδίων "Start Bias (V)" και "Stop Bias (V)" δεν είναι γνωστές από πριν και πολλές φορές πρέπει να πειραματιστεί κανείς σε διάφορες περιοχές τάσης για να βρει αυτήν που τον ενδιαφέρει. Στο πεδίο "Step Bias (V)" χρησιμοποιήθηκε η τιμή 0.05.

Το πεδίο "Number of bias step" χρησιμοποιείται όταν κανείς θέλει να διατρέξει την περιοχή τάσης που τον ενδιαφέρει πολλές φορές. Για παράδειγμα, αν κανείς βάλει στο πεδίο αυτό την τιμή 1 τότε η πύλη θα φορτιστεί με τάσεις αρχίζοντας από την τιμή "Start Bias (V)" και καταλήγοντας στην "Stop Bias (V)", αυξανόμενη κάθε φορά με βήμα "Step Bias (V)". Μετά οι μετρήσεις θα τελειώσουν και το Labview θα βγάλει ειδοποίηση για αποθήκευση του

αρχείου των μετρήσεων. Αν όμως βάλει κανείς την τιμή 2 τότε μόλις τελειώσει η προηγούμενη διαδικασία το Labview δεν θα σταματήσει αλλά θα διατρέξει άλλη μια φορά την περιοχή τάσης αρχίζοντας από την "Stop Bias (V)" (στην οποία ήδη βρίσκεται) και καταλήγοντας στην "Start Bias (V)", αυτή τη φορά με βήμα ίδιο σε πλάτος αλλά αντίθετο σε πρόσημο με το "Step Bias (V)". Η τάση της πύλης δηλαδή θα πάει "μπροσ-πίσω" στην περιοχή τάσης όσες φορές αναγράφεται στο πεδίο "Number of bias step".

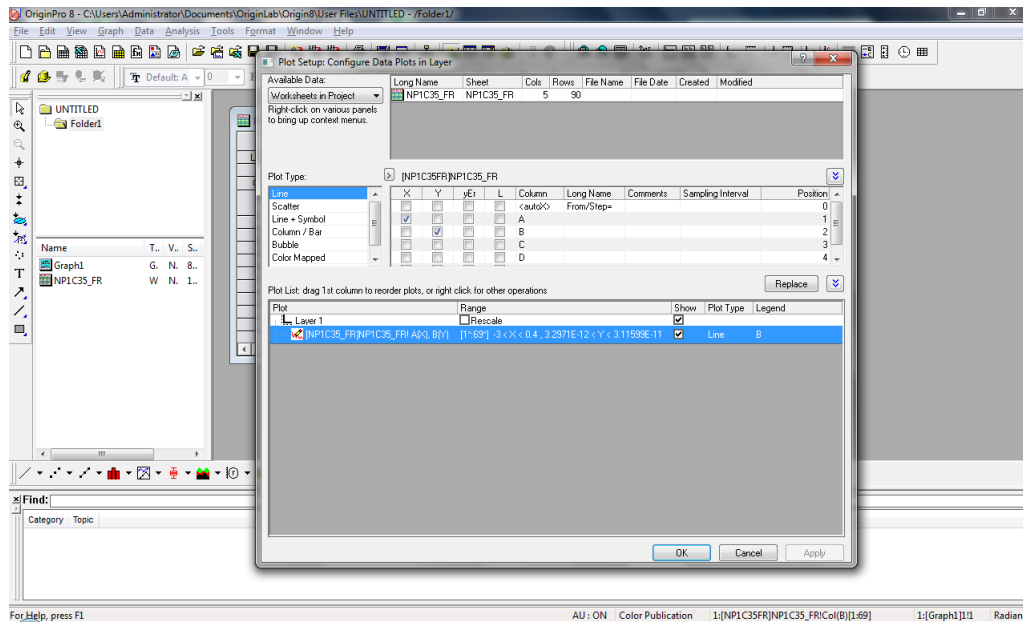
Οι τελευταίες ρυθμίσεις στις οποίες θα γίνει αναφορά είναι οι "Spot Bias/Current", "Spot Hold Time (s)" και "DC Spot Bias (V)". Σε ορισμένες περιπτώσεις πριν από μία μέτρηση (συνήθως C-V) είναι απαραίτητο να κρατηθεί λίγο η τάση σε μία συνηκευμένη τιμή. Έτσι λοιπόν, όταν το πεδίο "Spot Bias/Current" έχει την ένδειξη ON τότε το Labview θα κρατήσει την τάση στο "DC Spot Bias (V)" για χρόνο ίσο με "Spot Hold Time (s)". Συνήθως το "DC Spot Bias (V)" έχει την ίδια τιμή με το "Start Bias (V)" και η τιμή στο "Spot Hold Time (s)" είναι 6.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ένα πολύ σημαντικό στοιχείο. Όπως και σε ένα MOSFET, έτσι και στο SONOS, όταν εφαρμόζονται τάσεις κάτω από την V_{FB} αρχίζουν σταδιακά και έλκονται φορείς μειονότητας και καταλήγουμε τελικά στην δημιουργία στρώματος αντιστροφής, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. (Στο SONOS επίσης οι φορείς μειονότητας είναι επιθυμητοί και για λόγους αποθήκευσης στο νιτρίδιο.) Αυτό όμως είναι η θεωρία που αναφέρεται στα βιβλία. Στην πράξη, για να δημιουργηθεί αυτό το στρώμα και να φτάσει η διάταξη στην κατάσταση αντιστροφής θα περάσει πάρα πολύς καιρός! Υπερβολικά πολύς καιρός για ένα πείραμα ηλεκτρικού χαρακτηρισμού! Αυτό που γίνεται λοιπόν είναι ότι όταν υπάρχει μία μέτρηση (π.χ μια καμπύλη I-V) που γίνεται σε τάσεις που επιφέρουν αντιστροφή, τότε αυτή η μέτρηση γίνεται με το δείγμα φωτιζόμενο για ένα χρονικό διάστημα. Το φως δημιουργεί ζεύγη οπών-ηλεκτρονίων και κατά συνέπεια φορείς μειονότητας οι οποίοι στη συνέχεια είναι διαθέσιμοι για να σχηματιστεί το στρώμα αντιστροφής. Σε αντίθετη περίπτωση οι διαθέσιμοι φορείς μειονότητας είναι ελάχιστοι. Ο τρόπος που γίνεται ο φωτισμός είναι με μία πηγή φωτός ενσωματωμένη στον Micromanipulator και η διαδικασία είναι χειροκίνητη, δηλαδή δεν ελέγχεται από το Labview.

Μόλις το Labview ολοκληρώσει τη μέτρηση, θα βγάλει ειδοποίηση για αποθήκευση του αρχείου των μετρήσεων. Αφού γίνει η αποθήκευση, ακολουθεί η επεξεργασία των μετρήσεων. Ο συγγραφέας χρησιμοποίησε το λογισμικό Origin Pro και κατά συνέπεια τα επόμενα βήματα επεξεργασίας θα έχουν ως βάση αναφοράς το λογισμικό αυτό.

Μία μέτρηση, λοιπόν μπορεί να εισαχθεί στο Origin με την εξής διαδικασία:

- Πατάμε New Workbook.
- Πατάμε Import Single ASCII και επιλέγουμε το αρχείο των μετρήσεων που μας ενδια-



Σχήμα 5.11: Παράμετροι λογισμικού Origin

φέρει. Πατάμε Open.

- Πατάμε New Graph και διπλό κλικ στο κουτάκι "1" πάνω αριστερά.
- Φροντίζουμε στο πεδίο Available Data να γράφει Worksheets in Project και κάνουμε ένα κλικ στην γραμμή που αναφέρει το αρχείο των μετρήσεων.
- Μόλις γίνει το κλικ αμέσως από κάτω εμφανίζονται κάποια κουτάκια. Τα X, Y κλπ είναι οι άξονες του διαγράμματος ενώ τα A, B, C, D κλπ είναι οι στήλες του αρχείου των μετρήσεων. Επιλέγουμε για τον άξονα X την στήλη π.χ A και για τον άξονα Y την στήλη π.χ B κάνοντας tick τα αντίστοιχα κουτάκια.
- Πατάμε Add και OK.

Πολλές επιπλέον ρυθμίσεις μπορούν να γίνουν αν κάνει κανείς διπλό κλικ στην γραφική παράσταση ή στους άξονες του διαγράμματος. Αν επιθυμεί κανείς να εισάγει πολλαπλά αρχεία μετρήσεων μέσα σε ένα αρχείο Origin υπάρχει ειδική επιλογή Import Multiple ASCII. Ακολουθούν αναλυτικά οι διάφορες διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την διεξαγωγή του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού.

Χαρακτηριστική C-V

Για την μέτρηση μιας χαρακτηριστικής C-V εκτελούνται τα ακόλουθα βήματα:

- Συνδέουμε με BNC καλώδιο το Hprot του καπασιτομέτρου με την υποδοχή του Micro-manipulator στην οποία καταλήγει το καλώδιο της ακίδας.

Πίνακας 5.2: Ρυθμίσεις παραμέτρων Labview για C-V

Sample	Start Bias (V)	Stop Bias (V)	DC Spot Bias (V)
NOR (Unimplanted)	-1.5	1.5	-1.5
NO (Si-implanted)	-2.5	2.5	-2.5
NR (N-implanted)	-4	1	-4
NP (Ar-implanted)	-6	1.5	-6

- Συνδέουμε με BNC καλώδιο το Lpot του καπασιτομέτρου με την υποδοχή του Micro-manipulator στην οποία καταλήγει το κάτω μέρος της βάσης.
- Ρυθμίζουμε τις παραμέτρους "Start Bias (V)", "Stop Bias (V)", "Spot Hold Time (s)" και "DC Spot Bias (V)" σύμφωνα με τον Πίνακα 5.2. Θέτουμε "Number of bias step": 1 και "Spot Bias/Current": ON. Θέτουμε μία από τις έξι τιμές στο πεδίο "Frequency Value (Hz)". Οι τιμές των υπολοίπων πεδίων ("Capacitor Area (cm^2)", "Step Bias (V)") είναι αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.
- Αφήνουμε το φως του Micromanipulator αναμμένο, ώστε το δείγμα να φωτίζεται. Πατάμε Run. Η μέτρηση αρχίζει. Μετά από 2 δευτερόλεπτα κλείνουμε το φως ενώ η μέτρηση βρίσκεται σε εξέλιξη.
- Μόλις τελειώσει η μέτρηση, αποθηκεύουμε τα δεδομένα σε ένα αρχείο της επιλογής μας. Η επεξεργασία γίνεται με το Origin, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.
- Επαναλαμβάνουμε για τις υπόλοιπες πέντε συχνότητες.

Χαρακτηριστικές Dispersion C-V

- Ακολουθούμε την ίδια διαδικασία όπως και πριν και παίρνουμε μια μέτρηση C-V.
- Κρατώντας τη συχνότητα σταθερή μετακινούμαστε σε άλλους πυκνωτές και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία.

Έτσι μπορεί να διαπιστώσει κανείς κατά πόσο το δείγμα έχει ομοιόμορφη συμπεριφορά σε όλη την έκτασή του.

Χαρακτηριστική I-V

Για τη μέτρηση μιας χαρακτηριστικής I-V χρησιμοποιείται αντι του καπασιτομέτρου το αμπερόμετρο με πηγή τάσης Hewlett Packard 4140B. Το συνδέουμε στις αντίστοιχες υποδοχές με BNC καλώδια. Η διαδικασία που ακολουθείται είναι σχεδόν η ίδια με αυτή της C-V. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο διαδικασιών βρίσκεται στα πεδία "Start Bias (V)" και "Step Bias (V)". Κατά τα άλλα απλώς υπεισέρχονται και κάποια επιπλέον πεδία και χρησιμοποιείται

Πίνακας 5.3: Ρυθμίσεις παραμέτρων Labview για I-V

Sample	$StopV_A(V)Pos.$	$StopV_A(V)Neg.$
NOR (Unimplanted)	12	-20
NO (Si-implanted)	14	-20
NR (N-implanted)	15	-20
NP (Ar-implanted)	15	-15

διαφορετικό γραφικό περιβάλλον στο Labview. Αντί του πεδίου "Start Bias (V)" υπάρχει τώρα το " $StartV_A(V)$ " και αντί του "Stop Bias (V)" το " $StopV_A(V)$ ". Ουσιαστικά όμως η σημασία τους παραμένει ίδια. Υπάρχει επίσης και το πεδίο " $V_{A}Ilimit(mA)$ " που υποδηλώνει το όριο του ρεύματος που επιτρέπεται να περάσει από τον πυκνωτή, έτσι ώστε να μην καταστραφεί. Η τιμή του σε όλη την διάρκεια των πειραμάτων είναι 10mA. Πρέπει να τονιστεί ότι για την I-V σε θετικές τάσεις ακολουθείται ελαφρώς διαφορετική διαδικασία από ότι για την I-V στις αρνητικές. Επομένως για να καλυφθεί μία περιοχή τάσης με θετικές και αρνητικές τιμές παίρνονται δύο ξεχωριστές I-V (μία για θετικές τάσεις και μία για αρνητικές) και στη συνέχεια συνδυάζονται. Η διαδικασία θα επαναληφθεί για πέντε πυκνωτές (δηλαδή συνολικά 10 μετρήσεις I-V) διασπαρμένους σε όλη την έκταση του δείγματος. Η διαδικασία της I-V δηλαδή εμπεριέχει και χαρακτηριστικά της Dispersion C-V. Η βασική διαφορά της I-V σε σχέση με την C-V είναι το γεγονός ότι αντι να διατηρηθεί σταθερό το "Step Bias (V)" στην τιμή 0.05 και να αλλάζει κάθε φορά το " $StartV_A(V)$ " (ή "Start Bias (V)", όπως λεγόταν στην C-V), πλέον το " $StartV_A(V)$ " παραμένει σταθερό στην τιμή 0 και το "Step Bias (V)" παίρνει τιμές είτε 0.05 είτε -0.05 αναλόγως με το αν η μέτρηση γίνεται για θετικές ή αρνητικές τάσεις. Επομένως λοιπόν τα βήματα της διαδικασίας είναι τα ακόλουθα.

- Ρυθμίζουμε τις παραμέτρους " $StopV_A(V)$ " και "Step Bias (V)" σύμφωνα με τον Πίνακα 5.3.
- Αν η μέτρηση γίνεται σε αρνητικές τάσεις αφήνουμε το φως του Micromanipulator αναμμένο, ώστε το δείγμα να φωτίζεται. Αν γίνεται σε θετικές, τότε το φως μένει σβηστό.
- Πατάμε Run. Η μέτρηση αρχίζει. Σε αντίθεση με την C-V δεν πειράζουμε καθόλου το φως.
- Μόλις τελειώσει η μέτρηση, αποθηκεύουμε τα δεδομένα σε ένα αρχείο της επιλογής μας. Η επεξεργασία γίνεται με το Origin, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.
- Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία μέχρι να έχουμε μία θετική και μία αρνητική I-V για πέντε πυκνωτές.

Χαρακτηριστική $\Delta V_{FB} - |V_G|$ - Sequential Pulses

Οι παραπάνω διαδικασίες δίνουν μία πρώτη εικόνα για τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του δείγματος. Όμως είναι απαραίτητο να μελετηθεί η συμπεριφορά του δείγματος σε σχέση με τον προγραμματισμό και τη διαγραφή του. Κάτι τέτοιο απαιτεί την χρήση της γεννήτριας παλμών HP 8110A. Οι παλμοί που χρησιμοποιούνται για τον προγραμματισμό των δειγμάτων είναι τετραγωνικοί παλμοί, κανονικοί και ανεστραμμένοι. Η συγκεκριμένη γεννήτρια έχει τη δυνατότητα να παράγει τόσο κανονικούς όσο και ανεστραμμένους τετραγωνικούς παλμούς και η ρύθμιση γίνεται με το κυκλικό κουμπί που εναλλάσσει έναν δείκτη στην οθόνη της γεννήτριας μεταξύ των τιμών "Normal" και "Complementary". Οι παράμετροι που πρέπει να ρυθμιστούν είναι "High" (υψηλή τιμή παλμού), "Low" (χαμηλή τιμή παλμού), "Delay" (χρονική καθυστέρηση παλμού), "Width" (πλάτος παλμού), "LeadEdge" (χρόνος ανόδου) και "TrailEdge" (χρόνος καθόδου). Η σημαντική παράμετρος εδώ είναι το πλάτος παλμού ("Width"). Επειδή θέλουμε ο παλμός να είναι όσο πιο κοντά γίνεται στον ιδανικό τετραγωνικό παλμό, οι τιμές των παραμέτρων "Delay", "LeadEdge" και "TrailEdge" πάντα ρυθμίζονται να είναι 100 φορές μικρότερες σε τιμή από την εκάστοτε τιμή του πλάτους. Επομένως οι ανεξάρτητες παράμετροι είναι "High", "Low" και "Width".

Εδώ πρέπει να τονιστεί και ένα άλλο σημείο. Όπως ακριβώς και στην διαδικασία της I-V έτσι και τώρα θα γίνουν δύο ξεχωριστές διαδικασίες για θετικές και αρνητικές τάσεις και στη συνέχεια θα συνδυαστούν. Στην κατάσταση προγραμματισμού οι μετρήσεις θα γίνουν με το δείγμα μη φωτιζόμενο, τους παλμούς στο "Normal" και την τιμή "Low" ίση πάντα με το 0. Στην κατάσταση προγραμματισμού οι μετρήσεις θα γίνουν με το δείγμα φωτιζόμενο για ένα μικρό διάστημα (όπως δηλαδή στην C-V), τους παλμούς στο "Complementary" και την τιμή "High" ίση πάντα με το 0. Άρα στην ουσία οι ανεξάρτητες παράμετροι είναι μόνο δύο: το "Width" και ένα εκ των "High" ή "Low".

Οι τιμές του "Width" στις οποίες μελετώνται τα δείγματα είναι οι ακόλουθες:

100ms, 50ms, 1ms, 500μs, 100μs, 50μs, 10μs, 5μs, 1μs, 500ns, 100ns

Οι τιμές του "High" για τη μέτρηση θετικών παλμών είναι οι φυσικοί αριθμοί από 1 μέχρι 20 (ή μέχρι να πάθει ζημιά ο πυκνωτής) και οι τιμές του "Low" για τη μέτρηση αρνητικών παλμών είναι οι ακέραιοι αριθμοί από -1 μέχρι -20. Με βάση την παραπάνω περιγραφή τα βήματα της διαδικασίας είναι τα ακόλουθα:

- Αρχικά παίρνουμε μία μέτρηση C-V όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Αυτή θα χρησιμεύσει ως καμπύλη αναφοράς για να μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί η διαφορά ΔV_{FB} . Ονομάζεται καμπύλη Fresh.
- Συνδέουμε με BNC καλώδιο το Hpot του καπασιτομέτρου με την υποδοχή του Micro-manipulator στην οποία καταλήγει το καλώδιο της ακίδας.

- Συνδέουμε με BNC καλώδιο το Lpot του καπασιτομέτρου με την υποδοχή του Micro-manipulator στην οποία καταλήγει το κάτω μέρος της βάσης.
- Ρυθμίζουμε τις παραμέτρους "Start Bias (V)" και "Stop Bias (V)" από τον Πίνακα 5.2. Σημειώνεται ότι αυτό γίνεται όταν αρχίζει το πείραμα, όμως αργότερα, όταν εφαρμοστούν οι παλμοί, ο Πίνακας δεν είναι πια χρήσιμος καθώς η C-V μετατοπίζεται. Σε αντίθεση με την C-V, θέτουμε "Spot Bias/Current": ΟΦΦ και αγνοούμε τα πεδία "Spot Hold Time (s)" και "DC Spot Bias (V)". Θέτουμε "Number of bias step": 1 και μία από τις έξι τιμές στο πεδίο "Frequency Value (Hz)". Οι τιμές των υπολοίπων πεδίων ("Capacitor Area (cm²)", "Step Bias (V)") είναι αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.
- Θέτουμε στο "High" την τιμή 1 ή στο "Low" την τιμή -1, ανάλογα αν μετράμε θετικούς ή αρνητικούς παλμούς. Θέτουμε στο "Width" την τιμή 100ms.
- Εάν εφαρμόζουμε θετικούς (Normal) παλμούς τότε κλείνουμε το φως. Αλλιώς, το αφήνουμε ανοιχτό. Στη συνέχεια αφαιρούμε το BNC καλώδιο από το Hpot του καπασιτομέτρου και το τοποθετούμε στην υποδοχή Output 1. Στην γεννήτρια Shift και στη συνέχεια 0. Μετά πατάμε Man. Στη συνέχεια πάλι διαδοχικά Shift και στη συνέχεια 0. Ο παλμός έχει σταλεί στο δείγμα. Επαναφέρουμε το BNC καλώδιο στο Hpot.
- Εάν το φως είναι ανοιχτό (δηλαδή μετράμε αρνητικούς παλμούς) το σβήνουμε. Πατάμε Run. Η μέτρηση αρχίζει.
- Μόλις τελειώσει η μέτρηση, αποθηκεύουμε τα δεδομένα σε ένα αρχείο της επιλογής μας. Η επεξεργασία γίνεται με το Origin, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.
- Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία αυξάνοντας το "High" κατά 1 ή μειώνοντας το "Low" κατά 1. Με κάθε επανάληψη θα δούμε την C-V να μετατοπίζεται αριστερά ή δεξιά. Είναι λοιπόν απαραίτητο να αλλάζουμε κάθε φορά τα Start Bias (V) και Stop Bias (V) ώστε να γίνεται η μέτρηση στην περιοχή τάσεων που μας ενδιαφέρει. Δεν υπάρχει πίνακας με συγκεκριμένες τιμές. Συνήθως η διαφορά είναι της τάξης των 0.2 με 0.3V προς τη μία ή την άλλη κατεύθυνση και η διόρθωση των τιμών γίνεται από όποιον εκτελεί το πείραμα.
- Μόλις φτάσουμε στην τάση 20 ή -20 η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί και έχουμε 20 καμπύλες θετικών ή αρνητικών παλμών αντίστοιχα. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται για τις υπόλοιπες τιμές του "Width". Συνολικά δηλαδή πρέπει να πάρει κανείς 40 καμπύλες για κάθε "Width".
- Μόλις τελειώσει η διαδικασία των μετρήσεων, οι μετρήσεις ομαδοποιούνται σε κοινό αρχείο Origin ανά τιμή "Width". Στη συνέχεια υπολογίζεται παράμετρος ΔV_{FB} και σχεδιάζεται στο ίδιο Project του Origin η γραφική παράσταση $\Delta V_{FB} - |V_G|$, όπου $|V_G|$ είναι η απόλυτη τιμή της παραμέτρου "High" ή "Low" (που προφανώς είναι ίσες κατά απόλυτη τιμή). Στη συνέχεια όλες οι γραφικές παραστάσεις που αφορούν διαφορετικό "Width" ομαδοποιούνται σε μία.

Χαρακτηριστική Quasi-Static

Η χαρακτηριστική Quasi-Static είναι μια καμπύλη που δίνει μια ένδειξη για το αν ένα δείγμα περιέχει μεγάλο ή μικρό αριθμό διεπιφανειακών παγίδων. Η μέτρηση γίνεται χρησιμοποιώντας το ίδιο γραφικό περιβάλλον με την I-V, τα αποθηκευμένα αποτελέσματα όμως της μέτρησης, εισάγονται μετά στο Origin στο Project της C-V!

- Αρχικά, από τις καμπύλες I-V καταγράφουμε τις τιμές της τάσης για τις οποίες το δείγμα αρχίζει να άγει. Είναι οι τιμές για θετικές και αρνητικές τάσεις για τις οποίες το ρεύμα αρχίζει να ανεβαίνει. Φαίνονται στον Πίνακα 5.4 ως IVP και IVN αντίστοιχα.
- Στη συνέχεια, φροντίζουμε ώστε τα πεδία "*StartV_A(V)*" και "*StopV_A(V)*" να έχουν τιμές πιο μικρές κατά απόλυτη τιμή από τις προηγούμενες δύο τιμές. Αυτό γίνεται γιατί θέλουμε να μελετήσουμε την απόκριση των διεπιφανειακών παγίδων καθώς η τάση μεταβάλλεται και όχι τα χαρακτηριστικά αγωγής. Οι τιμές που επελέγησαν είναι καταγεγραμμένες στον Πίνακα 5.4.
- Επιλέγουμε "*SingleRamp*" και θέτουμε "*Range*"=10 και "*dV/dt*"=0.1. Ανάβουμε το φως.
- Αφήνουμε το φως του Micromanipulator αναμμένο, ώστε το δείγμα να φωτίζεται. Πατάμε Run. Η μέτρηση αρχίζει. Μετά από 2 δευτερόλεπτα κλείνουμε το φως ενώ η μέτρηση βρίσκεται σε εξέλιξη.
- Μόλις τελειώσει η μέτρηση, αποθηκεύουμε τα δεδομένα σε ένα αρχείο της επιλογής μας. Η επεξεργασία γίνεται με το Origin. Δημιουργούμε μια καινούρια στήλη στο Origin που είναι η απόλυτη τιμή της στήλης των ρευμάτων διαιρεμένη κατά την κλίση της τάσης. Δηλαδή πατάμε δεξιά κλικ και επιλέγουμε Add New Column. Μετά κάνουμε κλικ στο όνομα της στήλης, ώστε να επιλεγεί ολόκληρη και επιλέγουμε Set Column Values. Ανοίγει ένα παράθυρο στο οποίο γράφουμε: $col(C) = abs(col(B))/0.1$. Η Quasi-static πρέπει να συμπίπτει με την C-V στην περιοχή συσσώρευσης (accumulation region). Εάν υπάρχει απόκλιση τότε στο ίδιο παράθυρο προσθέτουμε ή αφαιρούμε μία σταθερά ώστε να συμπίπτει.
- Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για όλα τα δείγματα. Παρατηρούμε ότι η Quasi-static καμπύλη έχει σχήμα V. Εάν το χαμηλότερό της σημείο εκτείνεται χαμηλά, μπορώντας να ακολουθήσει την C-V τότε η παγίδες είναι λίγες. Εάν, αντιθέτως δεν μπορεί να ακολουθήσει σε βάθος την C-V τότε αυτό είναι ένδειξη ύπαρξης μεγάλου αριθμού διεπιφανειακών παγίδων.

Χαρακτηριστική $\Delta V_{FB} - T_{width}$ - Performance Curves

Σε αντίθεση με την χαρακτηριστική $\Delta V_{FB} - |V_G|$ που χρησιμοποιούσε συνεχόμενους παλμούς χωρίς εκφόρτιση ή διαγραφή του δείγματος ώστε να καταγράψει τι είδους φορείς

Πίνακας 5.4: Ρυθμίσεις παραμέτρων Labview για Quasi-Static

Sample	$StartV_A(V)$	$StopV_A(V)$	$IVP(V)$	$IVN(V)$
NOR (Unimplanted)	-2	2	4	-3.9
NO (Si-implanted)	-4	2	8	-8.2
NR (N-implanted)	-4.5	3	6	-7
NP (Ar-implanted)	-6	3	6	-8

αποθηκεύει το δείγμα και ποια είναι τα όρια του φορτίου που μπορεί να αντέξει, η χαρακτηριστική $\Delta V_{FB} - T_{width}$ είναι η χαρακτηριστική που δείχνει την απόδοση του δείγματος ως μνήμη. Δηλαδή πόσο γρήγορα προγραμματίζεται και διαγράφεται η μνήμη και τι παλμοί απαιτούνται (εύρος και πλάτος). Προφανώς πλέον η μετάβαση από την Fresh στην κατάσταση προγραμματισμού και διαγραφής πρέπει να συμβαίνει με έναν μοναδικό παλμό, ο οποίος πρέπει να προσδιοριστεί. Με βάση αυτά τα χαρακτηριστικά θα δημιουργηθεί ολόκληρο το ηλεκτρικό κύκλωμα προγραμματισμού και διαγραφής.

Αρχικά στην διαδικασία πρέπει να γίνει το λεγόμενο "στρώσιμο" του πυκνωτή. Δηλαδή γίνονται εκτεταμένες δοκιμές πάνω στα δείγματα προκειμένου να οριστεί η κατάσταση προγραμματισμού, η κατάσταση διαγραφής και οι παλμοί προγραμματισμού και διαγραφής. Οδηγός σε αυτή τη διαδικασία είναι η χαρακτηριστική $\Delta V_{FB} - |V_G|$. Συνήθως οι τάσεις πύλης που θα χρησιμοποιηθούν για τον προγραμματισμό και την διαγραφή του δείγματος είναι λίγο μικρότερες από αυτές στις οποίες έχουμε over-write και over-erase στην χαρακτηριστική $\Delta V_{FB} - |V_G|$. Φυσικά όμως η χαρακτηριστική αυτή έχει προκύψει από την εφαρμογή συνεχόμενων παλμών, ενώ τώρα πρέπει να μεταβούμε με έναν παλμό.

Επίσης πρέπει να οριστεί το παράθυρο, δηλαδή η διαφορά μεταξύ της κατάστασης προγραμματισμού και διαγραφής. Όμως για να γίνει αυτό πρέπει να οριστούν πρώτα αυτές οι δύο καταστάσεις. Πώς γίνεται αυτό; Πειραματικά και ελαφρώς αυθαίρετα. Δηλαδή, το κάθε δείγμα μπορεί, με την εφαρμογή διαφόρων παλμών, να φτάσει σε διάφορες καταστάσεις. Μετά από πολλά πειράματα μπορεί να καταλήξουμε στο ότι ένας παλμός με $High = 11V$ και $Width = 10ms$ είναι ικανός για να μεταφέρει την C-V αρκετά δεξιά, προγραμματίζοντας το δείγμα και ένας παλμός $Low = -11V$, $Width = 10ms$ είναι αρκετός για να επαναφέρει την C-V στο Fresh και, αν εφαρμοστεί ξανά, ακόμα πιο αριστερά, σε μία κατάσταση αποθήκευσης οπών. Δεν έπεται ότι αυτές οι δύο καταστάσεις πρέπει να δίνουν το απολύτως μέγιστο παράθυρο που μπορεί να εξαχθεί. Μπορεί να υπάρχει ένας παλμός που προγραμματίζει πιο πολύ το δείγμα, αλλά μετά να μην μπορεί εύκολα να γίνει η διαγραφή με έναν μοναδικό παλμό. Αυτός ο παλμός δεν μπορεί να οριστεί ως παλμός προγραμματισμού. Αντίστοιχα, ένας πολύ ισχυρός παλμός διαγραφής μπορεί να καταλήξει να κάνει ζημιά στον πυκνωτή, οδηγώντας την C-V σε αλλαγή κλίσης. Επομένως λοιπόν ψάχνουμε για δύο παλμούς οι οποίοι ως ζευγάρι θα προγραμματίζουν και θα διαγράφουν το δείγμα (δηλαδή ο ένας θα αναιρεί την επίδραση του

Πίνακας 5.5: Παλμοί Full-Write και Full-Erase

Sample	$FWHigh(V)$	$FWWidth(ms)$	$FELow(V)$	$FEWidth(ms)$
NOR (Unimplanted)	10	10	-8	100
NO (Si-implanted)	12	10	-10	100
NR (N-implanted)	14	10	-10	100
NP (Ar-implanted)	14	10	-10	100

άλλου), χωρίς να προξενούν ζημιά και θα δίνουν το μέγιστο παράθυρο. Καταλαβαίνει κανείς επομένως ότι πρόκειται για χρονοβόρα και επίπονη διαδικασία με μόνο οδηγό την εμπειρία ότι οι παλμοί προγραμματισμού και διαγραφής είναι συνήθως οι τάσεις πύλης λίγο πριν τα overwrite και over-erase στην χαρακτηριστική $\Delta V_{FB} - |V_G|$. Τελικά, καταλήγουμε σε 2 παλμούς για κάθε δείγμα. Οι καταστάσεις προγραμματισμού και διαγραφής ονομάζονται full-write και full-erase αντίστοιχα. Να σημειωθεί ότι η full-erase δεν συμπίπτει με την Fresh. Η full-erase είναι η κατάσταση στην οποία μεταβαίνει το δείγμα αν ενώ βρίσκεται στην Fresh εφαρμοστεί παλμός διαγραφής. Αν όμως στην full-write εφαρμοστεί ο παλμός που έχει οριστεί ως παλμός διαγραφής το δείγμα πρέπει να επιστρέφει στην Fresh. Κάτι τελευταίο που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι εμπειρικά αποφεύγεται να ορίζεται παλμός προγραμματισμού σε $Width = 100ms$, κάτι που δεν ισχύει για τον παλμό διαγραφής. Επομένως κατά πάσα πιθανότητα οι δύο παλμοί θα έχουν διαφορετικό Width.

Μετά από πολλές δοκιμές οι παλμοί που προέκυψαν αναφέρονται στον Πίνακα 5.5.

Στη συνέχεια αρχίζει η διαδικασία για την κατασκευή της χαρακτηριστικής $\Delta V_{FB} - T_{width}$. Αυτό που ουσιαστικά αναπαριστά αυτή η χαρακτηριστική είναι το πόσο ικανοί είναι να προγραμματίσουν ή να διαγράψουν το δείγμα παλμοί διαφορετικού πλάτους. Η διαδικασία, όπως και πριν, διαφέρει για προγραμματισμό και διαγραφή. Η μελέτη του προγραμματισμού περιλαμβάνει διαδοχική τοποθέτηση του δείγματος στην κατάσταση Full-Erase και μετά εφαρμογή παλμών με High ίσο με του παλμού Full-Write αλλά μεταβαλλόμενου πλάτους. Στην μελέτη της διαγραφής, αντιστοίχως, τοποθετούμε τον πυκνωτή στην κατάσταση Full-Write και δοκιμάζουμε να δούμε πόσο μπορεί να τον διαγράψει ένας παλμός με Low ίσο με αυτό του Full Erase και μεταβαλλόμενο πλάτος. Οι δοκιμές αυτές γίνονται χωρίς φως. Τα βήματα είναι ως εξής:

- Αρχικά παίρνουμε μία μέτρηση C-V όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Αυτή θα χρησιμεύσει ως καμπύλη αναφοράς για να μπορεί στη συνέχεια να υπολογιστεί η διαφορά ΔV_{FB} . Ονομάζεται καμπύλη Fresh.
- Συνδέουμε με BNC καλώδιο το Hpot του καπασιτομέτρου με την υποδοχή του Micro-manipulator στην οποία καταλήγει το καλώδιο της ακίδας.
- Συνδέουμε με BNC καλώδιο το Lpot του καπασιτομέτρου με την υποδοχή του Micro-manipulator στην οποία καταλήγει το κάτω μέρος της βάσης.

- Ρυθμίζουμε τις παραμέτρους "Start Bias (V)" και "Stop Bias (V)" από τον Πίνακα 5.2. Σημειώνεται ότι αυτό γίνεται όταν αρχίζει το πείραμα, όμως αργότερα, όταν εφαρμοστούν οι παλμοί, ο Πίνακας δεν είναι πια χρήσιμος καθώς η C-V μετατοπίζεται. Σε αντίθεση με την C-V, θέτουμε "Spot Bias/Current: ΟΦΦ" και αγνοούμε τα πεδία "Spot Hold Time (s)" και "DC Spot Bias (V)". Θέτουμε "Number of bias step": 1 και μία από τις έξι τιμές στο πεδίο "Frequency Value (Hz)". Οι τιμές των υπολοίπων πεδίων ("Capacitor Area (cm^2)", "Step Bias (V)") είναι αυτές που αναφέρθηκαν προηγουμένως.
- Θέτουμε στο "High" ή στο "Low", ανάλογα αν μετράμε θετικούς ή αρνητικούς παλμούς την τιμή του Πίνακα 5.5. Ομοίως ρυθμίζουμε και το "Width".
- Το φως παραμένει συνεχώς κλειστό. Αλλιώς, το αφήνουμε ανοιχτό. Στη συνέχεια αφαιρούμε το BNC καλώδιο από το Hpot του καπασιτομέτρου και το τοποθετούμε στην υποδοχή Output 1. Στην γεννήτρια Shift και στη συνέχεια 0. Μετά πατάμε Man. Στη συνέχεια πάλι διαδοχικά Shift και στη συνέχεια 0. Ο παλμός έχει σταλεί στο δείγμα. Επαναφέρουμε το BNC καλώδιο στο Hpot.
- Πατάμε Run. Η μέτρηση αρχίζει.
- Μόλις τελειώσει η μέτρηση, αποθηκεύουμε τα δεδομένα σε ένα αρχείο της επιλογής μας. Η επεξεργασία γίνεται με το Origin, όπως περιγράφηκε προηγουμένως.
- Παρατηρούμε ότι η καμπύλη C-V έχει μετατοπιστεί (αναλόγως του τι επιλέξαμε) είτε στο Full-Write είτε στο Full-Erase. Εάν πήγαμε στο Full-Write πρέπει να δοκιμάσουμε να διαγράψουμε το δείγμα. Εάν πήγαμε στο Full-Erase πρέπει να δοκιμάσουμε να προγραμματίσουμε το δείγμα. Στην πρώτη περίπτωση βάζουμε στο Low την τιμή του παλμού Full-Erase και θέτουμε $High = 0$. Στην δεύτερη περίπτωση βάζουμε στο High την τιμή του παλμού Full-Write και θέτουμε $Low = 0$. Τώρα αλλάζουμε το Width και βάζουμε μία από τις τιμές που εξετάζουμε. Στόχος είναι να εξετάσουμε όλες τις τιμές με φθίνουσα σειρά.
- Ακολουθώντας την προηγούμενη διαδικασία παίρνουμε μία C-V. Την φορτώνουμε στο Origin. Υπάρχει παράλληλη μετατόπιση της καμπύλης. Αυτό είναι το δεδομένο που μας ενδιαφέρει.
- Τώρα η διαδικασία πρέπει να επαναληφθεί για όλες τις τιμές του Width. Πρώτα όμως η C-V πρέπει να επανέλθει εκεί που ήταν. Αν η καμπύλη έχει μετατοπιστεί αρκετά τότε με έναν παλμό Full-Erase ή Full-Write αντίστοιχα, από τον Πίνακα 5.5 η καμπύλη θα επανέλθει. Αν όμως ο παλμός είναι πολύ αδύναμος και η καμπύλη έχει μετατοπιστεί ελάχιστα, τότε πρέπει να εφαρμόσουμε αντίστοιχα έναν παλμό Full-Write ή Full-Erase αντίστοιχα (Πίνακας 5.5) ώστε να γίνει πιο έντονη η μετακίνηση, και στη συνέχεια έναν παλμό Full-Erase ή Full-Write αντίστοιχα, ώστε να επανέλθει στην κατάσταση που πρέπει.
- Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για όλες τις τιμές του Width.

- Μόλις τελειώσει η διαδικασία των μετρήσεων, οι μετρήσεις ομαδοποιούνται σε κοινό αρχείο Origin. Στη συνέχεια υπολογίζεται παράμετρος ΔV_{FB} και σχεδιάζεται στο ίδιο Project του Origin η γραφική παράσταση $\Delta V_{FB} - T_{width}$, όπου T_{width} είναι το πλάτος του παλμού.

Χαρακτηριστική αντοχής (Endurance)

Η χαρακτηριστική αυτή δείχνει την μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του δείγματος καθώς εφαρμόζονται επαναλαμβανόμενοι παλμοί Full-Write και Full-Erase. Η διαδικασία γίνεται με το φως αναμμένο συνεχώς. Τα βήματα έχουν ως εξής:

- Αρχικά παίρνουμε μία μέτρηση C-V ώστε να έχουμε την Fresh του πυκνωτή. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε κατά σειρά τους παλμούς: Full-Write, Full-Erase, Full-Write, Full-Erase.
- Στην γεννήτρια παλμών, στην επιλογή ενTRF-MODE επιλέγουμε Added και Continuous. Αυτό σημαίνει ότι θα στένλονται συνεχόμενα δύο παλμοί ο ένας πίσω από τον άλλον. Τώρα πρέπει να ρυθμίσουμε τον έναν να είναι παλμός Full-Write και τον άλλο Full-Erase.
- Αυτή τη φορά θα χρησιμοποιήσουμε και τις δύο στήλες της επιλογής LEVELS καθώς έχουμε δύο παλμούς που θα βγουν από την ίδια έξοδο. Ρυθμίζουμε στην αριστερή στήλη τα High και Low του παλμού Full-Write και στη δεξιά τα αντίστοιχα μεγέθη του παλμού Full-Erase από τον Πίνακα 5.5.
- Πάμε στην επιλογή TIMING για να ρυθμίσουμε τους χρόνους. Θυμόμαστε ότι η ανεξάρτητη παράμετρος είναι το Width και οι άλλες είναι 100 φορές μικρότερες. Εδώ όμως υπάρχει μία εμπειρική εξαίρεση. Το Delay του παλμού Full-Erase θα είναι μεγαλύτερο, ώστε να μην πέσουν οι παλμοί Full-Write και Full-Erase πολύ κοντά ο ένας στον άλλον. Στην αριστερή στήλη (Full-Write) βάζουμε $Width = 10ms$ και $Delay = LeadEdg = TrailEdg = 100\mu s$. Στην δεξιά στήλη (Full-Erase) βάζουμε $Width = 100ms$ και $LeadEdg = TrailEdg = 1ms$. Θέτουμε $Delay = 13ms$. Άρα το συνολικό Duty Cycle θα είναι το άθροισμα. Δηλαδή: $DutyCycle = 100\mu s + 100\mu s + 10ms + 100\mu s + 13ms + 1ms + 100ms + 1ms = 10.3ms + 115ms = 125.3ms$. Άρα κάθε "κύκλος" προγραμματισμού-διαγραφής διαρκεί 125.3ms. Αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε τους κύκλους που θα εφαρμοστούν σε συγκεκριμένο χρόνο και με χρήση ενός χρονομέτρου να εκτελέσουμε τη μέτρηση. Οι υπολογισμένοι χρόνοι φαίνονται στον Πίνακα 5.6.
- Το φως παραμένει συνεχώς ανοιχτό. Στη συνέχεια αφαιρούμε το BNC καλώδιο από το Hpot του καπασιτομέτρου και το τοποθετούμε στην υποδοχή Output 1. Στην γεννήτρια Shift και στη συνέχεια 0. Μετά πατάμε Man. Στη συνέχεια πάλι διαδοχικά Shift και στη συνέχεια 0. Αρχίζουμε τη χρονομέτρηση. Όταν το πρώτο διάστημα ολοκληρωθεί σταματάμε το χρονόμετρο, πατάμε Man ώστε να σταματήσει η ροή των παλμών και επαναφέρουμε το BNC καλώδιο στο Hpot. Παίρνουμε μία χαρακτηριστική C-V.

Πίνακας 5.6: Υπολογισμός χρόνων χρονομέτρησης για Endurance

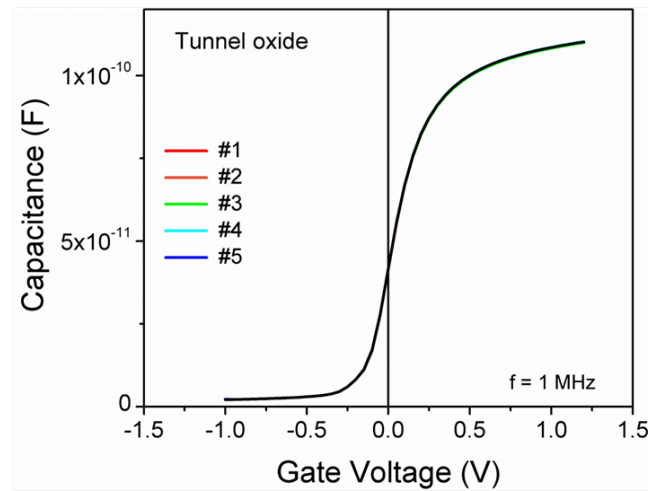
Δt	Applied Cycles	Total Cycles
12.5s	100	100
25s	200	300
50s	400	700
37.5s	300	1000
4m + 10s	2000	3000
8m + 20s	4000	7000
6m + 15s	3000	10000
41m + 40s	20000	30000
1h + 23m + 20s	40000	70000
1h + 2m + 30s	30000	100000

- Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία για όλα τα χρονικά διαστήματα.
- Μόλις τελειώσει η διαδικασία των μετρήσεων, οι μετρήσεις ομαδοποιούνται σε κοινό αρχείο Origin. Στη συνέχεια υπολογίζεται παράμετρος ΔV_{FB} και σχεδιάζεται στο ίδιο Project του Origin η γραφική παράσταση $\Delta V_{FB} - Time$.

Χαρακτηριστική διατήρησης (Retention)

Η χαρακτηριστική αυτή δείχνει την μεταβολή των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του δείγματος καθώς αυτό βρίσκεται σε περιβάλλον αυξημένης θερμοκρασίας. Τα βήματα έχουν ως εξής:

- Επιλέγουμε τρεις πυκνωτές. Αρχικά παίρνουμε μία μέτρηση C-V ώστε να έχουμε την Fresh. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε έναν παλμό Full-Write.
- Βάζουμε το δείγμα στο φούρνο. Οι θερμοκρασίες που μας ενδιαφέρουν είναι: θερμοκρασία δωματίου (προφανώς εδώ δεν χρειάζεται φούρνος), 55°C, 85°C, 110°C και 150°C. Οι χρόνοι χρονομέτρησης είναι κατά σειρά: 20s, 60s, 5m, 20m, 60m, 2h, 3h, 1day, 2days, 3days, 5days, 7days.
- Μόλις το πρώτο διάστημα χρονομέτρησης ολοκληρωθεί βγάζουμε το δείγμα από το φούρνο και παίρνουμε μία C-V.
- Επαναλαμβάνουμε για όλα τα χρονικά διαστήματα. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε την θέση στην οποία βρίσκονται οι πυκνωτές ώστε να μπορέσουμε να τους ξαναβρούμε την επόμενη μέρα.
- Μόλις η διαδικασία ολοκληρωθεί την επαναλαμβάνουμε σε άλλη τριάδα πυκνωτών για άλλη θερμοκρασία. Ομοίως για όλες τις απαιτούμενες θερμοκρασίες.



Σχήμα 5.12: Control Sample Dispersion C-V

- Μόλις τελειώσει η διαδικασία των μετρήσεων, οι μετρήσεις ομαδοποιούνται σε κοινό αρχείο Origin. Στη συνέχεια υπολογίζεται παράμετρος ΔV_{FB} και σχεδιάζεται στο ίδιο Project του Origin η γραφική παράσταση $\Delta V_{FB} - Time$.

5.2.2 Αποτελέσματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού. Η σειρά παρουσίασης βρίσκεται σε αντιστοιχία με την παρουσίαση των μεθόδων.

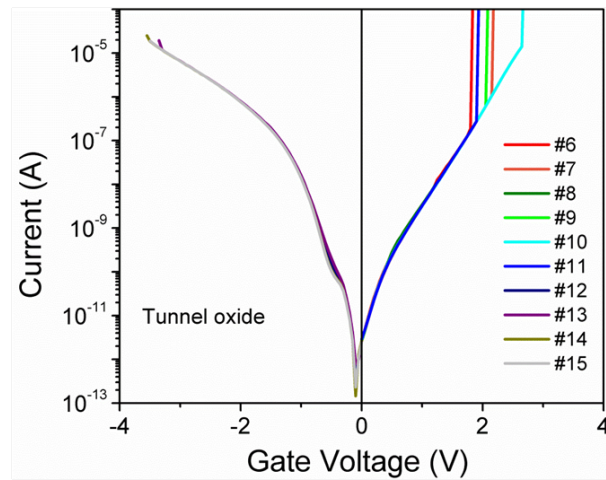
Αρχικά, εκτός από τα 4 δείγματα μελετάται το λεγόμενο Control Sample. Αυτό είναι ένα δείγμα το οποίο δεν περιέχει νιτρίδιο του πυριτίου ούτε οξειδίο φραγής, παραμόνο οξειδίο σήραγγος. Πρόκειται δηλαδή στην ουσία για έναν πυκνωτή MOS. Αυτό γίνεται για να μελετηθούν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του οξειδίου σήραγγος. Οι διαδικασίες στις οποίες υποβάλλεται το Control Sample είναι εντελώς ίδιες με αυτές στις οποίες υποβάλλονται και τα υπόλοιπα δείγματα. Επειδή όμως τα αποτελέσματα αυτά δεν έχουν ερευνητικό ενδιαφέρον αρχικά θα παρουσιαστούν όλα τα αποτελέσματα για το Control Sample και μετά παράλληλα τα αποτελέσματα των τεσσάρων δειγμάτων για να τονιστούν οι μεταξύ τους διαφορές.

Control Sample

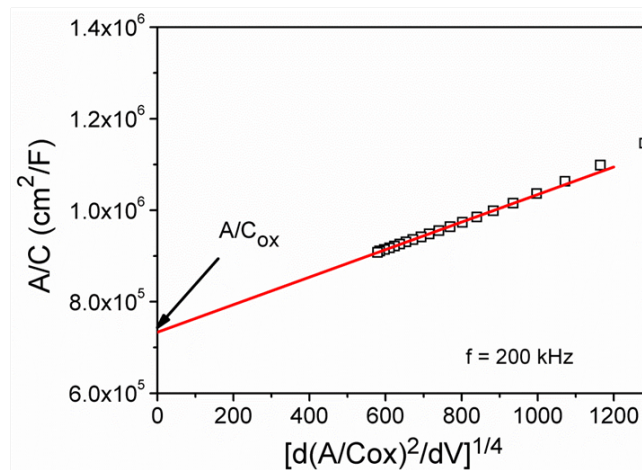
Έλεγχος ομοιομορφίας δείγματος

Στο Σχήμα 5.12 απεικονίζονται 5 χαρακτηριστικές C-V από 5 διαφορετικούς πυκνωτές στη συχνότητα 1 MHz. Παρατηρεί κανείς μία ομοιομορφία σε ότι αφορά το πάχος του οξειδίου σήραγγος καθώς και στα φορτία του οξειδίου.

Χαρακτηριστική I-V



Σχήμα 5.13: Control Sample I-V

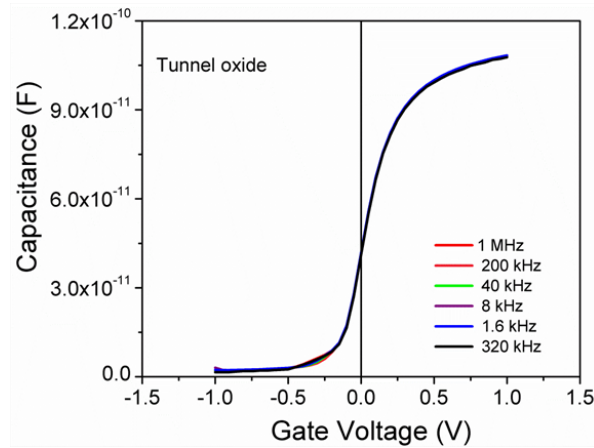


Σχήμα 5.14: Control Sample Maserjian Plot

Στο Σχήμα 5.13 απεικονίζονται χαρακτηριστικές I-V για 10 πυκνωτές (5 για κάθε περιοχή τάσης). Στις αρνητικές τάσεις οι μετρήσεις έγιναν με το δείγμα φωτιζόμενο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Εδώ πάλι παρατηρεί κανείς ομοιομορφία. Θα μπορούσε να πει επίσης κανείς ότι μετά τα 2V το δείγμα αρχίζει να άγει και επομένως υπάρχει μεταφορά φορτίων αλλά, εφ'όσον δεν υπάρχει ερευνητικό ενδιαφέρον για το συγκεκριμένο δείγμα, τέτοιες παρατηρήσεις θα γίνουν αργότερα.

Maserjian Plot

Στο Σχήμα 5.14 απεικονίζεται το λεγόμενο Maserjian Plot, δηλαδή η γραφική παράσταση της Σχέσης:



Σχήμα 5.15: Control Sample C-V

$$\frac{A}{C} = \frac{A}{C_{ox}} + s \cdot \left[\frac{d(A/C^2)}{dV} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5.2.2.0.1)$$

όπου:

A: η διατομή του πυκνωτή ($100 \times 100 \mu m^2$)

s: η κλίση του διαγράμματος

$\frac{A}{C_{ox}}$: το σημείο τομής της ευθείας με τον κάθετο άξονα

Από το σημείο τομής το πάχος του οξειδίου σήραγγος υπολογίζεται ότι είναι: $d_{OXT}=2.53nm$

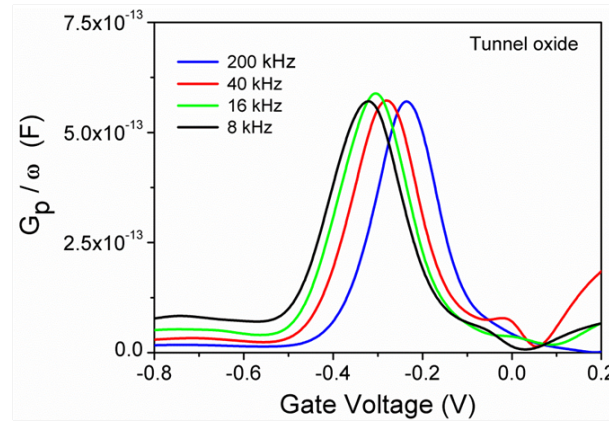
Χαρακτηριστική C-V

Στο Σχήμα 5.15 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές C-V του Control Sample σε συχνότητες ίδιες με αυτές που μελετήθηκαν τα δείγματα. Στα 0.3V παρατηρεί κανείς μία μικρή διασπορά στη συχνότητα που υποδεικνύει παρουσία διεπιφανειακών παγίδων.

Η ύπαρξη πλατό στις χαρακτηριστικές C-V μετά την εναπόθεση του νιτρίδιου αποδίδεται στη δημιουργία παγίδων στην διεπιφάνεια υποστρώματος-οξειδίου σήραγγος. Το φαινόμενο οφείλεται στην εναπόθεση του νιτρίδιου (εφ'όσον υπερβαίνει κάποιο πάχος) εξαιτίας της μηχανικής τάσης (strain) που εισάγει το νιτρίδιο.

Χαρακτηριστική G-V

Δεν έγινε ιδιαίτερη αναφορά στις χαρακτηριστικές αυτές στην ενότητα των μεθόδων επειδή το Labview τις παίρνει την ίδια στιγμή με την C-V. Επομένως αν ανοίξει κανείς τα αρχεία με τα αριθμητικά δεδομένα των μεθόδων C-V θα δει και επιπλέον στήλες με τις μετρήσεις G-V. Χρησιμοποιώντας την λεγόμενη "Hill's Method" (Σχέση 5.2.2.0.2) βρίσκει κανείς ότι η πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων ανα επιφάνεια είναι: $D_{it} = 6 \times 10^{10} cm^{-2} eV^{-1}$



Σχήμα 5.16: Control Sample G-V

$$D_{it} = \frac{\frac{2}{q \cdot A}}{\left(\frac{G_{max}}{\omega \cdot C_{ox}}\right)^2 + \left(1 - \frac{C_m}{C_{ox}}\right)^2} \quad (5.2.2.0.2)$$

Implanted Samples

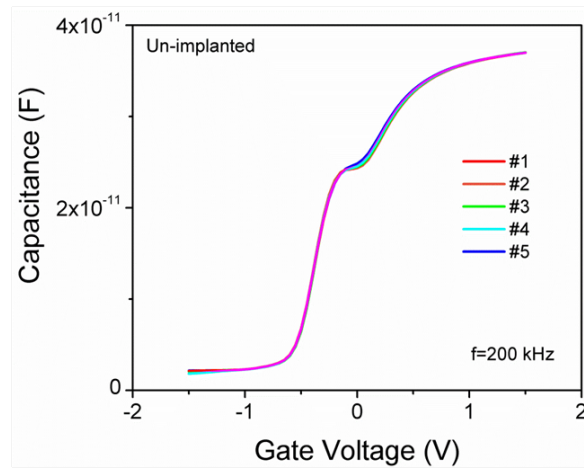
Τώρα εξετάζονται οι χαρακτηριστικές των τεσσάρων δειγμάτων. Τα αποτελέσματα που ακολουθούν, καθώς και η αξιολόγησή τους είναι και το θέμα της παρούσας εργασίας.

Έλεγχος ομοιομορφίας δείγματος

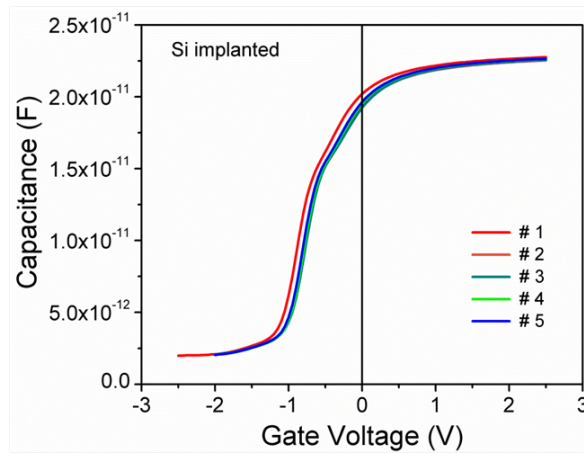
Στα Σχήματα 5.17, 5.18, 5.19 και 5.20 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές Dispersion C-V των τεσσάρων δειγμάτων. Παρατηρεί κανείς ότι τα δείγματα παρουσιάζουν ομοιομορφία ως προς την συμπεριφορά τους. Επίσης, η συμπεριφορά του δείγματος NOR στα $-0.1V$ είναι λόγω των διεπιφανειακών παγίδων μεταξύ υποστρώματος και οξειδίου σήραγγας καθώς το νιτρίδιο του πυριτίου που αναπτύσσεται από πάνω εμποδίζει τις ατέλειες αυτές από το να εξομαλυνθούν.

Χαρακτηριστική I-V

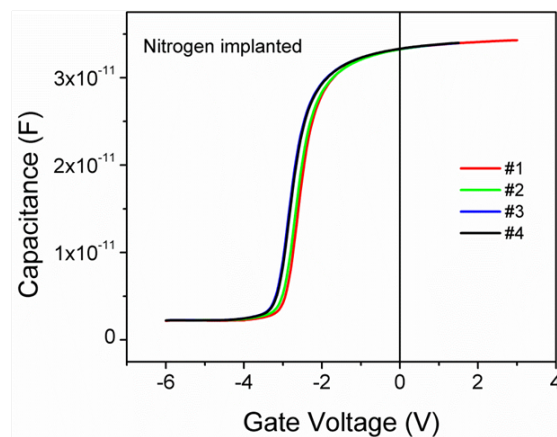
Στο Σχήμα 5.21 απεικονίζονται οι χαρακτηριστικές I-V για τα 4 δείγματα, κάθε μία εκ των οποίων περιέχει δεδομένα μετρήσεων από 10 πυκνωτές (5 για κάθε περιοχή τάσης). Στις αρνητικές τάσεις οι μετρήσεις έγιναν με το δείγμα φωτιζόμενο, όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως. Παρατηρεί κανείς ότι στις θετικές τάσεις το μη εμφυτευμένο δείγμα άγει στα 4V, ακολουθούν τα δείγματα εμφυτευμένα με Ar και N στα 5 και 6V αντίστοιχα και τέλος γύρω στα 8V άγει το δείγμα εμφυτευμένο με ιόντα πυριτίου. Στις αρνητικές τάσεις ακολουθείται αντίστοιχη σειρά με το μη εμφυτευμένο δείγμα να άγει πρώτο κατά σειρά και το εμφυτευμένο με ιόντα πυριτίου τελευταίο. Αυτό προφανώς συσχετίζεται με το πάχος του οξειδίου φραγής των δειγμάτων, δηλαδή τα δεδομένα του Πίνακα 5.1.



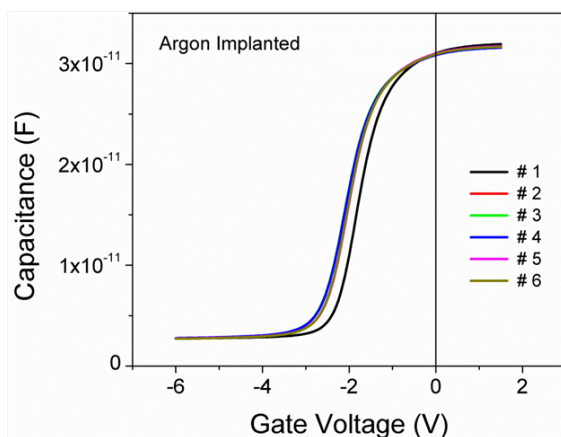
Σχήμα 5.17: NOR (Unimplanted) Sample Dispersion C-V



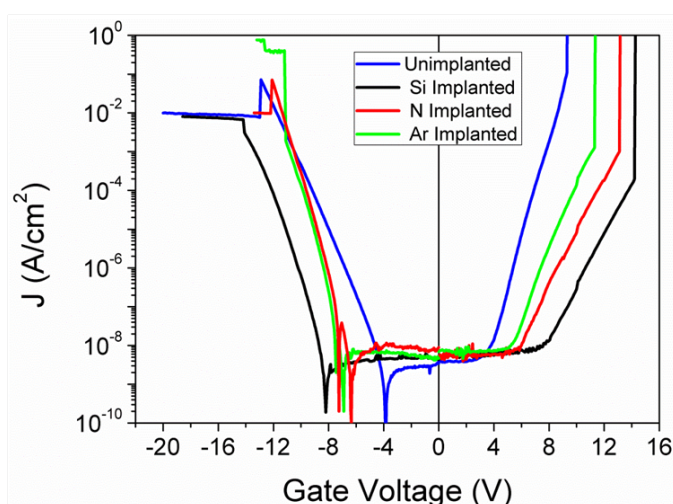
Σχήμα 5.18: NO (Si-implanted) Sample Dispersion C-V



Σχήμα 5.19: NR (N-implanted) Sample Dispersion C-V



Σχήμα 5.20: NP (Ar-implanted) Sample Dispersion C-V



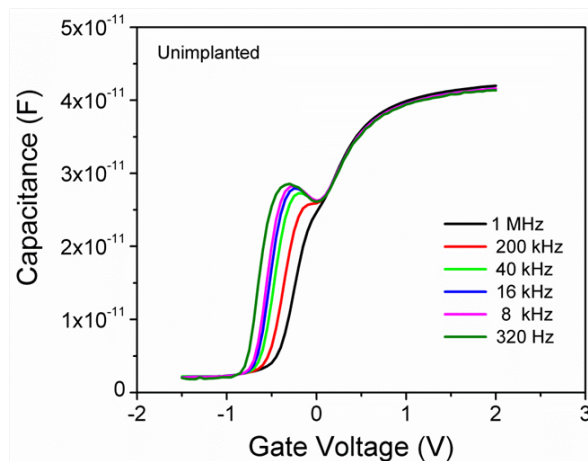
Σχήμα 5.21: Χαρακτηριστικές I-V των 4 δειγμάτων

Χαρακτηριστική C-V

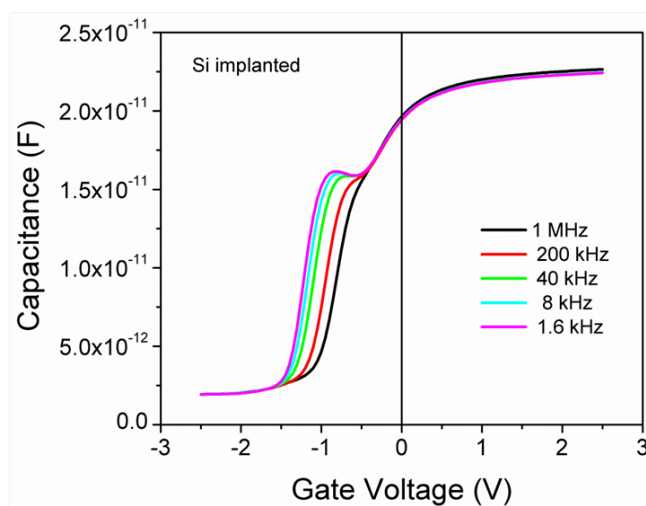
Στα Σχήματα 5.22, 5.23, 5.24 και 5.25 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές C-V των τεσσάρων δειγμάτων, ενώ στο Σχήμα 5.26 απεικονίζονται παράλληλα οι 4 χαρακτηριστικές C-V στην συχνότητα 1MHz. Κατ'αρχάς από τις χαρακτηριστικές αυτές μπορεί να εξαχθεί το EOT με βάση τον τύπο:

$$C = \epsilon_{ox} \cdot \frac{A}{x_{ONO}} \quad (5.2.2.0.3)$$

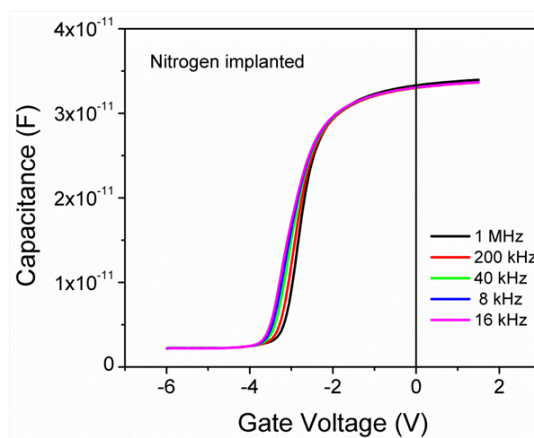
ο οποίος περιγράφεται με εναλλακτική μορφή στη Σχέση 3.1.0.0.29. Στο C αντικαθίσταται η μέγιστη τιμή της καμπύλης C-V για κάθε δείγμα. Τα αποτελέσματα φαίνονται στην δεξιά στήλη του Πίνακα 5.1. Από τα δεδομένα αυτά καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι η βασική



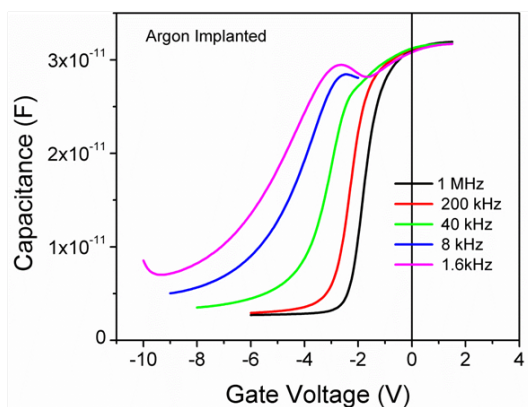
Σχήμα 5.22: NOR (Unimplanted) Sample C-V



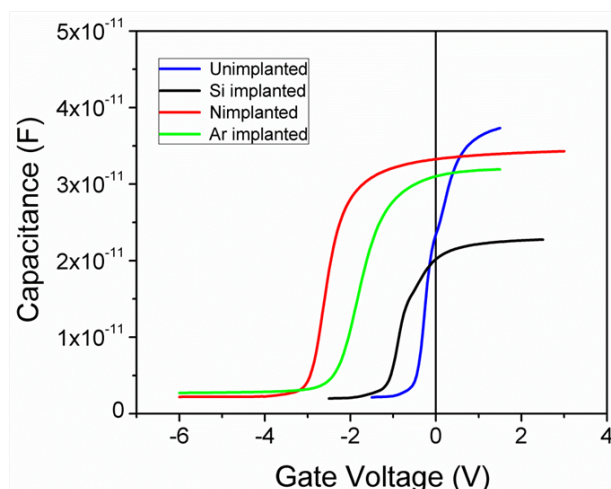
Σχήμα 5.23: NO (Si-implanted) Sample C-V



Σχήμα 5.24: NR (N-implanted) Sample C-V



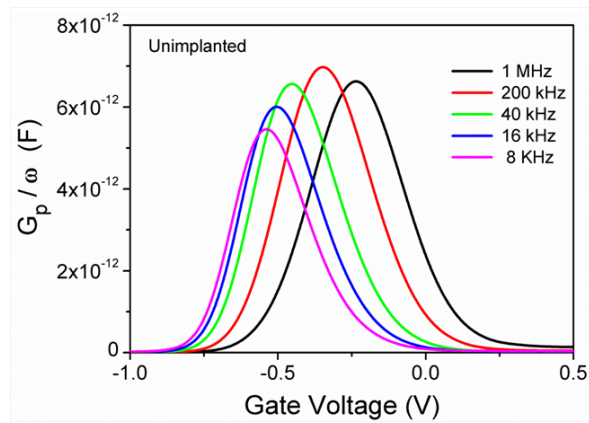
Σχήμα 5.25: NP (Ar-implanted) Sample C-V



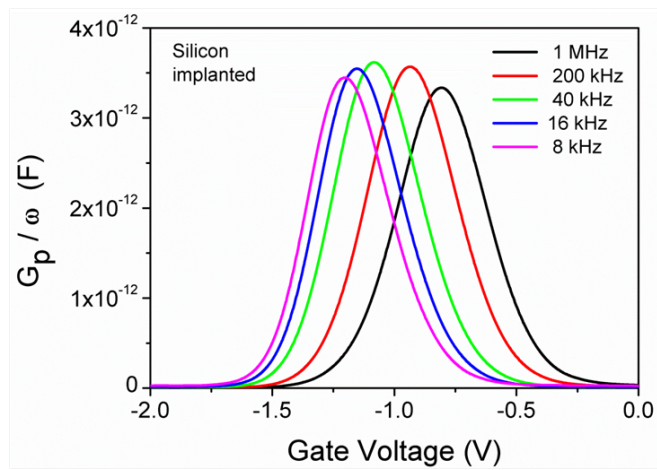
Σχήμα 5.26: Χαρακτηριστικές C-V των 4 δειγμάτων στο 1MHz

παράμετρος που καθορίζει το EOT είναι το πάχος του οξειδίου φραγής. Από το Σχήμα 5.26 συμπεραίνει κανείς ότι η ιοντική εμφύτευση έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία θετικού φορτίου τύπου Q_f . Η παρουσία του φορτίου αυτού είναι πιο έντονη στο δείγμα που είναι εμφυτευμένο με άζωτο. Έτσι λοιπόν φαίνεται ότι η ιοντική εμφύτευση έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση θετικού φορτίου και το φαινόμενο είναι πιο έντονο στα δείγματα με ιόντα N και Ar. Παρατηρεί κανείς επίσης την έντονη παρουσία παγίδων στη διεπιφάνεια υποστρώματος-οξειδίου σήραγγος στα δείγματα NOR και NO, κάτι που βέβαια επαναλαμβάνεται αλλά με πολύ μεγαλύτερη ένταση στο δείγμα NP. Προφανώς η C-V στο εμφυτευμένο με Ar δείγμα συσχετίζεται με την ελαττωματική ζώνη που παρουσιάστηκε προηγουμένως στον δομικό χαρακτηρισμό. Ο μεγάλος ατομικός αριθμός του Ar έχει προκαλέσει εκτεταμένη ζημιά κατά την ιοντική εμφύτευση με συνέπεια η C-V να αλλάζει κλίση στις χαμηλές συχνότητες. Τέλος, παρατηρεί κανείς ότι τα δεδομένα ηλεκτρικού και δομικού χαρακτηρισμού βρίσκονται σε απόλυτη συμφωνία.

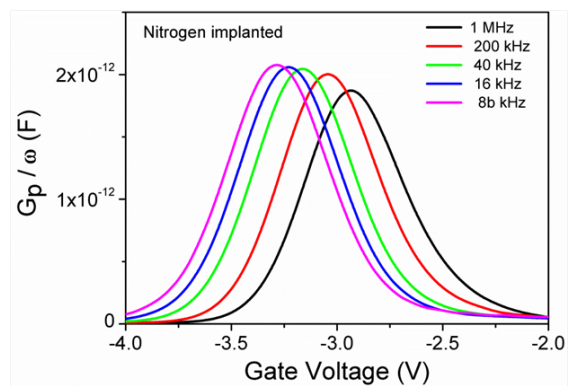
Χαρακτηριστική G-V



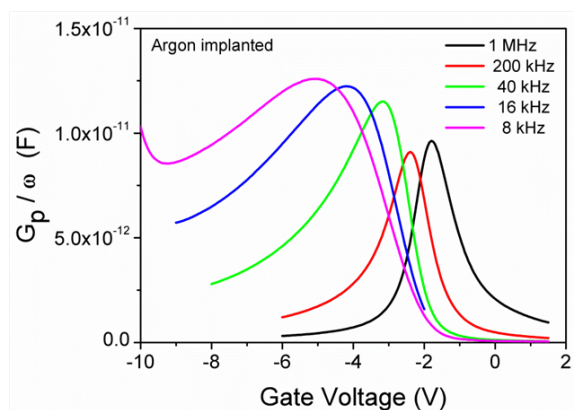
Σχήμα 5.27: NOR (Unimplanted) Sample G-V



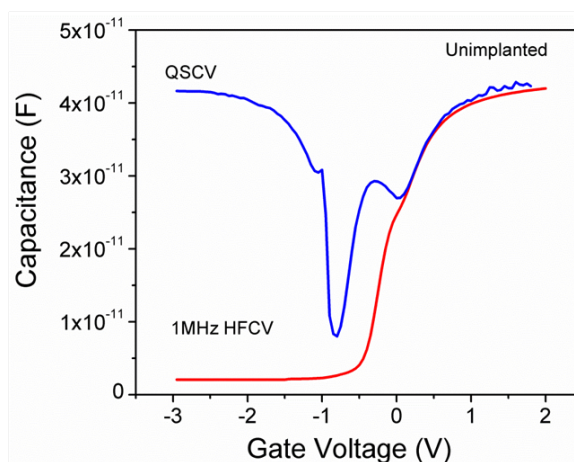
Σχήμα 5.28: NO (Si-implanted) Sample G-V



Σχήμα 5.29: NR (N-implanted) Sample G-V



Σχήμα 5.30: NP (Ar-implanted) Sample G-V



Σχήμα 5.31: NOR (Unimplanted) Sample Quasi-Static C-V

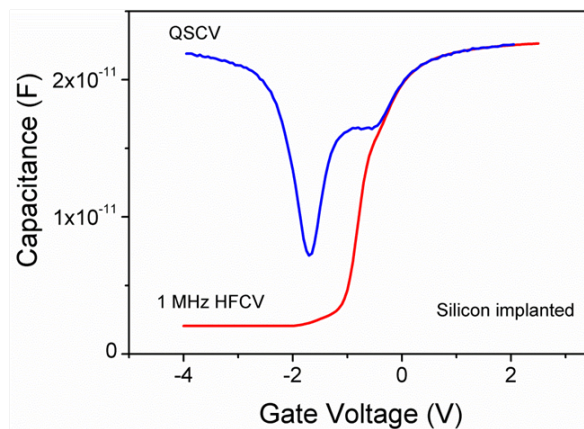
Στα Σχήματα 5.27, 5.28, 5.29 και 5.30 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές G-V των τεσσάρων δειγμάτων. Η συμπεριφορά του δείγματος NP διαφέρει εξαιτίας της ελαττωματικής ζώνης που προέκυψε από τον μεγάλο ατομικό αριθμό του Ar.

Χαρακτηριστική Quasi-Static

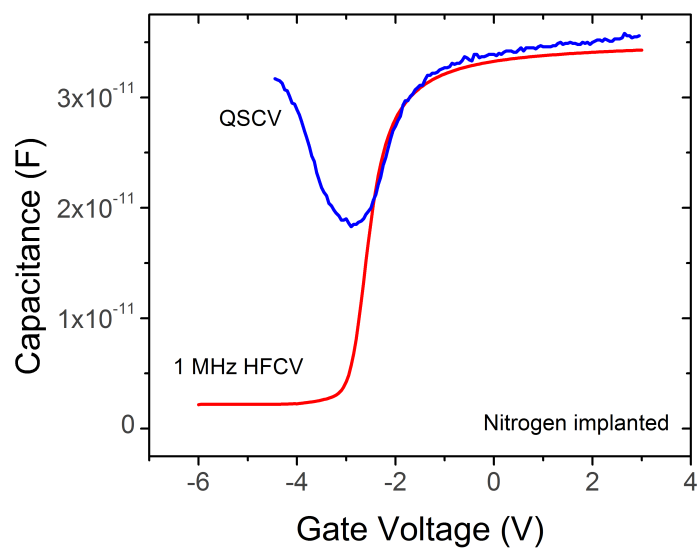
Στα Σχήματα 5.31, 5.32, 5.33 και 5.34 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές Quasi-static C-V των τεσσάρων δειγμάτων. Μικρή βύθιση της καμπύλης σημαίνει μεγάλη παρουσία διεπιφανειακών παγίδων. Παρατηρεί κανείς ότι η καμπύλη του δείγματος NP παρουσιάζει ελάχιστη βύθιση, προφανώς εξαιτίας της ελαττωματικής ζώνης.

Χαρακτηριστική $\Delta V_{FB} - |V_G|$

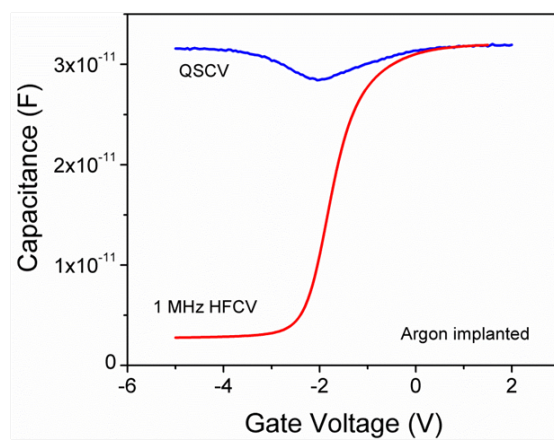
Στα Σχήματα 5.35, 5.36, 5.37, 5.38 και 5.39 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις της V_{FB} ως συνάρτηση του πλάτους της τάσης πύλης κατά την εφαρμογή διαδοχικών παλμών στα δείγματα. Παρατηρεί κανείς ότι το μοναδικό δείγμα που μπορεί να αποθηκεύσει οπές είναι το δείγμα με τα ιόντα πυριτίου. Στα υπόλοιπα δείγματα, όταν εφαρμόζεται αρνητικός παλμός στην πύλη



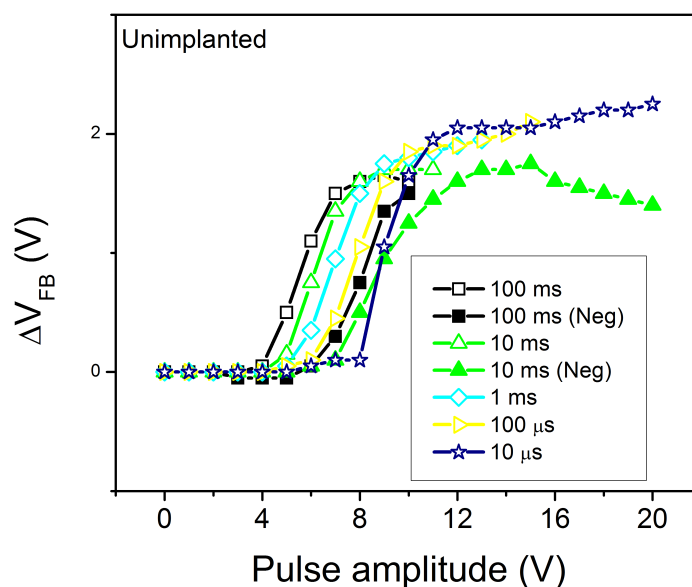
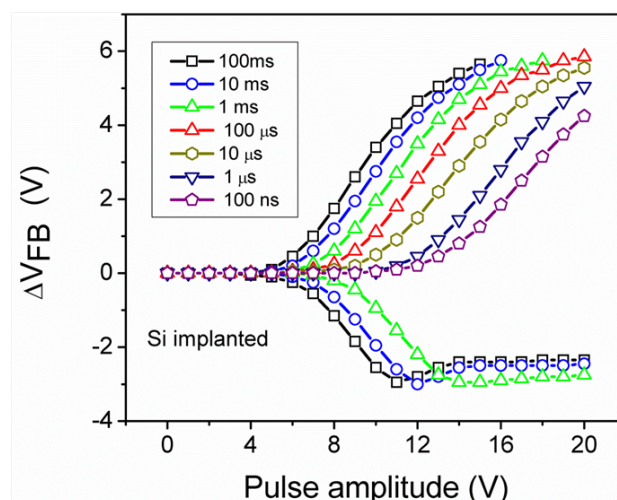
Σχήμα 5.32: NO (Si-implanted) Sample Quasi-Static C-V



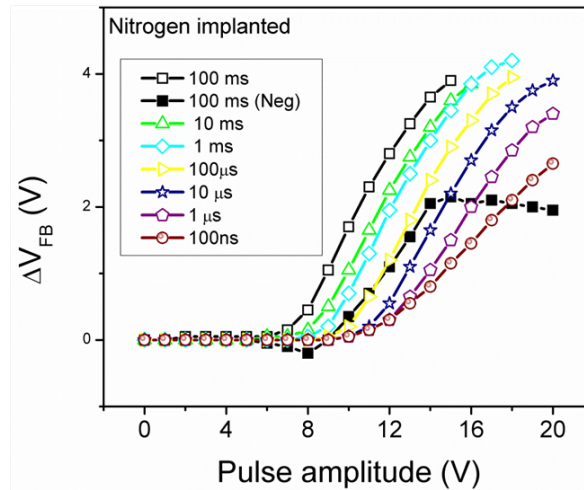
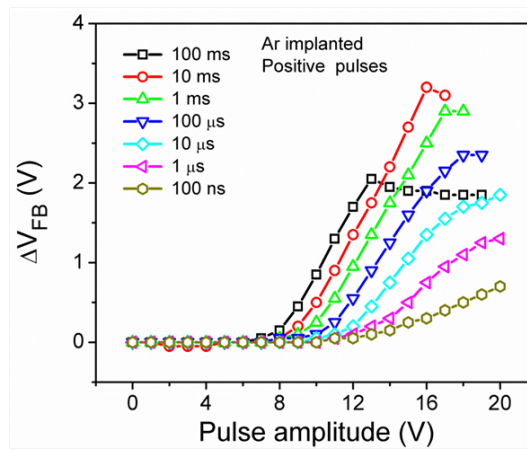
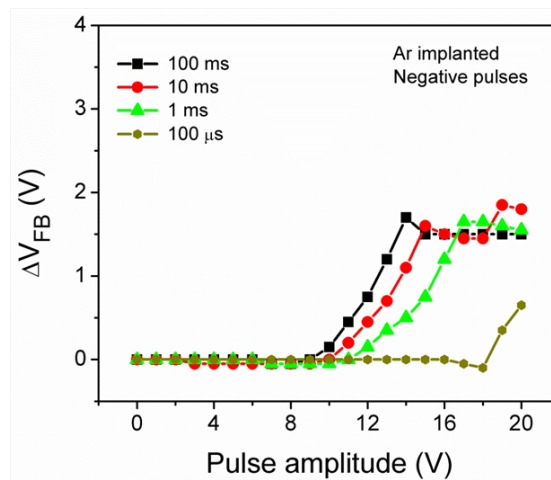
Σχήμα 5.33: NR (N-implanted) Sample Quasi-Static C-V

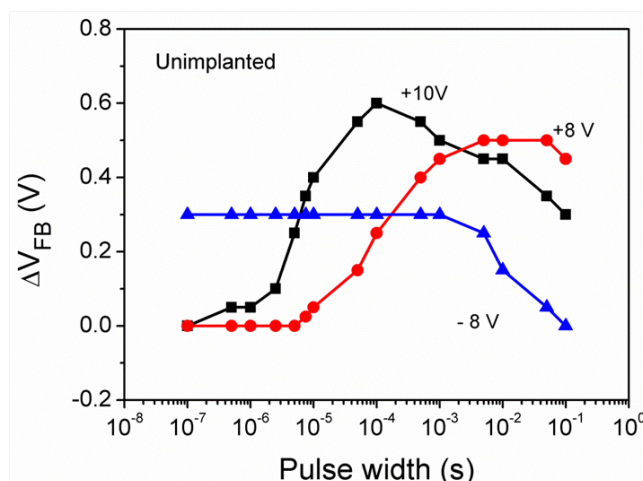
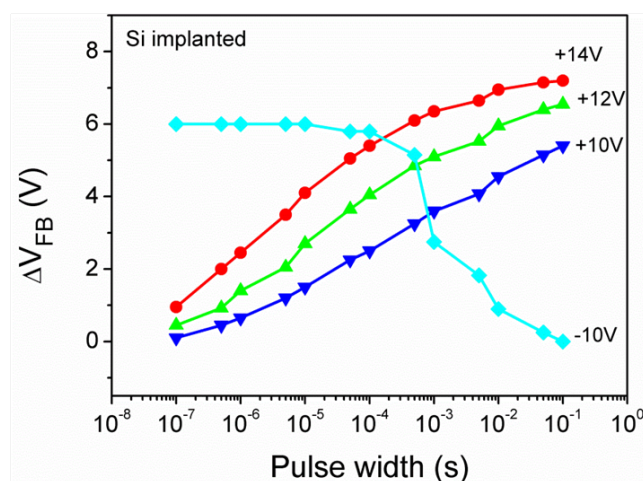


Σχήμα 5.34: NP (Ar-implanted) Sample Quasi-Static C-V

Σχήμα 5.35: NOR (Unimplanted) Sample $\Delta V_{FB} - |V_G|$ Σχήμα 5.36: NO (Si-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - |V_G|$

τότε η καμπύλη C-V μετατοπίζεται προς τα δεξιά, σαν να είχαμε εφαρμογή θετικού παλμού. Αυτό συνεπάγεται έγχυση ηλεκτρονίων από την πύλη λόγω του λεπτού οξειδίου φραγής. Παρατηρεί κανείς ότι για το δείγμα NO η παγίδευση ηλεκτρονίων αρχίζει γύρω στα 7V. Είναι περίπου η τάση στην οποία άρχισε η αγωγή στην χαρακτηριστική I-V. Γύρω στα 16V, η ΔV_{FB} από την Fresh είναι περίπου 5.5V και παρατηρείται ένας κορεσμός, που υποδεικνύει την έναρξη του φαινομένου Over-Write. Στην κατάσταση αυτή, οποιαδήποτε περαιτέρω εφαρμογή παλμών δεν συνεπάγεται αύξηση της ΔV_{FB} , δηλαδή μετατόπιση της C-V προς τα δεξιά, καθώς το επιπλέον φορτίο χάνεται μέσω ενός ρεύματος διαρροής από την πύλη. Στις αρνητικές τάσεις η αποθήκευση οπών αρχίζει στα -8V και το Over-Erase στα -13V. Η μέγιστη ΔV_{FB} από την Fresh είναι περίπου -3V, κάτι που συνεπάγεται συνολικό παράθυρο της τάξης των 8.5V.

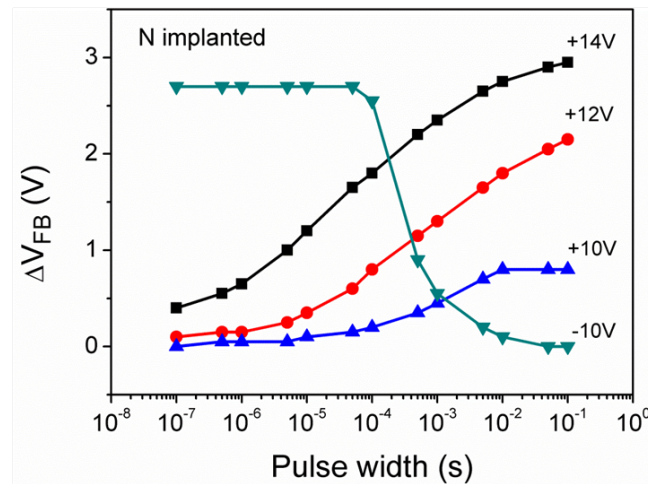
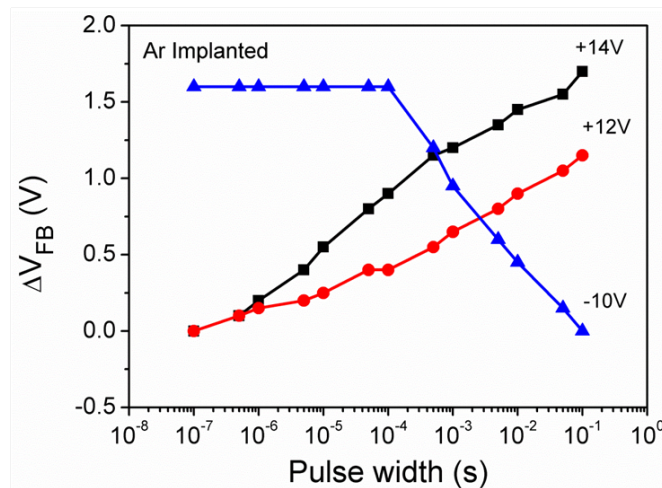
Σχήμα 5.37: NR (N-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - |V_G|$ Σχήμα 5.38: NP (Ar-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - |V_G|$ PositiveΣχήμα 5.39: NP (Ar-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - |V_G|$ Negative

Σχήμα 5.40: NOR (Unimplanted) Sample $\Delta V_{FB} - T_{width}$ Σχήμα 5.41: NO (Si-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - T_{width}$

Το αντίστοιχο παράθυρο για τα δείγματα NR και NP είναι 4.2 και 2.9V αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στην αδυναμία αποθήκευσης οπών λόγω του λεπτού οξειδίου φραγής. Και στα δύο δείγματα όμως τα αποθηκευμένα ηλεκτρόνια μπορούν να αποπαγιδευτούν με χρήση παλμού αρνητικής τάσης, κάτι που συνεπάγεται δυνατότητα διαγραφής της μνήμης.

Παρατηρείται ότι οι χαρακτηριστικές Διαγραφής - Εγγραφής αποδίδουν σωστά την λειτουργία του πυκνωτή γιατί στηρίζονται σε μηχανισμούς έγχυσης φορέων πλειονότητας των οποίων ο χρόνος αντίδρασης είναι πολύ μικρότερος από τη διάρκεια ενός παλμού. Αντίθετα οι χαρακτηριστικές Εγγραφής-Διαγραφής καθορίζονται από τον χρόνο δημιουργίας του στρώματος αντιστροφής, παρ'ότι το δείγμα βρισκόταν υπο φωτισμό. Επομένως, οι τελευταίες αυτές μετρήσεις ανταποκρίνονται μόνο στην περιοχή των ms.

Χαρακτηριστική $\Delta V_{FB} - T_{width}$

Σχήμα 5.42: NR (N-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - T_{width}$ Σχήμα 5.43: NP (Ar-implanted) Sample $\Delta V_{FB} - T_{width}$

Στα Σχήματα 5.40, 5.41, 5.42 και 5.43 φαίνονται οι χαρακτηριστικές απόδοσης των τεσσάρων δειγμάτων. Εδώ πλέον οι παλμοί δεν είναι διαδοχικοί αλλά μεσολαβεί αποπαγίδευση του φορτίου που αποθηκεύτηκε με τον προηγούμενο παλμό πριν εφαρμοστεί ο επόμενος. Από τις χαρακτηριστικές αυτές μπορεί κανείς να συμπεράνει ποια χαρακτηριστικά ενός παλμού είναι ικανά να οδηγήσουν τον πυκνωτή στις καταστάσεις Full-Write και Full-Erase. Στόχος είναι η λειτουργία σε όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές των παραμέτρων High, Low και Width.

Αρχικά για το δείγμα NOR παρατηρούμε ότι εάν επιλεγεί ως High η τιμή 10V τότε απαιτείται τουλάχιστον παλμός με $Width 5\mu s$ για να υπάρξει μετακίνηση της C-V από την κατάσταση Full-Erase. Επίσης, αν και στην αρχή επιλέξαμε ως παλμό Full-Write τον παλμό +10V/10ms παρατηρούμε ότι με Width 100 και 500 μs η C-V μετατοπίζεται πιο δεξιά, δίνοντας αυξημένο παράθυρο. Τέλος, για Width 50 και 100ms η C-V μετατοπίζεται όχι πιο δεξιά αλλά πιο αριστερά, κάτι που είναι ο ορισμός του φαινομένου Over-Write. Επομένως λοιπόν στα 10V

υπάρχει Over-Write πάνω από τα $100\mu\text{s}$.

Συνεχίζοντας στο ίδιο δείγμα αν ελαττώσει κανείς το High στα 8V τότε το Over-Write ελαττώνεται σημαντικά για μεγάλο Width, καθώς το συνολικό φορτίο που αποθηκεύεται σε κάθε παλμό μειώνεται. Παρατηρεί κανείς ότι χρειάζεται τουλάχιστον $Width = 50\mu\text{s}$ για να υπάρξει μετακίνηση και με $Width = 5\mu\text{s}$ φτάνουμε στο Full-Write.

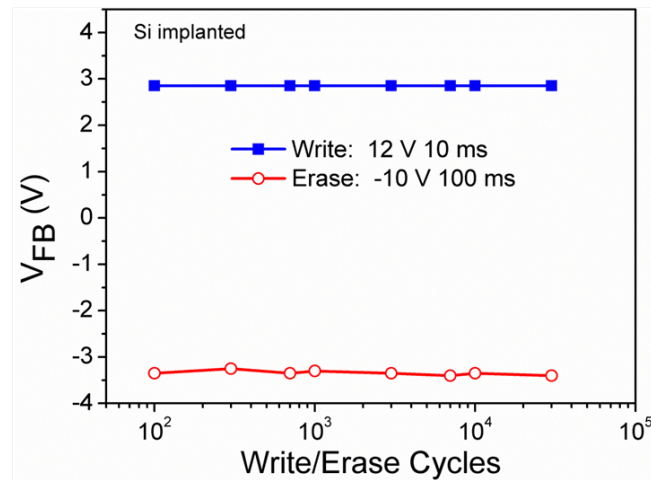
Τέλος, εξετάζοντας τους παλμούς διαγραφής παρατηρεί κανείς ότι απαιτείται μεγάλο Width, τουλάχιστον 50ms για να μεταβεί ο πυκνωτής στο Full-Erase. Επομένως ο παλμός διαγραφής με $Low = -8\text{V}$ θα έχει Width είτε 50ms είτε 100ms .

Το εμφυτευμένο με ιόντα πυριτίου δείγμα NO επιδεικνύει σαφώς καλύτερη συμπεριφορά. Εξετάζοντας πρώτα το υψηλό High των 14V διαπιστώνει κανείς ότι από τα 100ns υπάρχει διακριτή μετακίνηση της C-V, στα 10ms έχει φτάσει στο Full-Write και δεν υπάρχει φαινόμενο Over-Write, παρ'ότι το High είναι υψηλό. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στο παχύ οξειδίο φραγής που εμποδίζει το ρεύμα διαρροής της πύλης. Προχωρώντας στα 12V τα αποτελέσματα είναι τα ίδια. Η πτώση του παραθύρου είναι μικρή και επομένως μπορεί κανείς να αποδεχθεί αυτή την τιμή του High. Τέλος, για $High = 10\text{V}$ επίσης υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά (απαιτείται $Width = 10\text{ms}$ για μετάβαση στο Full-Write) αλλά πλέον η πτώση της V_{FB} είναι πιο αισθητή Σε κάθε περίπτωση πάντως δεν υπάρχει φαινόμενο Over-Write και το απαιτούμενο Width είναι 10ms με δύο υποψήφιες τιμές για το High. Τελικά επελέγη για το High η μεγαλύτερη από τις δύο τιμές για τον καθορισμό του παλμού Full-Write αυτού του δείγματος.

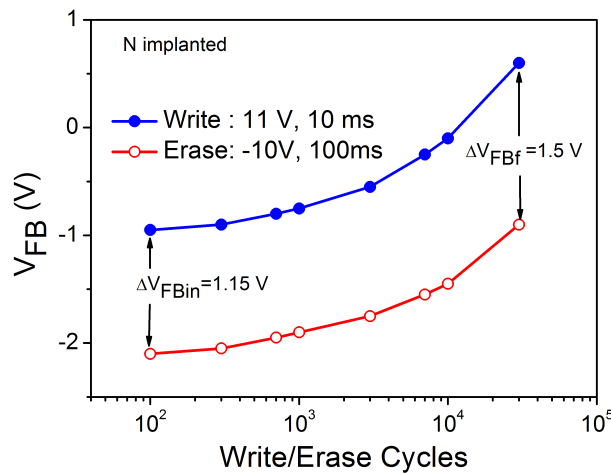
Εξετάζοντας τους παλμούς διαγραφής με $Low = -10\text{V}$ καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι απαιτείται τουλάχιστον $Width = 10\text{ms}$ για να μεταβεί η C-V στην κατάσταση Full-Erase.

Το εμφυτευμένο με ιόντα αζώτου δείγμα NR επιδεικνύει άριστη συμπεριφορά στα 14V . Υπάρχει διακριτή μετατόπιση από τα 100ns , μεταβαίνει στο Full-Write από τα 5ms και δεν επιδεικνύει Over-Write. Στα 12V πρέπει να φτάσουμε σε $Width = 2\mu\text{s}$ για να υπάρξει αισθητή μετατόπιση της C-V, όμως και πάλι το Full-Write συμβαίνει στα 5ms . Δεν υπάρχει Over-Write, όμως η πτώση του παραθύρου είναι κάτι παραπάνω από αισθητή. Αυτός ο λόγος ήταν η αιτία που τελικά επελέγη για τον παλμό Full-Write η μάλλον υψηλή τιμή του High που αναφέρθηκε προηγουμένως (14V). Η εξέταση της τιμής των 10V είναι άνευ νοήματος καθώς η πτώση του παραθύρου είναι τέτοια που την καθιστά απαγορευτική. Τέλος, εξετάζοντας τους παλμούς διαγραφής, παρατηρεί κανείς ότι απαιτείται τουλάχιστον $Width = 10\text{ms}$ για να μεταβεί η C-V στην κατάσταση Full-Erase.

Το εμφυτευμένο με ιόντα αργού δείγμα NP δεν επιδεικνύει τόσο καλή συμπεριφορά εξαιτίας της ελαττωματικής ζώνης, αλλά παρ'όλα αυτά μπορεί να λειτουργήσει ως κύτταρο μνήμης σε συγκεκριμένες συχνότητες (1MHz) και σε συγκεκριμένες τιμές των High και Width. Για $High = 14\text{V}$ υπάρχει διακριτή μετατόπιση της C-V για $Width = 5\mu\text{s}$ και μετάβαση στο



Σχήμα 5.44: NO (Si-implanted) Sample Endurance

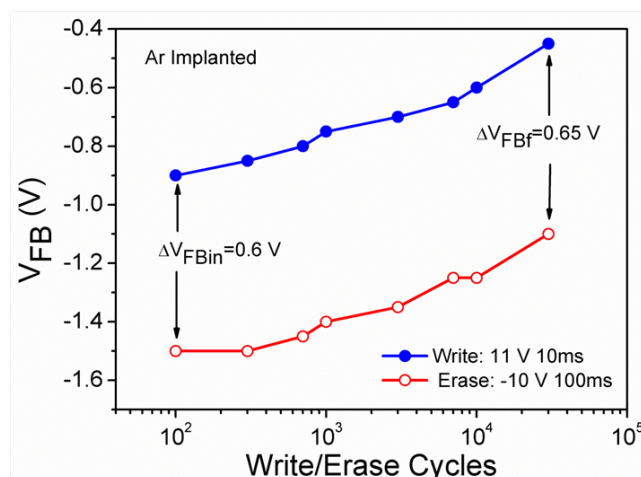


Σχήμα 5.45: NR (N-implanted) Sample Endurance

Full-Write στα 5ms. Επίσης δεν υπάρχει Over-Write. Αυτό το δείγμα φαίνεται ότι συμπεριφέρεται με παρόμοιο τρόπο με το δείγμα NR, απλώς λίγο χειρότερα. Στα 12V παρατηρείται ήδη υπερβολικά μεγάλη μείωση του παραθύρου, ενώ σε ό,τι αφορά τους παλμούς διαγραφής απαιτείται το μέγιστο $Width = 100ms$ για να φτάσει ο πυκνωτής στην κατάσταση Full-Erase.

Χαρακτηριστική αντοχής (Endurance)

Στα Σχήματα 5.44, 5.45 και 5.46 παρατίθενται οι μεταβολές των παραθύρων των δειγμάτων NO, NR και NP με την εφαρμογή επαναλαμβανόμενων κύκλων προγραμματισμού-διαγραφής. Το δείγμα NOR δεν συμπεριλαμβάνεται καθώς η αντοχή του δεν ξεπερνά τους 100 κύκλους. Παρατηρεί κανείς ότι και τα τρία δείγματα επιδεικνύουν πολύ καλή συμπεριφορά. Το εμφυτευμένο με ιόντα πυριτίου δείγμα διατηρεί το παράθυρό του καθώς και τις C-V του στις καταστάσεις Full-Write και Full-Erase σταθερές, ενώ στα άλλα δύο δείγματα υπάρχει μεν διατήρηση του παραθύρου αλλά με παράλληλη μετατόπιση των χαρακτηριστικών C-V προς τα

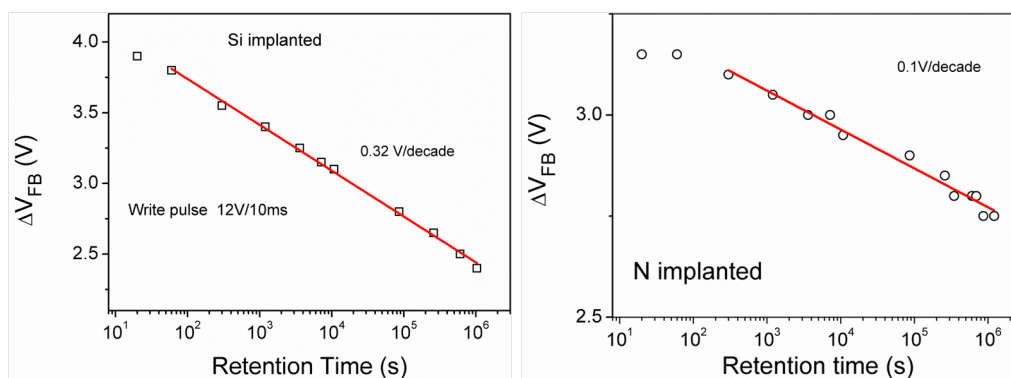


Σχήμα 5.46: NP (Ar-implanted) Sample Endurance

δεξιά.

Χαρακτηριστική διατήρησης (Retention)

Στα Σχήματα 5.47(α') και 5.47(β') παρατίθενται οι μεταβολές της V_{FB} των δειγμάτων NO και NR σε σχέση με την αντίστοιχη V_{FB} της καμπύλης Fresh σε διάφορες χρονικές στιγμές. Οι μετρήσεις έγιναν σε θερμοκρασία δωματίου. Παρατηρείται ότι το δείγμα με ιόντα πυριτίου έχει αρκετά μεγάλο ρυθμό απωλειών, σε αντίθεση με το δείγμα με ιόντα αζώτου. Οι μηχανισμοί οι οποίοι επηρεάζουν αυτόν τον ρυθμό θεωρείται ότι είναι αφενός η δυνατότητα υπερσυγκέντρωσης φορτίου στο νιτρίδιο εμφυτευμένο με πυρίτιο, λόγω του μεγαλύτερου οξειδίου φραγής, αφετέρου διάφορες δομικές ανωμαλίες στα δύο δείγματα, που υποβοηθούν την φυγή του αποθηκευμένου φορτίου από τον ακροδέκτη του υποστρώματος.



(α') NO (Si-implanted) Sample Retention 25°C (β') NR (N-implanted) Sample Retention 25°C

Σχήμα 5.47: Χαρακτηριστικές καμπύλες διατήρησης φορτίου

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

6.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ηλεκτρικός χαρακτηρισμός διατάξεων μνήμης τύπου SONOS με ιοντική εμφύτευση χαμηλής ενέργειας στο νιτρίδιο του πυριτίου και υγρή οξείδωση χαμηλής ενέργειας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο σχηματισμός του οξειδίου φραγής στην περίπτωση των ιόντων με χαμηλή αντιδραστικότητα (Ar, N) εξαρτάται από τις προκαλούμενες κρυσταλλικές ατέλειες, ενώ στην περίπτωση των εμφυτευμένων ιόντων πυριτίου η υγρή οξείδωση ενισχύεται λόγω της μεγάλης συγκέντρωσης ατόμων πυριτίου. Τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των διατάξεων εξαρτώνται κυρίως από το πάχος του οξειδίου φραγής, που είναι μία από τις πιο σημαντικές φυσικές παραμέτρους της διάταξης. Παρ'όλο που και οι τέσσερις διατάξεις παγιδεύουν ηλεκτρόνια, μόνο το εμφυτευμένο με πυρίτιο δείγμα παγιδεύει οπές. Τέλος, οι επιδόσεις στη διατήρηση φορτίου των δειγμάτων με πυρίτιο και άζωτο είναι πολύ καλές, πιθανότατα λόγω των παγίδων που δημιουργήθηκαν από την ιοντική εμφύτευση.

6.2 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Πιθανές επεκτάσεις της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να γίνουν με τη μελέτη της επίδρασης διαφόρων παραγόντων και συγκεκριμένα:

- του μετάλλου στην πύλη.
- του οξειδίου φραγής με χρησιμοποίηση high-k διηλεκτρικών.
- του αριθμού των στρωμάτων, με κατασκευή διατάξεων με πολλά στρώματα.

Μεταφράσεις ξένων όρων

Μετάφραση

αντοχή (φορτίου)
αντοχή (φορτίου) στη ραδιενέργεια
διαγραφή
διατήρηση (φορτίου)
επίπεδο κενού
κύκλος παραγωγής
κύτταρο-κελί μνήμης
μη πτητική μνήμη
μνήμη με αιωρούμενη (απομονωμένη) πύλη
μνήμη με παγίδευση φορτίων
μνήμη μόνο ανάγνωσης
μνήμη τυχαίας προσπέλασης
οξειδίο σήραγγος
οξειδίο φραγής
προγραμματισμός
πτητική μνήμη
σμίχρυνση
φαινόμενο σήραγγος υποβοηθούμενο από παγίδες

Αγγλικός όρος

(charge) endurance
(charge) radiation hardness
erase
(charge) retention
vacuum level
manufacturing cycle
memory cell
non-volatile memory
floating gate memory
charge-trapping memory
Read Only Memory - ROM
Random Access Memory - RAM
tunnel oxide
blocking oxide
write
volatile memory
scaling
trap-assisted tunneling - TAT

Βιβλιογραφία

- [1] Constantine A. Balanis. *Advanced Engineering Electromagnetics*. John Wiley and Sons, Inc, 1η έκδοση, 1989.
- [2] Joe E. Brewer και Mantzur Gill. *Nonvolatile Semiconductor Memory Technologies with emphasis on Flash*. John Wiley and Sons, Inc, 1η έκδοση, 2008.
- [3] William D. Brown και Joe E. Brewer. *Nonvolatile Semiconductor Memory Technology*. IEEE Press, 1η έκδοση, 1998.
- [4] Jiankang Bu και Marvin H. White. Design considerations in scaled sonos nonvolatile memory devices (presentation). http://klabs.org/richcontent/MemoryContent/nvmt_symp/nvmts_2000/presentations/bu_white_sonos_lehigh_univ.pdf, 2001.
- [5] Nathan Eichenlaub. Design, characterization and modeling of charge trapping nonvolatile semiconductor memory devices. Διπλωματική εργασία Master, Lehigh University, 2009.
- [6] Margaret French. *Physics and characterization of scaled multilayer nonvolatile memory devices*. Διδακτορική Διατριβή, Lehigh University, 1993.
- [7] P. Gentil. *Instabilities in Silicon Devices*, τόμος 3, κεφάλαιο 5, σελίδες 341–404. Elsevier Science B.V., 1999.
- [8] V. Ioannou-Sougleridis, P. Dimitrakis, V. Em. Vamvakas, P. Normand, C. Bonafos, S. Schamm, N. Cherkashin, G. Ben Assayag, M. Perego και M. Fanciulli. Oxide-nitride-oxide memory stacks formed by low-energy ion implantation into nitride and wet oxidation. *Microelectronic Engineering*, (84):1986–1989, 2007.
- [9] V. Ioannou-Sougleridis, P. Dimitrakis, V. Em. Vamvakas, P. Normand, C. Bonafos, S. Schamm, N. Cherkashin, G. Ben Assayag, M. Perego και M. Fanciulli. Wet oxidation of nitride layer implanted with low-energy si ions for improved oxide-nitride-oxide memory stacks. *Applied Physics Letters*, 90(26), 2007.
- [10] Frank Libsch. *Physics, technology and electrical aspects of scaled MONOS/SONOS devices for low voltage nonvolatile semiconductor memories (NVSMs)*. Διδακτορική Διατριβή, Lehigh University, 1989.

- [11] Hang Ting Lue. Vlsi (presentation). <http://www.feu.edu.tw/edu/mse/>, 2006.
- [12] Mielke, Fazio και Liou. Reliability comparison of flotox and textured-polysilicon e^2 proms. Στο *Reliability Physics Symposium*, σελίδες 85–92, 1987.
- [13] Minami και Kamigaki. A novel monos nonvolatile memory device ensuring 10-year data retention after 10^7 erase/write cycles. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 40(11):2011 – 2017, 1993.
- [14] G. Molas, D. Deleruyelle, B. De Salvo, G. Ghibaudo και M. Gely. Impact of few electron phenomena on floating-gate memory reliability. *Electron Devices Meeting*, (13-15):877–880, 2004.
- [15] Kwok K. Ng. *Complete Guide to Semiconductor Devices*. John Wiley and Sons, Inc, 1η έκδοση, 2002.
- [16] Nozawa, Matsukawa και Morita. An eeprom cell using a low barrier height tunnel oxide. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 33(2):275–281, 1986.
- [17] Asha Rani. Simulation and modeling of sonos non-volatile memory. Διπλωματική εργασία Master, George Mason University, 2010.
- [18] Yakov Roizin και Vladimir Gritsenko. *Dielectric Films for Advanced Microelectronics*, κεφάλαιο 6, σελίδες 252–295. John Wiley and Sons, Inc, 2007.
- [19] A. Scarpa, G. Tao και F.G. Kuper J. Dijkstra. Tail bit implications in advanced 2 transistors-flash memory device reliability. *Microelectronic Engineering*, 59(1-4):183•188, 2001.
- [20] S.M.Sze. *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. John Wiley and Sons, Inc, 2η έκδοση, 2002.
- [21] S.M.Sze και Kwok K. Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley and Sons, Inc, 3η έκδοση, 2007.
- [22] Suzuki και Hayashi. Degradation properties of mnos structures. *Journal of Applied Physics*, 52:6377, 1981.
- [23] Χρήστος Σαργέντης. Ανάπτυξη, χαρακτηρισμός και μελέτη μεταλλικών νανοκρυστάλλων στι διεπιφάνεια SiO_2/HfO_2 με εφαρμογή σε δομές στοιχείων μνήμης. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.
- [24] Ιωάννης Βομβορίδης. *Ηλεκτρομαγνητικά Πεδία*. Συμεών, 1η έκδοση, 2009.
- [25] Gan Wang. *Characterization and modeling of nanoscaled SONOS/MANOS nonvolatile semiconductor devices*. Διδακτορική Διατριβή, Lehigh University, 2008.

-
- [26] Marvin H. White, Yu (Richard) Wang, Stephen J. Wrazien και Yijie (Sandy) Zhao. Advancements in nanoelectronic sonos nonvolatile semiconductor memory (nvsm) devices and technology. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 16(2):479–501, 2006.
- [27] Bart Van Zeghbroeck. *Principles of Semiconductor Devices*. 2007.