



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
"Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις"

Μεταπτυχιακή Εργασία

Ηλεκτρικός χαρακτηρισμός δομών MOS Πυριτίου και Γερμανίου

Αλαφάκης Σταμάτιος

Τριμελής Επιτροπή:

Δρ. Δημήτριος Τσουκαλάς (Καθ. Σ.Ε.Μ.Φ.Ε. - Ε.Μ.Π.)

Δρ. Λεωνίδα Τσέτσερης (Καθ. Σ.Ε.Μ.Φ.Ε. - Ε.Μ.Π)

Δρ. Βασίλειος Ιωάννου-Σουγλερίδης (Ερευ. Α' Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»)

Αθήνα
Νοέμβριος 2021

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία εκπονήθηκε στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», στο πλαίσιο ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο διατμηματικό μεταπτυχιακό πρόγραμμα "Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις" της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου . Η διεξαγωγή των πειραμάτων έγινε στο εργαστήριο ηλεκτρικών μετρήσεων του Ινστιτούτου Νανοτεχνολογίας και Νανοεπιστήμης. Την ερευνητική επίβλεψη είχε ο Δρ. Βασίλειος Ιωάννου-Σουγλερίδης, Ερευνητής Α΄ βαθμίδας στο Ινστιτούτο Νανοτεχνολογίας και Νανοεπιστήμης του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στους ανθρώπους που συνέβαλαν στην εκπόνησή της :

Στον επιβλέποντα καθηγητή, Δρ. Δημήτριο Τσουκαλά, Καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο ερευνητικό θέμα καθώς και για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθόλη την διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας.

Στον Δρ. Βασίλειο Ιωάννου-Σουγλερίδη, τόσο για την καθοδήγησή του σε κάθε στάδιο της μεταπτυχιακής εργασίας όσο και για την επιμονή του σε δύσκολες στιγμές. Χωρίς την δική του, καθοριστική βοήθεια, δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής εργασίας.

Στον Δρ. Δημήτριο Σκαρλάτο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών, για την στήριξη που μου έδειξε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Ακόμη τον ευχαριστώ γιατί με καθοδήγησε στο να συνεχίσω τις σπουδές μου σε μεταπτυχιακό επίπεδο και να εντρυφήσω στο τομέα της μικροηλεκτρονικής.

Στον Δρ. Λεωνίδα Τσέτσερη, Καθηγητή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την συμμετοχή του στη τριμελή εξεταστική επιτροπή.

Στον Δρ. Α. Δημουλά ερευνητή στο Ινστιτούτο Νανοτεχνολογίας και Νανοεπιστήμης του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος», και στην Δρ. Δ.Τσούτσου για τις μετρήσεις XPS στα δείγματα γερμανίου.

Στον Δρ. Ε. Γογγολίδη ερευνητή στο Ινστιτούτο Νανοτεχνολογίας και Νανοεπιστήμης του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος» και τον Δρ. Α. Ζένιο, για τις διεργασίες plasma oxidation.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με την συνεχόμενη ανάγκη για μείωση των διαστάσεων του τρανζίστορ MOSFET και την ανάδειξη προβλημάτων που σχετίζονται με διαρροές ρευμάτων μέσα από το διηλεκτρικό, η έρευνα στράφηκε τόσο σε αντικατάσταση του SiO₂ με διηλεκτρικά υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς, όσο και του υποστρώματος, του πυριτίου με άλλα ημιαγωγία υποστρώματα. Τα τελευταία είναι πιθανόν να οδηγήσουν σε καλύτερη απόδοση του ολοκληρωμένου κυκλώματος εφόσον είναι δυνατή η ολοκλήρωσή τους σε διάταξη MOSFET. Ένας από τους υποψήφιους αντικαταστάτες του πυριτίου φαίνεται να είναι το γερμάνιο. Η επιστημονική κοινότητα ξεκίνησε μια ενδελεχή προσπάθεια κατανόησης των χαρακτηριστικών των δομών MOS με υπόστρωμα γερμανίου και εύρεσης του κατάλληλου οξειδίου πύλης. Σε δομές MOS γερμανίου απαιτείται λεπτομερής ανάλυση των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών ώστε να βρεθούν οι κατάλληλες διεργασίες που θα οδηγήσουν σε υψηλής ποιότητας διεπιφάνειες.

Η παρούσα εργασία διερευνά ένα φαινόμενο που παρατηρείται σε μετρήσεις σύνθετης αγωγιμότητας σε δομές MOS γερμανίου. Συγκεκριμένα οι κορυφές των απωλειών συναρτήσει της συχνότητας (χαρακτηριστικές Gr/ω-f) παρουσιάζουν εξαιρετικά μεγάλη διεύρυνση. Οι αναφορές του φαινομένου αυτού στο σύστημα Si-SiO₂ είναι περιορισμένες και προσδιορίζουν ότι το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται έντονα όταν μειώνεται η θερμοκρασία της μέτρησης. Η διερεύνηση των χαρακτηριστικών απαίτησε την πραγματοποίηση μετρήσεων σύνθετης αγωγιμότητας σε πυκνωτές MOS πυριτίου με διαφορετικές πυκνότητες διεπιφανειακών παγίδων (από 10¹⁰ έως 10¹³ cm⁻²eV⁻¹) στην περιοχή θερμοκρασιών 78-350 K. Οι μετρήσεις αυτές έδειξαν ότι το εύρος της κορυφής των απωλειών δεν εξαρτάται από την θερμοκρασία. Το αποτέλεσμα αυτό είναι σημαντικό γιατί δεν ανιχνεύθηκε κανένας συσχετισμός μεταξύ του εύρους της κορυφής των απωλειών από την πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων. Κατά συνέπεια, είναι δυνατή η γενίκευση ότι η διεύρυνση που παρατηρείται στην περίπτωση των δομών MOS γερμανίου πρέπει να οφείλεται σε σύνθετα φαινόμενα που σχετίζονται με την συνολική απόκριση της διεπιφάνειας διηλεκτρικού-ημιαγωγού που προφανώς περιλαμβάνει εκτός των διεπιφανειακών παγίδων και άλλες παγίδες φορέων.

Πραγματοποιήθηκαν επίσης ηλεκτρικές μετρήσεις σε δομές MOS γερμανίου n & p τύπου, με διηλεκτρικό πύλης τη διστρωματική στοίβα Al₂O₃/GeO₂ που επιτεύχθηκε με οξείδωση πλάσματος μέσω λεπτού στρώματος Al₂O₃. Οι ηλεκτρικές μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στην θερμοκρασιακή περιοχή 77.4- 198 K. Οι μετρήσεις αυτές δεν έδειξαν καμία βελτίωση της ποιότητας της διεπιφάνειας γερμανίου διηλεκτρικού σε σχέση με προηγούμενες.

ABSTRACT

The continuous need for downscaling the MOSFET's dimensions and the emerging problems that are related to the leakage currents through the dielectric, scientific research turned equally to replace SiO₂ with high-K dielectrics of the substrate, silicon with other semiconducting substrates. The latter could lead to even better performances of the integrated circuit, as long as they could fit successfully into a MOSFET layout. One of candidates for replacing silicon, seems to be germanium. Scientific community, through continuous effort, is trying to understand the characteristics of MOS structures based on germanium, finding the suitable gate oxide. MOS structures based on germanium substrates need detailed analysis of their electrical characteristics in order to find the suitable processes that could lead to high quality interfaces.

This work is trying to investigate an effect that occurs when measuring conductance on germanium based MOS structures. More specifically, peaks that occur and refer to losses, versus frequency, (G_p/ω vs f), present great broadening. References of this effect in Si-SiO₂ system are limited and show that this occurs with the decrease of temperature. To investigate this broadening, it was necessary to perform conductivity measurements in a range of temperatures 78-350K, on silicon based MOS capacitors that differ in the density of interface traps (from 10^{10} to 10^{13} cm⁻²eV⁻¹). These measurements, showed that the range of the peaks that represent the loss in conductivity, does not depend on the temperature. This result is of great significance because there was no other correlation between the density of interface traps and the range of the peaks. Consequently, it is possible to generalize that the broadening that is observed in the case of germanium based MOS structures, is due to complex mechanisms which are related to the whole response of the interface of the dielectric-semiconductor that obviously also includes other types of traps.

Furthermore, electrical measurements were carried out on germanium based MOS capacitors n & p type, with nitride dielectric pack Al₂O₃/GeO₂, which was achieved with plasma oxidation through a thin layer of Al₂O₃. These electrical measurements took place at a temperature range 77.4 – 198 K. These measurements did not show any improvement on the quality of the interface Ge-dielectric in contrast to previous measurements.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

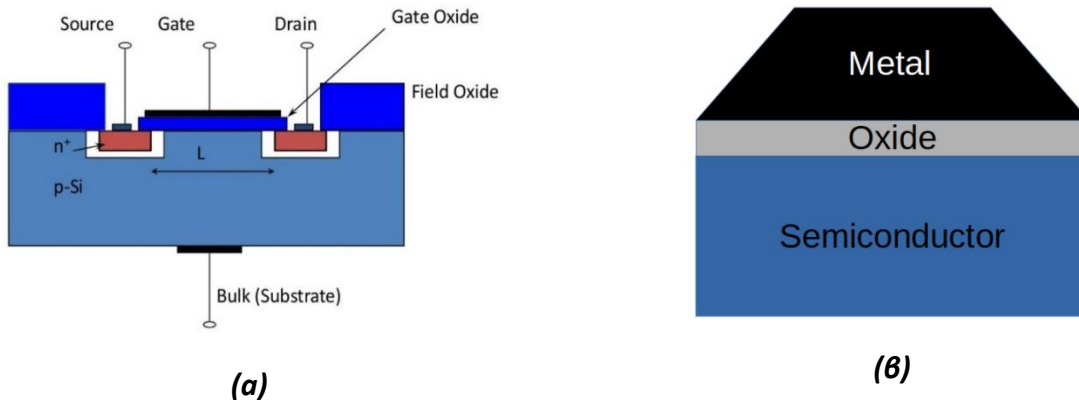
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	1
1.1 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CMOS ΠΥΡΙΤΙΟΥ & ΤΟ ΓΕΡΜΑΝΙΟ ΩΣ ΥΠΟΨΗΦΙΟΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΤΗΣ ...	1
1.2 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΥΛΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ MOS ΣΤΟ ΓΕΡΜΑΝΙΟ	6
1.3 Η ΔΟΜΗ Al_2O_3/Ge	8
1.4 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ MOS ΣΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ	10
1.5 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	12
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	14
2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ	16
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	16
2.2 ΤΕΧΝΙΚΗ ALD - ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΤΟΜΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ	16
2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΩΝ MOS	19
2.3.1 Η μορφή των χαρακτηριστικών χωρητικότητας-τάσης και το ισοδύναμο κύκλωμα πυκνωτή MOS	20
2.3.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες $C - V_G$ συναρτήσει της συχνότητας	22
2.3.3 Υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων: η μέθοδος Hi-Low	24
(α) Αρχή λειτουργίας της μεθόδου	24
(β) Υπολογισμός του δυναμικού επιφανείας	25
(γ) Υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων	26
(δ) Ενεργειακή κατανομή των διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα ...	27
(ε) Η επίδραση της ανόπτησης σε περιβάλλον υδρογόνου στην πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων στο σύστημα $Al/SiO_2/Si$	28
2.3.4 Υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων - η μέθοδος της αγωγιμότητας συναρτήσει της συχνότητας	30
(α) Αρχή λειτουργίας της μεθόδου	30
(β) Υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων	33
(γ) Ενεργειακή κατανομή των διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα ...	35
2.3.5 Υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων - η μέθοδος της αγωγιμότητας συναρτήσει της τάσης	37
2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟ ΓΕΡΜΑΝΙΟ	40
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	43

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	45
3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ	45
3.1.1 Δείγματα με υπόστρωμα πυριτίου	45
3.1.2 Δείγματα με υπόστρωμα γερμανίου	47
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	52
3.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΩΝ ΜΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	55
3.3.1 Δείγμα #1 Si- Al/SiO ₂ /n-Si Μετρήσεις οξειδίου αναφοράς σε θερμοκρασία δωματίου	55
3.3.2 Μετρήσεις διστρωματικών διηλεκτρικών δομών συναρτήσει της θερμοκρασίας - Συμπεριφορά θεωρητικής χαρακτηριστικής C-V _G με την θερμοκρασία ως παράμετρο	61
3.3.3 Δείγμα #2 Si - Δομή Al/SiO ₂ (+4.2nm Si ₃ N ₄)/n-Si	63
3.3.4 Δείγμα #3 Si - Δομή Al/SiO ₂ - Si ₃ N ₄ (+9.2nm)/n-Si	68
3.3.5 Δείγμα #4 Si - Δομή Al/SiO ₂ - Si ₃ N ₄ (+9.2nm)/n-Si + υγρή οξείδωση	76
3.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΩΝ ΜΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ	80
3.4.1 Μετρήσεις XPS δειγμάτων υποστρώματος γερμανίου	80
3.4.2 Δείγμα #1 Ge – Δομή Pt/Al ₂ O ₃ (GeO ₂)/p-Ge	81
3.4.3 Δείγμα #2 Ge – Δομή Pt/Al ₂ O ₃ (GeO ₂)/n-Ge	86
3.5 ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	92
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	94

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΚΑΙ ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

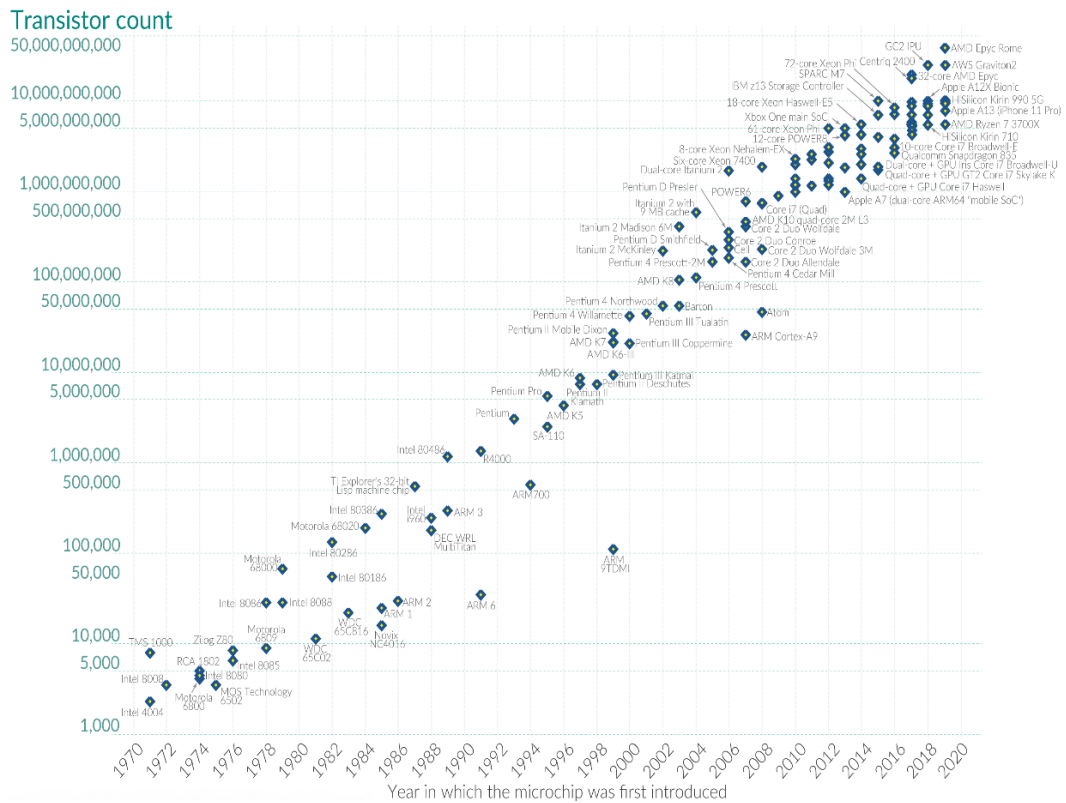
1.1 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ CMOS ΠΥΡΙΤΙΟΥ & ΤΟ ΓΕΡΜΑΝΙΟ ΩΣ ΥΠΟΨΗΦΙΟΣ ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΤΗΣ

Η κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μικροεπεξεργαστών και μνήμης στηρίζεται στην τεχνολογία CMOS, πυρήνα της οποίας αποτελεί το transistor επίδρασης ηλεκτρικού πεδίου ή MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor-Filled-Effect-Transistor), που εικονίζεται στην **Εικόνα 1.1(α)**. Η πύλη του του transistor, η οποία είναι μία δομή MOS (**Εικόνα 1.1(β)**) καθορίζει, κυρίως, την λειτουργία του transistor βάσει των χαρακτηριστικών της. Η πιο εδραιωμένη βιομηχανικά δομή MOS βασίστηκε, από το 1965 έως το 2003, αποκλειστικά σε υποστρώματα πυριτίου (Si) με διηλεκτρικό πύλης SiO_2 και μέταλλο πύλης το αλουμίνιο ή ισχυρά νοθευμένο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (poly-Si). Η θερμική και χημική σταθερότητα του SiO_2 [υψηλό σημείο τήξεως ($\sim 1400^\circ\text{C}$), μη διαλυτότητα στο νερό, διατήρηση της άμορφης φύσης του σε θερμοκρασίες κοντά στο σημείο τήξεως], σε συνδυασμό με την εύκολη ανάπτυξή του (θερμική οξείδωση των υποστρωμάτων πυριτίου) και την άριστη διεπιφάνεια που σχηματίζει με το πυρίτιο (απουσία τραχύτητας, χαμηλά επίπεδα διεπιφανειακών παγίδων μετά από απλή ανόπτηση σε μίγμα H_2/N_2), εδραίωσαν για πολλά χρόνια την χρήση του ως κυρίαρχο διηλεκτρικό πύλης σε διατάξεις MOSFET πυριτίου.



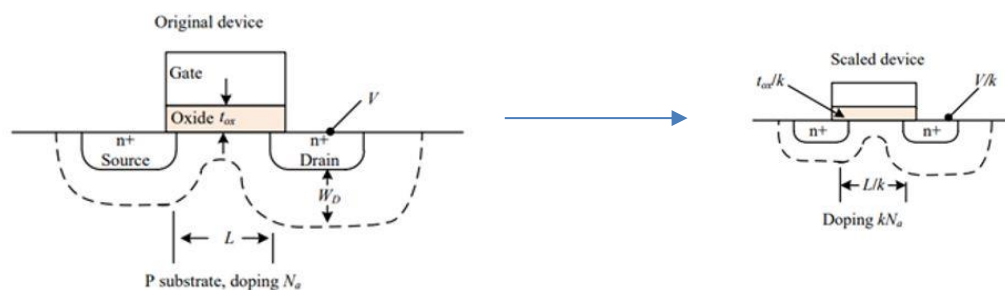
Εικόνα 1.1: (α) Το transistor MOSFET σε ημιαγώγιμο υπόστρωμα τύπου p. (β) Δομή MOS

Όμως, η απαίτηση για βελτιστοποίηση της απόδοσής τους, οδήγησε σε μια συνεχή μείωση των διαστάσεων βασικών δομικών χαρακτηριστικών του transistor MOSFET. Η μείωση αυτή επιτυγχάνονταν κάθε δύο χρόνια, σε πλήρη συμφωνία με τον εμπειρικό νόμο του Moore, που εικονίζεται στην **Εικόνα 1.2**, περί διπλασιασμού της πυκνότητας των transistor σε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα κάθε δυο χρόνια.



Εικόνα 1.2 Εμπειρικός νόμος του Moore.

Η ιδανική σμίκρυνση υπό κλίμακα των διαστάσεων των transistor MOSFET προτάθηκε από τους Denard et al. ως μοντέλο σμίκρυνσης σταθερού πεδίου (1). Το μοντέλο αυτό καθορίζει κανόνες σμίκρυνσης των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών (μήκος πύλης L , πάχος οξειδίου t_{ox}) κατά έναν παράγοντα $1/k$, και αύξηση κατά έναν παράγοντα k του επιπέδου νόθευσης των περιοχών πηγής-καταβόθρας (N_d, N_a), έτσι ώστε το πεδίο που αναπτύσσεται στη διεπιφάνεια μονωτή-ημιαγωγού κάθε transistor MOSFET να παραμένει σταθερό (ώστε να υπάρχει απόλυτος έλεγχος του ρεύματος από την πύλη), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.2** (1).



Εικόνα 1.3: Σχηματική αναπαράσταση του μοντέλου σμίκρυνσης υπό κλίμακα σταθερού πεδίου σε διάταξη n-MOSFET (1).

Βασιζόμενοι σε αυτόν τον κανόνα, ένα transistor MOSFET αποκτά μειωμένο χρόνο απόκρισης τ , ενώ ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα αυξημένο αριθμό τρανζίστορ (k^2) και μειωμένη ισχύ κατανάλωσης ανά τρανζίστορ, όπως αναφέρονται στον **Πίνακα 1.1** (2).

	MOSFET Device and Circuit Parameters	Multiplicative Factor ($k > 1$)
Scaling assumption	Device dimension (t_{ox}, L, W, x_j)	$1/k$
	Doping concentration (N_a, N_d)	k
	Voltage (V)	$1/k$
Derived scaling behavior of Circuit parameters	Electrical field (E)	1
	Circuit delay time ($\tau \sim CV/I$)	$1 / k$
	Oxide capacitance (C_{ox})	$1 / k$
	Power dissipation per transistor ($P \sim VI$)	$1 / k^2$
	Number of transistor per area (n/A)	k^2
	Power density (nP/A)	1
	Current, drift (I)	$1 / k$

Πίνακας 1.1: Κανόνες σμίκρυνσης υπό κλίμακα των διαστάσεων της διάταξης MOSFET και επίδραση στα βασικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του (2).

Η απαίτηση για διαρκή μείωση του πάχους του οξειδίου της πύλης των transistor MOSFET άρχισε να οδηγεί (από τις αρχές της δεκαετίας του 2000) το SiO_2 ως διηλεκτρικό στα φυσικά του όρια. Για την σύγχρονη τεχνολογία που χρησιμοποιεί μήκος πύλης 22 nm, το αντίστοιχο πάχος του SiO_2 θα έπρεπε να είναι της τάξεως του 1 nm, πολύ μικρό ώστε να διατηρεί την μονωτική φύση του οξειδίου, αφού αυτό καθίσταται διαπερατό από φορείς μέσω του φαινομένου σήραγγος (3,4). Έτσι γεννήθηκε η ανάγκη για ανεύρεση νέων διηλεκτρικών οξειδίων με υψηλότερη σχετική διηλεκτρική σταθερά k (high- k dielectrics) από το SiO_2 ($k=3.9$), όπως αυτά που εικονίζονται στο **Πίνακα 1.2** ($\text{HfO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{ZrO}_2$ κ.λπ.) προς αντικατάστασή του. Το σκεπτικό είναι ότι η χρήση ενός εναλλακτικού οξειδίου με υψηλότερη σχετική διηλεκτρική σταθερά από το SiO_2 επιτρέπει τη χρήση μεγαλύτερου φυσικού πάχους, διατηρώντας παράλληλα τη χωρητικότητα της δομής MOS της πύλης ισοδύναμη με αυτή που θα είχε παρουσία υπέρλεπτου υμενίου SiO_2 .

Material	Dielectric constant (k)	Band gap E_G (eV)	Band offset ΔE_C (eV) to Si	Band offset ΔE_C (eV) to Ge	Crystal structure
SiO ₂	3.9	8.9	3.2		Amorphous
Al ₂ O ₃	9	8.7	2.8	2.6 [24]	Amorphous
Si ₃ N ₄					Amorphous
TiO ₂	80–100	3.5	1.2		Tetragonal
Ta ₂ O ₅	26	4.5	1–1.5		Orthorhombic
HfO ₂	25	5.7	1.4	2.0 ± 0.1 [25]	Monoclinic, tetragonal, cubic
ZrO ₂	25	7.8	1.5		Monoclinic, tetragonal, cubic
La ₂ O ₃	30	4.3	2.3	2.56 [24]	Hexagonal, cubic
Y ₂ O ₃	15	5.6	2.3	2.56 [24]	Cubic
Gd ₂ O ₃	24 ± 2 [6]			2.44 [24]	
MgO	9.8 [7]	7.3 [7]			Cubic
Er ₂ O ₃	14.4 [8]	7.5 [8]	3.5 [8]		
Nd ₂ O ₃		5.8 [9]	2.2 [9]		
PrO ₂	25 [10]	3–4 [10]	>1 [10]		Cubic
CeO ₂	52 [11], 26 [12]	4.5 [12]			
LaAlO ₃	26 [13]	6.0 [10]		2.2 [24]	
ZrSiO ₄					Amorphous
HfSiO ₄				2.2 [24]	Amorphous
(Dy ₂ O ₃)	14	4.8			

Πίνακας 1.2 : Σύγκριση σχετικών διηλεκτρικών σταθερών διαφόρων οξειδίων προς αντικατάσταση του SiO₂ (4) .

Το πάχος του εναλλακτικού αυτού οξειδίου συνδέεται με το φυσικό πάχος του απαιτούμενου SiO₂ με βάση την προφανή σχέση (1.1) και ονομάζεται ισοδύναμο πάχος ως προς το διοξείδιο του πυριτίου.

$$EOT = t_{SiO_2} \left(\frac{\epsilon_{High-k}}{\epsilon_{SiO_2}} \right) \quad (1.1)$$

Ως απλοποιημένο παράδειγμα, απαιτούμενο πάχος SiO₂ 1nm, μπορεί να αντικατασταθεί από ισοδύναμο πάχος ~6nm HfO₂, το οποίο είναι δυσκολότερα διαπερατό από φορείς μέσω φαινομένου σήραγγος.

Παράλληλα με την αναζήτηση για ένα νέο διηλεκτρικό υλικό ικανό να αντικαταστήσει το SiO₂, η έρευνα από τις αρχές της δεκαετίας του 2000 προσανατολίστηκε ακόμη και στην αναζήτηση νέων ημιαγωγικών υποστρωμάτων, τα οποία εμφανίζουν ενδογενώς μεγαλύτερη ευκινησία φορέων από αυτή του Si, όπως εικονίζεται στο **Πίνακα 1.3**, προκειμένου να αυξηθεί η ταχύτητα των διατάξεων (5). Υλικά όπως το Ge και το GaAs αλλά και τεχνολογίες ημιαγωγών υπό μηχανική τάση κέντρισαν εγκαίρως το ενδιαφέρον για αυτό το σκοπό.

Ένα ενδιαμέσο στάδιο θεωρείται η τρέχουσα τεχνολογία ανάπτυξης transistor MOSFET σε πυρίτιο υπό μηχανική τάση (strained-Si) με επαφές πηγής-καταβόθρας από SiGe. Το SiGe προκαλεί

εφελκυστικές τάσεις στο κανάλι του transistor MOSFET, «διεύρυνση» του πλέγματος του Si στην περιοχή του, και επακόλουθη αύξηση της ευκινησίας των φορέων (ηλεκτρονίων) σε αυτό. Έως το 2003 (τεχνολογία 90 nm) ως διηλεκτρικό πύλης της τεχνολογίας strained-Si χρησιμοποιήθηκε το SiO₂, το οποίο από το 2007 (τεχνολογία 45 nm) αντικαταστάθηκε από διηλεκτρικό με βάση το Hf (νιτριδιωμένο HfO₂). Παρά ταύτα η μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να επιτευχθεί με τεχνολογία strained-Si δεν μπορεί να φτάσει αυτήν που θα έχει η τεχνολογία CMOS σε ένα εναλλακτικό ημιαγωγικό υπόστρωμα με εγγενώς υψηλότερες ευκινησίες φορέων αγωγιμότητας. Ένα ιδιαίτερα ελκυστικό εναλλακτικό υπόστρωμα είναι το γερμάνιο, που θεωρείται, ο πιο ώριμος αντικαταστάτης του πυριτίου.

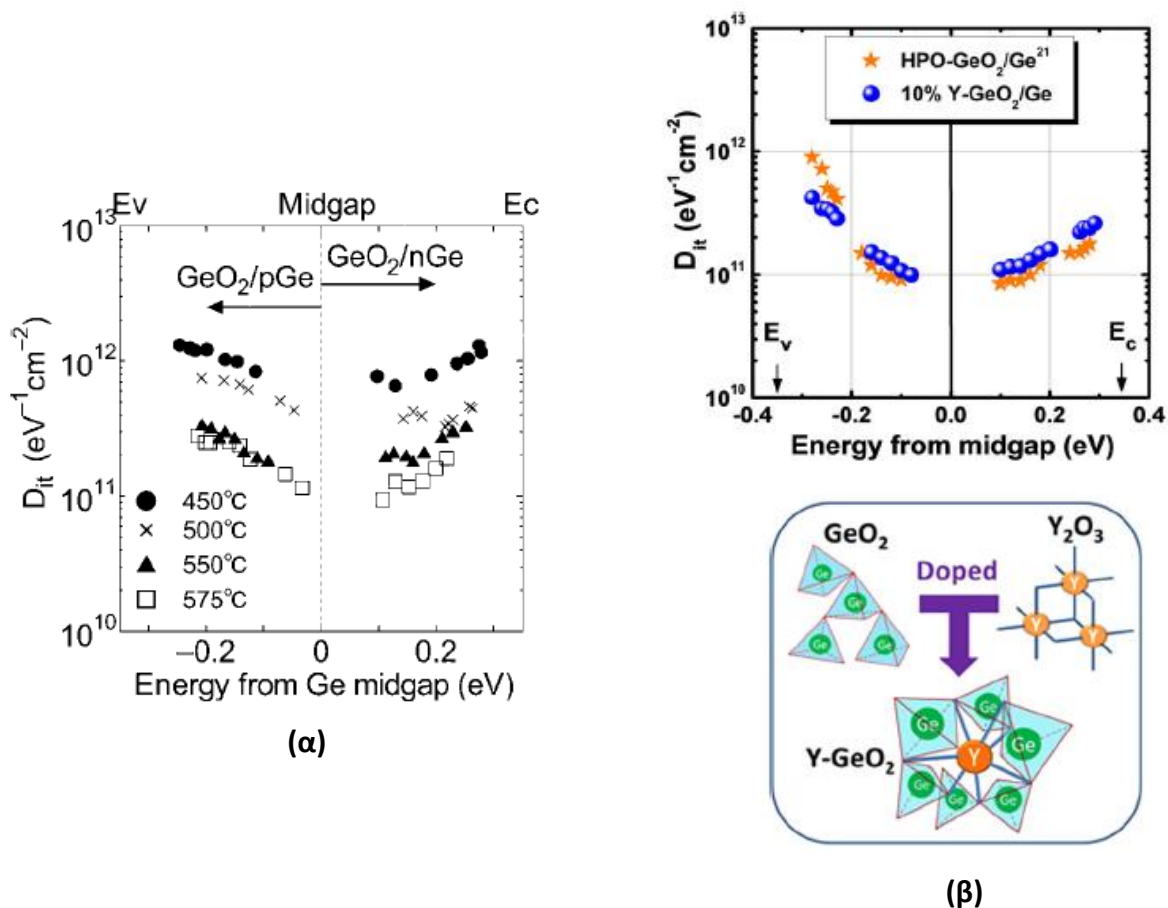
	Si	Ge	InP	GaAs	In _{0.47} Ga _{0.53} As	InAs	GaSb	InSb
Electron mobility (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	1600	3900	5400	9200	14000	40000	5000	77000
Electron effective mass (/m ₀)	m _e /m ₀ 0.19/0.16	m _e /m ₀ 0.082/1.467	0.08	0.067	0.041	0.026	0.042	0.014
Hole mobility (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	430	1900	200	400	300	500	850	850
Hole effective mass (/m ₀)	m _{h1} /m _{h1} 0.53/0.16	m _{h1} /m _{h1} 0.35/0.043	m _{h1} /m _{h1} 0.55/0.083	m _{h1} /m _{h1} 0.46/0.051	m _{h1} /m _{h1} 0.36/0.026	m _{h1} /m _{h1} 0.37/0.043	m _{h1} /m _{h1} 0.38/0.014	m _{h1} /m _{h1} 0.53/0.16
Band gap (eV)	1.12	0.66	1.34	1.42	0.75	0.36	0.72	0.14
Permittivity	11.8	16	12.4	13.2	13.9	14.6	15.7	17

Πίνακας 1.3: Ευκινησία ηλεκτρονίων και οπών σύνθετων και απλών ημιαγωγών (5) .

Το γερμάνιο (Ge), είναι ένας ημιαγωγός έμμεσου ενεργειακού χάσματος με τιμή στα 0.66 eV σε θερμοκρασία δωματίου, έναντι του Si που το ενεργειακό του χάσμα είναι διπλάσιο. Ως πολλά υποσχόμενος αντικαταστάτης του πυριτίου (Si), το γερμάνιο επιλέχθηκε λόγω της υψηλής ευκινησίας των φορέων του, όπως φαίνεται στο **Πίνακα 1.3**. Χαρακτηριστικό του γερμανίου είναι πως έχει την υψηλότερη ευκινησία οπών από όλους τους ημιαγωγούς (ακόμα και τους σύνθετους), στοιχείο που το κάνει ιδιαίτερα ελκυστικό για transistor MOSFET σε υπόστρωμα τύπου p (p-MOSFET). Επίσης, το γερμάνιο σε σύγκριση με τα υπόλοιπα υποστρώματα υψηλής ευκινησίας παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι είναι απόλυτα συμβατό με όλη την τεχνολογία CMOS που έχει αναπτυχθεί για το Si. Αυτό σημαίνει ότι, παρά τις ιδιαιτερότητές του, όλες οι διαδικασίες της τεχνολογίας Si, μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τις υπάρχουσες βιομηχανικές υποδομές και στην περίπτωση του γερμανίου.

1.2 ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΠΥΛΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ MOS ΣΤΟ ΓΕΡΜΑΝΙΟ

Ήδη από τα μέσα της δεκαετίας του 2000 τέθηκε το θέμα του κατάλληλου διηλεκτρικού πύλης για την μελλοντική τεχνολογία MOS Γερμανίου. Το συγγενές οξείδιό του γερμανίου, το GeO_2 , παρουσιάζει προβλήματα στη χρήση του ως διηλεκτρικού πύλης της τεχνολογίας γερμανίου (6). Το πρώτο είναι η υδατοδιαλυτή του φύση, που το καθιστά ασύμβατο με την υπάρχουσα τεχνολογία κατασκευής transistor MOSFET. Το δεύτερο είναι η θερμική του διάσπαση σε διάφορα υποοξείδια, όπως το πτητικό GeO , που παρατηρείται σε θερμοκρασίες της τάξεως των 575°C και σε ατμοσφαιρική πίεση (7), θερμοκρασία ιδιαίτερα χαμηλή αν αναλογιστεί κανείς ότι κατά την κατασκευή ενός transistor, οι δομές υποβάλλονται σε διάφορες διαδικασίες ανόπτησης σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 500°C . Τέλος, η σχετικά χαμηλή διηλεκτρική σταθερά του (~ 5.5) δεν το καθιστά κατάλληλο για μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωση κυκλώματα Ge. Παρά ταύτα η έρευνα των ιδιοτήτων του συστήματος GeO_2/Ge δεν σταμάτησε. Μελέτη της θερμικής οξείδωσης του Ge σε ατμοσφαιρική πίεση (8), απέδειξε ότι η πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων της διεπιφάνειας GeO_2/Ge μειώνεται όσο η θερμοκρασία οξείδωσης αυξάνεται, χωρίς να υπερβεί το όριο διάσπασής του, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.4(α)**. Οι Toriumi et al. (9) πραγματοποιώντας θερμική οξείδωση του Ge σε πολύ υψηλή πίεση 70 atm (HPO-High Pressure Oxidation), απέτρεψαν τη διάσπαση του GeO_2 σε υψηλές θερμοκρασίες, παίρνοντας εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα διεπιφανειακών παγίδων, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.4(β)**. Μια άλλη, σχετικά πρόσφατη, πολύ ενθαρρυντική προσέγγιση, επίσης από τους Toriumi et al. (10), βασίζεται στη χρήση του νοθευμένου με ύτριο (yttrium) GeO_2 (Y- GeO_2), που αναπτύχθηκε με ιοντοβολή (sputtering), ως κυρίως διηλεκτρικού πύλης. Η ενσωμάτωση υτρίου στο GeO_2 αυξάνει τη θερμική του σταθερότητα, επιβραδύνει δραστικά την διάλυσή του στο νερό και αυξάνει τη σχετική διηλεκτρική σταθερά του σε $\kappa \sim 10$. Τα επίπεδα διεπιφανειακών παγίδων είναι συγκρίσιμα με αυτά της θερμικής οξείδωσης σε υψηλή πίεση, όπως επίσης φαίνεται στην **Εικόνα 1.4(β)**.



Εικόνα 1.4: (α) Ενεργειακή κατανομή της πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα του Ge κατά τη θερμική του οξείδωση σε ατμοσφαιρική πίεση (8). (β) Αντίστοιχη κατανομή για την περίπτωση θερμικής οξείδωσης σε υψηλή πίεση (HPO) και ανάπτυξης GeO_2 νοθευμένου με ύτριο χρησιμοποιώντας ιοντοβολή (sputtering) (10).

Επίσης η έρευνα στράφηκε από νωρίς στη μελέτη διηλεκτρικών High-k ως διηλεκτρικών πύλης, με αντιπροσωπευτικότερα τα HfO_2 , ZrO_2 και Al_2O_3 . Στο γερμάνιο, όμως, η απευθείας ανάπτυξη διηλεκτρικών High-k, δημιουργεί μία χαμηλής ποιότητας διεπιφάνεια, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλή πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων ($\sim 10^{13}/\text{eVcm}^2$), αλλά και τραχύτητα, στοιχεία τα οποία είναι απαγορευτικά για την ανάπτυξη δομών MOSFET. Απαιτούνται, επομένως, διαδικασίες αδρανοποίησης της διεπιφάνειας διηλεκτρικού High-k/Ge, που δεν είναι πάντα εύκολες και αποδοτικές (11-14). Συστηματικές μελέτες της τελευταίας δεκαετίας απέδειξαν, όμως, ότι το GeO_2 ή υποξείδια αυτού (GeO_x) αποτελούν πολύ ικανοποιητικά στρώματα αδρανοποίησης εάν παρεμβληθούν μεταξύ ενός κατάλληλου διηλεκτρικού High-k και του υποστρώματος γερμανίου. Ένα τέτοιο διηλεκτρικό είναι το Al_2O_3 (αλούμινα) με σχετική διηλεκτρική σταθερά $k \sim 9$, που σε συνδυασμό με ένα λεπτό στρώμα (υπο)ξειδίου του γερμανίου, αποτελεί μια από τις πιο πολλά υποσχόμενες δομές πύλης της τεχνολογίας γερμανίου.

1.3 Η ΔΟΜΗ Al₂O₃/Ge

Το οξείδιο Al₂O₃ άρχισε να μελετάται συστηματικά ως διηλεκτρικό πύλης της τεχνολογίας CMOS Ge από το 2010. Παρά τη χαμηλή σχετική διηλεκτρική σταθερά του σε σχέση με τα HfO₂ και ZrO₂, παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα που είναι: (α) Το μεγάλο ενεργειακό του χάσμα (~9eV), βλ. **Πίνακα 1.2**, που είναι συγκρίσιμο με αυτό του SiO₂ και συνεπάγεται πολύ καλή μονωτική συμπεριφορά και (β) η θερμική του σταθερότητα, δεδομένου ότι αλλάζει φάση από άμορφο σε πολυκρυσταλλικό σε υψηλή θερμοκρασία (850°C), σε αντίθεση με το HfO₂ (ανίσοιχη θερμοκρασία ~550°C) ή το ZrO₂ που πολλές φορές εναποτίθεται ως πολυκρυσταλλικό.

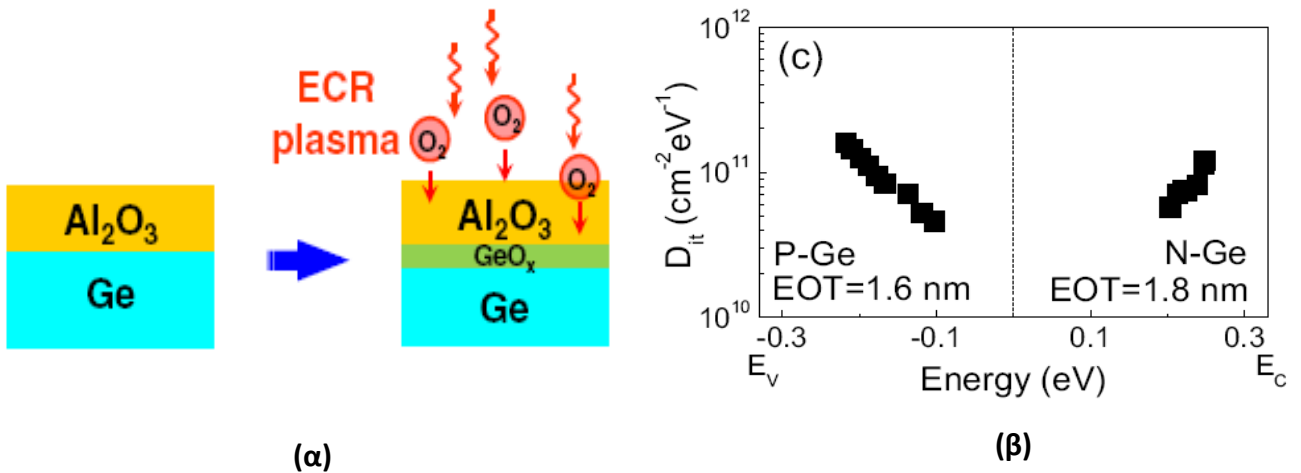
Ανεξάρτητα από την τεχνική εναπόθεσης του Al₂O₃ στο Ge (ιοντοβολή-sputtering, MBE-Molecular Beam Epitaxy, ALD-Atomic Layer Deposition), η διεπιφάνεια Al₂O₃/Ge εμφανίζει υψηλά επίπεδα διεπιφανειακών παγίδων (>2x10¹²/eVcm²) κατά μήκος του ενεργειακού χάσματος του Ge. Μία κρίσιμη παράμετρος είναι η ανάπτυξη ενός διεπιφανειακού στρώματος GeO_x μεταξύ του διηλεκτρικού και του Ge που σχηματίζεται κατά την εναπόθεση του Al₂O₃. Η σύνθεση και το πάχος του εξαρτώνται από τις συνθήκες εναπόθεσης (τεχνική, θερμοκρασία) και το πάχος του αναπτυσσόμενου Al₂O₃. Οι Botzakaki et al. (15) απέδειξαν ότι όσο παχύτερο είναι αυτό το διεπιφανειακό στρώμα, τόσο μειωμένη εμφανίζεται η πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων. Όμως το πάχος του (μέγιστο ~0.5nm για εναπόθεση 10nm Al₂O₃ με ALD στους 300°C) δεν είναι ικανό να ρίξει τα επίπεδα των διεπιφανειακών παγίδων σε τιμές ~10¹¹eV⁻¹ cm⁻² κατά μήκος του ενεργειακού χάσματος του γερμναίου.

Κατά τα τελευταία χρόνια προτάθηκαν αρκετές προσεγγίσεις αδρανοποίησης της διεπιφάνειας Al₂O₃/Ge, οι αντιπροσωπευτικότερες από τις οποίες είναι: (α) Εναπόθεση Al₂O₃ σε υπόστρωμα Ge με λεπτό στρώμα (δ-layer) Si στην επιφάνειά του (16), (β) Εναπόθεση Al₂O₃ σε υπόστρωμα Ge οξειδωμένο με όζον (O₃) (17), (γ) Εναπόθεση Al₂O₃ σε υπόστρωμα Ge εμβαπτισμένου σε διαλύματα HBr ή (NH₄)₂S (18), (δ) Εναπόθεση Al₂O₃ σε υπόστρωμα Ge εμβαπτισμένου σε διάλυμα H₂S (19).

Η πιο δραστική, όμως, προσέγγιση προτάθηκε από τους Zhang et al. (20) ,(21) το 2011, και εικονίζεται στην **Εικόνα 1.5(α)**. Βασίζεται στην επανοξείδωση με ECR (Electron Cyclotron Resonance) πλάσμα O₂ ενός λεπτού υμενίου Al₂O₃ που έχει ήδη εναποτεθεί στο Ge. Το O₂ διεισδύει μέσα από το Al₂O₃ και οξειδώνει το Ge δημιουργώντας ένα διεπιφανειακό στρώμα GeO_x με πάχος που εξαρτάται από τις συνθήκες του πλάσματος και απολύτως ελεγχόμενο. Απεδείχθη ότι όταν το πάχος του διεπιφανειακού αυτού στρώματος υπερβεί την κρίσιμη τιμή του 0.5 nm (~1-2nm) επιτυγχάνεται εξαιρετική αδρανοποίηση της διεπιφάνειας Al₂O₃ /Ge, με πολύ χαμηλά επίπεδα διεπιφανειακών παγίδων κατά μήκος του ενεργειακού χάσματος του Ge, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.5(β)**. Στα πλεονεκτήματα της μεθόδου πρέπει να προστεθεί το ότι οι συγκεκριμένες

συνθήκες επανοξειδωσης με πλάσμα δεν μεταβάλλουν το πάχος του Al_2O_3 που έχει ήδη εναποτεθεί.

Η παραπάνω προσέγγιση, μαζί με αυτήν του νοθευμένου με ύτριο GeO_2 , αποτελούν μέχρι σήμερα τις πιο ελπιδοφόρες για τον σχηματισμό της πύλης διατάξεων MOSFET Ge.



Εικόνα 1.5: (α) Η μέθοδος δημιουργίας διεπιφανειακού GeO_x μεταξύ Al_2O_3 και Ge με χρήση ECR πλάσματος O_2 (21) **(β)** Ενεργειακή κατανομή της πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα του Ge σε δομές $\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3(1\text{nm})/\text{GeO}_x(1\text{nm})/\text{Ge}$. Το διεπιφανειακό στρώμα GeO_x δημιουργήθηκε με έκθεση της δομής σε ECR πλάσμα O_2 (21).

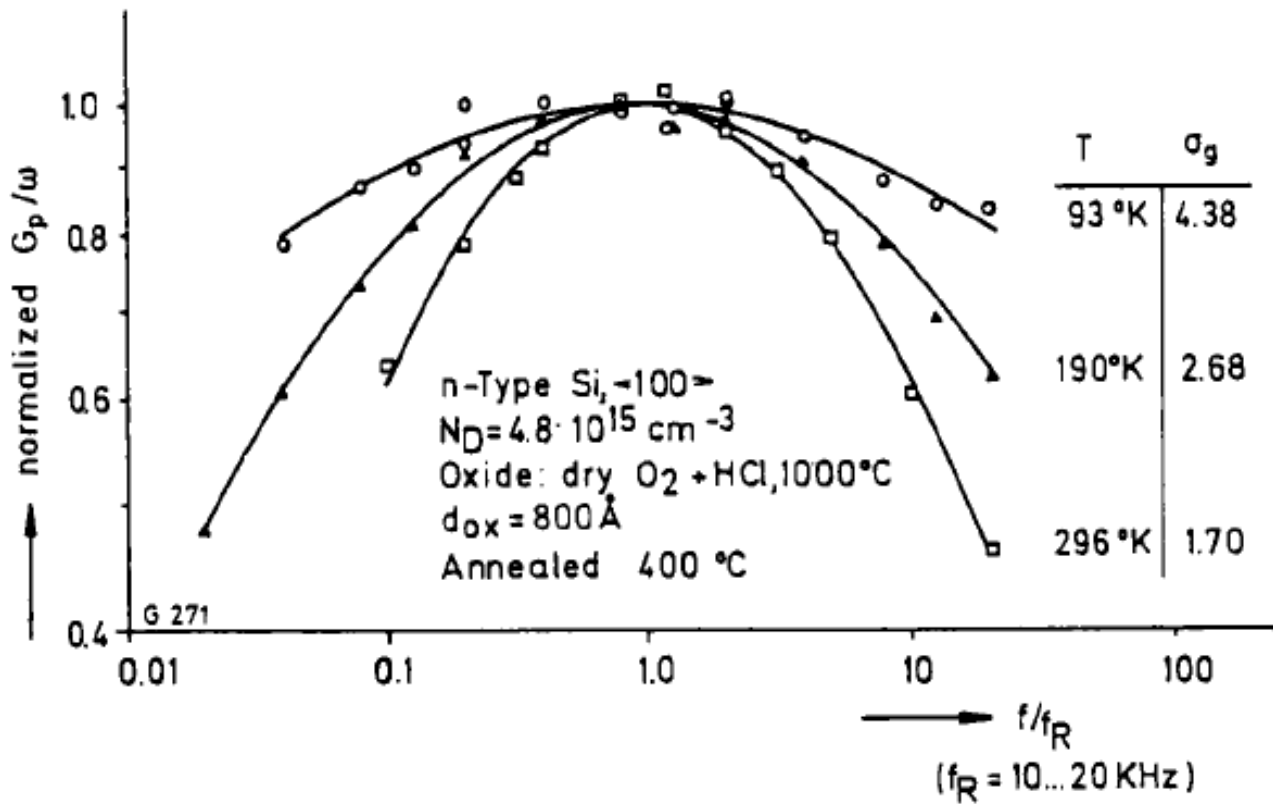
1.4 ΠΡΟΗΓΟΥΜΕΝΕΣ ΠΡΟΣΠΑΘΕΙΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΠΥΚΝΩΤΩΝ MOS ΣΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑΤΑ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ.

Στο πρόσφατο παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί σημαντικές προσπάθειες για την ανάπτυξη πυκνωτών MOS από διαφορετικές ερευνητικές ομάδες. Μία από τις κατευθύνσεις αυτές είναι η ανάπτυξη διηλεκτρικού Al_2O_3 με μέθοδο εναπόθεσης ατομικού στρώματος σε υπόστρωμα γερμανίου. Η δραστηριότητα αυτή εστιάζεται στην εύρεση των κατάλληλων συνθηκών που θα αποφέρουν μία σταθερή δομή ημιαγωγού-διηλεκτρικού με ελεγχόμενη πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων.

- α) Την θετική επίδραση της ανόπτησης υδρογόνου στην μείωση της πυκνότητας των επιφανειακών παγίδων ιδιαίτερα πλησίον της ζώνης σθένους.
- β) Την ισχυρή επίδραση της διεργασίας της φωτολιθογραφίας αρνητικού τόνου στην ηλεκτρική ποιότητα της δομής MOS. Συγκεκριμένα το TMAH που περιέχει το διάλυμα του εμφανιστή (Developer MIF 714) το καθιστά ισχυρή βάση που αποσταθεροποιεί το άμορφο Al_2O_3 . Η επακόλουθη εναπόθεση πλατίνας οδηγεί σε αντίδραση μεταξύ των ιόντων Al και των ιόντων Pt, με αποτέλεσμα την δημιουργία κράματος Al-Pt, και την μείωση του ενεργού πάχους του διηλεκτρικού. Η αντίδραση αυτή ενισχύεται κατά την ανόπτηση υψηλής θερμοκρασίας.

Η πραγματοποίηση αυτής της δραστηριότητας απαιτεί ηλεκτρικές μετρήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες στην περιοχή 80-200 K ούτως ώστε οι μετρήσεις να μην επηρεάζονται από φαινόμενα γένεσης και επανασύνδεσης φορών μειονότητας. Πράγματι, το μικρό ενεργειακό χάσμα του γερμανίου που είναι 0.66 eV σε θερμοκρασία δωματίου, καθιστά απαγορευτικές ηλεκτρικές μετρήσεις σύνθετης αντίστασης σε θερμοκρασία δωματίου, που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων ποιότητας της διεπιφάνειας γερμανίου-αλούμινας. Για την πληρέστερη κατανόηση των φαινομένων που παρατηρούνται σε μετρήσεις πυκνωτών MOS χαμηλών θερμοκρασιών θεωρήθηκε σημαντικό να πραγματοποιηθούν μετρήσεις χαμηλών θερμοκρασιών σε δομές MOS αναφοράς πυριτίου ώστε να μπορεί να ελεγχθούν ασφαλώς τα φαινόμενα που έχουν συναντώνται κατά τις αντίστοιχες μετρήσεις πυκνωτών γερμανίου. Για παράδειγμα κατά την διάρκεια της προηγούμενης μελέτης των πυκνωτών MOS γερμανίου (22) παρατηρήθηκε ότι οι χαρακτηριστικές απωλειών G_p/ω συναρτήσεως της συχνότητας ήταν πολύ διευρυμένες. Η διεύρυνση αυτή δε αυξάνει καθώς μειώνεται η θερμοκρασία. Το γεγονός αυτό αποτελεί σημαντικό στοιχείο αφού προσδιορίζει τον παράγοντα f_D από τον οποίο εξαρτάται η εύρεση της πυκνότητας των διεπιφανειακών παγίδων. Μελέτη της βιβλιογραφίας ανέδειξε ότι το

φαινόμενο αυτό το είχαν αναφέρει οι Goetzberger, Klausmann και Schulz σε ένα άρθρο ανασκόπησης στα 1976 με άγνωστη αιτία [Εικόνα 1.6. (23)] Δεν βρέθηκαν άλλες πηγές που να αναφέρονται στο φαινόμενο αυτό.



Εικόνα 1.6: Κανονικοποιημένες γραφικές G_p/ω vs f σε διαφορετικές θερμοκρασίες δομής MOS σε υπόστρωμα Si. Καθώς μειώνεται η θερμοκρασία παρατηρείται σημαντική διεύρυνση της κορυφής.

1.5 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο πρώτος σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η πραγματοποίηση ηλεκτρικών μετρήσεων σε πυκνωτές MOS πυριτίου (Si) διαφορετικής πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων στην περιοχή θερμοκρασιών 80-350 K. Οι μετρήσεις αυτές έχουν στόχο να οριοθετήσουν την επίδραση των διεπιφανειακών παγίδων στην συνολική απόκριση του πυκνωτή MOS σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Με αυτό τον τρόπο επιδιώκεται να διαχωριστούν φαινόμενα που είτε οφείλονται στην απόκριση των διεπιφανειακών παγίδων είτε στην ηλεκτρική ποιότητα του διηλεκτρικού στρώματος. Στην τυπική περίπτωση πειραματικών δομών MOS γερμανίου (Ge) και τα δύο ανωτέρω φαινόμενα εμφανίζονται ταυτοχρόνως, δηλαδή και υψηλή πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων και μειωμένη ηλεκτρική μόνωση του διηλεκτρικού, γεγονός που δυσκολεύει σημαντικά την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων. Οι μετρήσεις αυτές είναι πολύ σημαντικές γιατί διερευνούν την επίδραση συγκεκριμένων παραγόντων στην απόκριση της δομής MOS συναρτήσει της θερμοκρασίας. Επίσης προσδιορίζεται η ακρίβεια των διαφόρων μεθόδων ηλεκτρικού χαρακτηρισμού ούτως ώστε να αναδειχτούν τα κατάλληλα εργαλεία για τον προσδιορισμό των παραμέτρων των δομών MOS γερμανίου. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στον προσδιορισμό της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων. Τα αποτελέσματα του πρώτου στόχου θα χρησιμοποιηθούν για την ασφαλή εξαγωγή συμπερασμάτων για την περίπτωση των πυκνωτών MOS γερμανίου. Ο δεύτερος σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η μελέτη πυκνωτών MOS γερμανίου που κατασκευάστηκαν με διαφορετικούς τρόπους από τους προηγούμενους ώστε να μειωθεί η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων. Για την επίτευξη των ανωτέρω στόχων χρησιμοποιήθηκαν δομές MOS υποστρώματος Si και Ge. Συγκεκριμένα κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν:

1^η σειρά δειγμάτων σε υπόστρωμα πυριτίου

Κατασκευάστηκαν και μετρήθηκαν 10 δείγματα δομών MOS με υπόστρωμα Si και διηλεκτρικό πύλης SiO₂, 5 για κάθε τύπο υποστρώματος Si (n, p) τα οποία είχαν υποστεί παρόμοιες διεργασίες:

- 1) Αρχικό δείγμα μετά την ανάπτυξη του οξειδίου (As Grown)
- 2) Ανόπτηση σε περιβάλλον N₂ για 30 λεπτά στους 350 °C
- 3) Ανόπτηση σε περιβάλλον Forming Gas για 30 λεπτά στους 350 °C
- 4) Ανόπτηση σε περιβάλλον N₂ για 30 λεπτά στους 400 °C
- 5) Ανόπτηση σε περιβάλλον Forming Gas για 30 λεπτά στους 400 °C

Αυτά τα δείγματα παρουσίασαν ασταθή συμπεριφορά σε όλο το θερμοκρασιακό φάσμα και δεν παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη.

2^η σειρά δειγμάτων σε υπόστρωμα πυριτίου

Εφόσον οι ανωτέρω δομές παρουσίασαν προβλήματα αξιοπιστίας, μετρήθηκαν επιπρόσθετα δομές MOS με διπλή διηλεκτρική στοιβή $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$ επί υποστρώματος πυριτίου n-τύπου. Τα δείγματα αυτά παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον γιατί είτε μέσω διαφορετικού πάχους του στρώματος Si_3N_4 είτε λόγω επιπρόσθετης διεργασίας παρουσιάζουν μεταβαλλόμενη πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων που κυμαίνεται από 10^{10} έως $10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$.

3^η σειρά δειγμάτων σε υπόστρωμα γερμανίου

Κατασκευάσθηκαν και μελετήθηκαν δείγματα γερμανίου. Σε αυτά πραγματοποιήθηκε οξείδωση πλάσματος διεπιφάνειας γερμανίου υπέρλεπτου υμενίου Al_2O_3 πάχους 1 nm. Η διεργασία πλάσματος προκαλεί την ανάπτυξη ενός ενδιάμεσου στρώματος GeO_2 , τόσο σε n-τύπου όσο και σε p-τύπου υποστρώματα γερμανίου. Στη συνέχεια εναποτέθηκαν επιπρόσθετα 4 nm Al_2O_3 ούτως ώστε να είναι δυνατόν η δομή να μετρηθεί με ηλεκτρικές μετρήσεις.

Βιβλιογραφία

1. **R. H. Dennard, F. H. Gaensslen, V. L. Rideout, E. Bassous and A. R. LeBlanc**, *Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions*, Solid-State Circuits, Vol. 9, pp. 256-268, 1974.
2. **Ning, Y. Taur and T. H.** , *Fundamentals of Modern VLSI Devices*, Cambridge university press, 2009.
3. **R.Chau, B.Doyle, M.Doczy, S.Datta, S. Harelund, B.Jin, J.Kavalieros, and M.Metz**, *Silicon Nano-Transistors and Breaking the 10nm Physical Gate Length Barrier*. 5200 N.E. Elam Young Parkway, Hillsboro, OR 97124 : s.n., 2003.
4. **Mo Wu, Y. I. Alivov, H. Morkoc**, *High-k dielectrics and advanced channel concepts for Si MOSFET (Review)*, *J Mater Sci: Mater Electron*, **19**, pp.:915–951, 2008.
5. **Shinichi Takagi, Rui Zhang, Junkyo Suh, Sang-Hyeon Kim, Masafumi Yokoyama, Koichi Nishi, and Mitsuru Takenaka**, *III–V/Ge channel MOS device technologies in nano CMOS era (Review)*, *Japanese Journal of Applied Physics* , **54**, art06FA01, 2015.
6. **S. Takagi, T. Maeda, N. Taoka, M. Nishizawa, Y. Morita, K. Ikeda, Y. Yamashita, M.** *Microelectronic Engineering*, Vol. 84, pp. 2314-2319, 2007.
7. **A. Toriumi, T. Tabata, C. H. Lee, T. Nishimura, K. Kita, and K. Nagashio**, *Microelectron. Eng*, Vol. 86, p. 1571, 2009.
8. **H. Matsubara, T. Sasada, M. Takenaka, and S. Takagi**, *Appl. Phys. Lett*, **93**, art032104, 2008
9. **C. H. Lee, T. Nishimura, K. Nagashio, K. Kita, and A. Toriumi**, *IEEE Trans. Electron Devices*, **58**, p.1295, 2011.
10. **C. Lu, C.H. Lee, Wenfeng Zhang, T. Nishimura, K. Nagashio and A. Toriumi**, *Appl. Phys. Lett*, **104**, art092909, 2014.
11. **F.E. Leys et al.**, *Mater. Sci. Semicond. Process.*, **9**, p. 679, 2006
12. **C.O.Chui, H.Hyoungsub, D.Chi, P.McIntyre and K.Saraswat**, *IEEE Trans. El. Dev.*, **53(7)**, p.1509, 2006
13. **M.S. Rahman, E.K. Evangelou, I.I. Androulidakis, A. Dimoulas**, *Microelectronics Reliability*, **49**, pp. 26–31, 2009
14. **A. Dimoulas, D. Tsoutsou, Y. Panayiotatos, A. Sotiropoulos, G. Mavrou,S. F. Galata, and E. Golias**, *Appl. Phys. Lett.*, **96**, art012902, 2010

15. **M. Botzakaki, A. Kerasidou, L. Sygellou, V. Ioannou-Sougleridis, N. Xanthopoulos, S. Kennou, S. Ladas, N. Z. Vouroutzis, Th. Speliotis and D. Skarlatos**, ECS Solid State Letters, **1**, pp.32-34, 2012.
16. **A. J. Hong, M. Ogawa, K.L. Wang, Y. Wang, J. Zou, Z. Xu, and Yang Yang**, Appl. Phys. Lett, **93**, art023501, 2008.
17. **Duygu Kuzum**, INTERFACE-ENGINEERED GE MOSFETS FOR FUTURE HIGH PERFORMANCE CMOS APPLICATIONS, PHD DISSERTATION, STANFORD UNIVERSITY, DECEMBER 2009.
18. **X. Li, A. Li, X. Liu, Y. Gong, X. Chen, H. Li, and Di Wu**, App. Surf. Science, Vol. 257, pp. 4589-4592, 2011.
19. **S. Sioncke, J. Ceuppens, D. Lin, L. Nyns, A. Delabie, H. Struyf, S. De Gendt, M. Moller, B. Beckhoff, M. Caymax**. s.l. : Microelectronic Engineering, Vol. 88, p. 1553, 2011.
20. **R. Zhang, T. Iwasaki, N. Taoka, M. Takenaka, and S. Takagi**, Microelectron. Eng, Vol. 88, p. 1533, 2011.
21. **R. Zhang, T. Iwasaki, N. Taoka, M. Takenaka, and S. Takagi**, Appl. Phys. Lett, **98**, art112902, 2011.
22. «Ηλεκτρικές ιδιότητες δομών MOS Μετάλλου/Al₂O₃/p-Ge με διηλεκτρικό που εναποτέθηκε με τη μέθοδο ALD : Μελέτη συναρτήσεως του μετάλλου και της ανόπτησης (post – metallization annealing)», **Διπλωματική Εργασία Σταμάτιου Αλαφάκη**, Τμήμα Φυσικής Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2018 (Επιβλέπων : Δ. Σκαρλάτος).
23. **A. Goetzberger, E. Klausmann & M. J. Schulz** Interface states on semiconductor/insulator surfaces, Critical Reviews in Solid State and Material Sciences, 6:1, 1-43, 1976

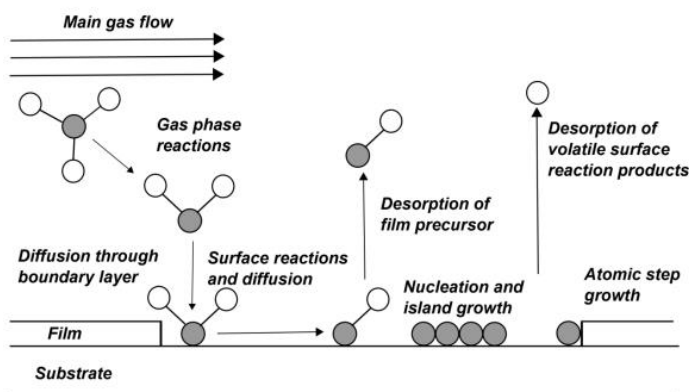
2. ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΥ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις βασικές τεχνικές ηλεκτρικού χαρακτηρισμού δομών MOS, στις πληροφορίες που μπορούμε να εξάγουμε από αυτές καθώς και στην τεχνική ανάπτυξης διηλεκτρικών υμενίων ατομικού στρώματος (ALD, Atomic Layer Deposition), που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των δειγμάτων σε υπόστρωμα Ge της παρούσας εργασίας.

2.2 ΤΕΧΝΙΚΗ ALD - ΕΝΑΠΟΘΕΣΗ ΑΤΟΜΙΚΟΥ ΣΤΡΩΜΑΤΟΣ

Η τάση για παραγωγή διαρκώς και μικρότερων διατάξεων μικροηλεκτρονικής έχει δημιουργήσει την απαίτηση ελεγχόμενης σε ατομικό επίπεδο ανάπτυξης διηλεκτρικών υμενίων. Η μέθοδος εναπόθεσης ατομικού στρώματος (Atomic Layer Deposition-ALD) αποτελεί την πιο ασφαλή επιλογή σε σύγκριση με άλλες [ιοντοβολή-sputtering, MBE-molecular beam epitaxy, PLD pulsed laser deposition, PVD-physical vapor deposition(εξάχνωση)], όπως φαίνεται και στο **Πίνακα 1**. Αποτελεί δε, μία ειδική κατηγορία της χημικής εναπόθεσης από ατμούς (Chemical Vapor Deposition-CVD), στην οποία βασίζεται και η αρχή λειτουργίας της. Περιληπτικά, στην τεχνική CVD για την ανάπτυξη διηλεκτρικών υμενίων χρησιμοποιούμε ένα θάλαμο αντιδράσεων, μέσα στον οποίο βρίσκεται το υπόστρωμα, εκτεθειμένο σε διαρκή ροή αντιδρώντων αερίων. Το προϊόν της αντίδρασης απορροφάτε από το υπόστρωμα και οδηγεί στον σχηματισμό του επιθυμητού στρώματος διηλεκτρικού. Όπως είναι φυσικά αναπόφευκτο, δημιουργούνται και παραπροϊόντα από τις χημικές αντιδράσεις, τα οποία απομακρύνονται από την επιφάνεια του υποστρώματος με την είσοδο αδρανούς φέροντος αερίου στο θάλαμο **Εικόνα 2.1**



Εικόνα 2.1: Διαδικασία εναπόθεσης διηλεκτρικών υμενίων με τη τεχνική CVD.

<i>ΜΕΘΟΔΟΣ</i>	<i>ALD</i>	<i>MBE</i>	<i>CVD</i>	<i>Sputtering</i>	<i>Evapor</i>	<i>PLD</i>
Ομοιομορφία πάχους υμενίου	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΜΕΤΡΙΑ
Πυκνότητα υμενίου	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΧΑΜΗΛΗ	ΚΑΛΗ
Κάλυψη ανά κύκλο διεργασίας	ΚΑΛΗ	ΧΑΜΗΛΗ	ΑΝΑΛΟΓΑΤ Η ΔΙΑΤΑΞΗ	ΧΑΜΗΛΗ	ΧΑΜΗΛΗ	ΧΑΜΗΛΗ
Ποιότητα διεπιφάνειας	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΑΝΑΛΟΓΑΤ Η ΔΙΑΤΑΞΗ	ΧΑΜΗΛΗ	ΚΑΛΗ	ΑΝΑΛΟΓΑΤ Η ΔΙΑΤΑΞΗ
Αριθμός υλικών	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΛΗ	ΧΑΜΗΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΧΑΜΗΛΗ
Εναπόθεση σε χαμηλές θερμοκρασίες	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΑΝΑΛΟΓΑΤ Η ΔΙΑΤΑΞΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ
Ρυθμός εναπόθεσης	ΜΕΤΡΙΑ	ΧΑΜΗΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ
Βιομηχανική εφαρμογή	ΚΑΛΗ	ΜΕΤΡΙΑ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΚΑΛΗ	ΧΑΜΗΛΗ

Πίνακας 1 : Συγκριτικός πίνακας ποιότητας μεθόδων εναπόθεσης λεπτών υμενίων

(www.cambridgenanotech.com)

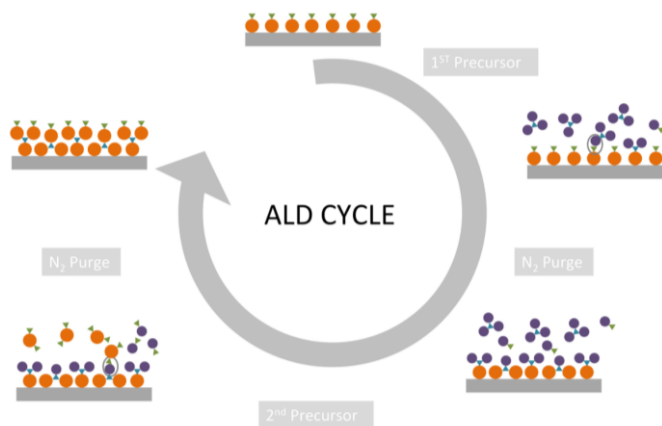
Στην τεχνική ALD (1), η ανάπτυξη ενός διηλεκτρικού υμενίου γίνεται μέσω κύκλων εναπόθεσης (deposition cycles), κατά τους οποίους λαμβάνει χώρα η αντίδραση δύο κύριων χημικών ενώσεων. Η μια από αυτές είναι η πρόδρομη ένωση (precursor) που είναι συνήθως μια οργανομεταλλική ένωση (π.χ. αλκυλαμίδιο, κυκλοπενταδιένιο), η οποία περιέχει το ένα από τα χημικά στοιχεία του προς εναπόθεση επιθυμητού υμενίου. Η δεύτερη, είναι το «αντιδρών» ή οξειδωτικό μέσο (oxidant) προκειμένου περί εναπόθεσης οξειδίων. Ως οξειδωτικό μέσο συνήθως χρησιμοποιείται είτε το νερό είτε το όζον.

Κάθε κύκλος εναπόθεσης αποτελείται συνολικά από 4 βήματα που φαίνονται στην **Εικόνα 2.2**:

1. Αρχικά το υπόστρωμα εκτίθεται στον παλμό της πρόδρομης ένωσης, τα μόρια της οποίας προσροφώνται στην (συνήθως υδροφιλοποιημένη από την έκθεση στο περιβάλλον) επιφάνεια του υποστρώματος.
2. Έπειτα στο θάλαμο των αντιδράσεων εισάγεται ένα αέριο-μεταφορέας για να απομακρύνει όσα μόρια της πρόδρομης ένωσης δεν έχουν προσροφηθεί στην επιφάνεια του υποστρώματος. Ως αέριο-μεταφορέας επιλέγεται συνήθως άζωτο (N₂) υψηλής καθαρότητας.
3. Κατά τη διάρκεια του τρίτου βήματος, το υπόστρωμα εκτίθεται στον παλμό του «αντιδρώντος» (ή οξειδωτικού). Η ένωση αυτή αντιδρά με τα μόρια της πρόδρομης ένωσης που έχουν

προσροφηθεί στην επιφάνεια του υποστρώματος για τον σχηματισμό ενός ατομικού στρώματος του διηλεκτρικού υμενίου.

- Κατά το τελευταίο βήμα του κύκλου πραγματοποιείται εκ νέου εισαγωγή του αερίου-μεταφορέα στο θάλαμο αντιδράσεων για την απομάκρυνση των παραπροϊόντων της αντίδρασης.



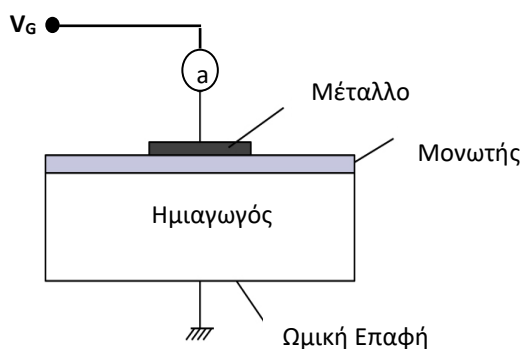
Σχήμα 2.2: Σχηματική απεικόνιση των τεσσάρων βημάτων ενός κύκλου εναπόθεσης διηλεκτρικών υμενίων με την τεχνική ALD.

Ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων κύκλων καθορίζει το πάχος που θέλουμε να εναποθέσουμε στην επιφάνεια του υποστρώματος. Ο ρυθμός ανάπτυξης του οξειδίου ανά κύκλο εξαρτάται τόσο από την επιλογή των αντιδρώντων ενώσεων (πρόδρομης ένωσης και οξειδωτικού μέσου), όσο και από τη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η εναπόθεση, ενώ δεν επηρεάζεται από την ποσότητα της εισαγόμενης πρόδρομης ένωσης. Τέλος, να σημειωθεί ότι, πολλές φορές στην πράξη τα βήματα 1 και 3 μπορεί να αντιστραφούν.

2.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΩΝ MOS

Η καταλληλότητα ενός οξειδίου ως διηλεκτρικού πύλης ενός transistor MOSFET μελετάται αρχικά σε δομές πυκνωτών MOS, όπως φαίνεται στο **Εικόνα 2.3**, με ένα συγκεκριμένο πρωτόκολλο ηλεκτρικών μετρήσεων με σκοπό να εκτιμηθεί η πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων στην διεπιφάνεια μονωτή/ημιαγωγού, η παρουσία φορτίων μέσα στο διηλεκτρικό και τα επίπεδα ρευμάτων διαρροής μέσα από αυτό συναρτήσει της εφαρμοζόμενης πόλωσης.

Η γενική αρχή των μετρήσεων φαίνεται επίσης στο **Εικόνα 2.3 (2,3)**. Ο σχηματισμός των πυκνωτών MOS θα περιγραφεί στο επόμενο κεφάλαιο. Στο μέταλλο (ή πύλη - gate) της δομής εφαρμόζεται συνεχής τάση V_G (της τάξεως των Volt) επάνω στην οποία υπερτίθεται μια εναλλασσόμενη τάση χαμηλού πλάτους (της τάξεως των millivolt) όπου η συχνότητα μπορεί να μεταβάλλεται. Η συνεχής τάση μεταβάλλεται σε συγκεκριμένα όρια και με αυτόν τον τρόπο λαμβάνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες χωρητικότητας – τάσης της δομής που δίνουν πολύτιμες πληροφορίες για την ποιότητα του διηλεκτρικού. Σημειώνεται επίσης ότι η μετρούμενη χωρητικότητα είναι **διαφορική χωρητικότητα** ($C=dQ/dV$) και εξάγεται από το μικρό εναλλασσόμενο σήμα που υπερτίθεται στην συνεχή τάση. Η μεταβολή της συνεχούς τάσης πραγματοποιείται για την μεταβολή της επιφανειακής κατάστασης του ημιαγωγού του πυκνωτή Μετάλλου-Μονωτή ημιαγωγού. Η πραγματοποίηση των μετρήσεων αυτών γίνεται σε σταθμό ακίδων όπου η επίπεδη διάταξη συνδέεται με το κατάλληλο όργανο μέτρησης σύνθετης αγωγιμότητας LCR HP4284A

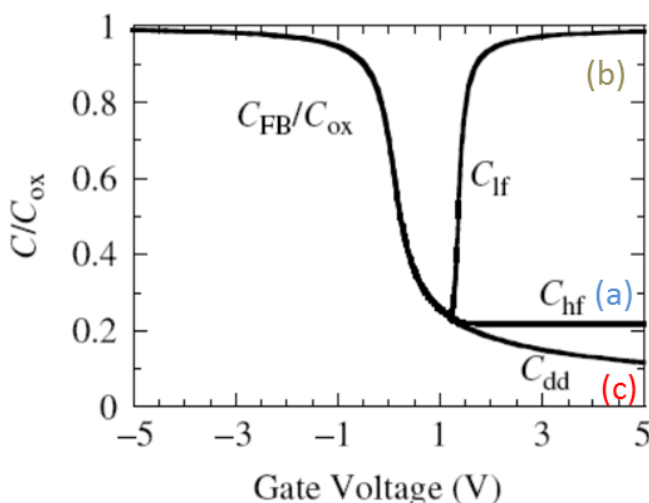


Εικόνα 2.3: Γενική αρχή ηλεκτρικών μετρήσεων σε πυκνωτή MOS για τον χαρακτηρισμό της καταλληλότητας ενός οξειδίου ως διηλεκτρικού πύλης (3).

2.3.1 Η μορφή των χαρακτηριστικών χωρητικότητας-τάσης και το ισοδύναμο κύκλωμα πυκνωτή MOS

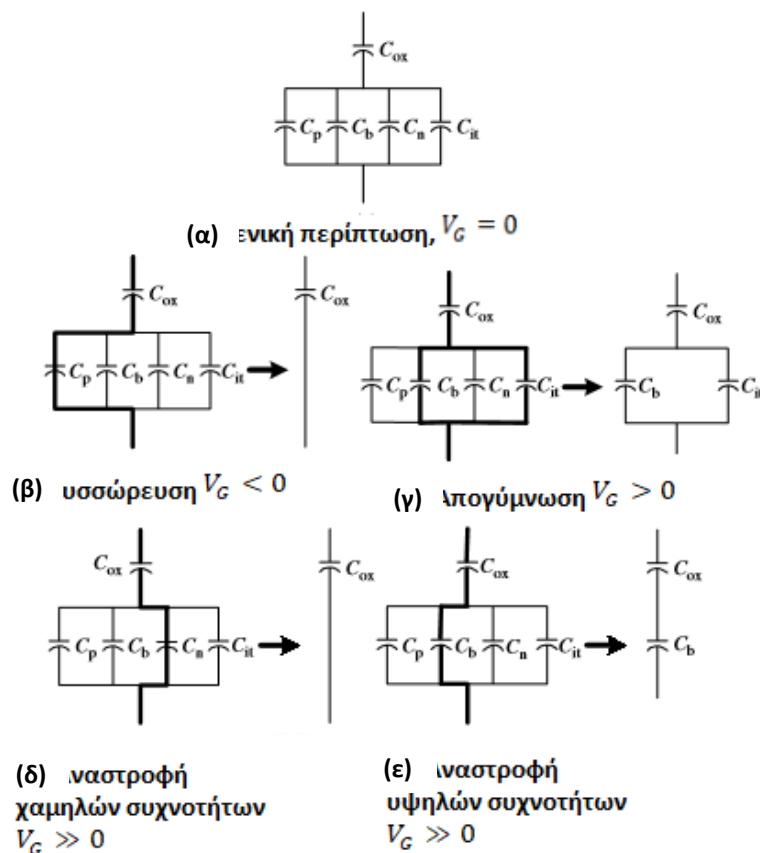
Στην **Εικόνα 2.4** παρουσιάζονται συνήθεις μορφές των χαρακτηριστικών χωρητικότητας-τάσης πυκνωτή MOS κανονικοποιημένες ως προς την μέγιστη τιμή της χωρητικότητας. Η πρώτη περίπτωση είναι η χαρακτηριστική υψηλής συχνότητας που στο σχήμα δηλώνεται ως C_{hf} και είναι η καμπύλη (a). Στην περιοχή από 5 έως ~ 1 V η χωρητικότητα παραμένει σε σταθερή μικρή τιμή. Σε τιμές μικρότερες του 1 V οι τιμές της χωρητικότητας αρχίζουν να αυξάνουν και για τιμές των τάσεων ακόμα μικρότερες του -1 V η χωρητικότητα παρουσιάζει κορεσμό με τιμές κοντά στο 1. Στην δεύτερη περίπτωση έχουμε την χαρακτηριστική χαμηλών συχνοτήτων που στο σχήμα συμβολίζεται με C_{lf} και είναι η καμπύλη (b). Η διαφορά της με αυτήν της υψηλής συχνότητας είναι ότι στην περιοχή των τάσεων 5 -1 V η χωρητικότητα έχει υψηλές τιμές και παρουσιάζει φαινόμενα κορεσμού. Η τρίτη περίπτωση που συμβολίζεται στο σχήμα ως C_{dd} και είναι η καμπύλη (c) περιγράφει την κατάσταση της βαθιάς απογύμνωσης. Σε αυτήν την περίπτωση και σε αντίθεση με τις άλλες δύο περιπτώσεις η χωρητικότητα δεν έχει σταθερή τιμή αλλά μειώνεται συνεχώς με την αύξηση της τάσης. Πρέπει να τονισθεί ότι και στις τρεις αυτές περιπτώσεις δεν παρατηρείται ουδεμία απόκλιση των τιμών της χωρητικότητας για τάσεις μικρότερες του 1 V.

Η θεωρητική μελέτη ενός πυκνωτή MOS είναι γνωστή και περιγράφεται λεπτομερώς (2,3,4). Η πόλωση συνεχούς τάσης προκαλεί ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο με την σειρά του μεταβάλλει την κατάσταση φορτίου στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Δηλαδή προκαλεί κάμψη των ζωνών του ημιαγωγού και επομένως μεταβολή στην χωρητικότητα του ημιαγωγού. Επομένως, ανάλογα με την περιοχή πόλωσης του πυκνωτή, που είναι συνάρτηση της τάσης πύλης του μετάλλου του πυκνωτή V_G , η συνολική χωρητικότητα καθορίζεται κύρια από την συνεισφορά του ημιαγωγού, καθώς η χωρητικότητα του οξειδίου είναι συνήθως σταθερή.



Εικόνα 2.4: Χαρακτηριστικές χωρητικότητας-τάσης πυκνωτή Μετάλλου-Μονωτή-Ημιαγωγού που δείχνουν τυπικές εξαρτήσεις της δομής είτε από την συχνότητα είτε από απόκλιση από την ισορροπία. Όλες οι χαρακτηριστικές είναι κανονικοποιημένες ως προς την μέγιστη χωρητικότητα.

Στην **Εικόνα 2.5(α)** αναπαρίσταται η γενική περίπτωση για μηδενική τιμή της τάσης του μετάλλου στον πυκνωτή. Για αρνητικές τιμές της τάσης του μετάλλου, το ημιαγωγίμο υπόστρωμα τύπου p θα βρεθεί σε κατάσταση συσσώρευσης οπών άρα και η αντίστοιχη χωρητικότητα C_p θα είναι πολύ μεγάλη. Αφού αυτή βρίσκεται σε σειρά με την C_{ox} , η συνολική χωρητικότητα στην κατάσταση συσσώρευσης οπών θα είναι ίση με αυτής του οξειδίου C_{ox} , όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.5(β)**. Όταν ο ημιαγωγός βρεθεί στην κατάσταση απογύμνωσης η συνολική χωρητικότητα C του συστήματος θα είναι συνισταμένη της χωρητικότητας του οξειδίου C_{ox} , της χωρητικότητας απογύμνωσης C_b καθώς και της χωρητικότητας των διεπιφανειακών παγίδων C_{it} , όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.5(γ)**. Στην περίπτωση αναστροφής, και πιο συγκεκριμένα στην περιοχή χαμηλών συχνοτήτων της εφαρμοζόμενης AC τάσης, η συσσώρευση ηλεκτρονίων είναι μεγάλη, με αποτέλεσμα η χωρητικότητα C_n να παίρνει μεγάλες τιμές και τελικά η συνολική χωρητικότητα να είναι πάλι ίση με αυτή του οξειδίου C_{ox} , όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.5(δ)**. Στην περιοχή αναστροφής και για υψηλές συχνότητες AC τάσης, οι φορείς μειονότητας του ημιαγωγού p αδυνατούν να ακολουθήσουν τις μεταβολές του πεδίου οπότε και δεν συνεισφέρουν στην συνολική χωρητικότητα C , με αποτέλεσμα να αναδεικνύονται οι χωρητικότητες του οξειδίου C_{ox} και της απογύμνωσης C_b , όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.5(ε)**.



Εικόνα 2.5: Κυκλωματικό ισοδύναμο χωρητικότητας ρεαλιστικής δομής MOS για τις διάφορες καταστάσεις πόλωσης του πυκνωτή (2 p. 323).

Στην παραπάνω **Εικόνα 2.5** ισχύουν τα παρακάτω:

- $C_{ox} = \epsilon_{ox} d$ είναι η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του οξειδίου.
- C_p είναι η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του ημιαγωγού στην κατάσταση συσσώρευσης φορέων πλειονότητας (οπών) στην επιφάνεια του ημιαγωγού για $V_G < 0$
- C_b είναι η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του ημιαγωγού στην κατάσταση απογύμνωσης για $V_G > 0$
- C_n είναι η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του ημιαγωγού στην κατάσταση αναστροφής, δηλαδή συσσώρευση φορέων μειονότητας, στην επιφάνεια του ημιαγωγού για $V_G \gg 0$

C_{it} είναι η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας των διεπιφανειακών παγίδων

Τα παραπάνω προϋποθέτουν αργές μεταβολές της DC τάσης, διαφορετικά για $V_G < 0$ δεν είναι δυνατόν να σχηματιστεί στρώμα αναστροφής και έχουμε την λεγόμενη κατάσταση βαθείας απογύμνωσης (deep depletion- C_{dd}).

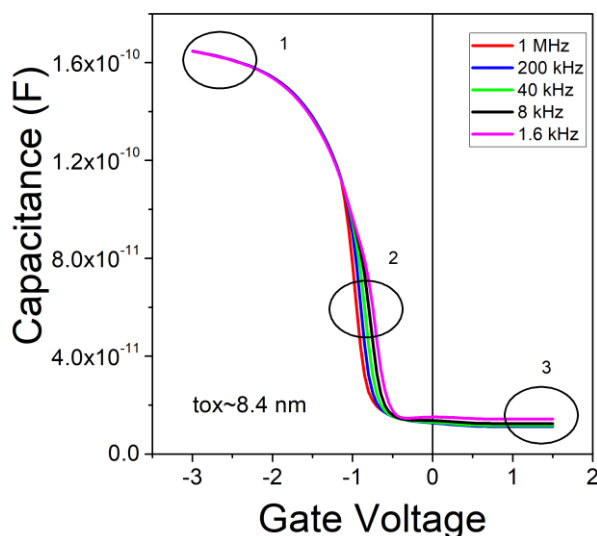
2.3.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες $C - V_G$ συναρτήσει της συχνότητας

Οι πληροφορίες που μπορούν να εξαχθούν από τη λήψη των χαρακτηριστικών καμπύλων

$C - V_G$ είναι οι εξής:

1. Ποιοτική επαλήθευση μιας τυπικής συμπεριφοράς δομής MOS και προσδιορισμός του τύπου του ημιαγωγού (p-type, n-type). Ένας ημιαγωγός τύπου p, βρίσκεται σε κατάσταση αναστροφής για θετικές τιμές της DC τάσης πύλης V_G και σε κατάσταση συσσώρευσης για αρνητικές τιμές της V_G , ενώ ένας ημιαγωγός τύπου n παρουσιάζει την ακριβώς αντίθετη συμπεριφορά. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ανάλυση της χαρακτηριστικής $C-V_G$ ενός πυκνωτή MOS επιτρέπει την εξαγωγή του επιπέδου νόθευσης N_b καθώς και του ϕ_b .
2. Στην περιοχή της συσσώρευσης μπορεί να προσδιοριστεί η χωρητικότητα του οξειδίου, C_{ox} από την μέγιστη τιμή της χωρητικότητας στο γράφημα, με την προϋπόθεση ότι δεν παρατηρείται μεγάλη διασπορά των καμπύλων που αντιστοιχούν στις διάφορες συχνότητες. Διασπορά στην περιοχή της συσσώρευσης υποδηλώνει μεγάλα ρεύματα διαρροής μέσα από το διηλεκτρικό είτε την ύπαρξη παγίδων στο μονωτή που μπορούν να ανταλλάσσουν φορτία με τον ημιαγωγό.
3. Η παρουσία διασποράς των καμπύλων στην περιοχή της απογύμνωσης – ασθενούς αναστροφής, είναι χαρακτηριστικό της ύπαρξης παγίδων στην διεπιφάνεια οξειδίου-ημιαγωγού. Οι παγίδες αυτές είναι συνήθως ασυμπλήρωτοι δεσμοί μεταξύ των ατόμων του υποστρώματος και του οξειδίου. Στην **Εικόνα 2.6** παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες $C - V_G$ για δομή MOS Al/SiO₂/p – Si με διηλεκτρικό πάχους 8.5nm (3). Το δείγμα δεν

υποβλήθηκε στην διαδικασία της ανόπτησης μετά τις διεργασίες επιμετάλλωσης του αλουμινίου. Παρατηρείται ότι στην περιοχή της συσσώρευσης (1) δεν υφίσταται διασπορά της χωρητικότητας με την συχνότητα. Στην περιοχή της απογύμνωσης (2) παρατηρείται έντονη διασπορά λόγω της απόκρισης των διεπιφανειακών παγίδων. Τέλος στην περιοχή της αναστροφής (3) παρατηρείται μικρή αύξηση της χωρητικότητας με την μείωση της συχνότητας που οφείλεται στην επικοινωνία του στρώματος αναστροφής του πυκνωτή με περιοχές έξω από αυτόν που βρίσκονται σε μόνιμη κατάσταση αναστροφής.



Εικόνα 2.6: Χαρακτηριστικές $C-V_G$ πυκνωτή MOS θερμοκρασίας δωματίου συναρτήσει της συχνότητας της υπερτιθέμενης εναλλασσόμενης τάσης που ελήφθησαν με μετρητή LCR HP4284A.

4. Παράλληλη μετατόπιση των χαρακτηριστικών καμπύλων προς θετικές ή αρνητικές τιμές τάσης συγκριτικά με την ιδανική καμπύλη υποδεικνύει τη διαφορά έργων εξόδου του μετάλλου και του ημιαγωγού, την επίδραση του σταθερού ή παγιδευμένου φορτίου στο οξείδιο καθώς και την δράση των διεπιφανειακών παγίδων. Στην **Εικόνα 2.6** παρατηρούμε ότι η περιοχή απογύμνωσης (και κατ' επέκταση όλη η δέσμη των καμπύλων) είναι μετατοπισμένη σε αρνητικές τιμές τάσης. Αυτό είναι ένδειξη ύπαρξης σταθερού θετικού φορτίου (fixed charge) μέσα στο οξείδιο που εξαλείφεται με ανόπτιση σε ουδέτερο περιβάλλον N₂ και σε υψηλή θερμοκρασία (~800°C) (3).

Μετά από ανόπτιση της δομής σε περιβάλλον Forming Gas (μίγμα H₂/N₂), η διασπορά στις παραπάνω περιοχές εξαλείφεται. Το H₂ αδρανοποιεί τους ασυμπλήρωτους δεσμούς SiO₂-Si μειώνοντας δραστικά την πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων. Παρατηρούμε επίσης ότι για τις δεδομένες συχνότητες δεν μπορούν να παράξουν χαρακτηριστικές χαμηλών συχνοτήτων για τον πυκνωτή MOS Για το πυρίτιο συγκεκριμένα έχουμε εμφάνιση συμπεριφοράς χαμηλών συχνοτήτων για συχνότητες της τάξεως των 100 Hz και κάτω (3) και δεν μπορούν να ληφθούν με το όργανο μέτρησης HP-4284 LCR.

Για την ορθή λήψη των χαρακτηριστικών καμπύλων $C - V_G$ πρέπει να λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

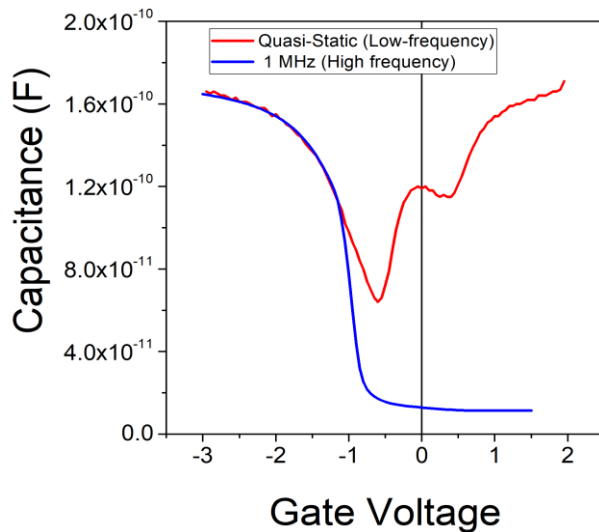
- (α) Κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ο πυκνωτής απαιτείται να βρίσκεται σε ισορροπία. Για αυτό το λόγο, η μεταβολή της DC συνιστώσας της τάσης πρέπει να μεταβάλλεται αργά. Το πρόβλημα αυτό εντοπίζεται όταν ο πυκνωτής βρίσκεται στην περιοχή αναστροφής και στην περιοχή της απογύμνωσης. Οι αλλαγές του πεδίου πρέπει να συμβαδίζουν με τις μεταβολές της συγκέντρωσης των φορέων μειονότητας ώστε να εισέρχεται ο πυκνωτής στις διαφορετικές περιοχές λειτουργίας σε σταθερή σχεδόν κατάσταση (1).
- (β) Η DC τάση πρέπει να μεταβάλλεται από την περιοχή αναστροφής προς την περιοχή συσσώρευσης. Έχει παρατηρηθεί πως κατά τη διάρκεια της σάρωσης της δομής κατά τον αντίθετο τρόπο, δηλαδή από την περιοχή της συσσώρευσης στην περιοχή της αναστροφής οι μετρούμενες τιμές της χωρητικότητας στη περιοχή της αναστροφής πλησιάζουν περισσότερο αυτές της μερικής βαθείας απογύμνωσης, γιατί δεν προλαβαίνει να σχηματιστεί στρώμα αναστροφής (2).

2.3.3 Υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων: η μέθοδος Hi-Low. Μία από τις προσφιλήs μεθόδους υπολογισμού των διεπιφανειακών παγίδων είναι αυτή του συνδυασμού των χαρακτηριστικών χωρητικότητας τάσης υψηλών και χαμηλών συχνοτήτων.

(α) Αρχή λειτουργίας της μεθόδου.

Στις χαρακτηριστικές υψηλών συχνοτήτων γίνεται η παραδοχή ότι οι παγίδες διεπιφάνειας δεν αποκρίνονται σε συχνότητες της τάξης του 1 MHz, επειδή το σήμα είναι πολύ γρήγορο. Σε αντίθεση, οι χαρακτηριστικές χαμηλών συχνοτήτων οι πλειονότητα των διεπιφανειακών παγίδων ανταποκρίνονται. Επομένως, είναι δυνατή η εύρεση της συγκέντρωσης των διεπιφανειακών παγίδων με κατάλληλη σύγκριση των αυτών των δύο χαρακτηριστικών χωρητικότητας τάσης. Η βασική θεωρία της μεθόδου αναπτύχθηκε από τον Berglund. Στην περίπτωση αυτή η χαρακτηριστική χαμηλής συχνότητας πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο Lock-in, που δεν είναι αρκετά διαδομένη. Τα συνήθη όργανα μέτρησης χωρητικότητας μεταβαλλόμενης συχνότητας έχουν υψηλή αξιοπιστία στις υψηλές συχνότητες (εφόσον έχουν αποφευχθεί σειριακές αντιστάσεις και ρεύματα διαρροής) και καμία αξιοπιστία σε συχνότητες κάτω των 100 Hz. Η λύση του προβλήματος αυτού είναι η λεγόμενη ημιστατική χαρακτηριστική (quasi-static). Στη μέθοδο αυτή η τάση πόλωσης αλλάζει με σταθερό ρυθμό ($dV/dt = \text{constant}$). Η μεταβολή αυτή προκαλεί αφενός ένα ρεύμα μετατόπισης και αφετέρου ένα ρεύμα διαρροής. Το ρεύμα μετατόπισης είναι ανάλογο της χωρητικότητας. Αν το ρεύμα διαρροής είναι τάξεις μεγέθους μικρότερο του ρεύματος

μετατόπισης τότε η χωρητικότητα της δομής μπορεί να εξαχθεί με μεγάλη ακρίβεια. Η χωρητικότητα αυτή περιέχει όλη την πληροφορία από τις διεπιφανειακές παγίδες, διότι αυτές μεταβαίνουν σε συγκεκριμένη τάση από την μία κατάσταση φόρτισης στην άλλη καθώς η στάθμη Fermi τις διατρέχει. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μία αξιόπιστη εναλλακτική λύση για την καταγραφή της χαρακτηριστικής χαμηλής συχνότητας. Επίσης από την χαρακτηριστική αυτή εξάγεται το δυναμικό επιφανείας του ημιαγωγικού υποστρώματος.



Εικόνα 2.7: Σύγκριση χαρακτηριστικών $C-V_G$ υψηλής συχνότητας και ημιστατικής. Το δείγμα είναι το ίδιο με αυτό της Εικόνας 2.6.

Στην **Εικόνα 2.7** πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ χαρακτηριστικών $C-V_G$ υψηλής συχνότητας (1MHz) και ημιστατικής σε πυκνωτή MOS Al/SiO₂/p-type Si. Οι χαρακτηριστικές αυτές ταυτίζονται στην περιοχή της συσσώρευσης και αποκλίνουν στις περιοχές απογύμνωσης αναστροφής. Από τις αποκλίσεις των τιμών της χωρητικότητας για ίδιες τιμές της τάσης στην περιοχή της απογύμνωσης εξάγεται η πυκνότητα των διεπιφανειακών καταστάσεων.

(β) Υπολογισμός του δυναμικού επιφανείας

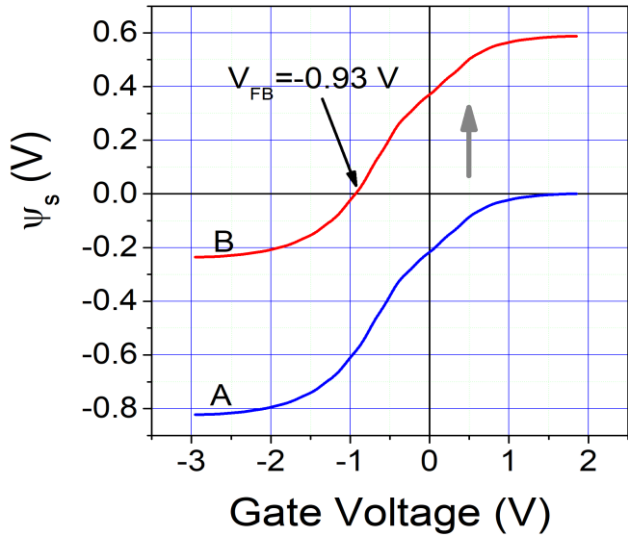
Για τον προσδιορισμό του δυναμικού επιφανείας ϕ_s συναρτήσει της τάσης V_G ολοκληρώνεται η συνάρτηση $(1-C_{lf}/C_{ox})$ σε όλο το εύρος των τιμών της τάσης της χαρακτηριστικής $C-V_G$ βάση της εξίσωσης κατά τον Berglund (5):

$$\phi_s = \int_{V_{g2}}^{V_{g1}} (1 - C_{lf}/C_{ox}) dV_G + \Delta \quad (2.1)$$

Όπου Δ είναι μία σταθερά ολοκλήρωσης η οποία πρέπει να καθοριστεί. Σημαντικό ρόλο σε αυτό διαδραματίζει η τάση επίπεδων ζωνών V_{fb} , διότι σε αυτή την τιμή τάσης το δυναμικό επιφανείας

είναι μηδενικό. Άρα θέτοντας μηδέν το δυναμικό επιφανείας όπου αντιστοιχεί η τάση επιπέδων ζωνών, γίνεται μια ζυγοστάθμιση, η οποία μας δίνει την αντιστοιχία $\psi_s - V_G$ **Εικόνα 2.8**.

Η παράμετρος V_{fb} προσδιορίζεται είτε από την χαρακτηριστική $1/C^2 - V_G$, είτε από τον θεωρητικό υπολογισμό $C - V_G$, είτε από την μέθοδο της δεύτερης παραγώγισης της χαρακτηριστικής $C - V_G$ υψηλής συχνότητας.



Εικόνα 2.8: Η ολοκλήρωση της συνάρτησης $(1 - C_{if}/C_{ox})$ παράγει την καμπύλη A που εκφράζει την μεταβολή του δυναμικού επιφανείας συναρτήσει της τάσης πόλωσης. Παρατηρούμε ότι στις περιοχές της αναστροφής και της συσσώρευσης το δυναμικό επιφανείας παρουσιάζει ισχυρά φαινόμενα κορεσμού. Απότομες μεταβολές στο δυναμικό επιφανείας συμβαίνουν στην περιοχή απογύμνωσης. Γνωρίζοντας ότι η τάση επιπέδων ζωνών είναι $-0.93 V$ πραγματοποιείται ολίσθηση της καμπύλης A ώστε για τιμή τάσης $V_G = -0.93 V$, το δυναμικό επιφανείας να είναι $\psi_s = 0 V$.

Η μεταβολή του δυναμικού επιφανείας στην **Εικόνα 2.8** (καμπύλη B) μεταξύ της τάσης επιπέδων και της συσσώρευσης είναι $-0.23 V$. Το διαθέσιμο εύρος κάμψης των ζωνών είναι $E_i/2 - \phi_b = 0.22 eV$ ($0.56 - 0.33 eV$). Το αποτέλεσμα αυτό αποδίδεται σε μικρό σφάλμα προσδιορισμού της τάσης επιπέδων ζωνών.

(γ) Υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων.

Η μέθοδος του Berglund (6) συγκρίνει μια χαμηλής συχνότητας χαρακτηριστική $C - V_G$ καμπύλη με μία υψηλής συχνότητας (1MHz) στην οποία δεν αποτυπώνεται η επιρροή των διεπιφανειακών παγίδων. Στις χαμηλές συχνότητες οι διεπιφανειακές παγίδες καθώς και οι φορείς μειονότητας από το στρώμα αναστροφής μπορούν να επηρεαστούν από την χαμηλή συχνότητα μέτρησης AC.

Η χωρητικότητα της χαμηλής συχνότητας στη περιοχή της απογύμνωσης – αναστροφής δίνεται από την εξίσωση :

$$C_{lf} = \left(\frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s + C_{it}} \right)^{-1} \quad (2.2)$$

όπου με τη χρήση της εξίσωσης της χωρητικότητας των διεπιφανειακών παγίδων:

$$D_{it} = C_{it}/q^2 \quad (2.3)$$

Μετασχηματίζεται τελικά σε :

$$D_{it} = \frac{1}{q^2} \left(\frac{C_{ox}C_{lf}}{C_{ox} - C_{lf}} - C_s \right) \quad (2.4)$$

Η εξίσωση (2.4) είναι ιδανική για τον υπολογισμό των ενεργειακών παγίδων σε ολόκληρο το ενεργειακό χάσμα.

Οι χωρητικότητες C_{lf} και C_s πρέπει να είναι γνωστές ώστε να προσδιοριστεί η πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων D_{it} . Η C_{lf} λαμβάνεται από μετρήσεις ως συνάρτηση της τάσης της πύλης V_G . Η χωρητικότητα C_s αρχικά υπολογίζονταν όμως αυτό ήταν αρκετά χρονοβόρο και μια απλοποιημένη μέθοδος προτάθηκε από τους Castagne and Vapaille (7), η οποία μάλιστα ελαχιστοποιεί την αβεβαιότητα στον υπολογισμό της. Η C_s υπολογίζεται μέσω των μετρήσιμων παραμέτρων, των χωρητικοτήτων C_{ox} και C_{hf} οι οποίες συνθέτουν την εξίσωση (2.5).

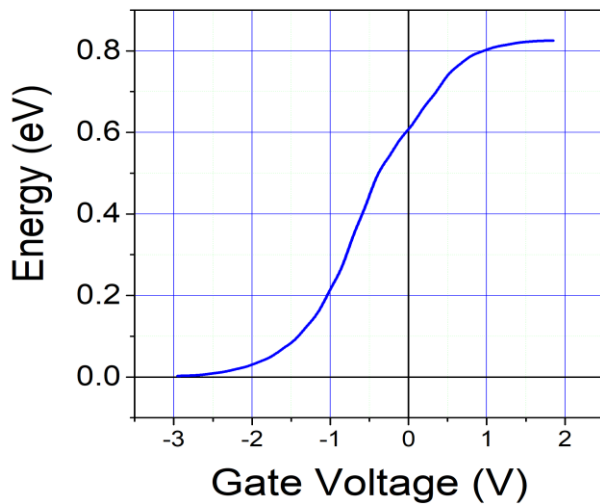
$$C_s = \frac{C_{ox}C_{hf}}{C_{ox} - C_{hf}} \quad (2.5)$$

Με την προσθήκη της εξίσωσης (2.5) στην εξίσωση (2.4) έχουμε την τελική εξίσωση υπολογισμού του D_{it} .

$$D_{it} = \frac{C_{ox}}{q^2} \left(\frac{C_{lf}/C_{ox}}{1 - C_{lf}/C_{ox}} - \frac{C_{hf}/C_{ox}}{1 - C_{hf}/C_{ox}} \right) \quad (2.6)$$

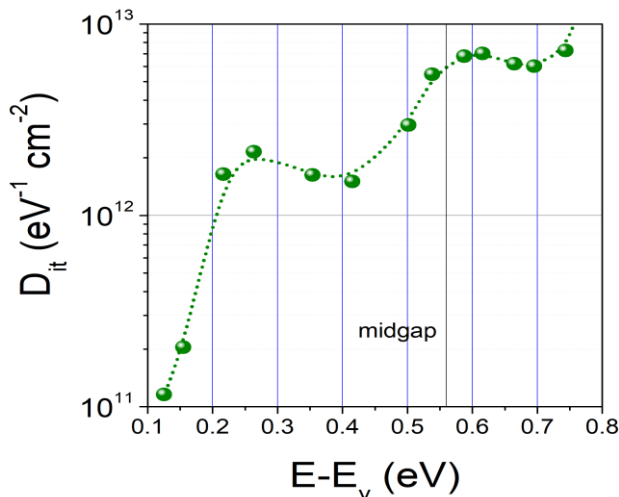
(δ) Ενεργειακή κατανομή των διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα.

Για τον προσδιορισμό της ενεργειακής κατανομής των παγίδων εντός του ενεργειακού χάσματος πραγματοποιείται αντιστοίχιση του δυναμικού επιφανείας με το ενεργειακό χάσμα. Μία ασφαλής προσέγγιση που παράγει σχετικά μικρό σφάλμα είναι να πραγματοποιηθεί με αναφορά στο όριο της ζώνης των φορέων πλειονότητας **Εικόνα 2.9**.



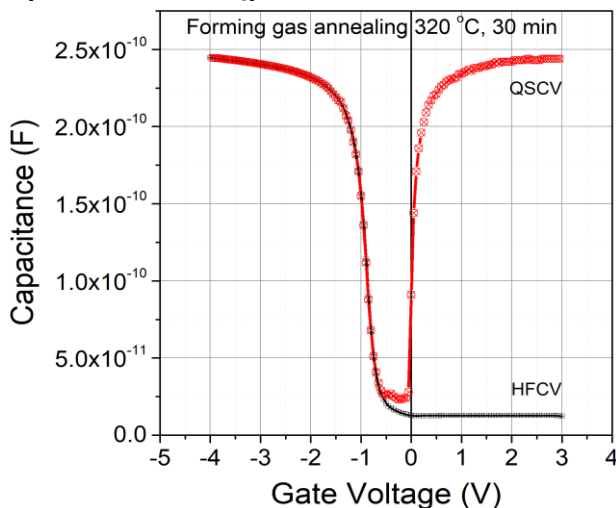
Εικόνα 2.9: Αντιστοίχιση τιμών ενεργειακού χάσματος συναρτήσει της τάσης πόλωσης. Το σημείο αναφοράς αποτελεί το ελάχιστο της ζώνης σθένους που θεωρείται ότι προσεγγίζει η στάθμη Fermi στην μέγιστη τιμή τάσης πόλωσης στην συσσώρευση.

Στην **Εικόνα 2.10** παρουσιάζεται η κατανομή των διεπιφανειακών παγίδων συναρτήσει της ενέργειας του χάσματος βάσει της παραπάνω μεθοδολογίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή είναι αξιόπιστη στην περιοχή πλησίον στο μέσο του χάσματος.



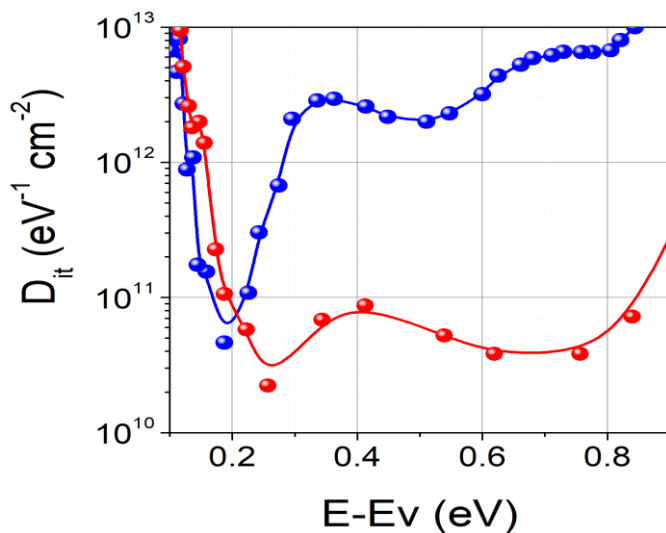
Εικόνα 2.10: Πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων συναρτήσει της ενέργειας του χάσματος πυκνωτή MOS Al-SiO₂-p-Si που βασίζεται στην μέθοδο των διαφορών χωρητικότητας υψηλής συχνότητας και ημιστατικής (Hi-low). Ως μηδέν της ενέργειας ορίζεται η άκρη της ζώνης σθένους του υποστρώματος. Το δείγμα δεν έχει υποστεί ανόπτηση χαμηλής θερμοκρασίας σε περιβάλλον υδρογόνου και εκ τούτου παρουσιάζει υψηλό D_{it}.

(ε) Η επίδραση της ανόπτησης σε περιβάλλον υδρογόνου στην πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων στο σύστημα Al/SiO₂/Si.



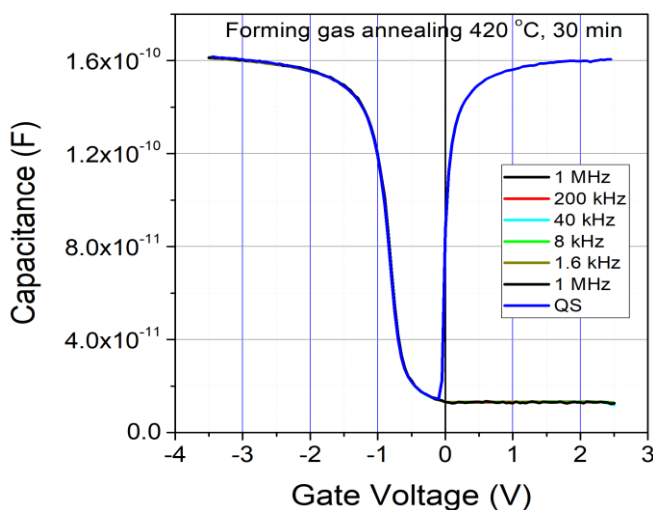
Εικόνα 2.11: Σύγκριση χαρακτηριστικών C-V υψηλής συχνότητας και ημιστατικής πυκνωτή MOS μετά από ανόπτηση στους 320 °C σε περιβάλλον υδρογόνου. Η διεργασία αυτή προκαλεί σημαντική μείωση της πυκνότητας των διεπιφανειακών καταστάσεων όπως φαίνεται από τις διαφορές των τιμών των χαρακτηριστικών C-V υψηλής συχνότητας και ημιστατικής.

Στην **Εικόνα 2.11** παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές χωρητικότητας – τάσης, υψηλής συχνότητας και η ημιστατική του δείγματος, των **Εικόνων 2.6 και 2.7** μετά από ανόπτηση σε περιβάλλον υδρογόνου (10 % H₂ -90% N₂), που είναι τυπική διαδικασία μετά τα στάδια της επιμετάλλωσης του δείγματος. Η ανόπτηση έγινε στους 320 °C διάρκειας 30 min. Γίνεται φανερό ότι οι διαφορές των δύο χαρακτηριστικών μειώνονται, που σηματοδοτεί την δραστική μείωση των διεπιφανειακών παγίδων. Στην **Εικόνα 2.12** πραγματοποιείται σύγκριση της πυκνότητας των διεπιφανειακών παγίδων μεταξύ του δείγματος χωρίς ανόπτηση (μπλε) και του δείγματος με ανόπτηση (κόκκινη) στους 320 °C, βάσει της μεθόδου σύγκρισης χωρητικοτήτων υψηλής συχνότητας και ημιστατικής. Είναι φανερό ότι η ανόπτηση σε περιβάλλον υδρογόνου μειώνει κατά 33 φορές το Dit στα 0.3 eV και κατά 2 τάξεις μεγέθους κοντά στον μέσο του χάσματος (0.6 eV)



Εικόνα 2.12: Σύγκριση της πυκνότητας των διεπιφανειακών παγίδων συναρτήσει της ενέργειας του χάσματος πυκνωτή MOS Al-SiO₂-p-Si που βασίζεται στην μέθοδο των διαφορών χωρητικοτήτων υψηλής συχνότητας και ημιστατικής (Hi-Low). Τα μπλε στοιχεία αντιστοιχούν στην κατάσταση πριν την ανόπτηση ενώ τα κόκκινα στην κατάσταση μετά την ανόπτηση.

Αύξηση της θερμοκρασίας ανόπτησης κατά 100 °C, στους 420 °C για 30 min προκαλεί την εξάλειψη σχεδόν των διεπιφανειακών παγίδων, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.12**.



Εικόνα 2.13: Σύγκριση χαρακτηριστικών C-V_G υψηλών συχνοτήτων (1 MHz-1.6 kHz) και ημιστατικής σε πυκνωτή MOS μετά από ανόπτηση στους 420 °C σε περιβάλλον υδρογόνου. Γίνεται φανερό ότι για τάσεις μικρότερες των -0.1 δεν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των χαρακτηριστικών. Στην περίπτωση αυτή η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων μειώνεται σε τιμές μικρότερες του 10¹⁰ cm⁻²eV⁻¹ με αποτέλεσμα η μέθοδος των διαφορών χωρητικότητας υψηλής συχνότητας ημιστατικής να καθίσταται επισφαλής.

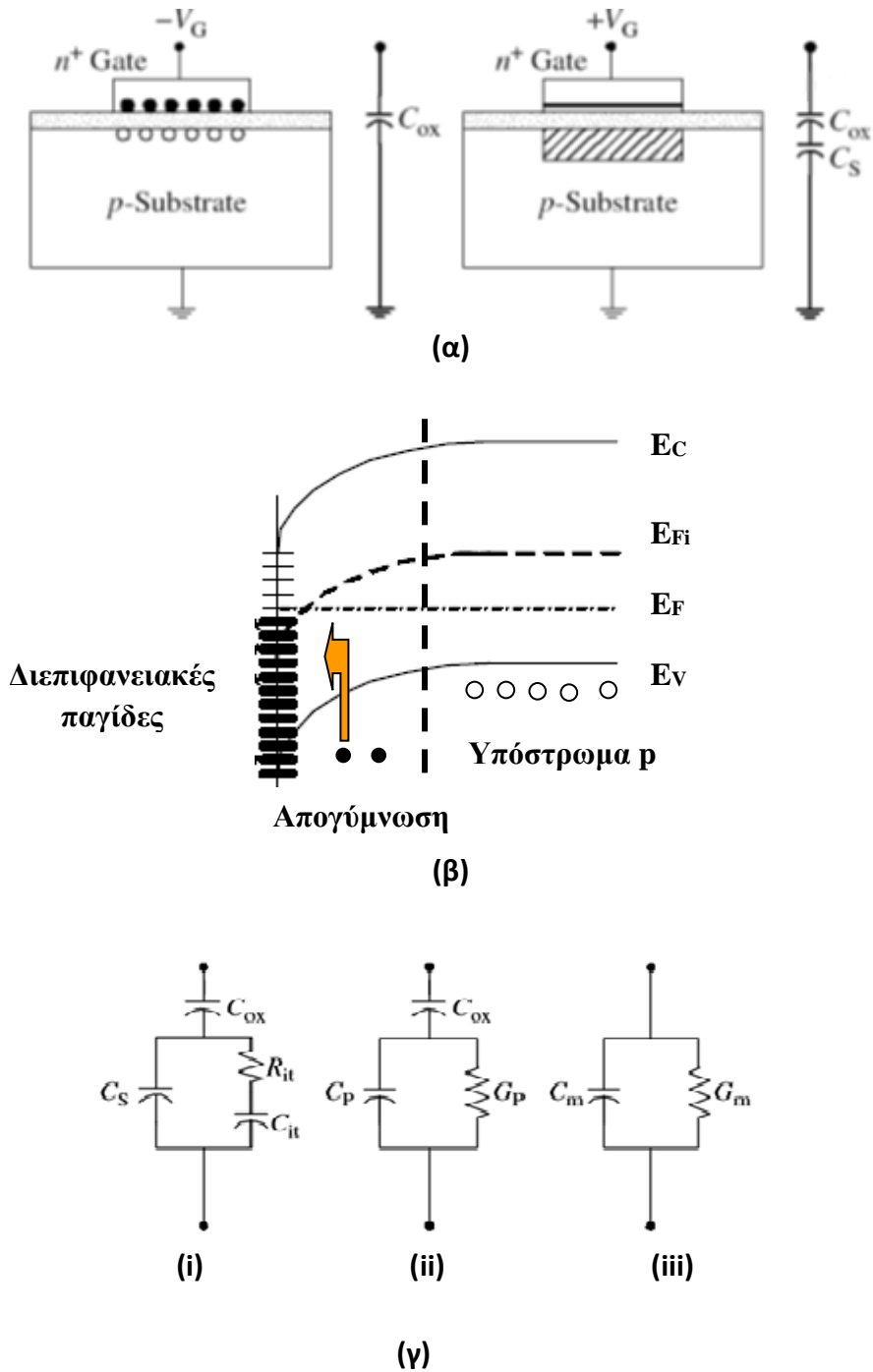
2.3.4 Υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων - η μέθοδος της αγωγιμότητας συναρτήσει της συχνότητας.

Από τις υπάρχουσες μεθόδους ποσοτικής εκτίμησης της πυκνότητας των διεπιφανειακών παγίδων (Dits) στην διεπιφάνεια οξειδίου-ημιαγωγού, αυτή της αγωγιμότητας συναρτήσει της συχνότητας που προτάθηκε από τους Nicollian & Goertzberg (4 pp. 209-228), αποτελεί την ακριβέστερη με ευαισθησία μέτρησης $10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ και χαμηλότερα για το πυρίτιο (2 p. 347).

(α) Αρχή λειτουργίας της μεθόδου.

Η μέθοδος εφαρμόζεται στην περιοχή απογύμνωσης της δομής MOS όπου αναδεικνύεται εκτός από τις χωρητικότητες C_{ox} και C_s **Εικόνα 2.13(α)** και η χωρητικότητα που οφείλεται στην παγίδευση/αποπαγίδευσης φορτίου από τις διεπιφανειακές παγίδες. Στην πράξη, πραγματοποιούμε μετρήσεις στον πυκνωτή για ένα φάσμα συχνοτήτων της υπερτιθέμενης AC τάσης, με εύρος συνήθως μερικών δεκάδων Hz έως 10^6 Hz, και παράμετρο τη DC τάση της πύλης που μεταβάλλεται στη περιοχή απογύμνωσης. Στην περιοχή απογύμνωσης οι διεπιφανειακές παγίδες αλληλοεπιδρούν με το υπόστρωμα του ημιαγωγού παγιδεύοντας ή αποπαγιδεύοντας φορείς πλειονότητας από τη ζώνη σθένους (ηλεκτρόνια για ημιαγωγό τύπου p), ανάλογα με την κάμψη των ενεργειακών ζωνών που επέρχεται σε συγκεκριμένη DC τάση από την υπερτιθέμενη AC, όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.13(b)**. Η διαδικασία παγίδευσης/αποπαγίδευσης εκτός από την ιδιότητα της χωρητικότητας, για να πραγματοποιηθεί, απαιτεί ενέργεια από το σύστημα που εντέλει χάνεται, άρα οι μεταβάσεις αυτές εκφράζουν απώλεια ενέργειας του συστήματος και με όρους ισοδύναμου ηλεκτρικού κυκλώματος εκφράζεται με αντιστάσεις R_{it} σε σειρά με τη χωρητικότητα C_{it} **Εικόνα 2.13(c)**. Επομένως, το συγκεκριμένο κύκλωμα παίρνει την μορφή της **Εικόνας 2.13(c-i)**, όπου $C_s = C_b = C_D$ η χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης της δομής MOS. Το τμήμα του κυκλώματος που αναπαριστά το υπόστρωμα του ημιαγωγού μπορεί να αντικατασταθεί με ένα ισοδύναμο κύκλωμα μιας χωρητικότητας C_p παράλληλης με μια συνιστώσα αγωγιμότητας G_p , όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.13(c-ii)**. Πρέπει να τονισθεί ότι η σωστή εφαρμογή της μεθόδου απαιτεί την σωστή πόλωση της διάταξης στην περιοχή απογύμνωσης ώστε να εξασφαλισθεί ότι η επικοινωνία των διεπιφανειακών θα πραγματοποιηθεί αποκλειστικά με την ζώνη των φορέων πλειονότητας. Αν ο πυκνωτής πολωθεί στην περιοχή της ασθενούς αναστροφής η στάθμη Fermi θα εντοπίζεται κοντά στην μέση του χάσματος και τότε οι πιθανότητες εκπομπής και σύλληψης ηλεκτρονίων και οπών από τις διεπιφανειακές παγίδες γίνονται περίπου ίδιες. Επομένως οι διεπιφανειακές παγίδες θα ανταλλάζουν φορτία και με την ζώνη των φορέων πλειονότητας αλλά και με την ζώνη των φορέων μειονότητας. Συνεπώς, στην περίπτωση πόλωσης του πυκνωτή στην περιοχή της ασθενούς αναστροφής καταγράφονται απώλειες του συστήματος εξαιτίας του

ρεύματος γένεσης-επανασύνδεσης μέσω διεπιφανειακών καταστάσεων και όχι τις απώλειες απλής ανταλλαγής (εκπομπής-σύλληψης) με τους φορείς της ζώνης πλειονότητας.



Εικόνα 2.13: (α) Ανάδειξη των χωρητικοτήτων δομής MOS με ημιαγωγό τύπου p στις περιπτώσεις συσσώρευσης και απογύμνωσης/αναστροφής. (β) Σύλληψη φορέων μειονότητας (ηλεκτρονίων) από τις διεπιφανειακές παγίδες στην κατάσταση απογύμνωσης ημιαγωγού τύπου p . (γ-i) Απλοποιημένο κύκλωμα επαφής MOS στην περιοχή απογύμνωση. (γ-ii) Ισοδύναμο κύκλωμα του (α). (γ-iii) Το μετρούμενο ισοδύναμο κύκλωμα.

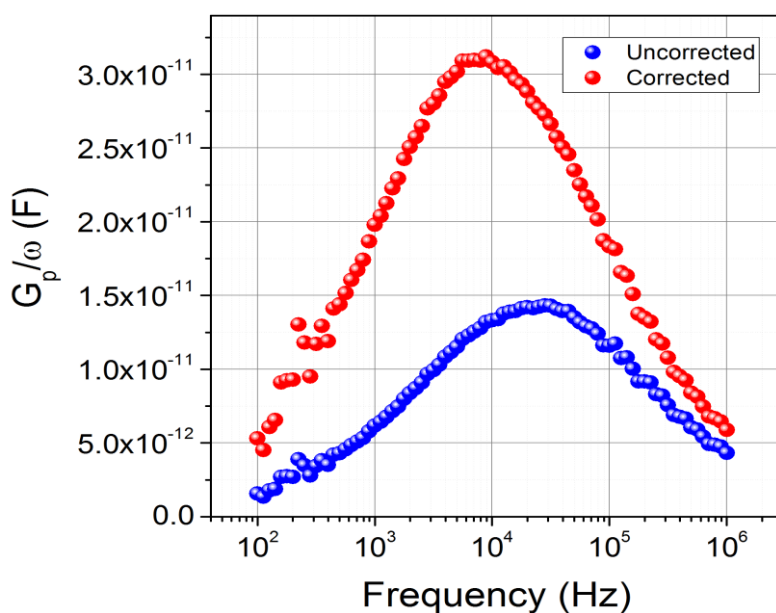
Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων μετράται μια χωρητικότητα C_m και μία συνιστώσα αγωγιμότητας G_m ($m = \text{measured} = \text{μετρούμενη}$), όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.13(γ-iii)**. Για να είναι δυνατή η ανάλυση του σήματος εξαιτίας των διεπιφανειακών παγίδων πρέπει να αφαιρεθεί η συνεισφορά του οξειδίου. Η διαφορά με το κύκλωμα της **Εικόνας 2.13(γ-ii)** βρίσκεται στο ότι το σύστημα δεν μετρά τη χωρητικότητα του οξειδίου C_{ox} . Επομένως, η σύνθετη αγωγιμότητα της **Εικόνας 2.13(c-ii)** μετατρέπεται σε σύνθετη αντίσταση από την οποία αφαιρείται η σύνθετη αντίσταση του οξειδίου και το αποτέλεσμα μετατρέπεται σε πάλι σε σύνθετη αγωγιμότητα. Το πραγματικό μέλος της σύνθετης αγωγιμότητας δίνεται από την σχέση **2.7** και είναι η AC αγωγιμότητα (διαιρούμενη με την κυκλική συχνότητα του σήματος) των διεπιφανειακών παγίδων. Η σχέση αυτή συνδέει τα μετρούμενα μεγέθη C_m και G_m σε κάθε συχνότητα με το σήμα των απωλειών των διεπιφανειακών παγίδων. Πρέπει να σημειωθεί ότι το C_{ox} προσδιορίζεται ανεξάρτητα από χαρακτηριστική $C-V_G$ υψηλής συχνότητας (2 p. 349).

$$\frac{G_p}{\omega} = \frac{\omega G_m C_{ox}^2}{G_m^2 + \omega^2 (C_{ox} - C_m)^2} \quad (2.7)$$

με $\omega = 2\pi f$, όπου f η συχνότητα της AC τάσης.

Η τιμή του C_{ox} είναι η μέγιστη χωρητικότητα της δομής MOS, όπως αυτή προκύπτει από την δέσμη των καμπυλών $C - V_G$ στην περιοχή της συσσώρευσης.

Στην **Εικόνα 2.14** παρουσιάζεται η μετρούμενη AC αγωγιμότητα διαιρεμένη με την κυκλική συχνότητα του σήματος και η εξαγόμενη ac αγωγιμότητα βάσει του τύπου **2.7**.



Εικόνα 2.14: Διαδικασία διόρθωσης χαρακτηριστικών ac αγωγιμότητας. Παρατηρούμε ότι η διόρθωση αυξάνει το σήμα και μετατοπίζει το μέγιστο του σε χαμηλότερες συχνότητες.

(β) Υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων. Από τις μετρήσεις, και με χρήση της έκφρασης **(2.1)**, προκύπτουν οι διορθωμένες καμπύλες $G_p/\omega = f(F)$. Η θεωρητική ανάλυση των Nicollian, Goertzberg και Brews **(2,4,8)**, με παραδοχές ότι οι καμπύλες είναι γκαουσιανές και υφίστανται διεύρυνση, οδηγεί στην ακόλουθη εξίσωση **(2.8)**.

$$(G_{it}/\omega)/(qD_{it}A) = \frac{1}{2\xi} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2}} \int_{-\infty}^{\infty} d\eta \exp[-\eta^2/(2\sigma_s^2)] \exp(-\eta) \ln[1 + \xi^2 \exp(2\eta)] \quad (2.8)$$

Η εξίσωση **(2.8)** καθώς απαιτεί πολλούς υπολογισμούς συνήθως παρακάμπτεται με την βοήθεια προσεγγιστικών μεθόδων. Η πιο δημοφιλής είναι αυτή που αναφέρεται από τον **D.K.Schröder** είναι η **(2.9)**.

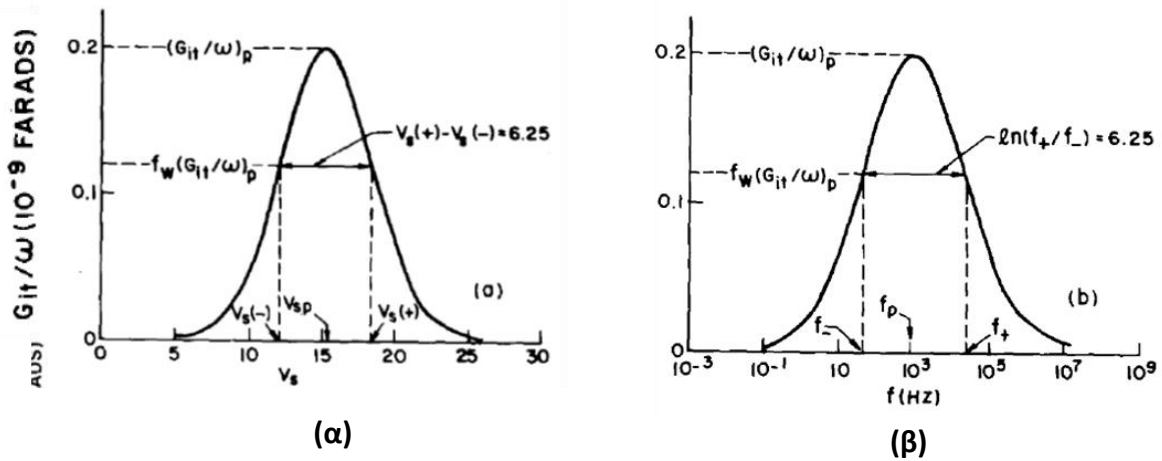
$$D_{it} \approx 2.5 \frac{\left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{max}}{(qA)}, \text{ σε } eV^{-1}cm^{-2} \quad (2.9)$$

όπου $\left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{max}$ το μέγιστο κάθε καμπύλης $G_p/\omega = f(F)$ για κάθε τιμή της DC τάσης πόλωσης στην περιοχή απογύμνωσης, q το φορτίο του ηλεκτρονίου, A η επιφάνεια του πυκνωτή. Αξίζει να αναφερθεί ότι ο παράγοντας 2.5 αποτελεί περαιτέρω απλοποίηση της εξίσωσης **(2.10)**.

$$D_{it} = \frac{\left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{max}}{(qA f_D)} \quad (2.10)$$

Ο παράγοντας f_D εκφράζει την διεύρυνση της κορυφής της αγωγιμότητας και λαμβάνει τιμές από 0.14-0.4. Επομένως ο παράγοντας 2.5 εκφράζει το γεγονός ότι ο **D.K.Schröder** θεωρεί ότι για τις περισσότερες περιπτώσεις η τυπική διεύρυνση της χαρακτηριστικής αποδίδεται με $f_D = 0.4$.

Η εξίσωση **(2.10)** προέρχεται από την προσεγγιστική μέθοδο που είχε προταθεί από τον Brews **(8)** και στηρίζεται στην υπόθεση ότι οι χαρακτηριστικές κορυφές απωλειών είτε συναρτήσει της συχνότητας είτε συναρτήσει της τάσης μπορούν κατά προσέγγιση να περιγραφούν από Γκαουσιανές κατανομές όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2.15**.



Εικόνα 2.15: **(α)** Θεωρητική κορυφή απωλειών G_{it}/ω συναρτήσεως του ανοιγμένου δυναμικού επιφανείας u_s ($=q\Psi_s/kT$) **(α)** και συναρτήσεως της συχνότητας **(β)**. Το εύρος της κορυφής υπολογίζεται σε ένα αυθαίρετα ορισμένο κλάσμα της κορυφής $f_w(G_{it}/\omega)_{max}$ από την διαφορά $u_s(+)-u_s(-)$ στην πρώτη περίπτωση και ως $f_+ - f_-$ στην δεύτερη περίπτωση. **(8)**

Ο Brews **(8)** προτείνει ως καλύτερη προσέγγιση την εύρεση του παράγοντα διεύρυνσης σ_s της κορυφής απωλειών, σε συγκεκριμένο κλάσμα του μεγίστου $f_w(G_{it}/\omega)_{max}$, όπου το f_w λαμβάνει τιμές μικρότερες του 1 και μεγαλύτερες του 0. Στην πράξη χρησιμοποιούνται τιμές από 0.5 έως 0.9. Δηλαδή:

$$\frac{G_{it}}{\omega} = f_w \times \left(\frac{G_{it}}{\omega}\right)_{max} \quad (2.11)$$

Έχοντας ορίσει το f_w στην συνέχεια υπολογίζεται ο παράγοντας διεύρυνσης της κορυφής (Broadening parameter) σ_s . Είναι διαπιστωμένο ότι για δεδομένο σ_s το G_{it}/ω εξαρτάται από την παράμετρο $\xi = \omega\tau$, όπου τ είναι ο χαρακτηριστικός χρόνος σύλληψης φορέα πλειονότητας από μια διεπιφανειακή παγίδα και δίνεται από την εξίσωση **(2.12)**.

$$\tau = \frac{\exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)}{\sigma u_{th} N_B} \quad (2.12)$$

Η συνθήκη 1 καθορίζει δύο τιμές της παραμέτρου ξ , την ξ_+ και την ξ_- . Μία εκτίμηση εύρους της κορυφής απωλειών που θα είναι ανεξάρτητη του επιπέδου νόθευσης και της πιθανότητας κατάληψης σu_{th} είναι ο λόγος $\ln\left(\frac{\xi_+}{\xi_-}\right)$.

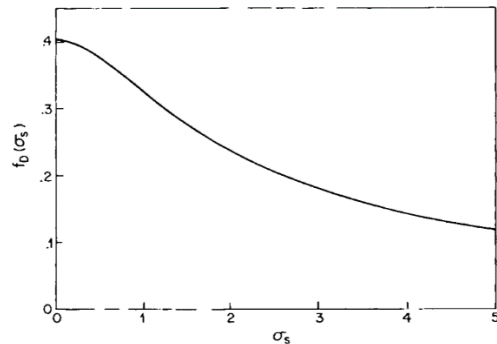
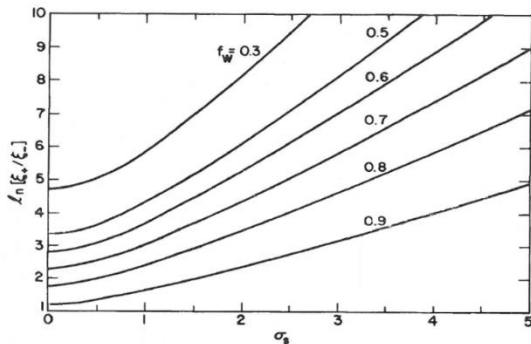
Για την περίπτωση που η κορυφή των απωλειών εκφράζεται συναρτήσεως του ανοιγμένου δυναμικού επιφανείας

$$\ln\left(\frac{\xi_+}{\xi_-}\right) = u_s(+)-u_s(-) \quad (2.13)$$

Για την περίπτωση που η κορυφή των απωλειών εκφράζεται συναρτήσει της συχνότητας:

$$\ln\left(\frac{\xi_+}{\xi_-}\right) = \ln\left(\frac{f_+}{f_-}\right) = \ln(f_+) - \ln(f_-) \quad (2.14)$$

Προσδιορισμός του $\ln\left(\frac{\xi_+}{\xi_-}\right)$ επιτρέπει τον προσδιορισμό του παράγοντα διεύρυνσης σ_s χρησιμοποιώντας την καμπύλη του σχήματος 2.14 που παρέχει άμεσα το σ_s για συγκεκριμένες τιμές του f_w (0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 και 0.9). Γνωρίζοντας το σ_s ο παράγοντας f_D προσδιορίζεται από την καμπύλη του σχήματος 2.15.



Εικόνα 2.16: Γραφική παράσταση της παρατηρούμενης πειραματικής διεύρυνσης $\ln(\xi_+/\xi_-)$ συναρτήσει του παράγοντα διεύρυνσης σ_s για διάφορες τιμές του κλάσματος f_w . (Από την αναφορά [8]).

Εικόνα 2.17: Γραφική παράσταση του κλάσματος f_D συναρτήσει του παράγοντα διεύρυνσης σ_s . (Από την αναφορά [8])

Σημειώνεται ότι ο παράγοντας f_D ορίζεται ως ο λόγος:

$$f_D \equiv \frac{\left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{max}}{D_{it}qA} \quad (2.15)$$

Σύμφωνα με την ανωτέρω προσέγγιση ο προσδιορισμός του f_D αποτελεί κομβικό σημείο για τον ασφαλή προσδιορισμό της πυκνότητας των διεπιφανειακών παγίδων.

(γ) Ενεργειακή κατανομή των διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα.

Ο προσδιορισμός της θέσης των παγίδων στο ενεργειακό χάσμα γίνεται με την βοήθεια της ημιστατικής C-V_G χαρακτηριστικής όπως έχει ήδη αναφερθεί. Στην περίπτωση όμως που η ημιστατική η C-V_G χαρακτηριστική δεν είναι δυνατόν να καταγραφεί όπως στην περίπτωση των λεπτών οξειδίων ή στην περίπτωση μικρής διαρροής ρεύματος διαμέσου του διηλεκτρικού τότε

είναι δυνατή η χρήση της παρακάτω προσεγγιστικής μεθόδου. Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στο γεγονός η χαρακτηριστικός χρόνος με τον οποίο ένας φορέας παγιδεύεται από μία παγίδα ενεργειακού βάθους E_T προσδιορίζεται από την στατιστική Fermi-Dirac και δίνεται από την σχέση:

$$\tau = \frac{\Delta E/kT}{\sigma v_{th} N_B} \quad (2.16)$$

όπου,

- ΔE : ενεργειακή απόσταση από την αντίστοιχη ζώνη πλειονότητας
- σ : ενεργή διατομή σύλληψης
- N_B : ενεργός πυκνότητα καταστάσεων της αντίστοιχης ζώνης

Από αυτόν τον χαρακτηριστικό χρόνο τ μπορεί να εξαχθεί η χαρακτηριστική συχνότητα απόκρισης σύμφωνα με την σχέση:

$$f = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (2.17)$$

Επομένως η κορυφή των απωλειών G_p/ω αντιστοιχεί σε μία συχνότητα που συνδέεται με την ενέργεια της παγίδας σύμφωνα με την εξίσωση (για p-τύπου ημιαγωγό):

$$E_T - E_V = \ln\left(\frac{\sigma v_{th} N_V}{2\pi f}\right) kT \quad (2.18)$$

όπου,

- E_T : η ενέργεια της παγίδας
- E_V : το άνω όριο της ζώνης σθένους
- N_V : η ενεργός πυκνότητα καταστάσεων στη ζώνη σθένους
- k : η σταθερά Boltzmann
- v_{th} : η θερμική ταχύτητα φορέων (για p-type υπόστρωμα οι φορείς είναι οπές)
- f : η συχνότητα που αντιστοιχεί στο $\left(\frac{G_p}{\omega}\right)_{max}$ στη χαρακτηριστική καμπύλη $G_p/\omega = f(F)$
- σ : η ενεργός διατομή σύλληψης – εκπομπής φορέα από την παγίδα.
- T : η απόλυτη θερμοκρασία στην οποία πραγματοποιείται η μέτρηση

Οι ποσότητες v_{th} και N_V υπολογίζονται αντίστοιχα μέσω των εξισώσεων (2.19) & (2.20).

$$\frac{1}{2} m^*_h v_{th}^2 = \frac{3}{2} kT \quad (2.19)$$

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m^*_h kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.20)$$

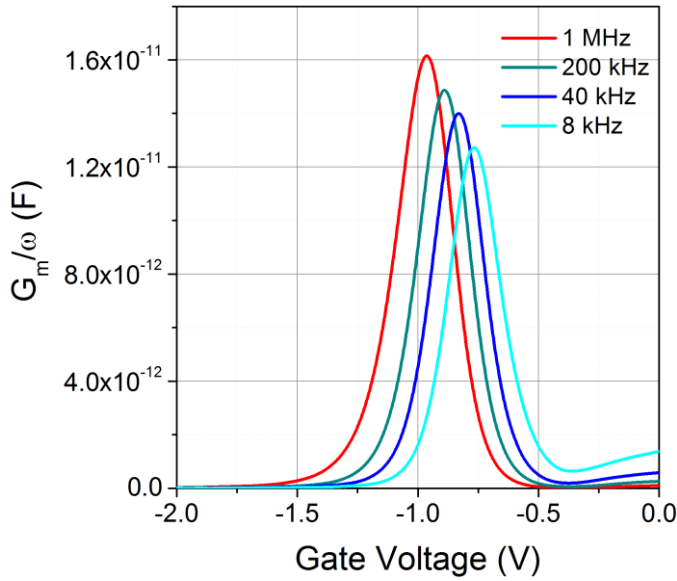
όπου m^*_h η ενεργός μάζα των οπών και h η σταθερά του Planck.

Σε κάθε θερμοκρασία μέτρησης «σαρώνεται» και μια περιοχή του ενεργειακού χάσματος του ημιαγωγού. Όσο χαμηλότερη είναι η θερμοκρασία μέτρησης, και προκειμένου για ημιαγωγό τύπου p τόσο πιο κοντά στην στάθμη E_v βρισκόμαστε. Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται πλησιάζουμε προς το μέσο του ενεργειακού χάσματος. Κατοπτρική είναι η κατάσταση για ημιαγωγό τύπου n (σε χαμηλές θερμοκρασίες βρισκόμαστε κοντά στο κάτω όριο της ζώνης αγωγιμότητας E_c), και οι σχέσεις (2.19) - (2.20) τροποποιούνται ανάλογα.

Κατά συνέπεια για την εξαγωγή της κατανομής της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων κατά μήκος του ενεργειακού χάσματος απαιτείται η μέθοδος της αγωγιμότητας να εφαρμοστεί σε ένα μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, που συνήθως κυμαίνεται από 80 έως 300 K.

2.3.5 Υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων - η μέθοδος της αγωγιμότητας συναρτήσει της τάσης.

Η μέθοδος της αγωγιμότητας συναρτήσει της συχνότητας παρουσιάζει ως προς το κάτω όριο ανίχνευσής της ισχυρούς περιορισμούς εξαρτώμενους από την διακριτική ικανότητα του οργάνου με την οποία πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Εάν τα επίπεδα διεπιφανειακών παγίδων είναι ιδιαίτερα χαμηλά δεν παρουσιάζονται ευδιάκριτα μέγιστα στις καμπύλες $G_p/\omega=f(f)$ και οι αντίστοιχοι υπολογισμοί είναι αδύνατοι. Εναλλακτικά μπορεί να εφαρμοστεί η μέθοδος της αγωγιμότητας συναρτήσει της τάσης V_G με παράμετρο τη συχνότητα της υπερτιθέμενης εναλλασσόμενης τάσης. Πράγματι, στην περίπτωση που πραγματοποιείται μέτρηση απωλειών συναρτήσει της συχνότητας ο πυκνωτής πολώνεται σε μία συγκεκριμένη κατάσταση στην περιοχή απογύμνωσης όπου το ac σήμα προκαλεί μικρή διαταραχή της κάμψης των ζωνών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα κατειλημμένες διεπιφανειακές παγίδες να ανεβαίνουν πιο ψηλά από την στάθμη Fermi κατά την διάρκεια της μισής ημιπεριόδου του σήματος και να κατεβαίνουν κατά την διάρκεια της άλλης μισής. Επομένως στην πρώτη περίπτωση προκαλείται εκπομπή φορέων από τις παγίδες και στην δεύτερη περίπτωση σύλληψη φορέων από την ζώνη φορέων πλειονότητας. Η σταθερή τάση όμως προσδιορίζει ότι μόνο ένα μικρό τμήμα του ενεργειακού χάσματος μπορεί να ανιχνευθεί. Στην περίπτωση μέτρησης των απωλειών συναρτήσει της τάσης όλες οι παγίδες στο χάσμα συνεισφέρουν στις απώλειες με αποτέλεσμα την καταγραφή μεγαλύτερου σήματος αγωγιμότητας στην δεύτερη περίπτωση. Χαρακτηριστικά αποτελέσματά της φαίνονται στην **Εικόνα 2.18**.



Εικόνα 2.18: Χαρακτηριστικές κορυφές απωλειών συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης με παράμετρο την συχνότητα της ac τάσης σε δομή MOS-Al/SiO₂-p-Si, που έχουν ληφθεί σε θερμοκρασία δωματίου.

Η πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων υπολογίζεται τώρα για κάθε συχνότητα με βάση την έκφραση (9):

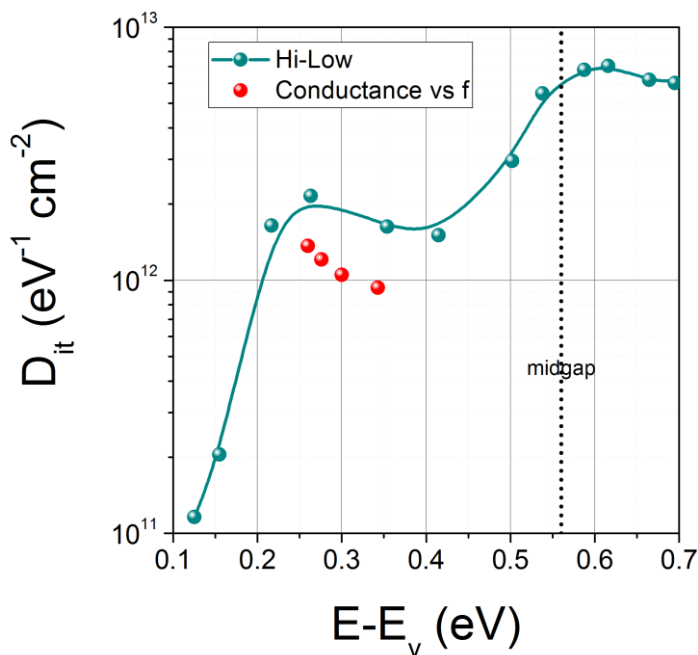
$$D_{it} = \frac{1}{qAf_D \left(\frac{C_{ox} - C_p}{C_{ox}} \right)^2 \left(\frac{G_p}{\omega} \right)_{max}} \quad (2.21)$$

όπου,

- $(G_p/\omega)_{max}$: το μέγιστο κάθε καμπύλης $G_p/\omega=f(V_G)$ για κάθε συχνότητα της AC τάσης στην περιοχή απογύμνωσης – ασθενούς αναστροφής
- q : το φορτίο του ηλεκτρονίου
- A : η επιφάνεια του πυκνωτή
- C_{ox} : η μέγιστη χωρητικότητα της δομής MOS
- C_p : η χωρητικότητα που αντιστοιχεί στην τάση που εμφανίζεται το αντίστοιχο μέγιστο της καμπύλης για κάθε συχνότητα, όπως αυτές προκύπτουν από την δέσμη των καμπυλών C-V_G στην περιοχή της συσσώρευσης.

Η παράμετρος f_D προσδιορίζεται πάλι με βάση τα Σχήματα 2.16-2.17, θεωρώντας γκαουσιανές τις καμπύλες $G_p/\omega = f(V_G)$.

Κλείνοντας την παρουσίαση των μεθόδων του ηλεκτρικού χαρακτηρισμού στην **Εικόνα 2.19** πραγματοποιείται μία σύγκριση των αποτελεσμάτων των μεθόδων εύρεσης της πυκνότητας των διεπιφανειακών καταστάσεων συναρτήσει της θέσης τους στο ενεργειακό χάσμα. Η σύγκριση αφορά την μέθοδο των διαφορών χωρητικότητας ανάμεσα σε C-V_G υψηλής συχνότητας και ημιστατικής και στην μέθοδο αγωγιμότητας συναρτήσει συχνότητας. Η δεύτερη μέθοδος είναι σε θέση να σαρώσει ένα μικρό τμήμα του ενεργειακού χάσματος που στην περίπτωση μας είναι της τάξης του 0.1 eV. Η πρώτη μέθοδος δίνει τιμές σε όλο σχεδόν το ενεργειακό χάσμα αλλά η αξιοπιστία της περιορίζεται στην περίπτωση αυτή από τα 0.2 έως τα 0.65 eV. Τέλος η μέθοδος των απωλειών δίνει σχετικά μικρότερες τιμές της πυκνότητας D_{it} ίσως γιατί στην περίπτωση θεωρήθηκε ως δεδομένο ότι f_D=0.4. Στο κεφάλαιο 3 θα δειχθεί ότι ο σωστός υπολογισμός του f_D αποδίδει τιμές που σχεδόν ταυτίζονται και για τις δύο μεθόδους.



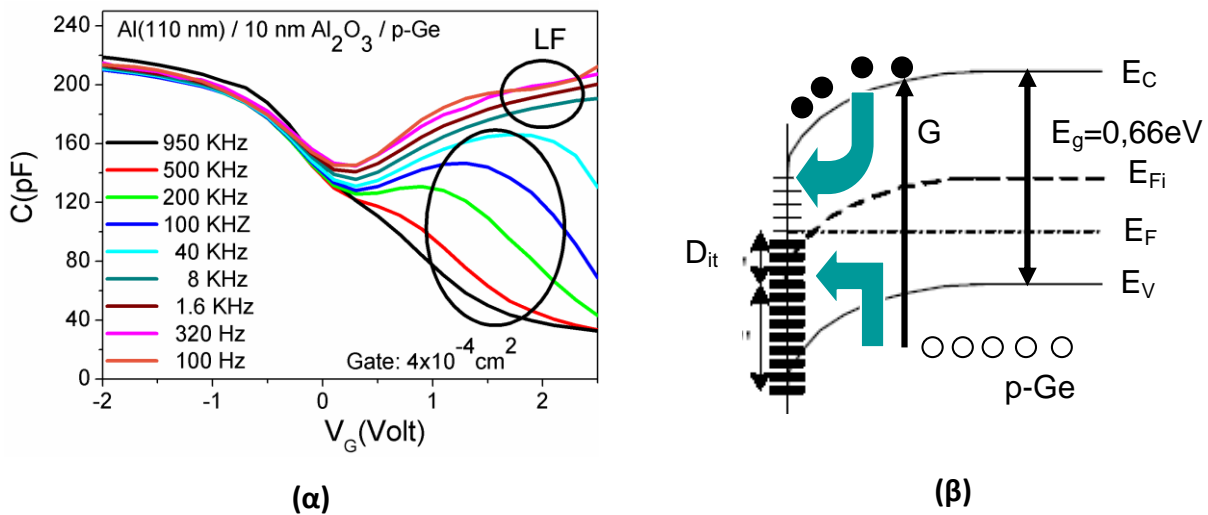
Εικόνα 2.19: Σύγκριση αποτελεσμάτων εύρεσης πυκνότητας διεπιφανειακών καταστάσεων των μεθόδων διαφορών χωρητικότητας χαρακτηριστικών C-V υψηλής συχνότητας-ημιστατικής και της μεθόδου απωλειών (αφ' αγωγιμότητας). Η θέση της ενέργειας προσδιορίσθηκε από την ημιστατική μέθοδο C-V.

2.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΜΕΘΟΔΩΝ ΣΤΟ ΓΕΡΜΑΝΙΟ

Θα πρέπει να τονιστεί πως οι παραπάνω μέθοδοι αναπτύχθηκαν και εφαρμόστηκαν για χρόνια στα πλαίσια της τεχνολογίας MOS ημιαγωγών σχετικά ευρέως ενεργειακού χάσματος όπως (κυρίως) το Si. Στην περίπτωση του Ge παρατηρούνται σημαντικές διαφορές τόσο στην μορφή των καμπύλων $C-V_G$ συναρτήσεως της συχνότητας, όσο και στα αποτελέσματα των μεθόδων εκτίμησης της πυκνότητας των διεπιφανειακών παγίδων.

Η **Εικόνα 2.20(α)** δείχνει χαρακτηριστικές καμπύλες $C-V_G$ συναρτήσεως της συχνότητας για δομή Al/Al₂O₃/p-Ge σε θερμοκρασία δωματίου (~300 K) (10). Μια σύγκριση με τις αντίστοιχες της δομής Al/SiO₂/p-Si στην ίδια θερμοκρασία, της **Εικόνας 2.6** αναδεικνύει τα εξής:

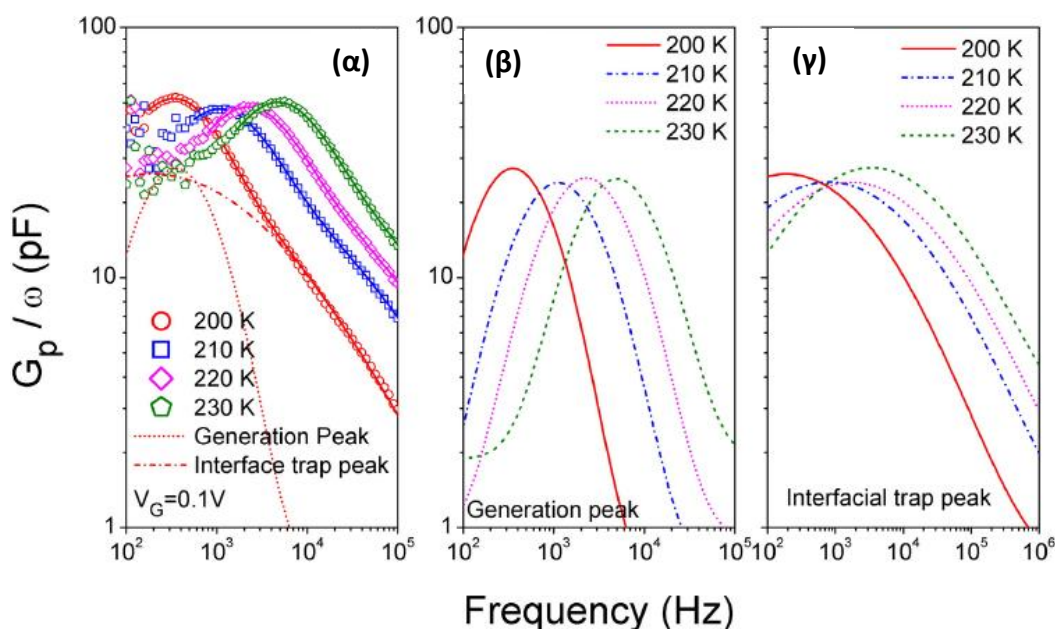
(α) Η συμπεριφορά χαμηλών συχνοτήτων στην περίπτωση του γερμανίου ξεκινά από συχνότητες πολύ υψηλότερες από τις αντίστοιχες του πυριτίου. Αυτή είναι μια γενική συμπεριφορά των δομών MOS γερμανίου ανεξάρτητα από το μέταλλο, το είδος και το πάχος του διηλεκτρικού. Το θέμα αυτό ήταν γνωστό από την δεκαετία του 1950 και τονίσθηκε εκ νέου από τους Dimoulas et al. (11) και βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τις προβλέψεις των Nicollian and Brews (4). Ο χαρακτηριστικός χρόνος σχηματισμού στρώματος αναστροφής σε έναν ημιαγωγό εξαρτάται κυρίως από το ενεργειακό χάσμα που καθορίζει τους ενεργειακούς φραγμούς και συνεπώς τον ρυθμό γέννησης φορέων μειονότητας. Επομένως, το μικρότερο ενεργειακό χάσμα του γερμανίου (0.66 eV) σε σχέση με αυτό του πυριτίου (1.12 eV) οδηγεί σε ισχυρά φαινόμενα γέννησης-επανασύνδεσης εφόσον το σύστημα αποκλίνει από την θερμική ισοροπία. Μία άλλη εκφάνση του μικρότερου ενεργειακού χάσματος είναι η ενδογενής συγκέντρωση φορέων n_i (4, 11) που στο γερμάνιο είναι τρεις τάξεις μεγέθους μεγαλύτερο από αυτό του πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου. Επομένως, ο χρόνος σχηματισμού στρώματος αναστροφής στο γερμάνιο είναι πολύ μικρότερος από τον αντίστοιχο στο πυρίτιο και η συχνότητα μετάβασης από συμπεριφορά υψηλών σε συμπεριφορά χαμηλών συχνοτήτων θα είναι μεγαλύτερη στο γερμάνιο.



Εικόνα 2.20: (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες $C-V_G$ ($\sim 300K$) δομών $Al/ Al_2O_3/Ge$ συναρτήσει της συχνότητας της υπερτιθέμενης εναλλασσόμενης τάσης (10). (β) Η αλληλεπίδραση των διεπιφανειακών παγίδων με φορείς μειονότητας (ηλεκτρόνια) και από τις δυο ζώνες (σθένους και αγωγιμότητας) οδηγεί στην εμφάνιση χαρακτηριστικών «ύβων» (humps) στις καμπύλες $C-V_G$ των δομών MOS Ge στην περιοχή απογύμνωσης/ασθενούς αναστροφής (10).

(β) Στην περίπτωση του γερμανίου, σε υψηλές συχνότητες και στην περιοχή απογύμνωσης, η διασπορά των καμπύλων συνοδεύεται και από την εμφάνιση έντονων χαρακτηριστικών «ύβων» (humps) στις καμπύλες $C-V_G$. Οι «ύβοι» αυτοί αντικατοπτρίζουν την αλληλεπίδραση των διεπιφανειακών παγίδων τόσο με φορείς πλειονότητας όσο και με φορείς μειονότητας του ημιαγωγού από τις αντίστοιχες ζώνες. Σε έναν ημιαγωγό ευρέως χάσματος όπως είναι το πυρίτιο ($E_g=1.2eV$), η φόρτιση/αποφόρτιση των διεπιφανειακών παγίδων γίνεται, όπως φαίνεται και στην **Εικόνα 2.20(β)**, μέσω της αλληλεπίδρασής τους με την ζώνη των φορέων πλειονότητας (για υπόστρωμα τύπου p με τις οπές της ζώνης σθένους). Σε αυτή τη διαδικασία οφείλεται και η παρατηρούμενη διασπορά στις καμπύλες $C-V_G$ στην περιοχή απογύμνωσης. Σε έναν ημιαγωγό μικρού χάσματος όπως το γερμάνιο ($E_g = 0.66eV$), το ρεύμα γένεσης- (εξαιτίας της απόκλισης από την συνθήκη ισορροπίας λόγω της εφαρμοζόμενης τάσης) μέσω των διεπιφανειακών παγίδων είναι ισχυρότατο σε θερμοκρασία δωματίου με αποτέλεσμα οι παγίδες να αλληλοεπιδρούν τόσο με την ζώνη σθένους όσο και με την ζώνη αγωγιμότητας. Επομένως δεν μπορεί να ικανοποιηθεί η συνθήκη της αλληλεπίδρασης μόνο με την ζώνη των φορέων πλειονότητας. Αυτό έχει σαν συνέπεια ότι το σήμα απωλειών (ac αγωγιμότητας) ακόμα και στη περιοχή της απογύμνωσης να περιέχει παρασιτικές συνεισφορές αλληλεπίδρασης με τους φορείς μειοψηφίας. Ο μηχανισμός αλληλεπίδρασης εικονίζεται στην **Εικόνα 2.20(β)**. Η αλληλεπίδραση των διεπιφανειακών παγίδων με ηλεκτρόνια και από τις δυο ζώνες οδηγεί στην εμφάνιση των έντονων «ύβων» στην περιοχή απογύμνωσης/ασθενούς αναστροφής των δομών MOS γερμανίου. Το φαινόμενο της

αλληλεπίδρασης των διεπιφανειακών με φορείς και από τις δυο ζώνες, εμπεριέχεται σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες και στις χαρακτηριστικές καμπύλες $G_p/\omega=f(f)$ και $G_p/\omega=f(V_G)$, από τις οποίες υπολογίζεται και η πυκνότητά τους ανά μονάδα επιφάνειας και ενέργειας μέσα στο χάσμα. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε υπερεκτίμηση της πυκνότητάς τους σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες, δεδομένου ότι η εξαγωγή των σχέσεων (2.1) και (2.8) στηρίχθηκε στην παραδοχή της αλληλεπίδρασής τους με φορείς της ζώνης πλειονότητας. Επομένως, ασφαλέστερα αποτελέσματα από την εφαρμογή των αντίστοιχων μεθόδων παίρνουμε κατά τη «χαρτογράφηση» του ενεργειακού χάσματος σε χαμηλές θερμοκρασίες (12), όπου δεν ευνοείται θερμική γένεση φορέων μειονότητας και δεν παρατηρούμε εμφάνιση **έντονων** «ύβων» (humps) στις καμπύλες $C-V_G$. Τα φαινόμενα αυτά γίνονται έντονα σε διατάξεις πυριτίου που λειτουργούν στην περιοχή απογύμνωσης σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 300 K. Η επίδραση της θερμικής γένεσης φορέων μειονότητας στη μορφή των χαρακτηριστικών καμπύλων $G_p/\omega=f(f)$ στην περίπτωση του γερμανίου έχει παρατηρηθεί σε θερμοκρασίες 200 K. Όπως φαίνεται στο **Εικόνα 2.21(α)** (13), εμφανίζονται διπλές κορυφές σε καθεμία από αυτές. Αποσυνέλιξη των καμπύλων οδηγεί στην ανάδειξη δυο ομάδων, η πρώτη από τις οποίες, **Εικόνα 2.21(β)**, αντικατοπτρίζει την επίδραση της θερμικής γένεσης φορέων μειονότητας, ενώ η δεύτερη, **Εικόνα 2.21(γ)**, την ζητούμενη συνεισφορά της αλληλεπίδρασης των διεπιφανειακών παγίδων με τους φορείς μειονότητας της ζώνης σθένους. Στην παρούσα εργασία οι θερμοκρασίες μέτρησης περιορίζονται στο διάστημα 80-180K.



Εικόνα 2.21: (α) Χαρακτηριστικές καμπύλες $G_p/\omega=f(f)$ (200-230K) δομών $Al/Al_2O_3/p-Ge$ για $V_G = 0.1V$. (β) Συνεισφορά του μηχανισμού θερμικής γένεσης φορέων μειονότητας (ηλεκτρονίων). (γ) Συνεισφορά του μηχανισμού αλληλεπίδρασης διεπιφανειακών παγίδων και φορέων μειονότητας (ηλεκτρονίων) της ζώνης σθένους (13).

Βιβλιογραφία

1. **Steven M. George**, Atomic Layer Deposition: An Overview, American Chemical Society (ACS), 2009.
2. **D.K.Schröder**, Semiconductor Material and Device Characterization 3rd ed., John Wiley & Sons Inc., 2006.
3. **Δ. Σκαρλάτος**, Υλικά με εφαρμογές στη Μικροηλεκτρονική, πανεπιστημιακές σημειώσεις, έκδοση Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2011.
4. **Nicollian and Brews**, MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology, John Wiley & Sons, 2003.
5. **C.N. Berglund**, "Surface States at Steam-Grown Silicon-Silicon Dioxide Interfaces," IEEE Trans. Electron Dev. **ED-13**, 701–705, Oct. 1966.
6. **P.V. Gray and D.M. Brown**, "Density of SiO₂-Si Interface States," Appl. Phys. Lett. **8**, 31–33, Jan.1966; D.M. Fleetwood, "Long-term Annealing Study of Midgap Interface-trap Charge Neutrality," Appl. Phys. Lett. **60**, 2883–2885, June 1992.
7. **R. Castagne and A. Vapaille**, "Description of the SiO₂-Si Interface Properties by Means of Very Low Frequency MOS Capacitance Measurements," *Surf. Sci.* **28**, 157–193, Nov. 1971.
8. **Brews, J.R.**, Rapid Interface Parameterization Using a Single MOS Conductance Curve, Solid State Electronics, **26(8)**, p.711, 1982.
9. **M. Passlack, M. Hong, J. P.Mannaerts, R. L. Opila, S. N. G. Chu, N. Moriya, F. Ren, and J. R. Kwo**, IEEE Trans. Electron Devices, **44**, p.214, 1997.
10. «Ηλεκτρικές ιδιότητες δομών MOS Al/Al₂O₃/p-Ge με διηλεκτρικό που εναποτέθηκε με τη μέθοδο ALD : Μελέτη συναρτήσεως του πάχους του διηλεκτρικού και της ανόπτησης σε περιβάλλον forming gas», Διπλωματική Εργασία **Ασημίνας Καραγεωργίου**, Τμήμα Φυσικής Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα 2013 (Επιβλέπων : Δ. Σκαρλάτος).
11. **A.Dimoulas, G.Vellianitis, G.Mavrou, E.K.Evangelou and A.Sotiropoulos**, Appl. Phys. Lett. 86, artno 223507, 2005.

12. **Martens, C.O.C, G. Brammertz, B.Jaeger, D. KUzum, M.M. Heyns, T.Krishnamohan, K. Saraswat, H. Maes and G. Groeseneken**, On the Correct Extraction of The Intreface Trap Density of MOS Devices With High-Mobility Semiconductor Substrates, IEEE Transactions on Electron Devices, pp. 547-554, 2008.
13. **V. Ioannou-Sougleridis, A. Karageorgiou, M. Barlas, S. Ladas, D. Skarlatos**, Microel. Engineering, Vol.159, pp. 84–89, 2016.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΜΩΝ.

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας κατασκευάστηκαν και μελετήθηκαν, συνολικά έξι δομές MOS. Τέσσερα δείγματα με υπόστρωμα πυριτίου και δύο δείγματα με υπόστρωμα γερμανίου, τα χαρακτηριστικά των οποίων και οι συνθήκες κατασκευής αναλύονται στις επόμενες ενότητες.

3.1.1 Δείγματα με υπόστρωμα πυριτίου

Αρχικά κατασκευάστηκαν τέσσερα δείγματα με υπόστρωμα n-type Si και τα εξής δομικά χαρακτηριστικά:

	Μέθοδος οξείδωσης	Ονομαστικό Πάχος (SiO ₂)	Νιτρίδιο(Si ₃ N ₄)	Επιπρόσθετη διεργασία
Δείγμα 1	Ξηρή	3 nm	-	-
Δείγμα 2	Ξηρή	3 nm	4.2 nm	-
Δείγμα 3	Ξηρή	3 nm	6.5 nm	-
Δείγμα 4	Ξηρή	3 nm	6.5 nm	Υγρή οξείδωση 750 οC 15 min

1. Al/SiO₂/n-Si με πάχος οξειδίου 3 nm το οποίο αναπτύχθηκε σε συνθήκες ξηρής οξείδωσης.
2. Al/SiO₂(Si₃N₄)/n-Si στο οποίο έγινε ανάπτυξη οξειδίου πάχους 3 nm σε συνθήκες ξηρής οξείδωσης και έπειτα εναπόθεση επιπλέον νιτρίδιου (Si₃N₄) πάχους 4.2 nm με τη μέθοδο LPCVD ενώ μετά την επιμετάλλωση της δομής το δείγμα δεν υπέστη ανόπτηση.
3. Al/SiO₂(+Si₃N₄)/n-Si στο οποίο έγινε ανάπτυξη οξειδίου πάχους 3 nm σε συνθήκες ξηρής οξείδωσης και έπειτα εναπόθεση επιπλέον νιτρίδιου (Si₃N₄) πάχους 6.5 nm με τη μέθοδο LPCVD ενώ μετά την επιμετάλλωση της δομής το δείγμα δεν υπέστη ανόπτηση.
4. Al/SiO₂(+Si₃N₄)/n-Si στο οποίο έγινε ανάπτυξη οξειδίου πάχους 3 nm σε συνθήκες υγρής οξείδωσης (750°C, 15min) και έπειτα εναπόθεση επιπλέον νιτρίδιου (Si₃N₄) πάχους 6.5 nm με τη μέθοδο LPCVD ενώ μετά την επιμετάλλωση της δομής το δείγμα δεν υπέστη ανόπτηση.

Συνθήκες κατασκευής δειγμάτων

Βάση πρωτόκολλου, πριν από την οξείδωση του n-type Si υποστρώματος προηγείται καθαρισμός αυτού, ώστε να απομακρυνθούν από την επιφάνεια διάφοροι ρύποι που μπορούν να υποβαθμίσουν τα χαρακτηριστικά του πυκνωτή. Ο καθαρισμός γίνεται βάση της μεθόδου «*HF last*» κατά το οποίο το δισκίδιο εμβαπτίζεται σε 4 διαφορετικά διαλύματα για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα :

- **1^ο διάλυμα:** H₂O₂ : H₂SO₄ σε αναλογία 1:1 για t=15min
Έκπλυση δισκιδίων με απιονισμένο νερό
- **2^ο διάλυμα:** H₂O : HF σε αναλογία 100:2 για t=20sec

Έκπλυση δισκιδίων με απιονισμένο νερό

- **3 διάλυμα:** H_2O_2 : H_2SO_4 σε αναλογία 1:4 για $t=10\text{min}$

Έκπλυση δισκιδίων με απιονισμένο νερό

- **4^ο διάλυμα:** H_2O : HF : PROPANOL σε αναλογία 1000:5:1 για $t=2\text{min}$ & 30sec

Έκπλυση δισκιδίων με απιονισμένο νερό

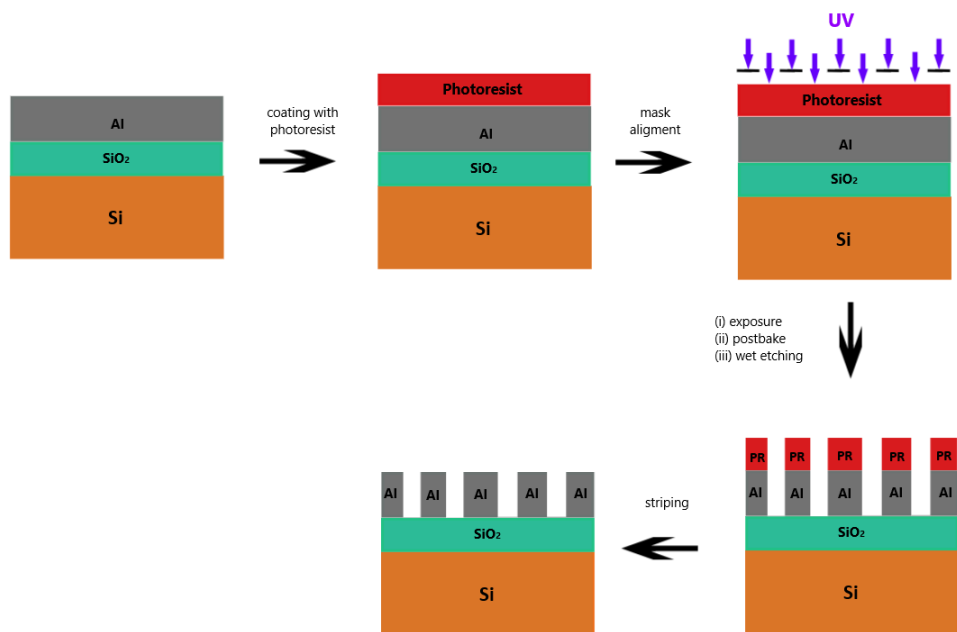
Για την ανάπτυξη του διηλεκτρικού SiO_2 στα τρία δείγματα ακολούθησε ξηρή οξείδωση του υποστρώματος σε περιβάλλον O_2 σε θερμοκρασία $850\text{ }^\circ\text{C}$ για $t = 6\text{min}$, η οποία είχε στόχο την δημιουργία οξειδίου πάχους 3 nm

Για τα δείγματα τα οποία έχουν επιπλέον νιτρίδιο στο οξείδιο μετά την ξηρή οξείδωση έγινε εναπόθεση 4.2nm και 6.5 nm Si_3N_4 με την τεχνική LPCVD στους $800\text{ }^\circ\text{C}$. Το συνολικό πάχος των διηλεκτρικών ανέρχεται στα 7 nm και 9.5 αντίστοιχα.

Στο τέλος γίνεται η εναπόθεση του μετάλλου πύλης Al με τη μέθοδο εξάχνωσης ηλεκτρονικής δέσμης (E-Gun Evaporation)

Έπειτα ακολουθεί η εγχάραξη της δομής με τη χρήση λιθογραφίας θετικού τόνου και υγρής εγχάραξης **Εικόνα 3.1**. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

1. Επίστρωση φωτοευαίσθητης ρητίνης μέσω "επίστρωσης με περιστροφή" (spin coating) σε υπόστρωμα πυριτίου
2. Θέρμανση του δείγματος μαζί με την ρητίνη
3. Εφαρμογή μάσκας οπτικής λιθογραφίας και έκθεση του δείγματος σε υπεριώδη ακτινοβολία
4. Εγχάραξη των δομών με τη μέθοδο της υγρής εγχάραξης. Οι περιοχές οι οποίες δεν εκτέθηκαν στην υπεριώδη ακτινοβολία αποτελούν το προστατευτικό στρώμα του μετάλλου.
5. Αφαίρεση της φωτοευαίσθητης ρητίνης που εκτέθηκε στην υπεριώδη ακτινοβολία.



Εικόνα 3.1: Βήματα κατασκευής των πυκνωτών MOS για τις δομές Al/SiO₂/Si με τη μέθοδο λιθογραφίας θετικού τόνου και υγρής εγχάραξης.

3.1.2 Δείγματα με υπόστρωμα γερμανίου

Κατασκευάστηκαν 2 δείγματα με υπόστρωμα γερμανίου ένα n-type και ένα p-type.

Συνθήκες κατασκευής δειγμάτων

Λόγω του αυτοαναπτυσόμενου οξειδίου (native oxide) στην επιφάνεια του γερμανίου, από την έκθεσή του σε συνθήκες περιβάλλοντος, καθίσταται απαραίτητος ο καθαρισμός της επιφάνειάς του πριν από την εναπόθεση του οξειδίου του αλουμινίου. Ο καθαρισμός είναι μια ακολουθία 2 βημάτων, η οποία επαναλαμβάνεται 5 συνεχόμενες φορές αμέσως πριν την εναπόθεση. Αρχικά εμβαπτίζουμε τα υποστρώματα γερμανίου σε διάλυμα HF (2%) για χρόνο 15 sec και έπειτα σε απιονισμένο νερό καθαρότητας 18 MΩ για 20 sec.

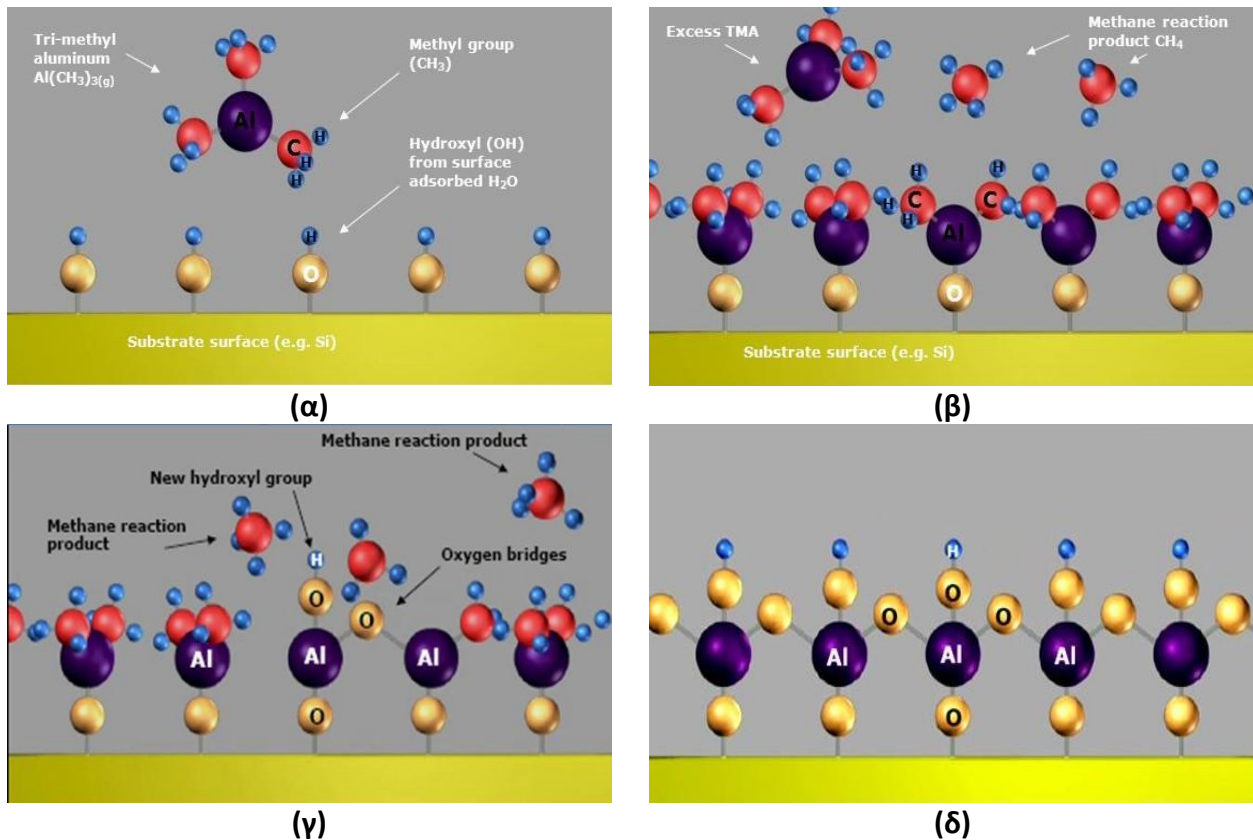
Για την ανάπτυξη του οξειδίου, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος εναπόθεσης ALD όπως παρουσιάστηκε περιληπτικά στο Κεφάλαιο 2, με τις φυσικοχημικές διεργασίες να λαμβάνουν χώρα στο θάλαμο αντιδράσεων σε κύκλους εναπόθεσης των τεσσάρων βημάτων. Για την εναπόθεση του Al₂O₃ πάχους 5nm χρησιμοποιήθηκε H₂O ως οξειδωτικό μέσο παράλληλα με την πρόδρομη ένωση TriMethylAluminum (TMA), Al(CH₃)₃ σε θερμοκρασία 300 °C με αριθμό 50 κύκλων εναπόθεσης. Η διαδικασία εικονίζεται στην **Εικόνα 3.1**. Τα βήματα της διαδικασίας είναι τα εξής:

Βήμα 1^ο: Μετά την σταθεροποίηση της θερμοκρασίας στο θάλαμο αντιδράσεων, απελευθερώνεται ένας παλμός υδρατμών για 0.015 sec, που αντιδρά με την επιφάνεια του γερμανίου αφήνοντας ελεύθερες ρίζες υδροξυλίου (OH) ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνειά των δειγμάτων.

Βήμα 2°: Στο θάλαμο διοχετεύεται N_2 υψηλής καθαρότητας για χρόνο 3sec ώστε να καθαριστεί από τυχόν πλεονάζοντες υδρατμούς.

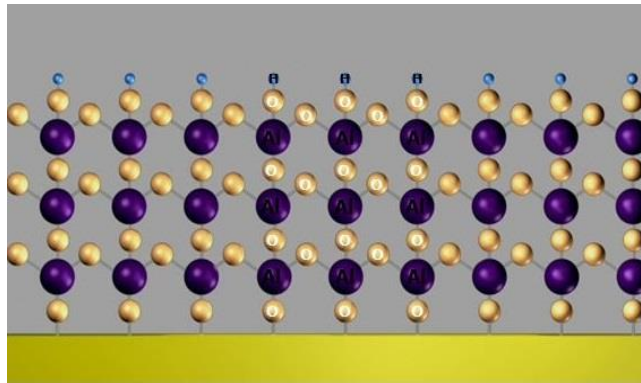
Βήμα 3°: Έπειτα ακολουθεί ένας παλμός TMA για 0.015sec με αποτέλεσμα να αντιδρά με τις σχηματισμένες ρίζες υδροξυλίου της επιφάνειας δημιουργώντας δεσμούς O – Al αλλά και δίνοντας ως παραπροϊόν της αντίδρασης μεθάνιο CH_4 .

Βήμα 4°: Επαναλαμβάνεται το 2° βήμα για τον καθαρισμό του θαλάμου από περίσσεια TMA αλλά και από τα παραπροϊόντα της αντίδρασης.



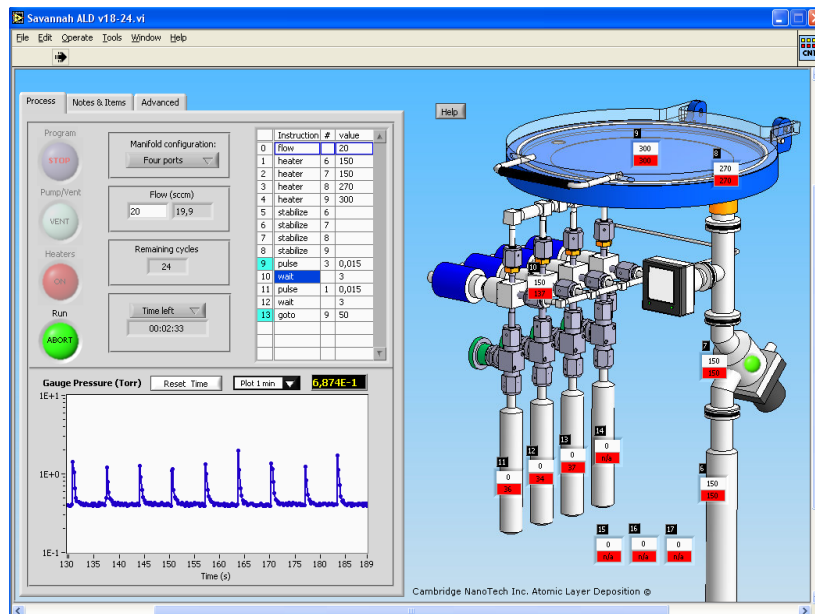
Εικόνα 3.2: Ανάπτυξη ενός στρώματος Αλουμίνας σε ατομικό επίπεδο. **(α)** Νέος παλμός υδρατμών **(β)** Απομάκρυνση παραπροϊόντων. Στο **(γ)** απεικονίζεται η εισαγωγή της πρόδρομης ένωσης TMA πριν αντιδράσει με τις ρίζες υδροξυλίου ενώ στο **(δ)** αντίδραση υδροξυλίου με πρόδρομη ένωση TMA.

Με την ολοκλήρωση του πρώτου κύκλου ουσιαστικά δημιουργείται ένα ατομικό στρώμα Al_2O_3 . Ο μέσος χρόνος εναπόθεσης σε αυτή τη θερμοκρασία και με τη συγκεκριμένη ακολουθία βημάτων είναι 1 \AA / κύκλο εναπόθεσης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως το τελικό επιθυμητό πάχος, όπως εικονίζεται στην **Εικόνα 3.3**.



Εικόνα 3.3: Τελικό προϊόν της εναπόθεσης οξειδίου Al_2O_3 σε υπόστρωμα Ge με την τεχνική εναπόθεσης ALD.

Στην **Εικόνα 3.4** παρατίθεται ένα στιγμιότυπο από την εναπόθεση 5 nm Al_2O_3 στους 300 °C μέσω της τεχνικής ALD, όπως καταγράφεται στην οθόνη του υπολογιστή που ελέγχει το σύστημα ALD Savannah-100 Cambridge-Nanotech/USA του Τμήμα Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών, **Εικόνα 3.5**, όπου και πραγματοποιήθηκε η εναπόθεση του οξειδίου του αλουμινίου στα δείγματα του πειράματος.



Εικόνα 3.4 : Η διαδικασία εναπόθεσης 5nm Al_2O_3 στους 300 °C με το σύστημα ALD Savannah-100 της Cambridge-Nanotech/USA, χρησιμοποιώντας ως πρόδρομο μόριο TMA και ως οξειδωτικό H_2O . Διακρίνεται η εναλλαγή παλμών των δυο αντιδρώντων.



(α)



(β)

Εικόνα 3.5: (α) Το Εργαστήριο ALD του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Πατρών (β) Το σύστημα ALD Savannah-100 της Cambridge-Nanotech/USA.

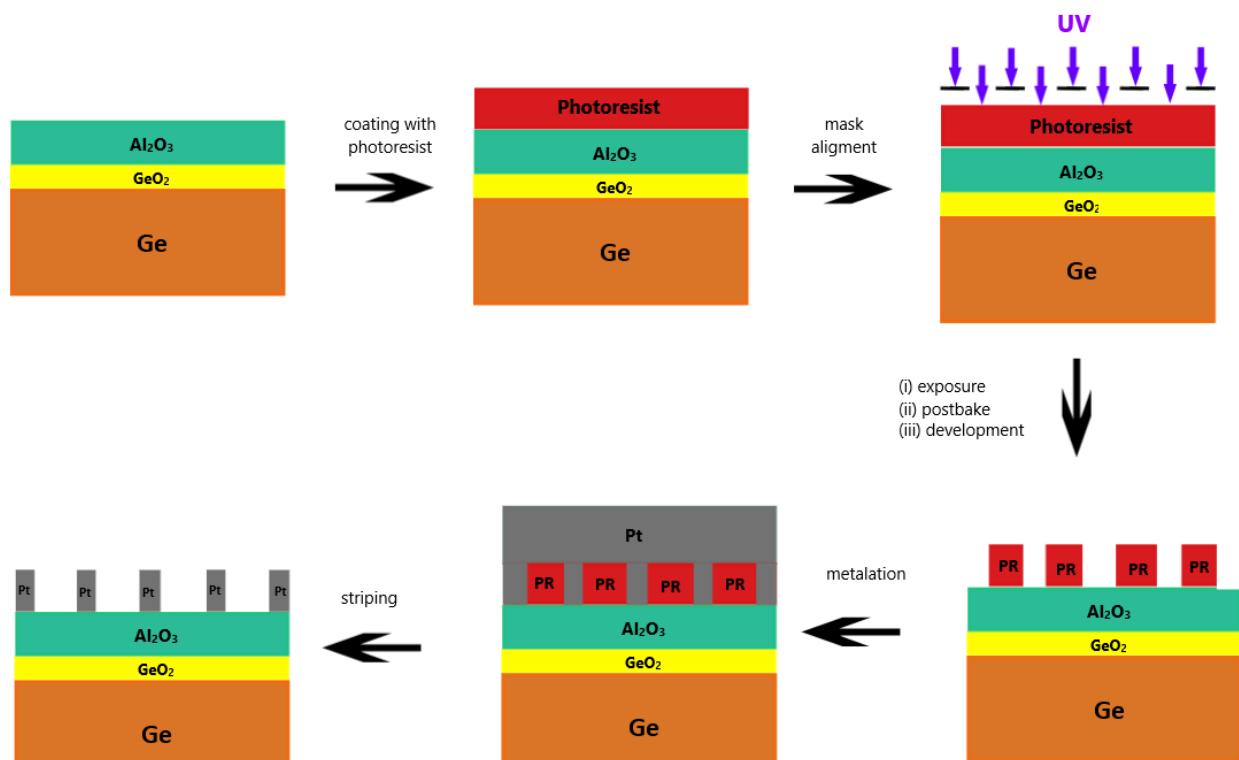
Για την ανάπτυξη του διεπιφανειακού, αδρανοποιητικού στρώματος GeO_2 μεταξύ του Ge και του Al_2O_3 , ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία:

1. Εναπόθεση του διηλεκτρικού Al_2O_3 πάχους $\sim 1\text{nm}$ στο υπόστρωμα Ge με τη μέθοδο ALD
2. Οξείδωση του Ge με τη μέθοδο οξείδωσης πλάσματος για τη δημιουργία του GeO_2 μεταξύ του Ge και του Al_2O_3 πάχους $\sim 1\text{nm}$. Η οξείδωση πλάσματος πραγματοποιήθηκε σε αντιδραστήρα Alcatel κατάλληλο για διεργασίες υψηλής πυκνότητας επαγωγικού πλάσματος σε συνθήκες 1900 W για 10 min σε πίεση 0.75 Pa.
3. Εναπόθεση ακόμα 4nm διηλεκτρικού Al_2O_3 με τη μέθοδο ALD

Το συνολικό πάχος των προς διερεύνηση δειγμάτων εκτιμάται σε $\sim 6\text{ nm}$.

Για την κατασκευή των δομών MOS έγινε χρήση της μεθόδου lift off η διαδικασία της οποίας φαίνεται στην **Εικόνα 3.6**. Τα βήματα που ακολουθήθηκαν είναι τα εξής:

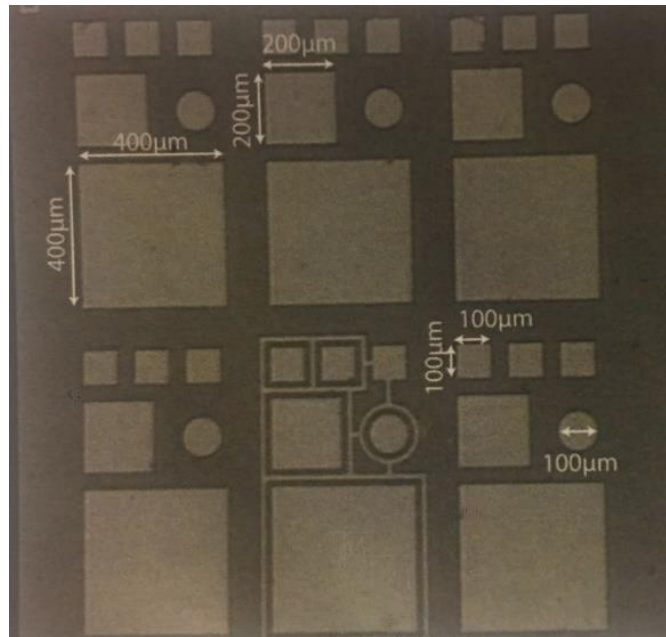
1. Επίστρωση φωτοευαίσθητης ρητίνης μέσω “επίστρωσης με περιστροφή” (spin coating) σε υπόστρωμα πυριτίου
2. Θέρμανση του δείγματος μαζί με την ρητίνη
3. Εφαρμογή μάσκας οπτικής λιθογραφίας και έκθεση του δείγματος σε υπεριώδη ακτινοβολία
4. Εμφάνιση των δομών. Οι περιοχές οι οποίες εκτέθηκαν στην υπεριώδη ακτινοβολία αποτελούν το προστατευτικό στρώμα του διηλεκτρικού.
5. Εναπόθεση Pt στην δομή με την τεχνική της ιοντοβολής (Sputtering)
6. Απομάκρυνση της ρητίνης και του επιπλέον στρώματος Pt



Εικόνα 3.6: Βήματα δημιουργίας των πυκνωτών MOS για τις δομές Pt/Al₂O₃/Ge με τη χρήση της μέθοδο lift off. Η εναπόθεση του Pt έγινε με τη μέθοδο της ιοντοβολής (Sputtering).

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός των δειγμάτων πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μετρήσεων του Ινστιτούτου Νανοεπιστήμης και Νανοτεχνολογίας (INN) του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. « ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ ». Οι δομές MOS που μετρήθηκαν φαίνονται στην **Εικόνα 3.7**. Τα δείγματα μετρήθηκαν συναρτήσει της θερμοκρασίας σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος (300 K) και κατόπιν σε ένα φάσμα χαμηλών θερμοκρασιών (78-200) K



Εικόνα 3.7: Κάτοψη πυκνωτών MOS διαφόρων διαστάσεων στα δείγματα της παρούσας εργασίας. Οι διαστάσεις των πυκνωτών επισημαίνονται στην εικόνα.

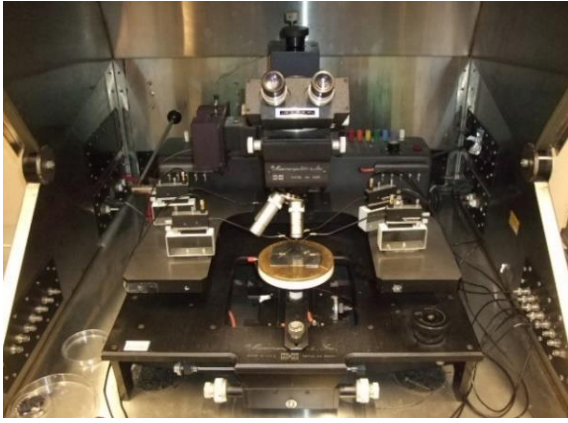
Η πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις σε θερμοκρασία περιβάλλοντος περιλαμβάνει :

- 1) Διάταξη λήψης μετρήσεων (probe station). Τον κλωβό θωράκισης με το σύστημα σκόπευσης του δείγματος και τις ακίδες μέτρησης **Εικόνα 3.8(α)**
- 2) Γέφυρα μετρήσεων (impedance bridge) για τις χαρακτηριστικές C- V_G και C-f, HP 4284A LCR METER **Εικόνα 3.8(β)**
- 3) Όργανα μετρήσεις χαμηλών ρευμάτων (picoammeter) για τις χαρακτηριστικές I- V_G , HP 4155A SEMICONDUCTOR PARAMETER ANALYZER **Σχήμα 3.8(γ)**
- 4) Η/Υ για τον έλεγχο των οργάνων μετρήσεις με τη χρήση λογισμικού **Εικόνα 3.8(ε)**

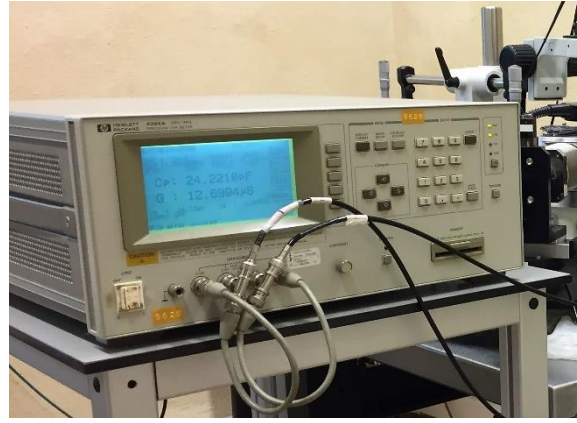
Η πειραματική διάταξη για τις μετρήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες περιλαμβάνει:

- 1) Έναν κρυοστάτη Janis ST-500 για την επίτευξη χαμηλών θερμοκρασιών συνδεδεμένο με ένα δοχείο υγρού αζώτου **Εικόνα 3.8(δ)**
- 2) Έναν θερμοστάτη για τη ρύθμιση της θερμοκρασίας
- 3) Έναν βραχίονα στόχευσης με μία κάμερα και μια συσκευή φωτισμού
- 4) Όργανα μέτρησης για την λήψη των μετρήσεων C-V_G και C-f, HP 4284A LCR METER **Εικόνα 3.8(β)**
- 5) Η/Υ για τον έλεγχο των οργάνων μέτρησης με χρήση λογισμικού **Εικόνα 3.8(ε)**

Για τη μέτρηση των δομών MOS σε χαμηλές θερμοκρασίες τα δείγματα τοποθετήθηκαν εντός του κρυοστάτη. Ο θάλαμος του κρυοστάτη ψυχραίνεται μέσω της εισροής σε αυτόν, υγρού αζώτου, ενώ η παρακολούθηση και ρύθμιση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται μέσω δύο αισθητήρων, εντός του θαλάμου, που είναι συνδεδεμένοι με έναν θερμοστάτη. Η στόχευση των δομών MOS πραγματοποιείται με τη χρήση ενός μηχανικού βραχίονα που φέρει κάμερα. Ως πάνω και κάτω ηλεκτρόδια των δομών χρησιμοποιούνται ειδικές ακίδες (tips) οι οποίες, μέσω ειδικού μηχανισμού καθίστανται δυνατές να εκτελέσουν μικρομετρικές κινήσεις στις τρεις διαστάσεις. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε πυκνωτές με εμβαδό (400 x 400) μm και σε συνθήκες πλήρους συσκότισης ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα φωτοδιέγερσης φορέων.



(α)



(β)



(γ)



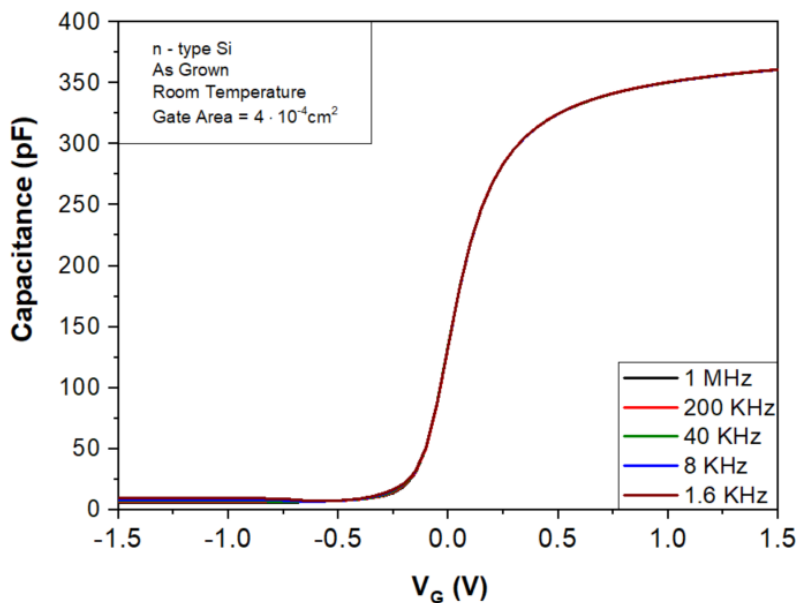
(δ)

Εικόνα 3.8: (α) Διάταξη λήψης μετρήσεων (probe station). (β) Γέφυρα μετρήσεων (impedance bridge) για τις χαρακτηριστικές $C-V_G$ και $C-f$, HP 4284A LCR METER. (γ). Κρυοστάτης Janis ST-500, με έναν βραχίονα στόχευσης με μία κάμερα και μια συσκευή φωτισμού, συνδεδεμένο με ένα δοχείο υγρού αζώτου. (δ) Η/Υ για τον έλεγχο της γέφυρας με χρήση λογισμικού.

3.3 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΩΝ ΜΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ Si

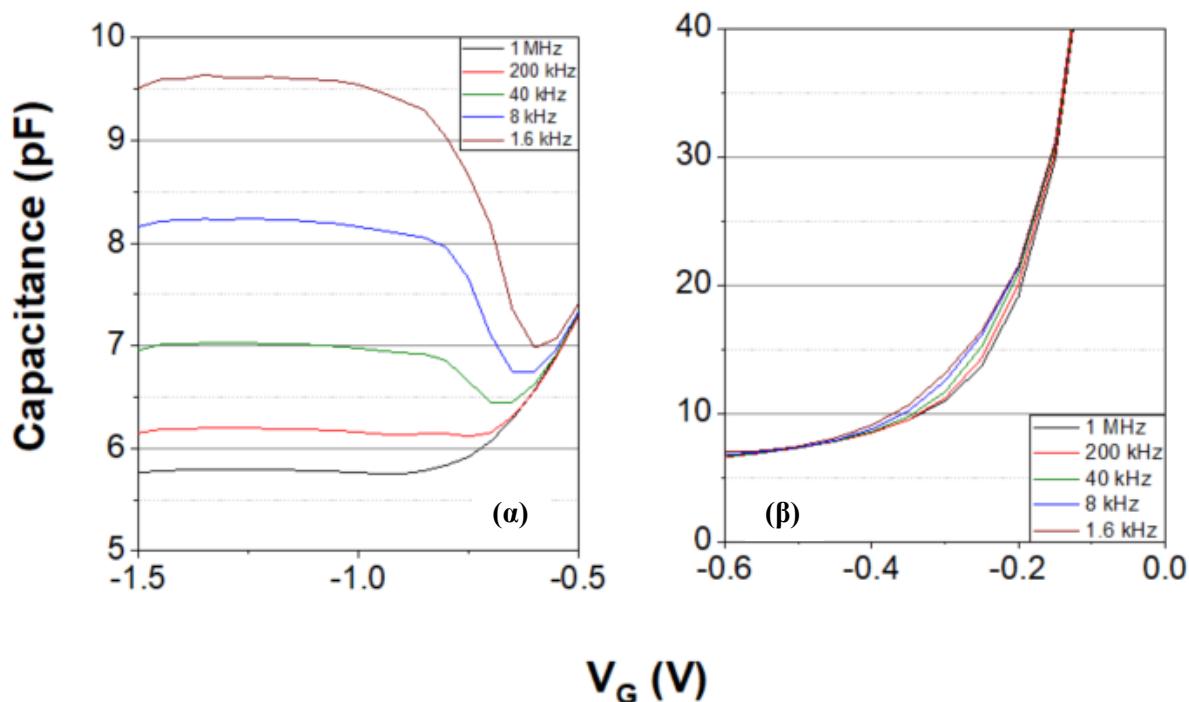
3.3.1 Δείγμα #1 Si- Al/SiO₂/n-Si Μετρήσεις οξειδίου αναφοράς σε θερμοκρασία δωματίου.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε πειραματικός έλεγχος της δομής MOS στην οποία το διηλεκτρικό αποτελείται μόνο από λεπτό οξείδιο του πυριτίου. Η θερμική οξείδωση πραγματοποιήθηκε ώστε να επιτευχθεί οξείδιο πάχους 3 nm. Αυτός ο πειραματικός έλεγχος πραγματοποιήθηκε μόνο σε θερμοκρασία δωματίου και έγινε για τον αρχικό έλεγχο της ποιότητας του οξειδίου. Πρέπει να σημειωθεί επίσης ότι το δείγμα αυτό αποτελεί τμήμα της δεύτερης σειράς των δειγμάτων που μελετήθηκαν, όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή.

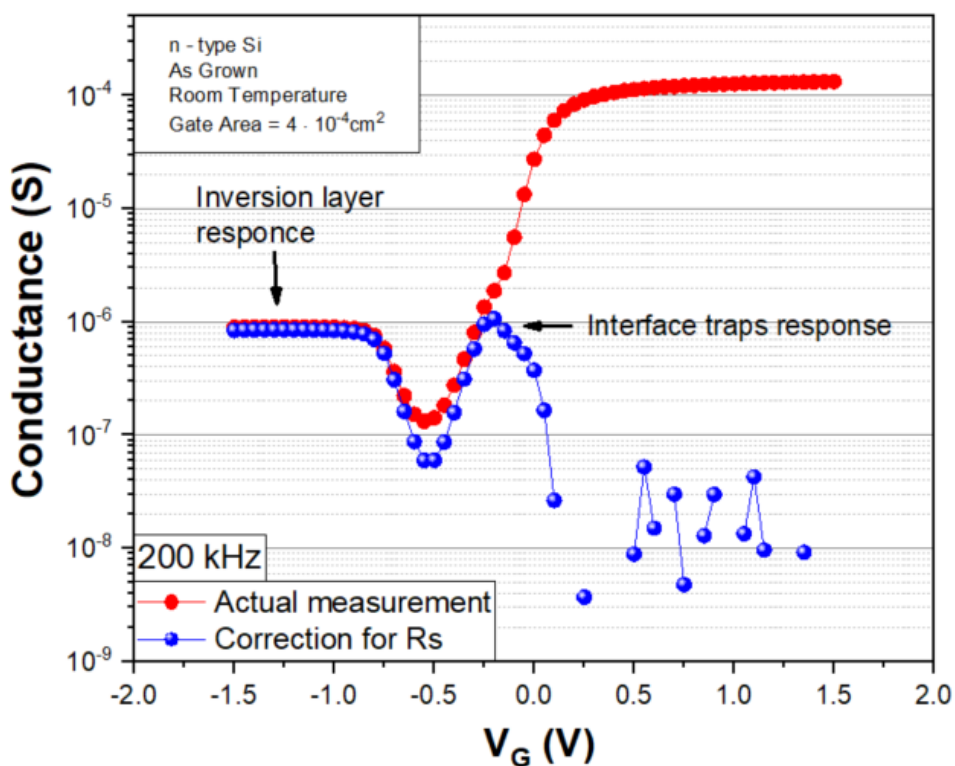


Εικόνα 3.9: Χαρακτηριστικές Χωρητικότητας τάσης ($C-V_G$) για δείγμα Al/SiO₂/n-type Si στην περιοχή συχνοτήτων 1 MHz-1.6 kHz.

Στην **Εικόνα 3.9** παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές $C-V_G$ του δείγματος που ελήφθησαν στις συχνότητες 1MHz, 200 kHz, 40 kHz, 8 kHz και 1.6 kHz. Οι χαρακτηριστικές ταυτίζονται για τιμές τάσεις μεγαλύτερες του -0.1 V, στις περιοχές δηλαδή που αρχίζει η κατάσταση επιπέδων ζωνών έως και σε αυτήν της συσσώρευσης. Στην περιοχή της αναστροφής παρατηρείται μικρή αύξηση της χωρητικότητας με την μείωση της συχνότητας γεγονός που αντιστοιχεί σε απόκριση του στρώματος αναστροφής καθώς το σήμα γίνεται πιο αργό. Πρέπει να οφείλεται στην επικοινωνία του στρώματος αναστροφής του πυκνωτή με περιοχές έξω από αυτόν που βρίσκονται σε μόνιμη κατάσταση αναστροφής **Εικόνα 3.10 (α)**, ενώ στην περιοχή της απογύμνωσης παρατηρείται μια μικρή διασπορά κάτι το οποίο καταδεικνύει τη μικρή πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων στη διεπιφάνεια SiO₂-Si **Εικόνα 3.10 (β)**.



Εικόνα 3.10: (α) Καθώς η συχνότητα του σήματος μειώνεται παρατηρείται αύξηση της χωρητικότητας του πυκνωτή στην περιοχή της αναστροφής. (β) Στη περιοχή της απογύμνωσης παρατηρείται εμφάνιση μικρής διασποράς της χωρητικότητας του πυκνωτή με την συχνότητα, γεγονός που υποδηλώνει μικρή πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων.



Εικόνα 3.11: Χαρακτηριστική $G-V_G$ με την συνεισφορά της σειριακής αντίστασης R_s και τη διόρθωση που αφαιρεί αυτή τη συνεισφορά από την περιοχή της

Πρέπει να σημειωθεί ότι η διερεύνηση των διεπιφανειακών παγίδων στο δείγμα αυτό μπορεί να γίνει μόνο από τις χαρακτηριστικές αγωγιμότητας – τάσης πύλης ($G-V_G$), γιατί είναι η μόνη μέτρηση που μπορεί να δώσει ένα αρκετά ισχυρό σήμα. Στην **Εικόνα 3.11** παρουσιάζεται η χαρακτηριστική αγωγιμότητας – τάσης πύλης ($G-V_G$) για μία συχνότητα 200 kHz. Η κόκκινη χαρακτηριστική είναι η μετρούμενη αγωγιμότητα που εμπεριέχει και την συνεισφορά της σειριακής αντίστασης R_s του δείγματος. Η σειριακή αντίσταση είναι δυνατόν να αφαιρεθεί με χρήση του κατάλληλου ισοδύναμου κυκλώματος και στην **Εικόνα 3.11** η διορθωμένη χαρακτηριστική παρουσιάζεται με μπλε σημεία. Γίνεται φανερό πως η σειριακή αντίσταση έχει ισχυρή συνεισφορά στη περιοχή απογύμνωσης και συσσώρευσης. Στην περιοχή της αναστροφής [-1.5 V, -0.75], παρατηρείτε μια σταθερή τιμή της αγωγιμότητας (8.4×10^{-7} S) λόγω της απόκρισης του στρώματος αναστροφής όπως έχει ήδη αναφερθεί. Η διορθωμένη χαρακτηριστική φανερώνει τις απώλειες που οφείλονται στην απόκριση (ανταλλαγή φορτίου με την ζώνη αγωγιμότητας των φορέων πλειονότητας) των διεπιφανειακών παγίδων μεταξύ οξειδίου και ημιαγωγού στην περιοχή της απογύμνωσης. Στο **Πίνακα 3.1** φαίνονται τα χαρακτηριστικά του δείγματος.

T (K)	V_{fb} (V)	C_{ox} (pF)	N_b (cm^{-3})	t_{ox} (nm)	Q_f	E_g (eV)	E_{fc} (eV)	Φ_b (eV)
R.T.	-0.085	385.1	1.67×10^{15}	3.57	5×10^{11}	1.125	0.256	0.35

Πίνακας 3.1: Ηλεκτρικά χαρακτηριστικά δείγματος Al/SiO₂/n-Si σε θερμοκρασία δωματίου

όπου:

- **T**: Η θερμοκρασία μέτρησης του δείγματος
- **V_{fb}** : Η τάση επίπεδων ζωνών
- **C_{ox}** : Η χωρητικότητα του διηλεκτρικού
- **N_b** : Η πυκνότητα νόθευσης
- **t_{ox}** : Το πάχος του διηλεκτρικού
- **Q_f** : Το σταθερό φορτίο στο διηλεκτρικό
- **E_g** : Το ενεργειακό χάσμα
- **E_{fc}** : Η απόσταση της στάθμης Fermi από την ζώνη αγωγιμότητας
- **Φ_b** : Είναι το δυναμικό που αντιστοιχεί στην ενεργειακή διαφορά της στάθμης Fermi τους ενδογενή ημιαγωγού και στη στάθμη Fermi του νοθευμένου ημιαγωγού. $\Phi_b = E_F - E_i$

Στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την εύρεση των τιμών του πίνακα 3.1.

- Η τάση επιπέδων ζωνών (V_{fb}) και η το επίπεδο νόθευσης του υποστρώματος (N_b) υπολογίστηκε από το γράφημα $1/C^2-V_G$ της χαρακτηριστικής C-V_G των 200 kHz. Η κλίση του γραφήματος αυτού δίνει τα επίπεδο νόθευσης σύμφωνα με την εξίσωση **(3.1) (1)**.

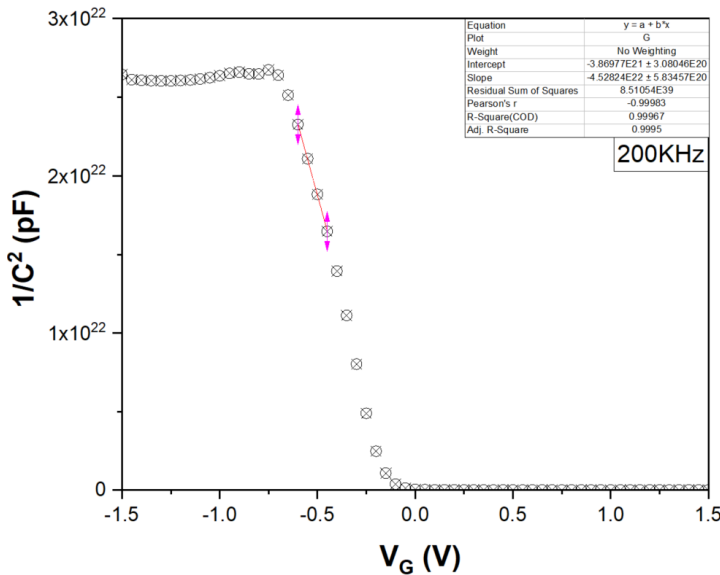
$$N_b = \frac{2}{q \cdot k \cdot \epsilon_0 \cdot A^2 \cdot \frac{d(1/C^2)}{dV}} \quad (3.1)$$

όπου:

- q : φορτίο ηλεκτρονίου
- k : διηλεκτρική σταθερά Si
- ϵ_0 : ηλεκτρική διαπερατότητα κενού
- A : επιφάνεια πυκνωτή

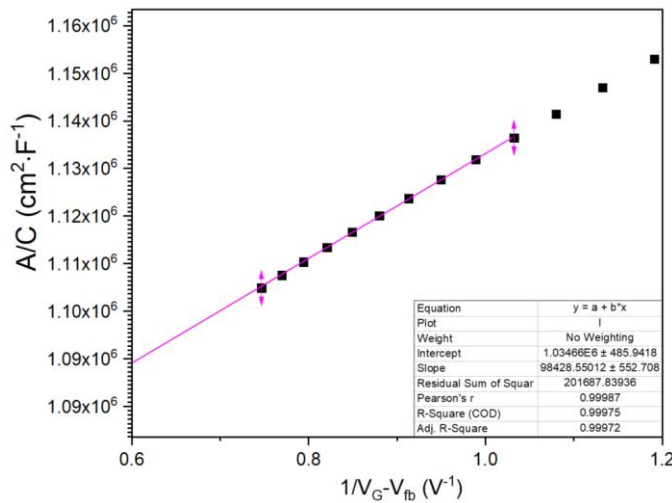
Η δε τάση επιπέδων ζωνών προσδιορίζεται από την τετμημένη επί της αρχής του άξονα των τάσεων

(1) όπως φαίνεται στην **Εικόνα 3.12**.



Εικόνα 3.12: Χαρακτηριστική $1/C^2-V_G$ για τον υπολογισμό της τάσης επίπεδων ζωνών V_{fb}

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.1 στην περιοχή της συσσώρευσης η χωρητικότητα δεν παραμένει σταθερή αλλά αυξάνεται συνεχώς με την τάση. Επομένως η χωρητικότητα του πυκνωτή και κατ' επέκταση το πάχος του οξειδίου δεν μπορεί να υπολογισθεί απλά από την μέγιστη χωρητικότητα. Ο προσδιορισμός αυτών των ανωτέρω παραμέτρων πραγματοποιείται με εναλλακτικά μοντέλα. Η πραγματική χωρητικότητα του οξειδίου C_{ox} καθώς και το πάχος του οξειδίου t_{ox} υπολογίστηκαν με τη μέθοδο Vincent (1) Δημιουργώντας την γραφική παράσταση της συνάρτησης $1/C = f(1/V_G - V_{fb})$ για την συχνότητα των 200 kHz, τα τελευταία σημεία στη περιοχή της συσσώρευσης προσδιορίζουν μία ευθεία. Η τομή της ευθείας αυτής με τον άξονα $1/C$ βάσει της εξίσωσης (3.2), υπολογίζεται το C_{ox} (1) **Εικόνα 3.13**.



Εικόνα 3.13 : Χαρακτηριστική $1/C = f(1/V_G - V_{fb})$.
Εύρεση τομής των τελευταίων 10 σημείων στη περιοχή της συσσώρευσης με τον άξονα A/C.

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} - \frac{2 \cdot k \cdot T}{q \cdot C_{ox}} \frac{1}{V_G - V_{fb}} \quad (3.2)$$

- Στη συνέχεια μέσω της εξίσωσης (3.3) υπολογίζουμε το t_{ox} . (1)

$$t_{ox} = \epsilon_o \epsilon_r \frac{A}{C_{ox}} \quad (3.3)$$

όπου,

- ϵ_r : ηλεκτρική διαπερατότητα οξειδίου

Ο υπολογισμός αυτός προσδιορίζει ότι το πάχος του οξειδίου είναι 3.57 nm, ή **3.6 nm**.

- Επίσης ο υπολογισμός του σταθερού φορτίου Q_f με τη χρήση της εξίσωσης (3.4) (1)

$$Q_f = \frac{C_{ox}}{qA} \cdot (\Phi_{ms} - V_{fb}) \quad (3.4)$$

όπου :

- Φ_{ms} : είναι η τάση επιπέδων ζωνών του πυκνωτή η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση (3.5) (1)

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - (x - E_g/2 + \varphi_b) \quad (3.5)$$

- Το ενεργειακό χάσμα E_g του ημιαγωγού το οποίο εξαρτάται από την θερμοκρασία υπολογίστηκε από την εξίσωση (3.6) (2). Η εξίσωση (3.6) είναι μια παγκόσμια εμπειρική

$$E_g = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (3.6)$$

Η εξίσωση (3.6) είναι μια παγκόσμια εμπειρική εξίσωση όπου,

- $E_g(0)$: η τιμή του ενεργειακού χάσματος σε θερμοκρασία απόλυτου μηδενός. Για το Si $E_g(0) = 1.169$ eV
- α, β : σταθερές που διαφέρουν από ημιαγωγό σε ημιαγωγό. Για το Si $\alpha = 4.9 \cdot 10^{-4}$ (eV/K) και $\beta = 655$ (K)

- Η απόσταση της στάθμης Fermi από τον ζώνη αγωγιμότητας, E_{fc} υπολογίστηκε από την εξίσωση (3.7) (1)

$$E_{fc} = k_B T \cdot \ln\left(\frac{N_C}{N_B}\right) \quad (3.7)$$

όπου,

- k_B : η σταθερά Boltzman / $k_B = 8.617 \cdot 10^{-5}$ eV·K⁻¹
- N_C : η ενεργός πυκνότητα καταστάσεων στη ζώνη αγωγιμότητας η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση (3.8) (1)

$$N_C = \frac{2}{h^3} (2 \pi m_e k_B T)^{\frac{3}{2}} \quad (3.8)$$

όπου,

- h : η σταθερά του Planck
- m_e : ενεργός μάζα ηλεκτρονίου

- Η ενεργειακή διαφορά της στάθμης Fermi του ενδογενή ημιαγωγού και της στάθμη Fermi του νοθευμένου ημιαγωγού, Φ_b υπολογίζεται από την εξίσωση (3.9) (1)

$$\Phi_b = \frac{k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_C}{n_i}\right) \quad (3.9)$$

όπου,

- n_i : η συγκέντρωση των ενδογενών φορέων αγωγιμότητας του ημιαγωγού, η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση (3.10) (1).

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}} \quad (3.10)$$

όπου,

- N_V : η ενεργός πυκνότητα καταστάσεων στη ζώνη σθένους η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση (3.11) (1).

$$N_V = \frac{2}{h^3} (2 \pi m_h k_B T)^{\frac{3}{2}} \quad (3.11)$$

όπου,

- m_h : ενεργός μάζα οπής

3.3.2 Μετρήσεις διστρωματικών διηλεκτρικών δομών συναρτήσει της θερμοκρασίας - Συμπεριφορά θεωρητικής χαρακτηριστικής C-V_G με την θερμοκρασία ως παράμετρο.

Για να έχουμε μία καλύτερη αντίληψη για επίδραση της θερμοκρασίας στις χαρακτηριστικές C-V_G όταν η θερμοκρασία μεταβάλλεται, πραγματοποιήθηκαν υπολογισμοί των χαρακτηριστικών αυτών για πυκνωτές MOS πυριτίου τύπου p σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Για τον σκοπό αυτό έγιναν τα παρακάτω βήματα:

- 1) Το πάχος του οξειδίου ορίστηκε στα 6 nm
- 2) Η νόθευση του πυριτίου ορίστηκε στα $1.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
- 3) Η πυκνότητα σταθερών φορτίων ορίστηκε ως 0
- 4) Η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων επίσης ορίστηκε 0
- 5) Ως ηλεκτρόδιο πύλης ορίστηκε το αλουμίνιο με έργο εξόδου $W_m = 4.1 \text{ eV}$. Συνέπεια αυτού η παράμετρος της διαφοράς έργων εξόδου μετάλλου-ημιαγωγού είναι -0.815 eV .
- 6) Αρχικά υπολογίζουμε το φορτίο του ημιαγωγού συναρτήσει του δυναμικού επιφανείας που στην περίπτωση αυτή αποτελεί και την ανεξάρτητη μεταβλητή του, από την εξίσωση **(3.12)** (1).

$$Q_{sc(x)} = \sqrt{2 \cdot q \cdot \varepsilon \cdot \left[\frac{n_0}{b} \cdot (\exp(b \cdot x) - 1) + \frac{N_b}{b} \cdot \exp[(-b \cdot x) - 1] + N_b \cdot x - n_0 \cdot x \right]} \quad (3.12)$$

όπου,

- $b = \frac{1}{k \cdot T}$
- x : το δυναμικό επιφανείας το οποίο αποτελεί και την ανεξάρτητη μεταβλητή της συνάρτησης και παίρνει τιμές -1, 0 και 1
- $n_0 = \frac{n_i^2}{N_b}$

Στη συνέχεια υπολογίσθηκε η χωρητικότητα του ημιαγωγού με βάσει την σχέση **(3.13)** (1)

$$C_s(x) = \left| \sqrt{q \cdot \frac{\varepsilon}{2}} \cdot \frac{[n_0 \cdot \exp(b \cdot x) - N_b \cdot \exp(-b \cdot x) + N_b - n_0]}{\sqrt{\frac{n_0}{b} \cdot [\exp(b \cdot x) - 1] + \frac{N_b}{b} \cdot [\exp(-b \cdot x) - 1] + N_b \cdot x - n_0 \cdot x + 10^{-80}}} \right| \cdot x + C_{fb} \quad (3.13)$$

όπου,

- C_{fb} : η χωρητικότητα του ημιαγωγού για την κατάσταση επίπεδων ζωνών ($x = 0$) , η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση **(3.14)** (1)

$$C_{fb} = \frac{(n_0 \cdot b + p_0 \cdot b)}{(\sqrt{2 \cdot n_0 \cdot b + 2 \cdot N_b \cdot b})} \cdot \sqrt{2 \cdot q \cdot \varepsilon} \quad (3.14)$$

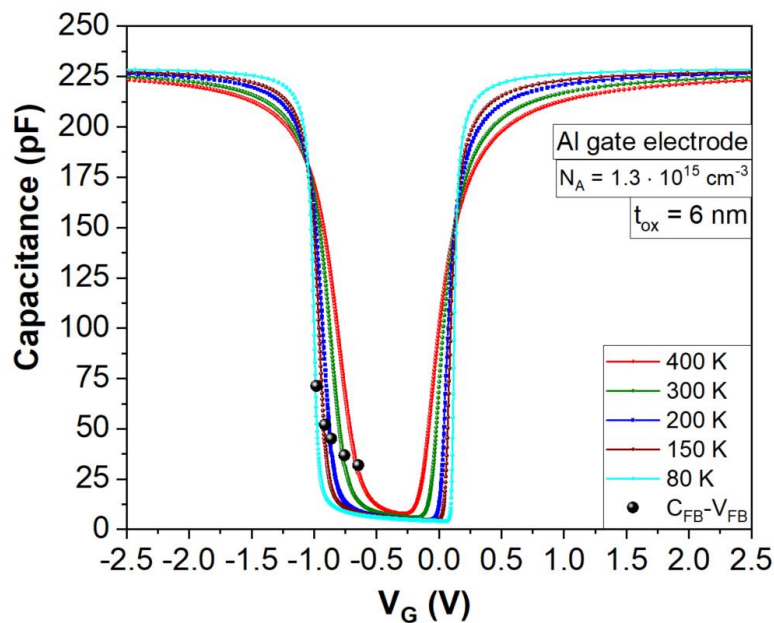
Και η ολική χωρητικότητα υπολογίσθηκε από την σχέση (3.15) (1).

$$C_t(x) = C_0 \cdot \frac{C_s(x)}{C_0 + C_s(x)} \quad (3.15)$$

Ενώ η τάση πύλης από την σχέση (3.16) (1).

$$V_G(x) = V_{fb} + x + \frac{-Q_{sc}(x)}{C_o} \quad (3.16)$$

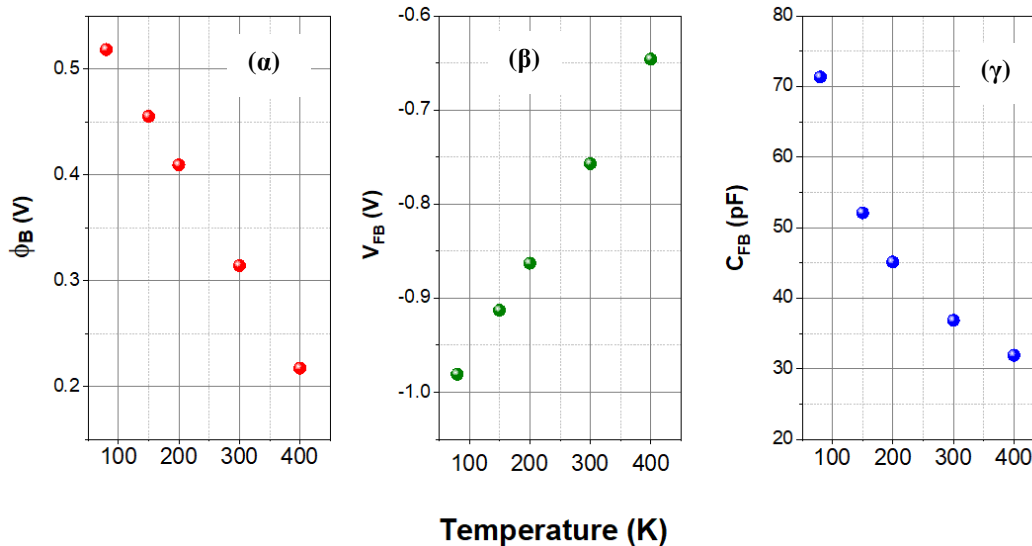
Αυτός ο απλός τρόπος υπολογισμού της χωρητικότητας δεν περιλαμβάνει μηχανισμούς απόκρισης των φορέων μειοψηφίας και πλειονότητας και συνεπώς αποδίδει χαρακτηριστικές C-V_G χαμηλών συχνοτήτων αλλά εμπεριέχει όλες τις παραμέτρους της δομής που έχουν εξάρτηση από την θερμοκρασία. Οι υπολογισμοί έγιναν για τις θερμοκρασίες 400, 300, 200, 150 και 80 K. Οι μεταβολές των παραμέτρων της δομής MOS που συμβαίνουν καθώς η θερμοκρασία μεταβάλλεται στην περιοχή 80-400 K αποδίδεται στην **Εικόνα 3.14**.



Εικόνα 3.14: Χαρακτηριστικές C-V_G χαμηλών συχνοτήτων που υπολογίσθηκαν σε πέντε διαφορετικές θερμοκρασίες στο εύρος 80-400 K. Το γράφημα δείχνει πως αναμένεται να ολισθήσουν οι χαρακτηριστικές C-V ως αποτέλεσμα της ολίσθησης της στάθμης Fermi προς το ανώτερο σημείο της ζώνης σθένους.

Στις **Εικόνες 3.15** παρουσιάζονται η μεταβολή της δυναμικού όγκου (bulk potential ϕ_B) με την θερμοκρασία **Εικόνα 3.15(α)**, η μεταβολή της τάσης επιπέδων ζωνών V_{fb} με την θερμοκρασία

Εικόνα 3.15(β) καθώς και η μεταβολή της χωρητικότητα C_{fb} επιπέδων ζωνών συναρτήσει της θερμοκρασίας **Εικόνα 3.15(γ)**. Πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι θερμοκρασιακές μεταβολές των παραμέτρων του πυκνωτή MOS προκύπτουν από την μεταβολή της θέσης της στάθμης Fermi στο ενεργειακό χάρμα του πυριτίου με την θερμοκρασία.

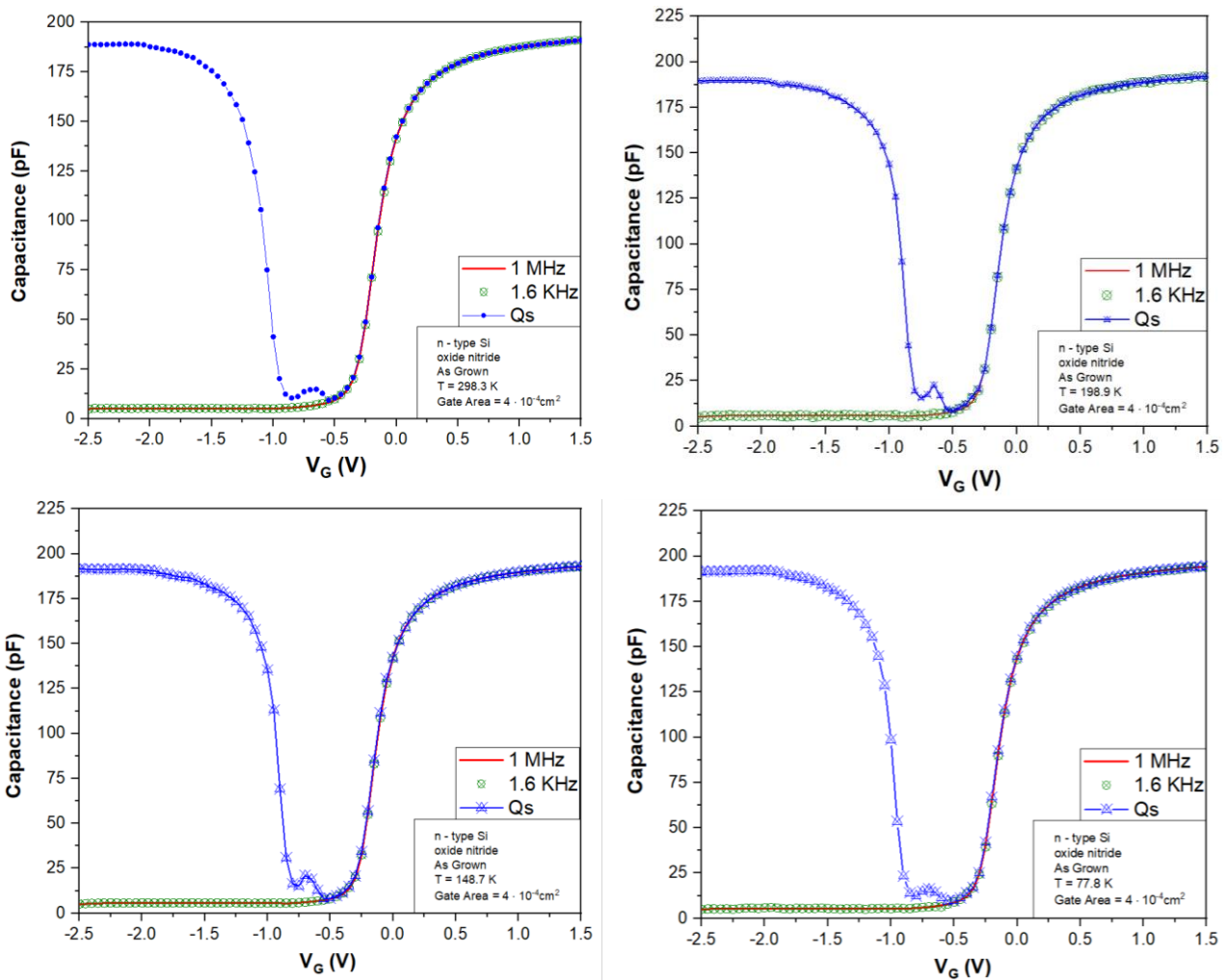


Εικόνα 3.15: (α) Εξάρτηση του δυναμικού όγκου από τη θερμοκρασία (β) Εξάρτηση της τάσης επιπέδων V_{fb} ζωνών από τη θερμοκρασία (γ) Εξάρτηση της χωρητικότητας των επιπέδων ζωνών από τη θερμοκρασία.

3.3.3 Δείγμα #2 Si - Δομή Al/SiO₂(+4.2nm Si₃N₄)/n-Si

Στη συνέχεια μετρήθηκε το δείγμα Al/SiO₂(Si₃N₄)/n-type Si στο οποίο έχει εναποτεθεί SiO₂ πάχους 3.5 nm και επιπλέον Si₃N₄ ονομαστικού πάχους 4.2nm κατά την εναπόθεση. Το συνολικό πάχος της διηλεκτρικής στοιβάς μείωσε αποτελεσματικά το ρεύμα διαρροής λόγω φαινομένου σήραγγος και επέτρεψε τη λήψη χαρακτηριστικών C-V_G μέσω της ημιστατικής μεθόδου (quasi static).

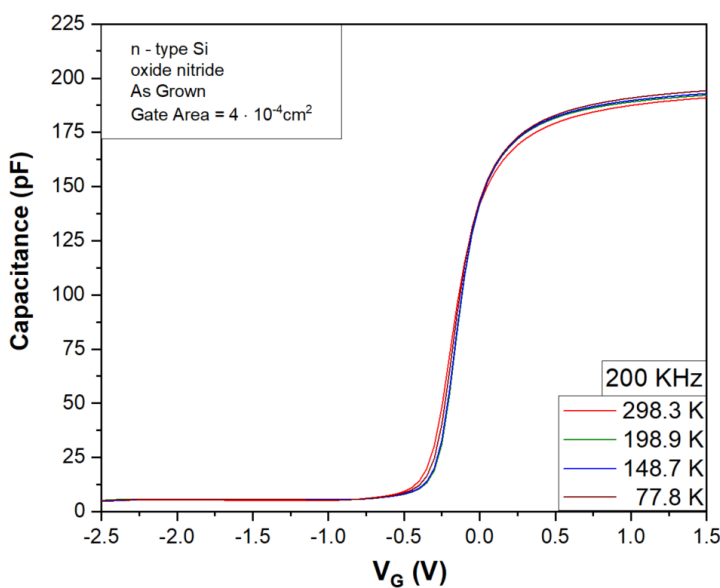
Το δείγμα αυτό μετρήθηκε σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες που ήταν 298.3 K, 198.9 K, 148.7 K και 77.8 K. Στη κάθε θερμοκρασία μετρήθηκε ο ίδιος πυκνωτής. Στην **Εικόνα 3.16** παρατίθενται οι χαρακτηριστικές C-V_G του δείγματος υψηλών συχνοτήτων (1 MHz και 1.6 kHz) καθώς και η ημιστατική χαρακτηριστική στις αντίστοιχες θερμοκρασίες. Η τάση πόλωσης των πυκνωτών για την λήψη των χαρακτηριστικών ήταν μεταξύ των τιμών -2.5 έως +1.5 V. Σημειώνεται ότι και στις τέσσερις θερμοκρασίες ελήφθησαν και οι χαρακτηριστικές C-V_G με συχνότητες 200, 40 και 1.6 kHz που δεν παρουσιάζονται.



Εικόνα 3.16: Χαρακτηριστικές καμπύλες $C-V_G$, του δείγματος#2 $Al/SiO_2(+4.2 \text{ nm } Si_3N_4)/n-Si$ συναρτήσει της θερμοκρασίας.

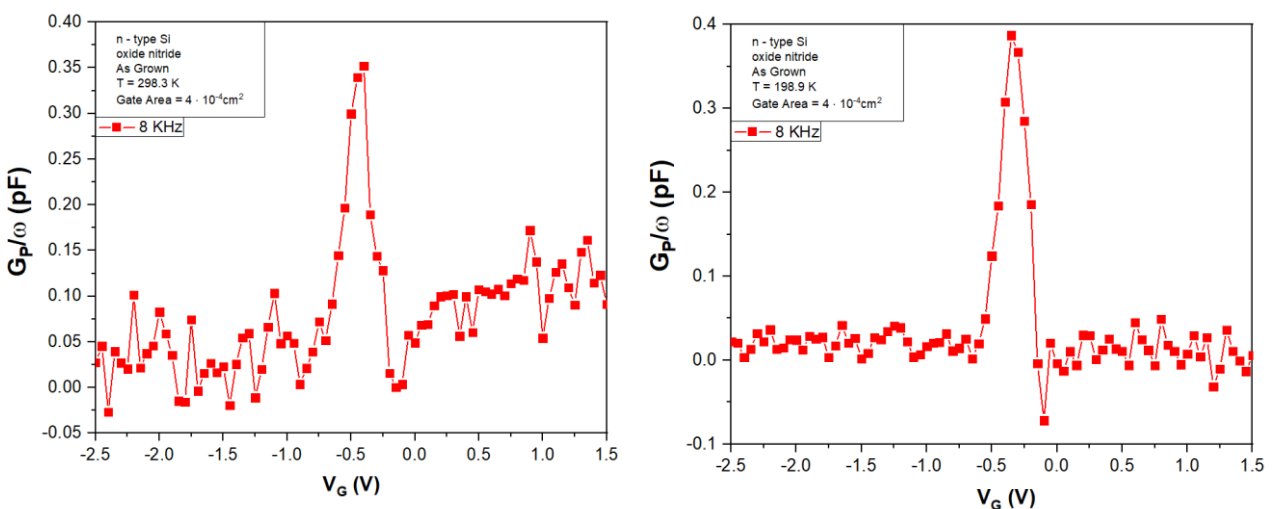
Οι χαρακτηριστικές $C-V_G$ υψηλών συχνοτήτων είναι ομαλές χωρίς να παρουσιάζουν διασπορά με την συχνότητα στις περιοχές απογύμνωσης, συσσώρευσης και αναστροφής. Ένα άμεσο συμπέρασμα είναι ότι η διστρωματική διηλεκτρική δομή διατηρεί χαμηλή πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων και επίσης μειώνεται η απόκριση του στρώματος αναστροφής που είχε παρατηρηθεί στο Δείγμα #1. Η ημιστατική χαρακτηριστική $C-V_G$ ελήφθη με σταθερό ρυθμό μεταβολής της τάσης πύλης dV/dt 10 mV/s. Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 ο ρυθμός αυτός θεωρείται σχετικά υψηλός με προφανή κίνδυνο να μετρούνται φαινόμενα μακριά από την απαιτούμενη ισορροπία, ιδιαίτερα σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της θερμοκρασίας δωματίου. Τα φαινόμενα αυτά εμφανίζονται κυρίως στην περιοχή της αναστροφής όπως έχουν δείξει προηγούμενες μελέτες (4). Επομένως όλο το τμήμα της ημιστατικής χαρακτηριστικής που ανήκει στην περιοχή της αναστροφής δεν λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς της πυκνότητας D_{it} . Το υπόλοιπο τμήμα της ημιστατικής χαρακτηριστικής θεωρείται ότι είναι σε ισορροπία εφόσον

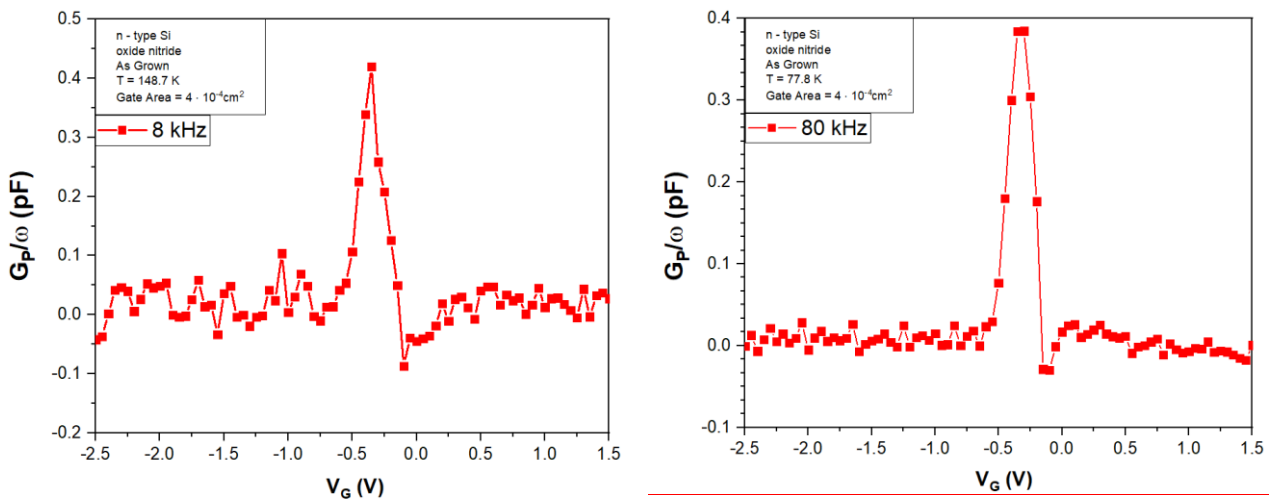
καθορίζεται από τον χρόνο απόκρισης των φορέων πλειονότητας του είναι της τάξης των ns, και συνεπώς αυτό συμμετέχει στην διεξαγωγή των υπολογισμών για την εύρεση των διεπιφανειακών παγίδων. Επίσης σε όλες τις χαρακτηριστικές (σε όλες δηλαδή τις θερμοκρασίες) παρατηρείται μια σταθερή κορυφή περιοχή της απογύμνωσης – ασθενούς αναστροφής, περίπου στα 0.75 V, της οποίας η τιμή δεν μεταβάλλεται σημαντικά με τη μεταβολή της θερμοκρασίας, γεγονός που μάλλον αποδίδεται σε ύπαρξη δομικού σφάλματος της διεπιφάνειας. Στην **Εικόνα 3.17** φαίνονται οι χαρακτηριστικές $C-V_G$ για συχνότητα υπερτιθέμενου πεδίου AC 200KHz, συναρτήσει της θερμοκρασίας. Δεν παρατηρείται σημαντική μεταβολή/μετακίνηση των χαρακτηριστικών κάτι το οποίο επαληθεύει την ύπαρξη χαμηλών διεπιφανειακών και συνοριακών καταστάσεων.



Εικόνα 3.17: Μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $C-V_G$ για συχνότητα 200KHz συναρτήσει της θερμοκρασίας, του δείγματος $Al/SiO_2(+4.2nm Si_3N_4)/n-Si$.

Λόγω του πολύ χαμηλού σήματος δεν ήταν δυνατόν να ληφθούν οι χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(f)$. Για τον υπολογισμό των διεπιφανειακών παγίδων πάρθηκαν υπόψη οι χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(V)$ για δεδομένη συχνότητα, συναρτήσει της θερμοκρασίας **Εικόνα 3.18**.





Εικόνα 3.18: Χαρακτηριστικές καμπύλες $G_p/\omega = f(V)$, του δείγματος $Al/SiO_2(+4.2nm Si_3N_4)/n-Si$ για κάθε θερμοκρασία. Στο δείγμα αυτό μόνο η συχνότητα των 8 kHz έδωσε αξιοποιήσιμα αποτελέσματα.

Η εύρεση της θέσης των διεπιφανειακών παγίδων μέσα στο ενεργειακό χάσμα έγινε με βάση τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 [Ενότητα 2.3.4 (γ)]. Στην **Εικόνα 3.19** παρατίθενται οι γραφικές με την πυκνότητα διεπιφανειακών καταστάσεων και τη θέση τους μέσα στο ενεργειακό χάσμα συναρτήσει τη θερμοκρασίας. Ο υπολογισμός της πυκνότητας καταστάσεων έγινε με δύο τρόπους:

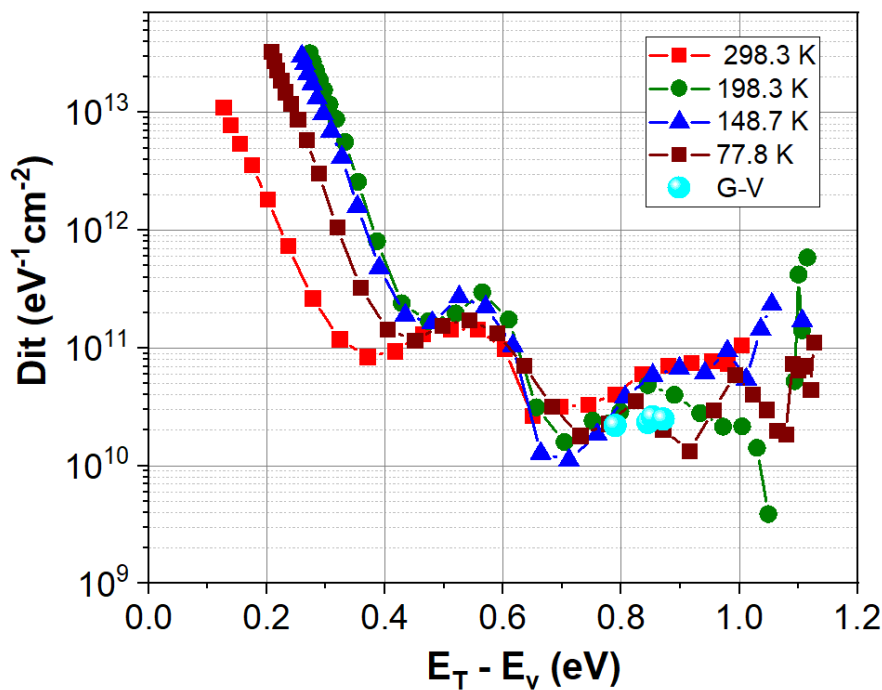
1. Υπολογισμός από τις χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(V)$ με βάση τη μέθοδο της αγωγιμότητας συναρτήσει της τάσης όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 [Ενότητα 2.3.4 (β)].
2. Υπολογισμός από τη μέθοδο Hi-Low όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2 [Ενότητα 2.3.3 (β)].

Στην **Εικόνα 3.19** παρατίθενται οι διεπιφανειακές παγίδες στο ενεργειακό χάσμα συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η θέση των διεπιφανειακών παγίδων από τις χαρακτηριστικές $G-V_G$, βρίσκονται στη περιοχή της απογύμνωσης από 0.75eV έως 0.85eV. Στην περιοχή μεταξύ 0.4 eV και 0.6eV παρατηρείται μια αύξηση της πυκνότητας των διεπιφανειακών παγίδων η οποία συνδέεται με την εμφάνιση κορυφής στην ημιστατική χαρακτηριστική $C-V_G$. Σημειώνεται ότι η αύξηση της πυκνότητας των διεπιφανειακών παγίδων που παρατηρείται προς την ζώνη σθένους θεωρείται πλασματική και δεν αξιολογείται.. Η εξάρτηση της πυκνότητας των διεπιφανειακών παγίδων συναρτήσει της θέσης τους στο ενεργειακό χάσμα της Εικόνας 3.12 φανερώνει ότι η μέθοδος Hi-Low είναι σε θέση να δώσει σχετικά ακριβή αποτελέσματα ανεξάρτητα της θερμοκρασίας που εφαρμόστηκε η μέθοδος. Όπως όμως φαίνεται στο σχήμα η μέθοδος υποφέρει εξαιτίας του θορύβου της ημιστατικής μέτρησης λόγω της αναγκαιότητας να ληφθεί η μέτρηση με αργό dV/dt . Η διασπορά των τιμών του Dit είναι αρκετά σημαντική στην περιοχή 0.7 με 1 eV της **Εικόνας 3.19**

γεγονός που δεν προσδίδει χαρακτηριστικά υψηλής ακρίβειας για την μέθοδο Hi-Low στην περίπτωση αυτή. Από την άλλη πλευρά η μέθοδος Hi-Low δείχνει ότι η πυκνότητα Dit χαρακτηρίζεται από δύο κορυφές μία κοντά στο μέσο του ενεργειακού χάσματος και μία στα 0.85 eV. Η τελευταία είναι γνωστή και αποδίδεται στο γνωστό κέντρο P_{b0} της φασματοσκοπίας Electron Spin Resonance. Συνεπώς η έλλειψη υψηλής ακρίβειας της μεθόδου Hi-Low (που παρατηρείται στην περίπτωση αυτή) αντισταθμίζεται με μεγάλη σάρωση κατά μήκος του ενεργειακού χάσματος (σχεδόν το μισό). Αντιθέτως οι μετρήσεις απωλειών αγωγιμότητας-τάσης εστιάζονται σε μικρή περιοχή του ενεργειακού χάσματος (από 0.8-0.85) με πολύ υψηλή ακρίβεια μέτρησης. Στο Πίνακα 3.2 φαίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι του δείγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας που υπολογίστηκαν βάση των μεθοδολογιών του εφαρμόστηκαν στο προηγούμενο δείγμα.

T (K)	V _{fb} (V)	C _{ox} (pF)	N _b (cm ⁻³)	t _{ox} (nm)	Q _f	E _g (eV)	E _{fc} (eV)	Φ _b (eV)
298.3	-0.251	203.4	1.3 x 10 ¹⁵	6.79	5 x 10 ¹²	1.125	0.25	0.31
198.8	-0.218	200.4	1.3 x 10 ¹⁵	6.89	3.7 x 10 ¹²	1.1476	0.1628	0.42
148.8	-0.23	201.4	1.3 x 10 ¹⁵	6.866	3.9 x 10 ¹²	1.157	0.1162	0.47
77.8	-0.25	203.3	1.3 x 10 ¹⁵	6.79	4.2 x 10 ¹²	1.166	0.0543	0.053

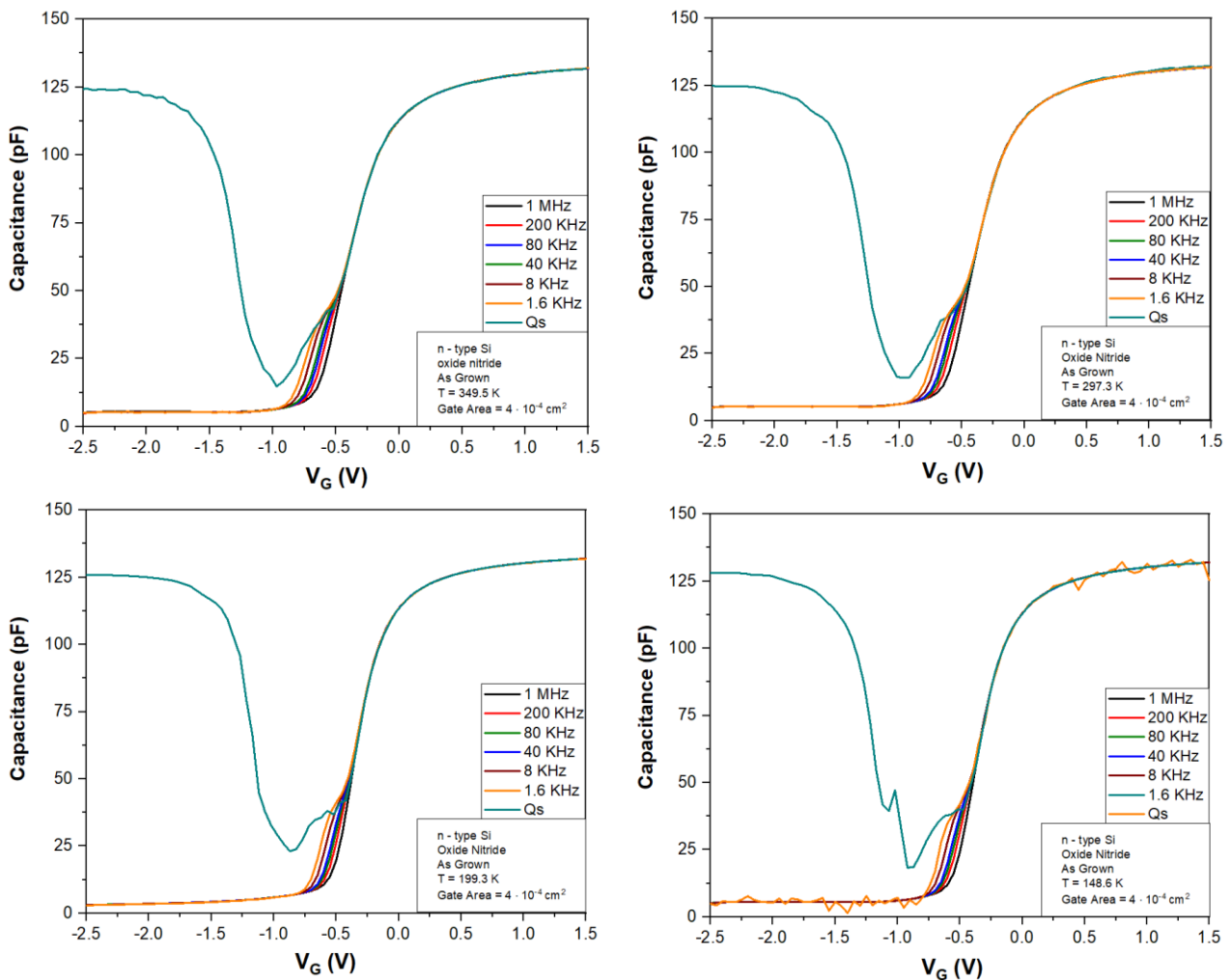
Πίνακας 3.2: Χαρακτηριστικές παράμετροι δείγματος #2 Al/SiO₂(Si₃N₄)/n-Si συναρτήσει της θερμοκρασίας.

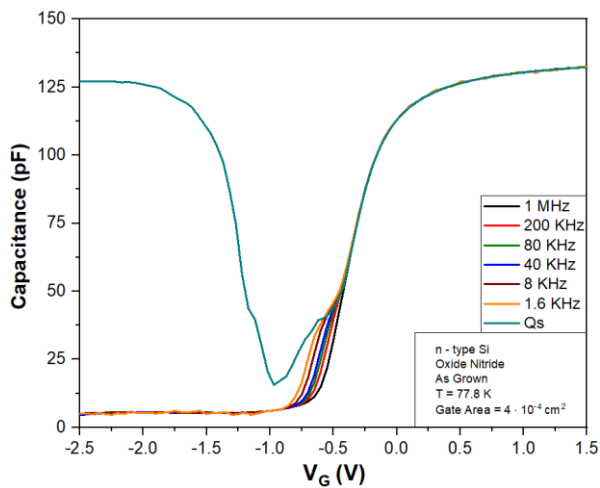


Εικόνα 3.19: Κατανομή διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού του δείγματος Al/SiO₂(+4.2nm Si₃N₄)/n-Si, συναρτήσει της θερμοκρασίας.

3.3.4 Δείγμα #3 Si - Δομή Al/SiO₂- Si₃N₄ (+9.2nm)/n-Si

Στη συνέχεια της μελέτης αυτής πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στο τρίτο δείγμα της σειράς πυριτίου δομής MOS όπου το διηλεκτρικό είναι διπλή στοιβάζ SiO₂ (3.4 nm)/Si₃N₄ (9nm). Σημειώνουμε εδώ την αύξηση του πάχους του δεύτερου μονωτικού της δομής. Στην περίπτωση του δείγματος αυτού είναι δυνατή η εφαρμογή και των τριών μεθόδων εύρεσης των διεπιφανειακών παγίδων δηλαδή της μεθόδου Hi-Low, της αγωγιμότητας συναρτήσεως της τάσης και της αγωγιμότητας συναρτήσεως της συχνότητας. Οι μετρήσεις έγιναν στις θερμοκρασίες 349.5, 297.3, 199.3, 148.6 και 77.8 K. Στην **Εικόνα 3.20** παρατίθενται οι χαρακτηριστικές C-V_G (υψηλών συχνοτήτων και ημιστατικής) του δείγματος σε κάθε θερμοκρασία. Σημειώνεται επίσης ο ίδιος πυκνωτής μετρήθηκε σε όλες τις θερμοκρασίες. Η τάση πόλωσης των πυκνωτών για την λήψη των χαρακτηριστικών ορίσθηκε στο διάστημα -2.5 έως +1.5 V.

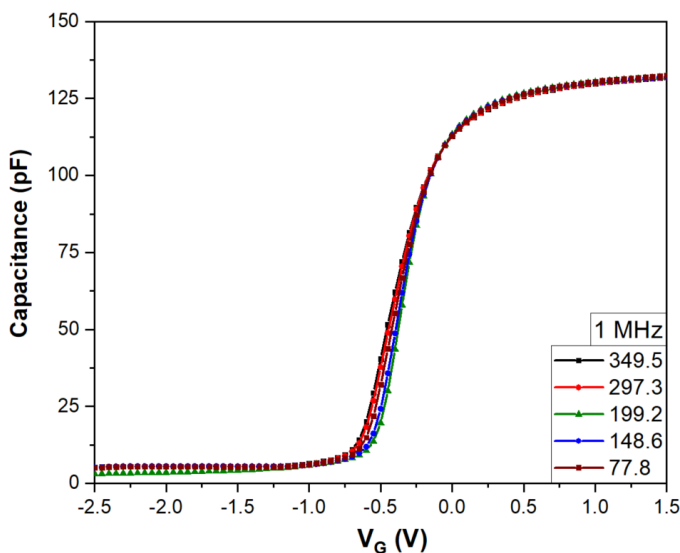




Εικόνα 3.20: Χαρακτηριστικές καμπύλες $C-V_G$ συναρτήσεως της θερμοκρασίας, (#3) $Al/SiO_2 - Si_3N_4/n-Si$

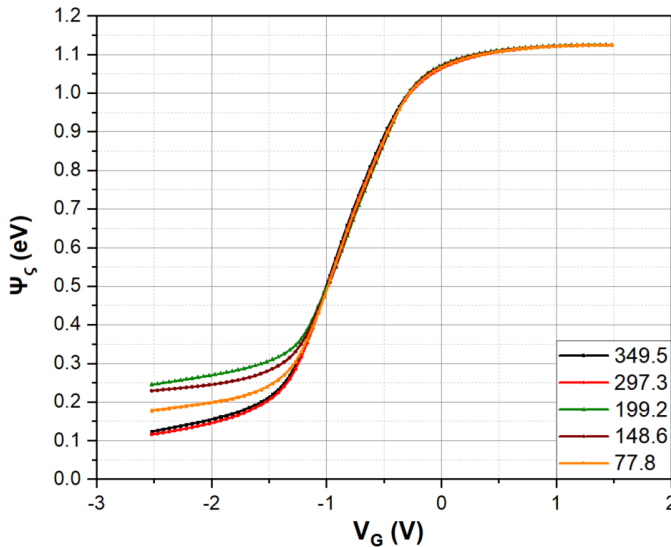
Από τις χαρακτηριστικές υψηλής συχνότητας παρατηρείται διασπορά της χωρητικότητας στη περιοχή της απογύμνωσης για κάθε θερμοκρασία, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη διεπιφανειακών παγίδων. Αναφορικά με την ημιστατική χαρακτηριστική παρατηρείται η ύπαρξη μιας κορυφής στη περιοχή της ασθενούς αναστροφής ($\sim -1.1V$) στις χαμηλότερες θερμοκρασίες των 148.6 K και των 77.8 K. Όπως έχει ήδη εξηγηθεί η απόκριση αυτή αποδίδεται στο σχετικά γρήγορο ρυθμό μεταβολής της τάσης πόλωσης και στην απόκλιση των συνθηκών μέτρησης από την «ισορροπία».

Στην **Εικόνα 3.21** παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές $C-V_G$ για συχνότητα υπερτιθέμενου πεδίου AC 1MHz, συναρτήσεως της θερμοκρασίας. Η ολίσθηση των χαρακτηριστικών με την θερμοκρασία είναι τυπική πυκνωτή MOS υποστρώματος n-τύπου πυριτίου.



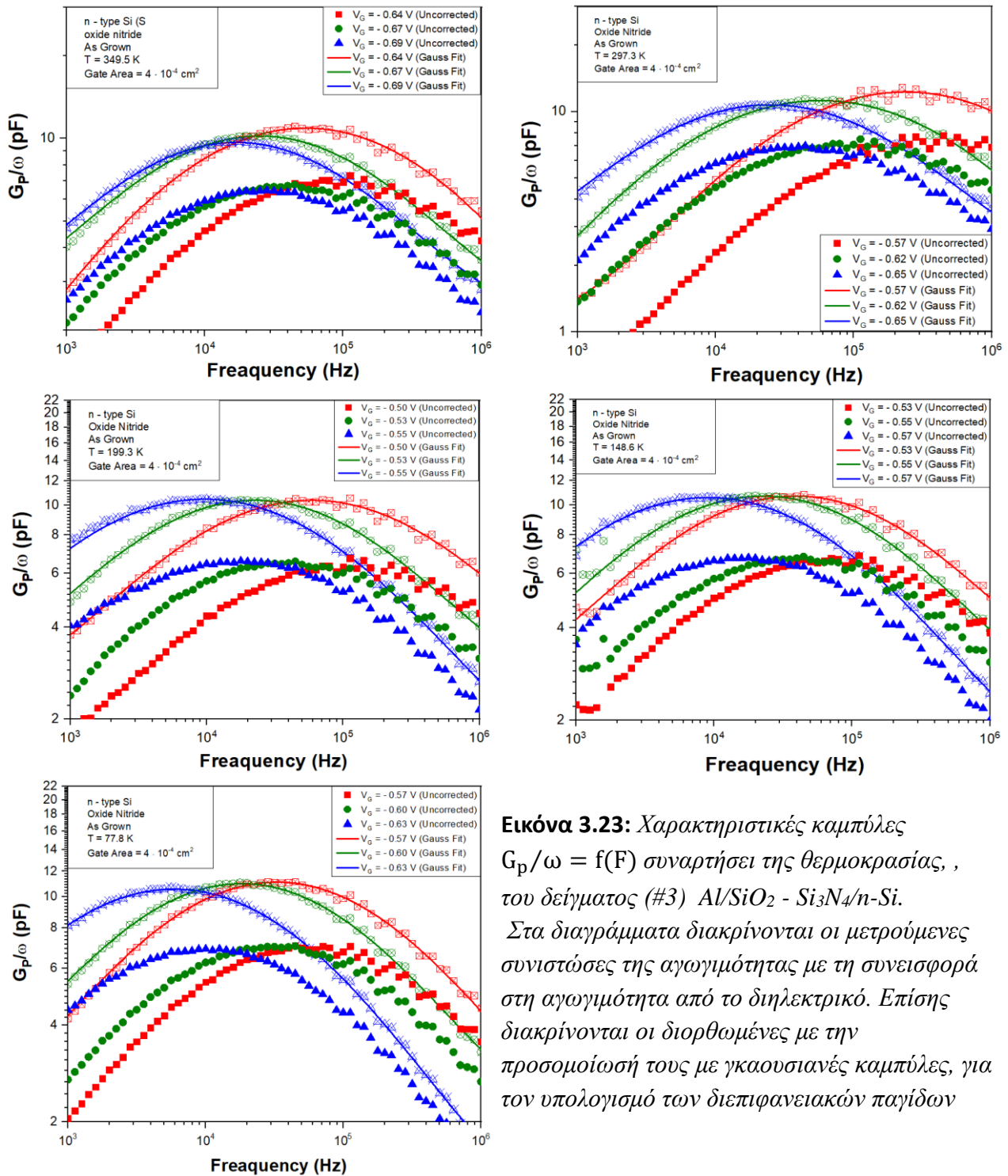
Εικόνα 3.21: Μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $C-V_G$ για συχνότητα 1 MHz συναρτήσεως της θερμοκρασίας, του δείγματος (#3) $Al/SiO_2 - Si_3N_4/n-Si$

Στην **Εικόνα 3.22** εξετάζεται το αποτέλεσμα της ολοκλήρωσης της συνάρτησης $(1-C_{LF}/C_{ox})$ και για τις 5 θερμοκρασίες. Για καλύτερη σύγκριση οι χαρακτηριστικές έχουν κοινή αρχή στα 1.125 eV. Το γράφημα δείχνει ότι σε όλες τις περιπτώσεις η μεταβολή του δυναμικού επιφανείας παραμένει η ίδια από την περιοχή της συσσώρευσης (+1.5 V) έως και την περιοχή της απογύμνωσης (-1.1 V), ενώ στην περιοχή της ασθενούς αναστροφής παρατηρούνται αποκλίσεις. Στην τελευταία αυτή περιοχή εμφανίζονται τα φαινόμενα «μη-ισορροπίας» και επομένως η περιοχή αυτή δεν αξιολογείται.



Εικόνα 3.22: Εξάρτηση του δυναμικού επιφανείας από την τάση πόλης του δείγματος συναρτήσει της θερμοκρασίας, (#3) $Al/SiO_2 - Si_3N_4/n-Si$.

Στην **Εικόνα 3.23** παρατίθενται τα διαγράμματα $G_p/\omega = f(f)$ του δείγματος στις αντίστοιχες θερμοκρασίες με τα διαγράμματα $C-V_G$. Σε κάθε θερμοκρασία φαίνονται οι μετρούμενες συνιστώσες της αγωγιμότητας G_m/ω και οι διορθωμένες συνιστώσες αγωγιμότητας G_p/ω που προκύπτουν μετά την αφαίρεση της σύνθετης αντίστασης της διηλεκτρικής στοίβας. Η διόρθωση έγινε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 [Ενότητα 2.3.4 (α)]. Οι διορθωμένες χαρακτηριστικές προσομοιάζονται επιπρόσθετα με κορυφές τύπου Gauss για την καλύτερη διεξαγωγή των υπολογισμών. Ακόμη, για τον υπολογισμό και τη χαρτογράφηση των διεπιφανειακών παγίδων έγινε επεξεργασία των διορθωμένων συνιστωσών της αγωγιμότητας, με βάση τη γραφική μέθοδο του Brews (3) όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 [Ενότητα 2.3.4 (β)].



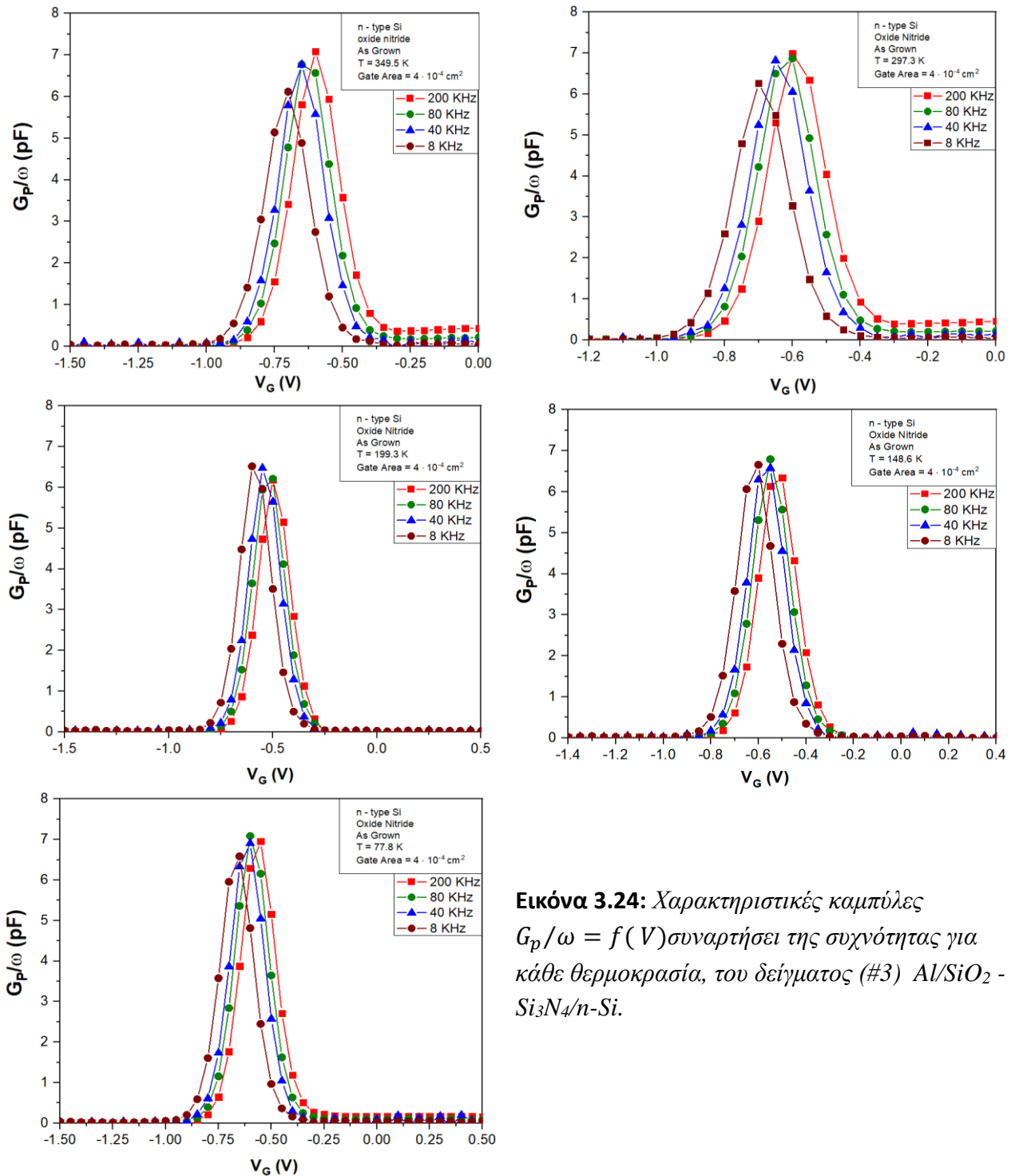
Εικόνα 3.23: Χαρακτηριστικές καμπύλες

$G_p/\omega = f(F)$ συναρτήσεως της θερμοκρασίας, του δείγματος (#3) $Al/SiO_2 - Si_3N_4/n-Si$.

Στα διαγράμματα διακρίνονται οι μετρούμενες συνιστώσες της αγωγιμότητας με τη συνεισφορά στη αγωγιμότητα από το διηλεκτρικό. Επίσης διακρίνονται οι διορθωμένες με την προσομοίωσή τους με γκαουσιανές καμπύλες, για τον υπολογισμό των διεπιφανειακών παγίδων

Η συμπεριφορά των χαρακτηριστικών της αγωγιμότητας είναι τυπική. Δηλαδή καθώς η τάση πόλωσης γίνεται περισσότερο θετική οι χαρακτηριστικές ολισθαίνουν και το μέγιστο εμφανίζεται σε υψηλότερες συχνότητες (προς τα δεξιά). Επίσης παρατηρείται ότι οι τιμές του μεγίστου $(G_p/\omega)_{max}$ εμφανίζει τιμές ~ 10 pF σε όλες τις περιπτώσεις της **Εικόνα 3.23**. Ακόμη παρατηρείται ότι η διόρθωση αυξάνει το σήμα και μετατοπίζει το μέγιστο του σε χαμηλότερες συχνότητες.

Πραγματοποιήθηκε επίσης ο υπολογισμός των διεπιφανειακών παγίδων και από τις χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(V)$ στις διάφορες θερμοκρασίες όπως φαίνονται στην **Εικόνα 3.24**

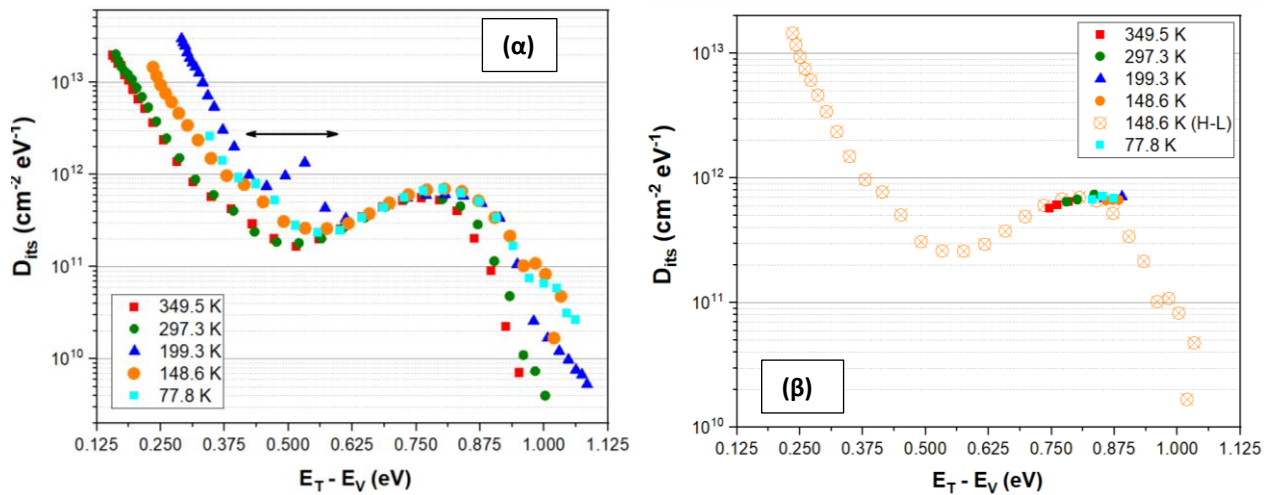


Εικόνα 3.24: Χαρακτηριστικές καμπύλες $G_p/\omega = f(V)$ συναρτήσεως της συχνότητας για κάθε θερμοκρασία, του δείγματος (#3) $Al/SiO_2 - Si_3N_4/n-Si$.

Ο υπολογισμός της πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων στο δείγμα αυτό πραγματοποιήθηκε με τρεις τρόπους:

1. Υπολογισμός από τις χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(f)$ με βάση τη μέθοδο της αγωγιμότητας συναρτήσει της τάσης .
2. Υπολογισμός από τις χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(V)$ με βάση τη μέθοδο της αγωγιμότητας συναρτήσει της τάσης .
3. Υπολογισμός από τη μέθοδο Hi-Low

Στην **Εικόνα 3.25(α)** παρουσιάζεται η κατανομή της πυκνότητας των διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα συναρτήσει τη θερμοκρασίας, όπως εξάχθηκε από την μέθοδο Hi-Low. Η μέθοδος παρουσιάζει μία κορυφή στα 0.82 eV με τιμή $D_{it} \sim 7 \times 10^{11} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ για όλες τις περιπτώσεις. Παρατηρείται επίσης ότι η κορυφή εμφανίζεται πιο στενή για τις δύο υψηλότερες θερμοκρασίες των 349.5 K και 297.3 K, ενώ υπάρχει μία διεύρυνση της κορυφής για τις τρεις χαμηλότερες. Πρέπει να σημειωθεί ότι στους υπολογισμούς έχει ληφθεί υπόψη η μικρή μεταβολή του ενεργειακού χάσματος με την θερμοκρασία. Η κορυφή εμφανίζεται διευρυμένη για τις τρεις χαμηλότερες θερμοκρασίες, ενώ για την υψηλότερη θερμοκρασία η κορυφή εμφανίζεται αρκετά πιο στενή. Είναι επίσης φανερό από το γράφημα ότι το ανοδικό τμήμα της κορυφής παρουσιάζει ίδιες σχεδόν τιμές και για τις 5 θερμοκρασίες. Μία πιθανή εξήγηση του φαινομένου αυτού είναι ότι εφαρμόζοντας την μέθοδο Hi-Low σε χαμηλές θερμοκρασίες πραγματοποιείται ακριβέστερη ανίχνευση των διεπιφανειακών παγίδων που βρίσκονται εγγύτερα της ζώνης αγωγιμότητας. Στην ίδια εικόνα φαίνεται ότι οι ασφαλείς τιμές της μεθόδου Hi-Low εξαρτώνται από την θερμοκρασία και βρίσκονται στο τμήμα του στο ενεργειακού χάσματος 0.6 -1 eV. Η κύρια ατέλεια των διεπιφανειακών παγίδων αποδίδεται στους ακόρεστους δεσμούς πυριτίου στην διεπιφάνεια Si-SiO₂. Στην **Εικόνα 3.25(β)** πραγματοποιείται σύγκριση των τριών μεθόδων εύρεσης των διεπιφανειακών παγίδων. Παρατηρείται ότι οι τρεις μέθοδοι δίνουν ίδιες περίπου τιμές και επομένως βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους. Σημειώνεται ότι οι τιμές του f_D για το δείγμα λαμβάνουν τιμές 0.25 και συνεπώς αποκλίνουν σημαντικά από την συνήθη τιμή 0.4. Είναι σημαντικό να τονισθεί το μικρό τμήμα του ενεργειακού χάσματος που σαρώνεται με τις μεθόδους αγωγιμότητας.

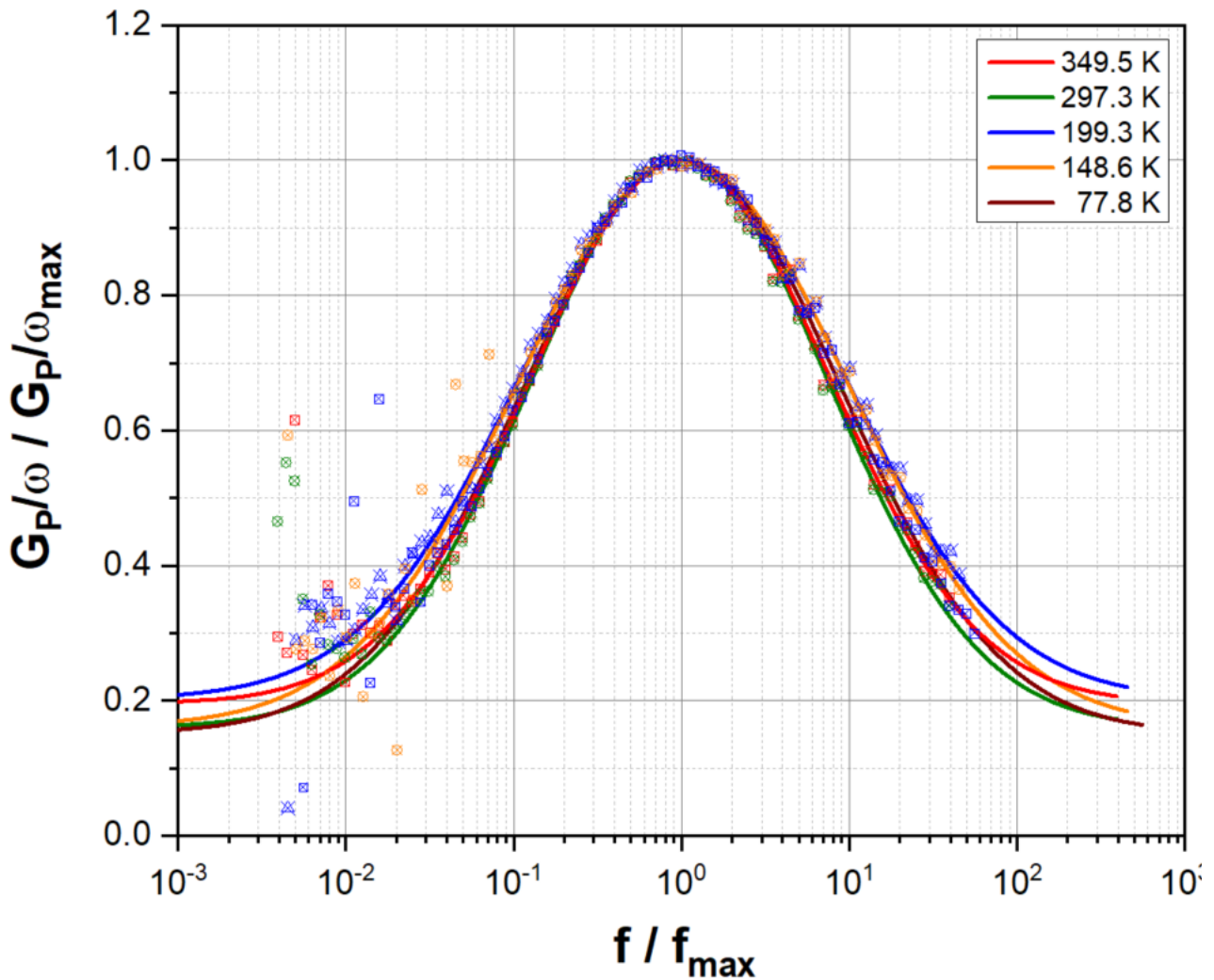


Εικόνα 3.25: (α) Κατανομή διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, συναρτήσει της θερμοκρασίας με τη μέθοδο Hi-Low. (β) Κατανομή διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού, συναρτήσει της θερμοκρασίας με τη μέθοδο της αγωγιμότητας $G-V$, με τις χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(f)$ καθώς και την μέθοδο Hi-Low (148.6 K)

Στο Πίνακα 3.3 φαίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι του δείγματος(#3) $Al/SiO_2 - Si_3N_4/n-Si$

T (K)	V_{fb} (V)	C_{ox} (pF)	N_b (cm^{-3})	t_{ox} (nm)	Q_f	E_g (eV)	E_{fc} (eV)	Φ_b (eV)
348.5	-0.537	138.2	1.4×10^{15}	10	2.85×10^{12}	1.111	0.307	0.302
297.3	-0.511	131.8	1.38×10^{15}	10.48	2.9×10^{12}	1.125	0.257	0.313
199.3	-0.453	131.8	1.38×10^{15}	10.46	3×10^{12}	1.148	0.162	0.417
148.6	-0.436	132	1.48×10^{15}	10.46	3.1×10^{12}	1.157	0.114	0.468
77.8	-0.250	132.3	1.3×10^{15}	10.05	3.1×10^{12}	1.166	0.054	0.531

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικές παράμετροι του δείγματος (#3) $Al/SiO_2 - Si_3N_4/n-Si$ συναρτήσει της θερμοκρασίας.



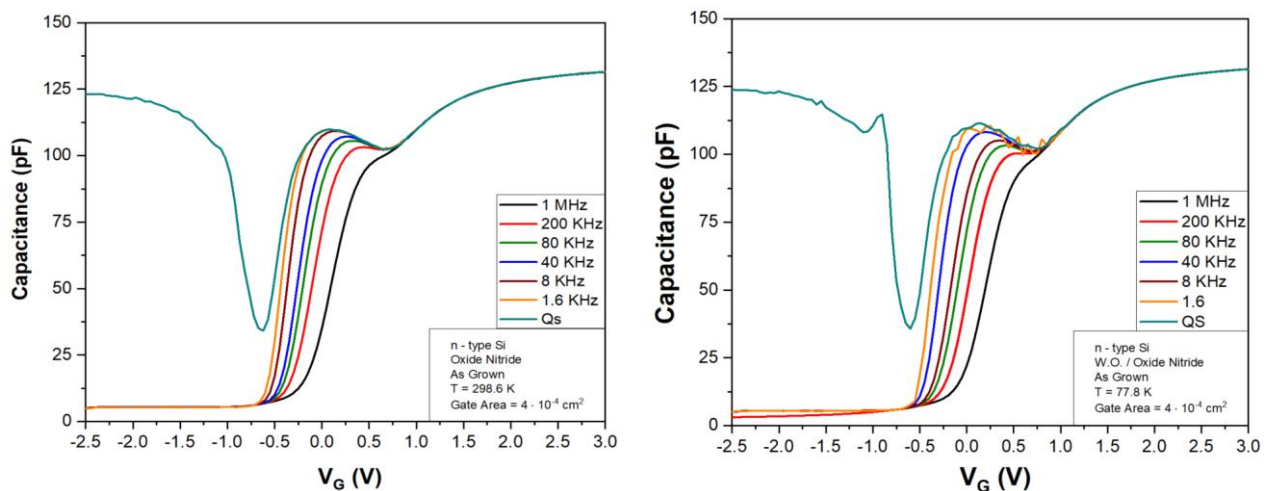
Εικόνα 3.26: Κανονικοποιημένες ως προς τους δύο άξονες των χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(f)$ συναρτήσεις τη θερμοκρασίας, του δείγματος (#3) $Al/SiO_2 - Si_3N_4(9.2nm)/n-Si$ (wet oxidation).

Τέλος στην Εικόνα 3.26 παρουσιάζεται ένα κομβικό αποτέλεσμα της εργασίας αυτής. Στην εικόνα αυτή παρουσιάζονται οι διπλά κανονικοποιημένες χαρακτηριστικές αγωγιμότητας. Η πρώτη κανονικοποίηση αφορά τον άξονα y και η δεύτερη τον άξονα x . Με τον τρόπο αυτό μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των χαρακτηριστικών αγωγιμότητας που ελήφθησαν σε κάθε θερμοκρασία. Γίνεται φανερό ότι η μείωση της θερμοκρασίας δεν αποτελεί παράγοντα διεύρυνσης των χαρακτηριστικών. Επομένως η αρχική παρατήρηση Goetzberger et al στα 1976 (6) μπορεί να αποδοθεί σε γενικευμένους παράγοντες που σχετίζονται με την ποιότητα των δισκίων του πυριτίου.

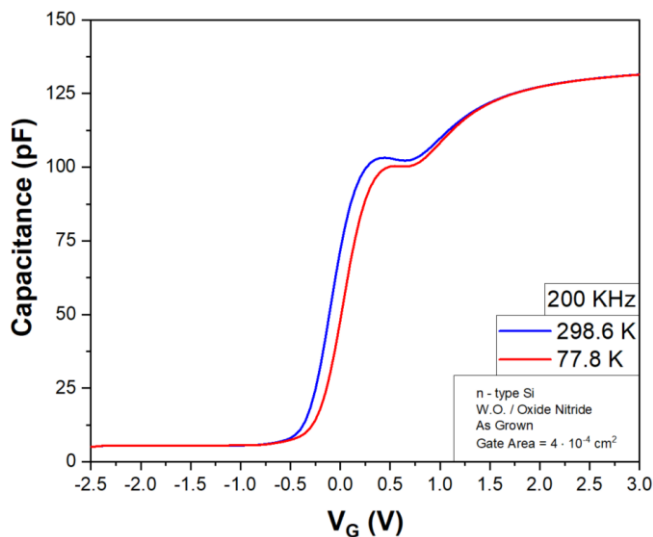
3.3.5 Δείγμα #4 Si - Δομή Al/SiO₂ - Si₃N₄ (+9.2nm)/n-Si + υγρή οξείδωση

Το τελευταίο δείγμα της σειράς με υπόστρωμα Si ήταν το δείγμα μετρήθηκε το δείγμα Al/SiO₂(+9.2nm Si₃N₄)/n-Si στο οποίο ήταν τμήμα του προηγούμενου δείγματος που υπέστη επιπρόσθετη θερμική διεργασία υγρής οξείδωσης στους 750 °C για χρόνο 15 min. Όπως θα φανεί παρακάτω η διεργασία αυτή αυξάνει υπέρμετρα τις διεπιφανειακές παγίδες του πυκνωτή και επομένως είναι ενδιαφέρον να μελετηθεί και αυτό ως προς τις διεπιφανειακές παγίδες. Το δείγμα μετρήθηκε σε δύο θερμοκρασίες. Σε θερμοκρασία δωματίου (298.6 K) και σε θερμοκρασία υγρού αζώτου (77.8 K).

Στην **Εικόνα 3.27** παρατίθενται οι χαρακτηριστικές C-V_G για το δείγμα που επιτυγχάνεται με τη σάρωση της τάσης πύλης του πυκνωτή από -2.5V έως 3.0 V ενώ στην εικόνα Στην **Εικόνα 3.28** φαίνονται οι χαρακτηριστικές C-V_G για συχνότητα υπερτιθέμενου πεδίου AC 200KHz, συναρτήσει της θερμοκρασίας. Παρατηρείται μεταβολή/ολίσθηση των χαρακτηριστικών κάτι το οποίο επαληθεύει την ύπαρξη διεπιφανειακών και συνοριακών καταστάσεων.



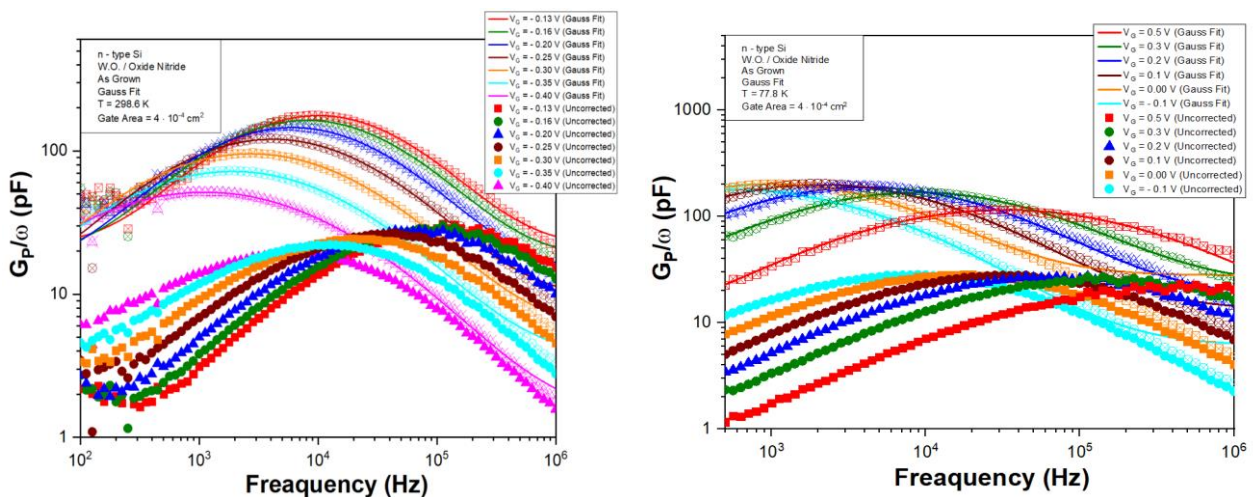
Εικόνα 3.27: Χαρακτηριστικές καμπύλες C-V_G συναρτήσει της θερμοκρασίας, του δείγματος (#4) Al/SiO₂ - Si₃N₄(9.2nm)/n-Si (wet oxidation).



Εικόνα 3.28: Μετατόπιση της χαρακτηριστικής καμπύλης $C-V_G$ για συχνότητα 200 KHz συναρτήσει της θερμοκρασίας, του δείγματος (#4) $Al/SiO_2 - Si_3N_4(9.2nm)/n-Si$ (wet oxidation).

Στην περίπτωση αυτή η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων είναι υψηλή με αποτέλεσμα η απόκρισή τους να σχηματίζει κορυφή στο γράφημα της $C-V_G$ χαρακτηριστικής. Το φαινόμενο δεν διαφοροποιείται με την μεταβολή της θερμοκρασίας. Παρατηρείται μεταβολή/ολίσθηση των χαρακτηριστικών κάτι το οποίο επαληθεύει την ύπαρξη διεπιφανειακών και συνοριακών καταστάσεων.

Στην **Εικόνα 3.29** παρατίθενται τα διαγράμματα $G_p/\omega = f(f)$ του δείγματος στις αντίστοιχες θερμοκρασίες με τα διαγράμματα $C-V_G$. Σε κάθε θερμοκρασία φαίνονται οι μετρούμενες (G_m/ω) και οι διορθωμένες συνιστώσες αγωγιμότητας (G_p/ω) καθώς και η προσομοίωσή τους με γκαουσιανές για τον υπολογισμό των διεπιφανειακών παγίδων.



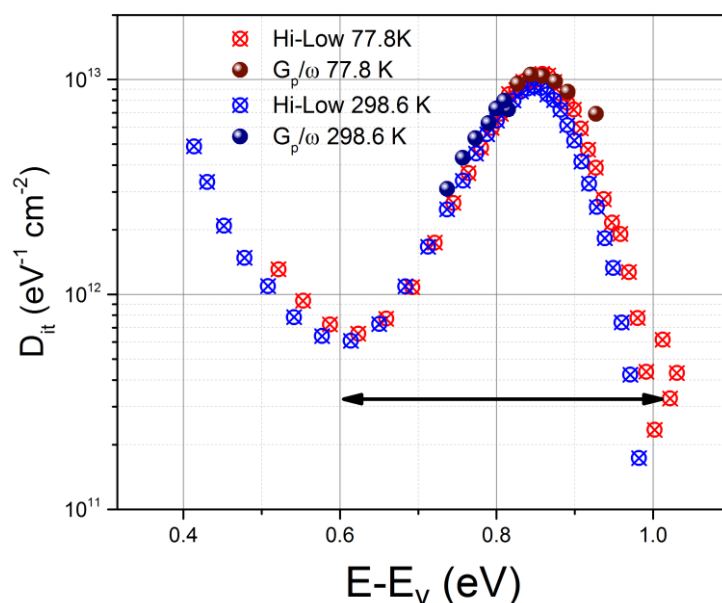
Εικόνα 3.29: Χαρακτηριστικές καμπύλες $G_p/\omega = f(F)$, συναρτήσει της θερμοκρασίας του δείγματος (#4) $Al/SiO_2 - Si_3N_4(9.2nm)/n-Si$ (wet oxidation). Στα διαγράμματα διακρίνονται οι μη διορθωμένες συνιστώσες της αγωγιμότητας (Uncorrected) με τη συνεισφορά στη αγωγιμότητα από το διηλεκτρικό. Επίσης διακρίνονται οι διορθωμένες με την προσομοίωσή τους με γκαουσιανές καμπύλες (Gauss Fit), για τον υπολογισμό των διεπιφανειακών παγίδων.

Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται αύξηση του σήματος της αγωγιμότητας καθώς αυξάνονται οι τιμές της θετικής πόλωσης του δείγματος. Το γεγονός αυτό αναδεικνύει ότι η πυκνότητα καταστάσεων αυξάνει απότομα συναρτήσει της θέσης στο ενεργειακό χάσμα. Ένα άλλο ενδιαφέρον αποτέλεσμα είναι ότι διόρθωση των χαρακτηριστικών οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του σήματος που από 20-25 pF λαμβάνει τιμές που μπορεί να προσεγγίσουν τα 200 pF.

Στην **Εικόνα 3.30** παρατίθενται οι γραφικές με την πυκνότητα διεπιφανειακών καταστάσεων και τη θέση τους μέσα στο ενεργειακό χάσμα συναρτήσει τη θερμοκρασίας. Ο υπολογισμός της πυκνότητας καταστάσεων έγινε με δύο τρόπους:

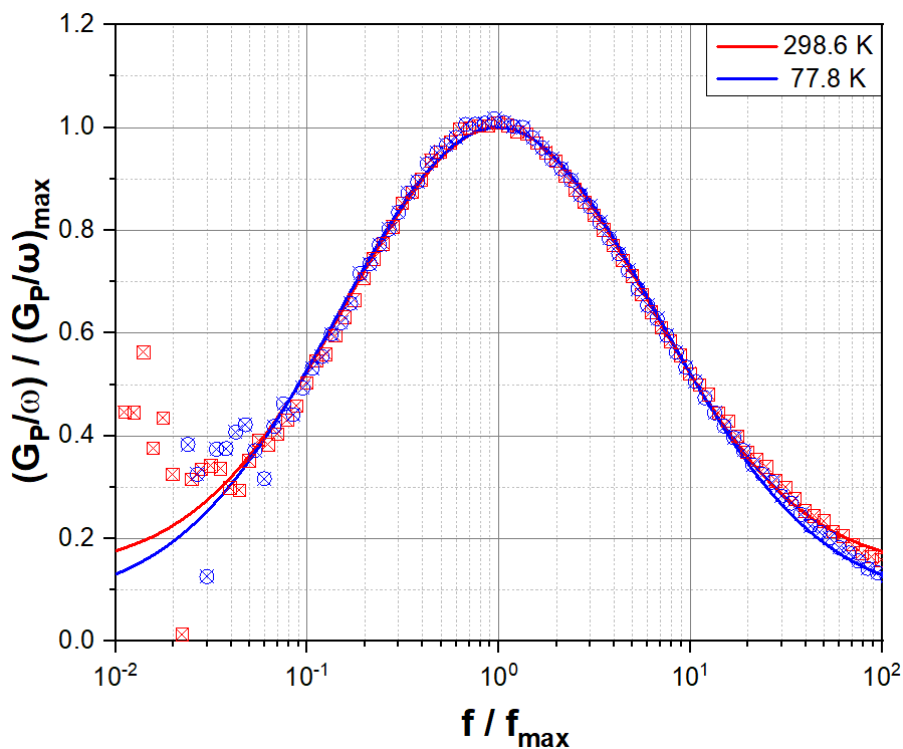
1. Υπολογισμός από τις χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(f)$ με βάση τη μέθοδο της αγωγιμότητας συναρτήσει της τάσης .
2. Υπολογισμός από τη μέθοδο Hi-Low

Οι υπολογισμοί και για τις δύο θερμοκρασίες δείχνουν την ίδια κατανομή διεπιφανειακών καταστάσεων που εμφανίζει μία πολύ έντονη κορυφή που έχει μέγιστο στα 0.85 eV με πυκνότητα παγίδων $1 \times 10^{13} \text{ eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$. Οι μετρήσεις αγωγιμότητας που πραγματοποιήθηκαν στους 298.6 K δίνουν τιμές στην ανοδική πλευρά της κατανομής. Σημειώνεται εδώ ότι οι τιμές του f_D δεν παραμένουν σταθερές αλλά μεταβάλλονται από 0.28 -0.38. Στην χαμηλή θερμοκρασία η μετρήσεις αγωγιμότητας εστιάζονται γύρω από την κορυφή του D_{it} . Με την ίδια λογική που αναφέρθηκε και για το προηγούμενο δείγμα οι τιμές της μεθόδου Hi-Low εμφανίζονται αυξημένες στην πλευρά της κορυφής που πρόσκειται προς την ζώνη αγωγιμότητας.



Εικόνα 3.30: Κατανομή διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού του δείγματος (#4) Al/SiO₂ - Si₃N₄(9.2nm)/n-Si (wet oxidation), συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Στην Εικόνα 3.31 φαίνονται οι διπλά κανονικοποιημένες χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(f)$ που ελήφθησαν στις δύο θερμοκρασίες. Και σε αυτή την περίπτωση της πολύ υψηλής πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων δεν παρατηρείται σχεδόν καμία εξάρτηση της διεύρυνσης της χαρακτηριστικής της αγωγιμότητας συναρτήσει της θερμοκρασίας. Επομένως ο κύριος στόχος της εργασίας αυτής διαλευκάνθηκε σε μεγάλο βαθμό. Η διεύρυνση των χαρακτηριστικών της αγωγιμότητας δεν προκαλείται από την μείωση της θερμοκρασίας. Δεν εξαρτάται επίσης από την πυκνότητα των ακόρεστων δεσμών της διεπιφάνειας. Πρέπει να καθορίζεται από την αργή επικοινωνία των διεπιφανειακών παγίδων με τις παγίδες συνόρου του διηλεκτρικού.



Εικόνα 3.31: Κανονικοποιημένες χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(f)$ συναρτήσει τη θερμοκρασίας, για το δείγμα (#4) Al/SiO₂ - Si₃N₄(9.2nm)/n-Si (wet oxidation).

Στο Πίνακα 3.4 φαίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι του δείγματος (#4) Al/SiO₂ - Si₃N₄(9.2nm)/n-Si (wet oxidation).

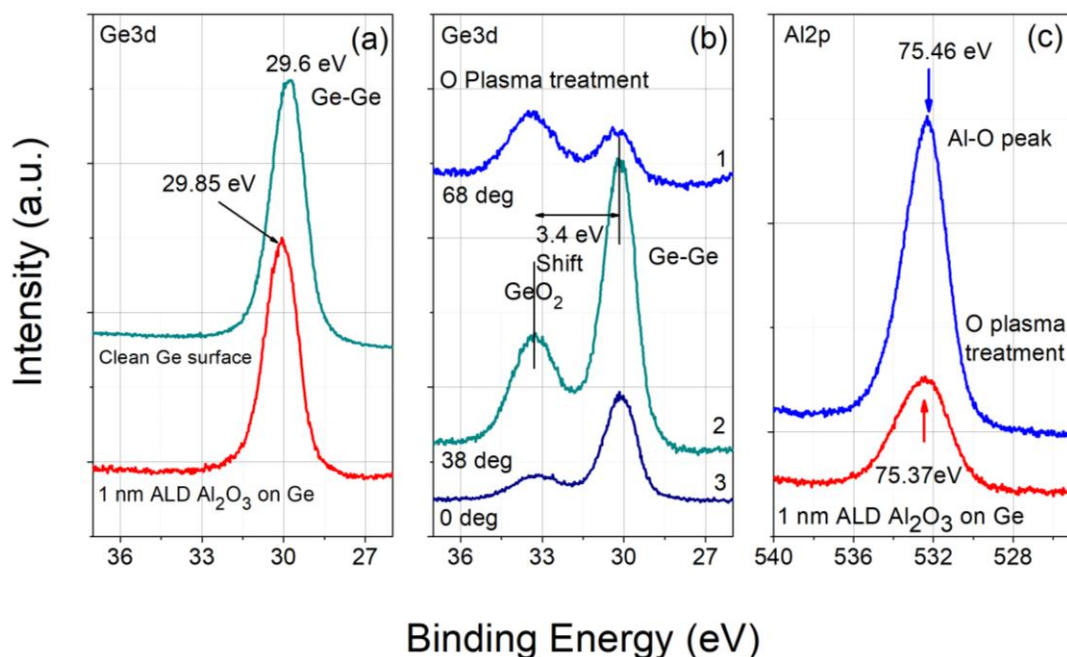
T (k)	V_{fb} (V)	C_{ox} (pF)	N_b (cm ⁻³)	t_{ox} (nm)	Q_f (cm ⁻²)	E_g (eV)	E_{fc} (eV)	Φ_b (eV)
298.6	-0.15	140	1.599×10^{15}	9.84	1.8×10^{12}	1.125	0.255	0.315
77.8	-0.1	140	1.623×10^{15}	9.87	1.75×10^{12}	1.166	0.053	0.586

Πίνακας 3.4: Χαρακτηριστικές παράμετροι δείγματος (#4) Al/SiO₂ - Si₃N₄(9.2nm)/n-Si (wet oxidation), συναρτήσει της θερμοκρασίας.

3.4 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ ΔΟΜΩΝ ΜΕ ΥΠΟΣΤΡΩΜΑ ΓΕΡΜΑΝΙΟΥ

3.4.1 Μετρήσεις XPS δειγμάτων υποστρώματος γερμανίου.

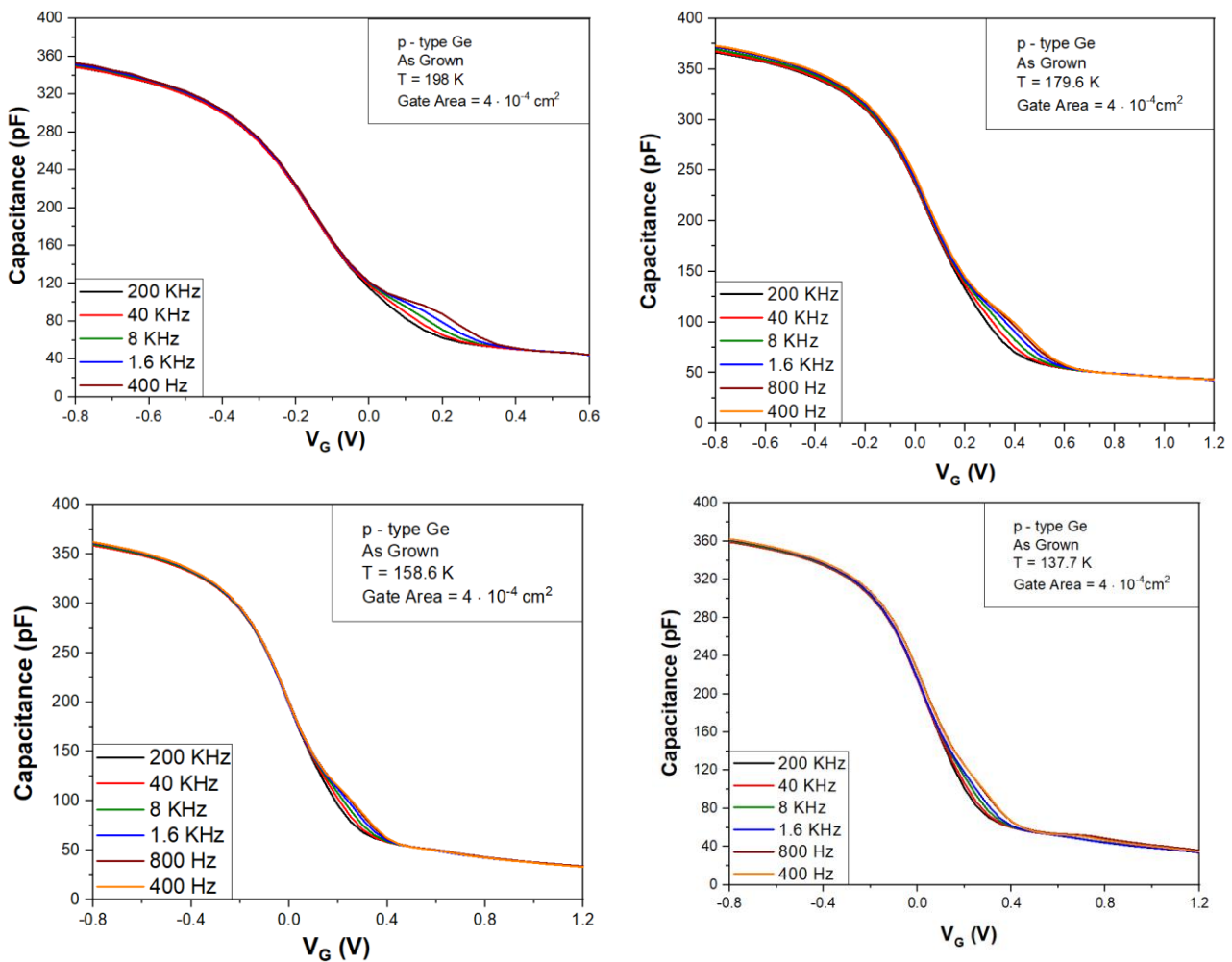
Στα δείγματα γερμανίου πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις XPS (X-ray photoelectron spectroscopy) ώστε να διερευνηθεί η επίδραση του πλάσματος οξυγόνου στην δομή Ge/Al₂O₃(1 nm). Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.32 από την οποία συμπεραίνεται ότι η διεργασία οξείδωσης με πλάσμα οξυγόνου οδηγεί στην ανάπτυξη ενός στοιχειομετρικού στρώματος οξειδίου του γερμανίου. Το πάχος του στρώματος αυτού δεν έγινε δυνατόν να υπολογισθεί από τις μετρήσεις XPS και ούτε έγινε κατορθωτό να υπολογισθεί με άλλη πειραματική τεχνική. Εκτιμάται ότι το πάχος του ενδιάμεσου στρώματος GeO₂ είναι ~ 1 nm.

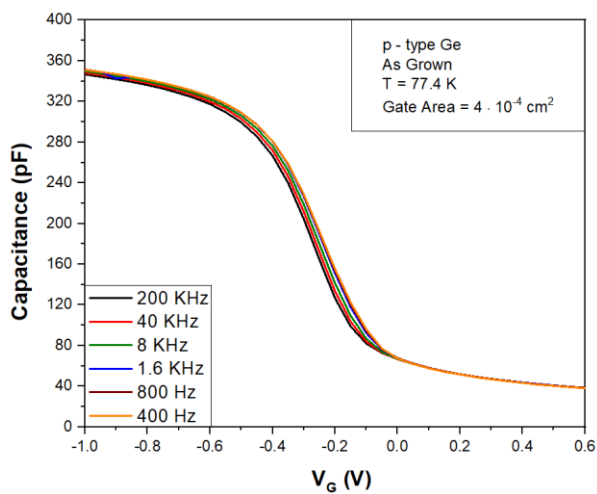
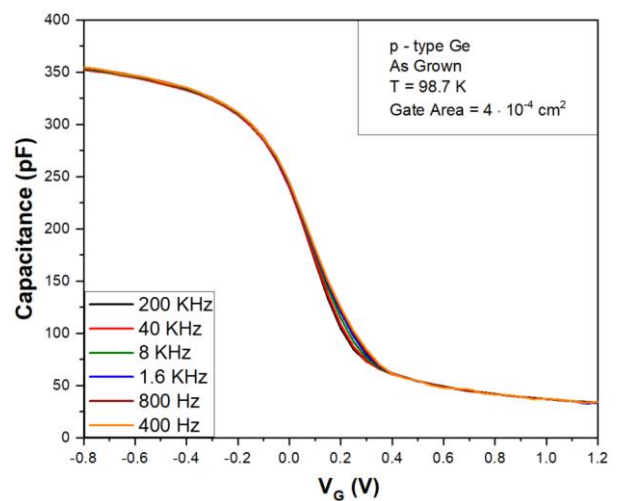
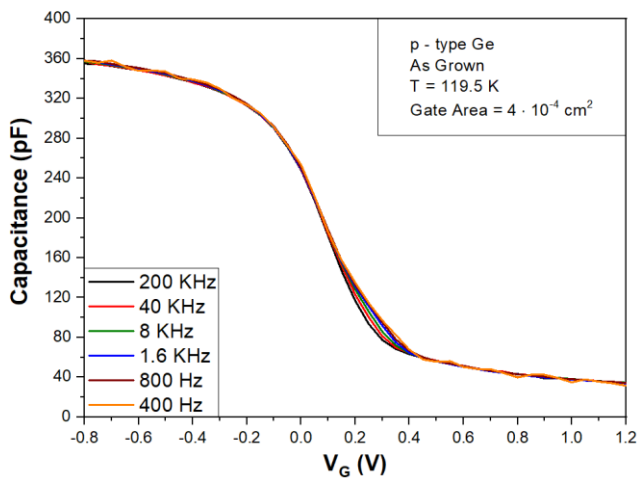


Εικόνα 3.32. Αποτελέσματα XPS δομής Ge- Al₂O₃ (1 nm) που υποβλήθηκε σε διεργασία οξείδωσης πλάσματος. (α) Η σύγκριση των σημάτων Ge 3d ανάμεσα σε ένα καθαρό υπόστρωμα γερμανίου και ενός υποστρώματος γερμανίου (κορυφή στα 28.6 eV) με with 1 nm ALD Al₂O₃ oxide (κορυφή στα 28.85 eV) υποδεικνύει μόνο την ύπαρξη δεσμών Ge-Ge στην επιφανειακή περιοχή του δεύτερου δείγματος. (β) Σήμα Ge 3d του δείγματος που υποβλήθηκε σε οξείδωση πλάσματος. Η κορυφή υψηλής έντασης των 30 eV υποδεικνύει την ύπαρξη δεσμών Ge-Ge. Επιπρόσθετα, παρατηρείται μία σημαντική συνεισφορά δεσμών Ge-O. Η ολίσθηση του σήματος κατά ~3.4 eV αποδίδεται στην παρουσία στοιχειομετρικού GeO₂. Η εξάρτηση του σήματος από την γωνία πρόσπτωσης φανερώνει ότι το στρώμα διοξειδίου του γερμανίου επικάθεται στο υπόστρωμα γερμανίου. (γ) Σύγκριση των σημάτων Al 2p μεταξύ του μη οξειδωμένου δείγματος και του δείγματος που υποβλήθηκε σε διεργασία οξείδωσης πλάσματος. Η θέση της ενέργειας σύνδεσης υποδεικνύει ένα στοιχειομετρικό στρώμα Al₂O₃ και για τα δύο δείγματα. (Οι μετρήσεις XPS πραγματοποιήθηκαν από την Δρ. Δ. Τσούτσου).

3.4.2 Δείγμα #1 Ge – Δομή Pt/Al₂O₃(GeO₂)/p-Ge

Στα δείγματα που υπέστησαν διεργασία πλάσματος αφού εναποτέθηκαν επιπρόσθετα άλλα 4nm Al₂O₃ και μετά στην διαδικασία της επιμετάλλωσης για τον σχηματισμό των πυκνωτών MOS Pt/Al₂O₃/p-Ge πραγματοποιήθηκαν ηλεκτρικές μετρήσεις στις θερμοκρασίες 179.6K, 158.6K, 137.7K, 119.5 K, 98.7 K και 77.4K. Στην **Εικόνα 3.33** παρατίθενται οι χαρακτηριστικές C-V_G υψηλών συχνοτήτων του δείγματος σε κάθε θερμοκρασία. Η τάση πόλωσης των πυκνωτών για την λήψη των χαρακτηριστικών έγινε σε ένα εύρος μεταξύ -1V και +1.2 V το οποίο διαφοροποιείται με τη θερμοκρασία.

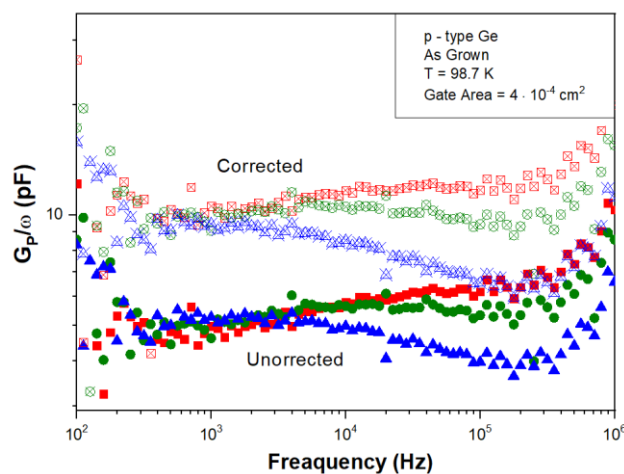
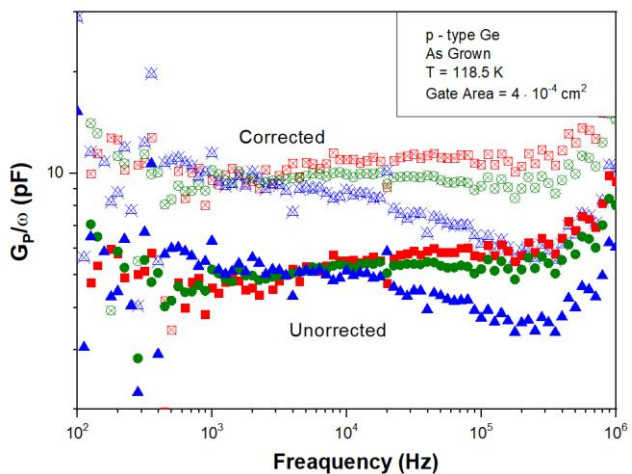
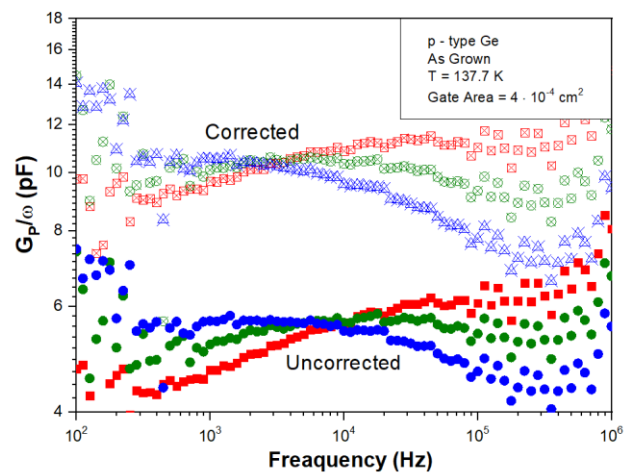
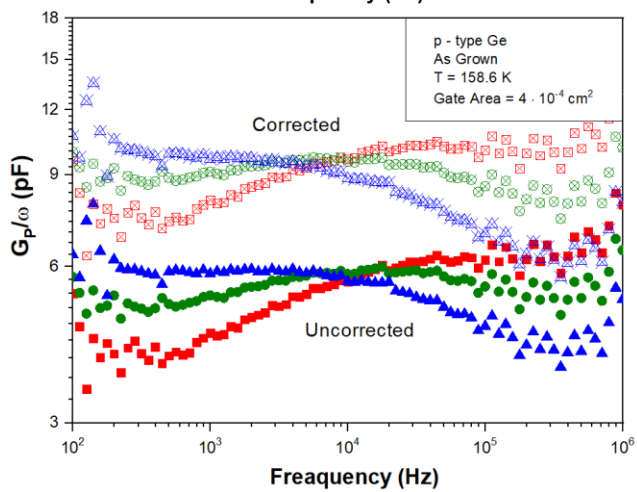
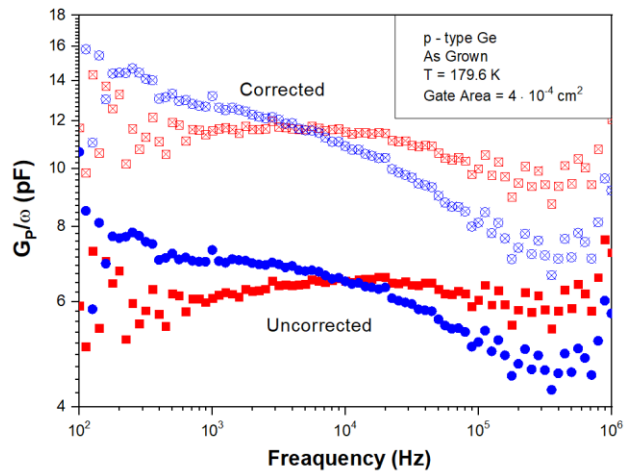
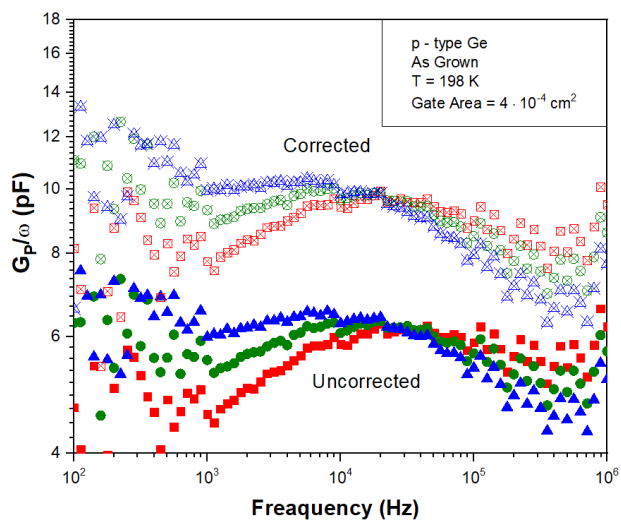


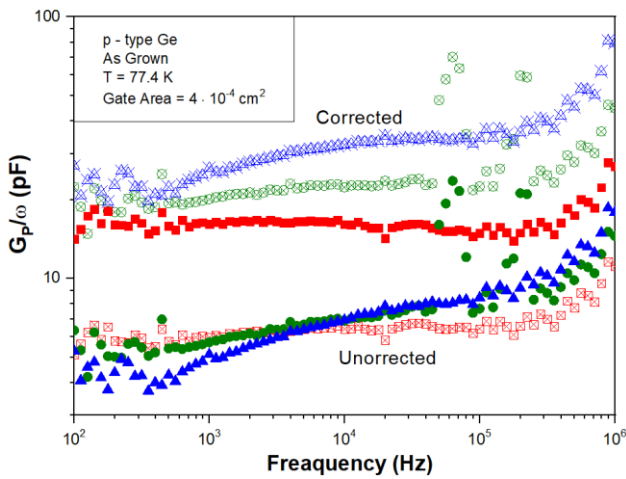


Εικόνα 3.33: Χαρακτηριστικές καμπύλες $C-V_G$ συναρτήσει της θερμοκρασίας, του δείγματος $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/p-Ge$.

Από τις χαρακτηριστικές υψηλής συχνότητας παρατηρείται διασπορά της χωρητικότητας στη περιοχή της απογύμνωσης για κάθε θερμοκρασία, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη διεπιφανειακών παγίδων .

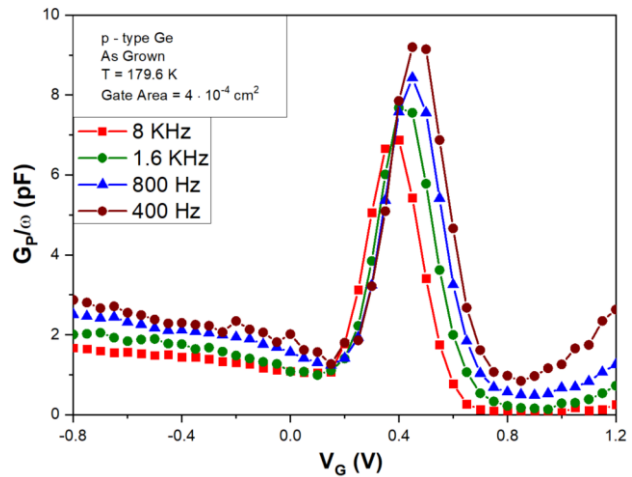
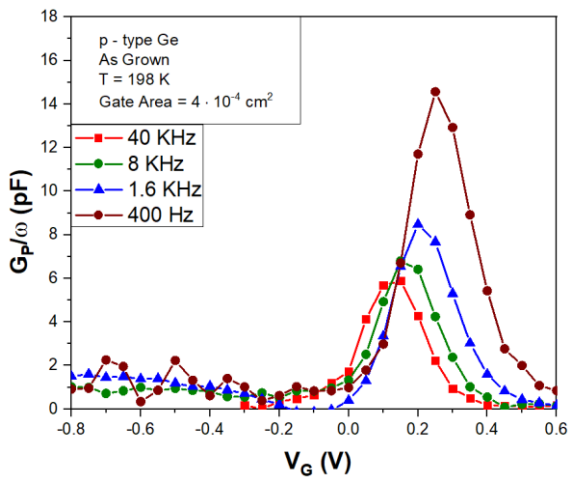
Στην **Εικόνα 3.34** παρατίθενται τα διαγράμματα $G_p/\omega = f(f)$ του δείγματος στις αντίστοιχες θερμοκρασίες με τα διαγράμματα $C-V_G$. Σε κάθε θερμοκρασία φαίνονται οι μετρούμενες συνιστώσες της αγωγιμότητας G_m/ω και οι διορθωμένες συνιστώσες αγωγιμότητας G_p/ω που προκύπτουν μετά την αφαίρεση της σύνθετης αντίστασης της διηλεκτρικής στοίβας. Η διόρθωση έγινε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 [Ενότητα 2.3.4 (α)].

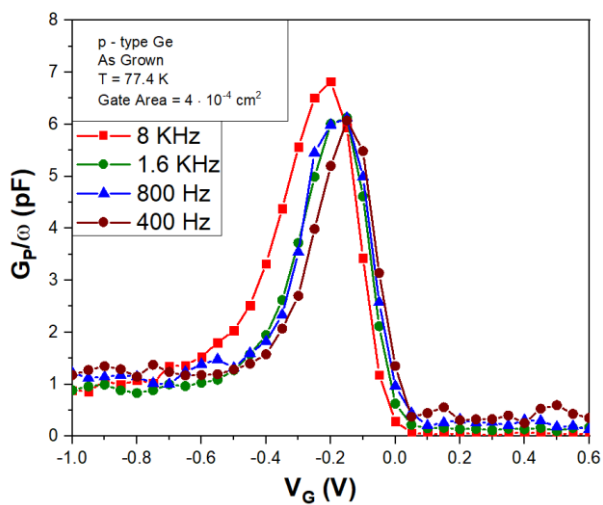
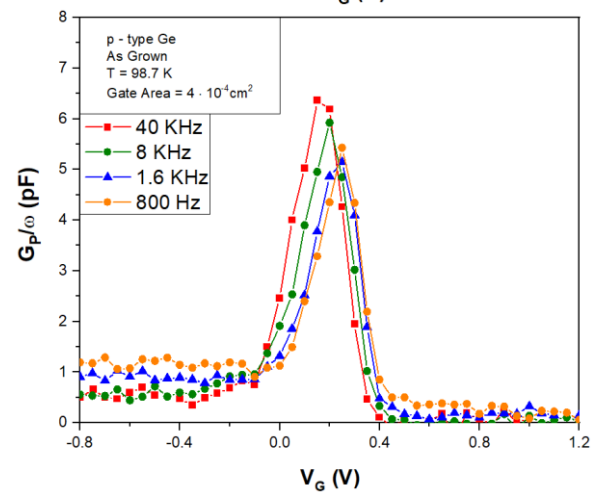
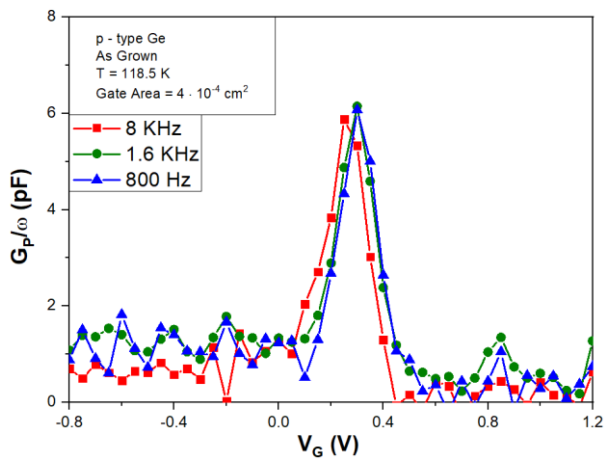
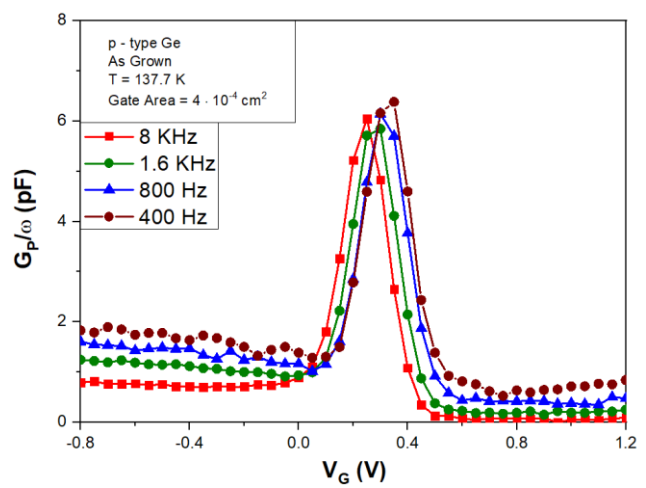
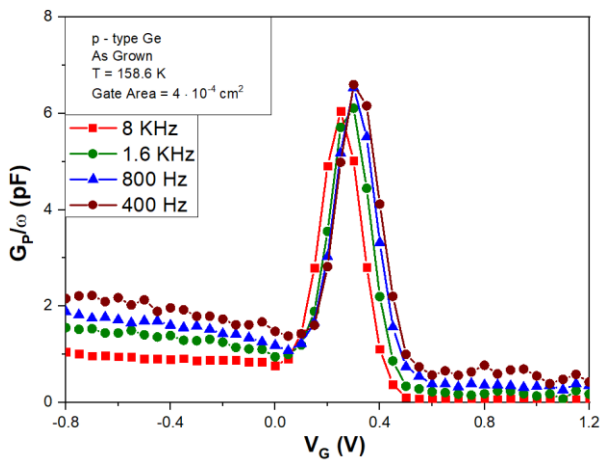




Εικόνα 3.34: Χαρακτηριστικές καμπύλες $G_p/\omega = f(f)$, συναρτήσει της θερμοκρασίας του δείγματος $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/p-Ge$. Στα διαγράμματα διακρίνονται οι μη διορθωμένες συνιστώσες της αγωγιμότητας (*Uncorrected*) με τη συνεισφορά στη αγωγιμότητα από το διηλεκτρικό. Επίσης διακρίνονται οι διορθωμένες (*Corrected*) Χωρίς τη συνεισφορά στη αγωγιμότητα από το διηλεκτρικό Η προσομοίωσή των διορθωμένων με γκαουσιανές καμπύλες (*Gauss Fit*), για τον υπολογισμό των διεπιφανειακών παγίδων δεν ήταν εφικτή.

Στην περίπτωση αυτή παρατηρείται ότι οι χαρακτηριστικές των απωλειών δεν σχηματίζουν κορυφές αφού εμφανίζονται ως να μην έχουν εξάρτηση από την θερμοκρασία. Σε αντίθεση, οι χαρακτηριστικές αγωγιμότητας-τάσης $G_m/\omega = f(V)$ σχηματίζουν καλά καθορισμένες κορυφές [Εικόνα 3.35]. Για αυτό τον λόγο αυτό ο προσδιορισμός της πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων καθώς και η θέση τους μέσα στο ενεργειακό χάσμα πραγματοποιήθηκε από τις χαρακτηριστικές G_m-V συναρτήσει της θερμοκρασίας. Η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων που υπολογίστηκε από το δείγμα ρ-τύπου παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.40 μαζί με την πυκνότητα των διεπιφανειακών καταστάσεων του δείγματος για n-type Ge υπόστρωμα.





Εικόνα 3.35: Χαρακτηριστικές καμπύλες $G_p/\omega = f(V)$ συναρτήσεως της συχνότητας για κάθε θερμοκρασία, του δείγματος $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/p-Ge$.

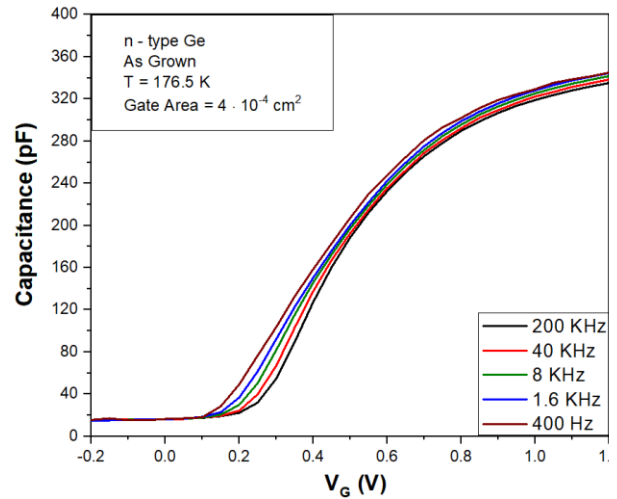
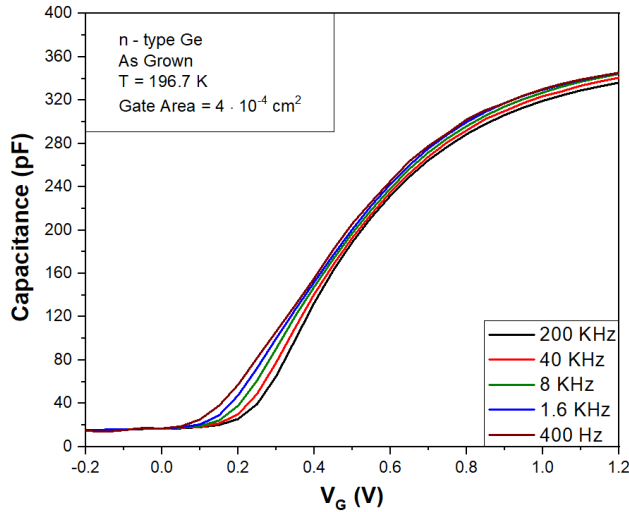
Στο Πίνακα 3.5 φαίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι του δείγματος $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/p-Ge$ συναρτήσεως της θερμοκρασίας όπως υπολογίστηκαν και για τα δείγματα με υπόστρωμα πυριτίου.

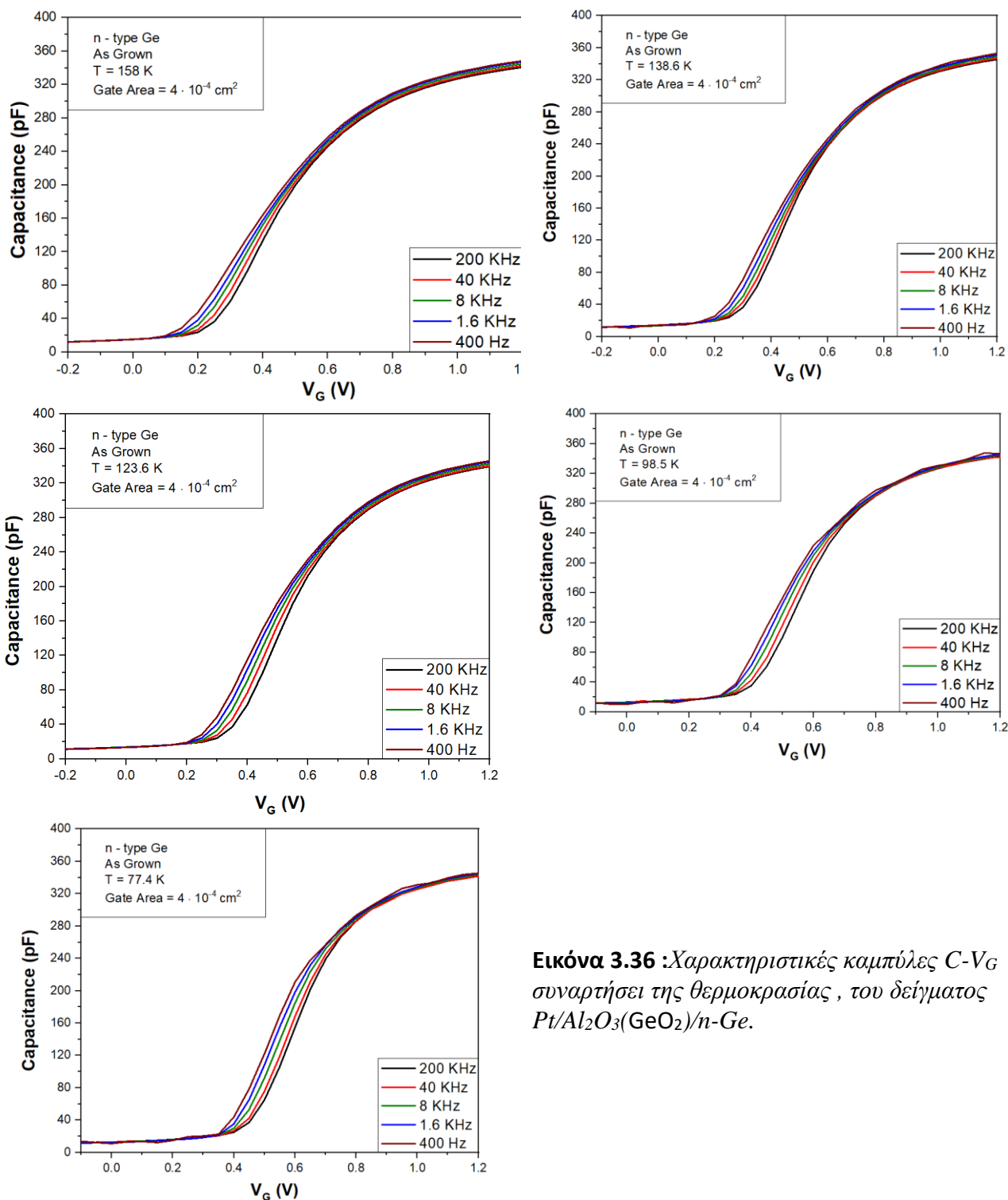
T (K)	V_{fb} (V)	C_{ox} (pF)	N_b (cm^{-3})	t_{ox} (nm)	E_g (eV)	E_{fv} (eV)	Φ_b (eV)
198	-0.03	413.3	4.92	7.71	0.699	0.068	0.275
179.6	0.18	411.3	5.828×10^{16}	7.746	0.705	0.057	0.29
158.6	0.1	411.3	5.424×10^{16}	7.96	0.711	0.062	0.302
137.7	0.11	3.963	5.174×10^{16}	8.039	0.718	0.04	0.315
118.5	0.12	387.1	6.39×10^{16}	8.231	0.723	0.03	0.32
98.7	0.1	383.2	6.3×10^{16}	8.313	0.728	0.023	0.338
77.4	0.27	374.5	6.388×10^{16}	8.507	0.733	0.016	0.349

Πίνακας 3.5: Χαρακτηριστικές παράμετροι του δείγματος $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/p-Ge$ συναρτήσει της θερμοκρασίας.

3.4.3 Δείγμα #2 Ge – Δομή $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/n-Ge$

Στο τέλος της μελέτης αυτής πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις δομές MOS $Pt/Al_2O_3/GeO_2/n-Ge$ με 5nm διηλεκτρικό Al_2O_3 και 1nm στη διεπιφάνεια του γερμανίου και του διηλεκτρικού. Οι ηλεκτρικές μετρήσεις έγιναν στις θερμοκρασίες 196.7 K, 176.5 K, 158 K, 138.6 K, 123.6 K, 98.5 K και 77.4K. Στην **Εικόνα 3.36** παρατίθενται οι χαρακτηριστικές C- V_G υψηλών συχνοτήτων του δείγματος σε κάθε θερμοκρασία. Η τάση πόλωσης των πυκνωτών για την λήψη των χαρακτηριστικών ορίσθηκε στο διάστημα -0.2V έως +1.2 V.



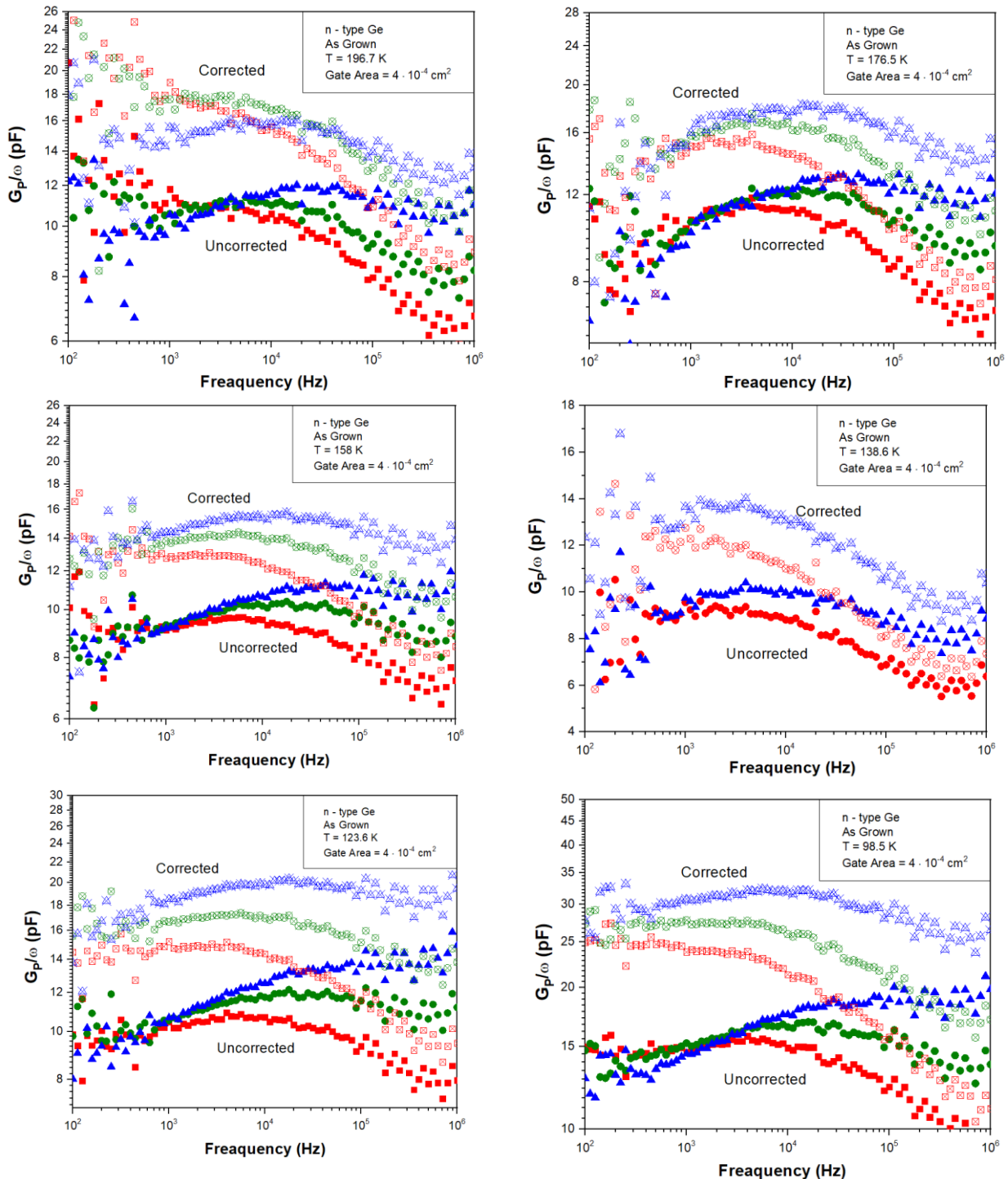


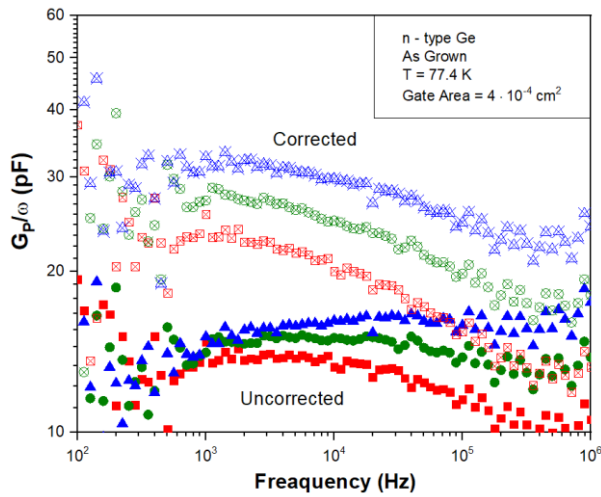
Εικόνα 3.36 :Χαρακτηριστικές καμπύλες $C-V_G$ συναρτήσεως της θερμοκρασίας, του δείγματος $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/n-Ge$.

Από τις χαρακτηριστικές υψηλής συχνότητας παρατηρείται διασπορά της χωρητικότητας στη περιοχή της απογύμνωσης για κάθε θερμοκρασία, γεγονός που υποδεικνύει την ύπαρξη υψηλής πυκνότητας διεπιφανειακών παγίδων. Ακόμη παρατηρείται διασπορά των χαρακτηριστικών στην περιοχή της συσσώρευσης, στις θερμοκρασίες 196.7 K, 176.5 K, 158 K, 138.6 K, 123.6 K. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία το φαινόμενο είναι εντονότερο. Το φαινόμενο αυτό πρέπει να οφείλεται

σε ρεύματα διαρροής του διηλεκτρικού, γεγονός που γίνεται αντιληπτό από τις χαρακτηριστικές αγωγιμότητας-τάσης.

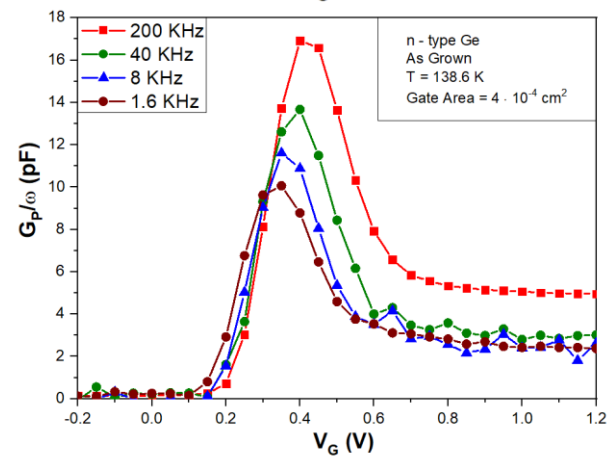
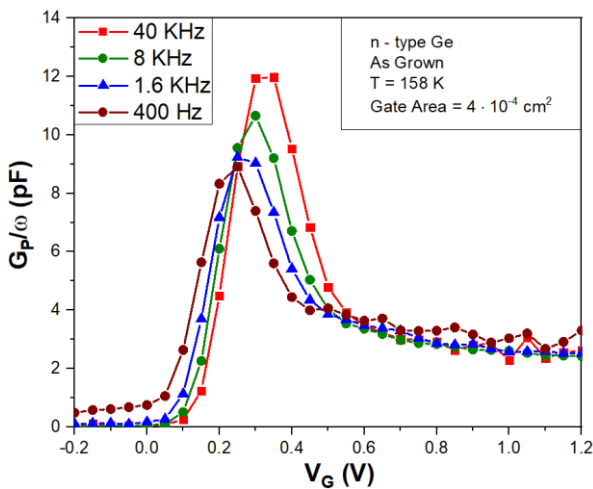
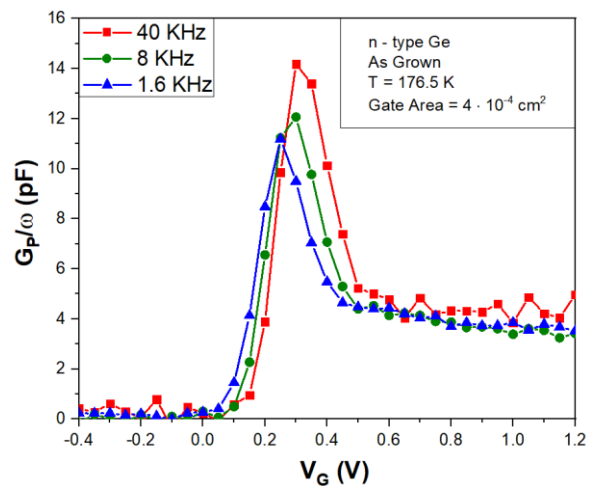
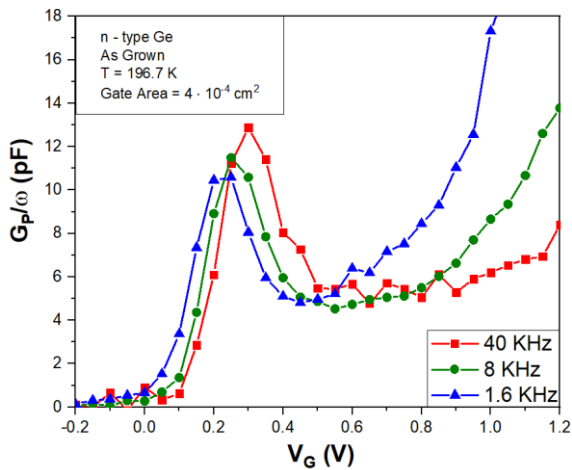
Στην **Εικόνα 3.37** παρατίθενται τα διαγράμματα $G_p/\omega = f(f)$ του δείγματος στις αντίστοιχες θερμοκρασίες με τα διαγράμματα $C-V_G$. Σε κάθε θερμοκρασία φαίνονται οι μετρούμενες συνιστώσες της αγωγιμότητας G_m/ω και οι διορθωμένες συνιστώσες αγωγιμότητας G_p/ω που προκύπτουν μετά την αφαίρεση της σύνθετης αντίστασης της διηλεκτρικής στοίβας. Η διόρθωση έγινε σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 [Ενότητα 2.3.4 (α)].

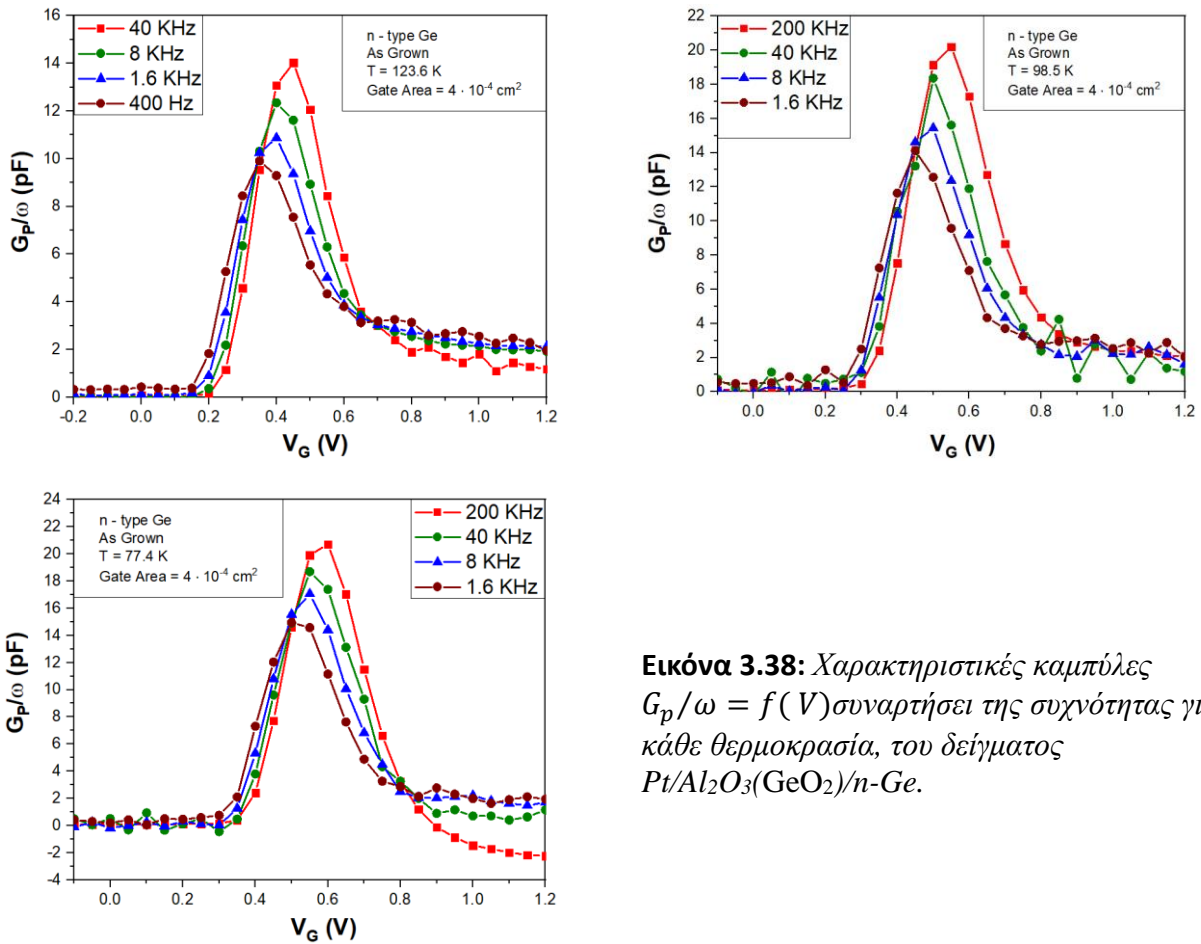




Εικόνα 3.37: Χαρακτηριστικές καμπύλες $G_p/\omega = f(F)$, συναρτήσει της θερμοκρασίας του δείγματος $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/n-Ge$. Στα διαγράμματα διακρίνονται οι μη διορθωμένες συνιστώσες της αγωγιμότητας (*Uncorrected*) με τη συνεισφορά στη αγωγιμότητα από το διηλεκτρικό. Επίσης διακρίνονται οι διορθωμένες (*Corrected*) χωρίς τη συνεισφορά στη αγωγιμότητα από το διηλεκτρικό Η προσομοίωσή των διορθωμένων με γκαουσιανές καμπύλες (*Gauss Fit*), για τον υπολογισμό των διεπιφανειακών παγίδων δεν ήταν εφικτή.

Όπως και στο δείγμα με υπόστρωμα p-type Ge, οι διορθωμένες χαρακτηριστικές G_p/ω δεν γίνεται να προσομοιαστούν με κορυφές τύπου Gauss έτσι χρησιμοποιήθηκαν οι χαρακτηριστικές $G_p/\omega = f(V)$ για δεδομένη συχνότητα, συναρτήσει της θερμοκρασίας για τον υπολογισμό των διεπιφανειακών καταστάσεων. **Εικόνα 3.38**





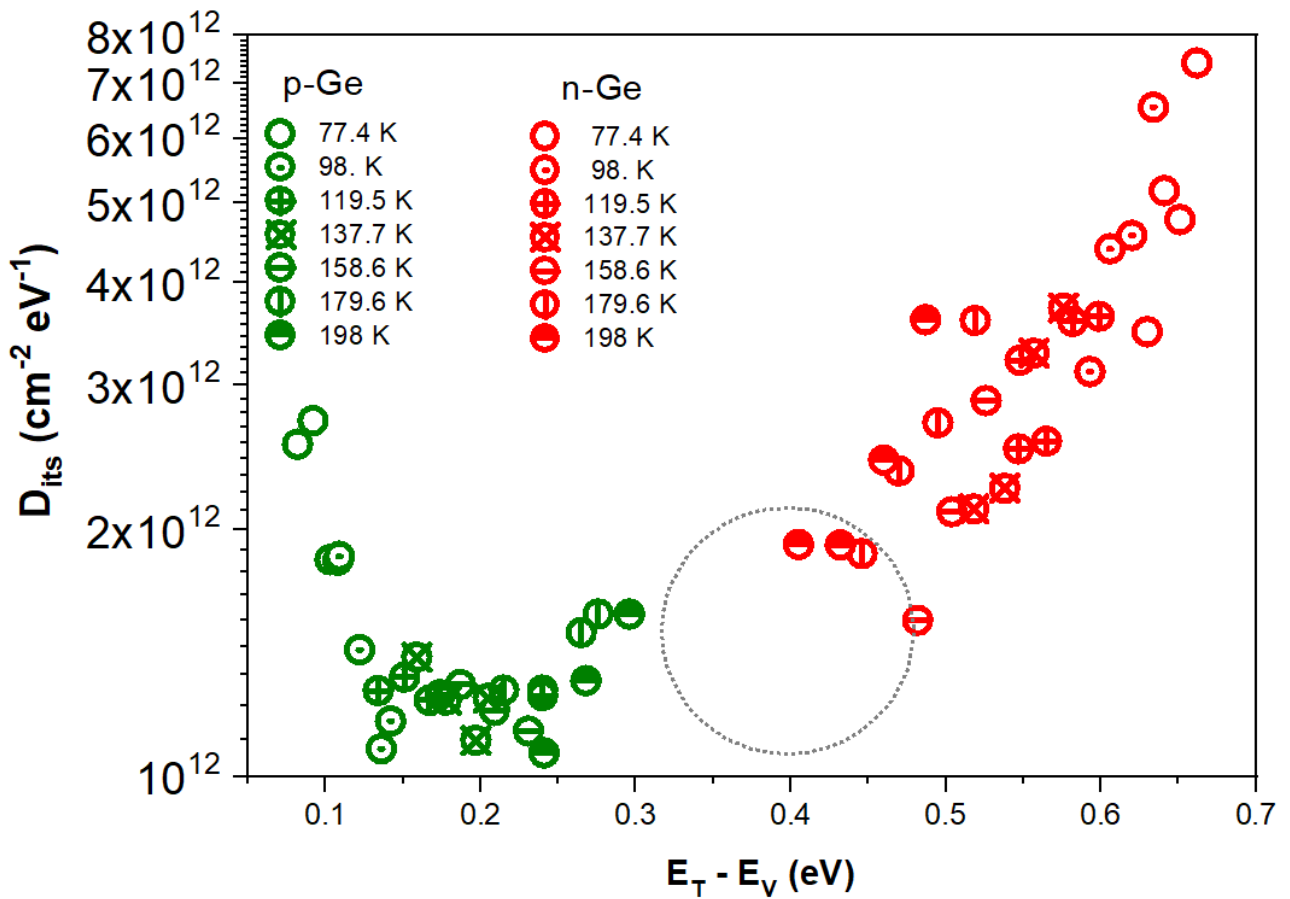
Εικόνα 3.38: Χαρακτηριστικές καμπύλες $G_p/\omega = f(V)$ συναρτήσεως της συχνότητας για κάθε θερμοκρασία, του δείγματος $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/n-Ge$.

Στο Πίνακα 3.6 φαίνονται οι χαρακτηριστικές παράμετροι του δείγματος $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/n-Ge$ συναρτήσεως της θερμοκρασίας όπως υπολογίστηκαν και για τα δείγματα με υπόστρωμα Si.

T (K)	V_{fb} (V)	C_{ox} (pF)	N_b (cm^{-3})	t_{ox} (nm)	E_g (eV)	E_{fc} (eV)	Φ_b (eV)
196.7	0.29	436.2	3.356×10^{15}	7.3	0.699	0.125	0.231
179.6	0.37	406	4.425×10^{15}	7.847	0.705	0.106	0.252
158	0.29	407.7	2.871×10^{15}	7.815	0.712	0.091	0.27
137.7	0.34	416	2.865×10^{15}	7.659	0.718	0.077	0.287
123.6	0.39	414.1	2.893×10^{15}	7.694	0.722	0.067	0.298
98.7	0.45	395.3	3.213×10^{15}	8.06	0.728	0.051	0.317
77.4	0.67	373.5	3.264×10^{15}	8.531	0.733	0.037	0.332

Πίνακας 3.6: Χαρακτηριστικές παράμετροι του δείγματος $Pt/Al_2O_3(GeO_2)/n-Ge$ συναρτήσεως της θερμοκρασίας.

Τελικώς, στην Εικόνα 3.39 παρατίθενται οι γραφικές με την πυκνότητα διεπιφανειακών καταστάσεων και τη θέση τους μέσα στο ενεργειακό χάσμα συναρτήσεως τη θερμοκρασίας για τα δείγματα με υπόστρωμα Ge (n & p type).



Εικόνα 3.40: Κατανομή διεπιφανειακών παγίδων στο ενεργειακό χάσμα του ημιαγωγού των δειγμάτων (*n* & *p* type), συναρτήσει της θερμοκρασίας.

Παρατηρούμε ιδιαίτερα υψηλή πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων ($\sim 7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$) κοντά στο όριο της ζώνης αγωγιμότητας (0.65 eV) σε αντίθεση με τα όρια ζώνη αγωγιμότητας ($< 0.1 \text{ eV}$) όπου παρατηρείται μικρότερη πυκνότητα διεπιφανειακών παγίδων αλλά σημαντικά υψηλή ($\sim 2.8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$).

3.5 ΣΥΝΟΨΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν οι ηλεκτρικές ιδιότητες πυκνωτών MOS υποστρωμάτων πυριτίου και γερμανίου συναρτήσει της θερμοκρασίας (80-350 K). Ο κύριος στόχος της μελέτης αυτής αποτέλεσε η διερεύνηση ενός μάλλον ειδικού φαινομένου των χαρακτηριστικών αγωγιμότητας (G_p/ω -f) ενός πυκνωτή MOS που ήταν **αν υπάρχει εξάρτηση του εύρους της κορυφής της αγωγιμότητας είτε από την θερμοκρασία είτε από την πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων**. Το ερώτημα αυτό τέθηκε από προηγούμενες μελέτες πυκνωτών MOS γερμανίου όπου οι χαρακτηριστικές αγωγιμότητας παρουσίαζαν είτε μεγάλο εύρος είτε ήταν ανεξάρτητες της συχνότητας. Τα ερωτήματα σχετικά με την αιτία του φαινομένου αυτού αυξήθηκαν μετά από την διερεύνηση της σχετικής βιβλιογραφίας όπου βρέθηκε μία μόνο αναφορά του έτους 1976 όπου είχε παρατηρηθεί αύξηση του εύρους των χαρακτηριστικών αγωγιμότητας με την μείωση της θερμοκρασίας σε πυκνωτές MOS υποστρώματος πυριτίου άγνωστου αιτίας. Τονίζεται ότι η αναφορά αυτή έχει αξιοσημείωτη βαρύτητα επειδή οι συγγραφείς (Goetzberger et al (5)) ήταν από τους πρωτοπόρους μελετητές του συστήματος MOS. Η φυσική σημασία της μελέτης εδράζεται στο γεγονός ότι στην μέθοδο αγωγιμότητας η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων D_{it} είναι συνάρτηση τόσο του ύψους της κορυφής $(G_p/\omega)_{max}$ όσο και του εμβαδού της που συνυπολογίζεται μέσω της παραμέτρου f_D . Η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε μελετώντας διστρωματικές διηλεκτρικές δομές MOS επί υποστρώματος πυριτίου με δύο διαφορετικές πυκνότητες διεπιφανειακών παγίδων και έδειξε ότι και στις δύο περιπτώσεις:

1. **δεν βρέθηκε εξάρτηση μεταξύ του εύρους της χαρακτηριστικής αγωγιμότητας είτε από την θερμοκρασία είτε από τη πυκνότητα D_{it}** . Συνεπώς η παρατήρηση των Goetzberger et al (5) δεν μπορεί να έχει καθολική ισχύ. Πιθανώς, τα αποτελέσματα της εργασίας (5) να οφείλονται σε θέματα αξιοπιστίας των υποστρωμάτων πυριτίου καθώς και των διεργασιών και των μέσων που ήταν διαθέσιμα την εποχή εκείνη. Η ανεξαρτησία του εύρους της χαρακτηριστικής αγωγιμότητας είτε από την θερμοκρασία είτε από την πυκνότητα D_{it} σημαίνει και ανεξαρτησία σε μεγάλο βαθμό από τα χαρακτηριστικά της διεπιφάνειας και η αιτία του αυξημένου πλάτους πρέπει να οφείλεται στο διηλεκτρικό που παρουσιάζει ατέλειες που επικοινωνούν ηλεκτρικά με το υπόστρωμα.

Στη συνέχεια της εργασίας αυτής πραγματοποιήθηκαν ηλεκτρικές μετρήσεις σε δομές MOS γερμανίου συναρτήσει της θερμοκρασίας (80-200 K). Στις δομές αυτές πραγματοποιήθηκε οξειδωση της επιφάνειας του γερμανίου με διεργασία πλάσματος. Για την προστασία της

επιφάνειας του γερμανίου καθώς και για τον έλεγχο της οξειδωσης, η διεργασία αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω ενός υπέρλεπτου υμενίου Al_2O_3 (ALD) πάχους 1 nm. Κατά την διάρκεια της διεργασίας ιόντα ατομικού οξυγόνου διαχέονται δια μέσου του υπέρλεπτου υμενίου και οξειδώνουν με ένα ελεγχόμενο (και αργό) τρόπο την επιφάνεια του γερμανίου. Η διεργασία οδηγεί στην ανάπτυξη ενός λεπτού στρώματος GeO_2 που λέγεται ότι βελτιώνει την ποιότητα της διεπιφάνειας του γερμανίου. Η ανάλυση των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών των δομών αυτών έδειξε ότι:

2. Η πλειονότητα των πυκνωτών MOS γερμανίου παρουσιάζουν χαρακτηριστικές αγωγιμότητας ($G_p/\omega - f$) που έχουν είτε αυξημένο εύρος είτε έχουν μία απόκριση που είναι σχεδόν ανεξάρτητη της συχνότητας. Επομένως η ελεγχόμενη διεργασία οξειδωσης πλάσματος δεν έλυσε το πρόβλημα. Υπό το πρίσμα του συμπεράσματος 1, είναι δυνατή η ερμηνεία των αποτελεσμάτων των χαρακτηριστικών αγωγιμότητας στο γερμάνιο ως αποτέλεσμα της ηλεκτρικής επικοινωνίας μεταξύ διεπιφανειακών παγίδων και καταστάσεων στο διηλεκτρικό της δομής MOS.
3. Η πυκνότητα των διεπιφανειακών παγίδων των δομών MOS γερμανίου υπολογίσθηκε με βάση τις χαρακτηριστικές G-V, που σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις σχηματίζουν συμμετρικές κορυφές. Οι τιμές της D_{it} κυμαίνονται γύρω από το $3 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ στο κάτω μισό του ενεργειακού χάσματος, ενώ στο άνω τμήμα του παρουσιάζουν μονότονα αυξητική τάση με τιμές που προσεγγίζουν το $8 \times 10^{12} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ προς την ζώνη αγωγιμότητας.
4. Εντέλει φαίνεται πως οι διεργασίες κατασκευής των πυκνωτών MOS γερμανίου απαιτούν μία διαφορετική προσέγγιση αφού οι τυπικές διεργασίες κατασκευής πυκνωτών MOS πυριτίου δεν μπορούν να μεταφερθούν ως έχουν στο γερμάνιο ιδιαίτερα όταν αυτές εμπλέκουν διηλεκτρικά από οξείδια μετάλλων όπως το Al_2O_3 . Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι η ηλεκτροχημεία της επαφής μετάλλου-οξειδίου του μετάλλου είναι ένα πεδίο στο οποίο η εμπειρία μας είναι μικρή. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι κατά την διεργασία εναπόθεσης πλατίνας ως ηλεκτροδίου πύλης επί διηλεκτρικού Al_2O_3 με διεργασία "lift-off", λόγω της επίδρασης του εμφανιστή που περιέχει TMAH, καταλήγει στο σχηματισμό κράματος Pt-Al (10). Το φαινόμενο αυτό που ήταν μη αναμενόμενο, οδηγεί σε μείωση του πάχους του διηλεκτρικού και σε οριακά λειτουργικές δομές. Τα προαναφερθέντα δεν αποτελούν καλό οιωνό για την πραγματοποίηση τεχνολογίας CMOS γερμανίου.

Βιβλιογραφία

1. **D.K.Schröder**, Semiconductor Material and Device Characterization 3rd ed., John Wiley & Sons Inc., 2006. (p.63)
2. **Y.P.Varshni**, Temperature dependence of the energy gap in semiconductors, Physica, Volume 34, Issue 1967, Pages 149-154
3. **Brews, J.R.**, Rapid Interface Parameterization Using a Single MOS Conductance Curve, Solid State Electronics, **26(8)**, p.711, 1982.
4. **Hauser, J. R.** Bias sweep rate Effects on Quasi static capacitance of MOS Capacitors, IEEE Trans. Electron Dev. 1997, 44, 1009.
5. **A. Goetzberger , E. Klausmann & M. J. Schulz** Interface states on semiconductor/insulator surfaces, Critical Reviews in Solid State and Material Sciences, 6:1, 1-43, 1976
6. **R. Zhang, T. Iwasaki, N. Taoka, M. Takenaka, and S. Takagi**, Appl. Phys. Lett, **98**, art112902, 2011.
7. **R. Zhang, T. Iwasaki, N. Taoka, M. Takenaka, and S. Takagi**, Microelectron. Eng, Vol. 88, p. 1533, 2011.
8. **S. Takagi, T. Maeda, N. Taoka, M. Nishizawa, Y. Morita, K. Ikeda, Y. Yamashita, M,** Microelectronic Engineering, Vol. 84, pp. 2314-2319, 2007.
9. **A. Toriumi, T. Tabata, C. H. Lee, T. Nishimura, K. Kita, and K. Nagashio**, Microelectron. Eng, Vol. 86, p. 1571, 2009.
10. **Vassilios Ioannou-Sougleridis, Stamatios Alafakis, Nikolaos Z. Vouroutzis, Konstantina Mergia, Athanasios Speliotis and Dimitrios Skarlatos** Degradation of Pt-Al₂O₃-Ge Metal Oxide Semiconductor Structures due to Pt-Al₂O₃ Induced Reactions, ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2020