



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ**  
**ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**

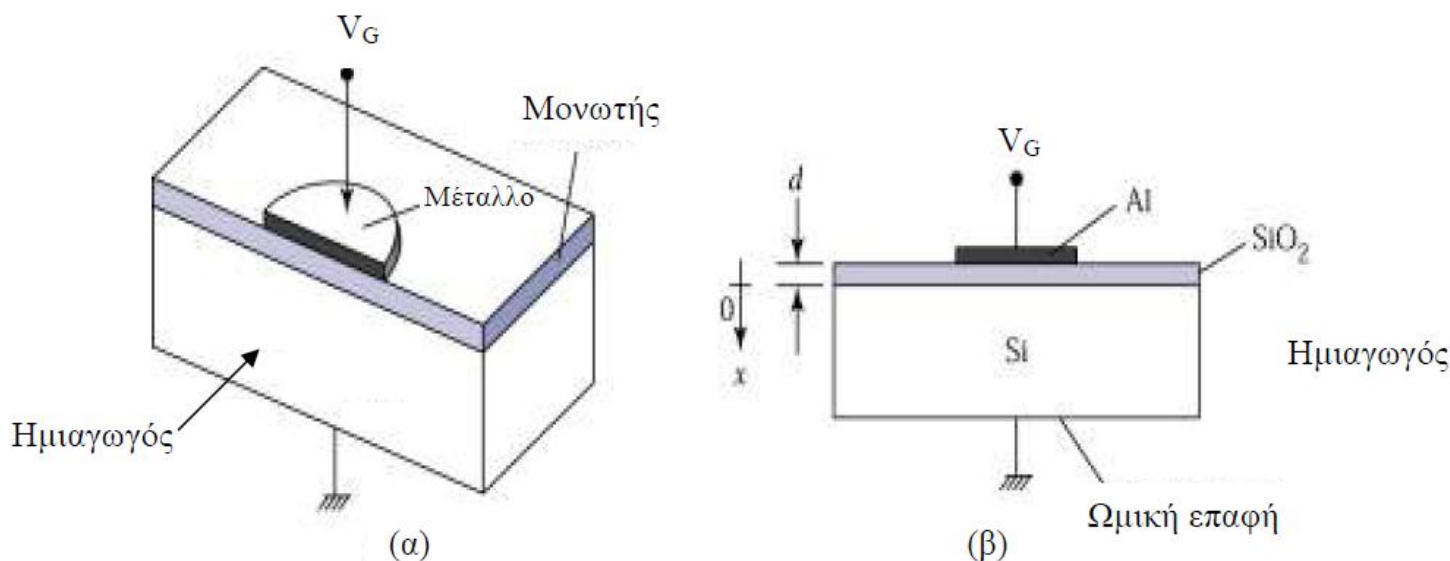
**ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ -**  
**ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ**

**ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ**

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς των διαφόρων υλικών. Όσον αφορά τα συστήματα των ημιαγωγών, με τις ηλεκτρικές μετρήσεις διερευνάται η ηλεκτρική αγωγιμότητα τους, το είδος των φορέων τους και υπολογίζονται διάφορα μεγέθη και παράμετροι, που είναι σημαντικοί τόσο για την κατανόηση των φυσικών φαινομένων, που διέπουν τη συμπεριφορά τους.

## 1. Ο Πυκνωτής Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού

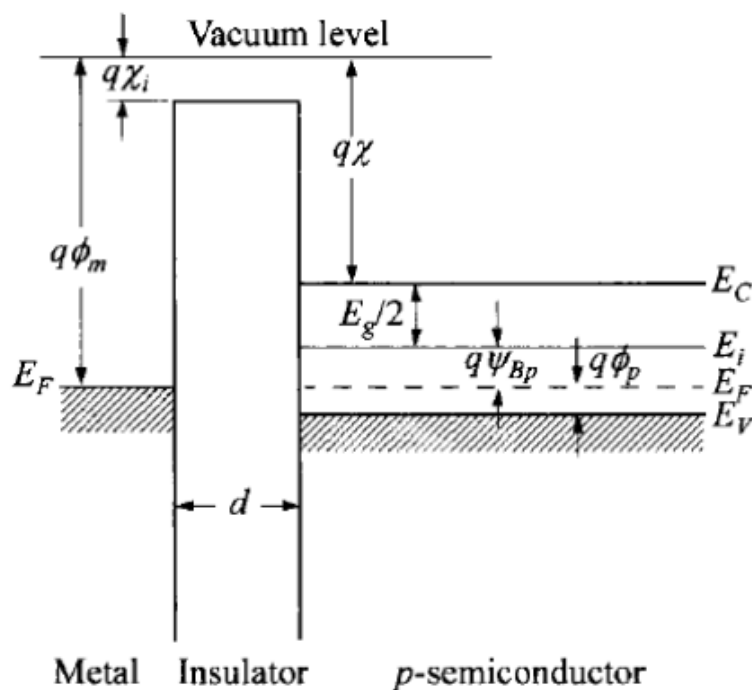
Ένα από τα σημαντικότερα ηλεκτρονικά στοιχεία, που βρίσκουν εφαρμογή τόσο στους σύγχρονους τομείς έρευνας και τεχνολογίας, όσο και στην ίδια τη μελέτη των ημιαγωγικών διατάξεων, είναι η ομάδα πυκνωτών μονωμένης πύλης MIS (Metal – Insulator – Semiconductor). Ουσιαστικά μια δομή MIS είναι ένα σύστημα που αποτελείται από έναν ημιαγωγό (τύπου p ή n), πάνω στον οποίο έχει αναπτυχθεί ένα μονωτικό στρώμα και πάνω από αυτό ένα στρώμα μετάλλου (Σχήμα 1.1). Συνήθως σαν ημιαγωγός χρησιμοποιείται το πυρίτιο (Si), σαν μονωτής το διοξείδιο του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) και σαν μέταλλο το αλουμίνιο (Al) ή το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (poly – Si) εμπλουτισμένο με υψηλής πυκνότητας προσμίξεις. Η διόδος MOS αποτελεί το βασικό στοιχείο των τρανζιστορ επίδρασης πεδίου (MOS Field Effects Transistors, MOSFETs), που κυριαρχούν πλέον στη βιομηχανία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (σε ποσοστό που ανέρχεται σε 92%). Στο Σχήμα 1.1(β) φαίνεται η εγκάρσια τομή ενός πυκνωτή MOS. Ο ημιαγωγός και το μέταλλο αποτελούν τους οπλισμούς του πυκνωτή, ενώ το οξείδιο είναι το διηλεκτρικό του. Στην παρουσίαση αυτή σαν μέταλλο χρησιμοποιείται Al και σαν ημιαγωγός πυρίτιο τύπου p, γιατί η αντίστοιχη δομή εμφανίζεται στο κυρίαρχο σήμερα τρανζίστορ n-MOSFET. Η εξωτερική τάση  $V_G$  θεωρείται ότι εφαρμόζεται στο μέταλλο του πυκνωτή, που ονομάζεται και πύλη (Gate) του πυκνωτή, με το υπόστρωμα γειωμένο.



**Σχήμα 1.1:** (α) Προοπτική άποψη μιας δομής MIS και (β) Εγκάρσια τομή ενός πυκνωτή MOS.

Καθ' όλη τη διάρκεια του κεφαλαίου θα χρησιμοποιήσουμε τη σύμβαση όη η τάση  $V_G$  είναι θετική όταν το μέταλλο πύλης είναι θετικά πολωμένο αναφορικά με το ημιαγώγιμο υπόστρωμα και το υπόστρωμα είναι τύπου p (εάν και η μεταφορά των συμπερασμάτων σε πυκνωτές με υπόστρωμα τύπου n είναι απλή). Το ενεργειακό διάγραμμα για ένα ιδανικό πυκνωτή p-MOS χωρίς πόλωση (δηλαδή σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας) παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.2. Ένας ιδανικός πυκνωτής ορίζεται ως εξής:

1. Τα μόνα φορτία που μπορούν να υπάρξουν στη δομή κάτω από οποιαδήποτε κατάσταση πόλωσης είναι του ημιαγωγού και εκείνα στη μεταλλική επιφάνεια πλευρικά του μονωτή (με αντίθετο πρόσημο). Δηλαδή δεν υπάρχουν παγίδες φορτίου στις διεπιφάνειες μετάλλου – μονωτή και μονωτή – ημιαγωγού ούτε κάποιο είδος φορτίου στο οξειδίο.
2. Δεν υπάρχει μεταφορά φορτίου μέσα από το μονωτή σε συνθήκες συνεχούς (dc) πόλωσης.
3. Για μηδενική πόλωση ισχύει η συνθήκη επίπεδων ζωνών, δηλαδή η στάθμη Fermi του μετάλλου βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τη στάθμη Fermi του ημιαγωγού.



**Σχήμα 1.2:** Ενεργειακό διάγραμμα ενός ιδανικού πυκνωτή MOS σε ισορροπία ( $V_G=0$ ) για ένα p-τύπου ημιαγώγ.

Εάν εφαρμόσουμε στη δίοδο MOS συνεχή τάση  $V_G$ , τότε στην επιφάνεια του μονωτή που είναι σε επαφή με τον ημιαγώγ αναπτύσσονται επαγωγικά φορτία του ίδιου προσήμου με την εξωτερική πόλωση (ιαθώς ο μονωτής δεν επιτρέπει κάτω από κανονικές συνθήκες τη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος δημιουργεί, κατά την εφαρμογή εξωτερικής πόλωσης, αυτά τα φορτία στις διεπιφάνειες του με άλλα υλικά με σκοπό να εξουδετερώσουν τα φορτία της πόλωσης και να διατηρήσουν τη διαφορά δυναμικού στο εσωτερικό του μονωτή μηδέν). Η παρουσία των επαγωγικών φορτίων έχει ως αποτέλεσμα την τροποποίηση

της επιφανειακής συγκέντρωσης των φορέων στις διεπιφάνειες και την κάμψη των ενεργειακών ζωνών. Διακρίνουμε τις ακόλουθες τρεις καταστάσεις εξωτερικής πόλωσης:

#### **α) $V_G < 0$ : Κατάσταση Συσσώρευσης (Accumulation)**

Η κατάσταση που συμβαίνει όταν το υπόστρωμα είναι γειωμένο και μια αρνητική τάση εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο πύλης. Το αρνητικό φορτίο της πύλης αντισταθμίζεται από μια ίση ποσότητα θετικού φορτίου στο υπόστρωμα που συσσωρεύεται στη διεπιφάνεια Si/SiO<sub>2</sub>, με αποτέλεσμα την κάμψη των ενεργειακών ζωνών προς τα πάνω. Αυτή η συσσώρευση συνεχίζεται μέχρι την εξίσωση των δύο φορτίων στις δύο περιοχές.

#### **β) $V_G > 0$ : Κατάσταση Απογύμνωσης (Depletion)**

Μια διαφορετική κατάσταση εξελίσσεται όταν πολώσουμε θετικά το ηλεκτρόδιο πύλης, σε αντιστοιχία με το γειωμένο υπόστρωμα. Το θετικό φορτίο της πύλης πρέπει να εξισορροπηθεί από ένα αρνητικό φορτίο στη διεπιφάνεια Si/SiO<sub>2</sub>. Οι ελεύθερες θετικές οπές απωθούνται από την επιφάνεια του υποστρώματος αποφέροντας μια περιοχή απογυμνωμένη από ελεύθερους φορείς και αρνητικά φορτισμένη (λόγω των ιονισμένων προσμίξεων). Οι ενεργειακές ζώνες στην περιοχή της διεπιφάνειας Si/SiO<sub>2</sub> κάμπτονται προς τα κάτω και η στάθμη Fermi  $E_F$  πλησιάζει το μέσο του ενεργειακού χάσματος  $E_i$ . Η διαδικασία σταματά όπως και προηγουμένως, δηλαδή μέχρι την εξίσωση ίσων ποσοτήτων φορτίων στις δύο περιοχές της διάταξης. Στην περιοχή της επιφάνειας του Si και σε βάθος  $X_d$  το οποίο εξαρτάται από την τιμή της ανάστροφης πόλωσης, οι προσμίξεις αποδεκτών ιονίζονται. Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε ότι η περιοχή απογύμνωσης περιέχει μόνο σταθερά φορτία, όπως τα ιόντα της πρόσμειξης που έχουν καταλάβει μια θέση στο κρυσταλλικό πλέγμα του υποστρώματος, και όχι ευκίνητους φορείς. Η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{sc} = -qN_A X_d \quad (1.1)$$

όπου  $N_A$  είναι η συγκέντρωση αποδεκτών και  $X_d$  το εύρος της περιοχής απογύμνωσης.

#### **γ) $V_G \gg 0$ : Κατάσταση Αντιστροφής (Inversion)**

Όταν εφαρμόζεται ακόμα μεγαλύτερη θετική τάση στην πύλη, η κάμψη των ζωνών είναι αρκετά μεγάλη ώστε η  $E_F$  τέμνει και πηγαίνει πάνω από το ενδογενές επίπεδο Fermi  $E_i$  κοντά στην περιοχή της διεπιφάνειας. Επιπλέον αυξάνεται και το φορτίο  $Q_{sc}$  αφού το πεδίο γίνεται ισχυρότερο και διεισδύει ακόμη περισσότερο στον ημιαγωγό. Κάποια στιγμή γίνεται πιο δύσκολη η συσσώρευση φορτίου  $Q_{sc}$  μέσω της περαιτέρω επέκτασης του στρώματος απογύμνωσης και καθίσταται ενεργειακά προτιμότερη η έλξη ηλεκτρονίων αγωγιμότητας μέσα στο στρώμα απογύμνωσης και η δημιουργία κοντά στην επιφάνεια ενός πολύ λεπτού στρώματος ηλεκτρονίων πλάτους  $X_n$ . Περαιτέρω αύξηση της τάσης δε μεταβάλλει το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης  $X_d$  αλλά αυξάνει τη συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στην περιοχή πάχους  $X_n$ . Ορισμένα από τα ηλεκτρόνια αυτά έλκονται από το κύριο σώμα του ημιαγωγού, όπου ήταν φορείς μειονότητας, τα πιο πολλά όμως από αυτά δημιουργούνται θερμικά από τη ρήξη των δεσμών Si-Si στην

περιοχή απογύμνωσης, με αποτέλεσμα τη δημιουργία ζευγών  $e-h$  και το διαχωρισμό τους από το πεδίο. Η επανασύνδεση των ηλεκτρονίων με άλλους φορείς αποτρέπεται σε μεγάλο βαθμό από το γεγονός ότι το στρώμα απογύμνωσης περιέχει πολύ λίγους φορείς.

Οι ιδιότητες του οξειδίου καθώς και της διεπιφάνειας  $Si/SiO_2$  επηρεάζουν καθοριστικά τις ηλεκτρικές ιδιότητες και τη λειτουργία των κυκλωμάτων που κατασκευάζονται με βάση τη δομή MOS. Για το σκοπό αυτό είναι απαραίτητος ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός τόσο του διοξειδίου  $SiO_2$ , όσο και της επιφάνειας του ημιαγωγού. Ο ηλεκτρικός χαρακτηρισμός μπορεί να γίνει με τη βοήθεια μετρήσεων των χαρακτηριστικών χωρητικότητας – τάσης ( $C - V$ ). Οι μετρήσεις των χαρακτηριστικών  $C - V$  περιλαμβάνουν την περιοχή μικρών σημάτων. Δηλαδή η εφαρμοζόμενη πόλωση αποτελείται από μια συνεχή συνιστώσα πάνω στην οποία υπερτίθεται μια εναλλασσόμενη μικρού πλάτους (της τάξης των  $\frac{k_B T}{q} = 25mV$ ). Στην πράξη η

χωρητικότητα του MOS υπολογίζεται εφαρμόζοντας μία συνεχή (dc) εξωτερική τάση  $V_G$  στα άκρα του, επάνω στην οποία υπερτίθεται μια εναλλασσόμενη τάση (ac), μικρού πλάτους. Η τάση  $V_G$  καθορίζει σε ποια κατάσταση βρίσκεται η δίοδος (συσσώρευση, απογύμνωση, αναστροφή), ενώ η ac συνιστώσα είναι επιφορτισμένη με το να προκαλεί μεταβολές στο φορτίο, ώστε να μετράται η χωρητικότητα του συστήματος σε κάθε περίπτωση πόλωσης.

#### **α) $V_G < 0$ : Κατάσταση Συσσώρευσης**

Η δομή συμπεριφέρεται σαν ένας πυκνωτής, με διηλεκτρικό το οξείδιο πάχους  $x_{ox}$ , διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_i$  και χωρητικότητας ανά μονάδα επιφάνειας  $C_{ac}$ :

$$C_{ac} = C_{ox} = \frac{\epsilon_i}{x_{ox}} (F \cdot cm^{-2}) \quad (1.2)$$

όπου  $\epsilon_i = 4\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του διοξειδίου  $SiO_2$ , και  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-14} F \cdot cm^{-1}$  η διηλεκτρική διαπερατότητα του κενού. Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της συσσώρευσης η χωρητικότητα της διάταξης, που είναι η μέγιστη συνολική χωρητικότητα, είναι ανεξάρτητη από την εξωτερική πόλωση  $V_G$  όπως επίσης και από τη συχνότητα του εναλλασσόμενου σήματος που προκαλεί τις μεταβολές φορτίων.

#### **β) $V_G > 0$ : Κατάσταση Απογύμνωσης**

Η δομή μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με σύστημα δύο πυκνωτών συνδεδεμένων σε σειρά. Η περιοχή απογύμνωσης του ημιαγωγού συμπεριφέρεται σαν διηλεκτρικό χωρητικότητας  $C_d$  που συνδέεται σε σειρά με το διηλεκτρικό  $SiO_2$  χωρητικότητας  $C_{ox}$ . Αν  $C$  η συνολική χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας της δίοδου, τότε θα ισχύει:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d} \Rightarrow C = \frac{C_{ox} C_d}{C_{ox} + C_d} \left( \frac{F}{cm^2} \right) \quad (1.3)$$

και η χωρητικότητα της περιοχής απογύμνωσης θα δίνεται από τη σχέση  $C_d = \frac{\epsilon_s}{X_d}$ , με  $\epsilon_s = 12\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του πυριτίου. Αποδεικνύεται ότι η ολική χωρητικότητα της διάταξης MIS στην κατάσταση απογύμνωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{C} = \sqrt{\frac{1}{C_{ox}^2} + \frac{2V}{qN_A\epsilon_s}} (F \cdot cm^{-2})^{-1} \quad (1.4)$$

Η σχέση αυτή αποτελεί τη θεωρητική έκφραση της χαρακτηριστικής  $C - V$  στην περίπτωση απογύμνωσης και παρατηρούμε πως είναι ανεξάρτητη της συχνότητας του εναλλασσόμενου ρεύματος. Επομένως, για την περίπτωση αυτή ισχύει ότι η συνολική χωρητικότητα μειώνεται με την αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης στην πύλη.

### γ) $V_G > 0$ : Κατάσταση Αντιστροφής

Στην κατάσταση αυτή θα πρέπει να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις εναλλασσόμενης πόλωσης:

#### γ1) Εξωτερικό σήμα υψηλής συχνότητας

Τα φορτία στην επιφάνεια του ημιαγωγού δε μπορούν να «παρακολουθήσουν» τη μεταβολή της υψηλής συχνότητας (1MHz) του εξωτερικού σήματος (Σχήμα 1.3). Στην περίπτωση αυτή ο αριθμός των ηλεκτρονίων στο στρώμα αντιστροφής δεν μπορεί ν' αυξηθεί για μικρές μεταβολές της τάσης στην πύλη, γιατί δεν βρίσκονται άλλα ηλεκτρόνια στο υπόστρωμα ώστε να προστεθούν σ' αυτά του στρώματος αντιστροφής. Έτσι για να ισορροπηθεί το φορτίο της πύλης που μεταβάλλεται αλλάζει το φορτίο της περιοχής απογύμνωσης. Και σε αυτή την περίπτωση έχουμε σύστημα δύο πυκνωτών σε σειρά με συνολική χωρητικότητα  $C_{inv}$  που δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{C_{inv}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_d} \quad (1.5)$$

Όταν η αντιστροφή είναι ισχυρή, η περιοχή απογύμνωσης αποκτά το μέγιστο βάθος  $x_{dmax}$  και η αντίστοιχη πυκνότητα φορτίου χώρου είναι  $qN_A x_{dmax}$ . Η ελάχιστη εξωτερική πόλωση που απαιτείται για την περίπτωση αυτή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$V_T = \frac{qN_A x_{dmax}}{C_{ox}} + \Psi_{S,inv} = \frac{\sqrt{2\epsilon_s qN_A (2\Psi_B)}}{C_{ox}} + 2\Psi_B = \frac{\sqrt{2\epsilon_s qN_A (2\Psi_B)}}{C_{ox}} + \frac{2k_B T}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right) \quad (1.6)$$

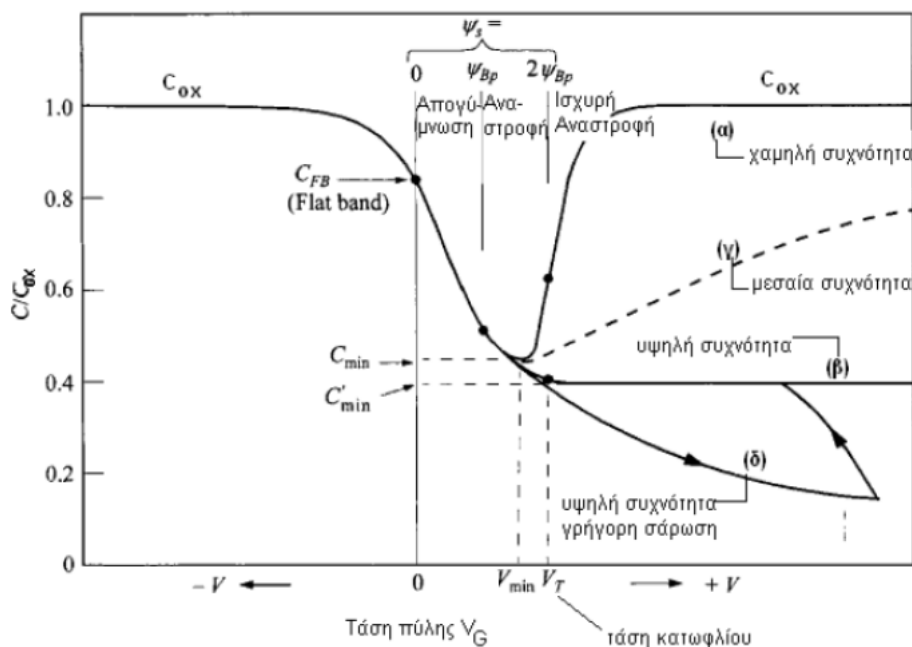
Η τιμή αυτή της πόλωσης καλείται τάση κατωφλίου (threshold voltage) για την οποία η αντίστοιχη χωρητικότητα της διάταξης παίρνει την ελάχιστη τιμή. Η τάση κατωφλίου είναι ένα κρίσιμο μέγεθος για τη λειτουργία των κυκλωμάτων που βασίζονται στην τεχνολογία MOS, διότι οι μεταβολές της επηρεάζουν σημαντικά τις χαρακτηριστικές των transistors MOSFET.

## γ2) Εξωτερικό σήμα χαμηλής συχνότητας

Λόγω της χαμηλής συχνότητας του σήματος, η μεταβολή των εξωτερικών φορτίων μπορεί να αντισταθμιστεί από τη μεταβολή των φορτίων του στρώματος αντιστροφής. Στις χαμηλές συχνότητες (5 - 100 Hz) προλαβαίνουν να δημιουργηθούν ηλεκτρόνια στο υπόστρωμα τα οποία εμπλουτίζουν το στρώμα αντιστροφής, το οποίο ακολουθεί τις μεταβολές στην πύλη. Στην περίπτωση που έχουμε γρήγορο ρυθμό μεταβολής της τάσης για υψηλή συχνότητα δεν παρατηρείται δημιουργία στρώματος αναστροφής, αλλά εμφανίζεται το φαινόμενο της βαθιάς απογύμνωσης (deep depletion). Σ' αυτή την περίπτωση δεν προλαβαίνουν να δημιουργηθούν ηλεκτρόνια αντιστροφής και το πλάτος της περιοχής απογύμνωσης ξεπερνάει τη μέγιστη τιμή του με την ολοένα αυξανόμενη τάση πύλης. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η μεγαλύτερη μείωση της χωρητικότητας κάτω από το  $C_{min}$ . Στην περίπτωση αυτή η περιοχή απογύμνωσης δεν επηρεάζει την διάταξη και η ολική χωρητικότητα ισούται με αυτή του οξειδίου:

$$C_{inv} = C_{ox} = \frac{\epsilon_i}{x_0} \quad (1.7)$$

Και εδώ παρατηρούμε πως η χωρητικότητα  $C_{inv}$  της διάταξης είναι ανεξάρτητη της πόλωσης  $V$  και της συχνότητας του σήματος. Στο Σχήμα 1.3 φαίνεται η χαρακτηριστική C-V για τις διάφορες καταστάσεις πόλωσης μιας ιδανικής διόδου MOS.

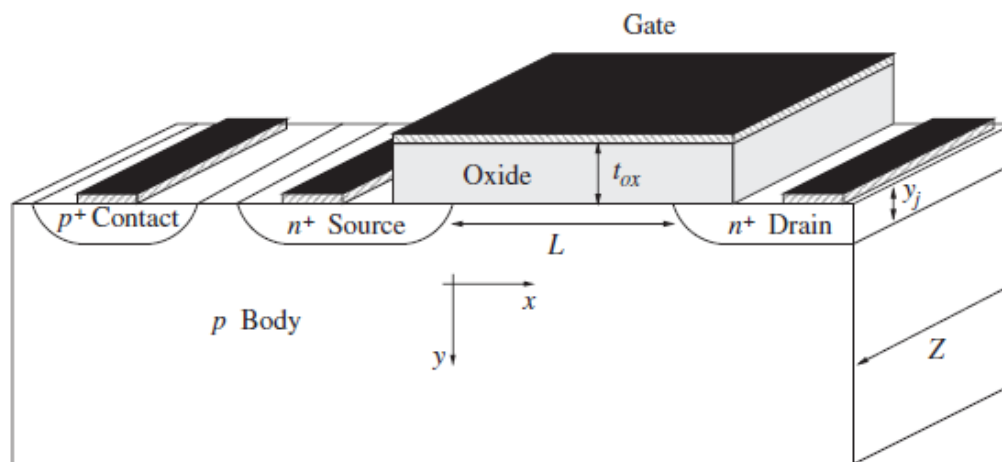


**Σχήμα 1.3:** Η εξάρτηση της καμπύλης χωρητικότητας – τάσης με την συχνότητα για έναν ιδανικό πυκνωτή MOS.

Μια πραγματική διόδος MOS περιέχει φορτία ή προσμίξεις τόσο στο εσωτερικό του οξειδίου της όσο και στην περιοχή της διεπιφάνειας Si/SiO<sub>2</sub>. Η είσοδος των προσμίξεων αυτών πραγματοποιείται κυρίως κατά τη διάρκεια των διαδικασιών της ανάπτυξης του οξειδίου. Η παρουσία αυτών των φορτίων προκαλεί μετατόπιση της χαρακτηριστικής C-V και της τάσης κατωφλίου της διάταξης MOS.

## 2. Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου MOSFET

Το MOS τρανζίστορ ή MOSFET ή κρυσταλλοτρίοδος είναι ένα τρανζίστορ επίδρασης πεδίου, (Field Effect Transistor), όπως δηλώνει το δεύτερο συνθετικό του ονόματός του. Είναι τρανζίστορ απομονωμένης εισόδου, γι' αυτό και αναφέρεται στη βιβλιογραφία και ως IGFET (Insulated Gate Field Effect Transistor). Η ηλεκτρική συμπεριφορά του είναι παρόμοια με αυτήν του JFET (Junction Field Effect Transistor). Η δομή, ωστόσο, των δύο τρανζίστορ είναι διαφορετική. Προτάθηκε το 1952 από τον Shokley. Ωστόσο, παρόλο που η δομή του MOSFET είναι απλούστερη τόσο του JFET όσο και του διπολικού τρανζίστορ BJT, η τεχνολογία ανάπτυξης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με MOS καθυστέρησε μέχρι το 1969, διότι χρειάστηκε να ξεπεραστούν κάποιες τεχνικές δυσκολίες. Έκτοτε, ο σχεδιασμός ψηφιακών, αρχικά και κατόπιν αναλογικών MOS κυκλωμάτων, προχώρησε με πολύ γρήγορους ρυθμούς. Τα κυκλώματα με MOS τρανζίστορ παρουσιάζουν πολύ χαμηλή κατανάλωση ισχύος συγκριτικά με αντίστοιχα κυκλώματα με διπολικά τρανζίστορ, όμως, υστερούν ως προς την ταχύτητα λειτουργίας τους. Επίσης, οι διαστάσεις κατασκευής MOS τρανζίστορ, σε ολοκληρωμένη μορφή, είναι κατά πολύ μικρότερες των διπολικών τρανζίστορ, γεγονός που καθιστά την MOS τεχνολογία πολύ ελκυστική για κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Το MOSFET είναι ένα «σάντουιτς» τριών υλικών, μετάλλου – οξειδίου – ημιαγωγού, όπως υποδεικνύεται στο Σχήμα 2.1. Η δομή αυτή δικαιολογεί την επικρατούσα ονομασία του στοιχείου ως MOSFET (**M**etal **O**xide **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor) ή απλώς MOS τρανζίστορ. Η κατασκευή του MOSFET γίνεται με διαδοχική επίπεδη διαστρωμάτωση υλικών (planar process), με φωτολιθογραφικές διεργασίες. Στο Σχήμα 2.1 διακρίνουμε το ημιαγωγίμο υλικό, το οποίο είναι ελαφρώς νοθευμένο Si τύπου p, (εάν πρόκειται για τρανζίστορ διαύλου n, δηλαδή nMOS), που αποτελεί το υπόστρωμα (substrate), πάνω στο οποίο δομείται το τρανζίστορ.



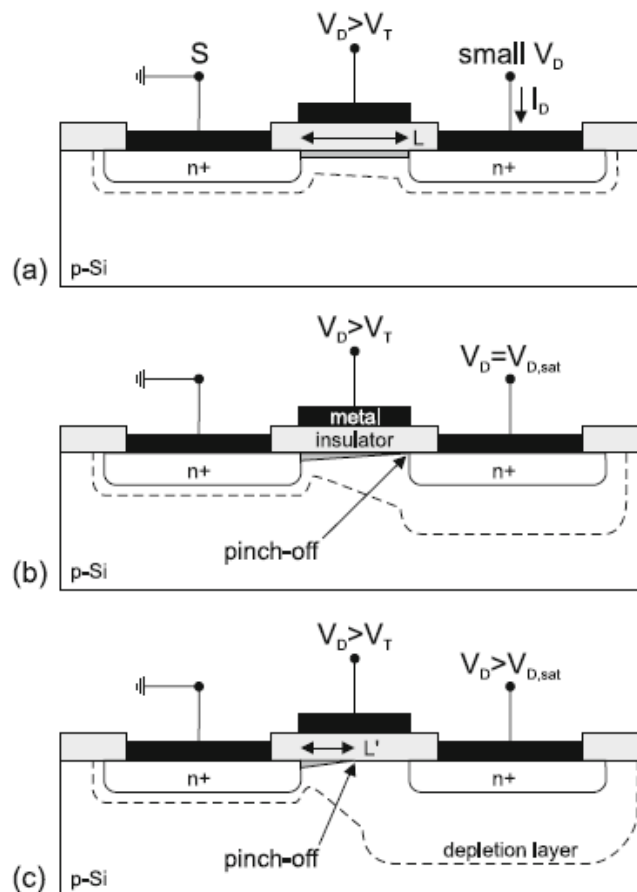
**Σχήμα 2.1:** Δομή MOSFET διαύλου n, σε τομή. Διακρίνονται οι περιοχές της πηγής, της πύλης, της υποδοχής και του υποστρώματος. Οι γκριζες περιοχές δηλώνουν ωμικές επαφές με το υπόστρωμα.

Πάνω στο υπόστρωμα δημιουργούνται, με διάχυση ή άλλες τεχνικές, δυο περιοχές ισχυρής νόθευσης, τύπου n+, σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ των περιοχών διάχυσης

καθορίζεται από την τεχνολογία κατασκευής, (π.χ. 0.18μm process). Οι περιοχές αυτές αποτελούν τον απαγωγό D (drain) και την πηγή S (source) του τρανζίστορ. Από κατασκευαστική άποψη δεν υπάρχει διάκριση μεταξύ απαγωγού και πηγής, αφού το MOS τρανζίστορ είναι συμμετρικό στη δομή του, σε αντίθεση με το BJT. Πάνω στο υπόστρωμα και μεταξύ των δυο περιοχών διάχυσης, εναποτίθεται λεπτό στρώμα μονωτικού υλικού, συνήθως, διοξειδίου του πυριτίου, SiO<sub>2</sub>. Στη συνέχεια της διεργασίας, πάνω από το μονωτικό υλικό εναποτίθεται αγωγίμο μεταλλικό υλικό. Το μέταλλο αποτελεί την πύλη G (Gate) του τρανζίστορ. Αρχικά οι δομές MOSFET χρησιμοποιούσαν μεταλλική πύλη, κανάλι πυριτίου και διοξείδιο του πυριτίου ως μονωτικό στρώμα. Στη συνέχεια, οι μεταλλικές πύλες αντικαταστάθηκαν από πύλες πολυκρυσταλλικού πυριτίου (γενιά κόμβων πύλης των 65nm) και οι πιο εξελιγμένες τεχνολογίες έκαναν χρήση οξυνιτριδίου του πυριτίου ως μονωτικού υλικού αντί του διοξειδίου του πυριτίου. Οι μεταλλικές πύλες επανέρχονται στο προσκήνιο σε συνδυασμό με τη χρήση διηλεκτρικών υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς ως μονωτικών πύλης, στις τεχνολογίες πύλης των 45nm και κάτω. Ο κοινός τόπος μεταξύ των περιοχών διάχυσης και πύλης καθορίζει τη γεωμετρία του τρανζίστορ, όπου με L χαρακτηρίζεται το μήκος του διαύλου του τρανζίστορ και με W χαρακτηρίζεται το εύρος του διαύλου. Για δεδομένη τεχνολογία κατασκευής, η γεωμετρία του τρανζίστορ είναι αυτή που καθορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά του στοιχείου, γι' αυτό και ο λόγος  $a = \frac{W}{L}$  (aspect ratio) αποτελεί τη μοναδική σχεδιαστική παράμετρο, (design parameter), κατά το σχεδιασμό ολοκληρωμένων MOS κυκλωμάτων.

Για την καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του MOSFET, θα εξετάσουμε διαδοχικά τη συμπεριφορά του σε διαφορετικές συνθήκες πόλωσης, που απεικονίζονται στο Σχήμα 2.2. Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρούμε το υπόστρωμα B του τρανζίστορ καθώς και την πηγή S συνδεδεμένα προς τη γη. Η κεντρική ιδέα της λειτουργίας των MOSFET είναι η ακόλουθη: Η εφαρμογή μιας διαφοράς δυναμικού μεταξύ πύλης και πηγής δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο το οποίο διαπερνά το διηλεκτρικό της πύλης και δημιουργεί (MOSFET προσαύξεσης) ή τροποποιεί (MOSFET διακένωσης) ένα στρώμα αναστροφής. Το στρώμα αναστροφής έχει αντίθετο τύπο αγωγιμότητας από αυτό του υποβάθρου και ταυτόσημο με αυτό των διαχύσεων σε πηγή και απαγωγό. Εάν όλοι οι ακροδέκτες του τρανζίστορ βρίσκονται σε μηδενικό δυναμικό, το τρανζίστορ βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Στην κατάσταση αυτή σχηματίζονται δυο δίοδοι μεταξύ των περιοχών υψηλής νόθευσης n<sup>+</sup> και του υποστρώματος. Σε κάθε μια δίοδο διακρίνεται η περιοχή εκκένωσης φορέων. Επομένως, λόγω της παρουσίας των περιοχών αυτών, ο απαγωγός D και η πηγή S του τρανζίστορ βρίσκονται σε ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ τους και άρα I<sub>DS</sub>=0. Όταν το θετικό δυναμικό της πύλης ξεπεράσει κάποια τιμή, V<sub>GS</sub>>V<sub>T</sub>, τότε, η περιοχή του υποστρώματος κάτω από την πύλη αναστρέφεται, δηλαδή, από ημιαγωγός τύπου-p μετατρέπεται σε ημιαγωγό τύπου - n, (Σχήμα 2.2(a)). Επομένως, ένας αγωγίμος διάυλος τύπου - n σχηματίζεται μεταξύ απαγωγού D και πηγής S. Το όριο δυναμικού της πύλης, πάνω από το οποίο προκαλείται η αναστροφή στους φορείς αγωγιμότητας στο τμήμα του ημιαγωγού κάτω από την πύλη, ονομάζεται δυναμικό κατωφλίου και συμβολίζεται ως V<sub>T</sub>. Μετά τη δημιουργία του αγωγίμου διαύλου, ρεύμα θα ρέει δι' αυτού, εφ' όσον υπάρξει διαφορά δυναμικού μεταξύ του απαγωγού και της πηγής. Το ρεύμα διαμέσου του διαύλου αγωγιμότητας, είναι ρεύμα ηλεκτρονίων.

Τρανζίστορ αυτού του τύπου ονομάζονται τρανζίστορ διαύλου-n ή NMOS. Με ανάλογο τρόπο αναπτύσσονται και τρανζίστορ διαύλου-p ή PMOS. Σ' αυτά φορείς αγωγιμότητας είναι οι οπές. Είναι, ωστόσο, χαρακτηριστικό ότι, το MOSFET είναι μονοπολικό τρανζίστορ, (unipolar), αφού το ρεύμα δι' αυτού συνίσταται από ένα είδος φορέων. Η μορφή του διαύλου αγωγιμότητας εξαρτάται από το δυναμικό του απαγωγού. Για μικρά θετικά δυναμικά απαγωγού,  $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ , η μορφή του διαύλου είναι σχεδόν ομοιόμορφη, (Σχήμα 2.2(a)), το δε ρεύμα  $I_{DS}$  δια του διαύλου μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την τάση  $V_{DS}$ . Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι, το τρανζίστορ λειτουργεί στην ωμική του περιοχή (ohmic or linear region).



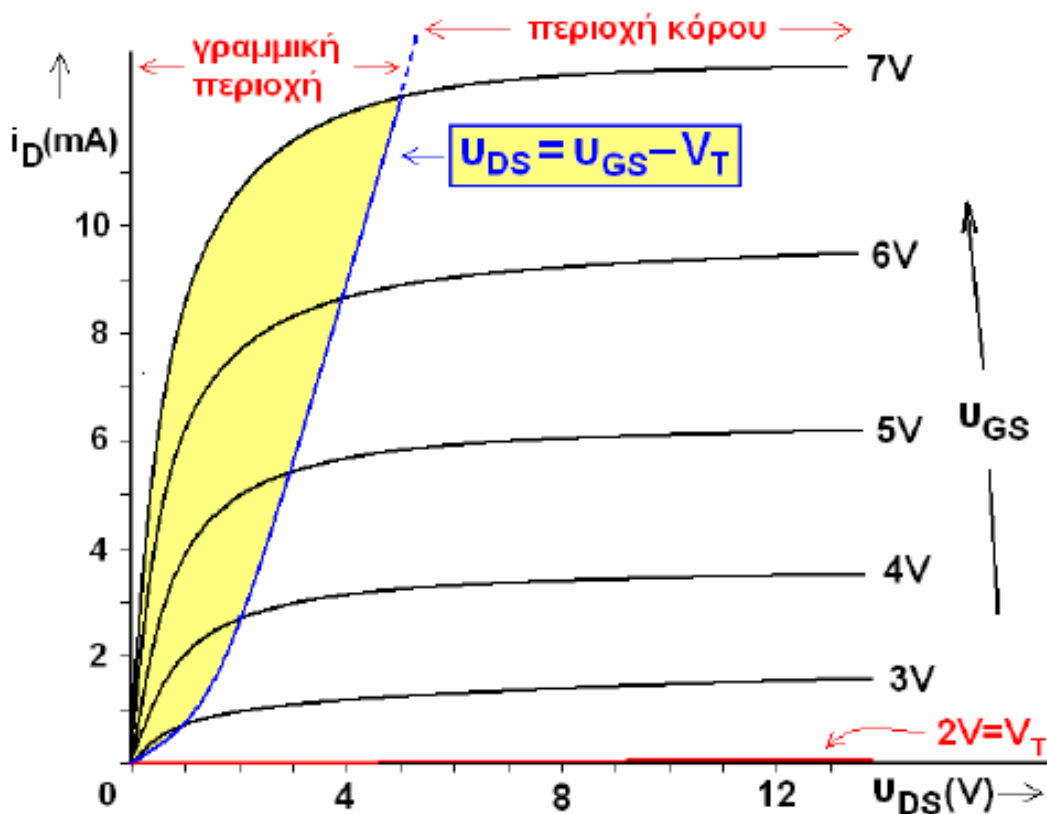
**Σχήμα 2.2:** (a) MOSFET προσυζήσης n - καναλιού (enhancement NMOS). Δημιουργία του n-καναλιού όταν η θετική τάση  $V_{GS}$  ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου  $V_T$ , (b) Τροποποίηση της μορφής του καναλιού υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού  $V_{DS}$  μεταξύ απαγωγού και πηγής και (c) Κατάσταση κορεσμένης αγωγιμότητας (saturated conduction).

Καθώς το δυναμικό του απαγωγού αυξάνεται, το εύρος του διαύλου αλλάζει, δηλαδή, γίνεται πιο ευρύ στην περιοχή της πύλης και στενότερο στην περιοχή του απαγωγού. Αυτό οφείλεται στο ότι, η διαφορά δυναμικού μεταξύ πύλης G και του υποστρώματος B του ημιαγωγού είναι μεγαλύτερη στην περιοχή της πηγής απ' ότι, στην περιοχή του απαγωγού. Για συγκεκριμένη τιμή της  $V_{GS}$  υπάρχει μια οριακή τιμή της  $V_{DS}$ ,  $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ , πέραν της οποίας το εύρος του διαύλου στην περιοχή του απαγωγού στραγγαλίζεται

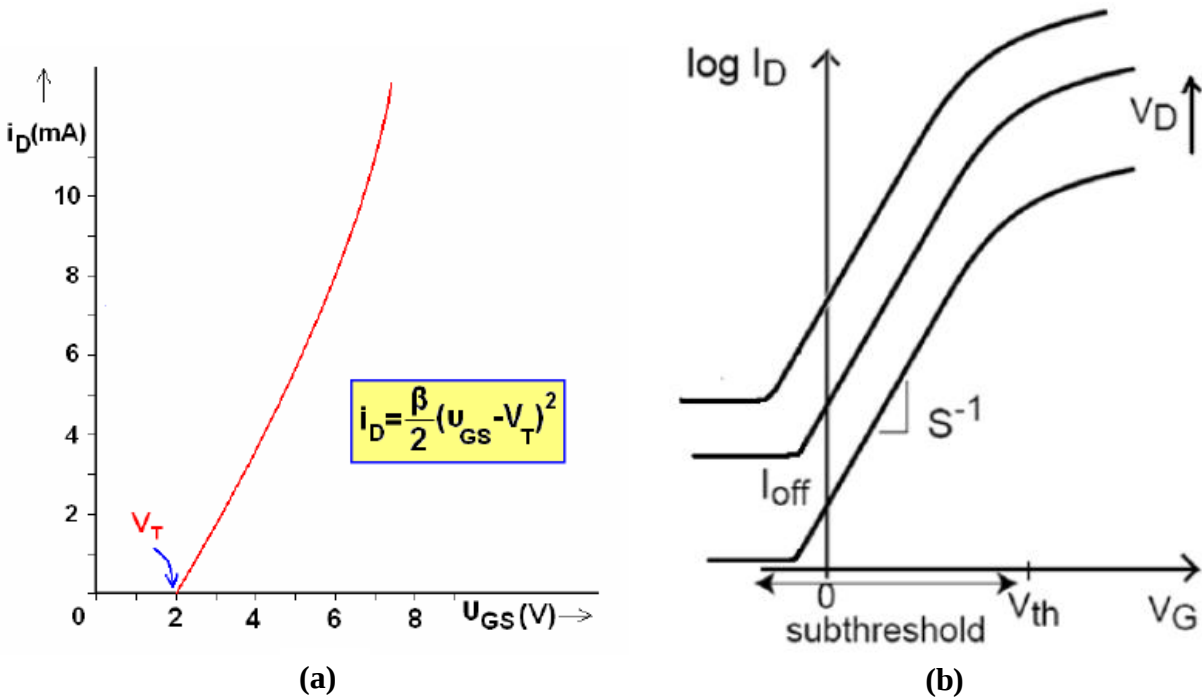
(pinch off), (Σχήμα 2.2(b)). Στην κατάσταση αυτή, το ρεύμα δια μέσω του διαύλου παραμένει σχεδόν σταθερό ανεξάρτητα από την τάση του απαγωγού, (Σχήμα 2.3). Τότε λέμε ότι, το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή του κόρου, (saturation region). Μεγαλύτερες τιμές της  $V_{DS}$ , πέραν της οριακής τιμής, μειώνουν το ενεργό μήκος του διαύλου, με συνέπεια μια μικρή γραμμική αύξηση του ρεύματος του απαγωγού  $I_D$  (Σχήμα 2.2(c)). Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως διαμόρφωση του μήκους του διαύλου (channel length modulation) και δικαιολογεί την κλίση της χαρακτηριστικής  $I_{DS} - V_{DS}$  του MOSFET στην περιοχή του κόρου, (Σχήμα 2.3).

Στα Σχήματα 2.3 & 2.4 παρουσιάζονται οι χαρακτηριστικές ρεύματος του MOSFET προσαύξησης. Ο γεωμετρικός τόπος που χωρίζει τη μη κορεσμένη αγωγιμότητα από την κορεσμένη στο Σχήμα 2.3 αντιστοιχεί στα σημεία εκείνα για τα οποία κλείνει ο δίαυλος στον απαγωγό, και κατά συνέπεια ισχύει:

$$V_{GD} = V_T \Rightarrow V_{GS} - V_{DS} = V_T \Rightarrow V_{DS} = V_{GS} - V_T \quad (2.1)$$



**Σχήμα 2.3:** Χαρακτηριστικές  $I_{ds} - V_{ds}$  MOSFET προσαύξησης για αυξανόμενες τάσεις πύλης.



**Σχήμα 2.4:** (a) Χαρακτηριστική μεταφοράς  $I_{ds} - V_{gs}$  MOSFET προσαύξησης. Η χαρακτηριστική μεταφοράς υπολογίζεται για σταθερή τιμή της  $V_{ds}$ , (b) Η χαρακτηριστική καμπύλη  $I_{ds} - V_{gs}$  για αυξανόμενες τάσεις  $V_{ds}$  σε ημιλογαριθμική κλίμακα.

Γενικά για το ρεύμα στις τρεις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του MOSFET προσαύξησης n - καναλιού ισχύουν τα ακόλουθα (σύμφωνα με την προσέγγιση φύλλου – φορτίου):

### 1. Περιοχή αποκοπής (cut - off ή sub - threshold περιοχή).

Στην περιοχή αυτή, που αντιστοιχεί σε  $V_{GS} < V_T$ , ο διάυλος κλείνει στη θέση της πηγής (δε σχηματίζεται δηλαδή καθόλου διάυλος) και το ρεύμα που ρέει μεταξύ πηγής και απαγωγού στην ιδανική περίπτωση είναι μηδέν. Στην πραγματικότητα όμως, λόγω του ότι οι ενέργειες των ηλεκτρονίων ακολουθούν την κατανομή Boltzmann, υπάρχουν πάντα κάποια ενεργητικά ηλεκτρόνια στην πηγή που εισέρχονται στην p-περιοχή και φτάνουν στον απαγωγό δημιουργώντας ένα ρεύμα διαρροής (sub - threshold leakage) που είναι εκθετική συνάρτηση της τάσης  $V_{GS}$ . Αυτό το ρεύμα δίνεται από τον τύπο:

$$I_{d,sub} = e^{\frac{q(V_g - V_T)}{k_B T}} \quad (2.2)$$

Για την περιοχή αποκοπής μια σημαντική παράμετρος είναι η αντίστροφη κλίση  $S$  της καμπύλης  $\log I_{DS} - V_{GS}$  (Σχήμα 2.4(b)). Χαρακτηριστικό είναι πως η ποσότητα αυτή αυξάνεται με την αύξηση των διεπιφανειακών καταστάσεων-παγίδων μεταξύ Si/SiO<sub>2</sub>. Το sub - threshold swing υπολογίζεται από τη σχέση:

$$S = \left[ \frac{d \log(I_{DS})}{d V_{GS}} \right]^{-1} \left( \frac{mV}{decade} \right) \quad (2.3)$$

## 2. Περιοχή τριόδου ή γραμμικής λειτουργίας.

Οι συνθήκες για να βρεθεί το MOSFET σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας είναι:  $V_{GS} > V_T$  και  $V_{DS} < V_{GS} - V_T$ . Το τρανζίστορ αρχίζει να λειτουργεί καθώς τώρα δημιουργείται ένα n - τύπου κανάλι που συνδέει πηγή και απαγωγό και επιτρέπει τη ροή ρεύματος μεταξύ των δύο αυτών περιοχών. Στην περιοχή αυτή το MOSFET συμπεριφέρεται σαν μια αντίσταση ελεγχόμενη από τάση. Μια αντίσταση που ελέγχεται τόσο από την τάση  $V_{DS}$  όσο και από την τάση  $V_{GS}$ . Λόγω αυτής της εξάρτησης, το ρεύμα  $I_{DS}$  που διαρρέει το κανάλι θα γράφεται σαν συνάρτηση των τάσεων  $V_{DS}$  και  $V_{GS}$ :

$$\begin{aligned} I_{DS} &= \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] = \\ &= \frac{\mu_n \epsilon}{t_{ox}} \frac{W}{L} \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] = \\ &= \beta \left[ (V_{GS} - V_T) V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right] \end{aligned} \quad (2.4)$$

όπου  $\mu_n$  ευκινησία των ελευθέρων φορέων,  $\epsilon$  η ηλεκτρική διαπερατότητα του οξειδίου,  $C_{ox}$  η χωρητικότητα της πύλης ανά μονάδα επιφάνειας,  $t_{ox}$  το πάχος του μονωτικού οξειδίου πύλης,  $W$  το εύρος του καναλιού (Σχήμα 2.1),  $L$  το μήκος του καναλιού,  $V_T$  η τάση κατωφλίου  $V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4eqN_A\psi_B}}{C_{ox}}$  και  $\beta$  ο παράγοντας ενίσχυσης (gain factor) του MOS τρανζίστορ.

## 3. Περιοχή κόρου (saturation).

Οι συνθήκες για να βρεθεί το MOSFET σε αυτήν την περιοχή λειτουργίας είναι:  $V_{GS} > V_T$  και  $V_{DS} > V_{GS} - V_T$ . Το κανάλι - όπως ήδη προαναφέρθηκε - είναι εν μέρει σχηματισμένο. Καλύπτει ένα συγκεκριμένο κλάσμα του συνολικού μήκους  $L$  του εν δυνάμει καναλιού, από την πηγή μέχρι ένα μήκος  $L'$ , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2(c), ενώ στο υπόλοιπο τμήμα μέχρι τον απαγωγό είναι κλειστό. Το ρεύμα κάτω από αυτές τις συνθήκες μπορεί να θεωρηθεί σε πρώτη προσέγγιση ανεξάρτητο της τάσης  $V_{DS}$ :

$$I_{DS} = \frac{\mu_n C_{ox}}{2} \frac{W}{L} [(V_{GS} - V_T)^2] = \frac{\beta}{2} [(V_{GS} - V_T)^2] \quad (2.5)$$

Οι εξισώσεις (2.4) και (2.5) ισχύουν και για PMOS τρανζίστορ με τη διαφορά ότι πρέπει ρεύματα και τάσεις έχουν αντίθετο πρόσημο και η ευκινησία των ηλεκτρονίων,  $\mu_n$ , να αντικατασταθεί από την ευκινησία των οπών,  $\mu_p$ .

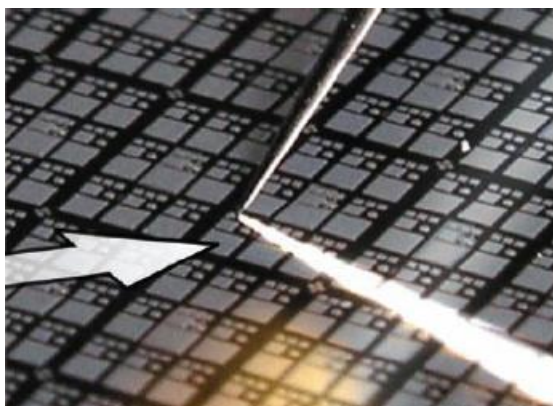
### **3. Πειραματικό Μέρος**

Για τον ηλεκτρικό χαρακτηρισμό των παρασκευασθέντων MOS πυκνωτών χρησιμοποιήθηκαν τα εξής μετρητικά όργανα:

α) Αναλυτή σύνθετης αντίστασης (impedance analyzer) τύπου Agilent 4284A (pF) με το οποίο γίνεται μέτρηση της χωρητικότητας (C) καθώς και της διαγωγιμότητας (G) συναρτήσει της εφαρμοζόμενης τάσης πύλης ( $V_{gate}$ ) (καμπύλες C-V και G-V). Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιούνται για ένα πλήθος συχνοτήτων εναλλασσομένου ρεύματος από συχνότητα  $f=1\text{kHz}$  έως  $1\text{MHz}$ . Το πλάτος του εναλλασσομένου ρεύματος σε όλες τις μετρήσεις είναι σταθερό και ίσο με  $25\text{mV}_{p-p}$ . Το συγκεκριμένο όργανο είναι εφοδιασμένο με εσωτερική πηγή τάσης η οποία εφαρμόζεται στην πύλη ( $V_{gate}$ ).

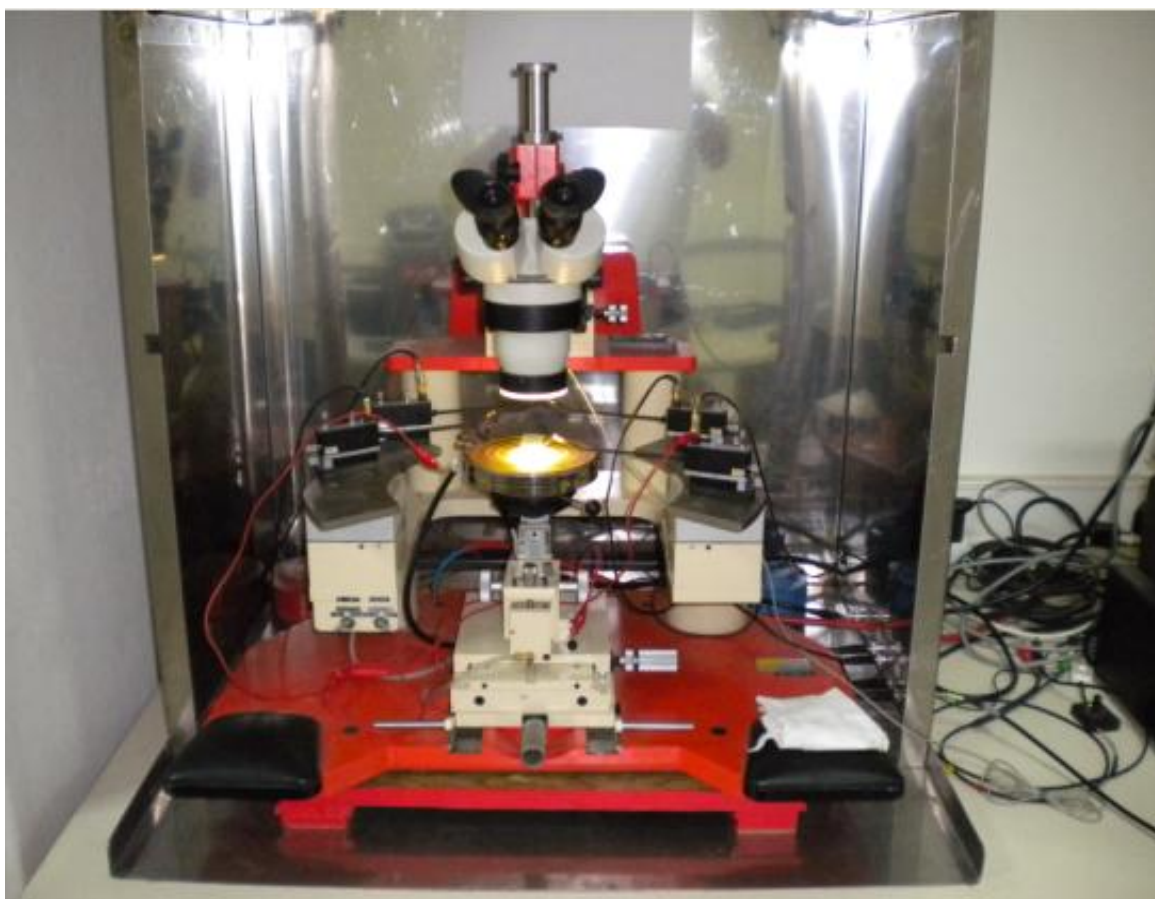
β) Όργανο 4140BpA meter/DC Voltage Source της Hewlett – Packard. Το όργανο αυτό χρησιμοποιείται για να μετρήσουμε τις στατικές χαρακτηριστικές I-V. Αυτό γίνεται επιλέγοντας την λειτουργία “staircase mode” η οποία αυξάνει την εφαρμοζόμενη τάση στη πύλη με σταθερό βήμα το οποίο επιλέγεται από το χρήστη μετρώντας στη συνέχεια την ένταση του ρεύματος (I) έπειτα από χρονική καθυστέρηση (καθορίζεται και αυτή από τον χρήστη). Η χρονική αυτή καθυστέρηση εξασφαλίζει την εξασθένηση του μεταβατικού χαρακτηριστήρα του ρεύματος που προκαλεί η μεταβολή της τάσης.

Για τη λήψη των μετρήσεων, το δείγμα με τους πυκνωτές MOS τοποθετείται σε μία μεταλλική βάση. Περιφερειακά της βάσης υπάρχουν μετακινούμενες ακίδες βολφραμίου με τρεις βαθμούς ελευθερίας, στην άλλη άκρη των οποίων συνδέονται τα όργανα μέτρησης. Με αυτό τον τρόπο, οι ακίδες μπορούν να ακουμπήσουν στις πύλες των πυκνωτών, ώστε να λαμβάνεται η επαφή (Σχήμα 3.1). Η μεταλλική βάση, στην οποία είναι τοποθετημένο το δείγμα, συνδέεται και αυτή στα όργανα μέτρησης ώστε να αποτελέσει την επαφή του υποστρώματος. Στη διάταξη είναι προσαρτημένο οπτικό μικροσκόπιο, το ποίο διευκολύνει την τοποθέτηση των ακίδων. Ολόκληρη η διάταξη (Σχήμα 3.2) εδράζεται μέσα σε μεταλλικό σκοτεινό θάλαμο, ο οποίος βοηθά στη θωράκιση από παρασιτικά ρεύματα ηλεκτροστατικής φύσεως και στην αποφυγή φωτισμού του δείγματος κατά τη διάρκεια μέτρησης.



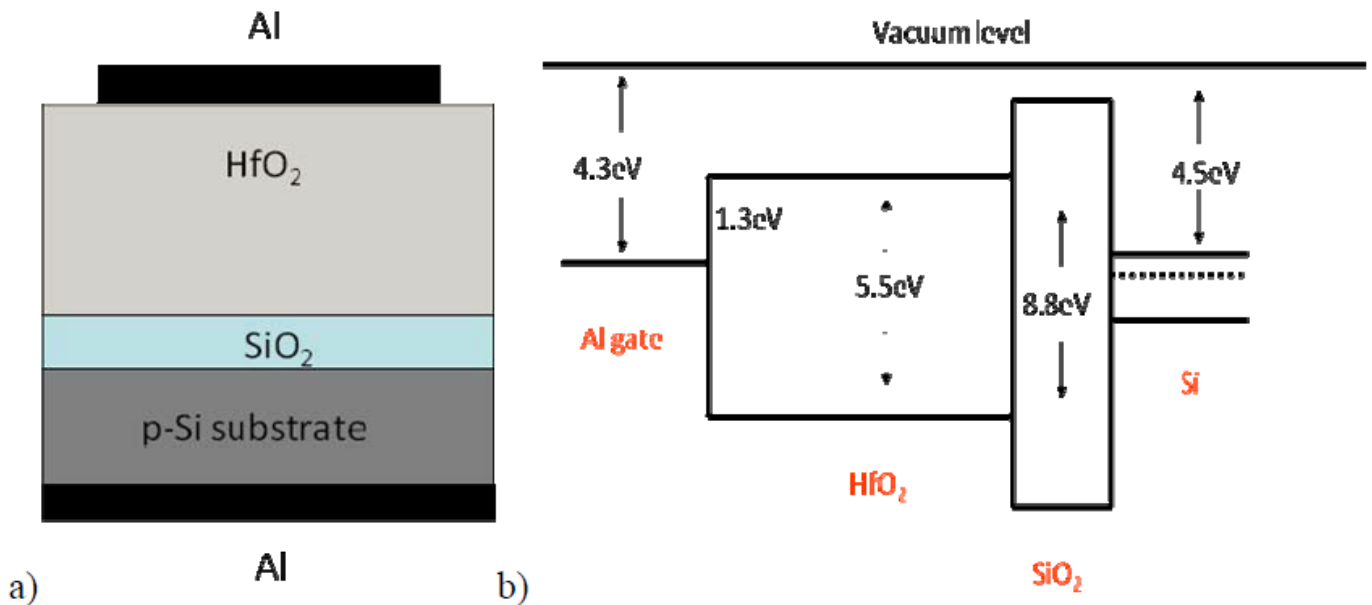
**Σχήμα 3.1:** Το δείγμα στηρίζεται στη μεταλλική βάση με βοήθεια κενού και η ακίδα είναι τοποθετημένη επάνω στην πύλη ενός πυκνωτή με εμβαδό  $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ .

Η σύνδεση των ακίδων και της βάσης με τα όργανα μέτρησης γίνεται με ομοαξονικά καλώδια BNC (Bayonet Neill Concelman), με το κεντρικό σύρμα να συνδέεται με την ακίδα και το εξωτερικό να συνδέεται με το θάλαμο, ο οποίος γειώνεται. Το δείγμα συγκρατείται στη μεταλλική βάση με τη βοήθεια κενού, που αναπτύσσεται μέσω άντλησης από οπές που έχουν ανοιχθεί εκεί. Τα όργανα είναι συνδεδεμένα με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσα από θύρα GPIB (General Purpose Interface Bus) και ελέγχονται με ρουτίνες του προγράμματος LabView™ 7.0 της National Instruments.



**Σχήμα 3.2:** Ο θάλαμος μέτρησης με το σύστημα των τεσσάρων ακίδων.

Η βασική των υπό μελέτη πυκνωτών απεικονίζεται στο Σχήμα 3.3. Σε υπόστρωμα πυριτίου p – τύπου έχει αναπτυχθεί, με τη μέθοδο της ξηρής οξείδωσης, θερμικό οξείδιο πάχους 3.5nm στους 850°C. Στη συνέχεια σε θάλαμο υπερυψηλού κενού έχουν εναποτεθεί 20nm HfO<sub>2</sub> με τη μέθοδο της ιοντοβολής σε ραδιοσυχνότητες (RF – Sputtering). Κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης η ροή Ar ήταν 60sccm, η πίεση  $8 \times 10^{-3}$ mbar, ο ρυθμός εναπόθεσης κρατούνταν σταθερός σε 0.1Å/sec με ισχύ P=200Watt και το τελικό πάχος του HfO<sub>2</sub> ήταν 20nm. Στη συνέχεια εξαχνώθηκε αλουμίνιο στις δύο πλευρές του πυκνωτή MIS και σχηματοποιήθηκε με τη μέθοδο της λιθογραφίας στο επάνω μέρος.



**Σχήμα 3.3:** (a) Διατομή του πυκνωτή του πειράματος με τη στοιβάδα των διηλεκτρικών, (b) Σχηματική αναπαράσταση των ενεργειακών ζωνών της διπλανής δομής για μηδενική εξωτερική πόλωση.

1) Στον πυκνωτή MIS (Σχήμα 3.3) να μετρηθούν η χωρητικότητα σε συνάρτηση με την εφαρμοζόμενη τάση στα άκρα του πυκνωτή (C-V) σε υψηλές συχνότητες εναλλασσόμενου ρεύματος 1MHz και να σχεδιαστούν γραφικά. Να εντοπίσετε και να αναφέρεται τα όρια των τάσεων στα οποία παρατηρούνται οι περιοχές συσσώρευσης, απογύμνωσης και αντιστροφής και να υπολογίσετε γραφικά την τάση κατωφλίου.

2) Να ληφθούν οι χαρακτηριστικές C-V σε εύρος συχνοτήτων από 1kHz-1MHz και να γίνει η γραφική παράσταση. Δώστε μια σύντομη ερμηνεία των καμπυλών και υπολογίστε την πυκνότητα των διεπιφανειακών καταστάσεων ( $D_{it}$  eV<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>) στο ενεργειακό χάσμα του Si, συγκρίνοντας την τιμή της χωρητικότητας για υψηλή συχνότητα (1MHz) με την αντίστοιχη στατική χωρητικότητα για χαμηλές συχνότητες (1Hz), σύμφωνα με τη σχέση:  $D_{it} = \frac{\Delta C}{q^2} (1 - \frac{C_{HF} + \Delta C}{C_{ox}})^{-1} (1 - \frac{C_{HF}}{C_{ox}})^{-1}$ , όπου  $\Delta C = C_{LF} - C_{HF}$ . Οι διαστάσεις των διαφόρων χωρητικότητων είναι F/cm<sup>2</sup>.

3) Υπολογίστε την ολική χωρητικότητα επίπεδης ζώνης με τη βοήθεια του τύπου:  $C_{FB} = \frac{C_{FBS} \cdot C_{ox}}{C_{FBS} + C_{ox}}$  όπου  $C_{ox}$  η συνολική χωρητικότητα του οξειδίου (περιοχή συσσώρευσης) και  $C_{FBS}$  η χωρητικότητα επίπεδης ζώνης του Si. Η χωρητικότητα αυτή δίνεται από τη σχέση  $C_{FBS} = \frac{\epsilon_{Si}}{L_D}$ , όπου  $\epsilon_{Si} = 11.9\epsilon_0$  είναι η στατική διηλεκτρική σταθερά του πυριτίου και  $L_D$  το μήκος Debye, το οποίο δίνεται από τον τύπο:  $L_D = \sqrt{\frac{KT\epsilon_{Si}}{N_A e^2}}$

με  $N_A = 10^{15} \text{cm}^{-3}$  η συγκέντρωση αποδεκτών του υποστρώματος Si (K είναι η σταθερά του Boltzmann και e το φορτίο του ηλεκτρονίου). Από την τιμή της  $C_{FB}$  φέρνοντας παράλληλες προς τους άξονες να βρείτε την τιμή της τάσης επίπεδης ζώνης ( $V_{FB}$ ). Τι εκφράζει φυσικά αυτή η τιμή?

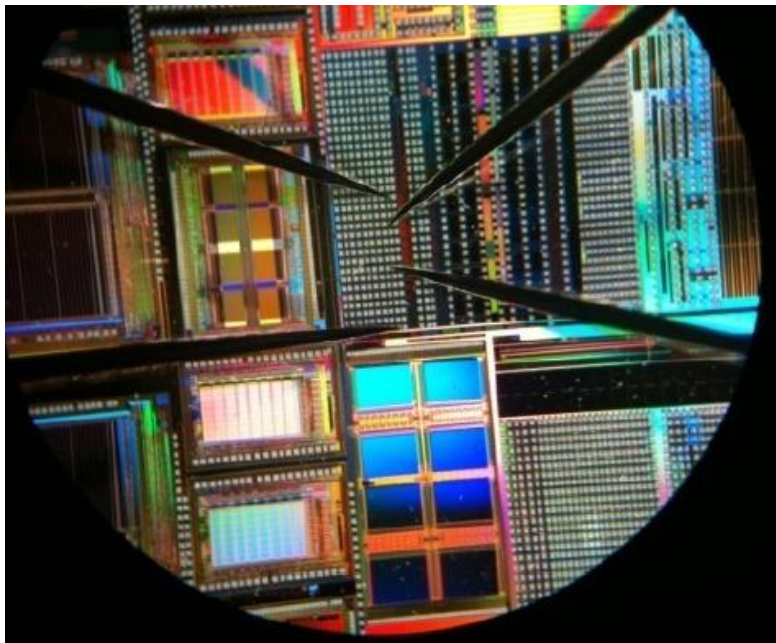
4) Θεωρώντας ότι τα δύο στρώματα οξειδίου (3.5nm SiO<sub>2</sub>/20nm HfO<sub>2</sub>) αποτελούν 2 χωρητικότητες σε σειρά και με βάση τον γνωστό τύπο:  $\frac{1}{C_{ox}} = \frac{d_{SiO_2}}{4\epsilon_0 A} + \frac{d_{HfO_2}}{k\epsilon_0 A}$ , όπου d-πάχος του αντίστοιχου στρώματος οξειδίου. Θεωρήστε ότι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του SiO<sub>2</sub> είναι 4ε<sub>0</sub> (ε<sub>0</sub>=8,85·10<sup>-14</sup> F/cm) και A το εμβαδό του πυκνωτή (A = 10<sup>-4</sup> cm<sup>2</sup>). Να υπολογιστεί η σχετική διηλεκτρική σταθερά κ του στρώματος του HfO<sub>2</sub> και να συγκριθεί αυτή η τιμή με τη βιβλιογραφία.

5) Βρείτε τη σχέση με την οποία υπολογίζουμε το ηλεκτρικό πεδίο εντός των δύο οξειδίων, χρησιμοποιώντας απλά επιχειρήματα από την ηλεκτροστατική, και υπολογίστε την τιμή για μία δεδομένη τιμή της εξωτερικής πόλωσης, π.χ.  $V_{gate} = 4V$ . Σχολιάστε τις τιμές που έχετε υπολογίσει και ερμηνεύστε την τάση της τεχνολογίας για την αντικατάσταση των υπαρχόντων διηλεκτρικών από υλικά υψηλής διηλεκτρικής σταθεράς (όπως είναι το HfO<sub>2</sub>).

6) Η μέτρηση της χαρακτηριστικής C-V γίνεται με τη χρήση αναλυτή σύνθετης αντίστασης θεωρώντας ότι η υπό εξέταση διάταξη του πυκνωτή MOS αποτελείται από ένα αμιγώς χωρητικό μέρος και από μια αντίσταση συνδεδεμένα παράλληλα. Έτσι, ταυτόχρονα με την μέτρηση της χωρητικότητας (C) γίνεται και η μέτρηση της αγωγιμότητας (G). Να σχολιαστεί η μορφή του γραφήματος G-V και να γίνει κοινό γράφημα C-V και G-V. Τι εκφράζει η διαγωγιμότητα στα δείγματά μας και που οφείλεται? Να υπολογιστεί γραφικά η τιμή της τάσης πύλης όπου παρουσιάζει μέγιστο η διαγωγιμότητα και να σχολιαστεί η τιμή αυτή.

7) Υπολογίστε το μέγιστο πάχος του απογυμνωμένου από ευκίνητους φορείς στρώματος, σύμφωνα με τη θεωρία για την επιφανειακή απογύμνωση ενός ημιαγωγικού στρώματος:  $W_F = \epsilon_s A \left( \frac{1}{C_{inv}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)$ , όπου  $C_{inv}$  η χωρητικότητα στην περιοχή αντιστροφής.

Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε τρανζίστορ n-MOSFET τύπου επαύξησης. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, για τη διεξαγωγή των ηλεκτρικών μετρήσεων, τα δείγματα τοποθετήθηκαν σε μεταλλική βάση και με βοήθεια μικροσκοπίου έγιναν οι απαραίτητες συνδέσεις ώστε να έρθουν σε επαφή οι μεταλλικές βελόνες με τους ακροδέκτες του δείγματος. Στη συνέχεια η διάταξη συνδέονταν με τα ανάλογα μετρητικά μηχανήματα, μέσω καλωδίων BNC, τα οποία ελέγχονταν από Η/Υ μέσω κάρτας GPIB. Για να λάβουμε τη χαρακτηριστική  $I_{ds} - V_{gs}$ , κρατώντας σταθερή τη  $V_{ds}$ , χρησιμοποιήθηκε ένας διακόπτης που τροφοδοτεί με σταθερή τάση τον απαγωγό και παράλληλα μετράει το ρεύμα από το ίδιο σημείο, καθώς σαρώνουμε την τάση στην πύλη. Αντίστοιχη συνδεσμολογία χρησιμοποιείται για τη λήψη των χαρακτηριστικών  $I_{ds} - V_{ds}$ , κρατώντας σταθερή την τάση πύλης  $V_{gs}$ . Μια άποψη των δειγμάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.4.



**Σχήμα 3.4:** Φωτογραφία ενός δείγματος και των μεταλλικών ακίδων μέσα από το οπτικό μικροσκόπιο.

Τα τρανζίστορ έχουν οξείδιο πύλης  $\text{SiO}_2$  συνολικού πάχους 17nm, πύλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου και

$$\text{λόγο ασυμμετρίας } \frac{W}{L} = \frac{0.08\mu\text{m}}{0.2\mu\text{m}}.$$

- 1) Να ληφθούν οι χαρακτηριστικές  $I_{DS} = f(V_{DS})$ , για διάφορες τάσεις πύλης  $V_{GS}$  και να σχεδιαστούν σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα. Να σημειωθούν οι περιοχές γραμμικής λειτουργίας και κορεσμού.
- 2) Να ληφθούν οι χαρακτηριστικές  $I_{DS} = f(V_{GS})$ , για διάφορες τάσεις υποδοχής  $V_{DS}$  και να σχεδιαστούν σε γραμμική και ημιλογαριθμική κλίμακα. Για μία τιμή της  $V_{DS}$  να υπολογιστεί γραφικά η τάση κατωφλίου του τρανζίστορ. Συγκρίνετε την τιμή αυτή με την τιμή που προκύπτει από τη θεωρία, σύμφωνα με τη σχέση

$V_T = \Phi_{ms} - \frac{Q_f}{C_{ox}} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4\epsilon_s q N_A \Psi_B}}{C_{ox}}$ , όπου  $\Phi_{ms}$  η διαφορά των έργων εξόδου του ημιαγωγού (p – type) από το μέταλλο της πύλης (poly-Si),  $Q_f = 2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \times q$  η επιφανειακή πυκνότητα των ακίνητων ή δέσμιων φορτίων σε μια περιοχή της διεπιφάνειας ημιαγωγού οξειδίου,  $\psi_B = \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right)$  το επιφανειακό δυναμικό σε κατάσταση ισχυρής αναστροφής,  $N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  η συγκέντρωση προσμίξεων αποδεκτών στο πυρίτιο,  $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  η ενδογενής συγκέντρωση φορέων στο πυρίτιο,  $C_{ox}$  η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφάνειας του παρεμβλλόμενου μεταξύ μετάλλου και ημιαγωγού οξειδίου και  $\epsilon_s = 11.9\epsilon_0$  η διηλεκτρική σταθερά του πυριτίου.

**3)** Η μεταβολή του ρεύματος  $I_{DS}$  για τάσεις πύλης  $V_{GS}$ , μικρότερες της τάσης  $V_{th}$ , χαρακτηρίζεται από την παράμετρο  $S$ , γνωστή με το όνομα subthreshold swing, η οποία ορίζεται από τη σχέση:  $S = \left( \frac{d \log I_{ds}}{dV_{gs}} \right)^{-1}$ , δηλαδή από το αντίστροφο της κλίσης της χαρακτηριστικής  $I_{DS} - V_{GS}$  για  $V_{GS} < V_{th}$ . Υπολογίστε την παράμετρο  $S$  για  $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$ , εξηγήστε τη φυσική ερμηνεία της και βρείτε από τη βιβλιογραφία πως συνδέετε με την πυκνότητα των διεπιφανειακών καταστάσεων  $D_{it}$  ( $\text{eV}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ).

**4)** Στη γραμμική περιοχή λειτουργίας του τρανζίστορ ορίζεται το μέγεθος της αγωγιμότητας διαγωγιμότητας  $g_m$ , που δίνεται από τη σχέση:  $g_m = \left. \frac{\partial I_{DS}}{\partial V_{GS}} \right|_{V_{DS} = \text{constant}} = \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} V_{DS}$  όπου  $\mu_n$  η ευκινησία (mobility) των ηλεκτρονίων στο κανάλι και  $W/L$  ο λόγος του πλάτους προς μήκος της πύλης του τρανζίστορ. Υπολογίζοντας γραφικά την κλίση της χαρακτηριστικής  $I_{DS} - V_{GS}$  για  $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$ , να βρείτε την ευκινησία των ηλεκτρονίων.

#### **4. Βιβλιογραφικές Αναφορές**

- [1] D. K. Scronder: “*Semiconductor Material and Device Characterization*”, Wiley and Sons, (2005).
- [2] S. M. Sze: “*Physics of Semiconductor Devices*”, , Willey Interscience, 3rd edition (2007).
- [3] E. H. Nicollian and J. R. Brews: “*MOS Physics and Technology*”, Wiley and Sons, New York, (1982).
- [4] H. J. M. Veendrick: “*Nanometer CMOS ICs - From basics to ASICs*”, Springer, (2008).
- [5] Απόσπασμα σημειώσεων του μαθήματος του εξαμήνου «Φυσική των Μικροηλεκτρονικών Διατάξεων», Δ. Τσουκαλάς, ΣΕΜΦΕ – ΕΜΠ, (2008).
- [6] R. M. Warner, Jr. and B. L. Grung: “*MOSFET Theory and Design*”, Oxford University Press, Oxford, (1999).
- [7] Marius Grundmann: “*The Physics of Semiconductors - An Introduction Including Nanophysics and Applications*”, Second Edition, Springer-Verlag Berlin, (2010).
- [8] David L. Pulfrey: “*Understanding Modern Transistors and Diodes*”, Cambridge University Press, (2010).
- [9] J. P. Colinge and C. A. Colinge: “*Physics of Semiconductor Devices*”, Kluwer Academic Publishers, (2002).