



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

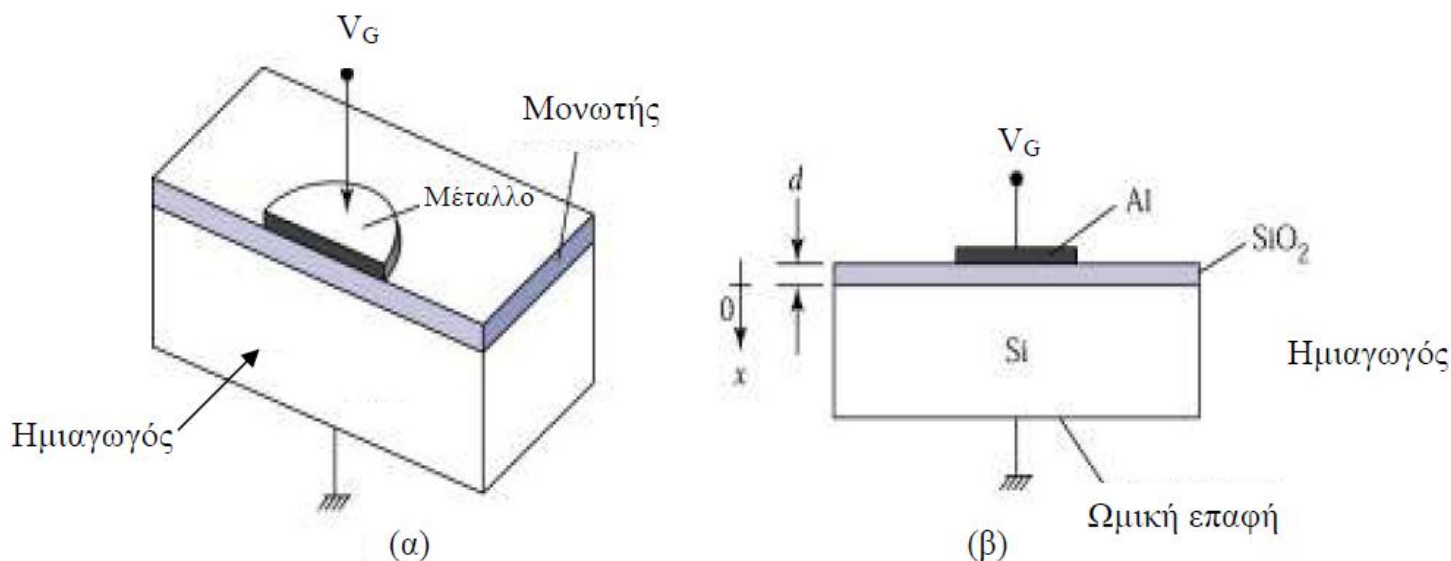
ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΙΚΡΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ -
ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΜΟΣ

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

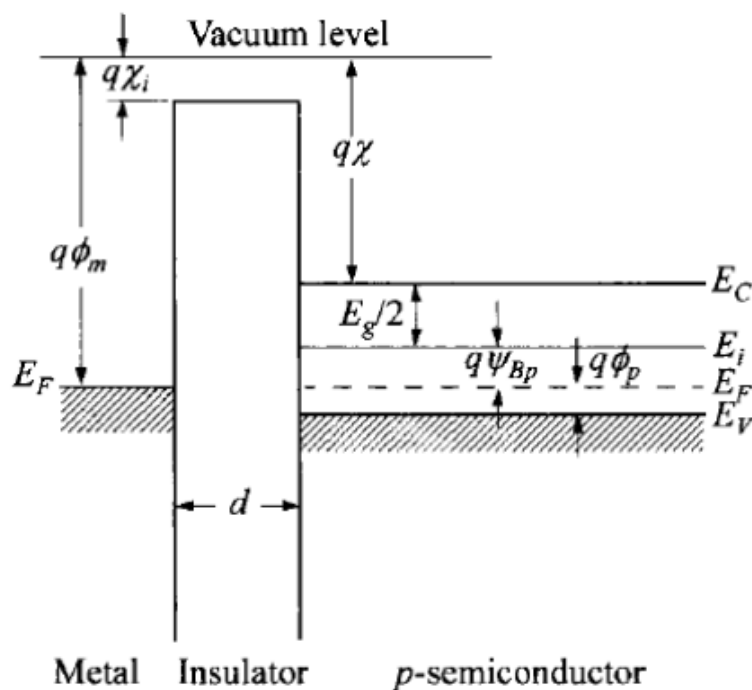
Ένα από τα σημαντικότερα ηλεκτρονικά στοιχεία, που βρίσκουν εφαρμογή τόσο στους σύγχρονους τομείς έρευνας και τεχνολογίας, όσο και στην ίδια τη μελέτη των ημιαγωγικών διατάξεων, είναι η ομάδα πυκνωτών μονωμένης πύλης MIS (Metal – Insulator – Semiconductor). Ουσιαστικά μια δομή MIS είναι ένα σύστημα που 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 (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 τρανζιστορ 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 ότι 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 ημιαγώγο.

Εάν εφαρμόσουμε στη δίοδο MOS συνεχή τάση V_G , τότε στην επιφάνεια του μονωτή που είναι σε επαφή με τον ημιαγώγο 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/SiO₂, 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/SiO₂. 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/SiO₂ 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/SiO₂ 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 SiO₂, 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 ε_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 ε_i=4ε₀ η διηλεκτρική σταθερά του διοξειδίου SiO₂, και ε₀=8.85·10⁻¹⁴ F·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 SiO₂ 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) $V_G \gg 0$: 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:

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

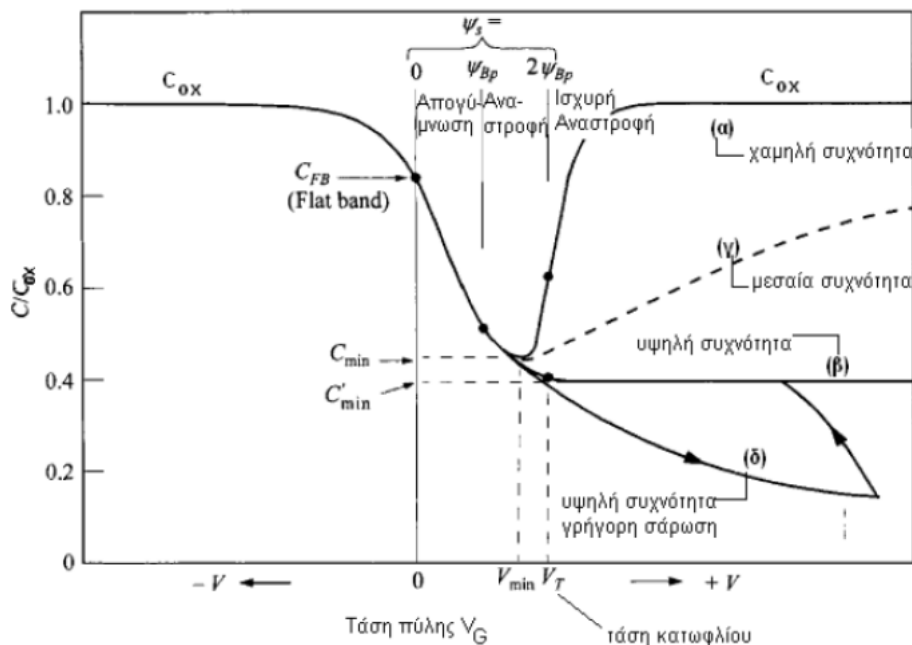
Η τιμή αυτή της πόλωσης καλείται τάση κατωφλίου (threshold voltage) για την οποία η αντίστοιχη χωρητικότητα της διάταξης παίρνει την ελάχιστη τιμή. Η τάση κατωφλίου είναι ένα κρίσιμο μέγεθος για τη λειτουργία των κυκλωμάτων που βασίζονται στην τεχνολογία MOS, διότι οι μεταβολές της επηρεάζουν σημαντικά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

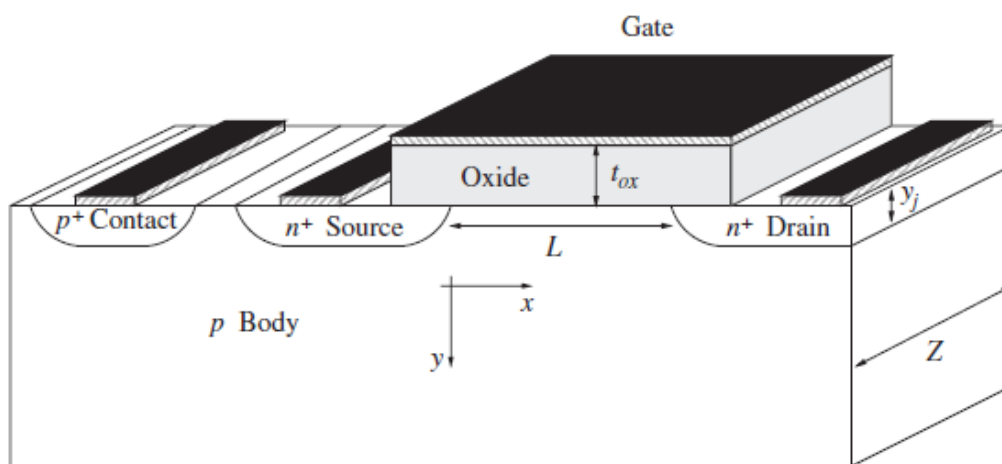


Σχήμα 1.3: Η εξάρτηση της καμπύλης χωρητικότητας – τάσης με την συχνότητα για έναν ιδανικό πυκνωτή MOS.

Μια πραγματική διόδος MOS περιέχει φορτία ή προσμίξεις τόσο στο εσωτερικό του οξειδίου της όσο και στην περιοχή της διεπιφάνειας Si/SiO₂. 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.



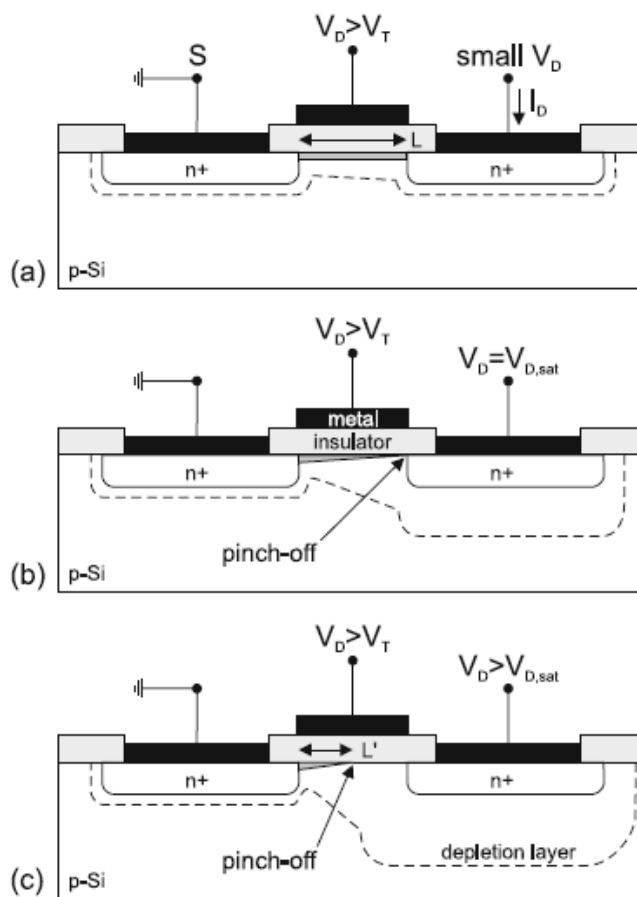
Σχήμα 2.1: Δομή MOSFET διαύλου n, σε τομή. Διακρίνονται οι περιοχές της πηγής, της πύλης, της υποδοχής και του υποστρώματος. Οι γκριζες περιοχές δηλώνουν ωμικές επαφές με το υπόστρωμα.

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, SiO₂. 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⁺ 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_{DS}=0. Όταν το θετικό δυναμικό της πύλης ξεπεράσει κάποια τιμή, $V_{GS} > V_T$, 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_T . 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).



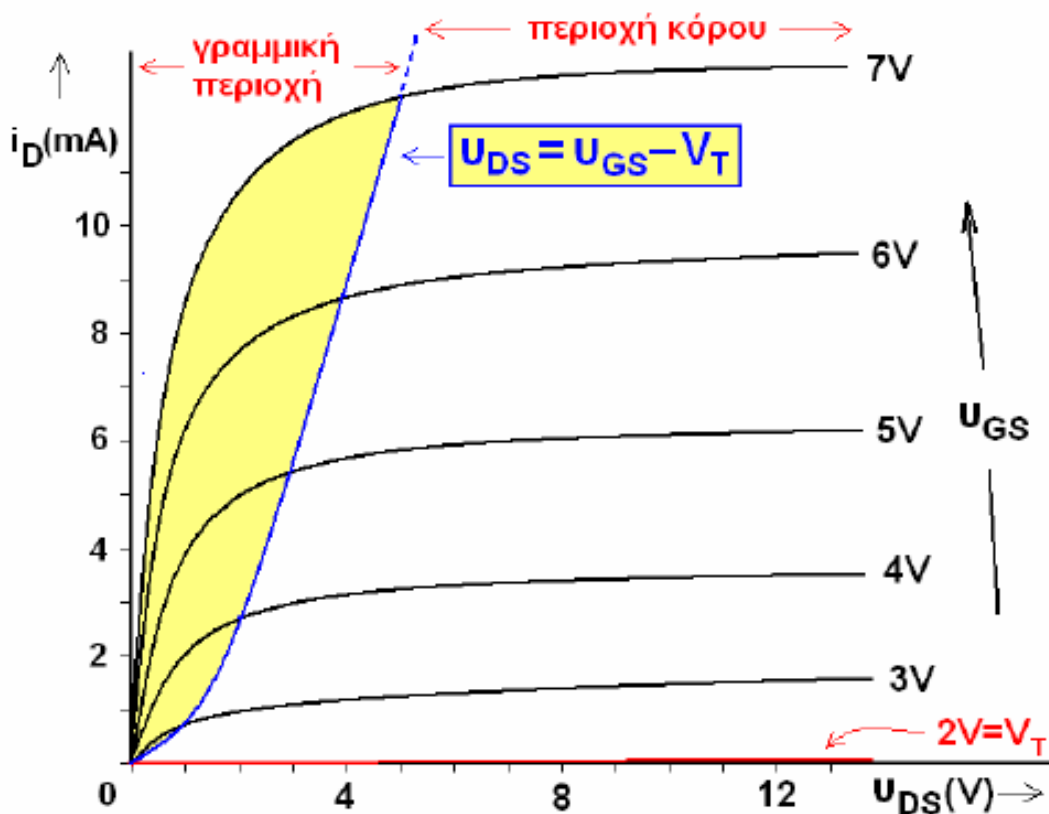
Σχήμα 2.2: (a) MOSFET προσαύξεσης n - καναλιού (enhancement NMOS). Δημιουργία του n-καναλιού όταν η θετική τάση V_{GS} ξεπεράσει την τιμή κατωφλίου V_T , (b) Τροποποίηση της μορφής του καναλιού υπό την επίδραση διαφοράς δυναμικού V_{DS} μεταξύ απαγωγού και πηγής και (c) Κατάσταση κορεσμένης αγωγιμότητας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

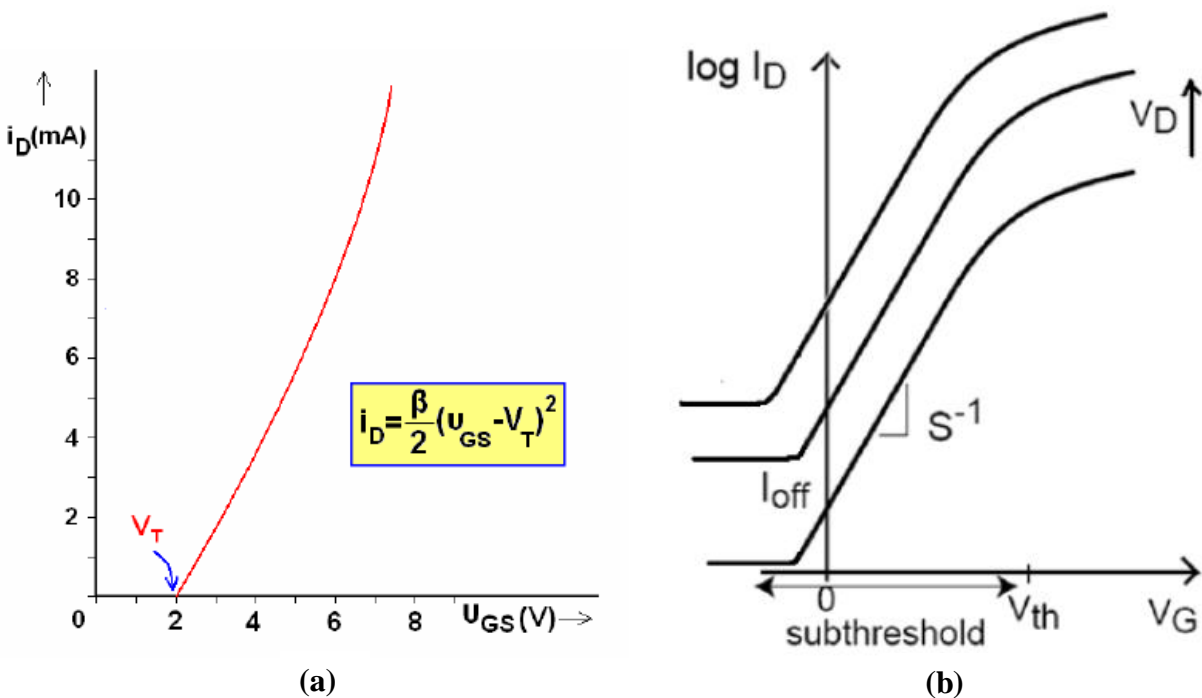
(pinch off), (Σχήμα 2.2(b)). Στην κατάσταση αυτή, το ρεύμα δια μέσω του διαύλου παραμένει σχεδόν σταθερό ανεξάρτητα από την τάση του απαγωγού, (Σχήμα 2.3). Τότε λέμε ότι, το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή του κόρου, (saturation region). Μεγαλύτερες τιμές της V_{DS} , πέραν της οριακής τιμής, μειώνουν 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 προσαύξεσης. 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 προσαύξεσης 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/SiO₂. Το sub - threshold swing υπολογίζεται από τη σχέση:

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

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} :

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

όπου μ_n ευκινησία των ελευθέρων φορέων, ϵ 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 $V_T = V_{FB} + 2\psi_B + \frac{\sqrt{4\epsilon q N_A \psi_B}}{C_{ox}}$ και β 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} :

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

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, μ_n , να αντικατασταθεί από την ευκινησία των οπών, μ_p .

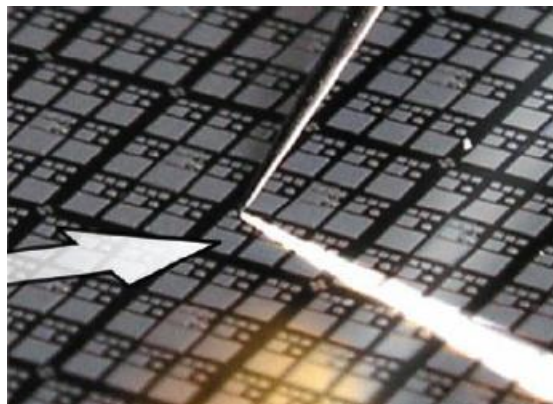
3. Πειραματικό Μέρος

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 1MHz. Το πλάτος του εναλλασσομένου ρεύματος σε όλες τις μετρήσεις είναι σταθερό και ίσο με 25mV_{p-p} . Το συγκεκριμένο όργανο είναι εφοδιασμένο με εσωτερική πηγή τάσης η οποία εφαρμόζεται στην πύλη (V_{gate}).

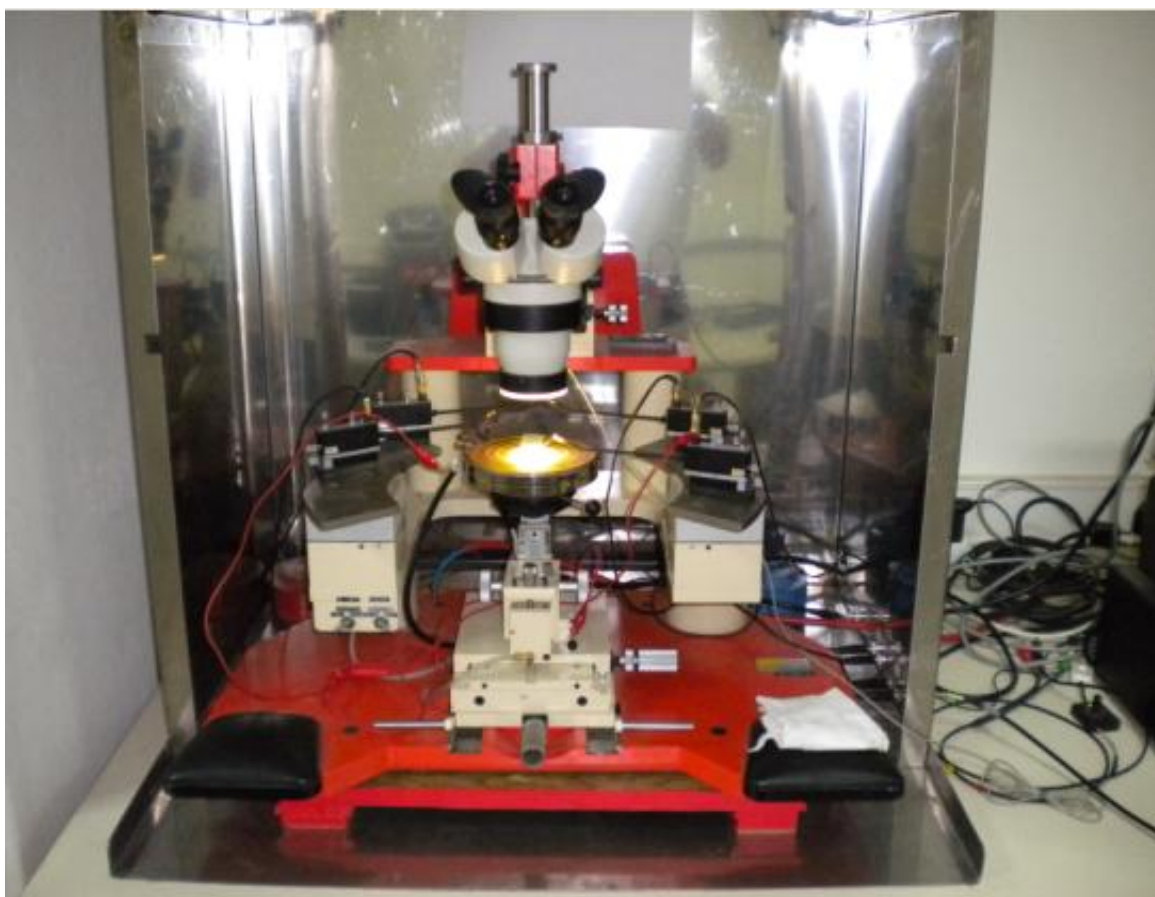
β) Όργανο 4140BrA meter/DC Voltage Source της Hewlett – Packard. Το όργανο αυτό χρησιμοποιείται για να μετρήσουμε τις στατικές χαρακτηριστικές I-V. Αυτό γίνεται επιλέγοντας την λειτουργία “staircase mode” η οποία αυξάνει την εφαρμοζόμενη τάση στη πύλη με σταθερό βήμα το οποίο επιλέγεται από το χρήστη 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 προσσαρτημένο οπτικό μικροσκόπιο, το οποίο 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.



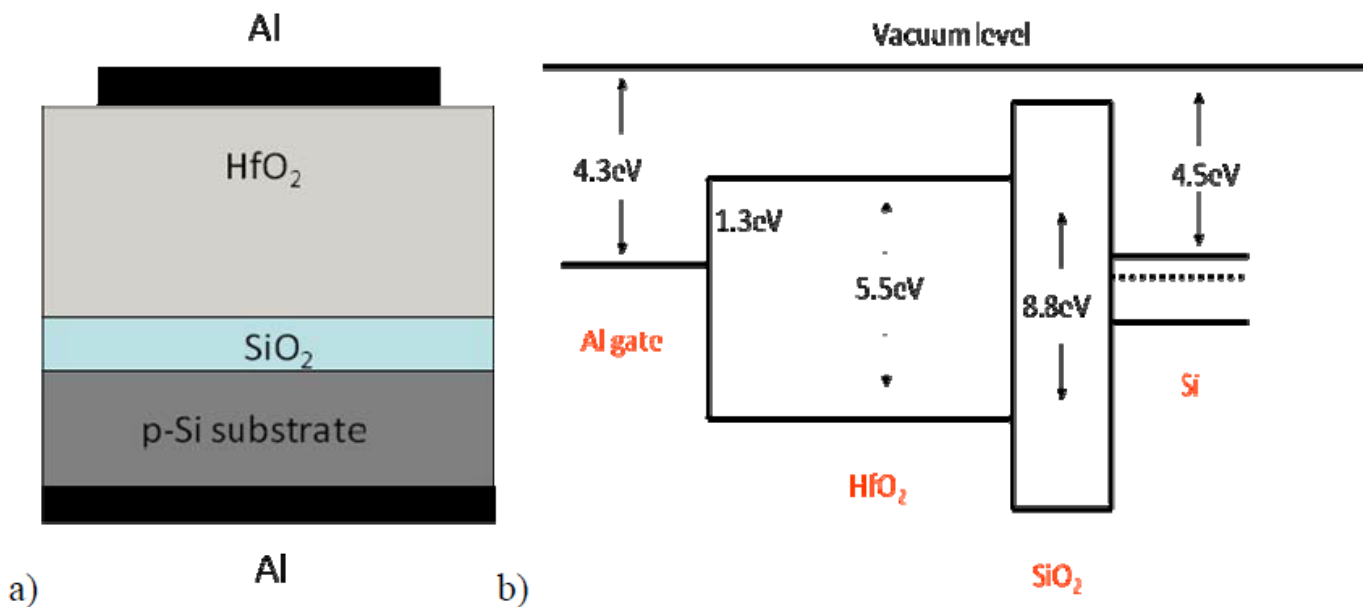
Σχήμα 3.1: Το δείγμα στηρίζεται στη μεταλλική βάση με βοήθεια κενού και η ακίδα είναι τοποθετημένη επάνω στην πύλη ενός πυκνωτή με εμβαδό $100 \times 100\mu\text{m}^2$.

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 HfO₂ με τη μέθοδο της ιοντοβολής σε ραδιοσυχνότητες (RF – Sputtering). Κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης η ροή Ar ήταν 60sccm, η πίεση 8 × 10⁻³mbar, ο ρυθμός εναπόθεσης κρατούνταν σταθερός σε 0.1Å/sec με ισχύ P=200Watt και το τελικό πάχος του HfO₂ 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⁻¹cm⁻²) 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:

$$D_{it} = \frac{\Delta C}{q^2} \left(1 - \frac{C_{HF} + \Delta C}{C_{ox}}\right)^{-1} \left(1 - \frac{C_{HF}}{C_{ox}}\right)^{-1}, \text{ όπου } \Delta C = C_{LF} - C_{HF}.$$

Οι διαστάσεις των διαφόρων χωρητικότητων είναι F/cm².

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 αποδευτών 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_2 /20nm HfO_2) αποτελούν 2 χωρητικότητες σε σειρά και με βάση τον γνωστό τύπο: $\frac{1}{C_{ox}} = \frac{d_{\text{SiO}_2}}{4\epsilon_0 A} + \frac{d_{\text{HfO}_2}}{k\epsilon_0 A}$, όπου d-πάχος του αντίστοιχου στρώματος

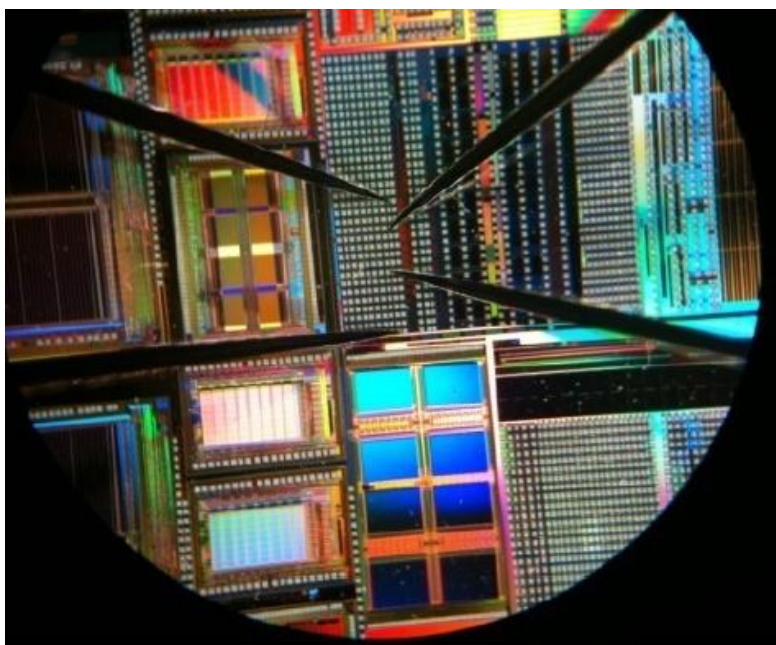
οξειδίου. Θεωρήστε ότι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του SiO_2 είναι $4\epsilon_0$ ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$) και A το εμβαδό του πυκνωτή ($A = 10^{-4} \text{ cm}^2$). Να υπολογιστεί η σχετική διηλεκτρική σταθερά k του στρώματος του HfO_2 και να συγκριθεί αυτή η τιμή με τη βιβλιογραφία.

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. $V_{\text{gate}} = 4\text{V}$. 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_2).

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 SiO_2 συνολικού πάχους 17nm, πύλη πολυκρυσταλλικού πυριτίου και

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 Φ_{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 αποδεικτών 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 παρεμβαλλόμενου 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 $V_{DS}=0.1V$, εξηγήστε τη φυσική ερμηνεία της και βρείτε από τη βιβλιογραφία πως συνδέετε με την πυκνότητα των διεπιφανειακών καταστάσεων D_{it} ($eV^{-1} \text{ cm}^{-2}$).

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 μ_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 $V_{DS}=0.1V$, 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 8ου 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).

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΜΙΑΓΩΓΩΝ

Κολιοπούλου Σταυρούλα

Οι ηλεκτρικές μετρήσεις χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της ηλεκτρικής συμπεριφοράς [1] 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, όσο και για τη λειτουργία τους σε επίπεδο ηλεκτρικών κυκλωμάτων και ηλεκτρονικών διατάξεων.

A. Ηλεκτρική αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς

Όπως είναι γνωστό, τα στερεά σώματα χωρίζονται, από πλευράς ηλεκτρικής αγωγιμότητας, σε μονωτές, αγωγούς και ημιαγωγούς [2, 3, 4].

α) Μονωτές ονομάζονται τα υλικά, που δεν επιτρέπουν τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος μέσα από τη μάζα τους. Αν λάβουμε υπόψη ότι το ηλεκτρικό ρεύμα είναι προσανατολισμένη κίνηση ηλεκτρικών φορέων, είναι προφανές ότι δεν υπάρχουν διαθέσιμοι ηλεκτρικοί φορείς στη μάζα των μονωτών ή –εν πάσει περιπτώσει- είναι τόσο λίγοι, ώστε θεωρούνται αμελητέοι. Τα ηλεκτρόνια σθένους στα άτομα των μονωτών είναι ισχυρά συνδεδεμένα με τον πυρήνα και σε καμία περίπτωση δεν μπορούν να θεωρηθούν ότι διαχέονται στο σώμα του μονωτή.

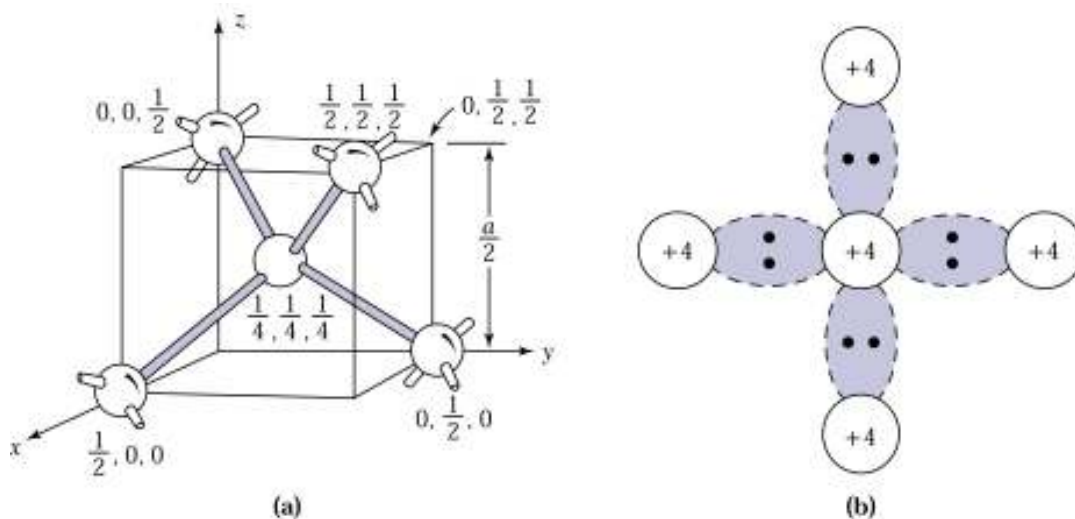
β) Αγωγοί ονομάζονται τα υλικά, που, ακόμα και κάτω από την επίδραση ενός ιδιαίτερα ασθενικού πεδίου, διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα. Στα στερεά σώματα αγωγοί είναι τα μέταλλα. Τα ηλεκτρόνια σθένους στα άτομα των μετάλλων είναι πολύ χαλαρά συνδεδεμένα με τον πυρήνα, ώστε και η παραμικρή προσφορά ενέργειας αρκεί για μετακινηθούν ορισμένα από αυτά σε ανώτερες επιτρεπόμενες ενεργειακές καταστάσεις (ζώνη αγωγιμότητας). Ουσιαστικά ‘σπάει’ ο δεσμός, που συγκρατεί τα ηλεκτρόνια σθένους με τον πυρήνα, με αποτέλεσμα τα ηλεκτρόνια αυτά να γίνουν ελεύθερα και να μην ανήκουν δομικά σε κανένα σημείο του μεταλλικού πλέγματος.

γ) Ημιαγωγοί ονομάζονται τα υλικά, που κάτω από ορισμένες συνθήκες (π.χ. πρόσπτωση φωτός, σχετικά αυξημένη θερμοκρασία κ.λ.π.) άγουν το ρεύμα. Οι κυριότεροι ημιαγωγοί, που χρησιμοποιούνται στη μικροηλεκτρονική και γενικότερα στην ηλεκτρονική τεχνολογία και βιομηχανία ανήκουν στην ομάδα IV του Περιοδικού Πίνακα και είναι, κυρίως, το Πυρίτιο (Si) και, σε πολύ μικρότερη έκταση, το Γερμάνιο (Ge). Επομένως τα

άτομα των ημιαγωγών αυτών έχουν τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα (στοιβάδα σθένους). Στα επόμενα θα εστιάσουμε την προσοχή μας στο Si, γιατί αυτό κυριαρχεί στη βιομηχανία των ημιαγωγικών διατάξεων. Αντίστοιχα πράγματα ισχύουν και για τους υπόλοιπους ημιαγωγούς.

γ1) Καθαροί ημιαγωγοί – Ενδογενής αγωγιμότητα

Όταν τα άτομα Si συνδυάζονται για να σχηματίσουν ένα στερεό, συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς με τέσσερα γειτονικά άτομα, συνεισφέροντας το καθένα από αυτά (σε κάθε ομοιοπολικό δεσμό) ένα από τα τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους, που διαθέτει, όπως φαίνεται στο σχήμα 1. Με αυτό τον τρόπο τα άτομα Si διατάσσονται αυτόματα σε μία κανο-

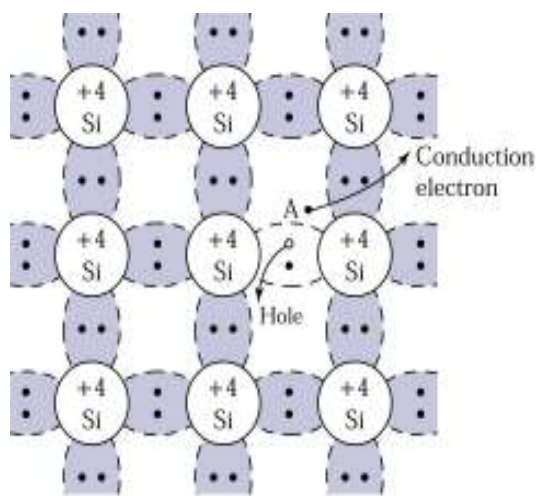


Σχήμα 1: (a) Ομοιοπολικός (τετραεδρικός) δεσμός ενός ατόμου Si με τέσσερα γειτονικά του άτομα στον κρύσταλλο του Si. (b) Σχηματική διδιάστατη αναπαράσταση του ομοιοπολικού αυτού δεσμού [2].

νική δομή, που λέγεται κρύσταλλος [2, 3]. Ένας καθαρός κρύσταλλος Si (δηλαδή κρύσταλλος, που κάθε άτομό του είναι ένα άτομο Si) ουσιαστικά είναι η περιοδική επανάληψη στο χώρο της κυβικής κυψελίδας (τετραεδρικός ομοιοπολικός δεσμός) του σχήματος 1(a). Ουσιαστικά θα περίμενε κανείς σε έναν καθαρό κρύσταλλο Si όλα τα ηλεκτρόνια σθένους των ατόμων, που τον αποτελούν, να συμμετέχουν σε ομοιοπολικούς δεσμούς και να μην υπάρχει κανένα ελεύθερο μέσα στον όγκο του κρυστάλλου. Αυτό πράγματι συμβαίνει μόνο στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός (-273 °C). Τα ηλεκτρόνια σθένους, εξαιτίας των ομοιοπολικών δεσμών, συγκρατούνται με ισχυρές δυνάμεις και δεν μπορούν να εγκαταλείψουν τα άτομα, στα οποία ανήκουν. Έτσι, ανεξάρτητα από την τάση

που του εφαρμόζεται, ο ημιαγωγός σε αυτή την περίπτωση συμπεριφέρεται σαν μονωτής, αφού δεν έχει ελεύθερα ηλεκτρόνια (ή άλλου είδους φορείς) για να προκαλέσουν ένα ηλεκτρικό ρεύμα.

Καθώς η θερμοκρασία αυξάνει, τα άτομα αρχίζουν να ταλαντώνονται τυχαία γύρω από τη θέση ισορροπίας, τους. Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τόσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος αυτών των τυχαίων ταλαντώσεων. Αυτές οι ταλαντώσεις μπορούν μερικές φορές να απομακρύνουν ηλεκτρόνια (σθένους) από τους ομοιοπολικούς δεσμούς, όπως φαίνεται στο σχήμα 2. Το ίδιο ακριβώς μπορεί να συμβεί και με την απορρόφηση φωτονίου από ένα ηλεκτρόνιο του ομοιοπολικού δεσμού. Το ηλεκτρόνιο εξαιτίας της θερμικής κινητικής ενέργειας ή της ενέργειας του φωτονίου, που απορροφά, μεταβαίνει σε ανώτερη επιτρεπόμενη ενεργειακή κατάσταση. Σε αυτή την κατάσταση το ηλεκτρόνιο γίνεται ελεύθερο, γιατί η έλξη του πυρήνα προς αυτό είναι περίπου αμελητέα. Το ηλεκτρόνιο ελευθερώθηκε από τον ομοιοπολικό δεσμό σθένους (ουσιαστικά 'έσπασε' ο δεσμός), αφήνοντας τη θέση αυτή κενή. Την κενή αυτή θέση, δηλαδή την έλλειψη ηλεκτρονίου στον ομοιοπολικό δεσμό, την ονομάζουμε οπή (σχήμα 2).



Σχήμα 2: Διδιάστατη αναπαράσταση της δομής ενδογενούς κρυστάλλου Si. Ένας σπασμένος δεσμός στη θέση A έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός ελεύθερου ηλεκτρονίου και μίας οπής [2].

Αυτή η οπή είναι μία θετική ανωμαλία στη δομή του κρυστάλλου, δηλαδή συμπεριφέρεται σαν θετικό φορτίο, με την έννοια ότι μπορεί να έλκει και να συλλαμβάνει κάθε ηλεκτρόνιο, που βρίσκεται στη γειτονιά της.

Σύμφωνα με τα προηγούμενα σε θερμοκρασία δωματίου μέσα στον κρύσταλλο του Si υπάρχουν μερικά ελεύθερα ηλεκτρόνια και οι αντίστοιχες δημιουργηθείσες οπές στους δεσμούς σθένους (ζώνη σθένους). Επειδή υπάρχουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (και οι οπές, όπως θα εξηγήσουμε πιο κάτω), εάν εφαρμοσθεί στα άκρα του ημιαγωγικού κρυστάλλου μία τάση, θα προκληθεί ένα μικρό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό αυξάνει με την αύξηση της

θερμοκρασίας. Σε θερμοκρασία δωματίου, όμως, το ρεύμα αυτό είναι αρκετά μικρό σε σχέση με το ρεύμα, που διαρρέει έναν αγωγό. Αυτός είναι και ο λόγος, που ο κρύσταλλος Si λέγεται ημιαγωγός.

Ένας αγωγός έχει μόνον ελεύθερα ηλεκτρόνια. Δεν μπορεί να έχει οπές. Το ρεύμα, επομένως, που δημιουργείται, όταν στα άκρα του αγωγού εφαρμοσθεί μία τάση, οφείλεται στην κίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων και μόνον. Ένας ημιαγωγός όμως εκτός από ελεύθερα ηλεκτρόνια (πολύ λιγότερα από αυτά ενός αγωγού στην ίδια θερμοκρασία) έχει και οπές. Καθώς τα ελεύθερα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν αδέσμευτα μέσα στο πλέγμα, συμβάλλουν στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου. Αλλά και η οπή εύκολα μπορεί να συμπληρωθεί από το ηλεκτρόνιο ενός γειτονικού ομοιοπολικού δεσμού, γιατί τα ηλεκτρόνια αυτά κραδαίνονται γύρω από τη θέση ισορροπίας τους και ένα από αυτά μπορεί να εγκατασταθεί στη θέση της οπής συμπληρώνοντας τον ατελή δεσμό, Στην προηγούμενη θέση όμως του συγκεκριμένου ηλεκτρονίου θα δημιουργηθεί μία νέα οπή και είναι σαν να μετακινήθηκε η αρχική οπή προς κατεύθυνση αντίθετη από την κατεύθυνση κίνησης του ηλεκτρονίου. Εάν τώρα εφαρμοστεί μία τάση στα άκρα του κρυστάλλου του Si, θα υπάρξει μετακίνηση φορτίου για δύο λόγους: από τη προσανατολισμένη κίνηση των ελευθέρων ηλεκτρονίων προς το υψηλότερο δυναμικό της τάσης (+) και από την προσανατολισμένη κίνηση των οπών προς το χαμηλότερο δυναμικό της τάσης (-), αφού τα ηλεκτρόνια των δεσμών, που “συμπληρώνουν” τις οπές και έχουν σαν αποτέλεσμα την κίνησή τους, μετακινούνται προς το + της τάσης. Γίνεται αντιληπτό επομένως ότι, παρότι οι μετακινήσεις των δύο διαφορετικών ειδών φορέων γίνονται κατ’ αντίθετη φορά, τόσο οι οπές όσο και τα ηλεκτρόνια συμβάλλουν στην αγωγιμότητα του κρυστάλλου κατά την ίδια φορά [2, 3, 4, 5].

Με αυστηρούς όρους η οπή δεν είναι ένα θετικό φορτίο αλλά μία έλλειψη ηλεκτρονίου στους δεσμούς σθένους του ημιαγωγικού κρυστάλλου. Όμως, ορισμένα πειράματα δείχνουν ότι συμπεριφέρεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, όπως συμπεριφέρεται ένα θετικό φορτίο. Μάλιστα το φαινόμενο Hall δείχνει ότι είναι ορθότερο να θεωρηθεί το ρεύμα της μετακίνησης των ηλεκτρονίων σθένους μέσω των οπών σαν ροή θετικών φορτίων κατά τη φορά της κίνησης των οπών, παρά σαν ροή αρνητικών φορτίων κατά τη φορά της κίνησης των ηλεκτρονίων [5].

Αξίζει να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι σε έναν εντελώς καθαρό ημιαγωγό, απαλλαγμένο από οποιαδήποτε πρόσμιξη, ο αριθμός των ελευθέρων ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον αριθμό των οπών και ο αγωγός είναι ηλεκτρικά ουδέτερος. Ένας τέτοιος ημιαγωγός ονομάζεται “ενδογενής” ημιαγωγός (intrinsic semiconductor) και η αγωγιμότητά του, που

οφείλεται στη συνδυασμένη κίνηση οπών και ελεύθερων ηλεκτρονίων, ονομάζεται “ενδογενής” αγωγιμότητα.

Η εικόνα, που παρουσιάστηκε μέχρι τώρα, είναι τελείως στατική. Στην πραγματικότητα συμβαίνει μία δυναμική διακίνηση του πληθυσμού των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των οπών, που διαρκώς διασπώνται και επανασυνδέονται. Έτσι η πιο πάνω κατάσταση πρέπει να θεωρείται σαν απεικόνιση μίας στατιστικής ισορροπίας [2, 3, 4, 6].

Σε θερμοκρασία δωματίου ο αριθμός των ελεύθερων ηλεκτρονίων και των οπών ενός καθαρού ημιαγωγού δεν είναι αρκετός για να προκαλέσει ρεύματα με εντάσεις, που να ικανοποιούν τις πρακτικές απαιτήσεις. Στην πραγματικότητα βέβαια, όσο και αν το επιδιώξουμε, δεν μπορούμε να επιτύχουμε πλήρη καθαρότητα του κρυσταλλικού ημιαγωγού. Ο ημιαγωγός θα περιέχει πάντα και άτομα προσμίξεων, τα οποία αλλάζουν την αγωγιμότητά του. Όμως το ποσοστό τους σε έναν “καθαρό” ημιαγωγό είναι αρκετά μικρό, με αποτέλεσμα η επιπλέον αγωγιμότητα, που προκαλούν να είναι επίσης πολύ μικρή. Μία μέθοδος για να αυξηθεί με ελεγχόμενο τρόπο η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός “καθαρού” ημιαγωγού είναι η προγραμματισμένη προσθήκη ξένων ατόμων (προσμίξεων) στη μάζα του, γεγονός που ονομάζεται εμπλουτισμός ή νόθευση του ημιαγωγού. Ένας ημιαγωγός με προσμίξεις είναι γνωστός σαν εμπλουτισμένος ή νοθευμένος ημιαγωγός ή εξωγενής ημιαγωγός (extrinsic semiconductor).

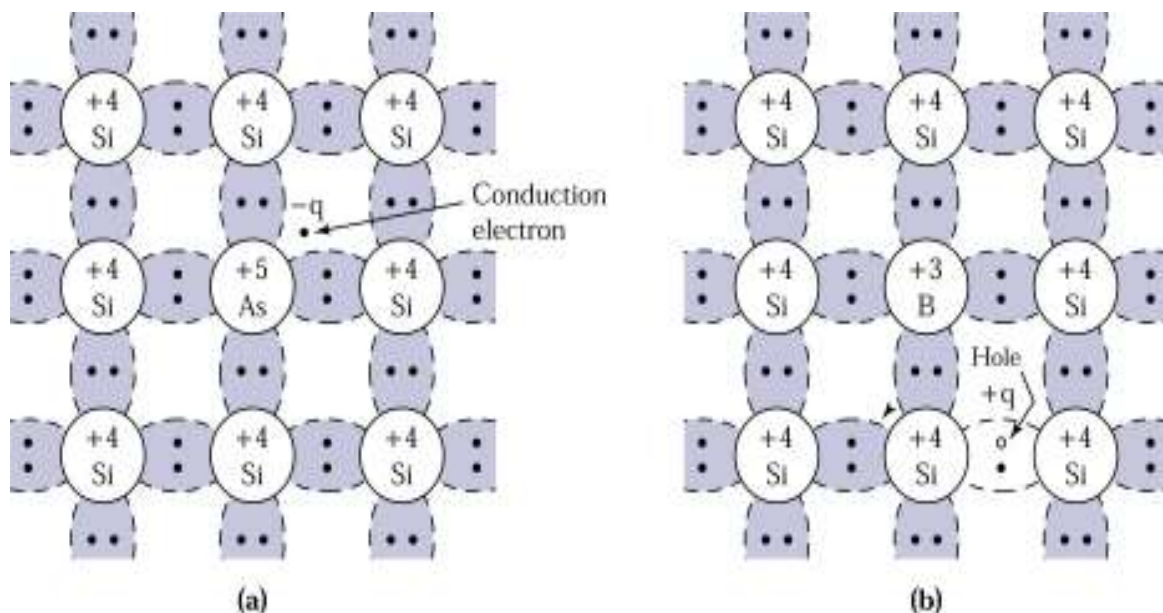
Ουσιαστικά, εφόσον θέλουμε να αυξήσουμε την αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού, θα πρέπει με κάποιο τρόπο να δημιουργήσουμε στον όγκο του επιπλέον ελεύθερα ηλεκτρόνια ή/και οπές. Το πως επιτυγχάνεται κάτι τέτοιο αναλύεται ποιοτικά στις επόμενες γραμμές.

η2) Ημιαγωγοί με προσμίξεις άτομα δοτών – Ημιαγωγοί τύπου n

Έστω ότι στον κρύσταλλο του Si μερικά άτομα Si αντικαθίστανται από άτομα της VA ομάδας του Περιοδικού Πίνακα, όπως άτομα Αρσενικού (As), Φωσφόρου (P) ή Αντιμονίου (Sb). Τα άτομα αυτά έχουν, ως γνωστόν, πέντε ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους τους. Εάν ένα τέτοιο άτομο αντικαταστάσει ένα άτομο Si στον κρύσταλλο του Si, τότε τα τέσσερα από τα πέντε ηλεκτρόνια σθένους του θα σχηματίσουν ομοιοπολικό δεσμό με τα τέσσερα γειτονικά άτομα Si στον κρύσταλλο, ενώ το πέμπτο ηλεκτρόνιο, αμέτοχο σε δεσμό, θα είναι πολύ χαλαρά συνδεδεμένο με τον πυρήνα και επομένως η προσφορά ενός πολύ μικρού ποσού ενέργειας (π.χ. θερμική ενέργεια περιβάλλοντος) είναι αρκετή για να αποσπαστεί αυτό το ηλεκτρόνιο και να γίνει ελεύθερο, όπως φαίνεται στο σχήμα 3(a). Το ηλεκτρόνιο αυτό είναι ηλεκτρόνιο αγωγιμότητας, γιατί συμβάλλει στο ηλεκτρικό ρεύμα, που διαρρέει τον ημιαγωγό, όταν στα άκρα του εφαρμοστεί μία τάση [2, 3, 4, 5, 6].

Αφού κάθε άτομο της πεντασθενούς πρόσμιξης προσφέρει από ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο, είναι δυνατός ο έλεγχος του αριθμού των (επιπλέον) ελευθέρων ηλεκτρονίων με τον έλεγχο της ποσότητας της πρόσμιξης, που εισάγεται στον κρύσταλλο του Si. Οι φορείς, που περιέχονται τώρα στον κρύσταλλο του Si, είναι: α) οπές και ελεύθερα ηλεκτρόνια, που προέρχονται από σπασμένους δεσμούς μεταξύ ατόμων Si και β) ελεύθερα ηλεκτρόνια, που προέρχονται από τα άτομα της πεντασθενούς πρόσμιξης, που εισήχθη στον κρύσταλλο. Είναι φανερό ότι τελικά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια στον κρύσταλλο είναι πολύ περισσότερα από τις οπές. Επειδή οι προσμίξεις αυτού του τύπου (πεντασθενή άτομα) δίνουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στον κρύσταλλο, ονομάζονται δότες (donors). Το Si, που εμπλουτίζεται με μία πεντασθενή πρόσμιξη, ονομάζεται ημιαγωγός τύπου n (από το negative), επειδή οι κύριοι φορείς του ρεύματος σε αυτούς τους ημιαγωγούς είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια, που αφθονούν σε σχέση με τις οπές στον κρύσταλλο. Για αυτό το λόγο τα ηλεκτρόνια, σε αυτή την περίπτωση, ονομάζονται φορείς πλειοψηφίας ή πλειονότητας, ενώ οι οπές ονομάζονται φορές μειοψηφίας ή μειονότητας.

Προσέξτε!!! Παρότι ο ημιαγωγός ονομάζεται τύπου n είναι ηλεκτρικά ουδέτερος. Πράγματι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των προσμίξεων εγκαταλείποντας το άτομο της πεντασθενούς πρόσμιξης από την οποία προέρχονται, αφήνουν πίσω τους ένα θετικό ιόν δότη (με ένα θετικό φορτίο), με αποτέλεσμα το συνολικό φορτίο να είναι μηδέν. Επίσης, για



Σχήμα 3: Σχηματική διδιάστατη αναπαράσταση δεσμών (a) n τύπου Si με άτομο δότη (Αρσενικού) (b) p τύπου Si με άτομο αποδέκτη (Βορίου) [2].

κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο, που προέρχεται από τον “καθαρό” ημιαγωγό του Si, υπάρχει η αντίστοιχη οπή, με αποτέλεσμα και πάλι το συνολικό φορτίο να είναι μηδέν. Αυτό, που πρέπει να θυμάστε, είναι ότι οι δότες σε ένα κρύσταλλο Si είναι θετικά ιόντα, εάν θεωρηθεί ότι όλοι οι δότες είναι ιονισμένοι, δηλαδή έχουν χάσει το πέμπτο ηλεκτρόνιο σθένους τους.

γ3) Ημιαγωγοί με προσμίξεις άτομα αποδεκτών – Ημιαγωγοί τύπου p

Εάν αντί για μία πεντασθενή πρόσμιξη εισαχθεί στον κρύσταλλο του Si μία τρισθενής πρόσμιξη, δηλαδή άτομα στοιχείων της III ομάδας του Περιοδικού Πίνακα, η εικόνα είναι τελειώς διαφορετική από αυτή, που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο [2, 3, 4, 5, 6]. Τα άτομα αυτά, όπως είναι το Αργίλιο (Al), το Βόριο (B) και το Γάλλιο (Ga), έχουν τρία ηλεκτρόνια στην εξωτερική τους στοιβάδα. Καθένα από τα άτομα της τρισθενούς πρόσμιξης, που αντικαθιστά ένα άτομο Si στον κρύσταλλο, δημιουργεί με τα τρία ηλεκτρόνια σθένους, που διαθέτει, τρεις ομοιοπολικούς δεσμούς με τρία από τα τέσσερα γειτονικά του άτομα Si, ενώ με το τέταρτο άτομο δημιουργεί έναν ασυμπλήρωτο δεσμό σθένους, όπως παραστατικά φαίνεται στο σχήμα 3(b). Αυτός ο ασυμπλήρωτος δεσμός σθένους είναι μία ανωμαλία στην ομοιομορφία του πλέγματος και γίνεται έδρα γένεσης μίας οπής. Πράγματι η ανωμαλία αυτή καταργείται εύκολα από ένα γειτονικό ηλεκτρόνιο σθένους, εάν του προσφερθεί πολύ μικρή ενέργεια. Τα άτομα των τρισθενών προσμίξεων ουσιαστικά μπορούν να δεχθούν ένα ηλεκτρόνιο σθένους από ένα γειτονικό άτομο Si του πλέγματος, δημιουργώντας έτσι μία οπή στον κρύσταλλο του ημιαγωγού, ενώ ταυτόχρονα τα ίδια μετατρέπονται σε αρνητικά ιόντα (με ένα φορτίο).

Επειδή και σε συνηθισμένη ακόμα θερμοκρασία σχεδόν όλα τα άτομα των τρισθενών προσμίξεων δέχονται από ένα ηλεκτρόνιο, ονομάζονται αποδέκτες (acceptors). Είναι φανερό ότι εκτός από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τις οπές, που προέρχονται από τον κρύσταλλο του Si και είναι ίσα (σε αριθμό) μεταξύ τους, υπάρχουν και οι οπές, που οφείλονται στην παρουσία των τρισθενών προσμίξεων στο σώμα του ημιαγωγού. Επομένως οι οπές είναι περισσότερες (και μάλιστα, όπως αποδεικνύεται πολύ περισσότερες) από τα ελεύθερα ηλεκτρόνια του κρυστάλλου, με αποτέλεσμα η αγωγιμότητα σε αυτού του είδους τους ημιαγωγούς να οφείλεται κυρίως στις θετικές οπές. Για αυτό, αυτού του είδους οι ημιαγωγοί ονομάζονται ημιαγωγοί τύπου p (από το positive) και οι οπές φορείς πλειοψηφίας ή πλειονότητας, ενώ τα ηλεκτρόνια ονομάζονται φορές μειοψηφίας ή μειονότητας. Οι τρισθενείς προσμίξεις, που εισάγονται στον κρύσταλλο, ονομάζονται προσμίξεις τύπου p [2, 3, 4, 5, 6].

Αξίζει να σημειωθεί εδώ ότι, όπως οι ημιαγωγοί τύπου n, έτσι και οι ημιαγωγοί τύπου p είναι, όπως φαίνεται και από την πιο πάνω ανάλυση, ουδέτεροι.

B. Βασικές ημιαγωγικές διατάξεις

Δημιουργώντας με διάφορους τρόπους σε κρυστάλλους Si περιοχές τύπου p και τύπου n και συνδυάζοντάς τες σε συγκεκριμένους σχηματισμούς, προκύπτουν τα διάφορα ημιαγωγικά συστήματα και διατάξεις, που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη ηλεκτρονική.

Τα στοιχειώδη (βασικά) δομικά στοιχεία των ημιαγωγικών διατάξεων Si είναι: η δίοδος ή επαφή p-n (p-n junction) και ο πυκνωτής MOS (Metal-Oxide-Semiconductor capacitor), τα οποία χρησιμοποιούνται είτε σαν τμήματα ημιαγωγικών συστημάτων είτε σαν αυτόνομες διατάξεις σε ολοκληρωμένα κυκλώματα.

1. Δίοδος ή Επαφή p-n

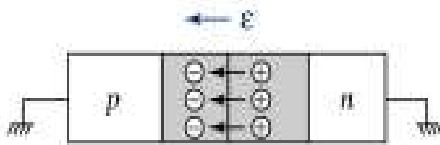
Μία επαφή (ή δίοδος) p-n είναι η παράθεση δύο περιοχών αντιθέτου τύπου ενός και του αυτού μονολιθικού ημιαγωγού. Η επαφή p-n επιτρέπει τη ροή των φορέων πλειονότητας προς μία μόνο κατεύθυνση, δηλαδή συμπεριφέρεται σαν μονόδρομος αγωγός. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται εκτεταμένα σαν ανορθωτής της εναλλασσόμενης τάσης στα τροφοδοτικά, σαν διακόπτης καθώς και σε άλλες εφαρμογές σε ηλεκτρονικά κυκλώματα. Είναι το βασικό δομικό στοιχείο για τα διπολικά τρανζίστορς και τα θυρίστορς καθώς επίσης και για τα τρανζίστορς JFETs και MOSFETs. Κάτω από κατάλληλες συνθήκες πόλωσης ή όταν εκτίθεται στο φως η δίοδος p-n μπορεί να λειτουργήσει σε μικροκυματικά κυκλώματα ή σε φωτονικές διατάξεις [5].

Στην επαφή p-n, που θα παρουσιάσουμε στα επόμενα, θεωρούμε ότι οι δύο περιοχές αντιθέτου τύπου είναι ομοιόμορφα νοθευμένες με αποδέκτες, συγκέντρωσης N_A και δότες, συγκέντρωσης N_D αντίστοιχα. Παρόλο που, στην πράξη, το πέρασμα από τη μία περιοχή στην άλλη γίνεται βαθμιαία, για διευκόλυνση της παρουσίασης θα θεωρήσουμε ότι το πέρασμα είναι απότομο. Το όριο, όπου το υλικό τύπου p συναντά το υλικό τύπου n, ονομάζεται επαφή και κατ' επέκταση και όλη η διάταξη ονομάζεται επαφή p-n [2, 3, 6].

α) Κατάσταση θερμικής ισορροπίας (Thermal equilibrium condition) – Περιοχή απογύμνωσης (Depletion region)

Μόλις δημιουργηθεί η δίοδος p-n, οι συγκεντρώσεις οπών και ηλεκτρονίων γύρω από την επαφή παρουσιάζουν απότομη ασυνέχεια. Αυτή η διαφορά συγκέντρωσης φορέων οδηγεί σε ταυτόχρονη διάχυση οπών από το τμήμα τύπου p στο τμήμα τύπου n και ελευθέρων ηλεκτρονίων από το τμήμα τύπου n στο τμήμα τύπου p, που τείνει να καταργήσει την ανισοκατανομή αυτή. Καθώς οι οπές διαχέονται από την p περιοχή στην n,

ορισμένα από τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα των αποδεκτών (N_A^-) απομένουν στην p περιοχή, πολύ κοντά στην επαφή, χωρίς το φορτίο τους να “εξουδετερώνεται” από το θετικό φορτίο των οπών, που εγκατέλειψαν την περιοχή. Αυτό συμβαίνει, γιατί τα άτομα των αποδεκτών συμμετέχουν στους ομοιοπολικούς δεσμούς του ημιαγωγικού κρυσταλλικού πλέγματος και επομένως είναι ακίνητα, ενώ οι οπές είναι ευκίνητες. Παρόμοια, καθώς ελεύθερα ηλεκτρόνια εισέρχονται αθρόα από την n περιοχή στην p, αρκετά από τα θετικά φορτισμένα ιόντα των δοτών (N_D^+) απομένουν στην n περιοχή, πολύ κοντά στην επαφή, χωρίς το φορτίο τους να “εξουδετερώνεται” από το αρνητικό φορτίο των ηλεκτρονίων, που εγκατέλειψαν την περιοχή. Συνεπώς ένα αρνητικό φορτίο χώρου θα σχηματισθεί στην p περιοχή, πολύ κοντά στην επαφή και ένα θετικό φορτίο χώρου θα σχηματισθεί στην n περιοχή, επίσης πολύ κοντά στην επαφή. Αυτή η περιοχή φορτίων χώρου δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο στην επαφή, που η κατεύθυνσή του είναι από το θετικό φορτίο (n περιοχή) προς το αρνητικό (p περιοχή), όπως φαίνεται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4: Η περιοχή απογύμνωσης, τα φορτία χώρου και το ηλεκτρικό πεδίο μίας επαφής p-n σε θερμική ισορροπία [2].

Μεταξύ των δύο τμημάτων της επαφής αναπτύσσεται μία διαφορά δυναμικού V_0 και η ροή των φορέων θα σταματήσει μόνον όταν αυτή η διαφορά δυναμικού γίνει αρκετή, ώστε ο αντίστοιχος φραγμός δυναμικού να “εμποδίζει” την παραπέρα διάχυση. Αυτή η τάση V_0 , που μετράται σε ανοικτό κύκλωμα p-n, λέγεται τάση επαφής ή τάση διάχυσης και αποδεικνύεται ότι δίνεται από τον τύπο:

$$|V_0| = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2} \quad (1)$$

όπου:

k: η σταθερά του Boltzman, T: απόλυτη θερμοκρασία

q: το φορτίο του ηλεκτρονίου

n_i : η συγκέντρωση φορέων (οπών ή ηλεκτρονίων) στον ενδογενή κρύσταλλο Si και

N_D, N_A : οι συγκεντρώσεις ατόμων δοτών και αποδεκτών στο τμήμα τύπου n και p του νοθευμένου ημιαγωγού αντίστοιχα.

Σε θερμοκρασία δωματίου η τάση επαφής είναι 0.7 V για τις διόδους Si και 0.3 V για τις διόδους Ge.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι μόλις ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο διαχέεται στην περιοχή p , γίνεται φορέας μειονότητας. Με τόσες πολλές οπές γύρω του ο φορέας μειονότητας έχει μικρό χρόνο ζωής και σύντομα “πέφτει” μέσα σε μία οπή, οπότε η οπή εξαφανίζεται και το ηλεκτρόνιο γίνεται ηλεκτρόνιο σθένους. Δηλαδή γίνεται επανασύνδεση των ελευθέρων ηλεκτρονίων, που εισέρχονται στο τμήμα τύπου p , με τις οπές, που υπάρχουν σε αυτό. Παρόμοια φαινόμενα επανασύνδεσης οπών-ελευθέρων ηλεκτρονίων συμβαίνουν και κατά τη διάχυση οπών (φορέων μειονότητας) στο τμήμα τύπου n . Επομένως γύρω από την επαφή δημιουργείται, όπως είδαμε, μία περιοχή φορτίου χώρου, η οποία είναι πρακτικά απογυμνωμένη από φορείς και για το λόγο αυτό ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης (depletion region).

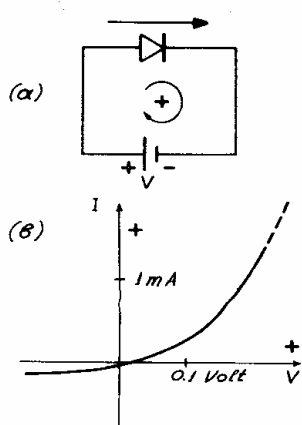
Μία πιο ενδελεχής ανάλυση της επαφής πρέπει να λάβει υπόψη τόσο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια (φορείς μειοψηφίας), που υπάρχουν αρχικά στο τμήμα τύπου p , όσο και τις οπές (επίσης φορείς μειοψηφίας), που υπάρχουν αρχικά στο τμήμα τύπου n και οφείλονται στις θερμικές διασπάσεις οπών-ηλεκτρονίων, οι οποίες ούτως ή άλλως συμβαίνουν σε έναν κρύσταλλο Si . Όταν αρχίζει να δημιουργείται η περιοχή των αντίθετων φορτίων χώρου γύρω από την επαφή, εγκαθίσταται στην περιοχή, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, ένα ηλεκτρικό πεδίο, έντασης ϵ , με κατεύθυνση από το τμήμα τύπου n προς το τμήμα τύπου p (σχήμα 4). Εξαιτίας αυτού του πεδίου ελεύθερα ηλεκτρόνια (φορείς μειοψηφίας) μετακινούνται από την περιοχή p στην n και οπές (επίσης φορείς μειοψηφίας) από την n στην p . Έτσι, εκτός από το ρεύμα διάχυσης οπών και ηλεκτρονίων, που περιγράφηκε πιο πάνω και οδηγεί στη δημιουργία των φορτίων χώρου γύρω από την επαφή (θυμηθείτε ότι η αντίθετης φοράς κίνηση οπών και ηλεκτρονίων δημιουργεί ουσιαστικά ηλεκτρικό ρεύμα ίδιας φοράς, αφού οι συγκεκριμένοι φορείς έχουν αντίθετα φορτία), ταυτόχρονα υπάρχει και ένα ρεύμα ολίσθησης ηλεκτρονίων και οπών (που οφείλεται στο αναπτυσσόμενο στην επαφή ηλεκτρικό πεδίο). Το ρεύμα ολίσθησης έχει αντίθετη φορά από το ρεύμα διάχυσης. Σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας, δηλαδή σε μία σταθερή κατάσταση χωρίς εξωτερική διέγερση για μία δεδομένη θερμοκρασία, θα πρέπει το συνολικό ρεύμα, που ρέει κατά μήκος της επαφής, να είναι ίσο με μηδέν. Ως εκ τούτου για κάθε είδους φορέων το ρεύμα ολίσθησης, που οφείλεται στο ηλεκτρικό πεδίο, πρέπει να είναι ίσο σε μέτρο με το ρεύμα διάχυσης, που οφείλεται στην ανομοιομορφία (βαθμίδα) της συγκέντρωσης των φορέων στην επαφή, έτσι ώστε τα δύο ρεύματα να αλληλοαναιρούνται. Σε αυτή την κατάσταση ο φραγμός δυναμικού (τάση επαφής) είναι τόσο μεγάλος, ώστε να “εμποδίζει” την παραπέρα διάχυση, με αποτέλεσμα το ρεύμα των ελάχιστων φορέων, που μπορεί τώρα να διαχέεται να γίνεται ίσο και να εξουδετερώνεται από το ρεύμα ολίσθησης, που ούτως ή άλλως είναι πολύ

μικρό, αφού οι αρχικοί φορείς μειοψηφίας (στους οποίους οφείλεται) στα δύο τμήματα p και n είναι λίγοι.

β) Ορθή Πόλωση (Forward Bias)

Εάν εφαρμοσθεί στα άκρα της διόδου τάση V με πολικότητα αντίθετη από εκείνη της τάσης επαφής, θα μειωθεί ο φραγμός δυναμικού (δηλαδή το ηλεκτροστατικό δυναμικό) V_0 στην περιοχή απογύμνωσης κατά V . Αυτό θα έχει σαν συνέπεια τη μείωση του ρεύματος ολίσθησης (αφού μειώνεται το δυναμικό, μειώνεται και το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί) με ταυτόχρονη αύξηση του ρεύματος διάχυσης. Με άλλα λόγια με τη μείωση του φραγμού δυναμικού διευκολύνεται η αθρόα έγχυση (εισβολή) φορέων μειοψηφίας (οπών στο τμήμα τύπου n από το τμήμα τύπου p και ηλεκτρονίων στο p από το n), που διαχέονται τώρα ευκολότερα και επικρατούν του αντιθέτου “αναιμικού” ρεύματος ολίσθησης φορέων πλειοψηφίας (ηλεκτρονίων στο τμήμα τύπου n από το τμήμα τύπου p και οπών στο p από το n). Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι η διάδος είναι ορθά πολωμένη και μικρή αύξηση της τάσης πόλωσης της διόδου σε τιμές μεγαλύτερες της V_0 οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της έντασης του ρεύματος ορθής φοράς (ρεύμα διάχυσης) και επομένως του συνολικού ρεύματος.

Στο σχήμα 5 δίνεται μία διάδος p-n (κυκλωματικό σύμβολο της διόδου) πολωμένη ορθά καθώς και αντιπροσωπευτική χαρακτηριστική έντασης ρεύματος I – τάσης πόλωσης V μίας ορθά πολωμένης διόδου.

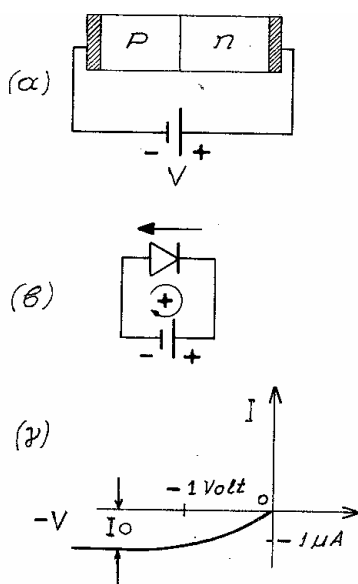


Σχήμα 5: (α) Δίοδος p-n (κυκλωματικό σύμβολο), πολωμένη ορθά και (β) I - V χαρακτηριστική της ορθά πολωμένης διόδου [3].

Όταν η διάδος είναι πολωμένη ορθά, χρειάζεται προσοχή, ώστε το ρεύμα, που τη διαρρέει, να μην πάρει εξαιρετικά μεγάλες τιμές, γιατί η διάδος τελικά θα καταστραφεί, επειδή η κατανάλωση ισχύος γίνεται πολύ μεγάλη.

γ) Ανάστροφη πόλωση (Reverse Bias)

Όταν στα άκρα της διόδου εφαρμόζεται μία διαφορά δυναμικού με πολικότητα ίδια με την πολικότητα της τάσης επαφής, δηλαδή, όταν συνδέεται ο θετικός πόλος (+) της πηγής τάσης με το τμήμα τύπου n της διόδου και ο αρνητικός πόλος με το τμήμα τύπου p, όπως φαίνεται στο σχήμα 6α, τότε λέμε ότι η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη. Στην περίπτωση αυτή η εφαρμοζόμενη τάση αυξάνει το ηλεκτροστατικό δυναμικό (τάση επαφής) V_0 , που επικρατεί στην περιοχή απογύμνωσης κατά V . Το αυξημένο δυναμικό εμποδίζει τις οπές του τμήματος p να διαχυθούν στο τμήμα n σαν φορείς μειοψηφίας, ενώ ευνοεί τις λίγες θερμικές οπές, που γεννιούνται στο τμήμα n να κατεβούν τον ακόμα βαθύτερο “κρημνό” δυναμικού και να εισέλθουν στο τμήμα p. Δηλαδή, ενώ μειώνεται το ρεύμα διάχυσης οπών σε σημείο, που να θεωρείται μηδενικό, αυξάνεται το ρεύμα ολίσθησης οπών, με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία ασυμμετρία ανάμεσα στις συνιστώσες ρεύματος οπών κατά τις δύο διευθύνσεις. Αντίστοιχα θα συμβούν και για τα ηλεκτρόνια και αυτό θα επιτείνει την ασυμμετρία στο ολικό ρεύμα κατά τις δύο διευθύνσεις. Συνεπώς στη διόδο θα ρέει ένα μακροσκοπικό ρεύμα, πολύ μικρής έντασης, γιατί ο αριθμός των θερμικών διασπάσεων οπών-ηλεκτρονίων το δευτερόλεπτο είναι περιορισμένος. Αυτό το ρεύμα, που είναι κατ’ ουσία ρεύμα ολίσθησης, ονομάζεται ανάστροφο ρεύμα (ή ανάστροφο ρεύμα κόρου) I_r , που μόνο η θερμοκρασία μπορεί να το αυξήσει.



Σχήμα 6: (α) Δίοδος p-n ανάστροφα πολωμένη
(β) Κυκλωματικό σύμβολο της ανάστροφα πολωμένης διόδου p-n και
(γ) I-V χαρακτηριστική της ανάστροφα πολωμένης διόδου [3].

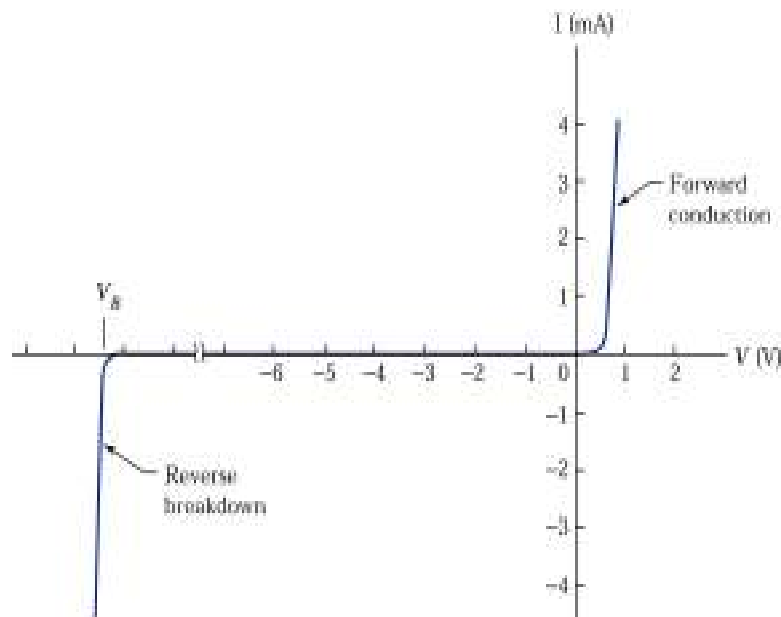
Το ανάστροφο ρεύμα εξακολουθεί να έχει πολύ μικρή ένταση, καθώς η ανάστροφη τάση, που εφαρμόζεται στη διόδο, συνεχίζει να αυξάνει μέχρι μία ορισμένη τιμή. Πολύ μικρή αύξηση της ανάστροφης τάσης πάνω από αυτή τη χαρακτηριστική τιμή οδηγεί σε απότομη αύξηση του ανάστροφου ρεύματος, που διαρρέει τη διόδο (σχήμα 7). Η

χαρακτηριστική αυτή τιμή της τάσης ονομάζεται (ανάστροφη) τάση διάσπασης ή τάση κατάρρευσης ή τάση Zener. Στην κατάσταση αυτή στη δίοδο εμφανίζεται το φαινόμενο της χιονοστιβάδας ή καταγισμού των φορέων (avalanche breakdown), που περιγράφεται στη συνέχεια.

Όταν η ανάστροφη τάση είναι αρκετά μεγάλη, μερικά ελεύθερα ηλεκτρόνια, που παράγονται θερμικά, επιταχύνονται αρκετά από το εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο, αποκτώντας έτσι μεγάλη κινητική ενέργεια, ώστε προσκρούοντας σε δέσμια ηλεκτρόνια να διασπών τους δεσμούς τους, δημιουργώντας έτσι νέα ζευγάρια οπών-ηλεκτρονίων. Τα νέα ζευγάρια φορέων επιταχύνονται και αυτά με τη σειρά τους από το ηλεκτρικό πεδίο, δημιουργώντας καινούργια ζευγάρια. Το φαινόμενο γενικεύεται και καταλήγει σε μία “χιονοστιβάδα” με ένα τεράστιο αριθμό ηλεκτρονίων σθένους, που εγκατέλειψαν τις τροχιές τους και έγιναν ελεύθερα. Αυτή η “χιονοστιβάδα” (ο καταγισμός) των φορέων εμφανίζεται μακροσκοπικά με την απότομη αύξηση του ανάστροφου ρεύματος της διόδου στην περιοχή της τάσης διάσπασης.

Αποδεικνύεται ότι η ένταση του ρεύματος I , που διαρρέει τη δίοδο p-n δίνεται τόσο για την ορθή όσο και για την ανάστροφη πόλωση από τη σχέση:

$$I = I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (2)$$



Σχήμα 7: Χαρακτηριστική έντασης ρεύματος (I)–τάσης (V) μίας τυπικής διόδου p-n από Si [2]

όπου:

k : η σταθερά του Boltzman, T : απόλυτη θερμοκρασία

q : το φορτίο του ηλεκτρονίου,

V : η εφαρμοζόμενη στη δίοδο τάση πόλωσης και

I_0 : το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου.

Πράγματι για $V > 0$ η ένταση του ρεύματος, που διαρρέει τη δίοδο, αυξάνεται εκθετικά με το χρόνο, χωρίς (φυσικά) να απειρίζεται, γιατί τόσο ο ίδιος ο κρύσταλλος του Si όσο και η μεταλλική επαφή παρουσιάζουν κάποια αντίσταση, που οδηγεί σε πτώση τάσης τόσο μεγαλύτερη όσο το ρεύμα ορθής φοράς αυξάνει. Έτσι για μεγάλες τιμές της τάσης η δίοδος θα συμπεριφέρεται (κατά προσέγγιση) σαν ωμική αντίσταση. Για $V < 0$ και για (σχετικά) μεγάλες τιμές της ανάστροφης τάσης, τέτοιες ώστε $|V| \gg kT/q$, ο πρώτος όρος της παρένθεσης στη (2) θα τείνει στο 0, οπότε τελικά $I \rightarrow -I_0$. Παρατηρούμε επομένως ότι το I_0 , που δίνεται στη σχέση (2) δεν είναι άλλο από το ανάστροφο ρεύμα κόρου της διόδου.

Στο σχήμα 7 φαίνεται συνολικά η χαρακτηριστική καμπύλη έντασης ρεύματος (I) – τάσης (V) τόσο στην ορθή όσο και στην ανάστροφη πόλωση για μία δίοδο p-n πυριτίου.

Αντίσταση διόδου

Η δίοδος είναι ένα μη γραμμικό στοιχείο, επειδή το ρεύμα που τη διαρρέει δεν είναι ανάλογο της τάσης, που εφαρμόζεται στα άκρα της.

Γενικά, αναφερόμενοι στην αντίσταση της διόδου, διακρίνουμε την dc αντίσταση R (R_F κατά την ορθή φορά, R_R κατά την ανάστροφη) της διόδου από τη δυναμική της αντίσταση r_d [5].

Η dc αντίσταση R της διόδου ορίζεται ως ο λόγος της τάσης V (V_F για την ορθή V_R για την ανάστροφη πόλωση) προς την αντίστοιχη ένταση I του ρεύματος (I_F για την ορθή και I_R για την ανάστροφη αντίστοιχα). Δηλαδή:

$$R_F = \frac{V_F}{I_F} \quad (\text{ορθή πόλωση}) \quad \text{και} \quad R_R = \frac{V_R}{I_R} \quad (\text{ανάστροφη πόλωση}) \quad (3)$$

Είναι προφανές ότι η dc αντίσταση της διόδου δεν είναι σταθερή. Η R , όπως είναι αναμενόμενο, είναι μικρή κατά την ορθή φορά (R_F) και μεγάλη κατά την ανάστροφη (R_R). Επίσης και σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυση η dc αντίσταση της διόδου κατά την ορθή φορά ελαττώνεται με την αύξηση του ρεύματος. Η dc αντίσταση της διόδου κατά την ανάστροφη φορά, αν και κατά πολύ μεγαλύτερη της αντίστασης κατά την ορθή φορά,

ελαττώνεται καθώς η τάση πλησιάζει την ανάστροφη τάση διάσπασης (reverse voltage breakdown).

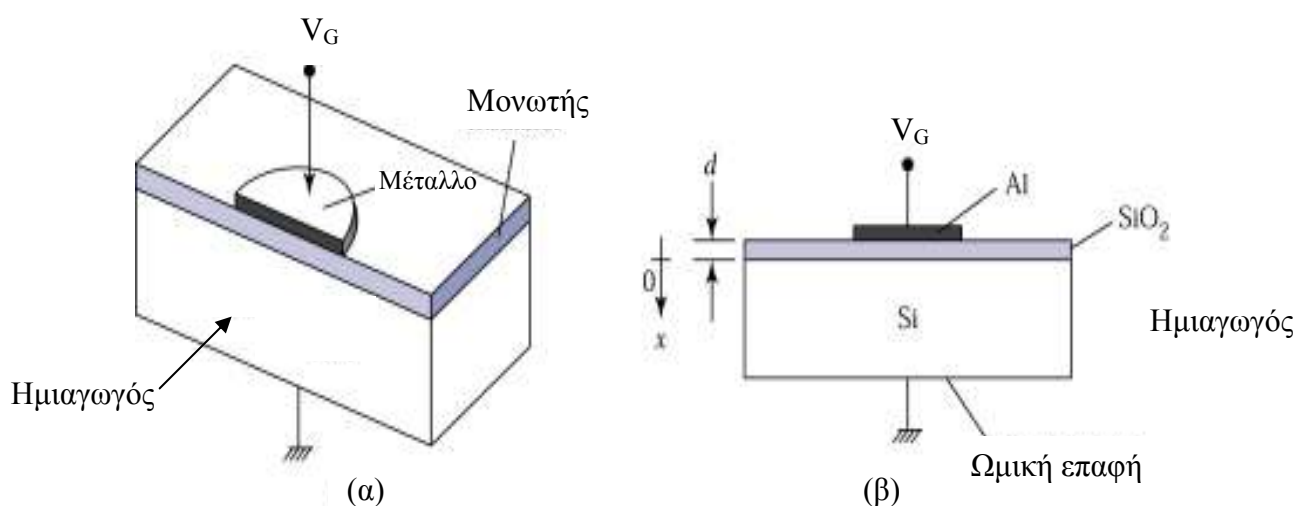
Η δυναμική αντίσταση r_d της διόδου ορίζεται ως το πηλίκο μίας μικρής μεταβολής ΔV της τάσης, που εφαρμόζεται στα άκρα της διόδου προς την αντίστοιχη μεταβολή ΔI , που επιφέρει στην ένταση του ρεύματος, που διαρρέει τη δίοδο. Δηλαδή:

$$r_d = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (4)$$

Η δυναμική αντίσταση της διόδου έχει νόημα, όταν υπολογίζεται μακριά από το “γόνατο” της χαρακτηριστικής της διόδου I-V, γιατί τότε είναι (σε μεγάλη προσέγγιση) σταθερή και χαρακτηρίζει τη δίοδο.

2. Ο πυκνωτής Μετάλλου - Οξειδίου - Ημιαγωγού (MOS)

Ο πυκνωτής ή δίοδος μετάλλου – οξειδίου – ημιαγωγού (Metal – Oxide – Semiconductor, MOS) ανήκει στην γενικότερη κατηγορία των δομών μετάλλου – μονωτή – ημιαγωγού (Metal – Insulator – Semiconductor, MIS). Ουσιαστικά μία δομή MIS είναι ένα σύστημα που αποτελείται από ένα ημιαγωγό (τύπου p ή n), πάνω στον οποίο έχει αναπτυχθεί ένα μονωτικό στρώμα και πάνω από αυτό ένα στρώμα μετάλλου (σχήμα 8). Συνήθως σαν ημιαγωγός χρησιμοποιείται το πυρίτιο (Si), σαν μονωτής το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), που αναπτύσσεται με τη μέθοδο της θερμικής οξείδωσης στο υπόστρωμα πυριτίου και σαν



Σχήμα 8: (α) Προοπτική άποψη μιας δομής MIS και (β) Εγκάρσια τομή ενός πυκνωτή MOS [2].

μέταλλο το αλουμίνιο (Al) ή το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο εμπλουτισμένο με υψηλής πυκνότητας προσμίξεις.

Οι πυκνωτές MOS χρησιμοποιούνται στα γραμμικά και, πιά συχνά, στα ψηφιακά κυκλώματα σαν στοιχεία αποθήκευσης φορτίου στις μνήμες τυχαίας προσπέλασης (Random Access Memories, RAMs). Επιπλέον η δίοδος MOS αποτελεί το βασικό στοιχείο των μετάλλου – οξειδίου – ημιαγωγού τρανζίστορς επίδρασης πεδίου (MOS Field Effect Transistors, MOSFETs), που κυριαρχούν πλέον στην βιομηχανία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Στο σχήμα 8β 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, όπως φαίνεται στο σχήμα 8β.

Ένας ιδανικός πυκνωτής είναι αυτός, που πληροί τις πιά κάτω παραδοχές:

α) Ο μονωτής (δηλαδή το οξείδιο) είναι ιδανικός, η αντίστασή του είναι άπειρη και επομένως δεν υπάρχει μεταφορά φορτίου διαμέσου του οξειδίου υπό συνθήκες συνεχούς (dc) πόλωσης.

β) Υπό συνθήκες οποιασδήποτε πόλωσης τα μόνα φορτία, που εμφανίζονται στον πυκνωτή, είναι εκείνα που βρίσκονται στον ημιαγωγό στην επιφάνειά του ή κοντά στην επιφάνειά του με το οξείδιο και εκείνα με ίσο και αντίθετο πρόσημο, που βρίσκονται στο μέταλλο και στη διεπιφάνειά του με το μονωτή. Για τον ιδανικό μονωτή δεν υπάρχουν φορτία τόσο στην επιφάνειά του όσο και μέσα στον όγκο του.

Όταν ένας ιδανικός πυκνωτής MOS πολώνεται με εξωτερικές θετικές ή αρνητικές τάσεις, τρεις καταστάσεις μπορούν να διαμορφωθούν στην επιφάνεια του ημιαγωγού [2, 4, 6, 7, 8], που είναι οι εξής (θυμηθείτε ότι στην παρούσα ανάλυση αναφερόμαστε σε πυκνωτή, που ο ένας οπλισμός του είναι ημιαγωγός Si τύπου p, δηλαδή Si ομοιόμορφα νοθευμένο με προσμίξεις τύπου p, που είναι, όπως έχει αναφερθεί στην ενότητα A, άτομα αποδεκτών):

(i) $V_G < 0$ (Περίπτωση συσσώρευσης - Accumulation case): Όταν το υπόστρωμα πυριτίου (Si) τύπου p διατηρείται στο δυναμικό της γης και στην πύλη του πυκνωτή εφαρμόζεται μία αρνητική τάση, το μέταλλο αποκτά αρνητικό φορτίο στη διεπιφάνειά του με το οξείδιο. Ταυτόχρονα, με χωρητική δράση, πρόσθετες οπές (θετικά φορτία) συσσωρεύονται στη διεπιφάνεια του ημιαγωγού (πυριτίου) με το οξείδιο. Αφού ο ημιαγωγός είναι Si τύπου p, η

πυκνότητα οπών θα είναι ίση με τη συγκέντρωση των ατόμων αποδεκτών σε όλο τον όγκο του ημιαγωγού εκτός από την περιοχή της διεπιφάνειάς του με το οξείδιο, όπου έχει δημιουργηθεί ένα στρώμα συσσώρευσης οπών. Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι ο ημιαγωγός βρίσκεται σε κατάσταση συσσώρευσης (accumulation condition).

Θα μπορούσε κανείς εναλλακτικά να θεωρήσει ότι η συσσώρευση επιπλέον οπών στην επιφάνεια του Si, την προσκείμενη στο οξείδιο, οφείλεται στην έλξη θετικών φορτίων από τον όγκο του ημιαγωγού προς την επιφάνειά του, η οποία προκαλείται από την εφαρμογή αρνητικού δυναμικού στο ηλεκτρόδιο της πύλης. Και επειδή σε ημιαγωγό τύπου p οι ευκίνητοι θετικοί φορείς, που υπάρχουν άφθονοι στον όγκο του, είναι οι οπές, αυτές και θα μετακινηθούν προς την επιφάνεια κάτω από την επίδραση της εφαρμοζόμενης αρνητικής τάσης στην πύλη του πυκνωτή.

Εξαιτίας της συσσώρευσης των οπών στην επιφάνεια του ημιαγωγού εμφανίζεται ένα δυναμικό Ψ_s , που ονομάζεται επιφανειακό δυναμικό και οδηγεί σε μία επιφανειακή πτώση τάσης στον ημιαγωγό. Είναι προφανές ότι η τάση V_G στα άκρα του πυκνωτή ισούται με την πτώση τάσης V_{ox} κατά μήκος του οξειδίου (δηλαδή του μονωτικού του πυκνωτή) και την πτώση τάσης ψ_s στην επιφάνεια του ημιαγωγού. Δηλαδή:

$$V_G = V_{ox} + \Psi_s \quad (1)$$

(ii) $V_G > 0$ (Περίπτωση απογύμνωσης - Depletion case): Στην περίπτωση που στο μέταλλο εφαρμόζεται μικρή θετική τάση, οι θετικές οπές (φορείς πλειοψηφίας στο Si) απωθούνται μακριά από την επιφάνεια του Si, την προσκείμενη στο οξείδιο, με αποτέλεσμα μια περιοχή του ημιαγωγού, εύρους W , κοντά στην διεπιφάνεια ημιαγωγού/μονωτή να απογυμνώνεται από τους φορείς πλειοψηφίας. Η περιοχή αυτή ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης και η κατάσταση, στην οποία βρίσκεται τώρα ο πυκνωτής, είναι γνωστή σαν συνθήκη απογύμνωσης (depletion condition). Στην περιοχή αυτή έχουν απομείνει οι (αρνητικά) ιονισμένοι αποδέκτες, αφού οι θετικά φορτισμένες οπές, που εξουδετέρωναν το φορτίο τους, έχουν απομακρυνθεί από την περιοχή, εξαιτίας της θετικής τάσης, που εφαρμόζεται στον πυκνωτή. Οι ιονισμένοι αυτοί αποδέκτες της περιοχής απογύμνωσης παρέχουν το αρνητικό φορτίο του ημιαγωγικού οπλισμού του πυκνωτή, που η πυκνότητά του Q_{sc} ανά μονάδα επιφανείας δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{sc} = -qN_A W \quad (2)$$

όπου q το φορτίο του ηλεκτρονίου και N_A η συγκέντρωση των ατόμων αποδεκτών στο Si.

Το πλάτος W της περιοχής απογύμνωσης δίνεται από τη σχέση:

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \Psi_s}{qN_A}} \quad (3)$$

όπου Ψ_s το επιφανειακό δυναμικό στην κατάσταση απογύμνωσης και ε_s η διηλεκτρική σταθερά του Si.

Και στην περίπτωση αυτή εμφανίζεται επιφανειακό δυναμικό Ψ_s στον ημιαγωγό, ενώ εξακολουθεί να ισχύει η σχέση 1.

Η κατάσταση είναι αντίστοιχη με τη δημιουργία της περιοχής απογύμνωσης στην επαφή pn, που συζητήθηκε στην ενότητα 1.

(iii) $V_G \gg 0$ (Κατάσταση αναστροφής - Inversion case): Καθώς η θετική τάση της πύλης αυξάνεται, ολοένα και μεγαλύτερο πλήθος οπών απομακρύνεται (αποθούμενο από τη θετική τάση της πύλης) από τη διεπιφάνεια του Si με το οξείδιο, με αποτέλεσμα να διευρύνεται η περιοχή απογύμνωσης και να αυξάνεται επιπλέον το αρνητικό φορτίο της. Αυτό συνεχίζεται μέχρις ότου η τάση της πύλης αποκτήσει τέτοια τιμή, ώστε να μπορεί να συγκρατήσει ηλεκτρόνια στην επιφάνεια του Si. Τότε ηλεκτρόνια αρχίζουν να στοιβάζονται στη διεπιφάνεια του Si με το οξείδιο και επιπλέον αύξηση της εφαρμοζόμενης τάσης V_G στην πύλη οδηγεί σε αύξηση της συγκέντρωσης των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του ημιαγωγού, με αποτέλεσμα η συγκέντρωσή τους να γίνει μεγαλύτερη από αυτή των οπών στην επιφάνεια. Η επιφάνεια του Si αναστρέφεται και από τύπου p γίνεται τύπου n, γιατί τώρα υπερτερούν σε αυτή τα ηλεκτρόνια έναντι των οπών. Έτσι στον ημιαγωγό τύπου p έχουμε μία περιοχή της επιφάνειάς του με χαρακτηριστικά τύπου n, η οποία διαχωρίζεται από τον τύπου p όγκο του με μία περιοχή απογύμνωσης, εύρους W . Στην περίπτωση αυτή ο ημιαγωγός βρίσκεται σε κατάσταση αναστροφής (inversion condition). Το επιφανειακό στρώμα ηλεκτρονίων ονομάζεται στρώμα αναστροφής (inversion layer) και το εύρος του, που συμβολίζεται με x_i , είναι της τάξης μερικών ατομικών διαμέτρων. Αρχικά η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στην επιφάνεια, αν και πολύ μεγαλύτερη από αυτή των οπών, είναι ακόμη μικρότερη από τη συγκέντρωση οπών στον όγκο του ημιαγωγού (ασθενής αναστροφή – weak inversion). Όταν η V_G φτάσει κάποια τιμή V_T , τότε η πυκνότητα ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του ημιαγωγού είναι ίση με αυτή των οπών στον όγκο του (ισχυρή αναστροφή – strong inversion). Η τιμή V_T της τάσης της πύλης, για την οποία επιτυγχάνεται ισχυρή αναστροφή, ονομάζεται τάση κατωφλίου (threshold voltage) του πυκνωτή MOS. Περαιτέρω αύξηση της V_G οδηγεί σε αύξηση των ηλεκτρονίων, έτσι ώστε, τελικά, η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στην επιφάνεια θα ξεπεράσει τη συγκέντρωση οπών στον όγκο του πυριτίου.

Αποδεικνύεται ότι η συγκέντρωση ηλεκτρονίων n_s στο στρώμα αναστροφής δίνεται από τον τύπο:

$$n_s = n_{0p} \exp\left(\frac{q\Psi_s}{kT}\right) \quad (4)$$

όπου:

n_{0p} : η συγκέντρωση ηλεκτρονίων στον όγκο του ημιαγωγού,

Ψ_s : το επιφανειακό δυναμικό στην κατάσταση αναστροφής,

k : η σταθερά του Boltzman και

T : η απόλυτη θερμοκρασία.

Στην κατάσταση αναστροφής το αρνητικό φορτίο του ημιαγωγικού οπλισμού του πυκνωτή αποτελείται από τα θερμικά γεννημένα (ελεύθερα) ηλεκτρόνια στο στρώμα αναστροφής και τους ιονισμένους αποδέκτες στο στρώμα απογύμνωσης. Στην περίπτωση αυτή το συνολικό φορτίο Q_s ανά μονάδα επιφάνειας στην πλευρά του ημιαγωγού θα είναι:

$$Q_s = Q_n + Q_{sc} \quad (5)$$

όπου Q_n είναι το ανά μονάδα επιφάνειας φορτίο των ηλεκτρονίων του στρώματος αναστροφής και Q_{sc} το ανά μονάδα επιφάνειας φορτίο των ιονισμένων αποδεκτών στην περιοχή απογύμνωσης.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονισθεί ότι από τη στιγμή που σχηματίζεται στρώμα αναστροφής η περιοχή απογύμνωσης αποκτά το μέγιστο πλάτος της W_{max} . Το γεγονός αυτό οφείλεται στο ότι περαιτέρω αύξηση της τάσης στο μέταλλο οδηγεί περισσότερο σε αναστροφή παρά σε απογύμνωση, γιατί το φορτίο (ηλεκτρόνια) ισχυρής αναστροφής κοντά στη διεπιφάνεια με το οξείδιο είναι αρκετό για να θωρακίσει τον όγκο του ημιαγωγού από πρόσθετο φορτίο. Εξάλλου, όπως προκύπτει από τη σχέση (4), η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων στο στρώμα αναστροφής αυξάνει εκθετικά με το επιφανειακό δυναμικό (ουσιαστικά με την αύξηση της V_G , σχέση 1), ενώ το φορτίο Q_{sc} της περιοχής απογύμνωσης είναι ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του επιφανειακού δυναμικού Ψ_s και επομένως πολύ μικρότερο του φορτίου Q_n του στρώματος αναστροφής (σχέσεις 2 και 3)..

Έτσι στην περίπτωση ισχυρής αναστροφής (strong inversion) θα έχουμε ότι το συνολικό φορτίο στην πλευρά του ημιαγωγού θα είναι:

$$Q_s = Q_n + Q_{sc} = Q_n - qN_A W_{max} \quad (6)$$

Σε κάθε περίπτωση από τις παραπάνω το φορτίο Q_M του μετάλλου ανά μονάδα επιφάνειας είναι ίσο και αντίθετο με αυτό του ημιαγωγού:

$$Q_M = -Q_s \quad (7)$$

Χωρητικότητα του ιδανικού πυκνωτή MOS

Η συνολική χωρητικότητα C ενός πυκνωτή MOS ορίζεται από τη σχέση:

$$C = \frac{d(-Q_s)}{dV_G} \quad (8)$$

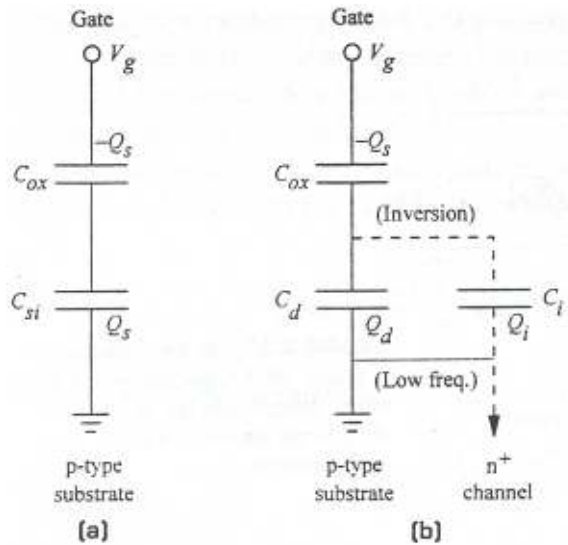
Το (-) στην παραπάνω έκφραση υποδηλώνει ότι το φορτίο, που εμφανίζεται στον ημιαγωγό, είναι πάντα αντιθέτου προσήμου από την εφαρμοζόμενη τάση.

Δεδομένου ότι η εξωτερικά εφαρμοζόμενη τάση εμφανίζεται εν μέρει στο οξειδίο (V_{ox}) και εν μέρει στον ημιαγωγό (ψ_s) έχουμε ότι:

$$V_G = V_{ox} + \psi_s = -\frac{Q_s}{C_{ox}} + \psi_s \quad (9)$$

όπου $C_{ox} = \epsilon_{ox}/d$ η χωρητικότητα του οξειδίου ανά μονάδα επιφανείας με ϵ_{ox} τη διηλεκτρική σταθερά του SiO_2 και d το πάχος του.

Επειδή η χωρητικότητα του ημιαγωγού ανά μονάδα επιφανείας είναι $C_s = d(-Q_s)/d\psi_s$ παραγωγίζοντας την (9) ως προς $d(-Q_s)$ προκύπτει ότι:



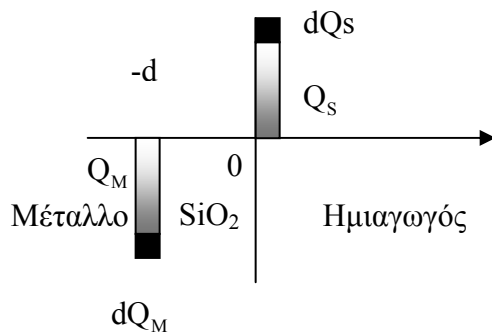
Σχήμα 9: Ισοδύναμο κύκλωμα σε επίπεδο χωρητικότητας του ιδανικού συστήματος MOS [6].

$$\frac{dV_G}{d(-Q_s)} = \frac{dV_{ox}}{d(-Q_s)} + \frac{d\psi_s}{d(-Q_s)} \Rightarrow \frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_s} \quad (10)$$

Επομένως το σύστημα ισοδυναμεί με δύο σε σειρά χωρητικότητες, όπως φαίνεται στο σχήμα 9α, αυτή του μονωτή (C_{ox}) και αυτή του ημιαγωγού (C_s) [1, 2, 6, 7, 8, 9,10].

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 ποία κατάσταση βρίσκεται η δίοδος (συσσώρευση, απογύμνωση, αναστροφή), ενώ η ac συνιστώσα είναι επιφορτισμένη με το να προκαλεί μεταβολές $d(Q_S)$ στο φορτίο, ώστε να μετράται η χωρητικότητα του συστήματος σε κάθε περίπτωση πόλωσης. Στα πιο κάτω θα αναφερθούμε στη μέτρηση της χωρητικότητας του πυκνωτή MOS στις διάφορες καταστάσεις του (συσσώρευση, απογύμνωση, αναστροφή) και θα διακρίνουμε (για την περίπτωση της αναστροφής μόνο και για λόγους, που θα εξηγήσουμε στην οικεία παράγραφο) την περίπτωση, που η (μικρού πλάτους) εναλλασσόμενη τάση εφαρμόζεται με μικρές συχνότητες (≤ 100 Hz) στην πύλη του πυκνωτή από εκείνη, που εφαρμόζεται με μεγάλες συχνότητες (>100 Hz) [1].

(i) Κατάσταση συσσώρευσης: Στην περίπτωση αυτή, όπως φαίνεται και στο σχήμα 10, το



Σχήμα 10: Μεταβολή του φορτίου μίας διάταξης MOS σε απόκριση προς ένα σήμα ac και μία πόλωση dc στη συσσώρευση [9].

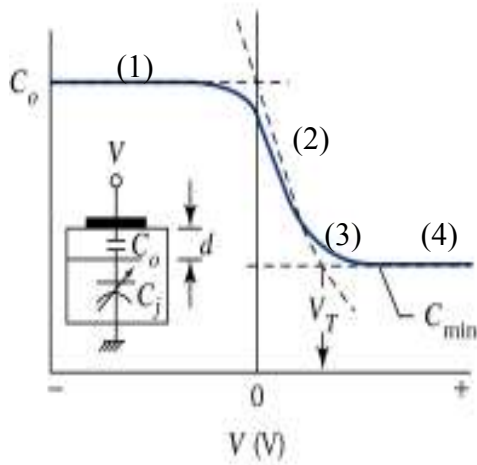
σύστημα ισοδυναμεί με έναν πυκνωτή με οπλισμούς του το μέταλλο και τον ημιαγωγό και το εσωτερικό του γεμάτο με διηλεκτρικό (το διοξείδιο του πυριτίου). Άρα αυτό, που ποιοτικά αναμένεται, είναι η χωρητικότητα του συστήματος να ισο-δυναμεί με αυτή του διηλεκτρικού C_{ox} .

Πράγματι αποδεικνύεται ότι η χωρητικότητα C του πυκνωτή σε αυτή την περίπτωση δίνεται από τη σχέση:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_S} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{ox}} \frac{\left(\frac{2k_B T}{q}\right)}{|V_G - \psi_S|} \Rightarrow C = \frac{C_{ox}}{1 + \frac{\left(\frac{2k_B T}{q}\right)}{|V_G - \psi_S|}} \quad (11)$$

Επειδή σε θερμοκρασία δωματίου είναι $(2k_B T/q) \approx 0.052V$ και στη συσσώρευση $\psi_s \approx 0.1V - 0.3V$, η χωρητικότητα C της δομής MOS πλησιάζει γρήγορα αυτή του οξειδίου C_{ox} , όταν η τάση της πύλης V_G γίνεται όλο και πιο αρνητική. Αυτό συμβαίνει, γιατί για τιμές της V_G μεγαλύτερες (σε απόλυτη τιμή) του $-1V$ ο δεύτερος όρος του παρονομαστή της (11) γίνεται αμελητέος, με αποτέλεσμα να είναι $C \approx C_{ox} =$ σταθερό (περιοχή 1 του σχήματος 11). Καθώς η V_G πλησιάζει το 0, ο δεύτερος όρος του παρονομαστή δεν είναι πια αμελητέος, η

χωρητικότητα του συστήματος είναι μικρότερη από την C_{ox} και φθίνει καθώς το σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση απογύμνωσης (περιοχή 2 του σχήματος 11).



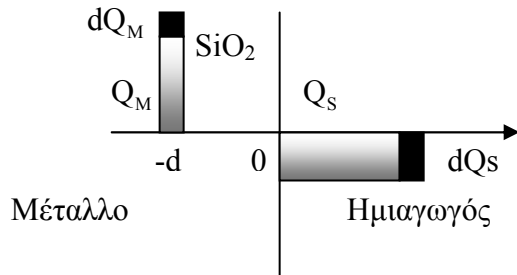
Σχήμα 11: Χαρακτηριστική καμπύλη (υψηλής συχνότητας) χωρητικότητας-τάσης ($C-V$), ιδανικού πυκνωτή MOS, p τύπου. Στην καμπύλη καθορίζονται προσεγγιστικά με διακεκομμένες γραμμές τα διάφορα τμήματα λειτουργίας του και φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού της τάσης κατωφλίου του V_T [2].

Στο σημείο αυτό σημειώνουμε ότι τα δύο σκιασμένα ορθογώνια παραλληλόγραμμα του σχήματος 10 παριστάνουν το φορτίο στους οπλισμούς του πυκνωτή κατά τη συσσώρευση, που είναι θετικό στον ημιαγωγικό οπλισμό και αρνητικό στο μέταλλο. Τα μαύρα τμήματα σε αυτά τα ορθογώνια παριστάνουν τη μεταβολή του φορτίου, εξαιτίας της μικρής (σε πλάτος) εναλλασσόμενης τάσης, που εφαρμόζεται ταυτόχρονα με τη συνεχή τάση V_G στην πύλη του πυκνωτή. Η V_G ουσιαστικά είναι αυτή, που έχει οδηγήσει τον πυκνωτή σε κατάσταση συσσώρευσης και στη δημιουργία του φορτίου (όπως φαίνεται στο σχήμα 10) στους οπλισμούς του. Για να μπορούμε όμως να μετράμε τη χωρητικότητα του πυκνωτή (δυναμική μέτρηση) σε σχέση με την εφαρμοζόμενη (συνεχή) τάση V_G σε όλες τις περιοχές λειτουργίας του, θα πρέπει να είμαστε σε θέση (σύμφωνα με την 8) να προκαλούμε μεταβολές του φορτίου του Q_s με πολύ μικρή μεταβολή της τάσης, που εφαρμόζεται στην πύλη, στην κατάσταση που βρίσκεται ο πυκνωτής (στη συσσώρευση για τη συγκεκριμένη περίπτωση). Αυτό ακριβώς επιτυγχάνεται με την εφαρμογή της μικρού πλάτους εναλλασσόμενης τάσης ταυτόχρονα με την εφαρμογή της συνεχούς τάσης V_G , που πολώνει τον πυκνωτή. Αντίστοιχα σχόλια για τη μεταβολή του φορτίου του πυκνωτή στη μέτρηση της χωρητικότητάς του ισχύουν και για τις άλλες δύο καταστάσεις του πυκνωτή, που αναπτύσσονται στη συνέχεια.

(ii) Περίπτωση απογύμνωσης: Στην περίπτωση αυτή το φορτίο του ημιαγωγού είναι το φορτίο χώρου (ακίνητο φορτίο) της περιοχής απογύμνωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 12. Το φορτίο αυτό αποτελείται από τα ιονισμένα (N_A^-) άτομα αποδεκτών, όπως αναπτύχθηκε πιο πάνω. Στην περίπτωση αυτή προκύπτει ότι η χωρητικότητα του συστήματος MOS δίνεται από τον τύπο:

$$C_s = \frac{C_{ox}}{\sqrt{1 + \frac{2V_G \epsilon_{ox}^2}{\epsilon_s q N_A d^2}}} \quad (12)$$

Από την (12) φαίνεται ότι η χωρητικότητα του πυκνωτή μειώνεται, καθώς η θετική τάση V_G



Σχήμα 12: Μεταβολή του φορτίου μίας διάταξης MOS σε απόκριση προς ένα σήμα ac και μία πόλωση dc στην απογύμνωση [9].

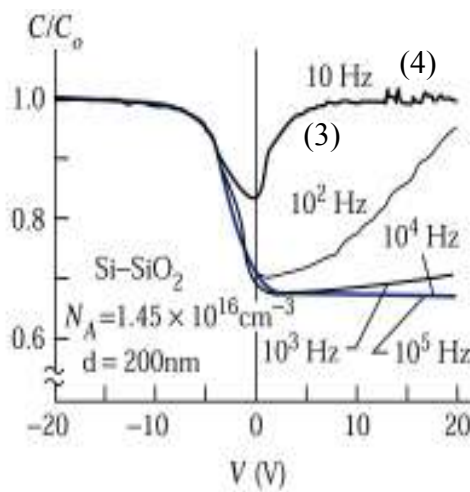
της πύλης αυξάνεται (περιοχή 2 του σχήματος 11), μέχρις ότου το σύστημα εισέλθει στην περιοχή αναστροφής. Αυτό είναι αναμενόμενο, γιατί, καθώς το σύστημα εισέρχεται στην κατάσταση αναστροφής (περιοχή 3 του σχήματος 11), η συνεισφορά της περιοχής απογύμνωσης μειώνεται, μια και το πλάτος της τείνει να σταθεροποιηθεί σε μία μέγιστη τιμή

(iv) Κατάσταση αναστροφής: Στην περίπτωση της αναστροφής το φορτίο αναστροφής είναι φορτίο ευκίνητων φορέων μειονότητας στον ημιαγωγό τύπου p. Είναι γνωστό όμως ότι οι φορείς μειονότητας σε έναν ημιαγωγό έχουν ένα σχετικά μεγάλο χρόνο απόκρισης στις μεταβολές της εφαρμοζόμενης τάσης (εν προκειμένω της ac). Το φορτίο αναστροφής κάνει ουσιαστικά αισθητή την παρουσία του, όταν γίνει τουλάχιστον ίσο με αυτό της περιοχής απογύμνωσης, που οφείλεται στους ιονισμένους αποδέκτες. Ο χρόνος που απαιτείται για να σχηματιστεί ένα τέτοιο στρώμα είναι της τάξης του $Q_{sc}/J_R = (N_A/n_i)\tau$, όπου Q_{sc} είναι το φορτίο του στρώματος απογύμνωσης, J_R είναι η πυκνότητα του ρεύματος γέννησης-επανασύνδεσης οπών-ηλεκτρονίων και τ ο χρόνος ζωής των φορέων μειονότητας (10^{-4} sec – 10^{-9} sec ανάλογα με την ποιότητα του υποστρώματος πυριτίου) [6, 8,10]. Ο χρόνος αυτός είναι 0.1 sec – 1 sec και δίνει μία εκτίμηση του χρόνου απόκρισης των φορέων του στρώματος αναστροφής. Κατά συνέπεια για συχνότητες της ac τάσης μεγαλύτερες των 100 Hz το φορτίο αναστροφής δεν ανταποκρίνεται στο εφαρμοζόμενο εναλλασσόμενο σήμα. Έτσι διαχωρίζεται η ανάλυση στην κατάσταση αναστροφής στις περιπτώσεις χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων.

(α) Περίπτωση χαμηλών συχνοτήτων (1 Hz - 100 Hz): Όπως προαναφέρθηκε, στην περίπτωση αυτή το φορτίο του στρώματος αναστροφής παρακολουθεί τις μεταβολές της ac τάσεως και υπερσχύει του φορτίου απογύμνωσης, το οποίο στη συγκεκριμένη φάση είναι της τάξεως του φορτίου, που αντιστοιχεί σε $V_G=0.7$ V – 1 V. Με αντίστοιχη ανάλυση με

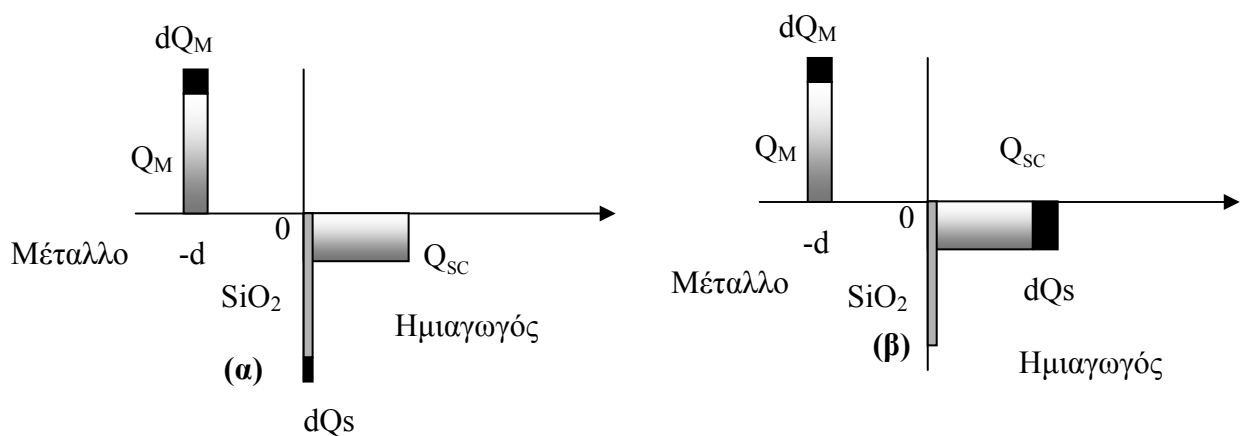
αυτή της κατάστασης συσσώρευσης προκύπτει ότι και στην περίπτωση της αναστροφής ισχύει μία σχέση ανάλογη της (11) για την αρχική περιοχή 3 ασθενούς αναστροφής του σχήματος 13. Αυξάνοντας την τάση V_G σε τιμές μεγαλύτερες των $2\text{ V} - 3\text{ V}$, το σύστημα εισέρχεται στην περιοχή ισχυρής αναστροφής 4 του σχήματος 13, όπου η χωρητικότητα C_S του συστήματος γίνεται περίπου ίση με αυτήν του μονωτή C_{ox} . Έτσι στις χαμηλές συχνότητες το φορτίο που συνεισφέρει στην χωρητικότητα είναι αυτό του στρώματος αναστροφής, όπως φαίνεται στο σχήμα 14α.

(β) Περίπτωση υψηλών συχνοτήτων (100 Hz – 1 MHz): Στην περίπτωση αυτή, παρά το ότι έχουμε σχηματισμό στρώματος αναστροφής, αυτό δεν παρακολουθεί τις μεταβολές της ac τάσης και το φορτίο της περιοχής απογύμνωσης καθορίζει την χωρητικότητα του ημιαγω-



Σχήμα 13: Χαρακτηριστικές (κανονικοποιημένες) καμπύλες (χαμηλών και υψηλών συχνοτήτων) χωρητικότητας-τάσης (C-V), ιδανικού πυκνωτή MOS, p τύπου. Στο διάγραμμα φαίνεται η επίδραση της συχνότητας της ac τάσης στις C-V χαρακτηριστικές του πυκνωτή [2].

γού, όπως φαίνεται στο σχήμα 14β. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το εύρος της περιοχής απογύμνωσης παίρνει τη μέγιστη τιμή του και η χωρητικότητα ανά μονάδα επιφανείας την



Σχήμα 14: Μεταβολή του φορτίου μιας διάταξης MOS σε απόκριση προς ένα σήμα ac και μία πόλωση dc στην κατάσταση αναστροφής για (α) χαμηλές και (β) υψηλές συχνότητες.

ελάχιστη τιμή της (περιοχή 4 του σχήματος 11), η οποία προκύπτει από τη σχέση:

$$\frac{1}{C_{\min}} = \frac{1}{C_{ox}} + \frac{1}{C_{D\min}} \Rightarrow C_{\min} = \frac{C_{D\min}C_{ox}}{C_{D\min} + C_{ox}} \Rightarrow C_{\min} = \frac{C_{ox}}{1 + C_{ox}/C_{D\min}} \quad (13)$$

όπου $C_{D\min}$ είναι η ελάχιστη χωρητικότητα του στρώματος απογύμνωσης.

Ιδανικός πυκνωτής n-MOS

Όλη η προηγούμενη ανάλυση αφορούσε ένα πυκνωτή MOS, τύπου p. Παρόμοιες συνθήκες, όμως, ισχύουν και για ένα πυκνωτή MOS τύπου n, με τη διαφορά ότι πρέπει να αλλάξουν οι πολικότητες της τάσης και του φορτίου και να ληφθεί υπόψη ότι οι φορείς μειοψηφίας είναι οι οπές και όχι τα ηλεκτρόνια, που τώρα είναι φορείς πλειοψηφίας.

Ο πυκνωτής βρίσκεται σε κατάσταση συσσώρευσης, όταν εφαρμόζεται μια θετική τάση στο μέταλλο της πύλης του. Σε κατάσταση απογύμνωσης και αναστροφής ο πυκνωτής βρίσκεται, όταν εφαρμόζεται αρνητική τάση στην πύλη του.

Αντίστοιχη ανάλυση ισχύει και για τη χωρητικότητα του n-MOS πυκνωτή, ενώ οι γραφικές C-V είναι παρόμοιες με αυτές του p-MOS πυκνωτή, με τη διαφορά ότι αλλάζει η πολικότητα της εφαρμοζόμενης τάσης στην πύλη για τις διαφορές περιοχές λειτουργίας του n-MOS πυκνωτή σε σχέση με τον p-MOS.

Γ. Πειραματικό μέρος

Στην παρούσα άσκηση θα επιχειρηθούν:

α) η μέτρηση της αντίστασης ενός στρώματος πολυκρυσταλλικού πυριτίου (polysilicon),

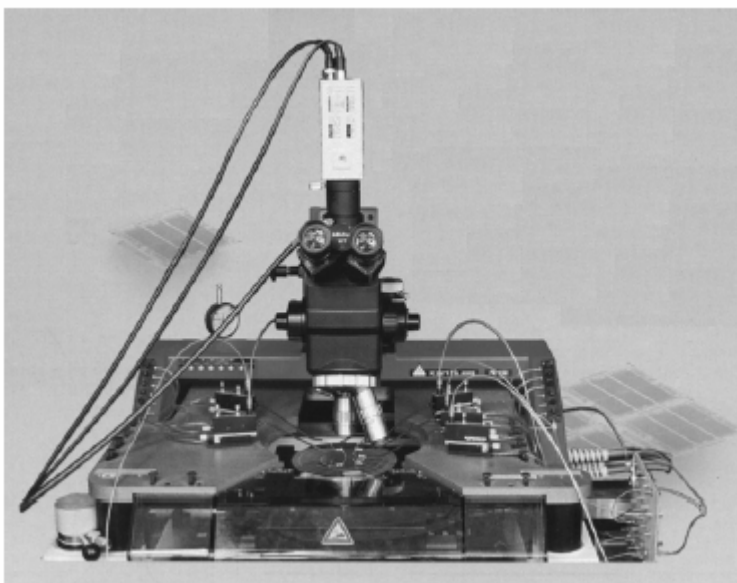
β) η εξαγωγή της χαρακτηριστικής I-V μίας διόδου p-n και ο υπολογισμός κάποιων μεγεθών, που αφορούν τη λειτουργία της,

γ) η εξαγωγή της χαρακτηριστικής C-V πυκνωτών MOS και η εύρεση μέσω αυτής του είδους του πυκνωτή (n-MOS ή p-MOS). Επίσης, με τη βοήθεια αυτής της χαρακτηριστικής θα γίνει απόπειρα προσδιορισμού διαφόρων παραμέτρων, που χαρακτηρίζουν έναν πυκνωτή MOS.

1. Πειραματική διάταξη

Οι μετρήσεις των I-V και C-V χαρακτηριστικών στην παρούσα άσκηση θα γίνουν με τη χρήση ενός κατάλληλου probe και τη βοήθεια ενός αυτοματοποιημένου συστήματος μέτρησης, που περιλαμβάνει τα ελεγχόμενα από PC (προσωπικό υπολογιστή) όργανα υψηλής ακρίβειας pA Μετερ/DC Voltage Source 4140B και impedance analyzer 4284A Precision LCR Meter της Hewlett Packard. Ο εξ αποστάσεως έλεγχος της λειτουργίας των οργάνων από τον υπολογιστή επιτυγχάνεται μέσω διασύνδεσης GPIB με τη χρήση καταλλήλων προγραμμάτων γραμμένων στον κώδικα LabVIEW™.

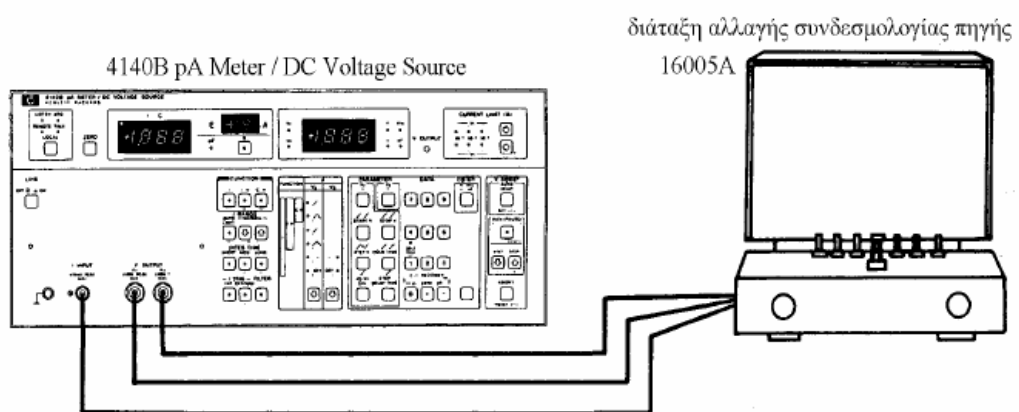
α) Metal probe station: Ο probe, που φωτογραφία του φαίνεται στο σχήμα 15, είναι ένα όργανο, που χρησιμοποιείται για την απευθείας ηλεκτρική διασύνδεση της προς μέτρη-



Σχήμα 15: Φωτογραφία του metal probe station (probe), που χρησιμοποιείται στην παρούσα άσκηση

ση διάταξης με τα μετρητικά όργανα μέσω μεταλλικών ακίδων (βολφραμίου). Συγκεκριμένα αποτελείται από μία μεταλλική βάση, στην οποία τοποθετείται το δείγμα, τέσσερις μεταλλικές ακίδες, ένα οπτικό μικροσκόπιο και μηχανικό σύστημα μετατόπισης της μεταλλικής βάσης σε σχέση με το μικροσκόπιο και τις ακίδες (κατά τον x, y και z άξονα) καθώς και μικρομετρικό σύστημα μετακίνησης των ακίδων (με τη βοήθεια του μικροσκοπίου) πάνω στο δείγμα. Με το οπτικό μικροσκόπιο είναι δυνατή η επιλογή της συγκεκριμένης διάταξης (από όλο το δείγμα), που θα μετρηθεί καθώς και η επίτευξη των ηλεκτρικών επαφών των μεταλλικών ακίδων του probe με τα ηλεκτρόδια της διάταξης. Οι μεταλλικές ακίδες (τέσσερις) καθώς και η μεταλλική βάση του probe συνδέονται ηλεκτρικά με τους εξωτερικούς ακροδέκτες (πέντε) του metal probe station. Από τους εξωτερικούς αυτούς ακροδέκτες γίνεται η ηλεκτρική διασύνδεση του δείγματος μέσω ομοαξονικών καλωδίων με τα μετρητικά όργανα.

β) 4140B pA Meter / DC Voltage Source: Το όργανο pA Μετερ/DC Voltage Source 4140B της Hewlett Packard, που φαίνεται στη φωτογραφία του σχήματος 16, είναι ένα pico-αμπερόμετρο υψηλής σταθερότητας με μέγιστη ανάλυση 10^{-15} A, ενώ ταυτόχρονα διαθέτει δύο προγραμματιζόμενες πηγές DC τάσης [11]. Το pico-αμπερόμετρο έχει ακρίβεια 0.5% σε φάσμα μετρήσεων από 10^{-15} A έως $2 \cdot 10^{-2}$ A. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη σε μία μεταβλητή, ψηφιακή μέθοδο ολοκλήρωσης. Η μέθοδος μέτρησης είναι σταθερή και γρήγορη (το 1nA μετρείται σε λιγότερο από 35 ms) και βρίσκει εφαρμογή σε μέτρηση ρευμάτων ημιαγωγι-



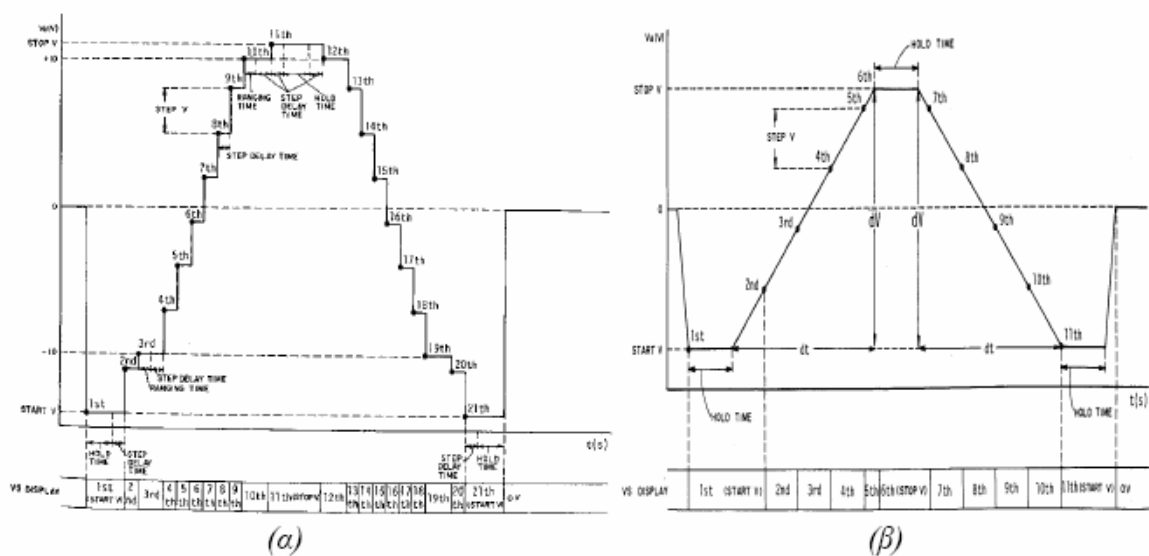
Σχήμα 16: (α) 4140B pA Meter / DC Voltage Source και (β) θωρακισμένο κουτί-διάταξη 16005A, που επιτρέπει την αλλαγή συνδεσμολογίας της DC πηγής τάσης του 4140B pA Meter / DC Voltage Source

κών διατάξεων, ακόμα και σε μέτρηση πολύ μικρών ρευμάτων διαρροής, σε στατικούς χαρακτηρισμούς διατάξεων FET και σε πολλές άλλες εφαρμογές.

Η μία από τις δύο προγραμματιζόμενες πηγές DC τάσης μπορεί να λειτουργήσει επιπλέον σαν μία γεννήτρια απλής βαθμωτής μεταβολής τάσης (unique staircase \nearrow , \searrow) και συνεχούς μεταβολής τάσης (accurate ramp \nearrow , \searrow) ανάλογα με το εί-

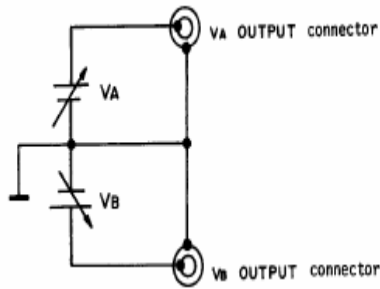
Συνάρτηση	VA	VB
I-V	\nearrow , \searrow , \nearrow , \searrow	==
C-V	\nearrow , \searrow	
I	\nearrow , \searrow , \nearrow , \searrow , ==	

Πίνακας 1: Τρόποι λειτουργίας της προγραμματιζόμενης DC πηγής τάσης ανάλογα με το είδος της μέτρησης



Σχήμα 17: Σχέση μεταξύ επιβαλλόμενης τάσης και βήματος για (α) βαθμωτή μεταβολή τάσης και (β) συνεχή μεταβολή τάσης.

είδος της μέτρησης, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 1 και το σχήμα 17. Το ισοδύναμο κύκλωμα των πηγών τάσης φαίνεται στο σχήμα 18.

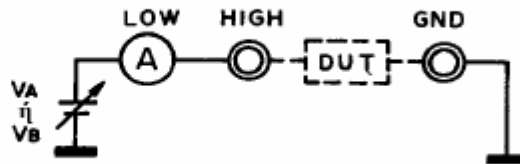


Σχήμα 18: Ισοδύναμο κύκλωμα των προγραμματιζόμενων πηγών τάσης του 4140B pA Meter / Voltage Source.

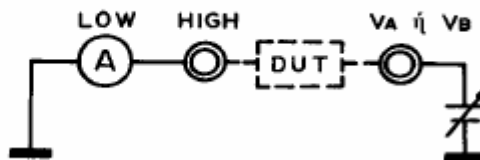
Το φάσμα των τιμών της DC πηγής, όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια βαθμωτής μεταβολής τάσης, είναι $\pm 100V$ σε βήματα των $100mV$ ή $\pm 10V$ σε βήματα των $10mV$ και όταν λειτουργεί σαν πηγή συνεχούς μεταβολής τάσης, αυτή η συνεχής μεταβολή τάσης μπορεί να κυμανθεί από $0.001V/s$ έως $1V/s$.

Το pico-αμπερόμετρο 4140B συνοδεύεται από τη διάταξη 16005A, που ένα απλό σχηματικό της φαίνεται στο σχήμα 19(β). Η διάταξη αυτή επιτρέπει την αλλαγή της συνδε-

(α) V_A , V_B :



(β) GND :



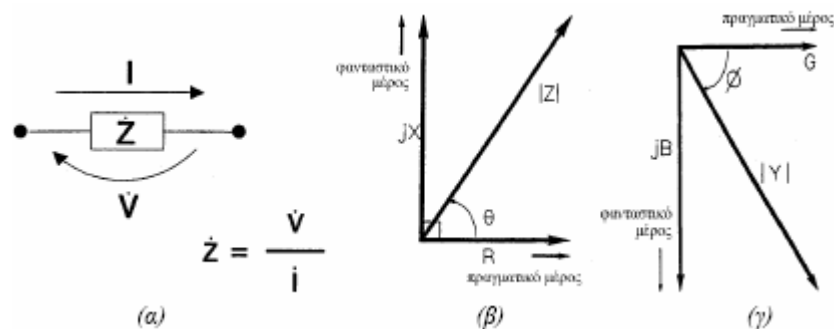
Σχήμα 19: Συνδεσμολογία της προγραμματιζόμενης DC πηγής τάσης του 4140B pA Meter / Voltage Source μέσω της διάταξης 16005A. DUT είναι η προς χαρακτηρισμό διάταξη

σμολογίας της προγραμματιζόμενης DC πηγής τάσης του 4140B pA Meter / DC Voltage Source, όπως επιδεικνύεται στο σχήμα 19. Σε όλες τις μετρήσεις της παρούσας άσκησης, που θα ληφθούν με το όργανο 4140B pA Μετερ/DC Voltage Source, θα χρησιμοποιηθεί η συνδεσμολογία (β) του σχήματος 19 για τη συσκευή 16005A, η οποία επιτρέπει τη γείωση της προς χαρακτηρισμό διάταξης (Device Under Test, DUT).

γ) 4284A Precision LCR Meter: Το όργανο 4284A Precision LCR Meter είναι ένας impedance analyzer [12] και ουσιαστικά χρησιμοποιείται για το χαρακτηρισμό υλικών ή διατάξεων ημιαγωγών σε ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων (20 Hz έως 1 MHz), ενώ το μέγεθος του εφαρμοζομένου σήματος είναι από 5 mV έως 2 V (ενεργός τιμή) και από 50 μΑ έως 20 mA (ενεργός τιμή).

Το μέγεθος, που μετράει αυτός ο impedance analyzer, είναι η εμπέδηση Z (impedance) ή η σύνθετη αγωγιμότητα Y (admittance) της προς χαρακτηρισμό διάταξης ανάλογα με τον τρόπο, με τον οποίο είναι ρυθμισμένος να λειτουργεί (σειριακός ή παράλληλος αντίστοιχα).

Η εμπέδηση Z ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ή μίας διάταξης ορίζεται ως η συνολική αντίσταση, που παρουσιάζει το κύκλωμα ή η διάταξη κατά τη διέλευση εναλλασσομένου ρεύματος για δεδομένη συχνότητα [13]. Η σύνθετη αγωγιμότητα Y είναι το αντίστροφο της εμπέδησης ($Y=1/Z$). Στο σχήμα 20 αναπαρίσταται: (α) σχηματικά το κυκλωματικό σύμβολο της εμπέδησης Z μίας διάταξης, στα άκρα της οποίας εφαρμόζεται τάση V και διαρρέεται από ρεύμα εντάσεως I , (β) διανυσματικά η εμπέδηση Z της διάταξης και (γ) διανυσματικά η σύνθετη αγωγιμότητα Y της ίδιας διάταξης.



Σχήμα 20: (α) Κυκλωματικό σύμβολο της εμπέδησης Z μίας διάταξης ή ενός κυκλώματος.

(β) Διανυσματική αναπαράσταση της εμπέδησης Z .

(γ) Διανυσματική αναπαράσταση της σύνθετης αγωγιμότητας Y .

Από τη διανυσματική αναπαράσταση του σχήματος 20(β) προκύπτει ότι [13]:

$$Z = R + iX = e^{i\theta} \quad (1)$$

με:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (2) \quad \text{και} \quad \theta = \arctan\left(\frac{|X|}{R}\right) \quad (3)$$

όπου:

$|Z|$ το μέτρο της εμπέδησης σε Ω ,

$R = R_s$ η ωμική αντίσταση (σε Ω) της διάταξης ή του κυκλώματος, όταν επιλέγεται ο σειριακός τρόπος λειτουργίας του οργάνου 4284A Precision LCR Meter,

$X = R_{LC} = R_L + R_C$ με $R_L = \omega L$ η επαγωγική αντίσταση (σε Ω) της διάταξης ή του κυκλώματος και $R_C = -1/\omega C$ η χωρητική αντίσταση (επίσης σε Ω) της διάταξης ή του κυκλώματος,

θ (σε deg ή rad) η διαφορά φάσης μεταξύ της εφαρμοζόμενης στη διάταξη (ή στο κύκλωμα) τάσης και της έντασης του ρεύματος, που διαρρέει τη διάταξη (ή το κύκλωμα) και

$$Y = \frac{1}{z} = G + iB \quad (4)$$

με $G = 1/R_p$ η αγωγιμότητα (σε S) της διάταξης (ή του κυκλώματος) και R_p η ωμική αντίσταση (σε Ω) της διάταξης ή του κυκλώματος, όταν επιλέγεται ο παράλληλος τρόπος λειτουργίας του οργάνου 4284A Precision LCR Meter.

Επίσης ορίζονται ο συντελεστής ποιότητας Q (quality coefficient) και ο συντελεστής κατανάλωσης ή απωλειών (dissipation coefficient) ως εξής:

$$Q = \frac{1}{D} = \frac{|X|}{R} \quad (5)$$

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, υπάρχουν δύο ισοδύναμα μοντέλα κυκλωμάτων, το σειριακό και παράλληλο, βάσει των οποίων προγραμματίζεται να λειτουργεί ο 4284A Precision LCR Meter με σειριακό τρόπο (series mode) ή με παράλληλο τρόπο (parallel mode) αντίστοιχα. Επίσης υπάρχει η δυνατότητα επιλογής μέσω του λογισμικού, που ελέγχει τον 4284A Precision LCR Meter (ανάλογα με το είδος της διάταξης, που θα μετρηθεί), αυτός να πάρει μετρήσεις χωρητικότητας C και ωμικής αντίστασης R σε σειριακή ρύθμιση λειτουργίας (ή C και -ισοδύναμα- αγωγιμότητας G σε παράλληλη ρύθμιση λειτουργίας) και αντίστοιχα επαγωγής L και R σε σειριακή ρύθμιση λειτουργίας (ή L και G σε παράλληλη ρύθμιση λειτουργίας).

Ανάλογα με την εμπέδηση, που παρουσιάζει η διάταξη, επιλέγεται και ο κατάλληλος τρόπος λειτουργίας του οργάνου 4284A Precision LCR Meter. Συγκεκριμένα:

- για $Z < 10\Omega$ επιλέγεται ο σειριακός τρόπος λειτουργίας,
- για $Z > 10k\Omega$ επιλέγεται ο παράλληλος τρόπος λειτουργίας και
- για $10\Omega < Z < 10k\Omega$ πρέπει να επιλέγουν και οι δύο τρόποι λειτουργίας.

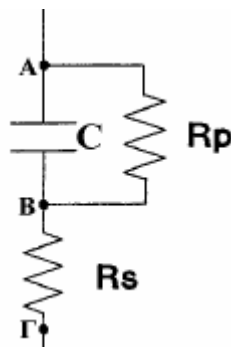
Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα μεγέθη, που μπορούν να υπολογιστούν ανάλογα με το είδος της προς μέτρηση διάταξης και τον κατάλληλο τρόπο λειτουργίας του οργάνου

4284A καθώς και οι τύποι, βάσει των οποίων υπολογίζονται οι συντελεστές ποιότητας Q και απωλειών D και η αγωγιμότητα G της διάταξης.

Είδος κυκλώματος	Συνάρτηση μετρήσεων	Ορισμοί των D, Q και G
C_p mode	C_p -D C_p -Q C_p -G C_p - R_p	$D = \frac{1}{2\pi f C_p R_p} = \frac{1}{Q}$ $G = \frac{1}{R_p}$
C_s mode	C_s -D C_s -Q C_s - R_s	$D = 2\pi f C_s R_s = \frac{1}{Q}$
L_p mode	L_p -D L_p -Q L_p -G L_p - R_p	$Q = \frac{R_p}{2\pi f L_p} = \frac{1}{D}$ $G = \frac{1}{R_p}$
L_s mode	L_s -D L_s -Q L_s - R_s	$Q = \frac{2\pi f L_s}{R_s} = \frac{1}{D}$

Πίνακας 2: Σειριακό (με το δείκτη s) και παράλληλο (με το δείκτη p) μοντέλο λειτουργίας του 4284A Precision LCR Meter.

Στην παρούσα άσκηση ο τρόπος λειτουργίας του 4284A Precision LCR Meter είναι ο παράλληλος (parallel mode), γιατί οι μετρούμενες διατάξεις είναι πυκνωτές MOS ($Z > 10k\Omega$). Ουσιαστικά ο προς μέτρηση πυκνωτής θα μπορούσε να προσεγγισθεί από μία χωρητικότητα C συνδεδεμένη παράλληλα με μία αντίσταση R_p , όπου $G=1/ R_p$ είναι η αγωγιμότητα του πυκνωτή MOS. Όμως, εξαιτίας των μεταλλικών επαφών μέτρησης της διάταξης εμφανίζεται και μία αντίσταση R_s σειριακά με το (παράλληλο) κύκλωμα της χωρητικότητας C και της παράλληλης αντίστασης R_p . Το ισοδύναμο κύκλωμα του προς μέτρηση πυκνωτή MOS φαίνεται στο σχήμα 21.



Σχήμα 21: Ισοδύναμο κύκλωμα του προς μέτρηση πυκνωτή MOS με το όργανο 4284A Precision LCR Meter.

Η εμπέδηση Z_p , που παρουσιάζει το πιο πάνω κύκλωμα ανάμεσα στα σημεία A και B, δίνεται από τη σχέση:

$$Z_p = \frac{R_p \frac{1}{i\omega C}}{R_p + \frac{1}{i\omega C}} \Rightarrow Z_p = \frac{R_p}{1 + i\omega R_p C} \quad (6)$$

ενώ η εμπέδηση Z_s του ίδιου κυκλώματος ανάμεσα στα σημεία Β και Γ είναι:

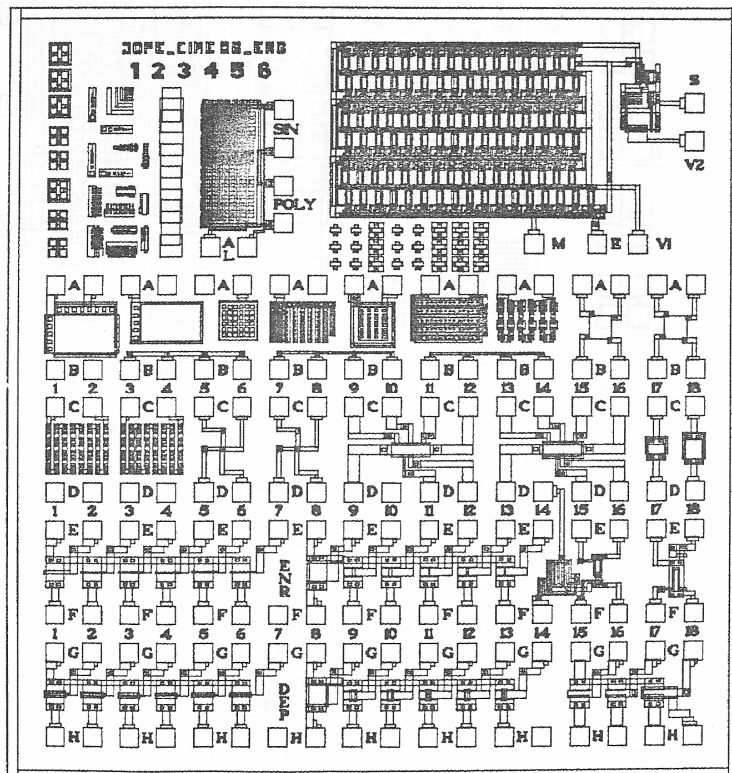
$$Z_s = R_{cs} \quad (7)$$

- όταν $\omega = 0$, τότε $Z_p = R_p$ και το ρεύμα άγεται σαν να απουσιάζει ο πυκνωτής,
- όταν $\omega \rightarrow \infty$, τότε $Z_p \rightarrow 0$ και η αντίσταση R_s συμβάλλει σχεδόν αποκλειστικά στην εμπέδηση του κυκλώματος.

Γενικά όσο η συχνότητα ω ή η χωρητικότητα C μειώνονται, τόσο πιο σημαντικό ρόλο παίζει η παράλληλη αντίσταση R_p . Αντίθετα, η αύξηση της συχνότητας ω ή της χωρητικότητας C κάνει τη συμβολή της σειριακής αντίστασης R_s (λόγω των επαφών της διάταξης) αρκετά σημαντική.

2. Εκτέλεση – Μετρήσεις

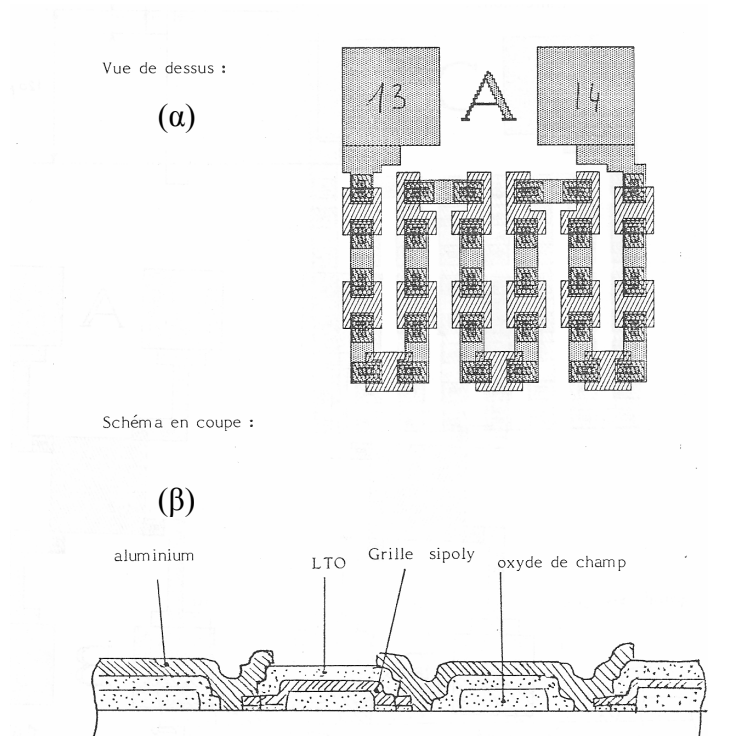
1. Με τη βοήθεια του επιβλέποντα αναγνωρίστε τα διάφορα όργανα, που θα χρησιμοποιήσετε στην άσκηση και τα οποία περιγράφονται στις αμέσως προηγούμενες παραγράφους.
2. Στο σχήμα 22 δίνεται μία ψηφίδα (όπως παρατηρείται από πάνω) του δείγματος Α, που θα



Σχήμα 22: Παρατηρούμενη από πάνω όψη της ψηφίδας του δείγματος Α [14].

μελετήσετε στην παρούσα άσκηση. Στο δείγμα A έχουν κατασκευασθεί με διαδικασίες Μικροηλεκτρονικής στρώματα από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, δίοδοι p-n, πυκνωτές MOS, τρανζίστορες MOSFETs και διάφορες άλλες διατάξεις. Μερικές από αυτές τις διατάξεις φαίνονται στα σχήματα 23, 24 και 25, που ακολουθούν.

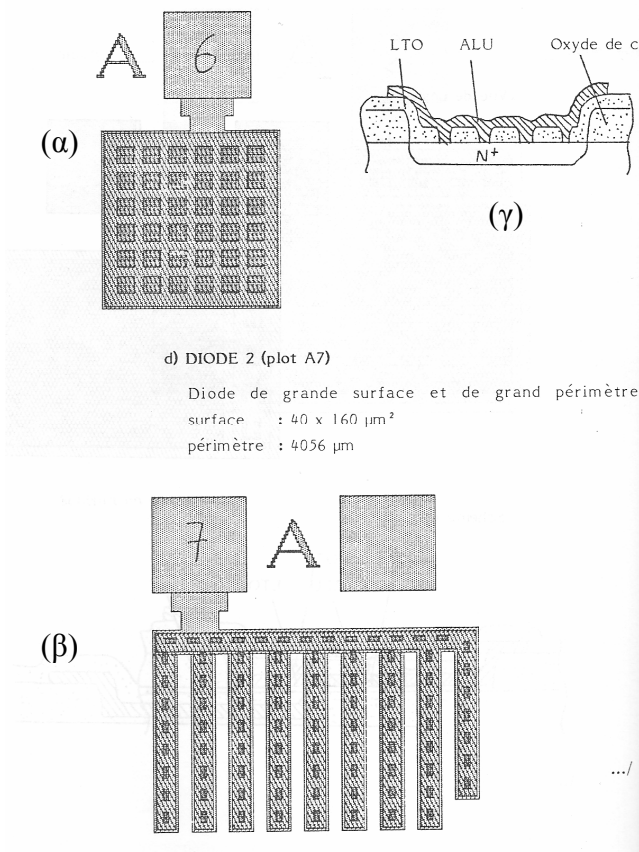
Στο σχήμα 23 φαίνεται: (α) η παρατηρούμενη από πάνω όψη (layout) ενός στρώματος από polysilicon και (β) τα διάφορα στρώματα υλικών (σε κάθετη τομή) από τα οποία είναι κατασκευασμένη η διάταξη. Το στρώμα από polysilicon αποτελείται από ορθογώνιες λωρίδες πολυκρυσταλλικού πυριτίου, οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με τετράγωνα πίστες αλουμινίου (Al). Τα μεγάλα τετράγωνα 13 και 14, που φαίνονται στο σχήμα είναι οι επαφές Al, μέσω των οποίων και με τη βοήθεια των ακίδων του metal probe station θα γίνει η ηλεκτρική διασύνδεση της διάταξης με τα μετρητικά όργανα.



Σχήμα 23: Στρώμα από polysilicon.
 (α) Παρατηρούμενη από πάνω όψη.
 (β) Κάθετη τομή της διάταξης [14].

Στο σχήμα 24 (α) και (β) απεικονίζονται δύο από τις διόδους p-n, που υπάρχουν σε κάθε ψηφίδα του δείγματος A, όπως φαίνονται από πάνω (οριζόντια) σε επίπεδο δισκιδίου. Στο σχήμα 24(γ) φαίνονται (σε κάθετη δομή) τα διάφορα στρώματα, από τα οποία αποτελούνται οι δίοδοι. Ουσιαστικά πρόκειται για υπόστρωμα τύπου p (αρχικό δισκίδιο Si), στο οποίο είναι ανεπτυγμένες τοπικά περιοχές, νοθευμένες με μεγάλη ποσότητα προσμίξεων τύπου n (η έντονη νόθευση με προσμίξεις τύπου n παριστάνεται στα σχήματα με N^+ ή n^+).

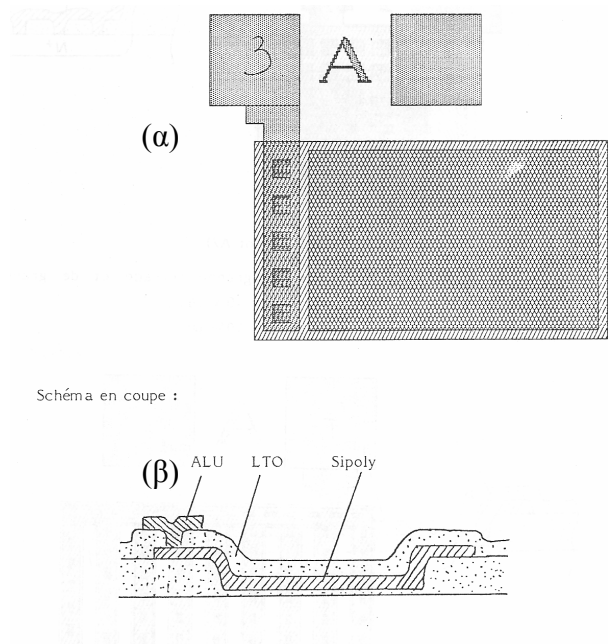
Οι διάφορες περιοχές τύπου n^+ συνδέονται με πίστες Al (σχήμα 24γ), δημιουργώντας έτσι το τμήμα τύπου n της διόδου πάνω στο υπόστρωμα Si τύπου p του δισκιδίου (τμήμα p της διόδου). Οι πίστες του Al συνδέονται μεταξύ τους σε κάθε δίοδο και καταλήγουν στις επαφές Al (τα τετράγωνα των σχημάτων 24α και 24β), μέσω των οποίων θα γίνουν οι ηλεκτρικές διασυνδέσεις των διατάξεων με τα μετρητικά όργανα. Τα υπόλοιπα στρώματα (LTO, oxide) χρησιμοποιούνται (όπως και στις υπόλοιπες διατάξεις του δείγματος A) για απομόνωση μεταξύ των διατάξεων ή των διαφόρων τμημάτων των διατάξεων καθώς και για παθητικοποίηση (προστασία) των δειγμάτων από εξωτερικούς και άλλους παράγοντες, που μπορεί να επηρεάσουν ή/και να καταστρέψουν τις διατάξεις.



Σχήμα 24: Δίοδοι $p-n$
 (α), (β) Παρατηρούμενη από πάνω όψη (layout) δύο διαφορετικών διόδων του δείγματος A.
 (γ) Κάθετη τομή με τα διάφορα στρώματα, που αποτελούν τις διόδους [14].

Στο σχήμα 25 δίνεται (α) το layout ενός από τους πυκνωτές MOS, που έχουν αναπτυχθεί στο δείγμα A καθώς και (β) κάθετη τομή, στην οποία σκιαγραφούνται τα διάφορα στρώματα, που αποτελούν τον πυκνωτή. Το στρώμα του polysilicon (Sipoly στο σχήμα 25β) είναι έντονα νοθευμένο με προσμίξεις τύπου n και (εξαιτίας αυτού) έχει “μεταλλική” συμπεριφορά, οπότε συνδεόμενο με το Al (ALU στο σχήμα 25β) δημιουργεί τον ένα οπλισμό του πυκνωτή, που καταλήγει στην επαφή του Al (τετράγωνο 3 στο σχήμα

25α). Ο άλλος σπλισμός αποτελείται από το υπόστρωμα p του δείγματος A και μέσω της επαφής Al, που παριστάνεται από το άλλο τετράγωνο του σχήματος 25α, μπορεί να διασυνδεθεί ηλεκτρικά με τις μετρητικές διατάξεις. Το διάστικτο γκριζό τμήμα του σχήματος είναι οξείδιο του πυριτίου, που το πολύ λεπτό τμήμα του ανάμεσα στο polysilicon και το υπόστρωμα του δείγματος παίζει το ρόλο του διηλεκτρικού του πυκνωτή.



Σχήμα 25: Πυκνωτής MOS του δείγματος A.

(α) Παρατηρούμενη από πάνω όψη (layout) του πυκνωτή.

(β) Κάθετη τομή με τα διάφορα στρώματα, που αποτελούν τον πυκνωτή [14].

Δείτε στο μικροσκόπιο το δείγμα A και αναγνωρίστε με τη βοήθεια των σχημάτων 22, 23, 24, 25 και του επιβλέποντα τις διατάξεις, που θα χαρακτηρίσετε ηλεκτρικά.

I. Στρώμα από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (polysilicon)

3. Συνδέστε (με τη βοήθεια του επιβλέποντα) μέσω των ομοαξονικών καλωδίων BLC, που διαθέτει η άσκηση, δύο από τις ακίδες του prober με το 4140B pA Meter / DC Voltage Source. Συγκεκριμένα η μία ακίδα συνδέεται στον ακροδέκτη V_A του 4140B pA Meter / DC Voltage Source και η άλλη με τον ακροδέκτη Exit Bias της 16005A διάταξης (κουτιού). Ανοίξτε από τον υπολογιστή το πρόγραμμα LabVIEW και από αυτό το HPVI9V7.VI Κατεβάστε με προσοχή τις ακίδες στις δύο επαφές από Al (τετράγωνα 13 και 14 του σχήματος 23), που συνδέουν τις λωρίδες του πολυκρυσταλλικού πυριτίου μεταξύ τους. Εφαρμόστε μέσω του προγράμματος μία τάση από 0 V έως +4 V με βήμα 0.1 V και στη συνέχεια από -1V έως +2V με βήμα 0.01 V Η καταγραφή των τιμών της έντασης I του ρεύματος, που διαρρέει και στις δύο περιπτώσεις το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, γίνεται αυτόματα από το πρόγραμμα. Σώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεών σας (ASCII χαρακτήρες) σε δύο αρχεία αντίστοιχα.

II. Δίοδοι p-n

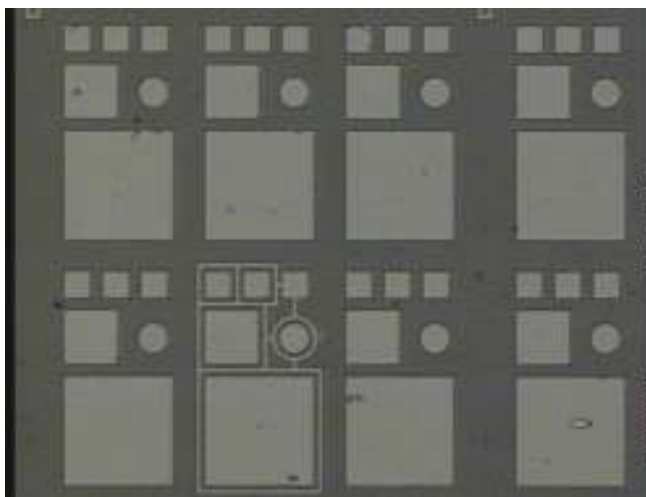
4. Αφού σηκώσετε με προσοχή τις ακίδες από τις επαφές Al του polysilicon, επιλέξτε από το ίδιο δείγμα A μία δίοδο p-n, σαν αυτή του σχήματος 24(α). Συνδέστε τη βάση του probeer (βρίσκεται σε ωμική επαφή με το σώμα p της διόδου μέσω του υμενίου Al, που έχει αναπτυχθεί σε όλη την πίσω επιφάνεια του δείγματος A) μέσω ενός καλωδίου BLC με τον ακροδέκτη V_A του 4140B pA Meter / DC Voltage Source. Στη συνέχεια συνδέστε μία ακίδα του probeer μέσω ενός άλλου καλωδίου BLC με τον ακροδέκτη Exit Bias της 16005A διάταξης. Κατεβάστε με προσοχή αυτή την ακίδα στην επαφή από Al της περιοχής n^+ (τετράγωνο δ του σχήματος 24α) της διόδου p-n.

Εφαρμόστε στη δίοδο (μέσω του προγράμματος HPVI9V7.VI) μία τάση από -2 V έως +1.5 V με βήμα 0.01 V. Το πρόγραμμα θα καταγράψει αυτόματα τις αντίστοιχες τιμές της έντασης I του ρεύματος, που θα διαρρέει τότε τη δίοδο. Σώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεών σας (ASCII χαρακτήρες) σε ένα αρχείο.

5. Βγάλτε το δείγμα A από τον probeer, αφού σηκώσετε με προσοχή την ακίδα από αυτό. Τοποθετήστε στη βάση του probeer μία από τις διόδους B και επαναλάβετε το βήμα 4, εφαρμόζοντας όμως τώρα στη δίοδο τάση από -3 V έως +25 V με βήμα 0.5 V και στη συνέχεια 0.2 V.

III. Πυκνωτές MOS

Στο σχήμα 26 φαίνεται μία φωτογραφία από οπτικό μικροσκόπιο ενός τμήματος από τα δείγματα (Γ ή Δ) με πυκνωτές, που θα μετρηθούν στην παρούσα άσκηση. Οι πυκνωτές αυτοί έχουν κατασκευασθεί σε ένα δισκίδιο Si τύπου p ή n, στο οποίο έχει αναπτυχθεί θερμικά ένα πολύ λεπτό υμένιο SiO_2 , πολύ καλής ποιότητας και πάνω από αυτό με κατάλληλες διεργασίες (εξάχνωση Al, φωτολιθογραφία και εγχάραξη Al) έχουν κατασκευα-



Σχήμα 26: Φωτογραφία από οπτικό μικροσκόπιο επίπεδης άποψης ενός δείγματος με πυκνωτές, στους οποίους φαίνονται οι μεταλλικοί σπλισμοί (από Al) των πυκνωτών [15].

σθεί ηλεκτρόδια από Al (οι γκρίζες περιοχές του σχήματος 26), πάχους 500 nm περίπου, που αποτελούν τον ένα οπλισμό των πυκνωτών. Ο άλλος οπλισμός των πυκνωτών είναι το ημιαγωγικό υπόστρωμα (p ή n) του δισκιδίου, ενώ το διηλεκτρικό τους είναι ουσιαστικά το λεπτό θερμικό υμένιο του SiO₂, που παρεμβάλλεται μεταξύ του σώματος του ημιαγωγού και των ηλεκτροδίων από Al. Είναι προφανές ότι η επιφάνεια των πυκνωτών καθορίζεται από τα ηλεκτρόδια του Al, που βρίσκονται στην πάνω επιφάνεια του δισκιδίου και φαίνονται στη φωτογραφία του σχήματος 26. Τα σχήματα των ηλεκτροδίων Al (και επομένως των οπλισμών των πυκνωτών), που περιέχουν τα δείγματα Γ και Δ, είναι τετράγωνα ή κυκλικά διαφόρων διαστάσεων, όπως φαίνεται στο σχήμα 26. Τα τετράγωνα έχουν εμβαδόν $1.6 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, $4 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ και $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$, ενώ τα κυκλικά έχουν εμβαδόν $1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$. Στην πίσω επιφάνεια των δειγμάτων έχει αναπτυχθεί ένα στρώμα από Al, πάχους επίσης 500 nm περίπου, για να γίνει έτσι δυνατή η ηλεκτρική διασύνδεση του ημιαγωγικού οπλισμού με τα μετρητικά όργανα.

Στις επόμενες μετρήσεις, που ακολουθούν, θα παρθούν τιμές της χωρητικότητας C και της αγωγιμότητας G κάποιων πυκνωτών σε συνάρτηση με την εφαρμογή κατάλληλης τάσης V στα άκρα τους. Η καταγραφή των τιμών C-V και G-V γίνεται αυτόματα μέσω του προγράμματος του LabVIEW. Το μετρητικό όργανο, που χρησιμοποιείται, για τη λήψη των μετρήσεων αυτών σε όλα τα επόμενα βήματα είναι ο 4284A Precision LCR Meter. Όλες οι επόμενες μετρήσεις λαμβάνονται για συχνότητα της ac τάσης (που υπερτίθεται στην τάση πόλωσης των πυκνωτών) ίση με 1 MHz.

6. Βγάλτε από τον probe το δείγμα B, αφού σηκώσετε με προσοχή την ακίδα από αυτό και τοποθετήστε στη βάση του probe το δείγμα Γ των πυκνωτών MOS. Συνδέστε τη βάση του probe (βρίσκεται σε ωμική επαφή με τον ημιαγωγικό οπλισμό του πυκνωτή) μέσω ενός καλωδίου BLC με τον ακροδέκτη LPOT (Low Potential) του οργάνου 4284A Precision LCR Meter. Συνδέστε, στη συνέχεια, μία ακίδα του probe μέσω ενός άλλου καλωδίου BLC με τον ακροδέκτη HPOT (High Potential) του ίδιου οργάνου. Διαλέξτε έναν από τους τετράγωνους πυκνωτές με το μεγάλο εμβαδόν και κατεβάστε με προσοχή την ακίδα στο ηλεκτρόδιο από Al αυτού του πυκνωτή.

Διαλέξτε από το LabVIEW (στον υπολογιστή) το πρόγραμμα HP 4284a CV meas. και εφαρμόστε μία τάση από +1 V έως -2 V στον πυκνωτή με βήμα 0.01 V. Σώστε τα αποτελέσματα (εφαρμοζόμενες τιμές τάσης V, αντίστοιχες τιμές χωρητικότητας C και αγωγιμότητας G), που θα καταγράψουν από τον υπολογιστή σε ένα αρχείο.

7. Επαναλάβετε το βήμα 6 για έναν τετράγωνο πυκνωτή με μεσαίο εμβαδόν.

8. Βγάλτε το δείγμα Γ από τον probe, αφού σηκώσετε με προσοχή την ακίδα από αυτό και τοποθετήστε στη βάση του probe το δείγμα Δ, στο οποίο επίσης έχουν αναπτυχθεί πυκνωτές αντίστοιχοι με του δείγματος Γ. Επαναλάβετε τα βήματα 6 και 7. Σε αυτούς τους πυκνωτές, όμως, εφαρμόστε τάση από -2 V έως +2 V με βήμα + 0.05 V και στη συνέχεια εφαρμόστε τάση από -3V έως +V με βήμα +0.05 V.

9. Σηκώστε με προσοχή την ακίδα και βγάλτε το δείγμα Δ από τον probe.

Προσοχή!!! Θυμηθείτε ότι όλες οι μετρήσεις στους πυκνωτές παίρνονται για συχνότητα της ac τάσης ίση με 1 MHz.

3. Επεξεργασία των μετρήσεων

I. Στρώμα από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (polysilicon)

α. Από τις μετρήσεις του βήματος 3 και με ένα κατάλληλο σχεδιαστικό πρόγραμμα (π.χ. Excel, Origin) κάνετε τη γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής I-V του στρώματος από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο.

Από αυτή τη χαρακτηριστική υπολογίστε την αντίστασή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου καθώς και την αντίσταση ανά μονάδα επιφάνειας, γνωρίζοντας ότι καθεμία από τις λωρίδες του στρώματος αυτού έχει εμβαδόν $8 \times 16 \mu\text{m}^2$.

II. Δίοδοι p-n

β. Από τις μετρήσεις του βήματος 4 και με ένα κατάλληλο σχεδιαστικό πρόγραμμα (π.χ. Excel, Origin) κάνετε τη γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής I-V της διόδου.

Από αυτή τη χαρακτηριστική υπολογίστε τη στατική αντίσταση R_F της διόδου για $V_F = 0.5V$ και για $V_F = 0.8V$ (δίοδος ορθά πολωμένη) και τη στατική αντίσταση R_R της διόδου για $V_R = -1V$ και για $V_R = -2V$ (δίοδος ανάστροφα πολωμένη).

Υπολογίστε τη δυναμική αντίσταση r_d της διόδου.

γ. Από τις μετρήσεις του βήματος 5, όπως και στο ερώτημα β, σχεδιάστε τη χαρακτηριστική I-V της διόδου και βρείτε τη στατική αντίσταση R_F της διόδου για $V_F = 10V$ και για $V_F = 24V$ (ορθή πόλωση) και R_R της διόδου για $V_R = -1V$ και για $V_R = -2V$ (ανάστροφη πόλωση).

Υπολογίστε τη δυναμική αντίσταση r_d της διόδου. Οι πιο πάνω υπολογισμοί να γίνουν και για τις δύο σειρές (sets) μετρήσεων, που πήρατε.

Σχολιάστε τα αποτελέσματά σας.

III. Πυκνωτές MOS

δ. Από τις μετρήσεις των βημάτων 6, 7, 8 και 9 και με ένα κατάλληλο σχεδιαστικό πρόγραμμα (π.χ. Excel, Origin) κάνετε τη γραφική παράσταση της χαρακτηριστικής C-V

των πυκνωτών MOS, που εξετάσατε. Από τη χαρακτηριστική αυτή βρείτε το είδος των πυκνωτών (τύπου p ή n) των δειγμάτων Γ και Δ. Δικαιολογείστε την απάντησή σας.

ε. Από τη χαρακτηριστική C-V υπολογίστε το πάχος d_{ox} του οξειδίου των πυκνωτών των δειγμάτων Γ και Δ.

στ. Από την ίδια χαρακτηριστική C-V υπολογίστε την τάση κατωφλίου (V_T) για καθένα από τους πυκνωτές των δειγμάτων Γ και Δ. Υπάρχει διαφορά στην τάση κατωφλίου μεταξύ των πυκνωτών με διαφορετικά εμβαδά (μεγάλο και μικρό) του ίδιου δείγματος. Εξηγήστε.

Δ. Βιβλιογραφία

- [1] D. K. Scronder: “Semiconductor Material and Device Characterization”, Wiley and Sons, (2005).
- [2] S. M. Sze: “Semiconductor Devices: Physics and Technology”, Wiley and Sons, New York, (2002).
- [3] Κ. Καρούπαλου, Γ. Φιλοκύπρου: “Μαθήματα Ηλεκτρονικής”, Εκδόσεις Πανεπιστημίου Αθηνών, Αθήνα, (1979).
- [4] Sima Dimitrijevic: “Understanding Semiconductor Devices”, Oxford University Press, (2000).
- [5] Albert Paul Malvino: “Βασική Ηλεκτρονική”, Εκδόσεις Α. Τζιόλα Ε., Θεσσαλονίκη (1990).
- [6] Yuan Taur - T. H. Ning: “Fundamentals of Modern VLSI Devices”, Cambridge University Press, (1998).
- [7] E. H. Nicollian and J. R. Brews: “MOS Physics and Technology”, Wiley and Sons, New York, (1982).
- [8] Yiannis Tsididis: “Operation and Modeling of the MOS Transistor”, 2nd edition, M^CGraw Hill, (1999).
- [9] Α. Αραπογιάννη: “Φυσική ημιαγωγικών διατάξεων”, Μέρος Β, Αθήνα 1999.
- [10] B. G. Streetman, S. Banerjee: “Solid State Electronic Devices”, Prentice Hall, New Jersey, (2000).
- [11] Hewelett Packard Inc.: “4140B pA Meter / DC Voltage Source – Operation Manual”, USA (1998).
- [12] Hewelett Packard Inc.: “4284A Precision LCR Meter – Operation Manual”, USA (1998).
- [13] Ν. Ι. Θεοδώρου: “Ηλεκτρικές Μετρήσεις”, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, (1994).
- [14] Jean Brini, Claudine Jouanny, Danika Perrin, Pierre Gentil: “Mise Au Point d’une filiere nMOS definition et dessin d’un jeu de masques de test”, Projet de troisieme annee, E.N.S.E.R.G., (1985-1986).
- [15] Σ. Κολιοπούλου: “Νανοηλεκτρονικές Διατάξεις Πυριτίου”, Διδακτορική διατριβή, Θεσσαλονίκη, (2005).