


ΤΕΙ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ - ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ & ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

A large, stylized logo for 'mos' is positioned on the left side of the page. It features a large blue 'C' shape that partially encloses the word 'mos' in a bold, red, lowercase font. A red ribbon-like element is intertwined with the 'C' shape. The background of the page is a complex geometric design with yellow, blue, and grey diagonal-hatched areas.

mos

**Σχεδίαση,
& προσομοίωση**

υλοποίηση σε επίπεδο φυσικού
σχεδίου (layout) οικογένειας λογικών πυλών 

Διπλωματική εργασία

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΣ Α. ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΣ ΑΜ: 2006049

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Θ. ΠΑΠΑΖΑΧΑΡΙΟΥ ΑΜ: 2006019

Επιβλέπων: Ιωάννης Διαπέρδος



ΤΕΙ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ - ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ &
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Πτυχιακή Εργασία

των φοιτητών

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ του ΑΡΓΥΡΙΟΥ

ΑΜ: 2006049

και

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΠΑΠΑΖΑΧΑΡΙΟΥ του ΘΩΜΑ

ΑΜ:2006019

Τίτλος

*«Σχεδίαση, προσομοίωση και υλοποίηση σε
επίπεδο φυσικού
σχεδίου (layout) οικογένειας
λογικών πυλών
CMOS»*

Επιβλέπων:

Ιωάννης Λιαπέρδος, καθηγητής εφαρμογών

Σπάρτη, Σεπτέμβριος 2011

ΤΕΙ ΚΑΛΑΜΑΤΑΣ - ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΠΑΡΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ &
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Πτυχιακή Εργασία

των φοιτητών

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ ΑΛΕΞΟΠΟΥΛΟΥ του ΑΡΓΥΡΙΟΥ

ΑΜ: 2006049

και

ΝΙΚΟΛΑΟΥ ΠΑΠΑΖΑΧΑΡΙΟΥ του ΘΩΜΑ

ΑΜ:2006019

Τίτλος

*«Σχεδίαση, προσομοίωση και υλοποίηση σε
επίπεδο φυσικού
σχεδίου (layout) οικογένειας
λογικών πυλών
CMOS»*

Επιβλέπων:

Ιωάννης Λιαπέρδος, καθηγητής εφαρμογών

Σπάρτη, Σεπτέμβριος 2011

**Στους γονείς μας
και στα αδέρφια μας**

"Ἄμες δέ γ' ἐσόμεθα πολλῶ κάρρονες"

Αυτή η φράση, που θα πει: «εμείς θα γίνουμε πολύ καλύτεροι (από εσάς)», είναι η απάντηση του χορού των παιδιών στην αρχαία Σπάρτη, στους χορούς των γερόντων και των μεγάλων, και εκφράζει την υπόσχεση της νέας γενιάς πως θα δικαιώσει τις ελπίδες των μεγάλων καθώς και τον κόπο των γονιών τους για να τα μεγαλώσουν και να τα μορφώσουν.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Με την παρούσα έκδοση ουσιαστικά ολοκληρώνεται η διπλωματική μας εργασία που εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2010-2011 στο *ΤΕΙ Καλαμάτας-Παράρτημα Σπάρτης, Τμήμα Τεχνολογίας Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών*.

Από την αρχή τέθηκαν υψηλοί στόχοι τους οποίους κατορθώσαμε να κατακτήσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα μπορούσαμε. Τα χαρακτηριστικά μας ήταν επιμονή, υπομονή, σκληρή δουλειά, αναζήτηση, το ενδιαφέρον που μας προκάλεσε από την πρώτη στιγμή το θέμα, η διάθεση και το χαμόγελό μας ώστε όλα να πάνε καλά. Φροντίσαμε κάθε μας κίνηση, κάθε μας αναζήτηση να αποτελεί πάντα την αφετηρία για μια σωστή και ολοκληρωμένη δουλειά και όταν αποφασίζαμε να λειτουργήσουμε με ενδιαφέρον τότε μεταμορφωνόμασταν και πετυχαίναμε.

Με την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε πρώτιστα τον καθηγητή εφαρμογών κ. Ιωάννη Λιαπέρδο για την καθοδήγηση και τις συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας αυτής, ο οποίος με ουσιαστική και αρκετές φορές καταλυτική παρουσία βοήθησε να ξεπεραστούν εμπόδια οργανωτικά και ανεπάρκειας χρόνου. Ένα μεγάλο ευχαριστώ χρωστάμε επίσης στον κ. Γεώργιο Αγγελόπουλο, τον προϊστάμενο μας, για όσο διάστημα κάναμε πρακτική, στο Τμήμα Πληροφορικής και Νέων Τεχνολογιών στη Βουλή των Ελλήνων, ο οποίος πέρα από τη θέση που μας πρόσφερε μας συμβουλεύει και μας βοηθάει μέχρι και τώρα σε ό,τι και αν χρειαζούμαστε.

Επίσης, θα ήταν παράλειψη να μην ευχαριστήσουμε τον συμφοιτητή μας Νικολετάκη Αλέξανδρο και τις φίλες μας Παναγιώτα Μητροπούλου, Μυριάνθη Σολωμού και Μαριέττα Οικονομοπούλου για τη συμπαράστασή τους όποτε συναντούσαμε δυσκολίες. Τέλος, αλλά όχι τελευταίους, θέλουμε να ευχαριστήσουμε τους γονείς μας, Αργύρη και Βασιλική, Θωμά και Ελένη, αντίστοιχα για όσα μας προσέφεραν, προσωπικά στον καθένα μας, αυτά τα πέντε χρόνια που σπουδάζουμε και όχι μόνο. Επίσης, τους υπεύθυνους της βιβλιοθήκης της Σπάρτης και της Δημητσάνας για την αντιμετώπιση και την πολύτιμη βοήθεια που είχαμε από αυτούς όσον αφορά το κομμάτι των πληροφοριών και τέλος ευχαριστούμε όλους όσους βοήθησαν ώστε η αρχική μας ιδέα να γίνει πραγματικότητα.

Τα καλύτερα έπονται!

Χαράλαμπος Α. Αλεξόπουλος
alex_lambis@hotmail.com

Νικόλαος Θ. Παπαζαχαρίου
thomaslp@otenet.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εφεύρεση του ολοκληρωμένου κυκλώματος (Integrated Circuit- IC) το 1959 αποτέλεσε μεγάλο επίτευγμα, επειδή τα εξαρτήματα δεν είναι πια διακριτά. Είναι ολοκληρωμένα. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργούνται και συνδέονται κατά τη διαδικασία κατασκευής σε ένα μόνο τσιπ, ένα μικρό κομμάτι ημιαγωγού υλικού. Επειδή τα εξαρτήματα αυτά είναι μικροσκοπικά, ο κατασκευαστής μπορεί να τοποθετήσει χιλιάδες από αυτά τα ολοκληρωμένα εξαρτήματα στον χώρο που θα καταλάμβανε ένα μόνο διακριτό transistor. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή του τρόπου κατασκευής ενός IC. Οι σύγχρονες διαδικασίες κατασκευής είναι πολύ πιο περίπλοκες, αλλά αυτός ο απλοποιημένος σχολιασμός θα σας δώσει τη βασική ιδέα για την κατασκευή ενός διπολικού IC.

Αρχικά, ο κατασκευαστής δημιουργεί έναν κρύσταλλο τύπου p μήκους αρκετών ιντσών. Αυτός διαιρείται σε πολλές λεπτές φέτες(wafer). Η μια πλευρά της λεπτής φέτας ημιαγωγού υλικού εμπλουτίζεται και λειαίνεται για να απομακρυνθούν τυχόν επιφανειακές ατέλειες. Η λεπτή αυτή φέτα ονομάζεται υποστρώμα p. Θα χρησιμοποιηθεί σαν «σασί» για τα ολοκληρωμένα εξαρτήματα. Στη συνέχεια οι φέτες τοποθετούνται σε έναν κλίβανο. Ένα μείγμα αερίου από άτομα πυριτίου και πεντασθενή άτομα περνά πάνω από τη φέτα. Αυτό σχηματίζει ένα λεπτό στρώμα ημιαγωγού τύπου-n στη θερμή επιφάνεια του υποστρώματος. Το στρώμα αυτό ονομάζεται επιταξιακό στρώμα (epitaxial layer). Το επιταξιακό στρώμα έχει πάχος περίπου 0.1 μέχρι 1 mil(1 mil ισούται με το χλυστό της ίντσας). Για να εμποδίσουμε τη ρύπανση του επιταξιακού στρώματος, φυσάμε καθαρό οξυγόνο πάνω από την επιφάνεια. Τα άτομα του οξυγόνου συνδυάζονται με τα άτομα του πυριτίου για να σχηματίσουν ένα στρώμα διοξειδίου του πυριτίου(SiO_2) πάνω στην επιφάνεια. Αυτό το στρώμα που μοιάζει με γυαλί και αποτελείται από SiO_2 καλύπτει την επιφάνεια και εμποδίζει περαιτέρω χημικές αντιδράσεις. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται μόνωση ημιαγωγού. Στη συνέχεια η λεπτή φέτα ημιαγωγού χωρίζεται σε ορθογώνια τμήματα. Καθεμία από αυτές τις περιοχές θα αποτελέσει ξεχωριστό τσιπ μετά την τομή της φέτας. Πριν όμως από την τομή αυτή ο κατασκευαστής δημιουργεί εκατοντάδες κυκλώματα πάνω στη φέτα ημιαγωγού σε κάθε περιοχή του τσιπ. Αυτή η ταυτόχρονη μαζική παραγωγή είναι ο λόγος του χαμηλού κόστους των IC. Ένα transistor δημιουργείται ως εξής: Απομακρύνεται ένα μέρος του SiO_2 αποκαλύπτοντας το επιταξιακό στρώμα.

Κατόπιν, η λεπτή φέτα ημιαγωγού τοποθετείται σε κλίβανο και τρισθενή άτομα ενώνονται με το επιταξιακό στρώμα. Η συγκέντρωση τρισθενών ατόμων είναι αρκετή για να μεταβάλει το επιταξιακό στρώμα που εκτίθεται από υλικό-n σε υλικό-p. Επομένως, μπορούμε να πάρουμε μια νησίδα υλικού-n κάτω από το στρώμα SiO_2 . Τώρα ανοίγεται μια οπή στο κέντρο του στρώματος SiO_2 . Αυτή εκθέτει το επιταξιακό στρώμα n. Η οπή στο στρώμα SiO_2 ονομάζεται παράθυρο. Τώρα ας εξετάσουμε αυτό που είναι γνωστό σαν συλλέκτης του transistor. Για να πάρουμε τη βάση, περνάμε τρισθενή άτομα μέσα από το παράθυρο. Οι προσμίξεις αυτές ενώνονται με το επιταξιακό στρώμα και σχηματίζουν μια νησίδα από υλικό τύπου p. Μετά, το στρώμα SiO_2 ανασχηματίζεται περνώντας οξυγόνο πάνω από τη φέτα ημιαγωγού. Για να σχηματίσουμε τον εκπομπό, ανοίγουμε ένα παράθυρο στο στρώμα SiO_2 και εκθέτουμε τη νησίδα-p. Ενώνοντας τα πεντασθενή άτομα με τη νησίδα-p μπορούμε

να σχηματίσουμε τη μικρή νησίδα n . Μπορούμε να μονώσουμε τη δομή φυσώντας οξυγόνο πάνω από τη φέτα ημιαγωγού. Ανοίγοντας παράθυρα στο στρώμα SiO_2 , μπορούμε να τοποθετήσουμε μέταλλο για να δημιουργήσουμε ηλεκτρική επαφή με τον εκπομπό, τη βάση και τον συλλέκτη. Για να πάρουμε μια δίοδο, ακολουθούμε την ίδια διαδικασία μέχρι το σημείο σχηματισμού και μόνωσης της νησίδας p . Κατόπιν, ανοίγουμε παράθυρα και εκθέτουμε τις νησίδες p και n . Τοποθετώντας μέταλλο μέσα από τα παράθυρα αυτά, δημιουργούμε ηλεκτρική επαφή με την κάθοδο και την άνοδο της ολοκληρωμένης διόδου. Ανοίγοντας δύο παράθυρα πάνω από τη νησίδα, μπορούμε να δημιουργήσουμε μεταλλική επαφή με τη συγκεκριμένη νησίδα. Αυτό μας δίνει μια ολοκληρωμένη αντίσταση. Τα transistors, οι δίοδοι και οι αντιστάσεις κατασκευάζονται εύκολα σε ένα τσιπ. Γι' αυτό σχεδόν όλα τα IC χρησιμοποιούν αυτά τα εξαρτήματα. Δεν είναι πρακτικό να ολοκληρώνουμε πηνία και μεγάλους πυκνωτές στην επιφάνεια ενός τσιπ.

Ανεξάρτητα από το πόσο περίπλοκο μπορεί να είναι το κύκλωμα, η δημιουργία του είναι κυρίως μια διαδικασία διάνοιξης παραθύρων, σχηματισμού νησίδων p και n και σύνδεσης των ολοκληρωμένων εξαρτημάτων. Το υπόστρωμα p απομονώνει τα ολοκληρωμένα εξαρτήματα μεταξύ τους. Υπάρχουν περιοχές απογύμνωσης μεταξύ του υποστρώματος p και των τριών νησίδων n που ακουμπούν σε αυτό. Επειδή οι περιοχές απογύμνωσης ουσιαστικά δεν έχουν φορείς ρεύματος, τα ολοκληρωμένα εξαρτήματα απομονώνονται μεταξύ τους. Αυτού του είδους η μόνωση ονομάζεται μόνωση περιοχή-απογύμνωσης.

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα που περιγράψαμε ονομάζονται μονολιθικά IC. Ο όρος αυτός θεωρείται ο καταλληλότερος επειδή τα εξαρτήματα αποτελούν τμήματα του ίδιου τσιπ. Τα μονολιθικά IC είναι ο πιο συνηθισμένος τύπος IC. Από την εφεύρεσή τους οι κατασκευαστές παρέχουν μονολιθικά IC για τη διεξαγωγή κάθε είδους λειτουργίας. Τα είδη που κυκλοφορούν στο εμπόριο μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν ενισχυτές, σταθεροποιητές τάσης, διατάξεις προστασίας από υπερφόρτιση, δέκτες AM, τα τηλεοπτικά κυκλώματα και κυκλώματα H/Y. Όμως το μονολιθικό IC έχει περιορισμούς ισχύος. Αφού τα περισσότερα μονολιθικά IC έχουν περίπου το μέγεθος ενός διακριτού transistor μικρού σήματος, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος. Όταν απαιτείται υψηλότερη ισχύς, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε IC λεπτής και χοντρής μεμβράνης. Οι διατάξεις αυτές είναι μεγαλύτερες από τα μονολιθικά IC, αλλά μικρότερες από τα διακριτά κυκλώματα. Με ένα IC λεπτών και παχέων υμενίων, ολοκληρώνονται τα παθητικά εξαρτήματα όπως οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές, αλλά τα transistors και οι δίοδοι συνδέονται σαν διακριτά εξαρτήματα για να σχηματίσουν το τελικό κύκλωμα. Επομένως, τα κυκλώματα λεπτών και παχέων υμενίων που διατίθενται στο εμπόριο, αποτελούν συνδυασμό ολοκληρωμένων και διακριτών εξαρτημάτων. Ένα άλλο IC που χρησιμοποιείται στις εφαρμογές υψηλής ισχύος είναι το υβριδικό IC. Τα υβριδικά IC συνδυάζουν δύο ή περισσότερα μονολιθικά IC κυκλώματα λεπτών και παχέων υμενίων. Χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε εφαρμογές ακουστικών ενισχυτών υψηλής ισχύος από 5 μέχρι πάνω από 50 W.

Όσον αφορά την κλίμακα ολοκλήρωσης αρχικά έχουμε τα κυκλώματα μικρής κλίμακας (small-scale integration, SSI), όπου μόνο μερικά εξαρτήματα έχουν ολοκληρωθεί για τον σχηματισμό ενός πλήρους κυκλώματος. Τα περισσότερα τσιπ SSI χρησιμοποιούν ολοκληρωμένες αντιστάσεις διόδους και διπολικά τρανζίστορ.

Η ολοκλήρωση μεσαίας κλίμακας (medium-scale integration, MSI) αναφέρεται σε ολοκληρωμένα κυκλώματα που έχουν από 12 μέχρι 100 ολοκληρωμένα εξαρτήματα ανά τσιπ. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε διπολικά τρανζίστορ είτε τρανζίστορ

MOS (MOSFET εμπλουτισμένου τύπου) σαν τα ολοκληρωμένα τρανζίστορ ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος. Και πάλι στα περισσότερα τσιπ MSI χρησιμοποιούμε διπολικά εξαρτήματα.

Η ολοκλήρωση μεγάλης κλίμακας (large-scale integration, LSI) αναφέρεται σε ολοκληρωμένα κυκλώματα που έχουν πάνω από εκατό ολοκληρωμένα εξαρτήματα. Εφόσον χρειάζονται λιγότερα βήματα για την κατασκευή ενός ολοκληρωμένου τρανζίστορ MOS, ο κατασκευαστής μπορεί να δημιουργήσει περισσότερα εξαρτήματα σε ένα τσιπ από ότι με τα διπολικά τρανζίστορ.

Η ολοκλήρωση πολύ μεγάλης κλίμακας (very large-scale integration, VLSI) αναφέρεται στην τοποθέτηση χιλιάδων ή ακόμα και εκατοντάδων χιλιάδων εξαρτημάτων σε ένα μόνο τσιπ. Σχεδόν όλα τα σύγχρονα τσιπ χρησιμοποιούν VLSI.

Τέλος, υπάρχει και η ολοκλήρωση εξαιρετικά μεγάλης κλίμακας (ultra large-scale integration, ULSI) που αναφέρεται στην τοποθέτηση περισσότερο του ενός εκατομμυρίου εξαρτημάτων σε ένα μόνο τσιπ. Οι μικροεπεξεργαστές 486 της INTEL και ο Pentium χρησιμοποιούν τεχνολογία ULSI. Οι προσδοκίες της χρονιάς μας προσανατολίζονται στο ένα δισεκατομμύριο εξαρτήματα σε ένα μόνο τσιπ.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ- ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	5
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ	12
1.1 Ορισμοί	13
1.2 Τα συστατικά των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και συστημάτων	13
1.3 Πίσω στον χρόνο	14
1.4 Υλικά ημιαγωγών	17
1.5 Σύγχρονη μικροηλεκτρονική	18
1.6 Κατάταξη ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων	19
1.7 Δομή και ιδιότητες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων	21
✓ 1.7.1 Τα Μονολιθικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα	
✓ 1.7.2 Ολοκληρωμένα κυκλώματα σε ταινίες	
✓ 1.7.3 Τα Υβριδικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα	
1.8 Λειτουργίες και χαρακτηριστικά των Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ	27
2.1 Η κρυσταλλική δομή του Πυριτίου	28
2.2 Παρασκευή πυριτίου ηλεκτρονικού τύπου	31
2.3 Ατέλειες στους κρυστάλλους	31
2.4 Καθαρισμός υλικού	33
2.5 Ανάπτυξη κρυστάλλου	33
2.6 Η μέθοδος Czochralski	34
2.7 Η μέθοδος κινητής ζώνης	36
2.8 Μορφοποίηση Δισκίων	37
2.9 Επιταξία	39
2.10 Επιταξία Μοριακής Δέσμης (MBE)	43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
Η ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ 45

3.1 Μέθοδοι παρασκευής οξειδίων	46
✓ 3.1.1 Θερμική οξείδωση	
3.2 Η θεωρία ανάπτυξης του οξειδίου	48
3.3 Η διαδικασία οξείδωσης	53
3.4 Ανακατανομή των προσμίξεων κατά την οξείδωση	54
3.5 Μετρήσεις του πάχους του οξειδίου	55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΔΙΑΧΥΣΗ ΚΑΙ ΕΜΦΥΤΕΥΣΗ ΙΟΝΤΩΝ 57

4.1 Διάχυση	59
✓ 4.1.1 Η θεωρία της διάχυσης	
✓ 4.1.2 Η διαδικασία της διάχυσης	
✓ 4.1.3 Οξείδωση κατά την διάχυση	
✓ 4.1.4 Μάσκες διάχυσης	
✓ 4.1.5 Συστήματα διάχυσης	
4.2 Εμφύτευση ιόντων	69
✓ 4.2.1 Κατανομές εμφύτευσης ιόντων	
✓ 4.2.2 Οι συσκευές εμφύτευσης ιόντων	
✓ 4.2.3 Ανόπτηση μετά της εμφύτευση ιόντων	
4.3 Χαρακτηρισμός της εμφύτευσης προσμίξεων	75
✓ 4.3.1 Μετρήσεις της αντίστασης φύλλου	
✓ 4.3.2 Μετρήσεις του βάθους επαφής	
✓ 4.3.3 Μετρήσεις της κατανομής των προσμίξεων	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΜΙΚΡΟΛΙΘΟΓΡΑΦΙΑ 77

5.1 Κατηγορίες λιθογραφίας	78
✓ 5.1.1 Λιθογραφία με γρήγη εμφάνιση	
✓ 5.1.2 Λιθογραφία ξηρής εμφάνισης	
✓ 5.1.3 Είδη λιθογραφίας ως προς το είδος της ακτινοβολίας	
5.2 Μάσκες	80
✓ 5.2.1 Κατασκευή μασκών	
✓ 5.2.2 Υποστρώματα Μασκών	
✓ 5.2.3 Συστήματα κατασκευής μασκών	
✓ 5.2.4 Λιθογραφικά υλικά για την κατασκευή μασκών	
5.3 Η φωτολιθογραφία	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6
ΑΠΟΘΕΣΗ ΥΜΕΝΙΩΝ **87**

6.1 Επιμετάλλωση	88
✓ 6.1.1 Χημική Απόθεση Ατμών	
✓ 6.1.2 Φυσική Απόθεση ατμών	
1. 6.1.2.1 Εξάχνωση	
2. 6.1.2.2 Θρυμματισμός(Sputtering)	
6.2 Εξοπλισμός για τις διαδικασίες απόθεσης κενού	91
6.3 Αντλίες παρασκευής κενού	92
✓ 6.3.1 Αντλίες προσρόφησης	
✓ 6.3.2 Περιστροφικές αντλίες	
1. 6.3.2.1 Αντλία με έλασμα	
2. 6.3.2.2 Αντλία με περιστροφικό έμβολο	
✓ 6.3.3 Αντλίες διάχυσης	
✓ 6.3.4 Τουρμπομορικές αντλίες	
6.4 Sputtering	96
✓ 6.4.1 Μάγνητρον sputtering	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7
Ολοκληρωμένες αντιστάσεις και πυκνωτές- Τρανζίστορ MOSFET **102**

7.1 Ολοκληρωμένες αντιστάσεις	102
✓ 7.1.1 Αντιστάσεις τύπου διάχυσης	
✓ 7.1.2 Αντιστάσεις λεπτών στρωμάτων	
7.2 Ολοκληρωμένοι πυκνωτές	
✓ 7.2.1 Πυκνωτές τύπου MOS	
✓ 7.2.2 Πυκνωτές ένωσης p-n	
7.3 Τρανζίστορ MOSFET	106
✓ 7.3.1 Δομή MOSFET	
✓ 7.3.2 Λειτουργία σε διαφορετικές συνθήκες πόλωσης	
✓ 7.3.3 Συμπληρωματικά MOSFET	
7.4 Κατασκευαστικά στάδια Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων	112
✓ 7.4.1 Κατασκευή διόδου MOS	

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8
Τεχνολογία CMOS **113**

8.1 Τεχνολογία CMOS	114
8.2 Εισαγωγή στην σχεδίαση οικογένειας λογικών πυλών CMOS	116
8.3 Αντιστροφείας τεχνολογίας CMOS	117
✓ 8.3.1 Σχεδίαση	
✓ 8.3.2 Προσομοίωση – Μελέτη	

✓ 8.3.3 Τα Βήματα κατασκευής του αναστροφέα CMOS	
✓ 8.3.4 Υλοποίηση σε φυσικό επίπεδο (Layout)	
8.4 Πύλη NOR τεχνολογίας CMOS	136
✓ 8.4.1 Σχεδίαση	
✓ 8.4.2 Προσομοίωση – Μελέτη	
✓ 8.4.3 Υλοποίηση σε φυσικό επίπεδο (Layout)	
8.5 Πύλη NAND τεχνολογίας CMOS	143
✓ 8.5.1 Σχεδίαση	
✓ 8.5.2 Προσομοίωση – Μελέτη	
✓ 8.5.3 Υλοποίηση σε φυσικό επίπεδο (Layout)	

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**152**

1

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

Εισαγωγή στα Ολοκληρωμένα Κυκλώματα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΑ

1.1 Ορισμοί

Η ηλεκτρονική, ως επιστήμη, έχει αποκτήσει τόσα πολλά ευρήματα ώστε οι παλαιότεροι ορισμοί της να είναι ανεπαρκείς για να την καθορίσουν. Ενώ αρχικά σήμανε την περιγραφή της συμπεριφοράς των ελεύθερων ηλεκτρονίων σε αερόκενους σωλήνες, ο όρος αργότερα επεκτάθηκε για τη μελέτη της συμπεριφοράς τους στα αέρια, στα στερεά και στα υγρά. Τα τελευταία χρόνια θεωρήθηκε ως ένας επιμέρους κλάδος της ηλεκτρομηχανικής.

Η ηλεκτρονική είναι η βάση για κάθε σκέψη σχετική με τις επικοινωνίες (υποβρύχια καλώδια, αυτόματα τηλεφωνικά δίκτυα, τηλεοπτικά κυκλώματα κ.τ.λ.) καθώς και με την επεξεργασία, απομνημόνευση και ανάκτηση πληροφοριών με τη χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Αν πρέπει να αποδώσουμε έναν ορισμό της Ηλεκτρονικής, αυτός θα ήταν ο εξής:

Η *Ηλεκτρονική* είναι ένα κομμάτι της επιστήμης και της βιομηχανίας, όπου εξετάζει τη λειτουργία καθώς και την εφαρμογή των κυκλωμάτων και των διατάξεων (όπως λυχνίες και ημιαγωγοί), που λειτουργούν με τον έλεγχο ροής ηλεκτρονίων και άλλων ηλεκτρικά φορτισμένων σωματιδίων.

Η *Μικροηλεκτρονική* είναι το κομμάτι της επιστήμης που αφορά τη μελέτη και την επεξεργασία ενός καινούργιου τύπου ηλεκτρονικών συσκευών από άποψη ποιότητας, αλλά κυρίως του όγκου που καταλαμβάνουν, των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και των αρχών της χρήσης τους.

Τα *Ολοκληρωμένα μικροκυκλώματα* αποτελούνται από διάφορα ηλεκτρικά στοιχεία όπως τρανζίστορ, αντιστάσεις, διόδους κ.α. τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με διάφορους τρόπους κατά τη διάρκεια ενός ενιαίου τεχνολογικού κύκλου. Το σύνολο αυτών των συνιστωσών (τρανζίστορ, διόδοι, αντιστάσεις, πυκνωτές κ.α.) εκτελούν μια καθορισμένη λειτουργία μετασχηματισμού πληροφορίας.

1.2 Τα συστατικά των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και συστημάτων

Η σύγχρονη ηλεκτρονική περιλαμβάνει μια μεγάλη ποικιλία από στοιχεία τα οποία είναι γνωστά στον χώρο της Πληροφορικής ως hardware(υλικό). Η ορολογία αυτή έχει επικρατήσει στη διεθνή βιβλιογραφία και χρησιμοποιείται επίσης για τα κυκλώματα και τα συστήματα που περιέχουν σαν επιμέρους μέρη, τα στοιχεία αυτά.

Η πιο κατάλληλη μέθοδος ταξινόμησης των διακριτών στοιχείων είναι η υποδιαίρεσή τους σε αυτά που έχουν τη δυνατότητα ενίσχυσης του σήματος το οποίο

διαχειρίζονται, τα οποία είναι γνωστά και ως **ενεργά**, και σε αυτά που δεν έχουν την δυνατότητα αυτή, γνωστά και ως **παθητικά**.

Στα ενεργά στοιχεία περιλαμβάνονται οι ηλεκτρονικές λυχνίες και μερικές συσκευές ημιαγωγών, όπως τα γνωστά σε όλους τρανζίστορ, των οποίων η χρήση είναι ως ταλαντωτές ή ενισχυτές ή εκτελούν άλλες εξειδικευμένες λειτουργίες των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων. Τα κύρια ηλεκτρικά χαρακτηριστικά τα οποία θα αναλύσουμε πιο κάτω και αφορούν τα παθητικά στοιχεία είναι η αντίσταση, η χωρητικότητα και η επαγωγή.

Αντίσταση είναι το μέτρο της δυσκολίας που παρουσιάζει ένα υλικό στη ροή του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι παράγοντες οι οποίοι καθορίζουν την αντίσταση είναι η δομή των ατόμων, η θερμοκρασία, ο βαθμός καθαρότητας και η πυκνότητα των ελεύθερων ηλεκτρονίων που είναι διαθέσιμα να κινηθούν υπό την επίδραση ενός εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Η μονάδα μέτρησης της αντίστασης είναι τα ohm και ορίζεται από τον λόγο της διαφοράς δυναμικού κατά μήκος ενός αγωγού προς την ένταση του ρεύματος που τον διαρρέει. Έτσι, αν τάση ενός Volt προκαλεί ρεύμα έντασης ενός Ampere, η αντίσταση, βάσει του ορισμού, έχει τιμή ενός Ohm.

Χωρητικότητα είναι η ικανότητα αποθήκευσης φορτίου σε ένα ζεύγος αγωγών, διαχωρισμένων, από έναν μονωτή, και μπορεί να μετρηθεί σαν τον λόγο του υποθηκευμένου φορτίου προς το δυναμικό που δημιουργείται από το φορτίο αυτό. Μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το Farad.

Επαγωγή είναι μια μαγνητική ιδιότητα των αγωγών που ορίζεται από τον λόγο της μαγνητικής ροής προς το ρεύμα που απαιτείται για να δημιουργηθεί η ροή αυτή. Έχει σαν μονάδα μέτρησης το Henry ή το Wb/A (Weber/Ampere). Όπως και η χωρητικότητα έτσι και η επαγωγή εξαρτώνται από τη γεωμετρία των αγωγίων διατάξεων και από τη μεταξύ τους θέση στο εσωτερικό των ηλεκτρονικών κατασκευών.

1.3 Πίσω στον χρόνο

Η λυχνία από καταβολής της όπως δηλαδή την ανακάλυψε ο Edison, είναι η τρίοδος¹. Έχει τέσσερις ακροδέκτες και τρία στοιχεία στο εσωτερικό της. Η ισχύς της είναι χαμηλή. Γι' αυτό αργότερα αναπτύχθηκε άλλο σύστημα, που ονομάστηκε πέντοδος.

Οι πρώτες προσπάθειες που αφορούν την αρχή λειτουργίας του τρανζίστορ κατοχυρώθηκαν το 1928 από τον Γιούλιους Έντγκαρ Λιλιενφελντ (Julius Edgar Lilienfeld) στη Γερμανία. Το 1934 ο Γερμανός φυσικός Όσκαρ Χάιλ (Oskar Heil) κατοχύρωσε την ευρεσιτεχνία για το *τρανζίστορ επίδρασης πεδίου* (field effect transistor). Αυτή τους η εργασία ακολούθησε τις προσπάθειες τους κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου να παρασκευάσουν γερμάνιο υψηλής καθαρότητας, που

¹ Η τρίοδος λυχνία αποτελείται από τρία μέρη:

α) την κάθοδο, η οποία εκπέμπει ηλεκτρόνια όταν θερμαίνεται.

β) την άνοδο, η οποία συλλέγει τα ηλεκτρόνια της καθόδου και

γ) ένα παρεμβλλόμενο πλέγμα για τον έλεγχο της ροής των ηλεκτρονίων, συνήθως με τη μορφή λεπτής συρμάτινης σχάρας, περιβάλλει την κάθοδο σε μικρή απόσταση από αυτή.

είχε χρησιμοποιηθεί ως στοιχείο του δέκτη μικροκυμάτων στο ραντάρ. Η προηγούμενη τεχνολογία που βασιζόταν σε λυχνίες δεν προσέφερε αρκετά ταχεία εναλλαγή για να εξυπηρετήσει επαρκώς αυτή τη λειτουργία. Έτσι, η ομάδα των παραπάνω ερευνητών χρησιμοποίησε διόδους στερεάς κατάστασης. Με τις γνώσεις που απέκτησαν από αυτές προσπάθησαν να κατασκευάσουν μία τρίοδο, πράγμα που αρχικά αποδείχθηκε δύσκολο.

Παρόλα αυτά το πρακτικά αξιοποιήσιμο τρανζίστορ ανακαλύφθηκε επίσημα το 1948 από τους Αμερικανούς W. Shockley, J. Bardeen και W. Brattain στα εργαστήρια της Bell. Η ονομασία της ανορθωτικής αυτής διάταξης οφείλεται στην έκφραση transfer resistor (αντίσταση μεταφοράς), αφού ο όρος αυτός έμοιαζε να περιγράφει τις λειτουργικές ιδιότητες της συσκευής. Τα πρώτα τρανζίστορ που εμφανίστηκαν στο εμπόριο ήταν συσκευές σημειακών επαφών (point-contact devices) και αποτελούνταν από δύο λεπτά ελατήρια από σύρμα, τα οποία, με απλή πίεση, συνδέονταν με την επιφάνεια του ημιαγωγού. Η καθεμία από τις επαφές του μετάλλου με τον ημιαγωγό εμφάνιζε τα απαιτούμενα ανορθωτικά χαρακτηριστικά για τη λειτουργία του τρανζίστορ.

Το πρώτο τρανζίστορ πυριτίου¹¹ κατασκευάστηκε από την Texas Instruments το 1954. Ήταν εργασία του Gordon Teal, ενός ειδικού στην παραγωγή κρυστάλλων υψηλής καθαρότητας που εργάζονταν προηγουμένως στα Bell Labs. Το πρώτο MOS τρανζίστορ κατασκευάστηκε από τους Kahng και Atalla στα Bell Labs το 1960.

Η μεγάλη ώθηση στην τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έγινε στις αρχές της δεκαετίας του '60 με την ανάπτυξη της επιπεδικής κατασκευαστικής τεχνικής (planar process). Με βάση την τεχνική αυτή χρησιμοποιήθηκε η εισαγωγή προσμίξεων με διάχυση, μέσα σε δισκίο (wafer) ημιαγωγού, μέσω επιλεγμένων περιοχών της επιφάνειάς του με τη βοήθεια των κατάλληλων μασκών. Με τον τρόπο αυτό έγινε δυνατή η επίτευξη της επιθυμητής συγκέντρωσης προσμίξεων σε περιοχές του ημιαγωγού, η κατασκευή των στοιχείων του κυκλώματος και η δημιουργία των αγωγίμων διασυνδέσεων στην ίδια επιφάνεια του δισκίου. Με την τεχνική αυτή μέσα από διαδοχικά κατασκευαστικά στάδια έγινε δυνατή η ταυτόχρονη κατασκευή πολλαπλών στοιχείων και διατάξεων.

Το σημαντικό αυτό πλεονέκτημα είχε σαν αποτέλεσμα την μαζική κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με διαστάσεις που συνεχώς μικραίνουν και πυκνότητα στοιχείων που αυξάνει ραγδαία με σημαντική μείωση του κόστους κατασκευής. Άλλα πλεονεκτήματα είναι η μικρή κατανάλωση ισχύος, η μεγάλη αξιοπιστία τους καθώς και η μεγάλη ταχύτητα απόκρισης, παράγοντες που ευνοούν την ευρεία χρήση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε διατάξεις των H/Y (μικροεπεξεργαστές, μνήμες κ.α.), σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, αυτοματισμούς κ.α.

¹¹ Το γερμάνιο είναι ένα άλλο παράδειγμα ημιαγωγού. Έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στην στοιβάδα σθένους. Πολλά χρόνια πριν, το γερμάνιο ήταν το μόνο διαθέσιμο υλικό για την κατασκευή εξαρτημάτων ημιαγωγών. Αλλά αυτά τα εξαρτήματα γερμανίου είχαν ένα μοιραίο μειονέκτημα(το υπερβολικό ανάστροφο ρεύμα τους),το οποίο οι μηχανικοί δεν μπόρεσαν να εξουδετερώσουν. Τελικά, ένας άλλος ημιαγωγός, το πυρίτιο, έγινε χρησιμοποιήσιμος και έκανε απαρχαιωμένο το γερμάνιο για τις περισσότερες ηλεκτρονικές εφαρμογές.

Μειονεκτήματα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μπορούν να θεωρηθούν η αδυναμία επέμβασης ή επισκευής στο κύκλωμα, η πολυπλοκότητα των κατασκευαστικών βημάτων καθώς και οι ειδικές εγκαταστάσεις (καθαροί χώροι) με εξοπλισμό υψηλού κόστους, που απαιτούνται για την κατασκευή τους. Τα μειονεκτήματα αυτά όμως αντισταθμίζονται από τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε μικρό χρονικό διάστημα.

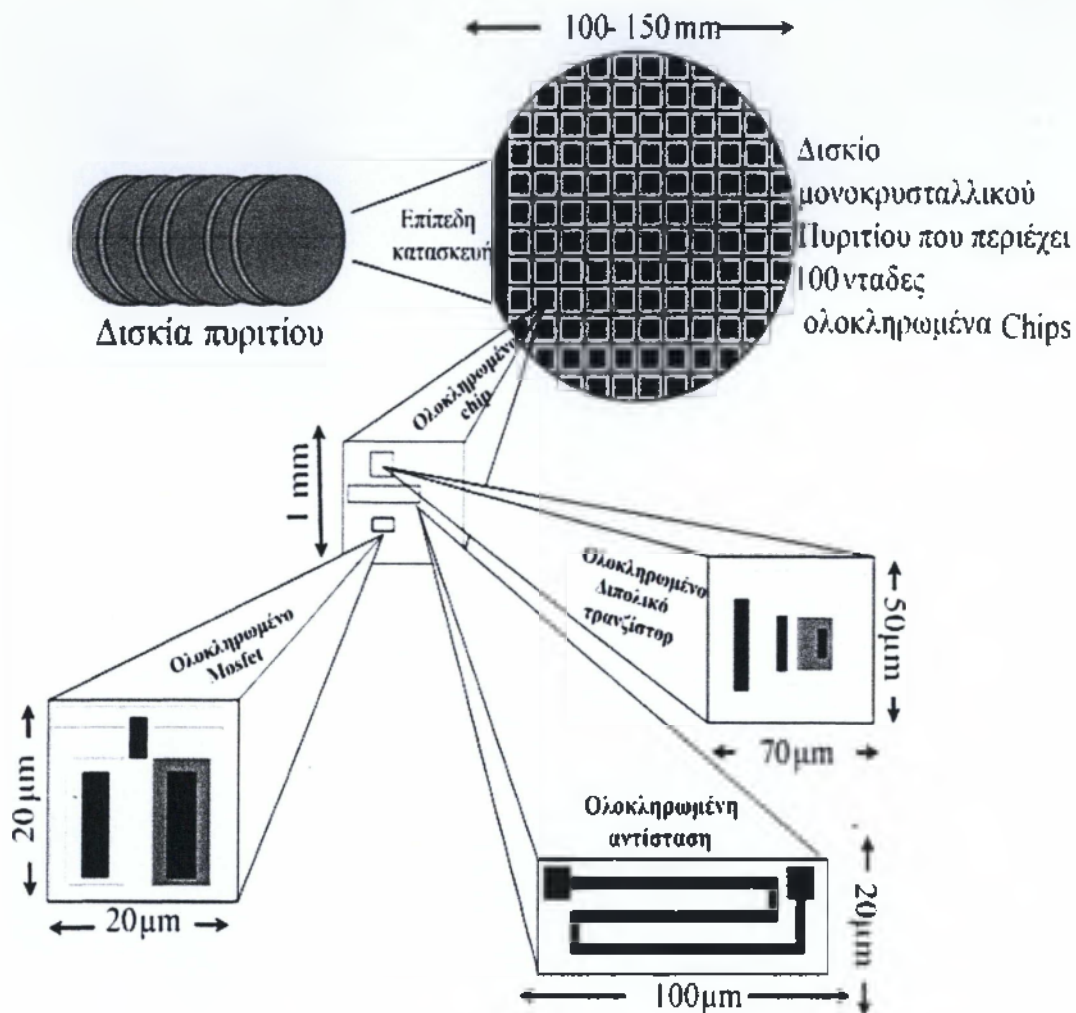
Η **πυκνότητα (κλίμακα) ολοκλήρωσης** που συνήθως εκφράζεται σε αριθμό στοιχείων ανά chip καθώς και το ελάχιστο μήκος στοιχείου ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος είναι δύο χαρακτηριστικά «ανταγωνιστικά» μεγέθη που αποτυπώνουν την εξέλιξη της τεχνολογίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων τις τελευταίες δεκαετίες. Έτσι, στις αρχές της δεκαετίας του '60 τα ολοκληρωμένα κυκλώματα μικρής κλίμακας (SSI: small scale of integration) περιείχαν από 1-100 στοιχεία ανά chip με ελάχιστο μήκος 30-40μm.

Στο τέλος της δεκαετίας του '70 η πυκνότητα έφθασε στα επίπεδα του 10^2 - 10^3 στοιχεία ανά chip (MSI : medium scale of integration) αργότερα έγινε 10^3 - 10^5 στοιχεία (LSI: large scale of integration).

Προς το τέλος της δεκαετίας του 80 η πυκνότητα έγινε 10^5 - 10^6 στοιχεία ανά chip (VLSI : very large scale of integration) με ελάχιστο μήκος μικρότερο από 1μm (υπομικρονική τεχνολογία), ενώ στο τέλος της δεκαετίας του 90 έως σήμερα η πυκνότητα κυμαίνεται στα επίπεδα των 10^7 - 10^9 στοιχείων ανά chip (ULSI : ultra large scale of integration). Μάλιστα στις αρχές της νέας χιλιετίας οι βιομηχανίες των ημιαγωγών ξεκίνησαν την παραγωγή των λεγόμενων “**nanochips**”, κυκλωμάτων δηλαδή με χαρακτηριστικές διαστάσεις μικρότερες από 100 nm.

Οι απαιτήσεις για αύξηση της πυκνότητας ολοκλήρωσης και μείωσης του κόστους έδωσαν εντυπωσιακή ώθηση τα τελευταία χρόνια στην ταχύτητα μείωσης των διαστάσεων.

Τα τελευταία χρόνια είμαστε μάρτυρες μιας συνεχούς και εκτεταμένης ανάπτυξης της μικροηλεκτρονικής και συγκεκριμένα της τεχνολογίας CMOS. Βασικό στοιχείο αυτής της ανάπτυξης είναι η συνεχής σμίκρυνση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ως αποτέλεσμα των απαιτήσεων για ηλεκτρονικές διατάξεις υψηλότερων επιδόσεων, χαμηλότερης κατανάλωσης ισχύος και μειωμένου κόστους. Η πρόοδος αυτή επαληθεύει κατά κάποιο τρόπο την πρόβλεψη που έκανε το 1965, ακριβώς τέσσερα χρόνια μετά την ανακάλυψη του πρώτου επίπεδου ολοκληρωμένου κυκλώματος ο Gordon Moore (συνιδρυτής της Intel και νυν επίτιμος πρόεδρος της), σύμφωνα με την οποία, ο αριθμός των τρανζίστορ ανά ολοκληρωμένο κύκλωμα θα διπλασιάζεται περίπου κάθε δεκαοχτώ μήνες . Η πρόβλεψη αυτή έμεινε γνωστή ως «νόμος του Moore». Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της προόδου αποτελεί η Intel. Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, στις συσκευές της υπήρχαν μερικά εκατοντάδες τρανζίστορ ανά chip. Στον επεξεργαστή Pentium IV που βγήκε στην αγορά το 2000 υπήρχαν 42 εκατομμύρια τρανζίστορ. Ο πιο πρόσφατος Itanium 2 αποτελείται από 410 εκατομμύρια τρανζίστορ, ενώ τελευταία η εταιρία κατασκεύασε έναν μικροεπεξεργαστή με 1.7 δισεκατομμύρια τρανζίστορ. Πριν μερικά χρόνια (12^{06} /2000) η intel ανακοίνωσε την κατασκευή, σε ερευνητικό επίπεδο, transistor MOSFET με ελάχιστο μήκος 30nm και πάχος που αντιστοιχεί σε 3 ατομικά στρώματα Σε αυτούς τους ρυθμούς κινούνται και οι υπόλοιπες εταιρίες του κλάδου (IBM, AMD, Philips κ.τ.λ.), αφού έτσι ικανοποιείται το αίτημα για μείωση του κόστους εξαιτίας του γεγονότος ότι πλέον χωρούν πολύ περισσότερα τρανζίστορ σε ένα και μόνο chip.



Σχήμα 1.1

Σχηματική παράσταση μαζικής κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με βάση την επιπεδική τεχνική

1.4 Υλικά Ημιαγωγών

Τα υλικά των ημιαγωγών υποδιαιρούνται σε δύο κατηγορίες: στα ημιαγωγία υλικά, που αποτελούνται από ένα μόνο στοιχείο (στοιχειακοί ημιαγωγοί) και στα υλικά που κατασκευάζονται από τα κράματα δύο ή περισσότερων στοιχείων. Το γερμάνιο (Ge) και το πυρίτιο (Si) αποτελούν τους πιο στοιχειακούς ημιαγωγούς. Οι περισσότερες διατάξεις ημιαγωγών κατασκευάζονται πάνω σε λεπτές φέτες μονοκρυσταλλικού υλικού το οποίο έχει νοθευτεί με κατάλληλες προσμίξεις. Η

προπαρασκευή περιλαμβάνει τα στάδια του καθαρισμού της πρώτης ύλης, της δημιουργίας του μονοκρυστάλλου, την κοπή του μονοκρυστάλλου σε φέτες πάχους περίπου 0,025cm, την επεξεργασία λείανσης της άνω επιφάνειας και τέλος, τη δημιουργία του στρώματος της επίταξης πάχους μερικών μm ($1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$).

1.5 Σύγχρονη Μικροηλεκτρονική

Κάποιες φορές μερικά πράγματα ακούγονται εξωπραγματικά και πέρα από τις κοινές ανθρώπινες δυνατότητες. Παρόλα αυτά όχι μόνο έχουν περάσει στην καθημερινή ζωή μας, αλλά και την προσδιορίζουν. Αλήθεια, πόσο εύκολο είναι να πιστέψει κανείς ότι στο πάχος μιας τρίχας του κεφαλιού μας μπορούν να χωρέσουν περισσότερα από δέκα τρανζίστορ ή ακόμη ότι πάνω σε μία ψηφίδα (chip) μπορούν να κατασκευαστούν εκατομμύρια τρανζίστορ. Αυτά όλα, που για τον απλό άνθρωπο φαντάζουν σαν παραμύθι, στον χώρο της μικροηλεκτρονικής είναι πλέον μια επαγγελματική ρουτίνα.

Ο αιώνας που διανύουμε θα μπορούσε να χαρακτηριστεί και σαν αιώνας της μικροηλεκτρονικής. Όλα αυτά τα χρόνια πολλά άλλαξαν και ακόμα περισσότερα βελτιώθηκαν. Τα ηλεκτρονικά στοιχεία που ξεκίνησαν από τις ογκώδεις και δύσχρηστες λυχνίες κενού κατέληξαν στα τρανζίστορ ημιαγωγών. Η ταχεία μείωση του μεγέθους των ηλεκτρονικών στοιχείων οδήγησε σε τεράστια αύξηση των χρήσεων και της υπολογιστικής ικανότητάς τους. Ο πρώτος υπολογιστής (ENIAC) ο οποίος κατασκευάστηκε το 1946, αποτελούνταν από 17.468 λυχνίες κενού, ζύγιζε 30 τόνους και κατανάλωνε 174 KW. Σε σύγκριση με τους σημερινούς υπολογιστές ο ENIAC ήταν ένα πανάκριβο ανόητο κουτί. Είναι αποδεδειγμένο ότι το μέγεθος των ηλεκτρονικών κυκλωμάτων μειώνεται τα τελευταία χρόνια κατά 30% ανά διετία. Τα πρώτα τρανζίστορ που κατασκευάστηκαν στη δεκαετία του '70 είχαν μέγεθος μερικά εκατομμυριοστά του μέτρου, ενώ σήμερα τα τρανζίστορ είναι 10 φορές μικρότερα. Είναι προφανές ότι η μείωση του μεγέθους των ηλεκτρονικών διατάξεων δεν μπορεί να συνεχίζεται επ' άπειρο. Κάποια στιγμή στο κοντινό μέλλον η τεχνολογία του πυριτίου, που σ' αυτήν βασίζονται τα σημερινά ηλεκτρονικά στοιχεία, θα φτάσει στα όριά της. Ενώ το 1995 ένα τρανζίστορ λειτουργούσε με περίπου 1000 ηλεκτρόνια, προβλέπεται ότι το 2010 ένα τρανζίστορ θα χρειάζεται οχτώ μόνο ηλεκτρόνια για να λειτουργήσει και το 2020 θα φτάσουμε στο θεωρητικό όριο του ενός ηλεκτρονίου ανά τρανζίστορ. Και μόνο απ' αυτήν την πληροφορία είναι αυτονόητο ότι η συνεχής ανάπτυξη των ηλεκτρονικών διατάξεων μετά την ημερομηνία αυτή οδηγεί στην υιοθέτηση, όσον αφορά στα υλικά από τα οποία αποτελούνται τα ηλεκτρονικά στοιχεία, νέων τεχνολογιών.

Η μικροηλεκτρονική ξεκίνησε ως επιστημονικό αντικείμενο πριν από περίπου 45 χρόνια και στο χρονικό αυτό διάστημα έχει γνωρίσει τόσο γρήγορη εξέλιξη όσο κανένας άλλος επιστημονικός κλάδος. Στον πολύ κόσμο είναι γνωστά κυρίως τα προϊόντα της μικροηλεκτρονικής, που είναι οι ψηφίδες ή τσιπάκια, από την παράφραση του αγγλικού όρου «chips», που εύκολα τα βλέπει κανείς σε αποσυναρμολογημένους υπολογιστές, τηλεοράσεις, κινητά τηλέφωνα κτλ. Στην πραγματικότητα είναι σύνθετα ηλεκτρονικά κυκλώματα κατασκευασμένα σε μικροσκοπική κλίμακα πάνω σε μια μικρή φλούδα κάποιου κρυσταλλικού υλικού,

συνήθως πυριτίου (silicon). Όλη η λειτουργία του κινητού τηλεφώνου, π.χ., στηρίζεται σε οκτώ ως δέκα τέτοιες ψηφίδες, οι οποίες τα επόμενα λίγα χρόνια θα ενσωματωθούν σε μία ψηφίδα.

Για την υλοποίηση των επιτευγμάτων της μικροηλεκτρονικής αναπτύχθηκε μια πολύ σύνθετη τεχνολογία, που χαρακτηρίστηκε «υψηλή τεχνολογία». Στα πρώτα χρόνια οδηγός στην τεχνολογία της μικροηλεκτρονικής υπήρξαν οι ΗΠΑ (Silicon Valley). Αργότερα στο παιχνίδι μπήκαν η Ιαπωνία και η Ευρώπη. Η μικροηλεκτρονική σηματοδότησε τη μετάβαση από τη βιομηχανική εποχή στη μεταβιομηχανική εποχή. Στις ημέρες μας τεχνολογικά ανεπτυγμένες θεωρούνται οι χώρες οι οποίες διαθέτουν ή μπορούν να αξιοποιήσουν τη μικροηλεκτρονική τεχνολογία. Ο οικονομικός ανταγωνισμός μεταξύ των διαφόρων χωρών υπήρξε και είναι στην ουσία του ένας τεχνολογικός ανταγωνισμός. Μετά το 1960 η υστέρηση στον τεχνολογικό τομέα ορισμένων οικονομικά εύρωστων ευρωπαϊκών χωρών, τις έθεσε σε δευτερεύουσα θέση στο οικονομικό και πολιτικό παιχνίδι. Έτσι, βλέπουμε τις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής να κυριαρχούν στον χώρο των υπολογιστών, να καθορίζουν την πορεία και τους ρυθμούς εξέλιξης και να επιμένουν να διατηρήσουν το προβάδισμα, αφού ξέρουν καλύτερα από κάθε άλλον να μεταφράζουν τη σημασία αυτής της πρωτοπορίας σε οικονομικούς όρους. Η μετάβαση από μια εποχή σε μια άλλη συνεπάγεται αλλαγές στο επαγγελματικό σκηνικό. Προφανώς είναι απαραίτητη η δημιουργία νέων επαγγελμάτων καθώς και η ειδίκευση επιστημόνων που κατέχουν τίτλους κλασικών πτυχίων. Αυτό αναγκαστικά οδηγεί σε αλλαγές στο εκπαιδευτικό σκηνικό. Σε εθνικό επίπεδο, κυρίαρχο είναι το να καθοριστούν προτεραιότητες και στόχοι σε σύντομο χρονικό διάστημα.¹¹¹

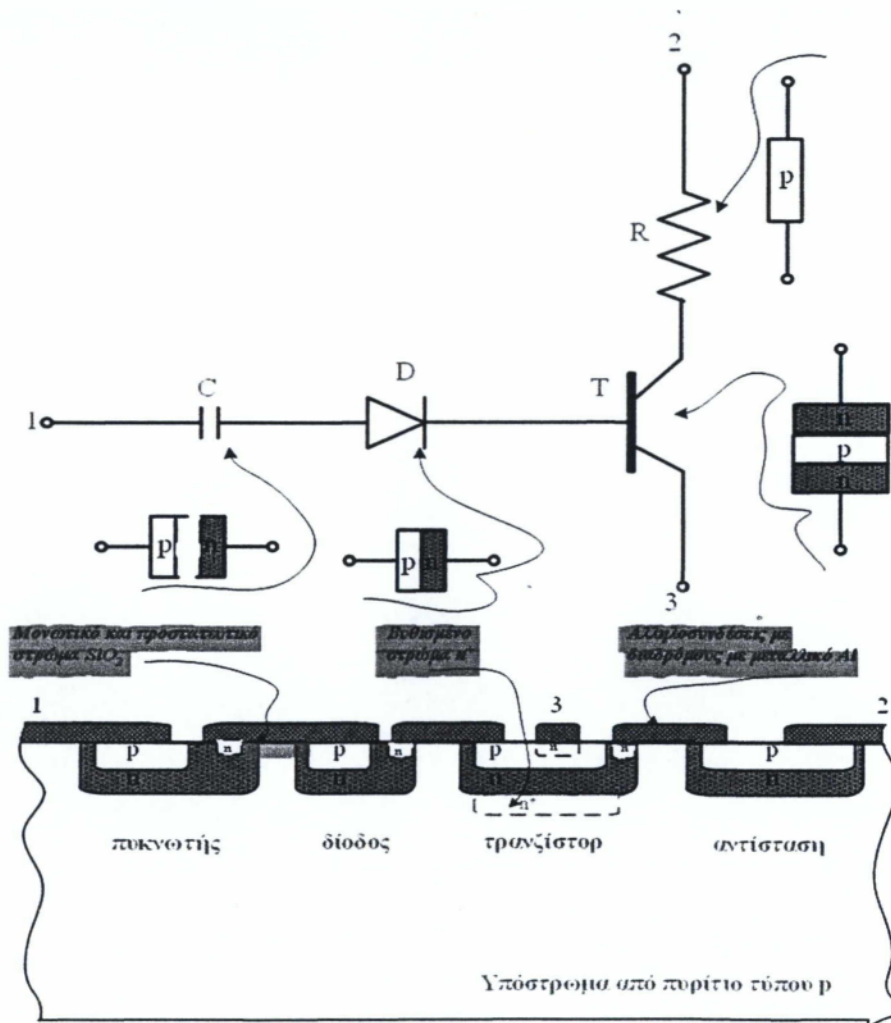
1.6 Κατάταξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

Το ολοκληρωμένο κύκλωμα είναι ένας συνδυασμός διασυνδεδεμένων ηλεκτρονικών στοιχείων – όπως τρανζίστορ, αντιστάσεων διόδων και πυκνωτών, - τα οποία έχουν κατασκευαστεί πάνω στο ίδιο μονοκρυσταλλικό υλικό (υπόστρωμα) με συγκεκριμένα στάδια κατασκευής που δημιουργούν ένα μεγάλο αριθμό συσκευών ταυτόχρονα. Επειδή τα επιμέρους ηλεκτρονικά συστατικά των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων έχουν μικροσκοπικό μέγεθος ονομάζονται συγχρόνως και μικροκυκλώματα.

Τα συμβατικά τυπωμένα κυκλώματα συνίστανται στην συνδεσμολογία διακριτών ηλεκτρονικών συστατικών, καθένα από τα οποία είναι τοποθετημένο σε ανεξάρτητο περίβλημα και επομένως διαφέρουν από τα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

¹¹¹ Σε ό,τι αφορά τη μικροηλεκτρονική τεχνολογία και επιστήμη, μπορεί η χώρα μας να μη βρίσκεται στις πρώτες γραμμές αλλά διαθέτει καλή δυναμική. Το αντικείμενο της μικροηλεκτρονικής είναι από τη φύση του διεπιστημονικό. Αυτό σημαίνει ότι συμμετέχουν επιστήμονες διαφόρων ειδικοτήτων, ο καθένας από τη σκοπιά του.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των μικροκυκλωμάτων είναι το μικρό μέγεθος, η χαμηλή κατανάλωση ισχύος, η μεγαλύτερη ταχύτητα λειτουργίας, το χαμηλό κόστος και βελτιωμένη απόδοση. Επίσης, σημαντικό είναι να προσθέσουμε ότι η σχεδίαση του όλου κυκλώματος απλοποιείται σημαντικά με τη χρήση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, αφού οι περισσότερες από τις απαιτούμενες διασυνδέσεις υπάρχουν ήδη έτοιμες στο εσωτερικό των μικροκυκλωμάτων. Ως αποτέλεσμα των παραπάνω πλεονεκτημάτων, ο κλάδος της μικροηλεκτρονικής είναι αποδεδειγμένα ο περισσότερο αναπτυσσόμενος τομέας της τεχνολογίας γενικότερα.



Σχήμα 1.2

Στο σχήμα 1α φαίνεται ένα συμβατικό κύκλωμα διακριτών στοιχείων που περιλαμβάνει αντίσταση πυκνωτή, δίοδο και τρανζίστορ και στο 1β η κατασκευή του σε ολοκληρωμένη μορφή, όπου όλα τα στοιχεία του καθώς και οι αγώγιμες διασυνδέσεις περιέχονται στην επιφάνεια (βάθους μερικών μm) ενός chip πυριτίου.

Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι ολοκληρωμένων κυκλωμάτων:

1. Τα μονολιθικά ολοκληρωμένα κυκλώματα^{iv}, τα οποία αποτελούνται από ηλεκτρονικά συστατικά που βρίσκονται τοποθετημένα πάνω στο ίδιο υπόστρωμα του ημιαγωγού. Στις περισσότερες περιπτώσεις, το υπόστρωμα είναι μια λεπτή φέτα πυριτίου η οποία έχει αποκοπεί από ένα μεγαλύτερο τμήμα μονοκρυστάλλου. Η τεχνολογία κατασκευής των τρανζίστορ αποτέλεσε την βάση για αρχική ανάπτυξη και κατασκευή μονολιθικών μικροκυκλωμάτων.
2. Τα πολλαπλά ολοκληρωμένα κυκλώματα συνίστανται στη συναρμολόγηση και τοποθέτηση πάνω στο ίδιο υπόστρωμα δύο τουλάχιστον ανεξάρτητων ηλεκτρονικών συστατικών. Τα ανεξάρτητα συστατικά είναι συνήθως μικροκυκλώματα ή μεμονωμένες ηλεκτρονικές συσκευές (π.χ. πυκνωτές). Το υπόστρωμα συμβάλλει στην κατασκευή των αγωγίμων συνδέσεων, ελαχιστοποιώντας το μέγεθος της όλης διάταξης.
3. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα ταινιών κατασκευάζονται πάνω σε κατάλληλο λεπτό επιφανειακό στρώμα και έχουν μονωτικό υπόστρωμα. Συνήθως περιλαμβάνουν παθητικά ηλεκτρονικά συστατικά, όπως συστοιχίες αντιστάσεων και πυκνωτών. Τα κυκλώματα της κατηγορίας αυτής διακρίνονται σε ταινίες μεγάλου πάχους και διαφέρουν στην μέθοδο εναπόθεσης της ταινίας στο μονωτικό υπόστρωμα. Τα μονωτικά υποστρώματα είναι δυνατόν να κατασκευαστούν και από ημιαγωγούς με κατάλληλες προσμίξεις (π.χ. αρσενικούχο γάλλιο με πρόσμιξη χρωμίου)

Πολλές φορές γίνονται συνδυασμοί των κυκλωμάτων προκειμένου να εξοικονομηθεί χώρος. Αρκετά μονολιθικά ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι δυνατόν να συνυπάρχουν με στοιχεία που κατασκευάζονται σε λεπτές ταινίες και είναι τοποθετημένα σε κοινό υπόστρωμα. Το είδος αυτών των κατασκευών είναι γνωστό ως *υβριδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα*.

1.7 Δομή και ιδιότητες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

1.7.1 Τα Μονολιθικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα

Η κατασκευή τους συνίσταται στη διαδοχική και επιλεκτική διαμόρφωση στρωμάτων από διάφορα υλικά με τη χρησιμοποίηση πολύπλοκων κατασκευαστικών σταδίων. Η τελική δομή αποτελεί ένα τρισδιάστατο κύκλωμα αγωγών, μονωτών και κατάλληλα νοθευμένων τμημάτων του ημιαγωγού. Τα διάφορα κατασκευαστικά στάδια δημιουργούν τα επιμέρους ηλεκτρονικά συστατικά, τα οποία χαρακτηρίζονται από την τοπολογική μορφή των στρωμάτων και προκαθορίζονται από την γεωμετρία της μάσκας που χρησιμοποιείται στο κάθε στάδιο της φωτολιθογραφικής χάραξης. Οι μάσκες αυτές είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να δημιουργούν συγκεκριμένες απεικονίσεις στην επιφάνεια του ημιαγωγού, οι οποίες συνδυασμένες με κατάλληλες

^{iv} Η λέξη «μονολιθικό» προέρχεται από την ελληνική *μόνος*, με την έννοια «ενιαία» και *λίθος*, που σημαίνει «πέτρα». Έτσι μονολιθικό κύκλωμα είναι χτισμένο σε μία πέτρα.

χημικές διαδικασίες αποδίδουν το κατάλληλο επιθυμητό ηλεκτρονικό κύκλωμα. Τα θεμελιώδη συστατικά που απαρτίζουν το ολοκληρωμένο κύκλωμα μπορούν να διακριθούν σε διόδους, τρανζίστορ, αντιστάσεις, πυκνωτές, νησίδες απομόνωσης και μεταλλικές διασυνδέσεις. Στη συνέχεια δίνονται μερικά παραδείγματα.

Δίοδοι p-n. Σχεδόν όλες οι συσκευές ημιαγωγών συμπεριλαμβάνουν επαφές στρωμάτων με διαφορετικές προσμίξεις (περιοχές τύπου p και τύπου n). Στους χώρους τύπου n φορείς πλειονότητας είναι τα ελεύθερα ηλεκτρόνια που έχουν αρνητικό φορτίο, ενώ στους χώρους τύπου p φορείς πλειονότητας είναι οι οπές που έχουν θετικό φορτίο. Η περιοχή της επαφής p-n συνιστά μια diόδο και έχει την ιδιότητα να άγει όταν αρνητικό δυναμικό εφαρμοστεί στην περιοχή τύπου n, ενώ παρεμποδίζει τη διέλευση του ηλεκτρικού ρεύματος στην ανάστροφη πόλωση.

Τρανζίστορ. Υπάρχουν δύο είδη τρανζίστορ: το *τρανζίστορ επαφής* ή *διπολικό (bipolar) τρανζίστορ* και το *τρανζίστορ εγκάρσιου πεδίου μονωμένης πύλης* ή *μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού (MOS)*. Στο τρανζίστορ επαφής υπάρχουν δύο διαδοχικές ενώσεις τμημάτων p και n, και έχουν δημιουργηθεί με διάχυση πάνω σε ένα μονοκρυστάλλο ημιαγωγού (συνήθως πυριτίου). Η διαδοχή των στρωμάτων μπορεί να είναι είτε p-n-p είτε n-p-n. Το λιγιστό ρεύμα που διαρρέει το ενδιάμεσο στρώμα (βάση) ελέγχει τη ροή πολύ μεγαλύτερων ρευμάτων μεταξύ των δύο άλλων στρωμάτων (συλλέκτη, εκπομπού).

Στο τρανζίστορ MOS υπάρχουν δύο επαφές p-n μετατοπισμένες κατά μήκος της επιφάνειας. Η μεταξύ τους περιοχή καλύπτεται επιφανειακά από μονωτικό στρώμα, στην επιφάνεια του οποίου έχει εξαχρωθεί μέταλλο το οποίο αποτελεί το ηλεκτρόδιο της πύλης. Κατάλληλο δυναμικό που εφαρμόζεται στο ηλεκτρόδιο αυτό είναι δυνατόν να επάγει φορείς στην επιφάνεια του ημιαγωγού, οπότε δημιουργείται ένας αγωγίμος διάυλος μεταξύ των περιοχών της πηγής και της υποδοχής. Υπάρχουν δύο είδη τρανζίστορ MOS, ανάλογα με τον τύπο του διαύλου (επαγόμενος διάυλος τύπου p και τύπου n). Η τιμή του δυναμικού της πύλης καθορίζει το πάχος του διαύλου, οπότε ελέγχεται και το ρεύμα το οποίο διαρρέει τον διάυλο. 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 τρανζίστορ MOS 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 διπολικών τρανζίστορ, γεγονός που καθιστά την MOS τεχνολογία πολύ ελκυστική για κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Παθητικά στοιχεία. Οι ημιαγωγοί χρησιμοποιούνται συχνά για την κατασκευή αντιστάσεων. Στα μικροκυκλώματα η απλούστερη μορφή αντίστασης υλοποιείται με την κατασκευή μαιανδρικού διαύλου διάχυσης τύπου p ή n σε υπόστρωμα τύπου n ή p, αντίστοιχα. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας του κυκλώματος εξασφαλίζεται η ανάστροφη πόλωση της diόδου που δημιουργείται μεταξύ του διαύλου της αντίστασης και του υποστρώματος, οπότε όλο το ρεύμα ρέει δια μέσου της αντίστασης. Άλλες κατασκευαστικές δομές είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για αντιστάσεις μεγάλης τιμής που καταλαμβάνουν μικρές επιφάνειες, σε ορισμένες

περιπτώσεις, οι αντιστάσεις εναποτίθενται υπό μορφή λεπτού στρώματος επιφάνειας των μονολιθικών κυκλωμάτων.

Οι πυκνωτές των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων διακρίνονται για τη μικρή τιμή της χωρητικότητάς τους, λόγω του μικρού διαθέσιμου εμβαδού επιφάνειας των μικροκυκλωμάτων. Ο τυπικός πυκνωτής έχει ένα μεταλλικό ηλεκτρόδιο, το οποίο διαχωρίζεται από τον ημιαγωγό με διηλεκτρικό αντίστοιχο με αυτό που υπάρχει στην περιοχή της πύλης των MOS τρανζίστορ. Επίσης, επαφές p-n σε ανάστροφη πόλωση εμφανίζουν σημαντική χωρητικότητα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν πυκνωτές.

Τα πηνία (αυτεπαγωγές) είναι πολύ δύσκολο να κατασκευαστούν σε μικρούς όγκους και αποφεύγονται συστηματικά με κατάλληλη σχεδίαση του κυκλώματος.

Οι διασυνδέσεις συνήθως δημιουργούνται στο τελευταίο κατασκευαστικό στάδιο με την μέθοδο της εξάχνωσης του μετάλλου στην επιφάνεια του μικροκυκλώματος και της επιλεκτικής απομάκρυνσής του με χρήση φωτολιθογραφικής μεθόδου. Σε συγκεκριμένες πολύπλοκες κατασκευές οι αγωγιμες συνδέσεις που ενώνουν τα διάφορα συστατικά των μικροκυκλωμάτων βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα μεταξύ των οποίων παρεμβάλλεται κατάλληλο μονωτικό υλικό.

Η μόνωση μεταξύ των διακριτών συστατικών του ολοκληρωμένου κυκλώματος επιτυγχάνεται είτε με αναστροφή πολωμένη δίοδο p-n είτε με την ύπαρξη διηλεκτρικού στην περιοχή του κυκλώματος. Στην περίπτωση των MOS τρανζίστορ οι συσκευές αυτο-μονώνονται κατά τη λειτουργία, δεδομένου ότι οι περιοχές της πηγής και της υποδοχής σχηματίζουν διόδους ανάστροφης πόλωσης με υπόλοιπο τμήμα του ημιαγωγού. Για τους λόγους αυτούς η κατασκευή των MOS είναι πολύ απλή και επιδέχεται μεγάλη πυκνότητα δόμησης.

1.7.2 Τα Ολοκληρωμένα Κυκλώματα σε ταινίες

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα ταινιών μικρού πάχους εναποτίθενται πάνω σε μονωτικά υποστρώματα (π.χ. γυαλί, κεραμικά υλικά) με διάφορες κατασκευαστικές μεθόδους. Τα απλούστερα κυκλώματα περιλαμβάνουν μόνο συστοιχίες πυκνωτών, αντιστάσεων, καθώς και μεταξύ τους διασυνδέσεις. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα των κυκλωμάτων αυτών είναι η αδυναμία κατασκευής ενεργών στοιχείων, όπως είναι το τρανζίστορ. Για τον λόγο αυτό, τα μονολιθικά και τα υβριδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα κυριαρχούν στις διάφορες κατασκευές. Τα μονολιθικά ολοκληρωμένα κυκλώματα πολλές φορές συνεργάζονται με κυκλώματα ταινιών για εξαιρετικά πολύπλοκες κατασκευές και επιτυγχάνεται μεγάλη εξοικονόμηση χώρου.

Στα κυκλώματα ταινιών μεγάλου πάχους χρησιμοποιούνται ειδικές χρωστικές ουσίες, προκειμένου να εκτυπωθούν τα απαραίτητα συστατικά στην επιφάνεια ενός κατάλληλου υποστρώματος. Εξακολουθεί θέρμανση σε υψηλή θερμοκρασία, οπότε διαμορφώνονται οι αντιστάσεις, οι αγωγιμες διασυνδέσεις και τα ενδιάμεσα μονωτικά στρώματα, τα οποία έχουν ελάχιστη διάσταση πλάτους της τάξης των 100 μm (σε αντίθεση με τα κυκλώματα ταινιών μικρού πάχους, στα οποία η ελάχιστη διάσταση έχει πλάτος της τάξης των 10 μm).

Τα κυκλώματα ταινιών εμφανίζουν το μεγάλο πλεονέκτημα ότι αποδέχονται ρυθμίσεις και μεταβολές, ώστε οι τιμές των αντιστάσεων να είναι ακριβώς οι απαιτούμενες από τον κατασκευαστή. Αυτό επιτυγχάνεται με τμηματική απομάκρυνση ενός τμήματος της ταινίας που αποτελεί την συγκεκριμένη αντίσταση,

και με την επακριβή καταμέτρηση της παραμένουσας αντίστασης. Η απόξεση της ταινίας είναι δυνατόν να γίνει με λέιζερ ή άλλες μεθόδους.

1.7.3 Τα Υβριδικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα

Η τεχνολογία κατασκευής ταινιών αξιοποιείται κυρίως στα υβριδικά κυκλώματα. Εδώ τα κυκλώματα των ταινιών χρησιμοποιούνται ως βοηθητικά μέρη άλλων μικροκυκλωμάτων και περιέχουν μόνο τα παθητικά στοιχεία. Έτσι, τα υβριδικά κυκλώματα έχουν παθητικά στοιχεία ακριβείας τα οποία θα ήταν πολύ δύσκολο να συμπεριληφθούν στα μονολιθικά κυκλώματα.

Ιδιαίχοντα προβλήματα των υβριδικών ή πολλαπλών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων εμφανίζονται τόσο στο στάδιο της τοποθέτησής τους σε ένα κοινό υπόστρωμα όσο και στην κατασκευή των απαραίτητων αγωγίμων συνδέσεων. Όμως, τα βασικά πλεονεκτήματα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (μικρό μέγεθος, μικρό βάρος, χαμηλό κόστος κατασκευής) ισχύουν κατεξοχήν για τα υβριδικά κυκλώματα και κατά συνέπεια αυτός ο τύπος κυκλωμάτων βρίσκει πολλαπλές εφαρμογές σε πολύπλοκα ηλεκτρονικά κυκλώματα.

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα με υμένα ή αλλιώς τα υβριδικά κυκλώματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τα υβριδικά κυκλώματα με παχέα υμένα και τα υβριδικά κυκλώματα με λεπτά υμένα.

Τα υβριδικά κυκλώματα με παχέα υμένα βασίζονται σε μια πολύ απλή τεχνολογία κατά την οποία πάνω σε μια πλακέτα απλώνουμε διάφορες πάστες με διαφορετική σύνθεση. Αυτές οι πάστες είναι ο λόγος δημιουργίας συνδέσεων μεταξύ των στοιχείων, των οπλισμών των πυκνωτών και οι έξοδοι προς τους αποδέκτες του περιβλήματος. Η τεχνολογία αυτή είναι πολύ προσιτή λόγω χαμηλού κόστους και απλότητας. Επίσης η διαδικασία απόθεσης των παστών έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία στοιβάδων με πάχος μεταξύ 50 και 100μm (γι' αυτό άλλωστε λέγονται και υβριδικά ολοκληρωμένα κυκλώματα με παχέα υμένα).

Η δεύτερη κατηγορία που διακρίνονται τα Υβριδικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα, είναι αυτά με λεπτά υμένα. Η τεχνολογία που χρησιμοποιούν είναι πολύ πιο πολύπλοκη από αυτή των υβριδικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων με παχέα υμένα και ο εξοπλισμός δεν είναι τόσο οικονομικός. Στην τεχνολογία στην οποία στηρίζονται τα υβριδικά κυκλώματα με λεπτά υμένα, οι στοιβάδες αποτίθενται πάνω στο υπόστρωμα από την αέρια φάση, με αποτέλεσμα να μην παίρνουν αμέσως το τελικό τους πάχος, αλλά να αναπτύσσονται βαθμιαία. Κάθε στοιβάδα είναι σχεδιασμένη με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το διάφραγμα, πάνω στο υπόστρωμα ή πάνω στην μάσκα, να παίζει καθοριστικό ρόλο. Τέλος, θα πρέπει να εξασφαλίσουμε ικανοποιητική καθαρότητα, ώστε τα άτομα ή τα μόρια του αερίου να περνάνε ελεύθερα από την πηγή προς το υπόστρωμα.

1.8 Λειτουργίες και χαρακτηριστικά των Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, που λειτουργούν σε μια ευρεία κλίμακα συχνοτήτων η οποία εκτείνεται από το συνεχές ρεύμα μέχρι τα μικροκύματα, βρίσκουν εφαρμογή κατά κύριο λόγο στην επεξεργασία σημάτων και στα κυκλώματα διακοπών των ψηφιακών υπολογιστών. Στις εφαρμογές αυτές είναι απαραίτητη η αντιδιαστολή μεταξύ δύο διακριτών καταστάσεων που παριστάνουν το λογικό «0» και «1» ή τις καταστάσεις «ανοιχτό» και «κλειστό». Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες ολοκληρωμένων κυκλωμάτων των οποίων η κατασκευή είναι κατάλληλη για ψηφιακή λογική. Η κάθε κατηγορία διακρίνεται από την ίδια τάση τροφοδοσίας και τις ίδιες διακριτές τάσεις που αντιστοιχούν στα λογικά «0» και «1». Τα κυκλώματα της κάθε κατηγορίας είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν από απλές λειτουργίες πυλών μέχρι πολύπλοκες μαθηματικές συναρτήσεις, οπότε ανάλογα με την πυκνότητα των διακριτών συστατικών διαχωρίζονται στα μεσαίας κλίμακας (LSI) (Large Scale Integration) και πολύ μεγάλης κλίμακας (VLSI)^γ ολοκληρωμένα κυκλώματα (τα VLSI περιλαμβάνουν συνήθως πάνω από 1000 λογικές πύλες).

Μια λογική ομάδα λογικών συναρτήσεων χρησιμοποιεί τα MOS τρανζίστορ. Ένα πλήρες λογικό κύκλωμα είναι δυνατόν να απαρτίζεται από MOS-LSI ή MOS-VLSI ολοκληρωμένα κυκλώματα. Επειδή τα μικρά MOS τρανζίστορ έχουν περιορισμένη δυνατότητα ελέγχου εξωτερικών φορτίων, είναι σημαντική η ελαχιστοποίηση του αριθμού των τρανζίστορ τα οποία τροφοδοτούν τις εξωτερικές διασυνδέσεις του κυκλώματος. Οι εξωτερικές διασυνδέσεις απολήγουν σε συσκευές MOS μεγάλης επιφάνειας, οι οποίες είναι σε θέση να άγουν τα μεγάλα εξωτερικά φορτία. Για συγκεκριμένες κατασκευές οι διάφορες λειτουργίες ολοκληρώνονται με τη χρησιμοποίηση ενός μικρού ποσοστού των συστατικών που υπάρχουν στο ολοκληρωμένο κύκλωμα. Αυτό ήταν η αιτία για την κατασκευή ειδικών κυκλωμάτων LSI, τα οποία έχουν τη δυνατότητα να διαμορφώνονται στο τελικό στάδιο της επιμετάλλωσης, ώστε να ικανοποιούν τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του κάθε πελάτη. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα της τεχνολογίας MOS-LSI είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και η υψηλή πυκνότητα δόμησης, η οποία οφείλεται κυρίως στην ευκολία μόνωσης των επιμέρους συστατικών κάθε κυκλώματος.

Στα αναλογικά κυκλώματα, όπως στα κυκλώματα ενισχυτικών διατάξεων, λαμβάνεται υπόψη η ακριβής τιμή του σήματος. Τα μονολιθικά ολοκληρωμένα κυκλώματα αναπτύχθηκαν με πολύ βραδύτερο ρυθμό από ότι τα ψηφιακά λόγω των περιορισμών που υπεισέρχονται κατά την ολοκλήρωσή τους. Τα συμβατικά αναλογικά κυκλώματα περιλαμβάνουν μια μεγάλη ποικιλία από στοιχεία κυκλωμάτων, όπως τρανζίστορ, αντιστάσεις υψηλής τιμής, συσκευές υψηλής τάσης και άλλα διάφορα συστατικά υψηλής ακρίβειας τα οποία είναι πολύ δύσκολο να ολοκληρωθούν.

Το μεγάλο πλεονέκτημα των αναλογικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι η διασφάλιση της ίδιας θερμοκρασίας όλων των συστατικών του μικροκυκλώματος. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, γιατί οι ηλεκτρικές παράμετροι των ενεργών και παθητικών στοιχείων εξαρτώνται κατά μεγάλο ποσοστό από τη θερμοκρασία, με

^γ Ο όρος VLSI αναφέρεται σε μια τεχνολογία μέσω της οποίας είναι πιθανό να υλοποιήσουμε μεγάλα κυκλώματα σε πυρίτιο- κυκλώματα με πάνω από ένα εκατομμύριο τρανζίστορ. Η σημερινή τεχνολογία μας επιτρέπει να φτιάξουμε ολοκληρωμένα μικροσυστήματα σε ένα μοναδικό chip

αποτέλεσμα να αποφεύγονται τα προβλήματα που δημιουργούνται συχνά στα κλασικά τυπωμένα κυκλώματα, στα οποία το κάθε ηλεκτρονικό συστατικό παραμένει ανεξάρτητο και βρίσκεται σε διαφορετική θερμοκρασία. Επίσης, στην περίπτωση των μονολιθικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, είναι δυνατή η ακριβής τήρηση των αναλογιών των τιμών των αντιστάσεων σε συνάρτηση με την μεταβολή της θερμοκρασίας παρόλο που οι απόλυτες τιμές τους μεταβάλλονται.

Μια ακόμα σημαντική διαφορά στη σχεδίαση των αναλογικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, είναι η δυνατότητα κατασκευής ενεργών συστατικών, π.χ. τρανζίστορ με πολύ μικρότερο κόστος από εκείνο που απαιτείται για την κατασκευή αντιστάσεων και πυκνωτών. Έτσι σχεδιασμοί αναλογικών κυκλωμάτων οι οποίοι παλιότερα ήταν ασύμφοροι, λόγω του μεγάλου αριθμού των ενεργών συστατικών, είναι πλέον εύκολο να υλοποιηθούν με τη χρησιμοποίηση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.



Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

Ανάπτυξη κρυστάλλων
πυριτίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΡΥΣΤΑΛΛΩΝ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Μετά το οξυγόνο, το πυρίτιο είναι το πιο άφθονο υλικό στη γη. Αλλά ορισμένα προβλήματα εξευγενισμού δεν επέτρεψαν την χρήση του πυριτίου τις πρώτες μέρες των ημιαγωγών. Αφού λύθηκαν αυτά τα προβλήματα, τα πλεονεκτήματα του πυριτίου το έκαναν αμέσως τον ημιαγωγό επιλογής. Χωρίς το πυρίτιο, τα μοντέρνα ηλεκτρονικά, οι επικοινωνίες και οι υπολογιστές δεν θα υπήρχαν. Το πυρίτιο είναι χημικό στοιχείο αμέταλλο. Στη φύση συναντάται με μορφή ενώσεων. Απομονώθηκε για πρώτη φορά από τον Μπερζέλιους το 1823 ως άμορφο. Το 1854 ο Σάιντ Κλέρ Ντεβίλ πέτυχε την παρασκευή του κρυσταλλικού πυριτίου, το οποίο βρίσκεται στη φύση ενωμένο πάντα με το οξυγόνο (διοξείδιο) με την άμμο της θάλασσας και τον χαλαζία. Όπως προαναφέραμε, η κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (Ο.Κ.) υψηλών επιδόσεων και πυκνότητας ολοκλήρωσης βασίζεται στη χρησιμοποίηση ημιαγωγικών μονοκρυσταλλικών δισκιδίων (wafers) υψηλής ποιότητας. Οι πρώτες κρυσταλλικές διατάξεις (δεκαετία 50) κατασκευάστηκαν με Ge, το οποίο όμως λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας και του προβληματικού του οξειδίου αντικαταστάθηκε σύντομα από το Si. Το Si παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα (υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας, πολύ καλό οξείδιο, χαμηλό κόστος κ.α.) τόσο έναντι του Ge όσο και έναντι των άλλων ημιαγωγών

Συγκριτικά στοιχεία πυριτίου – γερμανίου

ημιαγωγός	E_g (eV)	Θερμοκρασία λειτουργίας Βαθμοί Κελσίου	Θερμικό οξείδιο	Ενδογενής αντίσταση	Κόστος
Πυρίτιο Si	1.12	150	Πολύ καλό	230 kΩ cm	1
Γερμάνιο Ge	0.66	100	καλό	47 Ω cm	10

Πίνακας 2.1

2.1 Η κρυσταλλική δομή του Πυριτίου

Το πυρίτιο είναι το χημικό στοιχείο με χημικό σύμβολο Si, ατομικό αριθμό 14 και ατομική μάζα 28,0855 amu. Είναι ένα μεταλλοειδές που ανήκει στην ομάδα IVA (14) του περιοδικού πίνακα μαζί με τον Άνθρακα, το Γερμάνιο, τον Κασσίτερο και τον Μόλυβδο. Αυτό σημαίνει ότι έχει τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα και είναι τετρασθενές και ηλεκτροθετικότερο από τον άνθρακα. Είναι το όγδοο (8ο) κατά σειρά αφθονίας μάζας στοιχείο στο σύμπαν και δεύτερο στο φλοιό της Γης, αποτελώντας συγκεκριμένα το 25,7% της μάζας του, όπου όμως σπάνια βρίσκεται σε ελεύθερη στοιχειακή κατάσταση. Η πιο συνηθισμένη μορφή του στη διαστρική

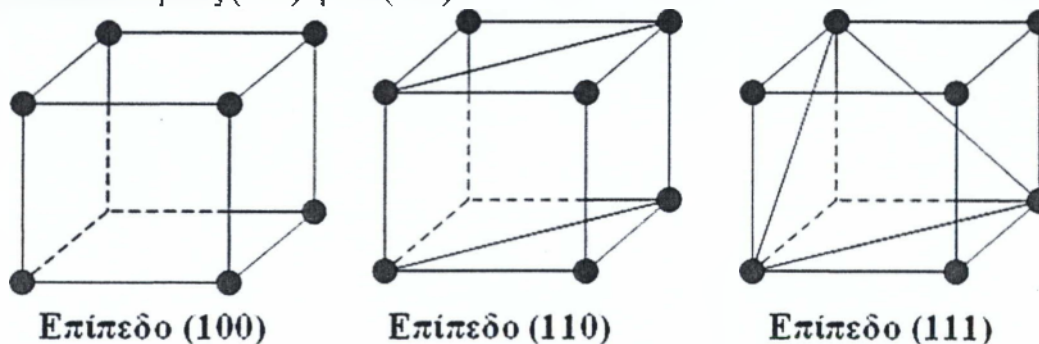
σκόνη, σε αστεροειδείς, δορυφόρους και πλανήτες είναι το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και διάφορες πυριτικές ενώσεις.

Πίνακας 2.2

Το πυρίτιο και οι ενώσεις του έχουν πολλές βιομηχανικές χρήσεις. Το ίδιο το πυρίτιο είναι κύριο συστατικό των περισσότερων ημιαγωγικών συστημάτων και των μικροτσιπ. Οι ημιαγωγικές ιδιότητες των ημιαγωγών πυριτίου παραμένουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες σε σύγκριση με των αντίστοιχων του γερμανίου. Ακόμη, το φυσικό του οξείδιο είναι πιο εύχρηστο και έτσι σχηματίζεται καλύτερο ζεύγος ημιαγωγών - διηλεκτρικών σε σχέση με κάθε άλλο γνωστό υλικό. Ακόμη, στη μορφή του χαλαζία και διαφόρων πυριτικών ενώσεων σχηματίζει χρήσιμα υαλικά, τσιμέντα και κεραμικά προϊόντα. Είναι ακόμη ένα κύριο συστατικό των σιλικονών, μια τάξη πολυμερών που περιέχουν πυρίτιο, άνθρακα, οξυγόνο και υδρογόνο (με γενικό τύπο $[\text{R}_2\text{SiO}]_n$, όπου R μονοσθενής οργανική ρίζα και όχι αποκλειστικά αλκύλιο).

Όσον αφορά την κρυσταλλική δομή του πυριτίου τα κρυσταλλογραφικά επίπεδα παρίστανται σε ένα σύστημα ορθογωνίων αξόνων από τους δείκτες Miller, οι οποίοι ορίζονται σαν τα αντίστροφα των τομών του επιπέδου με τους κύριους άξονες, κανονικοποιημένα για να είναι οι δείκτες ακέραιοι αριθμοί.

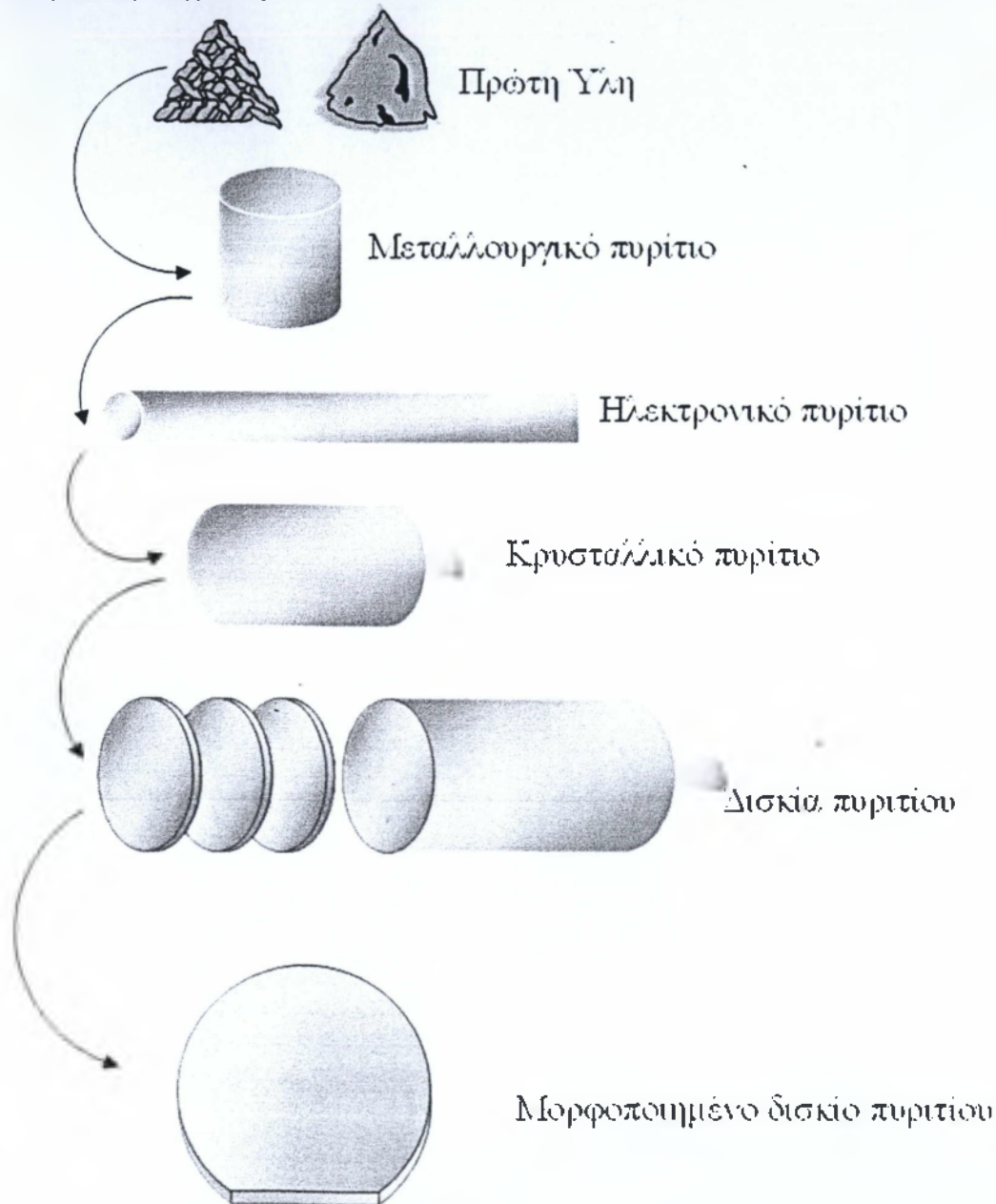
Λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζει ένα κυβικό κρυστάλλου, τα επίπεδα παρίστανται από τα (100), (010), (001), (0-10) και (00-1) και είναι ισοδύναμα. Σε όλες σχεδόν τις διατάξεις χρησιμοποιείται πυρίτιο με κρυσταλλογραφικούς προσανατολισμούς (111) ή και (100).



Σχήμα 2.1
Δείκτες Miller

Ο προσδιορισμός του προσανατολισμού ενός κρυστάλλου πυριτίου γίνεται κατά κύριο λόγο με 2 μεθόδους: τις οπτικές μεθόδους και τις μεθόδους περίθλασης με ακτίνες X, όπου και προτιμάται. Από αυτό καταλαβαίνουμε πως η κρυσταλλική δομή δεν είναι ορατή με το γυμνό μάτι, γιατί αρκετές ουσίες αποτελούνται από κρυσταλλίτες (μικροσκοπικά κομμάτια ύλης που το καθένα είναι ένας τέλειος κρύσταλλος), οι οποίοι σχηματίζουν συσσωματώματα με τυχαίους προσανατολισμούς. Οι κρυσταλλικές μορφές σε πολλά από αυτά τα πολύκρυσταλλικά υλικά αναγνωρίζονται μόνο με τη χρήση περίθλασης ακτινών X

από δείγμα κρυσταλλικής κόνεως. Στην τεχνική αυτή, οι χαρακτηριστικές αποτυπώσεις πάνω σε ένα φιλμ ακτίνων Χ αποτελούν «δακτυλικά αποτυπώματα», τα οποία επιτρέπουν τον προσδιορισμό ενός ορυκτού συστατικού από ένα πολύ μικρό δείγμα. Σήμερα, είναι διαθέσιμο ένα πολύ μεγάλο αρχείο τέτοιων διαγραμμάτων, το οποίο χρησιμοποιείται για να αντιπαραβάλλονται τα διαγράμματα κάθε ιδιαίτερου υπό μελέτη δείγματος.



Σχήμα 2.2

Διαδικασία παραγωγής κρυσταλλικού πυρίτιου

Φυσικές ιδιότητες

Το πυρίτιο απαντά σε δύο μορφές: Μια άμορφη και μια κρυσταλλική. Το κρυσταλλικό πυρίτιο έχει μεταλλική λάμψη, είναι σκληρό και έχει σκούρο γκρι χρώμα. Είναι στερεό σε θερμοκρασία δωματίου και δεν είναι ούτε ελατό ούτε όλκιμο.

Είναι ημιαγωγός και την ιδιότητα αυτή διατηρεί ακόμη και σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες. Δεν είναι καλός αγωγός της θερμότητας.

2.2 Παρασκευή πυριτίου ηλεκτρονικού τύπου

Για την παρασκευή μονοκρυσταλλικών δισκίων Si, ως πρώτη ύλη χρησιμοποιείται πολυκρυσταλλικό Si υψηλής καθαρότητας (> 99%) το οποίο καλείται **Ηλεκτρονικό πυρίτιο (Electronic Grade Si: EGS)**. Η παρασκευή του EGS απαιτεί διαδοχικά στάδια καθαρισμού του υλικού ξεκινώντας από την αρχική πρώτη ύλη χαλαζία (SiO₂). Τα στάδια αυτά συνοψίζονται ως εξής:

α) Παρασκευή πυριτίου μεταλλουργικού τύπου (MGS).

Γίνεται σε φούρνους ηλεκτρικού τόξου με αρχικά υλικά χαλαζία και άνθρακα σύμφωνα με τη συνολική αντίδραση:

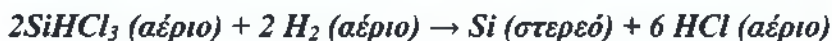


Το μεταλλουργικό Si δεν είναι ικανοποιητικό για την κατασκευή ηλεκτρονικών διατάξεων καθώς η καθαρότητά του δεν ξεπερνά το 98%, γι' αυτό ακολουθεί νέο στάδιο καθαρισμού.

β) Παρασκευή τριχλωροσιλάνης SiHCl₃ με επίδραση HCl σε κονιορτοποιημένη Si σύμφωνα με την αντίδραση:



γ) Παρασκευή ηλεκτρονίων Si υψηλής καθαρότητας. Από το αέριο SiHCl₃, με τη μέθοδο της χημικής εναπόθεσης από αέρια φάση (ΧΕΑ ή CVD), παρασκευάζεται το ηλεκτρονικό πυρίτιο (EGS) υψηλής καθαρότητας σύμφωνα με την αντίδραση:



Απλούστερη διαδικασία και χαμηλότερου κόστους είναι η μέθοδος της χημικής εναπόθεσης από αέρια φάση (CVD) κατά την οποία το EGS παρασκευάζεται αποπυρόλυση της σιλάνης SiH₄ σε υψηλή θερμοκρασία (~1000 °C):



2.3 Ατέλειες στους κρυστάλλους

Οι κρύσταλλοι δεν είναι πάντα τέλειοι. Οι ατέλειες μπορεί να προκληθούν από παραμόρφωση του στερεού, ταχεία ψύξη από υψηλή θερμοκρασία ή προσβολή του στερεού από ακτινοβολία υψηλής ενέργειας (ακτίνες X ή νετρόνια). Οι δομικές αυτές ατέλειες απαντούν σε μεμονωμένα σημεία, κατά μήκος γραμμών ή πάνω σε

ολόκληρες επιφάνειες του στερεού και επηρεάζουν τις μηχανικές, ηλεκτρικές και οπτικές του ιδιότητες. Στις σημειακές δομικές ατέλειες, που έχουν τάξη μεγέθους ίση με αυτή του ατόμου, περιλαμβάνονται ο τύπος Φρένκελ (Frenkel), ο τύπος Σότκυ (Schottky) και ο τύπος των προσμίξεων. Η ατέλεια Φρένκελ αναφέρεται σε μεμονωμένα ιόντα, τα οποία απομακρύνονται από την κανονική θέση τους στο κρυσταλλικό πλέγμα και καταλαμβάνουν ένα γειτονικό κενό- «οπή» μεταξύ ατόμων του πλέγματος. Στην ατέλεια Σότκυ, δύο ιόντα διαφορετικού φορτίου εγκαταλείπουν το πλέγμα. Στις ατέλειες των προσμίξεων, ξένα άτομα αντικαθιστούν μερικά άτομα του υλικού ή εισχωρούν στα κενά διαστήματα μεταξύ των ατόμων του πλέγματος. Οι ατέλειες αυτές είναι σημαντικές για την ηλεκτρική αγωγιμότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται στα τρανζίστορ.

Οι γραμμικές ατέλειες ή εξαρμώσεις είναι γραμμές κατά μήκος των οποίων ολόκληροι στοίχοι (σειρές) ατόμων ενός στερεού διατάσσονται ακανόνιστα. Η διατάραξη των αποστάσεων μεταξύ των ατόμων που προκύπτει είναι εντονότερη κατά μήκος μιας γραμμής που ονομάζεται γραμμή εξάρμωσης. Οι γραμμικές ατέλειες ενισχύουν ή και εξασθενούν τα υλικά.

Οι επιφανειακές ατέλειες εμφανίζονται στα όρια μεταξύ δύο κόκκων οι κρυσταλλινών μέσα σε ένα μεγαλύτερο κρύσταλλο. Οι στοίχοι των ατόμων σε δύο διαφορετικούς κόκκους μπορεί να έχουν ελαφρά διαφορετικό προσανατολισμό δημιουργώντας έτσι μια ανωμαλία κατά μήκος των ορίων επαφής των κόκκων. Η εξωτερική επιφάνεια ενός κρυστάλλου είναι και η ίδια μια επιφανειακή ατέλεια, αφού τα άτομά της τροποποιούν τη θέση τους έτσι ώστε να αντισταθμίσουν την απουσία γειτονικών ατόμων έξω από την επιφάνεια.

Η παραγωγή μεγάλων μονοκρυστάλλων χωρίς κόκκους κρυσταλλινών απαιτεί συγκριτικά αργούς ρυθμούς σχηματισμού. Σε όλους τους κρυστάλλους εμφανίζονται, όμως, σε κάποιο βαθμό μικρές δομικές ατέλειες. Αυτές μπορεί να είναι απωλεσθέντα άτομα ή κενές πλεγματικές θέσεις ή ξένα άτομα που κατέχουν θέσεις του κρυσταλλικού πλέγματος, οι οποίες έπρεπε να είναι κατειλημμένες από άτομα όμοια με αυτά των υπόλοιπων ανάλογων θέσεων του κρυστάλλου.

Εκτός από τις παραπάνω ατομικές ή σημειακές ατέλειες, οι κρύσταλλοι μπορεί να παρουσιάζουν και πιο εκτεταμένες γραμμικές ατέλειες, στις οποίες η αταξία ή εξάρμωση, δηλαδή η ολίσθηση τμήματος του κρυστάλλου, γίνεται κατά μήκος μιας γραμμής ή ενός επιπέδου από άτομα. Οι γραμμικές ατέλειες είναι δύο κυρίως ειδών: οι κατ' ακμήν εξαρμώσεις και οι κοχλιοειδής εξαρμώσεις. Η ατέλεια αυτή μπορεί να θεωρηθεί αποτέλεσμα της προσθήκης ενός ακόμα επιπέδου ατόμων, $ABB'A'$, στο πάνω μισό του κρυστάλλου. Κάτω από προσεχτικό έλεγχο, υλικά όπως το πυρίτιο και το γερμάνιο ή και ο χαλαζίας, έχουν αναπτυχθεί με τη μορφή κρυστάλλου χωρίς εξαρμώσεις, αλλά οι θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν ότι όλοι οι κρύσταλλοι παρουσιάζουν κενές πλεγματικές θέσεις, εκτός αν βρίσκονται στη θερμοκρασία του απόλυτου μηδενός (-273°C περίπου).

Είναι πραγματικότητα πως όσο ταχύτερος είναι ο ρυθμός ανάπτυξης ενός κρυστάλλου και όσο λιγότερο καθαρό είναι το περιβάλλον ανάπτυξής του τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός και η ποικιλία των ατελειών που αποκτά ο κρύσταλλος. Στους σχετικά τέλειους κρυστάλλους, ο απροσανατολισμός μεταξύ γειτονικών κόκκων υπάρχει περίπτωση να μην εντοπιστεί εύκολα (αυτό παρατηρείται όταν οι μόνες ατέλειες που υπάρχουν είναι οι σημειακές και οι εξαρμώσεις), αλλά, καθώς και οι δυσμενείς συνθήκες εντοπισμού εντείνονται, οι προσανατολισμοί αυξάνονται ως το σημείο σχηματισμού μιας πολυκρυσταλλικής μάζας.

2.4 Καθαρισμός υλικού

Το γερμάνιο υπάρχει στη φύση σαν πρόσμιξη χαμηλού ποσοστού στα ορυκτά ψευδαργύρου και χαλκού. Εξάγεται με χημικές διαδικασίες από τη μορφή διοξειδίου του γερμανίου και στη συνέχεια θερμαίνεται παρουσία υδρογόνου, όποτε αποδεσμεύεται καθαρό γερμάνιο.

Στο εμπόριο, το γερμάνιο βρίσκεται σε μορφή ράβδων διαμέτρου πέντε εκατοστόμετρων και μήκος περίπου δεκαπέντε εκατοστόμετρων. Για ηλεκτρονική χρήση το υλικό χρειάζεται περαιτέρω καθαρισμό. Ο καθαρισμός αυτός βασίζεται στην ιδιότητα των προσμίξεων να είναι πιο διαλυτές στα υγρά παρά στην στερεή κατάσταση. Ο βιομηχανικός τρόπος καθαρισμού συνίσταται στη μέθοδο της τετηγμένης ζώνης. Το τελικό προϊόν περιέχει λιγότερο από ένα άτομο πρόσμιξης ανά 10^{12} άτομα καθαρού γερμανίου ή πυριτίου.

Το πυρίτιο είναι ένα από τα πιο κοινά στοιχεία που υπάρχουν στην επιφάνεια της γης, αφού περιέχεται στην άμμο, σε μορφή διοξειδίου του πυριτίου καθώς και σε μορφή κραμάτων. Επίσης, υπάρχει ως παράγωγο της χημικής διαδικασίας παρασκευής σιλικόνης υπό μορφή τετραχλωριούχου πυριτίου SiCl_4 και τριχλωροσιλανίου SiHCl_3 .

Η βιομηχανική μέθοδος παρασκευής καθαρού πυριτίου βασίζεται στην εξαγωγή του από το SiHCl_3 λόγω της εύκολης εξάλειψης των ακαθαρσιών φωσφόρου και βορίου, οι οποίες τουλάχιστον στο στάδιο αυτό είναι ανεπιθύμητες. Το SiHCl_3 καθαρίζεται με απόσταξη σε θερμοκρασία 32°C μέσα σε θαλάμους από κρύσταλλο χαλαζία και στη συνέχεια διαχωρίζεται σε καθαρό πυρίτιο με θέρμανση παρουσία υδρογόνου.

Η μέθοδος τετηγμένης ζώνης έχει αποδειχτεί ακατάλληλη για τον καθαρισμό του πυριτίου, λόγω του υψηλού σημείου τήξης (1.420°C) και της ευκολίας με την οποία το υγρό πυρίτιο διαλύει τις διάφορες ακαθαρσίες. Εξάλλου, το βόριο δεν μπορεί να αφαιρεθεί με τη μέθοδο της τετηγμένης ζώνης, γιατί εμφανίζει την ίδια διαλυτότητα τόσο στο στερεό όσο και στο υγρό πυρίτιο.

2.5 Ανάπτυξη κρυστάλλου

Η επιτυχής κατασκευή διατάξεων ημιαγωγών εξαρτάται όχι μόνο από την καθαρότητα του υλικού αλλά και την κανονικότητα της κρυσταλλικής δομής του. Τα άμορφα και πολυκρυσταλλικά υλικά εμφανίζουν μειωμένη ευκινησία φορέων καθώς και μικρό χρόνο ανασύνδεσης των φορέων, με αποτέλεσμα να είναι ακατάλληλα για ηλεκτρονικές εφαρμογές. Τα περισσότερα υλικά που αναφέρονται ως «κρύσταλλοι», στην πράξη αποτελούνται από πολλούς μικρούς κρυστάλλους με διαφορετικό μέγεθος, σχήμα και προσανατολισμό. Τα υλικά αυτά είναι πολυκρυσταλλικά.

Συγκεκριμένα, το ηλεκτρονικό πυρίτιο (EGS) που παρασκευάζεται με τη μέθοδο που αναπτύχθηκε προηγουμένως έχει πολυκρυσταλλική δομή, αποτελείται δηλαδή από πολλές μικρές κρυσταλλικές περιοχές (κόκκους) με αποτέλεσμα τη μειωμένη ευκινησία των ελευθέρων φορέων. Για την κατασκευή ημιαγωγικών διατάξεων ή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι απαραίτητη η παραγωγή μονοκρυσταλλικού Si με προκαθορισμένη συγκέντρωση και τύπο προσμίξεων (n ή p) σε μορφή δισκιδίων που αποτελούν την πρώτη ύλη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Οι

χρησιμοποιούμενες τεχνικές εξασφαλίζουν υψηλή ποιότητα κρυσταλλικού Si κυρίως σε μορφή ράβδων ή λεπτών στρωμάτων σε επιλεγμένα υποστρώματα.

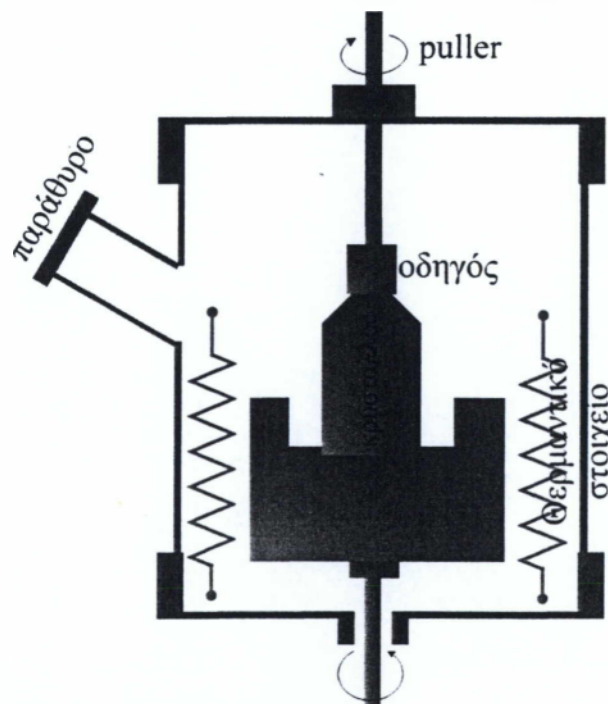
Σημαντικότερες μέθοδοι κρυσταλλικής ανάπτυξης είναι:

- ❖ Η μέθοδος Czochralski, με την οποία παράγεται το μεγαλύτερο ποσοστό (~98%) του χρησιμοποιούμενου Si από τη βιομηχανία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, καθώς επίσης και
- ❖ Η μέθοδος τηγμένης ή κινητής ζώνης (float zone).

Για την ανάπτυξη λεπτών κρυσταλλικών στρωμάτων (επιταξίες) χρησιμοποιούνται επιταξιακές μέθοδοι εναπόθεσης (CVD, MBE κ.α.).

2.6 Η μέθοδος Czochralski ^{vi}

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη στερεοποίηση λιωμένου πολυκρυσταλλικού Si με τη βοήθεια οδηγού μονοκρυστάλλου ή σπόρου που τοποθετείται στο άκρο ενός βραχίονα (puller).



Σχήμα 2.3

Συσκευή παραγωγής κρυστάλλων με τη μέθοδο Czochralski

^{vi} Η μέθοδος Czochralski ανακαλύφθηκε το 1917 και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την παρασκευή υλικού ημιαγωγών από τους Teal και Little το 1950.

Ο οδηγός βυθίζεται μέσα στο τήγμα και με τη βοήθεια του βραχίονα σύρεται και ταυτόχρονα περιστρέφεται με σταθερές ταχύτητες παρασύροντας με αυτόν τον τρόπο μία στερεοποιούμενη μάζα μονοκρυσταλλικού Si σε μορφή κυλινδρικής ράβδου. Η διάταξη αποτελείται επίσης από δοχείο πορσελάνης ή χαλαζία μέσα στο οποίο τοποθετείται το πολύ-Si. Το δοχείο τοποθετείται σε υποδοχέα γραφίτη και το όλο σύστημα φέρεται μέσα σε θάλαμο με ατμόσφαιρα αδρανούς αερίου (Ar, N₂) σε πιέσεις από 1 έως 50 Torr. Η αναγκαία θέρμανση για την τήξη του Si παρέχεται είτε μέσω θερμαντικής αντίστασης είτε μέσω επαγωγικού πηνίου RF. Οι επιθυμητές προσμίξεις (dopants), που θα καθορίσουν τον τύπο και τη αγωγιμότητα του κρυστάλλου, μπορεί να εισαχθούν υπό μορφή σκόνης κατά τη διάρκεια της τήξης του πολυκρυσταλλικού Si. Πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το χαμηλό κόστος, η παραγωγή κρυσταλλικού Si χωρίς ατέλειες και εξαρθρώσεις καθώς επίσης και η επιλογή διαμέτρων των ράβδων που κυμαίνονται από 75 έως 150 mm. Μειονέκτημα της μεθόδου αποτελεί η εισαγωγή O₂, προερχόμενου από το δοχείο χαλαζία, που επηρεάζει την αγωγιμότητα και άλλες ηλεκτρικές παραμέτρους του κρυστάλλου.

Η μέθοδος Czochralski προτιμάται σήμερα για την παραγωγή κρυστάλλων Si διότι εμφανίζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

- Ευκολία παραγωγής κρυστάλλων μεγάλης διαμέτρου.
- Οικονομία πρώτης ύλης, εφόσον μπορούν να χρησιμοποιηθούν εξίσου κομμάτια κρυστάλλου ή πολυκρυσταλλικού πυριτίου.
- Σχετική ευκολία ελέγχου της διεπιφάνειας στερεού-υγρού σε συνθήκες παραγωγής.
- Δυνατότητα ισχυρού ντοπαρίσματος του κρυστάλλου από επιλεγμένες προσμίξεις.

Η ράβδος του γερμανίου, που λαμβάνεται με τη μέθοδο της τετηγμένης ζώνης, είναι πολυκρυσταλλική. Και η δημιουργία του μονοκρυστάλλου γίνεται με τη μέθοδο Τσοχράλσκι. Κατά τη μέθοδο αυτή, το γερμάνιο τοποθετείται σε δοχείο γραφίτη το οποίο βρίσκεται σε περιβάλλον αδρανούς αερίου. Το υλικό θερμαίνεται και αφού λιώσει διατηρείται σε θερμοκρασία μόλις πάνω από το σημείο τήξης του γερμανίου.

Στη συνέχεια, ένας μικρός μονοκρυστάλλος γερμανίου τοποθετείται σε επαφή με το τήγμα, περιστρέφεται και ανυψώνεται βραδέως. Επειδή ο μονοκρυστάλλος βρίσκεται σε χαμηλή θερμοκρασία από το τήγμα, υπάρχει ροή θερμότητας από το τήγμα προς τον μονοκρυστάλλο. Η υγρή φάση που έρχεται σε επαφή με τον στερεό κρυστάλλο στερεοποιείται και τα άτομα διευθετούνται έτσι ώστε να έχουν τον ίδιο προσανατολισμό με τον αρχικό μονοκρυστάλλο. Η θερμότητα που ρέει στο στερεό ακτινοβολείται στο περιβάλλον. Ο τελικός μονοκρυστάλλος έχει κυκλική διατομή, η διάμετρος της οποίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του τήγματος, την ταχύτητα περιστροφής του κρυστάλλου και την ταχύτητα ανύψωσης. Τυπική περιστροφή αποτελούν οι 100 στροφές ανά λεπτό και η ταχύτητα ανύψωσης ποικίλλει από 1,3 έως 5 cm την ώρα. Οι συνθήκες διαστάσεις του μονοκρυσταλλικού γερμανίου είναι: διάμετρος 5 cm και μήκος 25 cm. Η κατασκευή μονοκρυσταλλικού υλικού τύπου n ή p γίνεται με την πρόσμιξη δοτών ή αποδεκτών στο τήγμα. Οι αναλογίες ατόμων των προσμίξεων είναι από 1:10⁶ έως 1:10⁸ σε σχέση με τα άτομα του στοιχειακού ημιαγωγού.

2.7 Η μέθοδος κινητής ζώνης

Για την παραγωγή Si υψηλής καθαρότητας με αντιστάσεις 20-10 kΩ cm και εφαρμογές σε ειδικές διατάξεις (ισχύος, ανιχνευτές κ.α.) χρησιμοποιείται κυρίως η τεχνική της τηγμένης ή αλλιώς κινητής ζώνης (float zone). Η διάταξη που χρησιμοποιείται για τον σκοπό αυτό περιλαμβάνει σύστημα κατακόρυφης κίνησης και περιστροφής όπου είναι στερεωμένη μία ράβδος πολύ-πυριτίου η οποία στο κάτω μέρος της φέρει στερεωμένο μικρό μονοκρυσταλλικό οδηγό. Η ράβδος εισάγεται περιστροφικά μέσα σε μια θερμαινόμενη (συνήθως με πηγή RF) στενή ζώνη με μικρή ταχύτητα, έτσι ώστε η μάζα που εισέρχεται στην θερμαινόμενη περιοχή τήκεται και στερεοποιείται καθώς εξέρχεται από αυτή.



Σχήμα 2.4

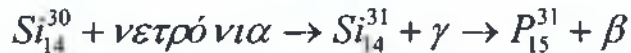
Ανάπτυξη κρυστάλλων πυριτίου με τη μέθοδο κινητής ζώνης

Επειδή η μάζα που τήκεται αρχικά είναι σε επαφή με τον κρυσταλλικό οδηγό κατά τη στερεοποίησή της κρυσταλλώνεται στην κρυσταλλική διεύθυνση του οδηγού. Το ίδιο συμβαίνει και με την υπόλοιπη μάζα με τελικό αποτέλεσμα τη μετατροπή του πολυκρυσταλλικού Si σε μονοκρυσταλλικό. Λόγω της πτητικότητας των προσμίξεων, στην τηγμένη ζώνη του Si, κάθε πέρασμα της ράβδου από την περιοχή αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της περιεκτικότητας του κρυστάλλου σε προσμίξεις. Έτσι, η

μέθοδος χρησιμοποιείται και για την παραγωγή κρυσταλλικού Si υψηλής καθαρότητας.

Μειονεκτήματα της μεθόδου είναι το υψηλό κόστος της σε σχέση με την τεχνική Czochralski και η ανομοιογένεια στην τιμή της αντίστασης λόγω μεγάλων θερμοκρασιακών διακυμάνσεων κατά τη διάρκεια της παρασκευής.

Τέλος, σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ομοιογένεια προσμίξεων και μεγάλη επιφάνεια chip χρησιμοποιείται η μέθοδος ακτινοβόλησης του Si με νετρόνια και μετατροπή ενός μέρους του σε φώσφορο (μεταστοιχείωση) με τελικό προϊόν n-Si σύμφωνα με την αντίδραση:



2.8 Μορφοποίηση Δισκίων

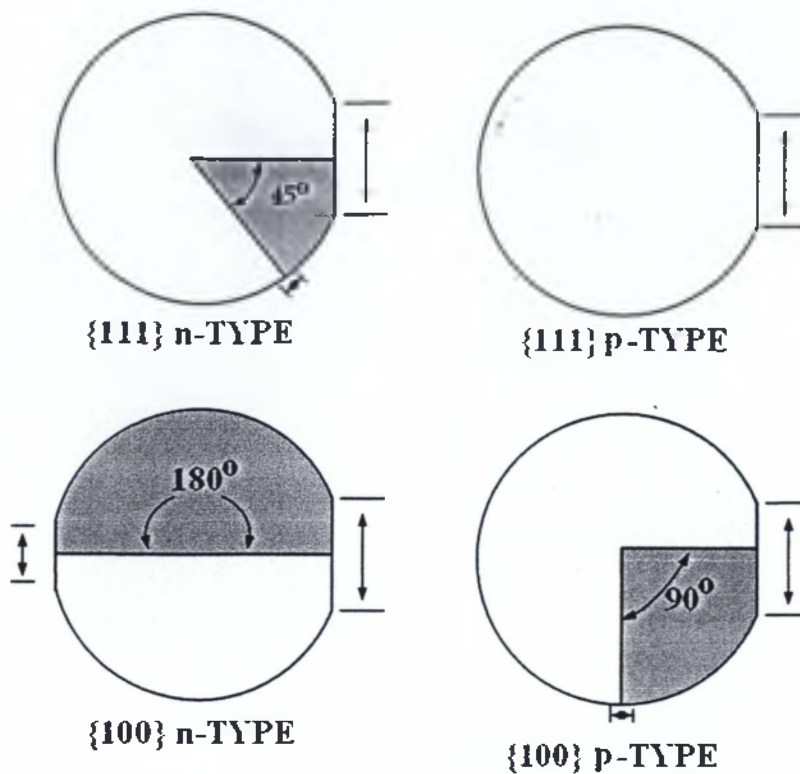
Μετά την ανάπτυξη μονοκρυσταλλικών ράβδων Si, όπως έχει διατυπωθεί, απαιτούνται στη συνέχεια οι κατάλληλες διαδικασίες επεξεργασίας του υλικού για την παραγωγή μονοκρυσταλλικών δισκίων κατάλληλων για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

- **Πρώτο βήμα(αφαίρεση σπόρου- καθορίζεται η διάμετρος)**

Αρχικά αφαιρείται ο οδηγός-σπόρος και στη συνέχεια καθορίζεται η διάμετρος του δισκίου με το κατάλληλο τρόχισμα της ράβδου. Οι διαμέτροι των δισκίων που κυρίως χρησιμοποιούνται είναι 75, 100, 125 και 150 mm. Οι διαμέτροι αυτοί είναι οι πιο διαδεδομένοι στη βιομηχανία με τέτοιο τρόπο ώστε ο εξοπλισμός για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων να μπορεί να τυποποιηθεί. Μετά τον καθορισμό της διαμέτρου ο κρύσταλλος ακονίζεται μέχρι 0,4mm, διάμετρο μεγαλύτερη από την επιθυμητή τιμή. Η διαδικασία του ακονίσματος αφήνει μια περιοχή κατεστραμμένη που όμως απομακρύνεται με τη διαδικασία του κρυσταλλικού προσανατολισμού που περιγράφεται στη συνέχεια.

- **Δεύτερο βήμα(κρυσταλλικός προσανατολισμός-τύπος αγωγιμότητας)**

Στη συνέχεια, λοιπόν, αποτυπώνονται ο κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός και ο τύπος αγωγιμότητας του υλικού με τη βοήθεια της απόσπασης μικρών κυκλικών τμημάτων. Ο προσανατολισμός του κρυστάλλου γίνεται με τεχνική σκέδαση ακτίνων X. Τα συστήματα εγκοπής διατηρούν τον προσανατολισμό των εγκοπών μέσα στο όριο $\pm 0,5^\circ$. Η περιοχή που είναι κατεστραμμένη λόγω της διαδικασίας του τροχίσματος απομακρύνεται με ένα ισοτροπικό γυαλιστικό (HF, HNO₃ και CH₃COOH). Η αποτύπωση προσανατολισμού και ο τύπος δισκίων φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.5

Προσανατολισμός κοπής των δισκίων πυριτίου

- **Τρίτο βήμα(κοπή δισκίων)**

Έπειτα, η ράβδος κόβεται σε δισκία με τη βοήθεια τροχού ή λεπίδας διαμαντιού με κυριότερα πάχη 0.3, 0.5, 0.7 mm ανάλογα με το μήκος της διαμέτρου. Για την κοπή των δισκίων, συνήθως, χρησιμοποιείται πριόνι με λεπίδα εσωτερικού κύκλου, η οποία έχει πυρήνα από ανοξείδωτο ατσάλι με πάχος 100-150μm και επίστρωση από ένα πλέγμα διαμαντιού/νικελίου.

- **Τέταρτο βήμα(αφαίρεση ατελειών και βελτίωση ομοιομορφίας)**

Η διαδικασία κοπής των δισκίων δημιουργεί μια επιφάνεια άγρια γεμάτη από γδαρσίματα. Έτσι, οι δύο επιφάνειες των δισκίων υποβάλλονται σε κατεργασία με μίγμα Al_2O_3 και γλυκερίνης για την αφαίρεση των επιφανειακών ατελειών και βελτίωση της ομοιομορφίας.

- **Πέμπτο βήμα(γυάλισμα επιφάνειας δισκίων)**

Τέλος, οι επιφάνειες των δισκίων γυαλίζονται για να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή ολοκληρωμένων διατάξεων. Το συστατικό για τη διαδικασία του γυαλίσματος είναι ένα κολλοειδές αιώρημα λεπτών σωματιδίων SiO_2 σε αλκαλικό υδατικό διάλυμα με pH από 10 έως και 12.

- **Έκτο βήμα(γυάλισμα και καθάρισμα)**

Είναι το τελευταίο βήμα και περιλαμβάνει τον τελικό καθαρισμό των δισκίων με διάφορους τρόπους όπως, διαλυτικά, απορρυπαντικά, απιονισμένο νερό κ.τ.λ. Στη συνέχεια γίνεται μια τελευταία παρακολούθηση για τυχόν ατέλειες και γδαρσίματα.

Στον πίνακα αυτό φαίνονται τα χαρακτηριστικά μορφοποιημένων δισκίων μονοκρυσταλλικού Si με τρεις τυπικές τιμές διαμέτρων.

Τύποι δισκίων Si			
Παράμετρος	100 cm	125 cm	150 cm
Διάμετρος (mm)	100±1	125±1	150 ±1
Πάχος (mm)	0.5-0.55	0.6-0.65	0.65-0.7
Πρωτεύουσα εγκοπή (mm)	30-35	40-45	55-60
Δευτερεύουσα εγκοπή (mm)	16-20	25-30	35-40
Κάμψη (μm)	60	70	60
Μεταβολή πάχους(μm)	50	65	50

Πίνακας 2.3

2.9 Επιταξία (Epitaxy)

Γενικά

Η απόθεση, συνήθως σε λεπτό στρώμα, πάνω στην επιφάνεια ενός απλού κρυσταλλικού σώματος ενός συστατικού το οποίο προέρχεται από ένα άλλο κρυσταλλικό σώμα.

Ο όρος *επιταξία* είναι ελληνικής προέλευσης και αναφέρεται στον σχηματισμό εκτεταμένου μονοκρυσταλλικού υμενίου στην επιφάνεια ενός κρυσταλλικού υποστρώματος. Είναι αναμφισβήτητα ένα από τα πιο σημαντικά φαινόμενα στην τεχνολογία, όσον αφορά τις συσκευές ημιαγωγίων λεπτών υμενίων.

Ο όρος *επιταξία* εισήχθη από τον Γάλλο μεταλλειολόγο L. Royer το 1928. Για αρκετά χρόνια το φαινόμενο της επιταξίας παρέμενε ενδιαφέρον στις επιστημονικές κοινότητες, όπου οι ερευνητές χρησιμοποιούσαν μεθόδους όπως: ηλεκτροεναπόθεση, sputtering και εναπόθεση ατμών μετάλλου σε συνθήκες κενού. Μια ενδιαφέρουσα σειρά από αποτελέσματα επιδεικνύεται από υμένα και υποστρώματα τα οποία παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους ως προς την κρυσταλλική και ηλεκτρονική δομή.

Η σημασία της επιταξίας είναι πολύ μεγάλη κατά την κατασκευή ηλεκτρονικών και οπτοηλεκτρονικών συσκευών. Για τον σκοπό αυτό έχουν καταστεί αναγκαία τα επιταξιακά υμένα χωρίς ατέλειες ανεπτυγμένα κατά στρώσεις (layer-by-layer growth).

Η επιταξία χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, που η κάθε μια έχει ξεχωριστό επιστημονικό και τεχνολογικό ενδιαφέρον.

Το πρώτο είδος, η *ομοεπιταξία* αναφέρεται στην περίπτωση που το υμένιο και το υπόστρωμα είναι από το ίδιο υλικό. Ο λόγος που θέλουμε να συμπυκνώσουμε σε ένα

μεταλλικό υπόστρωμα ατμούς του ίδιου μετάλλου είναι ότι το επίστρωμα είναι απαλλαγμένο από ατέλειες, έχει υψηλότερη καθαρότητα από το υπόστρωμα και μπορούν να προστεθούν ξένες ουσίες αναλόγως με τις ιδιότητες που θέλουμε να του προσδώσουμε. Παράδειγμα: Si/Si για την κατασκευή κυκλωμάτων ισχύος (βηματοδότες, H/Y αυτοκινήτων, εξόρυξη πετρελαίου κλπ)

Το δεύτερο είδος, η *ετεροεπιταξία* αναφέρεται στην περίπτωση που το υμένιο και το υπόστρωμα αποτελούνται από διαφορετικά υλικά, π.χ. AlAs πάνω σε υπόστρωμα GaAs. Η ετεροεπιταξία είναι πολύ συνηθισμένο φαινόμενο σε σχέση με την ομοεπιταξία.

Οι επιθυμητές ιδιότητες του υποστρώματος είναι:

1. Πρέπει να είναι φυσικώς και χημικώς αδρανές στο περιβάλλον και τη θερμοκρασία ανάπτυξης.
2. Η επιφάνειά του πρέπει να είναι λεία, χωρίς ανωμαλίες και οξειδία.
3. Πρέπει να είναι χημικώς συμβατό με το επιταξιακό υμένιο \Rightarrow να μη σχηματίζεται χημική ένωση ανάμεσα στο υπόστρωμα και το υμένιο.
4. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας k του υποστρώματος και του υμενίου θα πρέπει να είναι συμβατοί, έτσι ώστε να μην αναπτύσσονται επιπλέον τάσεις κατά την ψύξη στους 300K που μπορούν να προκαλέσουν τον σχηματισμό εξαρμόσεων στη διεπιφάνεια ή σπάσιμο ή αποκόλληση του υμενίου.
5. Η διαφορά των πλεγματικών σταθερών a του υμενίου και του υποστρώματος θα πρέπει να είναι μικρή.

Η πλεγματική ασυμφωνία ορίζεται ως $\Delta a = \frac{|a_f - a_s|}{a_s}$ όπου a_f και a_s οι πλεγματικές

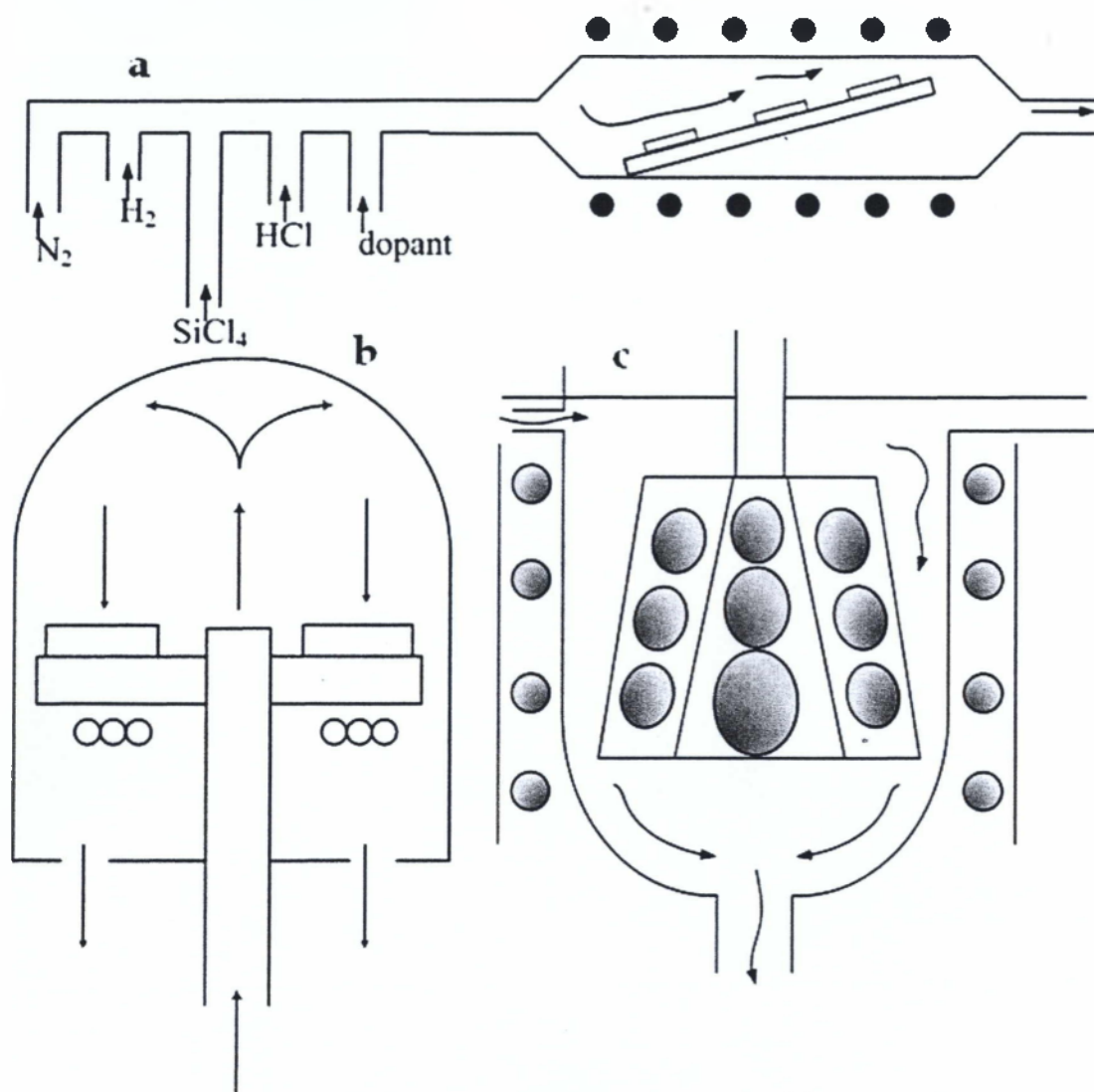
σταθερές του υμενίου και του υποστρώματος αντίστοιχα.

Όταν $\Delta a \cong 1\%$ η διεπιφάνεια διαταράσσεται λόγω strain, ατελειών δομής και σπασμένων δεσμών με αποτέλεσμα μεγάλη συγκέντρωση ατελειών δομής οπότε και περιορίζονται σημαντικά οι επιλογές για το κατάλληλο υπόστρωμα.

Η μέθοδος αυτή δεν χρησιμοποιεί χημική αντίδραση μεταξύ των δύο υλικών και η κρυσταλλική δομή του επιταξιακού στρώματος ελέγχεται από αυτή την επιφάνεια πάνω στην οποία σχηματίζεται. Πολλά είδη ηλεκτρονικών εξαρτημάτων στερεάς κατάστασης, όπως τρανζίστορ υψηλής ταχύτητας και ολοκληρωμένα κυκλώματα, κατασκευάζονται με παραγωγή επιταξιακού στρώματος ενός ημιαγωγού πάνω σε μια βάση ενός άλλου, ο οποίος είναι διαφορετικού τύπου ηλεκτρικής αγωγιμότητας από τον πρώτο. Μια τεχνική που χρησιμοποιείται στην κατασκευή επιταξιακού στρώματος είναι η έκθεση της καθαρής επιφάνειας ενός απλού κρυσταλλικού ημιαγωγού συνήθως πυριτίου ή γερμανίου, στη δράση ενός αεριοποιημένου μίγματος μιας χημικής ένωσης ενός άλλου στοιχείου που ονομάζεται αδρανοποιητικό στοιχείο συχνά γάλλιο ή αρσενικό. Οι ατμοί συμπυκνώνονται και αποσυντίθενται πάνω στην επιφάνεια, σχηματίζοντας έτσι ένα ομαλό κρυσταλλικό στρώμα στο οποίο ένας μικρός αριθμός θέσεων του κρυσταλλικού πλέγματος του ατομικά μεγαλύτερου συστατικού έχει καταληφθεί από άτομα του αδρανοποιημένου στοιχείου.

Τα τελευταία χρόνια ο ρόλος της επιταξίας και στη σημασία της μηχανικής εφαρμογής της είναι ιδιαίτερος και σημαντικός. Ένα μικρό δείγμα δραστηριοτήτων περιλαμβάνει τα εξής:

1. Δημιουργία νέων οπτοηλεκτρονικών συσκευών με μεγαλύτερη ενέργεια χάσματος, π.χ. φωτοδιόδους και lasers από GaInN.
2. Κατασκευή και χρήση διαφόρων ειδών ταχέων, μικροηλεκτρονικών, ψηφιακών, υψηλής συχνότητας, χωρίς καλώδιο συσκευών επικοινωνίας αποτελούμενες από $\text{Ge Si}_{x^{1-x}}$



Σχήμα 2.6

Τύποι αντιδραστήρων χημικής εναπόθεσης αερίων

- A. Οριζόντιας ροής
- B. Κατακόρυφης ροής με θέρμανση RF ηγής
- C. Κατακόρυφης με θέρμανση από ακτινοβολία

3. Δημιουργία τρισδιάστατων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που να κατέχουν υψηλή πυκνότητα ολοκλήρωσης των κυκλωμάτων. Να κατασκευαστεί δηλαδή μια κατακόρυφη πολυστρωματική δομή, όπου κάθε κομμάτι της θα διαχωρίζεται από τα γειτονικά της με μονωτικά υμένα.
4. Την κατασκευή πολυστρωματικών συνθέτων υλικών με ετεροεπαφές.

5. Εναπόθεση προσανατολισμένων ηλεκτροκεραμικών υμενίων για διάφορους σκοπούς, όπως: υπεραγωγοί υψηλών θερμοκρασιών, σιδηροηλεκτρικά υμένια.

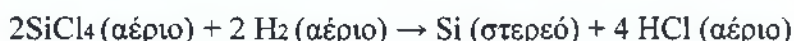
Οι επιταξιακές μέθοδοι διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- τις **χημικές**, κατά τις οποίες οι πρώτες ύλες είναι διαφορετικές από το τελικό προϊόν – λεπτό στρώμα και
- τις **φυσικές**, κατά τις οποίες το αρχικό και το τελικό υλικό είναι της ίδιας φύσης, αλλά διαφορετικής δομής.

Η χημική εναπόθεση ατμών (ΧΕΑ) ή CVD από τα αρχικά: **Chemical Vapor Deposition** λαμβάνει χώρα σε ειδικούς αντιδραστήρες και συνίσταται σε πυρόλυση ή χημική αντίδραση των προδρόμων υλικών (πρώτες ύλες) σε υψηλές θερμοκρασίες (άνω των 1000 °C) του υποστρώματος, έτσι ώστε τα προϊόντα των αντιδράσεων, ατμοί Si, να εναποτίθενται στο κρυσταλλικό υπόστρωμα.

Τα χαρακτηριστικά της χημικής εναπόθεσης ατμών είναι η υψηλή ταχύτητα ανάπτυξης, της τάξης των μμ/hr και η ομοιόμορφη επικάλυψη σε σώματα με πολύπλοκη διατομή. Υπάρχουν, όμως, και αρνητικά χαρακτηριστικά όπως τα αντιδραστήρια τα οποία είναι διαβρωτικά και τοξικά, καθώς και οι ταυτόχρονες αντιδράσεις (πολύπλοκη δυναμική αερίων). Η υψηλή θερμοκρασία υποστρώματος ($T_{gr} \leq 1000^\circ C$) έχει σαν αποτέλεσμα να καταλύει την αντίδραση και να αυξάνει την κινητικότητα των ατόμων που προσροφώνται στην επιφάνεια του υποστρώματος (adatoms) βελτιώνοντας τις δομικές ιδιότητες του αναπτυσσόμενου υμενίου. Παρόλα αυτά είναι ασύμβατη προς ορισμένα βήματα επεξεργασίας (processes) και ενισχύει τη διάχυση προσμίξεων από το υπόστρωμα στο αναπτυσσόμενο υμένιο (autodoping).

Τα πρόδρομα υλικά-αέρια που χρησιμοποιούνται για την εναπόθεση επιταξιακού Si είναι ενώσεις του Si όπως: $SiCl_4$, SiH_4 , $SiCl_2H_2$, $SiCl_3H$ κ.α. Οι χλωριούχες ενώσεις του Si αποσυντίθενται με την αναγωγή του με H_2 :



Στην περίπτωση σιλάνης SiH_4 γίνεται πυρόλυση στους 1200°C ως εξής:



Τα υποστρώματα τοποθετούνται εντός του αντιδραστήρα από χαλαζία σε πλάκες γραφίτη, ενώ η θέρμανση γίνεται με RF πηγές ή με θερμαντικές αντιστάσεις ή με ακτινοβολία από λαμπτήρες. Η ποιότητα και οι ιδιότητες των επιταξιακών στρωμάτων εξαρτώνται από τις συνθήκες εναπόθεσης, όπως θερμοκρασία υποστρώματος, ροή αερίων, πίεση, χρόνος εναπόθεσης, γεωμετρία υποστρώματος κ.α. Η εισαγωγή προσμίξεων γίνεται μέσω αερίων ενώσεων που διοχετεύονται στον αντιδραστήρα παράλληλα με τις πηγές του Si με την κατάλληλη στοιχειομετρία. Συνηθέστερες πηγές είναι η φωσφίνη PH_3 , η αρσίνη AsH_3 και το διβοράνιο B_2H_6 . Στο προηγούμενο σχήμα φαίνεται διάταξη αντιδραστήρων ΧΕΑ διαφόρων τύπων όπως :

οριζόντιου τύπου, κατακόρυφου τύπου με RF θέρμανση και κατακόρυφου τύπου με θέρμανση από ακτινοβολία (photoCVD).

2.10 Επιταξία Μοριακής Δέσμης (MBE)

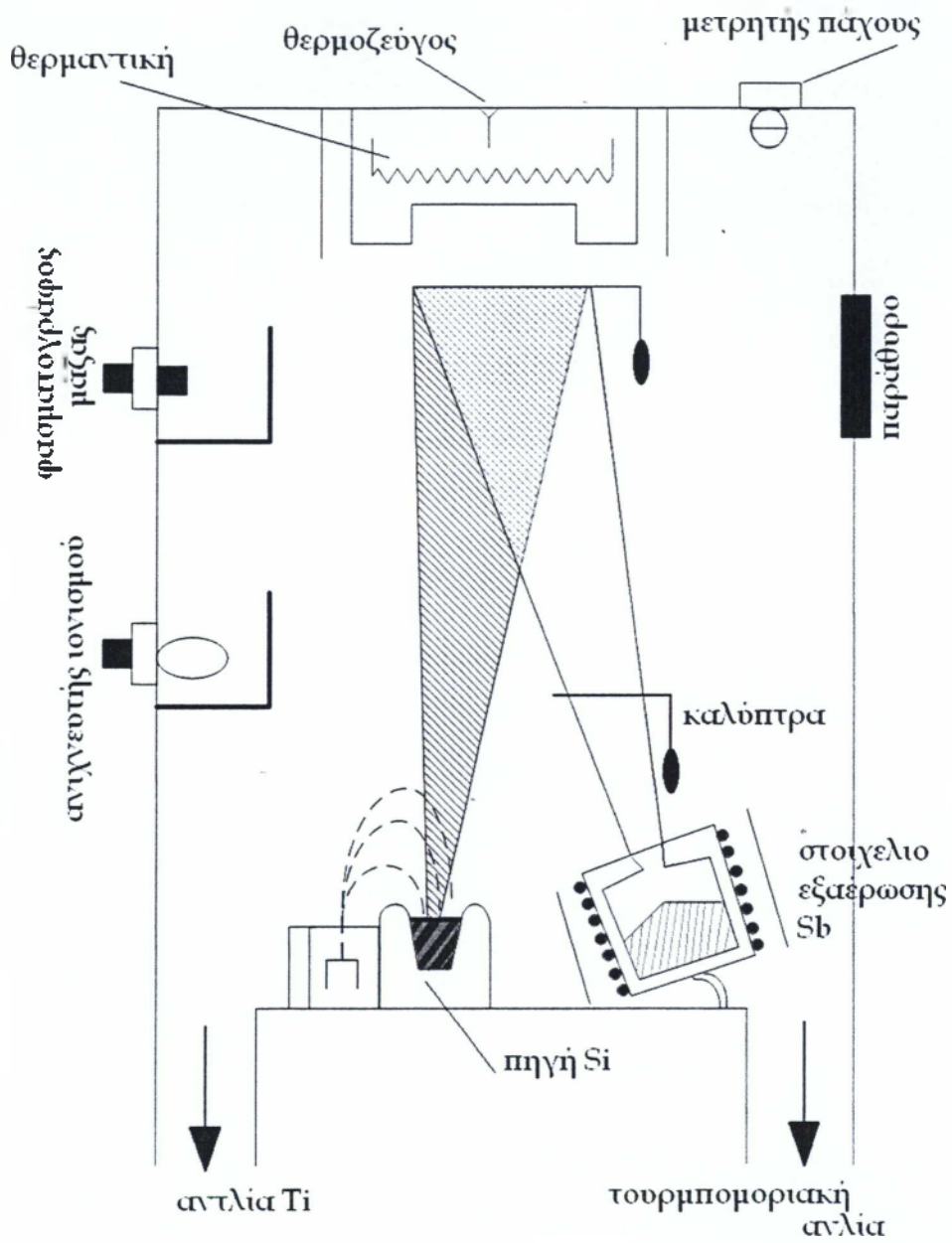
Η τεχνική Επιταξίας Μοριακής Δέσμης είναι η MBE από τα αρχικά των λέξεων Molecular Beam Epitaxy.

Η Επιταξία Μοριακής Δέσμης είναι μια επίσης επιταξιακή μέθοδος, που βασίζεται στην εξάχνωση του υλικού. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός που χρειάζεται έχει υψηλό κόστος και η χρήση της μεθόδου προσφέρει κυρίως τα εξής πλεονεκτήματα:

Περιέχει διαδικαστικά στάδια χαμηλών, σχετικά με την ΧΕΑ, θερμοκρασιών (400-800 °C) και έτσι αποφεύγεται η διάχυση επιταξιακών προσμίξεων στο επιταξιακό στρώμα.

Το δεύτερο πλεονέκτημα είναι ο ακριβής έλεγχος των επιθυμητών προσμίξεων καθώς επίσης και ο έλεγχος του πάχους του επιταξιακού στρώματος. Η διαδικασία εναπόθεσης της επιταξίας με τις προσμίξεις γίνεται με βάση την εξάχνωση μάζας poly-Si και μιας ή περισσοτέρων προσμίξεων (dopants) μέσα σε θάλαμο υπερυψηλού κενού (10^{-8} - 10^{-12} Torr) πάνω σε θερμαινόμενο υπόστρωμα.

Η εξάχνωση του Si προκαλείται με τη βοήθεια δέσμης ηλεκτρονίων προερχομένων από ηλεκτρονική τηλεβόλο τα οποία προσπίπτουν στο στόχο Si που βρίσκεται μέσα σε ειδικό κεραμικό δοχείο (crucible). Από τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας των ηλεκτρονίων σε θερμική προκαλείται τήξη και εξάχνωση του Si. Για τη εξάχνωση των προσμίξεων, συνήθως As, P, B κ.α., χρησιμοποιείται στοιχείο τήξης τύπου Knudsen. Τα σύγχρονα συστήματα MBE είναι αρκετά πιο σύνθετα και προσφέρουν τη δυνατότητα πολλαπλών και επαλλήλων επιταξιακών εναποθέσεων.



Σχήμα 2.7
 Διάταξη επιταξίας μοριακής δέσμης MBE



Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

Η οξείδωση του πυριτίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Η ΟΞΕΙΔΩΣΗ ΤΟΥ ΠΥΡΙΤΙΟΥ

Η οξείδωση του πυριτίου είναι μια διαδικασία απαραίτητη και σημαντική κατά τη διάρκεια κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Για αυτό τον λόγο, η κατανόηση των μηχανισμών της οξείδωσης είναι αναγκαία, όπως και η δυνατότητα κατασκευής οξειδίων υψηλής ποιότητας που θα διασφαλίζουν τη δομή αλλά και τις φυσικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Η διαδικασία της οξείδωσης έχει σαν κύριο σκοπό την προστασία του πυριτίου από χημικές επιδράσεις ή την ηλεκτρική του μόνωση. Έτσι, ένα στρώμα οξειδίου παράγεται στην επιφάνεια του πυριτίου για να εξυπηρετήσει τους παραπάνω λόγους. Για να μετατραπεί όμως το πυρίτιο σε διοξείδιο του πυριτίου πρέπει να ακολουθήσει μια σημαντική διαδικασία στην τεχνολογία των διπολικών και των MOS μονολιθικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων που ονομάζεται θερμική οξείδωση.

Ο ρόλος των θερμικών οξειδίων είναι αναμφισβήτητα απαραίτητος, καθώς η εφαρμογή τους είναι να παρέχουν ένα ομοιόμορφο και σταθερό προστατευτικό σώμα στο πυρίτιο. Επίσης, το οξείδιο από τη φύση του έχει σαν ιδιότητα να δρα σαν φράγμα στη διάχυση των περισσότερων ηλεκτρικά ενεργών προσμίξεων αντικατάστασης για το ντοπάρισμα του πυριτίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να επιτρέπει το ντοπάρισμα περιοχών ενός δίσκου πυριτίου, οι οποίες με τη φωτολιθογραφία καθορίζονται με απομάκρυνση του οξειδίου και παράλληλα προστατεύονται τα υπόλοιπα μέρη του υποστρώματος από το οξείδιο.

Ο έλεγχος των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του SiO_2 γίνεται με τη μέθοδο χαρακτηριστικών χωρητικότητας- τάσης $C(V)$ πάνω σε ειδικές διατάξεις MOS (metal- oxide- semiconductor) και στην προκειμένη περίπτωση αποτελούνται από τα υλικά $\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$. Ο έλεγχος της παρασκευής και των ιδιοτήτων των οξειδίων εξασφαλίζει την αξιόπιστη αναπαραγωγή και λειτουργία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

3.1 Μέθοδοι παρασκευής οξειδίων

Όταν επιλέγουμε μια μέθοδο για να παρασκευάσουμε οξείδια, πρώτα καλούμαστε να αποφασίσουμε και να λάβουμε υπόψη μας το έργο το οποίο καλούνται τα οξείδια να επιτελέσουν σε ένα κύκλωμα. Έτσι έχουμε τη μέθοδο θερμικής οξείδωσης με την παρουσία ή και χωρίς την παρουσία υδρατμών, τη μέθοδο χημικής εναπόθεσης (CVD: Chemical Vapor Deposition) που ήδη έχουμε αναλύσει, την ηλεκτρολυτική μέθοδο (ηλεκτροχημική ανοδίωση) και τέλος τη μέθοδο πλάσματος (plasma oxidation). Από όλα τα παραπάνω, η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως στην τεχνολογία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων πυριτίου είναι η μέθοδος θερμικής οξείδωσης.

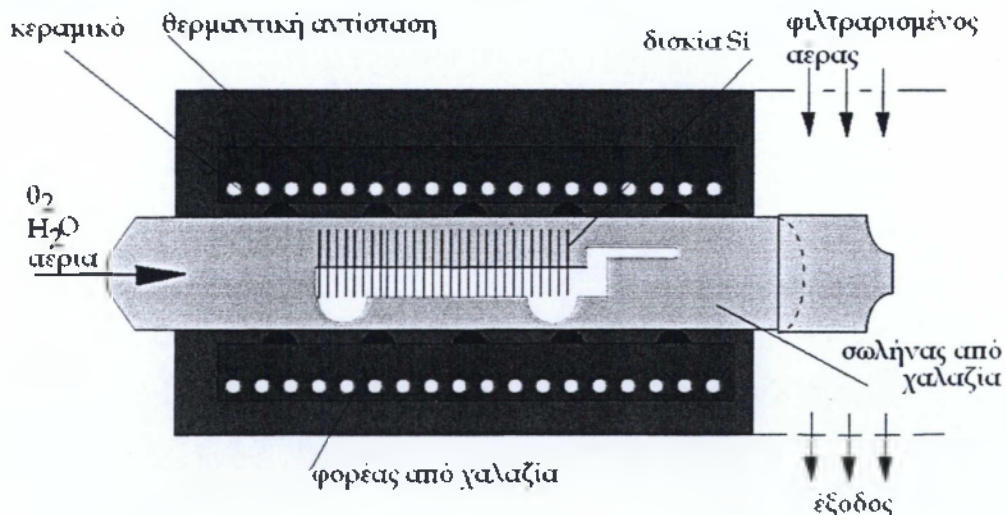
Στη χημική εναπόθεση μέσω ατμού διαβιβάζεται αδρανές αέριο με διάφορα αντιδρώντα αέρια σε ένα θάλαμο αντίδρασης που περιέχει το υπόστρωμα. Τα αντιδρώντα αέρια κινούνται προς το υπόστρωμα με το οποίο αντιδρούν. Το προϊόν

της αντίδρασης αυτής είναι ένα στερεό υλικό (οξειδίο μετάλλου) που συμπυκνώνεται στις επιφάνειες εσωτερικά του αντιδραστήρα. Μια παραλλαγή της μεθόδου CVD είναι η χημική απόθεση μέσω ατμού υπό χαμηλή πίεση (Low Pressure CVD, LPCVD) με την οποία παράγονται υμένα με εξαιρετική ομοιομορφία στο πάχος και τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του οξειδίου. Απαιτούνται όμως υψηλές θερμοκρασίες και παρατηρείται σχετικά χαμηλός ρυθμός απόθεσης. Η ενισχυμένη με πλάσμα χημική απόθεση μέσω ατμού (Plasma Enhanced CVD, PECVD) μπορεί να λειτουργήσει σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ωστόσο, η ποιότητα των παραγόμενων είναι κατώτερη σε σχέση με αυτή που επιτυγχάνεται σε υψηλές θερμοκρασίες.

3.1.1 Θερμική οξείδωση

Η διαδικασία οξείδωσης του πυριτίου πραγματοποιείται σε ειδικές διατάξεις που καλούνται αντιδραστήρες οξείδωσης.

Τα κύρια μέρη της διάταξης θερμικής οξείδωσης είναι όπως παρατηρούμε και στην σχηματική απεικόνιση, ένας φούρνος που παρέχει θερμαντική ισχύ με τη βοήθεια ηλεκτρικής αντίστασης, ένας κυλινδρικός σωλήνας από χαλαζία (Quartz tube) ανοικτός από το ένα άκρο του. Το άλλο άκρο, όπως παρατηρούμε, φέρει ακροφύσιο για την είσοδο του αερίου O_2 και των υδρατμών. Επίσης, υπάρχει και ένας φορέας για την οξείδωση δισκίων Si. Είναι από χαλαζία και έχει κατάλληλες υποδοχές για πολλά δισκία. Ένα σύστημα ελέγχου και σταθεροποίησης της θερμοκρασίας (temperature controller), καθώς και ένα σύστημα ελέγχου της ροής των οξειδωτικών αερίων μέσα στο φούρνο. Τέλος, με τη βοήθεια υπολογιστή συνδεδεμένου με τη διάταξη του φούρνου επιτυγχάνεται η άνοδος της θερμοκρασίας μέχρι την επιθυμητή τιμή με σταθερό βήμα που επιλέγεται κατάλληλα ο συνεχής έλεγχος της θερμοκρασίας, ο έλεγχος της ροής των αερίων οξείδωσης μέσα στο φούρνο και ο χρόνος οξείδωσης και ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας στην αρχική τιμή λειτουργίας.

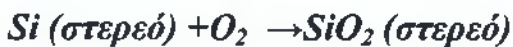


Σχήμα 3.1
διάταξης αντιδραστήρα θερμικής οξείδωσης

3.2 Η θεωρία ανάπτυξης του οξειδίου

Η μορφή του οξειδίου του πυριτίου που παράγεται με θερμική οξείδωση έχει τη μορφή ενός τυχαίου τρισδιάστατου δικτύωματος χτισμένου από τετραδικά κύτταρα διοξειδίου του πυριτίου. Κάθε τετράεδρο αποτελείται από ένα ιόν Si που περιβάλλεται από τέσσερα ιόντα οξυγόνου. Τα τετράεδρα ενώνονται μεταξύ τους με γέφυρα. Παρόλα αυτά, στο θερμικό SiO₂ πολλά από τα ιόντα οξυγόνου ανήκουν σε ένα μόνο τετράεδρο και ορίζονται σαν μη γεφυρωτά.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται πιο συχνά για την ανάπτυξη θερμικών οξειδίων είναι το ξηρό οξυγόνο και οι υδρατμοί. Έτσι, το προστατευτικό και μονωτικό στρώμα του SiO₂ αναπτύσσεται στην επιφάνεια του wafer πυριτίου με θερμική οξείδωση σε υψηλή θερμοκρασία (900-1200° C σε φούρνους χαλαζία με θερμαντικά σπειρώματα) με τους δύο ακόλουθους τρόπους:



Στην πρώτη περίπτωση η ατμόσφαιρα της οξείδωσης είναι ξηρό οξυγόνο και στη δεύτερη είναι υδρατμοί. Και στις δύο περιπτώσεις, τα οξειδωτικά υλικά έρχονται σε επαφή με την ελεύθερη επιφάνεια του wafer πυριτίου, αντιδρούν με αυτήν και η διεπιφάνεια SiO₂-Si σιγά-σιγά κινείται "προς τα κάτω" μέσα στο wafer. Τελικά, περίπου το 42-44% του πάχους του οξειδίου που προκύπτει βρίσκεται κάτω από την αρχική επιφάνεια του wafer πυριτίου.

Η υγρή οξείδωση είναι πολλές φορές ταχύτερη από την ξηρή, έχει όμως το μειονέκτημα ότι απελευθερώνει αέριο υδρογόνο το οποίο διαχέεται γρήγορα και ξεφεύγει από το οξείδιο προκαλώντας του μια σχετική άποδυνάμωση και καθιστώντας το πιο πορώδες. Καθίσταται λοιπόν προφανές πως όταν το ζητούμενο είναι η ανάπτυξη ενός πολύ λεπτού και με ακρίβεια ελεγχόμενου οξειδίου, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση του διηλεκτρικού πύλης σε MOSFET, η μεθοδολογία θερμικής οξείδωσης που προκρίνεται είναι αυτή της ξηρής οξείδωσης. Η δεύτερη διαδικασία της ξηρής οξείδωσης δίνει οξείδια με καλύτερες φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες, όμως ο ρυθμός ανάπτυξης τους είναι σχετικά χαμηλός.

Όπως είδαμε, η υγρή οξείδωση μπορεί να επιτευχθεί διοχετεύοντας το O₂ μέσα σε λουτρό H₂O υψηλής καθαρότητας και στη συνέχεια μέσα στο φούρνο. Επίσης, μπορεί να γίνει και με απευθείας ροή ατμού πάνω στο οξειδούμενο Si.

Κατά τη διάρκεια της θερμικής οξείδωσης της επιφάνειας του Si ένα επιφανειακό στρώμα του Si αναλώνεται για τη δημιουργία του SiO₂. Ο υπολογισμός του πάχους του στρώματος αυτού βασίζεται στο συλλογισμό ότι ένα άτομο Si απαιτείται για τη δημιουργία ενός μορίου SiO₂.

$$\text{Οπότε έχουμε } N_{Si} \cdot X_{Si} = N_{SiO_2} \cdot X_{OX} \quad (1)$$

όπου N_{Si} , N_{SiO_2} : άτομα/cm³

και X_{Si} , X_{OX} : πάχη των Si και SiO₂

$$(1) \rightarrow X_{Si} = \frac{N_{SiO_2} \cdot X_{Ox}}{N_{Si}} \Leftrightarrow X_{Si} = 0,44 X_{Ox}$$

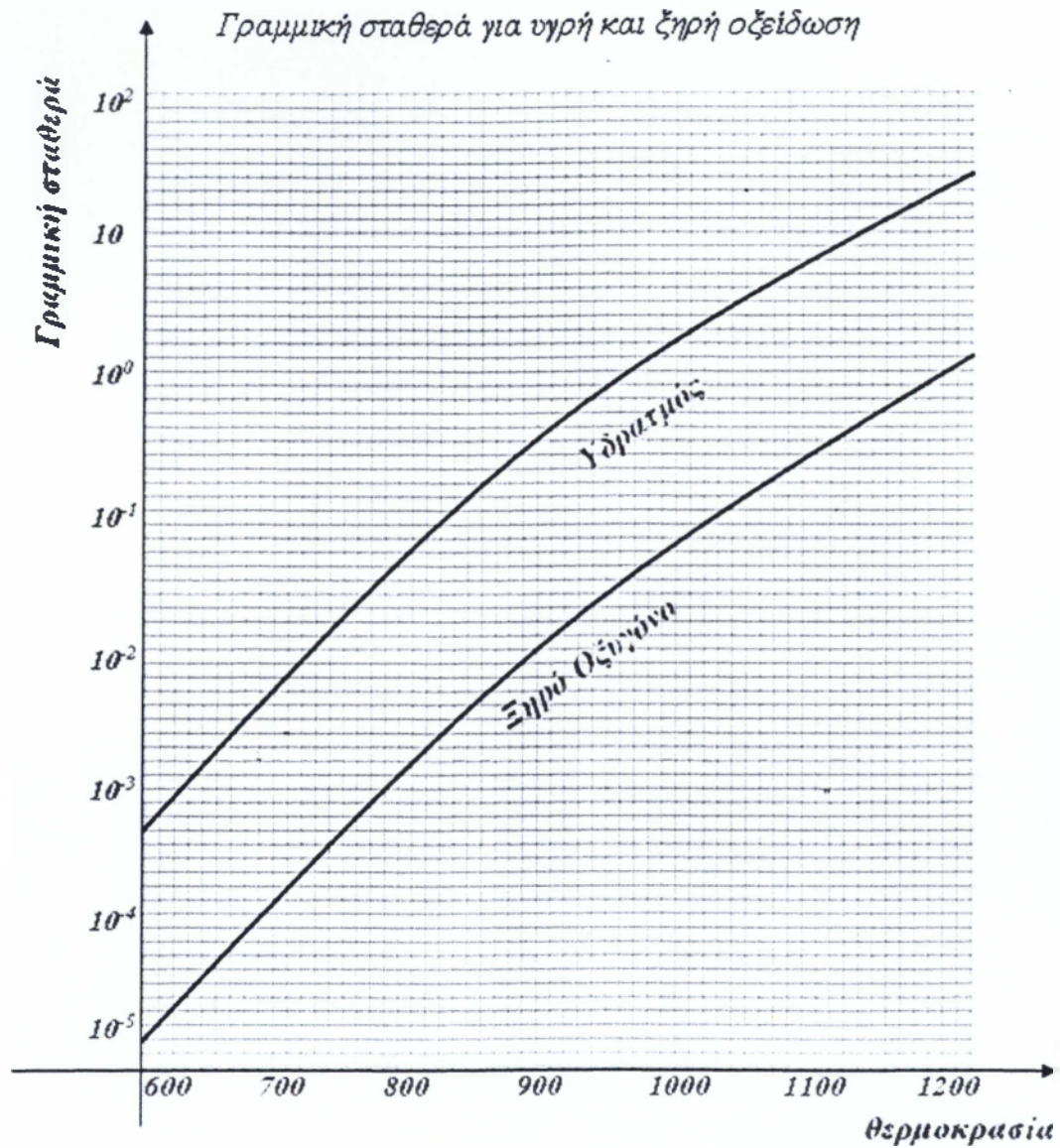
Επομένως, $X_{Si} = 0,44 X_{Ox}$

Το γεγονός ότι η ελεύθερη επιφάνεια του SiO_2 , που αναπτύχθηκε με θερμική οξείδωση, βρίσκεται σε μια υψομετρική διαφορά με την επιφάνεια του Si είναι κάτι που παρατηρούμε και στην πράξη. Αυτό είναι και η αιτία δημιουργίας προβλημάτων των επόμενων κατασκευαστικών βημάτων, όπως η εναπόθεση λεπτών στρωμάτων.

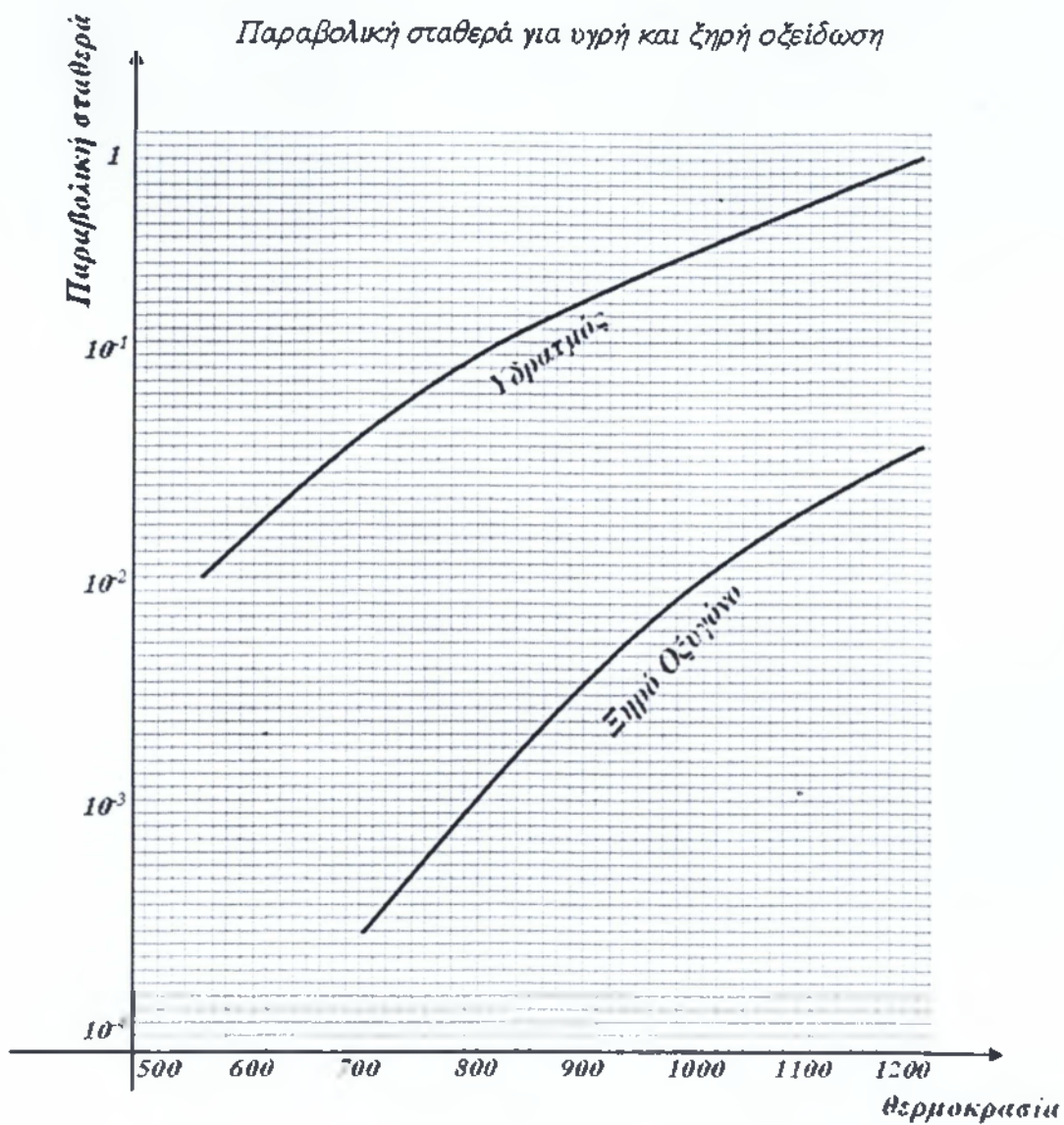


Σχήμα 3.2

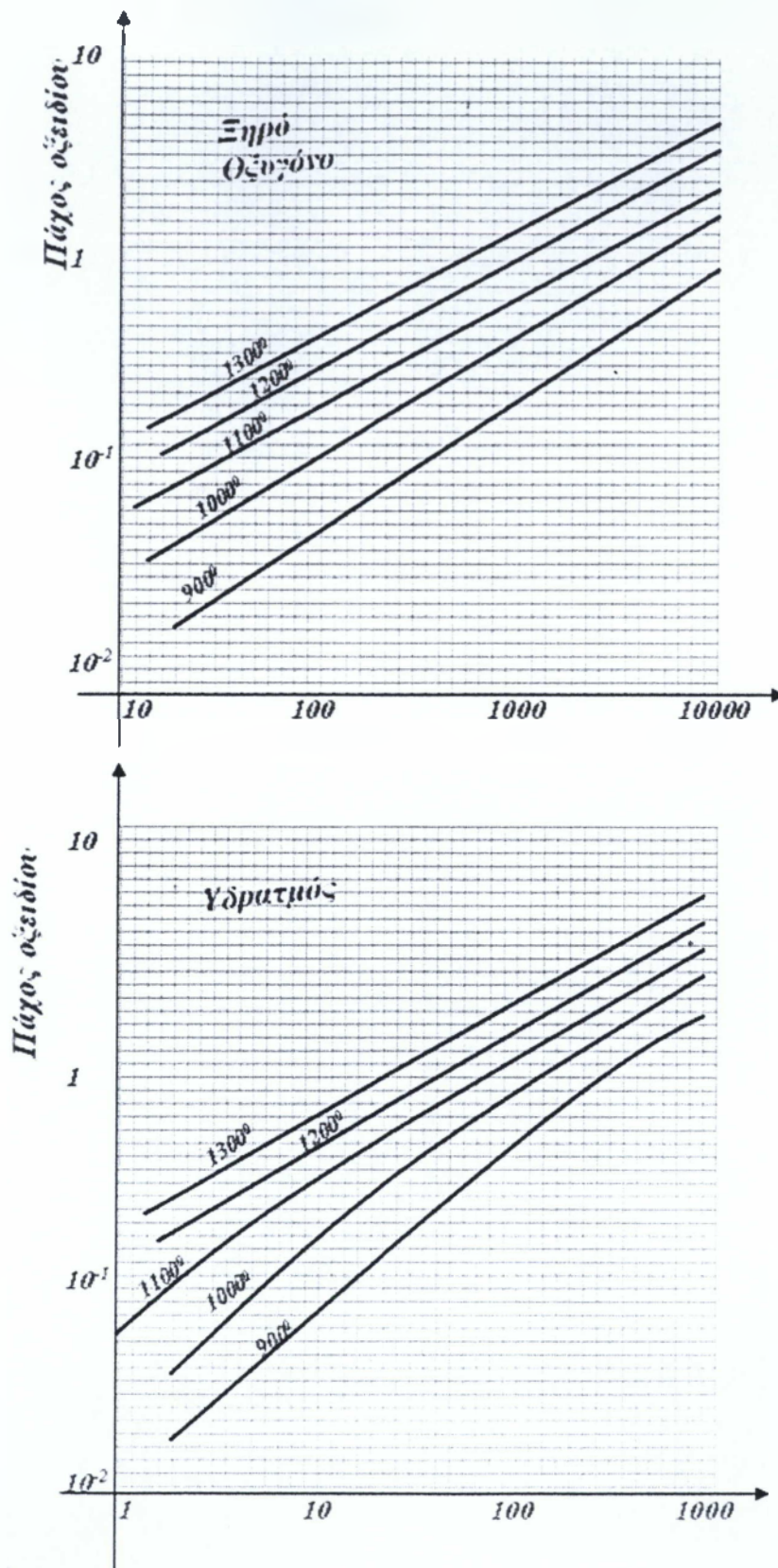
Ανάλωση επιφανειακού στρώματος του Si κατά την οξείδωσή του



Σχήμα 3.3
Γραμμική σταθερά για υγρή και ξηρή οξείδωση



Σχήμα 3.4
Παραβολική σταθερά για υγρή και ξηρή οξείδωση



Σχήμα 3.5
Πειραματικά αποτελέσματα θερμικής οξείδωσης πυριτίου

3.3 Η διαδικασία οξείδωσης

Γενικά

Η θερμική οξείδωση είναι μια από τις πιο βασικές τεχνικές ανάπτυξης οξειδίων. Συνίσταται στην οξείδωση της μεταλλικής επιφάνειας σε μια ατμόσφαιρα πλούσια σε οξυγόνο και σε υψηλή θερμοκρασία. Κατά τη θερμική οξείδωση ουσιαστικά καταναλώνεται ένα ποσοστό του υποστρώματος, δηλαδή το υμένιο του οξειδίου αναπτύσσεται σε βάθος εντός του μετάλλου καθώς το οξυγόνο διαχέεται κάτω από τη μεταλλική επιφάνεια. Όσο αυξάνεται το πάχος της οξειδωμένης στοιβάδας, η διάχυση του οξυγόνου στο υπόστρωμα γίνεται πιο δύσκολη οδηγώντας σε μια παραβολική σχέση ανάμεσα στο πάχος του οξειδίου και στο χρόνο οξείδωσης. Το πάχος του οξειδίου εξαρτάται επίσης από τη θερμοκρασία. Κατά κανόνα υψηλές θερμοκρασίες οδηγούν στο σχηματισμό κρυσταλλικών υμενίων μεγάλης πυκνότητας, ενώ σε χαμηλές προκύπτουν κυρίως άμορφα οξείδια. Η χρήση της τεχνικής αυτής περιορίζεται σε υποστρώματα που μπορούν να οξειδωθούν, π.χ. μέταλλα, και είναι τυπική για το σχηματισμό υμενίων που χρησιμοποιούνται για ηλεκτρική μόνωση.

Η διαδικασία της θερμικής οξείδωσης γίνεται σε φούρνο ανοιχτού σωλήνα όπως δείχνει και η σχηματική απεικόνιση (σχήμα 1) της διάταξης θερμικής οξείδωσης. Χρησιμοποιούνται αέρια υψηλής καθαρότητας τα οποία και περνάνε από μοριακά φίλτρα, ενώ η προέλευσή τους είναι συνήθως από υγρές πηγές.

Ο φούρνος της διάταξης αντιδραστήρα για τη θερμική οξείδωση, παρέχει θερμαντική ισχύ με τη βοήθεια ηλεκτρικής αντίστασης. Συγκεκριμένα, αποτελείται από τρεις θερμοκρασιακές ζώνες. Στην κεντρική θερμοκρασιακή ζώνη παρέχεται ο ακριβής έλεγχος της θερμοκρασίας, όπως και στις άλλες δύο που εξαρτώνται από αυτήν. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας είναι από τις πιο σημαντικές διαδικασίες. Το στοιχείο φούρνου πρέπει να είναι μικρής μάζας και να έχει την δυνατότητα να συνδυαστεί με ταχύτατα συστήματα ελέγχου, έτσι ώστε ο χρόνος που θα χρειαστεί για να αποκατασταθεί το σύστημα κατά την εισαγωγή ενός φορέα με περισσότερες από 100 πολλές φορές πλακέτες πυριτίου να είναι όσο το δυνατόν ελάχιστος.

Ο κυλινδρικός σωλήνας είναι φτιαγμένος από τηγμένο χαλαζία (Quartz tube) που παρουσιάζει την ιδιομορφία ότι από το ένα άκρο είναι ανοιχτός, ενώ από το άλλο φέρει ακροφύσιο για την είσοδο του αερίου O_2 και των υδρατμών. Ο κυλινδρικός σωλήνας τοποθετείται μέσα στον φούρνο. Τα ανοίγματα μεταξύ του σωλήνα και του μονωτικού καλύμματος στις άκρες του φούρνου σφραγίζονται από μονωτικό υλικό έτσι ώστε να αποφευχθούν απώλειες θερμότητας. Το μονωτικό αυτό υλικό συνήθως είναι από λεπτές ίνες αλουμίνας.

Ο φορέας για την οξείδωση των δισκίων πυριτίου είναι και αυτός από τηγμένο χαλαζία και τοποθετείται πάνω σε μια βάση από ρόδες. Σε αυτόν τον φορέα τοποθετούνται οι πλακέτες πυριτίου. Τέλος έχει κατάλληλες υποδοχές για πολλά δισκία. Η εισαγωγή του φορέα στον κυλινδρικό σωλήνα οξείδωσης γίνεται από ένα αυτόματο σύστημα ελέγχου της ταχύτητας εισαγωγής και θέσης μέσα στον σωλήνα. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία της οξείδωσης ο φορέας αυτός απομακρύνεται πάλι με τη βοήθεια του αυτόματου συστήματος έξω από τον φούρνο.

Τα συστήματα ελέγχου και σταθεροποίησης της θερμοκρασίας (temperature controller) είναι από τηγμένο χαλαζία και αυτά. Υπάρχουν και κάποια συστήματα για

τον έλεγχο της ροής των οξειδωτικών αερίων μέσα στον φούρνο. Τα καθαριστικά είναι το άζωτο, το ήλιο και το αργό. Για τη δημιουργία υδρατμών υπάρχουν πολλοί τρόποι, με πιο διαδεδομένο και τα κύριο λόγο πιο εύκολο το βράσιμο απονισμένου νερού μέσα σε φιάλη από τηγμένο χαλαζία. Για να πετύχουμε οξειδώσεις μεγάλης καθαρότητας, οι υδρατμοί δημιουργούνται μέσα στο σωλήνα με κάψιμο του υδρογόνου μέσα σε οξυγόνο.

Αν στο ρεύμα του οξειδωτικού αερίου περιληφθεί μικρή ποσότητα HCl, τότε οι ηλεκτρικές ιδιότητες του οξειδίου μπορούν να βελτιωθούν. Το HCl έχει σαν ρόλο να καθαρίζει το αναπτυσσόμενο οξείδιο και τον σωλήνα οξείδωσης από τη μόλυνση με ιόντα νατρίου, τα οποία αυξάνουν την πυκνότητα του φορτίου της διεπιφάνειας προκαλώντας δυσχέρειες κάνοντας έτσι επιθυμητή τη διατήρηση της μόλυνσης από ιόντα του νατρίου σε όσο το δυνατόν μικρότερη στάθμη.

Η διαδικασία της οξείδωσης περιλαμβάνει έναν κύκλο από ξηρή, υγρή και πάλι ξηρή οξείδωση. Το οξείδιο αναπτύσσεται κατά τη διάρκεια της υγρής οξείδωσης, το οποίο γίνεται πυκνότερο κατά την ξηρή οξείδωση. Η υγρή είναι ταχύτερη διαδικασία από αυτήν της ξηρής, αλλά τα παρασκευαζόμενα οξείδια δεν είναι πολύ καλής ποιότητας, λόγω των προσμίξεων και των ατελειών που αποκτούν από τους υδρατμούς. Η ταχύτητα της οξείδωσης αυξάνει με την αύξηση της μερικής πίεσης των ατμών. Η δεύτερη διαδικασία (ξηρή οξείδωση) δίνει οξείδια με καλύτερες φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες όμως, ο ρυθμός ανάπτυξής τους είναι σχετικά χαμηλός.

3.4 Ανακατανομή των προσμίξεων κατά την οξείδωση

Η συγκέντρωση των προσμίξεων μέσα στο πυρίτιο και κοντά στην διεπιφάνεια πυριτίου- οξειδίου μεταβάλλεται κατά την ανάπτυξη ενός θερμικού οξειδίου πάνω σε ένα υπόστρωμα νιοπαρισμένου πυριτίου. Αυτή η ιδιότητα εξαρτάται από την ικανότητα των προσμίξεων να ενσωματώνονται μέσα στο πυρίτιο όσο αυτό αναπτύσσεται.

Ο συντελεστής κατανομής ή διαχωρισμού υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$m = \frac{\text{συγκέντρωση των προσμίξεων στο πυρίτιο στην κατάσταση ισορροπίας}}{\text{συγκέντρωση των προσμίξεων στο SiO}_2 \text{ στην κατάσταση ισορροπίας}}$

	Τιμή του m	Συντελεστής διαχωρισμού στο SiO ₂	Απορριψη πρόσμιξης / συγκέντρωση της πρόσμιξης
Βόριο	0,3	χαμηλός	Διόγκωση συγκέντρωσης πρόσμιξης
Φωσφορος	10	χαμηλός	Απόρριψη πρόσμιξης
Αντιμόνιο	10	χαμηλός	Απόρριψη πρόσμιξης
Αρσενικό	10	χαμηλός	Απόρριψη πρόσμιξης
Γάλλιο	20	υψηλός	

Πίνακας 3.1

Για τις τιμές του m διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις:

- Για $m > 1$, με χαμηλό συντελεστή διάχυσης στο SiO_2 . Το αποτέλεσμα είναι να απορριφθεί η πρόσμιξη από το αναπτυσσόμενο οξείδιο και απότομη αύξηση της συγκέντρωσης της μέσα στο πυρίτιο κοντά στην διεπιφάνεια.
- Για $m < 1$, με χαμηλό συντελεστή διάχυσης στο SiO_2 . Το αποτέλεσμα είναι να διογκωθεί η συγκέντρωση της πρόσμιξης μέσα στο οξείδιο και απογύμνωση από προσμίξεις πυριτίου κοντά στην επιφάνεια.

3.5 Μετρήσεις του πάχους του οξειδίου

Η πιο απλή μέθοδος μέτρησης του πάχους του οξειδίου είναι η οπτική μέθοδος, δηλαδή η παρατήρηση του κάτω από λευκό φωτισμό. Αν το χρώμα του οξειδίου είναι ομοιόμορφο, τότε και το πάχος του είναι ομοιόμορφο. Η παρατήρηση ενός μόνο χρώματος έχει να κάνει με την απουσία κάποιων συχνοτήτων, καθώς το φως ανακλάται από τη διεπιφάνεια οξειδίου-αέρα. Για να συμβεί όμως αυτή η συμβολή πρέπει να ισχύει ο εξής τύπος: $2d = \frac{(2k-1) \cdot \lambda}{2}$.

Όπου: d το πάχος του υμενίου, $k=1,2,3,\dots$, και λ το μήκος κύματος.

Η μέθοδος αυτή δεν είναι τόσο ακριβείας, για τον λόγο ότι εμφανίζεται το ίδιο χρώμα για διάφορα πάχη του οξειδίου, κάτι που δεν είναι και τόσο χρήσιμο καθώς αναζητούμε πάντα οξείδια των οποίων, το πάχος να έχει προσδιοριστεί με ακρίβεια.

Μια δεύτερη μέθοδος μέτρησης του πάχους του οξειδίου είναι αυτή με τους κροσσούς Fizeau. Έτσι, με αυτήν τη μέθοδο το οξείδιο σχηματίζει ένα σκαλοπάτι ή μια σφήνα σε ένα τμήμα του υποστρώματος το οποίο καλύπτεται με αλουμίνιο. Για την ύπαρξη μονοχρωματικού φωτισμού χρησιμοποιούμε λάμπα με ατμούς νατρίου. Ο τύπος που περιγράφει και υπολογίζει το πάχος του οξειδίου με κροσσούς Fizeau, είναι ο εξής: $x_{\text{OX}} = N \times \frac{\lambda}{2}$ Όπου: N είναι ο αριθμός των κροσσών και λ το μήκος κύματος του μονοχρωματικού φωτός (5890 E).

Η πιο ακριβής μέθοδος για τη μέτρηση του πάχους του οξειδίου βασίζεται στην ολίσθηση φάσης. Αυτό συμβαίνει όταν το μονοχρωματικό φως ανακλάται από την επιφάνεια του οξειδίου και από την υποκείμενη της επιφάνειας του πυριτίου. Η μέθοδος αυτή ονομάζεται ελλειψομετρία και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετρήσει το πάχος με μεγάλη ακρίβεια σε μια κλίμακα προσέγγιση 12400 E.

Όπως είδαμε, το πάχος του οξειδίου έχει πολύ μεγάλη σημασία για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα υψηλής πυκνότητας (VLSI) και την εξέλιξή τους. Συγκεκριμένα, οι εξελίξεις αυτές απαιτούν την ανάπτυξη πολύ λεπτών οξειδίων υψηλής ποιότητας τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σαν διηλεκτρικά πύλης (gate-oxide) των MOSFET.

Κάτω από το οξειδίο της πύλης σχηματίζεται ο αγώγιμος διάυλος από φορείς μειονότητας που συνδέει την πηγή με την υποδοχή του MOSFET, αφού πολωθεί η διάταξη σε κατάσταση αντιστροφής. Η ποιότητα του οξειδίου πύλης και κυρίως της διεπιφάνειας Si-SiO₂ επηρεάζει τις χαρακτηριστικές των MOSFET.

Το πολύ μικρό πάχος όμως δεν είναι το μόνο. Τα οξειδία αυτά θα πρέπει να έχουν και κάποιες άλλες ιδιότητες όπως:

- καλή ομοιογένεια
- υψηλή τάση κατάρρευσης
- μικρή πυκνότητα φορτίων
- μικρή πυκνότητα καταστάσεων στη διεπιφάνεια Si-SiO₂

Τα χαρακτηριστικά των λεπτών οξειδίων επηρεάζονται σημαντικά σε περίπτωση υγρασίας κατά την ανάπτυξή τους. Γι' αυτό η ξηρή οξείδωση είναι η καταλληλότερη μέθοδος παρασκευής τους.

4

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

Διάχυση και εμφύτευση ιόντων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΔΙΑΧΥΣΗ & ΕΜΦΥΤΕΥΣΗ ΙΟΝΤΩΝ

Όπως είναι γνωστό, η εισαγωγή προσμίξεων σε ένα ημιαγωγό επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις ηλεκτρικές του ιδιότητες. Μερικές από αυτές οι οποίες αλλάζουν είναι η ηλεκτρική αγωγιμότητα, η συγκέντρωση προσμίξεων, ο τύπος του ημιαγωγού, η ευκινησία των φορέων, ο χρόνος ζωής του πλεονάσματος φορέων κ.α.

Οι πιο κατάλληλες προσμίξεις που μπορούν να ικανοποιήσουν τον παραπάνω σκοπό είναι τα στοιχεία των ομάδων III και V του περιοδικού πίνακα, οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν ενεργειακές στάθμες κοντά στις ζώνες σθένους και αγωγιμότητας αντίστοιχα του Si.

Η προσθήκη προσμίξεων για την παραγωγή δισκίων n ή p τύπου Si γίνεται, όπως προαναφέραμε, κατά τη διάρκεια της κρυσταλλικής ανάπτυξης. Όμως, για την κατασκευή διακριτών ή ολοκληρωμένων ημιαγωγικών διατάξεων συχνά απαιτείται η μετατροπή περιοχών του κρυστάλλου στο επιθυμητό βάθος, από p-τύπου σε n και αντίστροφα. Αυτό γίνεται με την εισαγωγή επιπλέον προσμίξεων επιλεγμένων συγκεντρώσεων με την ιδιότητα της αντιστάθμισης (compensation). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ως "μάσκα" στην επιφάνεια του Si, το SiO₂ με τα κατάλληλα ανοίγματα (παράθυρα) στις επιλεγμένες περιοχές της επιφάνειας του Si.

Η ιοντική εμφύτευση είναι η εισαγωγή ιονισμένων προσμίξεων μέσα σ' ένα υπόστρωμα, όπως ο κρύσταλλος Si, με τη βοήθεια συστήματος ιοντικού εμφυτευτή (ion implantation) που παράγει δέσμη ιόντων προσμίξεων. Με τη βοήθεια της εμφύτευσης ιόντων σε ένα κρύσταλλο είναι δυνατή η αλλαγή των ηλεκτρικών του ιδιοτήτων καθώς επίσης και η επιλεκτική μετατροπή του τύπου του ημιαγωγού (n ή p) μέσω αντιστάθμισης για τις ανάγκες σύνθετων διατάξεων (MOSFET, διπολικά transistors κ.α.). Τυπικές τιμές ενεργειών ενός ιοντικού εμφυτευτή είναι 30-300 keV, ενώ οι δόσεις των ιόντων μπορεί να κυμαίνονται από 10¹⁰-10¹⁷ ιόντα/cm².

Δόση είναι ο αριθμός των επιταχυνόμενων ιόντων ανά cm² επιφάνειας του ημιαγωγού. Σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ιοντικής εμφύτευσης είναι ο έλεγχος των προσμίξεων με ικανοποιητική ακρίβεια και αξιοπιστία καθώς και οι χαμηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται σε σχέση με τη θερμική διάχυση. Μειονεκτήματα είναι οι "καταστροφές" που προκαλούνται στο πλέγμα του κρυστάλλου, οι οποίες επηρεάζουν τοπικά την περιοδικότητά του.

1.1 Διάχυση

Διάχυση, η (αγγλ. και γαλλ. Diffusion)-(φυσική-χημεία). Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο δύο ρευστά που βρίσκονται σε επαφή διεισδύουν βαθμιαία το ένα μέσα στο άλλο και διασκορπίζονται μέχρι να αναμιχθούν πλήρως και το σύστημα να αποκτήσει τελικά τα χαρακτηριστικά του ομοιογενούς μίγματος. Πρόκειται, επομένως, για ένα είδος μεταφορικής ύλης, που ενεργοποιείται θερμικά και είναι αποτέλεσμα της μετακίνησης των μορίων ή των ατόμων λόγω των τυχαίων κινήσεών τους.

Κατά το φαινόμενο της διάχυσης η μεταφορά της ύλης πραγματοποιείται σε κλίμακα σωματιδίων και όχι μαζικά. Αυτή η μεταφορά είναι αποτέλεσμα της αντίδρασης του μέσου σε κάθε μεταβολή της κατανομής των συγκεντρώσεων μέσα σε αυτό. Μια τέτοια μεταβολή μπορεί να προκύψει από εισροή ή απομάκρυνση υλικού κατά την επαφή του με ένα άλλο μέσο (από την διεπιφάνεια) ή να έχει την μορφή της εξάτμισης, της εξάχνωσης, της συμπύκνωσης, της διάλυσης κ.α. Στην κατάσταση ισορροπίας συνεχίζονται στην πραγματικότητα οι ανταλλαγές ύλης ή ατόμων και το αποτέλεσμά τους είναι συνολικά μηδενικό. Στην περίπτωση αυτή έχουμε αυτοδιάχυση.

4.1.1 Η θεωρία της διάχυσης

Ο πρώτος νόμος του Fick

Η βασική εξίσωση που διέπει το φαινόμενο της διάχυσης είναι οι νόμοι του Φικ (Fick), σύμφωνα με τους οποίους υπάρχει αναλογία στον ρυθμό ροής της διαχεόμενης ουσίας και στην κλίση (grad) της συγκέντρωσης. Δηλαδή, αν \bar{J} είναι η ποσότητα της ουσίας που διαχέεται δια μέσου μιας μοναδιαίας επιφάνειας αναφοράς στην μονάδα του χρόνου, αν x είναι ο άξονας συντεταγμένων κάθετος προς την παραπάνω επιφάνεια αναφοράς και αν C η συγκέντρωση της ουσίας (εκφρασμένη σε μολ ανά κυβικό μέτρο: moles/m³), τότε ισχύει η σχέση

$$\bar{J} = -D \cdot \text{grad}C \text{ ή } J = -D \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x}\right) \quad (1)$$

Το αρνητικό πρόσημο στην παραπάνω σχέση δείχνει ότι η ύλη ρέει από την περιοχή υψηλών προς την περιοχή χαμηλών συγκεντρώσεων.

Όπου :

\bar{J} →	Η καθαρή ροή των ατόμων (σε atoms/m ² .s)
$\frac{\partial C}{\partial x}$ →	Η βαθμωση της συγκέντρωσης διαχεόμενων ατόμων (σε atoms/m ³ .s)
D →	Ο συντελεστής διάχυσης (σε m ² /s), ο οποίος εκφράζει την ικανότητα των ατόμων προς διάχυση και διέπεται από την σχέση $D = D_0 \cdot e^{-q/kT}$

k →	Η σταθερά Boltzmann (= 1.38×10^{-23} J/atom K)
q →	Η ενέργεια ενεργοποίησης διαχεόμενου ατόμου (σε J/mol)
T →	Η απόλυτη θερμοκρασία (σε K) του συστήματος διάχυσης
R →	Η παγκόσμια σταθερά των αερίων (=1.987 J/mol K)
D₀ →	Χαρακτηριστική σταθερά του συστήματος διάχυσης

Πίνακας 4.1

Στην περίπτωση των αερίων οι τιμές των συντελεστών διάχυσης (D) κυμαίνονται μεταξύ 10^{-4} και 10^{-5} m²/sec. Εξαρτώνται από τη φύση των υλικών που συμμετέχουν στο φαινόμενο, μεταβάλλονται ελάχιστα από τη συγκέντρωση της διαχεόμενης ουσίας, είναι ανάλογοι προς το ιξώδες, αντιστρόφως ανάλογοι προς την πίεση και αυξάνονται γρήγορα (εκθετικά) με την αύξηση της θερμοκρασίας.

$$D_{AB} \propto \frac{T^{3/2}}{P} \rightarrow \frac{D_{AB,1}}{D_{AB,2}} = \frac{P_2}{P_1} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{3/2}$$

Στα υγρά, ο συντελεστής διάχυσης (D) κυμαίνεται μεταξύ 10^{-9} και 10^{-10} m²/sec και μειώνεται όταν αυξάνεται το ιξώδες.

$$D_{H_2O-ΑΕΡΑΣ} = 1.87 \times 10^{-10} \frac{T^{2.072}}{P} \text{ (m}^2/\text{s)} \quad 280\text{K} < T < 450\text{K}$$

Ο δεύτερος νόμος του Fick

Με βάση της αρχή διατήρησης της ύλης έχουμε :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{\partial J}{\partial x} \quad (2), \text{ η οποία σε συνδυασμό με την } J = -D \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right), \text{ προκύπτει:}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Όπου:

- J** → Η ποσότητα της ύλης που διέρχεται ανά μονάδα επιφάνειας
- $\frac{\partial C}{\partial x}$ → Η μεταβολή της συγκέντρωσης ανά μονάδα απόστασης
- D** → Η σταθερά διάχυσης (η οποία μπορεί να είναι διαφορετική από σημείο σε σημείο),
- $\frac{\partial C}{\partial t}$ → Εκφράζει το ρυθμό μεταβολής της συγκέντρωσης σε ένα σημείο
- $\frac{\partial J}{\partial x}$ → Εκφράζει τη ροή ύλης από ή προς το συγκεκριμένο σημείο
- C** → Η συγκέντρωση διαχεομένων ατόμων
- x** → Η απόσταση

t → Ο χρόνος

Πίνακας 4.2

Κάθε σημείο του χώρου μπορεί να έχει μια διαφορετική ροή. Ο ρυθμός μεταβολής της συγκέντρωσης είναι ανάλογος της διαφοράς της ροής από το ένα μέρος του χώρου σε ένα άλλο μέρος του χώρου. Το (-) εκφράζει ότι όταν υπάρχει ροή τέτοια που αποσπά ύλη από ένα σημείο, τότε η συγκέντρωση της ύλης σε αυτό το σημείο μειώνεται, ενώ αντίστροφα όταν η ροή προσθέτει ύλη σε ένα σημείο, τότε η συγκέντρωση αυξάνεται.

Από τον δεύτερο νόμο του *Fick* και με την επίλυσή της με αρχικές και συνοριακές συνθήκες προκύπτουν δύο βασικά μοντέλα διάχυσης με σταθερό *D*. Η πρώτη αφορά την περίπτωση κατά την οποία το υπόστρωμα του ημιαγωγού από μια συνεχώς αναπληρούμενη σταθερά συγκέντρωσης ατόμων πρόσμιξης και ονομάζεται *Διάχυση με σταθερή επιφανειακή συγκέντρωση* και η δεύτερη αφορά την περίπτωση κατά την οποία σαν πηγή διάχυσης χρησιμοποιείται ένα στρώμα ατόμων πρόσμιξης που έχει αποθεθεί πάνω στο υπόστρωμα του πυριτίου και ονομάζεται *Διάχυση σταθερού συνολικού αριθμού προσμίξεων*.

Διάχυση με σταθερή επιφανειακή συγκέντρωση

Αρχικές συνθήκες : $t=0, C(x, t)=0$

Συνοριακές συνθήκες : $C(0,t)=0, C(x=\infty, t)=0$

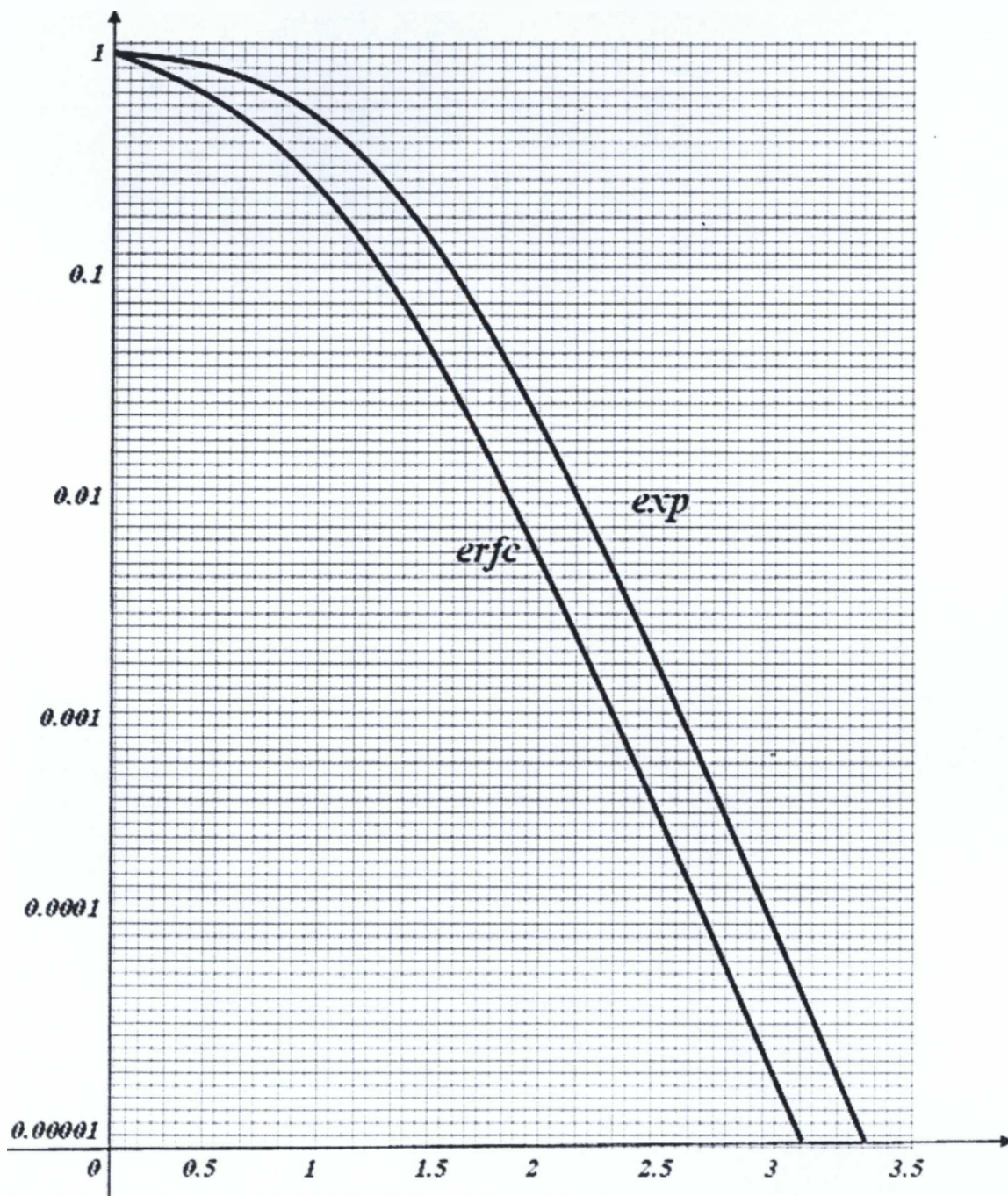
$$\text{Οπότε έχουμε: } \frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \Leftrightarrow C(x, t) = C_s \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right)$$

Όπου erfc : συνάρτηση σφάλματος $\operatorname{erfc} \cong \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{\pi x}}$

Όπου:

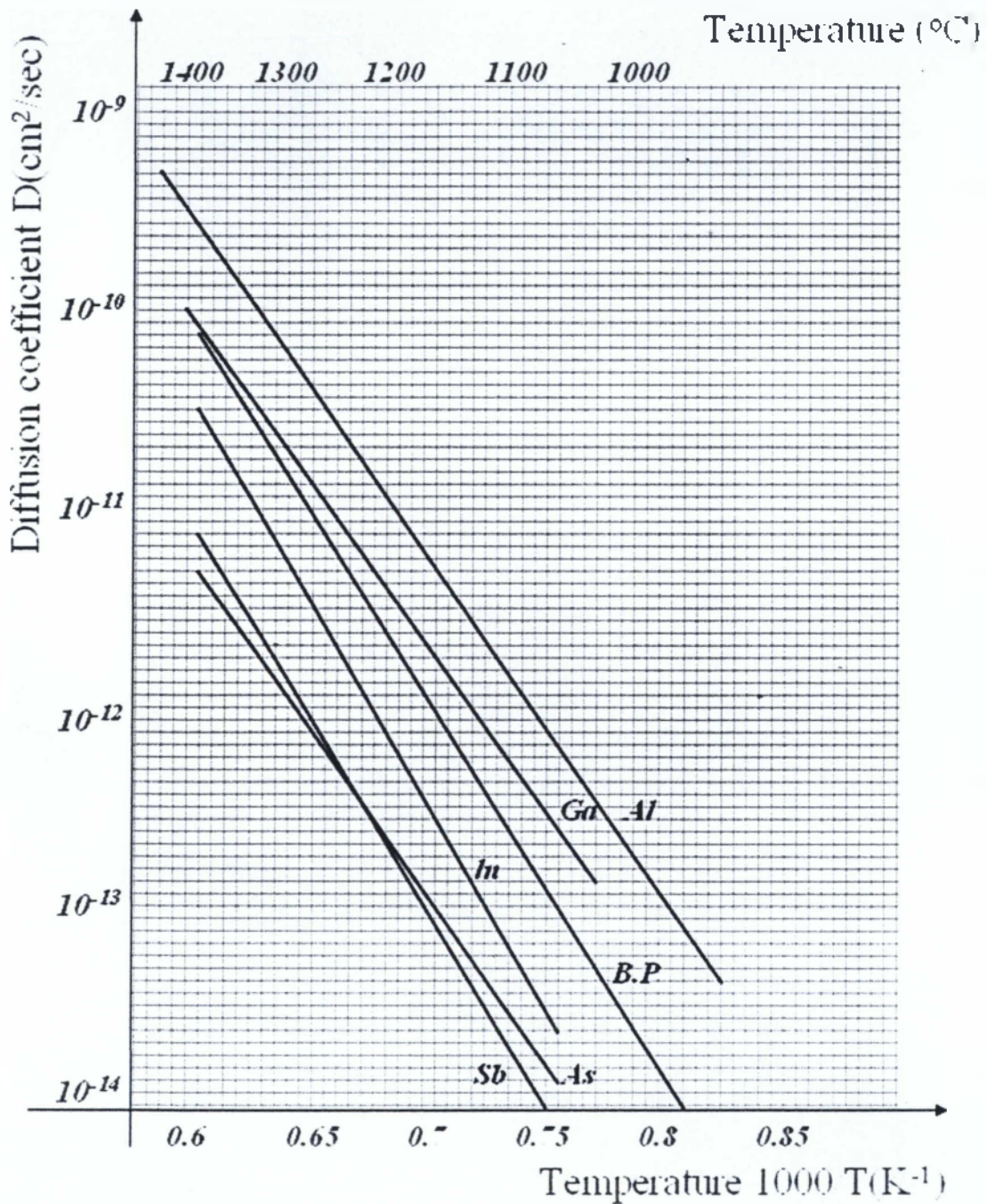
- $C_x \rightarrow$ Η συγκέντρωση των προσμίξεων στο σημείο x
- $t \rightarrow$ Ο χρόνος
- $C_s \rightarrow$ Η συγκέντρωση των προσμίξεων στην επιφάνεια του Si
- $D \rightarrow$ Συντελεστής Διάχυσης

Πίνακας 4.3



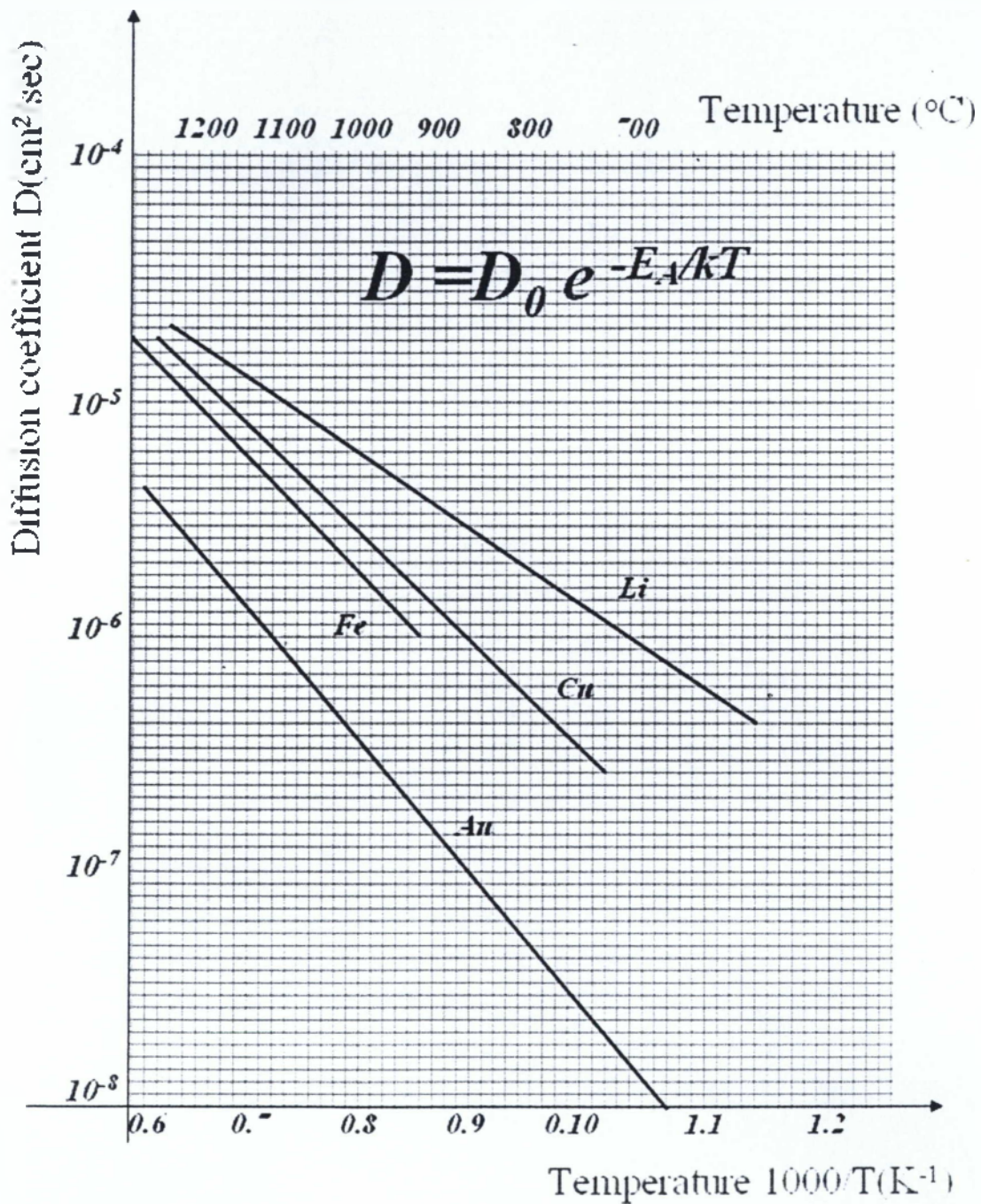
Σχήμα 4.1

Συμπληρωματική συνάρτηση σφάλματος και γκαουσιανή κατανομή



Σχήμα 4.2

Συντελεστές διάχυσης προσμίξεων στο Si



Σχήμα 4.3

Συντελεστές διάχυσης προσμίξεων στο Si

Διάχυση σταθερού συνολικού αριθμού προσμίξεων

Οι αρχικές και συνοριακές συνθήκες του προβλήματος είναι:

$$C(x,t)=0$$

$$Q_T = \int_0^{\infty} C(x,t)dx \text{ και } C(\infty,t)=0$$

$$\text{Οπότε έχουμε } C(x,t) = \frac{Q_T}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(\frac{-x^2}{4Dt}\right) \xrightarrow{x=0} C(0,t) = \frac{Q_T}{\sqrt{\pi Dt}}$$

Όπου Q_T ο συνολικός αριθμός ατόμων προσμίξεων ανά cm^3 .

Σύμφωνα με τη μορφή της λύσης οι προσμίξεις υπακούουν σε Γκαουσιανή κατανομή. Η διάχυση στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων πραγματοποιείται σε δύο φάσεις τις οποίες και θα δούμε στη συνέχεια.

4.1.2 Η διαδικασία της διάχυσης

Η πρακτική διαδικασία της διάχυσης πραγματοποιείται σε ειδικούς φούρνους χαλαζία με ροή αδρανούς αερίου (N_2 , Ar) και θερμοκρασίες μεταξύ $800\text{-}1200\text{ }^\circ\text{C}$.

Η διάταξη και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται είναι παρόμοιος με αυτή της θερμικής οξειδωσης με την προσθήκη εισόδων για την περίπτωση αέριων προσμίξεων. Τα δισκία Si τοποθετούνται παράλληλα σε ειδικές θήκες και ανάμεσά τους τοποθετούνται οι πηγές με τα επιθυμητά στοιχεία προσμίξεων.

Στην περίπτωση *n*-τύπου, συνηθέστερες προσμίξεις είναι P και As σε στερεά μορφή ενώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και υγρές ή αέριες.

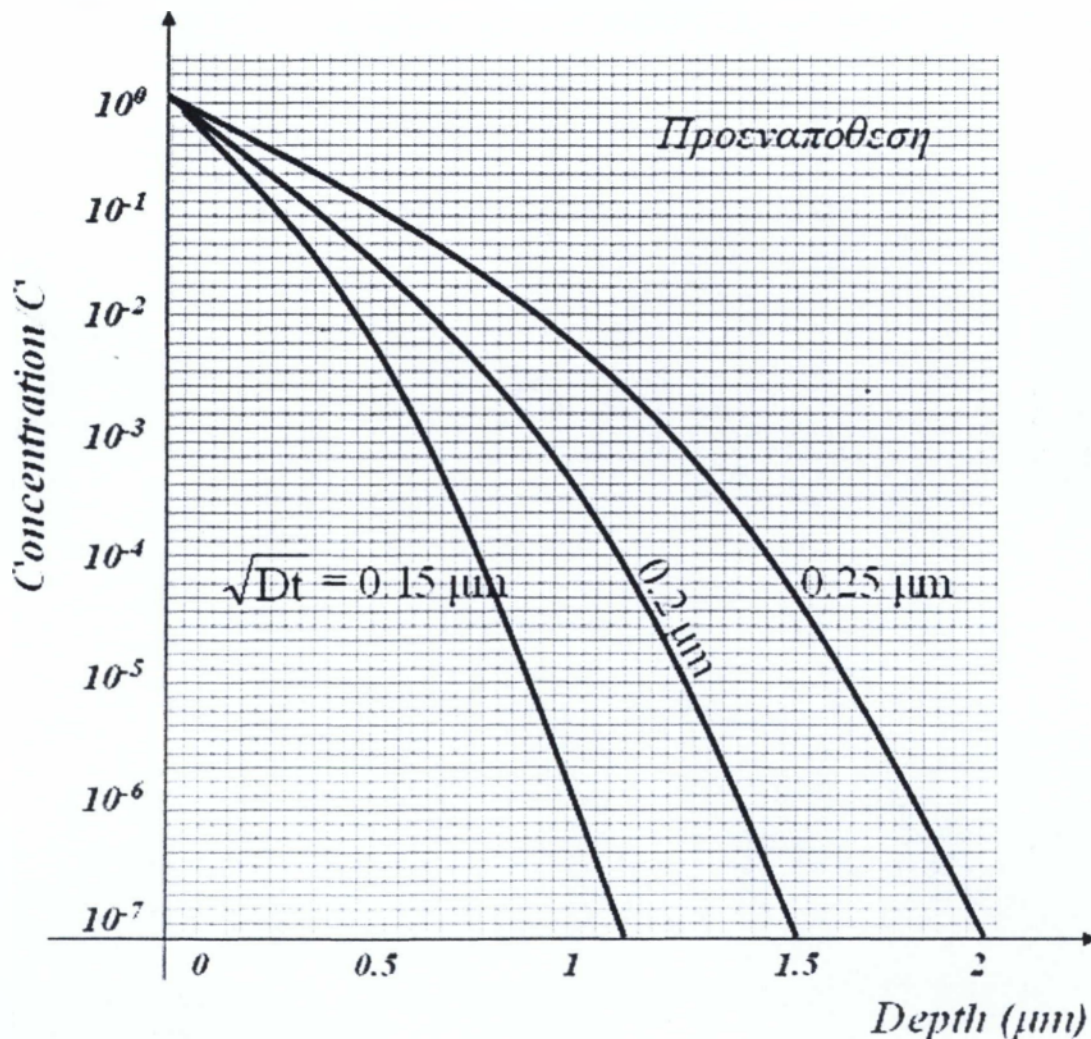
Στην περίπτωση *p*-τύπου με προσμίξεις B, χρησιμοποιείται συνήθως το BN (στερεό).

Τα άτομα των προσμίξεων φθάνουν στην επιφάνεια του Si , ή κοντά σε αυτήν, με εναπόθεση από την αέρια φάση λόγω υψηλής θερμοκρασίας των πηγών και στη συνέχεια εισέρχονται στο εσωτερικό του ημιαγωγού με τη βοήθεια της υψηλής θερμικής τους κίνησης όπου καταλαμβάνουν τελικά πλεγματικές θέσεις. Οι βασικοί μηχανισμοί εισαγωγής των προσμίξεων στο κρυσταλλικό πλέγμα είναι δύο: η διάχυση μέσω **διακένων** (vacancies) και η διάχυση μέσω **διαπλεγματικών θέσεων** (interstitials). **Διάχυση διαπλεγματικών θέσεων (interstitial diffusion)** είναι η μεταφορά ξένων ατόμων σε διαπλεγματικές θέσεις του μητρικού κρυσταλλικού πλέγματος, ενώ **διάχυση αντικατάστασης ή διάχυση κενών (substitutional diffusion)** είναι η μεταφορά ξένων ατόμων ή κενών (οπών) σε πλεγματικές θέσεις του μητρικού

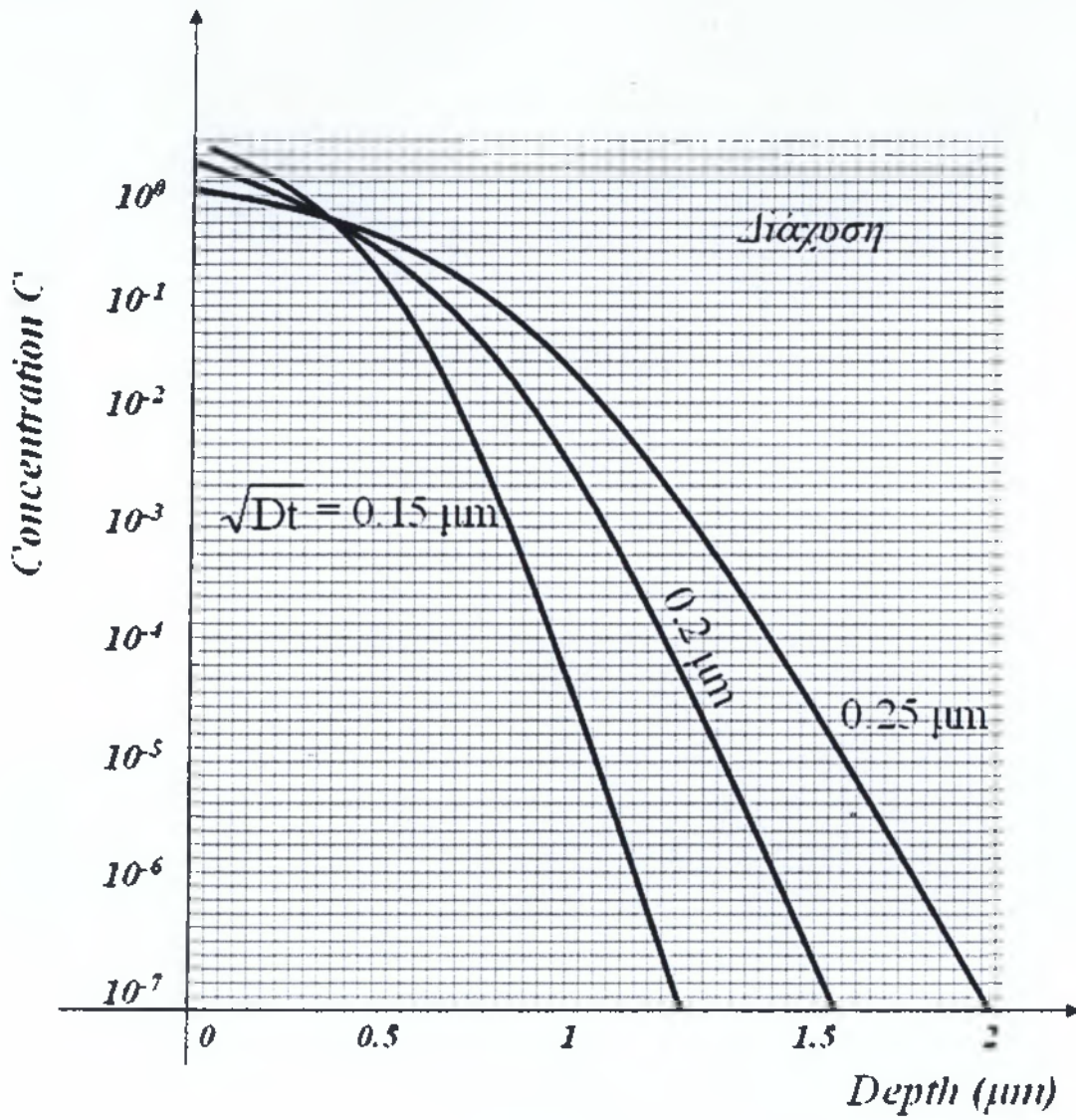
κρυσταλλικού πλέγματος. Στην περίπτωση αυτή, το μέγεθος ξένων και μητρικών ατόμων είναι περίπου ίδιο και ο μηχανισμός διευκολύνεται πολύ από την ύπαρξη κενών στο αρχικό πλέγμα. Γενικά, κατά την εξέλιξη της διάχυσης παρατηρείται ροή ατόμων και κενών.

Όπως αναφέρθηκε, για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων η διάχυση πραγματοποιείται συνήθως σε δύο βήματα.

1. Αρχικά σχηματίζεται ένα στρώμα διάχυσης με συνθήκες σταθερής συγκέντρωσης προσμίξεων στην επιφάνεια. Το βήμα αυτό καλείται **προεναπόθεση** (predeposition).
2. Στη συνέχεια η διάχυση γίνεται με συνθήκη σταθερού συνολικού αριθμού προσμίξεων στην επιφάνεια και καλείται διάχυση **ανακατανομής** (redistribution ή drive-in).



Σχήμα 4.4
Προεναπόθεση



Σχήμα 4.5
Διάχυση

4.1.3 Οξείδωση κατά την διάχυση

Η διαδικασία της διάχυσης συνοδεύεται συνήθως από οξείδωση. Ο λόγος που γίνεται αυτό είναι για να δημιουργηθεί ένα στρώμα απομόνωσης που θα δρα σαν προστατευτικό για τις επόμενες διαδικασίες. Έτσι, αναπτύσσεται μια στοιβάδα οξειδίου του πυριτίου, η οποία και θα χρησιμοποιηθεί για τον παραπάνω σκοπό. Η οξείδωση που συνοδεύει την διαδικασία της διάχυσης, μετατοπίζει την επιφάνεια του πυριτίου καθώς ένα μέρος αυτού σταματάει να υπάρχει. Ένας τρόπος για την μείωση της επιφανειακής συγκέντρωσης μέσα στο πυρίτιο, είναι η χρήση βορίου, το οποίο έχει σαν ιδιότητα να μπορεί να ενσωματωθεί σχετικά εύκολα μέσα στο οξείδιο που αναπτύσσεται. Όταν θα αρχίσει το βόριο να ανακατανέμεται θα χρησιμοποιήσουμε αδρανές οξυγόνο και έπειτα έναν κύκλο από υδρατμούς για να πετύχουμε το επιθυμητό πάχος του οξειδίου. Αν δεν χρησιμοποιήσουμε τα παραπάνω, τότε κατά το στάδιο της ανακατανομής του βορίου στην υγρά οξείδωση και με τη γρήγορη ανάπτυξη του οξειδίου μπορεί να απομακρυνθεί ένα πολύ μεγάλο μέρος του βορίου της προεναπόθεσης. Κατά τη διάρκεια της οξείδωσης ο φωσφόρος αποβάλλεται από το οξείδιο, κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της επιφανειακής συγκέντρωσης στην επιφάνεια του πυριτίου (snow-plow).

4.1.4 Μάσκες διάχυσης

Για την κατασκευή διακριτών ή ολοκληρωμένων ημιαγωγικών διατάξεων πολύ συχνά χρειάζεται να μετατραπούν κάποιες περιοχές στο επιθυμητό βάθος, από τύπου p σε τύπου n και από τύπου n σε τύπου p. Αυτό επιτυγχάνεται με εισαγωγή επιπλέον προσμίξεων επιλεγμένων συγκεντρώσεων με την ιδιότητα της αντιστάθμισης. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ως «μάσκα» στην επιφάνεια του Si, το SiO₂ με τα κατάλληλα ανοίγματα στις επιλεγμένες περιοχές της επιφάνειας του Si. Το διοξείδιο του πυριτίου είναι το πιο δημοφιλές και συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό για τις μάσκες διάχυσης.

Το βόριο, το αρσενικό και ο φωσφόρος χρησιμοποιούνται σαν πηγές διάχυσης, καθώς οι συντελεστές διάχυσης τους μέσα στο διοξείδιο του πυριτίου είναι δύο με τρεις φορές μικρότεροι από αυτούς του πυριτίου. Ο μηχανισμός διάχυσης των παραπάνω υλικών δεν είναι όπως έχει διατυπωθεί για τον μηχανισμό διάχυσης μονοκρυσταλλου πυριτίου.

4.1.5 Συστήματα διάχυσης

Πηγές διάχυσης μπορούμε να αντλήσουμε από υγρά, στερεά και αέρια για τα περισσότερα υλικά προσμίξεων. Ας δούμε ποιες είναι οι κυριότερες πηγές διάχυσης.

Πηγές διάχυσης αρσενικού. Το αρσενικό είναι μέταλλο στοιχείο, με σύμβολο As, ατομικό αριθμό 33 και ατομικό βάρος 74,9216 και ανήκει στην Va ομάδα του

περιοδικού πίνακα (ομάδα αζώτου). Οι περισσότερες ενώσεις που χρησιμοποιούν αρσενικό είναι τοξικές και έτσι για χρόνια αποφεύγονταν. Παρόλο λοιπόν που η αρσίνη (AsH_3) είναι πολύ τοξικό αέριο, οι βελτιώσεις της την καθιστούν πλέον μια βιώσιμη πηγή διάχυσης ανοιχτού σωλήνα για το αρσενικό.

Πηγές διάχυσης φωσφόρου. Ο φωσφόρος είναι αμέταλλο χημικό στοιχείο με σύμβολο P και ατομικό αριθμό 15, που ανήκει στην ομάδα Va του περιοδικού συστήματος. Σαν συστήματα διάχυσης φωσφόρου χρησιμοποιούνται ο υδροχλωριούχος φωσφόρος ($POCl_3$) γνωστό και ως φωσφορυλοχλωρίδιο ή η φωσφίνη. Ο υδροχλωριούχος φωσφόρος ($POCl_3$) είναι άχρωμο ατμίζον υγρό, με αποπνικτική οσμή, ειδικού βάρους 1,68. Χρησιμοποιείται ως μέσο χλωρίωσης, ως καταλύτης και φυσικά για την εισαγωγή προσμίξεων φωσφόρου σε ημιαγωγούς. Τέλος, η φωσφίνη δημιουργείται από φωσφόρο και υδρογόνο.

Πηγές διάχυσης βορίου. Το βόριο είναι αμέταλλο χημικό στοιχείο με σύμβολο B και ατομικό αριθμό 5, που αποτελεί το πρώτο μέρος της IIIa ομάδας του περιοδικού πίνακα. Ως προς τις χημικές του ιδιότητες παρουσιάζει κάποια ομοιότητα με το πυρίτιο. Καίγεται στον αέρα με πράσινη φλόγα προς το αντίστοιχο οξείδιο : B_2O_3 .

4.2 Εμφύτευση ιόντων

Η εμφύτευση ιόντων (ion implantation), είναι μια τεχνική «νόθευσης» ενός ημιαγωγού με την εμφύτευση μιας δόσης ιόντων του νοθευτικού παράγοντα στον ημιαγωγό κρύσταλλο. Αυτό επιτυγχάνεται με βομβαρδισμό της επιφάνειας του ημιαγωγού από ηλεκτρικά ελεγχόμενη δέσμη ιόντων υψηλής ενεργειακής στάθμης. Η κίνηση και διείδυση μιας ιοντικής δέσμης σε έναν κρύσταλλο είναι συνάρτηση της κινητικής ενέργειας της δέσμης και δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη θερμοκρασία του κρυστάλλου. Αυτό σημαίνει ότι τα στάδια επεξεργασίας του ημιαγωγού μπορούν να διαφοροποιηθούν ουσιαστικά από τα αντίστοιχα της νόθευσης με διάχυση παρέχοντας στον κατασκευαστή μεγαλύτερη ευελιξία για την επίτευξη των προγραμματικών του στόχων. Η ανεξαρτησία από τη θερμοκρασία του κρυστάλλου επιτρέπει τη νόθευση ψυχρού κρυστάλλου που επιτρέπει, παρά το γεγονός ότι συνήθως απαιτείται μια τελική επεξεργασία ανόπτησης(θέρμανσης και βραδείας ψύξης) την χρησιμοποίηση υλικών χαμηλής θερμοκρασίας τήξης όπως και υλικών υψηλής θερμοκρασίας διάχυσης ως νοθευτικών παραγόντων. Ο ηλεκτρικά ελεγχόμενος χαρακτήρας της ιοντικής δέσμης επιτρέπει ακριβέστατο έλεγχο του πλήθους των ανά μονάδα επιφάνειας εμφυτευμένων ιόντων, πράγμα που σημαίνει ηλεκτρικό και όχι θερμικό του ελέγχου του βάθους και της στάθμης ακαθαρσιών του δεσμού p-n. Η ευελιξία της νόθευσης με εμφύτευση ιόντων επιτρέπει τη δημιουργία βαθιών και ρηχών περιοχών, υψηλής και χαμηλής συγκέντρωσης νοθευτών n και p, ακριβέστατων διαστάσεων και βάθους διείδυσης.

Χαρακτηριστικά της εμφύτευσης ιόντων

- Υψηλή ταχύτητα, επαναληψιμότητα και ομογενής κατανομή προσμίξεων
- Ακριβής έλεγχος του πλήθους των εμφυτευομένων ατόμων (χαμηλές συγκεντρώσεις)
- Χαμηλή θερμοκρασία υποστρώματος

- Εμφύτευση μέσω προστατευτικής μάσκας (π.χ. φωτοευπαθούς,
- μετάλλου ή μονωτή, SiO₂, Si₃N₄ κλπ) → διαμόρφωση profile, μείωση του damage.
- Κατασκευή ρηχών εμφυτεύσεων με υψηλή συγκέντρωση προσμείξεων (π.χ. δίοδοι IMPATT, τρανζίστορ μικροκυμάτων κλπ)
- Έλεγχος του σχήματος της κατανομής (πολλαπλές εμφυτεύσεις)
- Μικρή εγκάρσια διασπορά των προσμείξεων → κατασκευή διατάξεων με μικρές διαστάσεις και με μικρή παρασιτική χωρητικότητα.

Η πιο συνηθισμένη εφαρμογή της διεργασίας αυτής είναι το ντοπάρισμα του πυριτίου για την κατασκευή ημιαγωγικών ηλεκτρονικών και μικροηλεκτρονικών στοιχείων και διατάξεων. Η χρήση ιόντων 11B⁺, 31P⁺, 75As⁺ και 121Sb⁺ με ενέργειες 0,5 - 500keV είναι αρκετή για την εμφύτευση των ιόντων αυτών σε βάθος περίπου 0,001-1μm κάτω από την επιφάνεια του πλακιδίου Si.

Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η κατάργηση των κατασκευαστικών σταδίων που αναφέρονται στην φωτολιθογραφική χάραξη που θα αναλύσουμε στο επόμενο κεφάλαιο. Έτσι, δεν απαιτείται η δημιουργία προστατευτικού στρώματος από διοξείδιο του πυριτίου, η κάλυψή του με φωτοευπαθές υλικό ούτε και η κατασκευή της δαπανηρής μάσκας που θα προσδιορίσει τις περιοχές στις οποίες τελικά γίνεται η διάχυση.

Αντίθετα, η μετατόπιση της ιοντικής δέσμης μπορεί να ελέγχεται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, οπότε η συμβατική μάσκα χρωμίου υποκαθίσταται από το πρόγραμμα το οποίο αποθηκεύεται στη μνήμη του ηλεκτρονικού υπολογιστή. Αποτέλεσμα είναι η εύκολη μετάβαση της μορφής της επιφανειακής νόθευσης του ημιαγωγού, αφού αυτή προϋποθέτει μόνο τη μεταβολή του προγράμματος του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Το μειονέκτημα όμως της μεθόδου αυτής είναι πρόκληση των κρυσταλλικών ατελειών στον ημιαγωγό από τα εμφυτευόμενα ιόντα με αποτέλεσμα να επηρεάζουν τοπικά την περιοδικότητα του, πράγμα που δεν συμβαίνει κατά την χρησιμοποίηση της φωτολιθογραφικής χάραξης η οποία γίνεται με υπεριώδες φως.

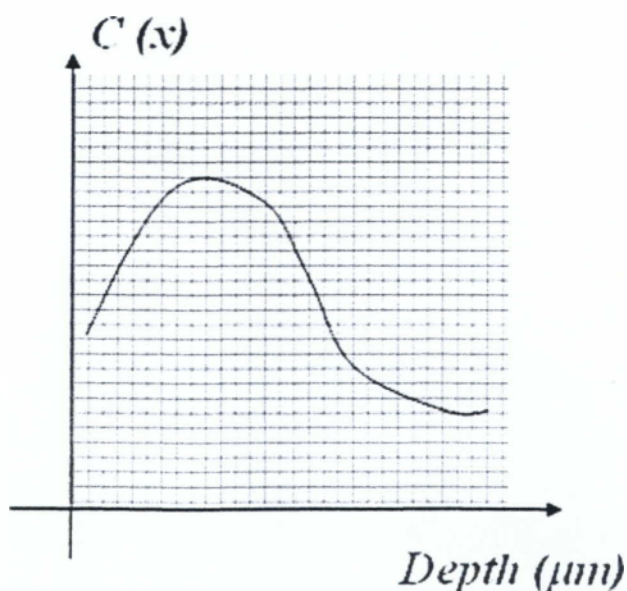
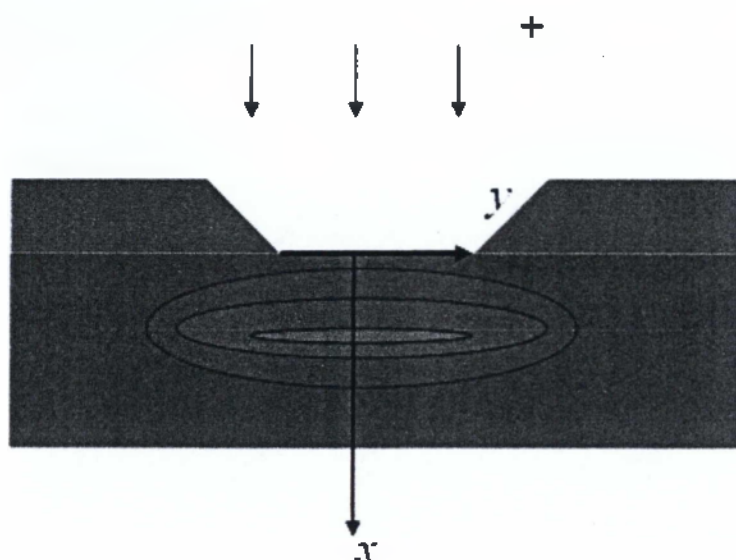
4.2.1 Κατανομές εμφύτευσης ιόντων

Οι περισσότεροι από τους στόχους πυριτίου είναι κρυσταλλικοί με συμμετρική διάταξη ατόμων. Για τα ιόντα που κινούνται σε τυχαίες διευθύνσεις, οι σειρές των ατομικών επιπέδων στοιχίζονται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να δημιουργούν μεταξύ τους διάκενα, μέσα από τα οποία τα ιόντα μπορούν να περάσουν χωρίς να σκεδαστούν.

Τα ιόντα κατευθύνονται κατά μήκος αυτών των καναλιών, παθαίνοντας μόνο πλάγιες συγκρούσεις με τα ατομικά επίπεδα, επεκτείνοντας έτσι την τελική εμβέλεια του ιόντος βαθύτερα μέσα στον στόχο. Το μονοκρυσταλλικό πυρίτιο συμπεριφέρεται ως άμορφο κατά την εμφύτευση ιόντων με την προϋπόθεση ότι η προσπίπτουσα δέσμη ιόντων αποκλίνει από μία κρυσταλλική διεύθυνση με μικρούς δείκτες (π.χ. τη διεύθυνση <111>).

Στην περίπτωση αυτή η κατανομή ακολουθείται πιστά στην κορυφή της, καθώς και μέχρι δύο δεκάδες κάτω από την τιμή που αντιστοιχεί στην κορυφή της κατανομής. Όμως, ακόμα και για αποκλίσεις από την κρυσταλλική διεύθυνση $\langle 111 \rangle$, υπάρχει μια ουρά στην κατανομή των ιόντων που μεταβάλλεται εκθετικά με την απόσταση (ως $\exp(-x/\lambda)$), όπου λ είναι συνήθως της τάξης των $0,1 \mu\text{m}$.

Το φαινόμενο καναλιού είναι ανεπιθύμητο στις περισσότερες εφαρμογές, και γι' αυτό για να το αποφύγουμε συνήθως αποπροσανατολίζουμε τον στόχο κατά μία γωνία 7° ως 10° , έτσι ώστε η δέσμη ιόντων να προσπίπτει κατά μήκος μίας τυχαίας διεύθυνσης μέσα στον κρύσταλλο.



Σχήμα 4.6
Ιοντική εμφύτευση

Ένας άλλος τρόπος αποφυγής του φαινομένου καναλιού είναι να δημιουργήσουμε ένα άμορφο επιφανειακό στρώμα χρησιμοποιώντας αδρανή ιόντα (π.χ. ιόντα Ar) πριν από την εμφύτευση των προσμίξεων ντοπαρίσματος.

Η κατανομή των εμφυτευμένων προσμίξεων είναι Γκαουσιανή.

Η συνάρτηση κατανομής $n(x)$ δίνεται από τη σχέση:

$$n(x) = \frac{S}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{(x - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}\right]$$

Όπου:

R_p : προβολή του R στον άξονα x,

ΔR_p : Στατιστική διακύμανση της προβολής R_p και

S: ιοντική δόση ανά μονάδα επιφάνειας.

4.2.2 Οι συσκευές εμφύτευσης ιόντων

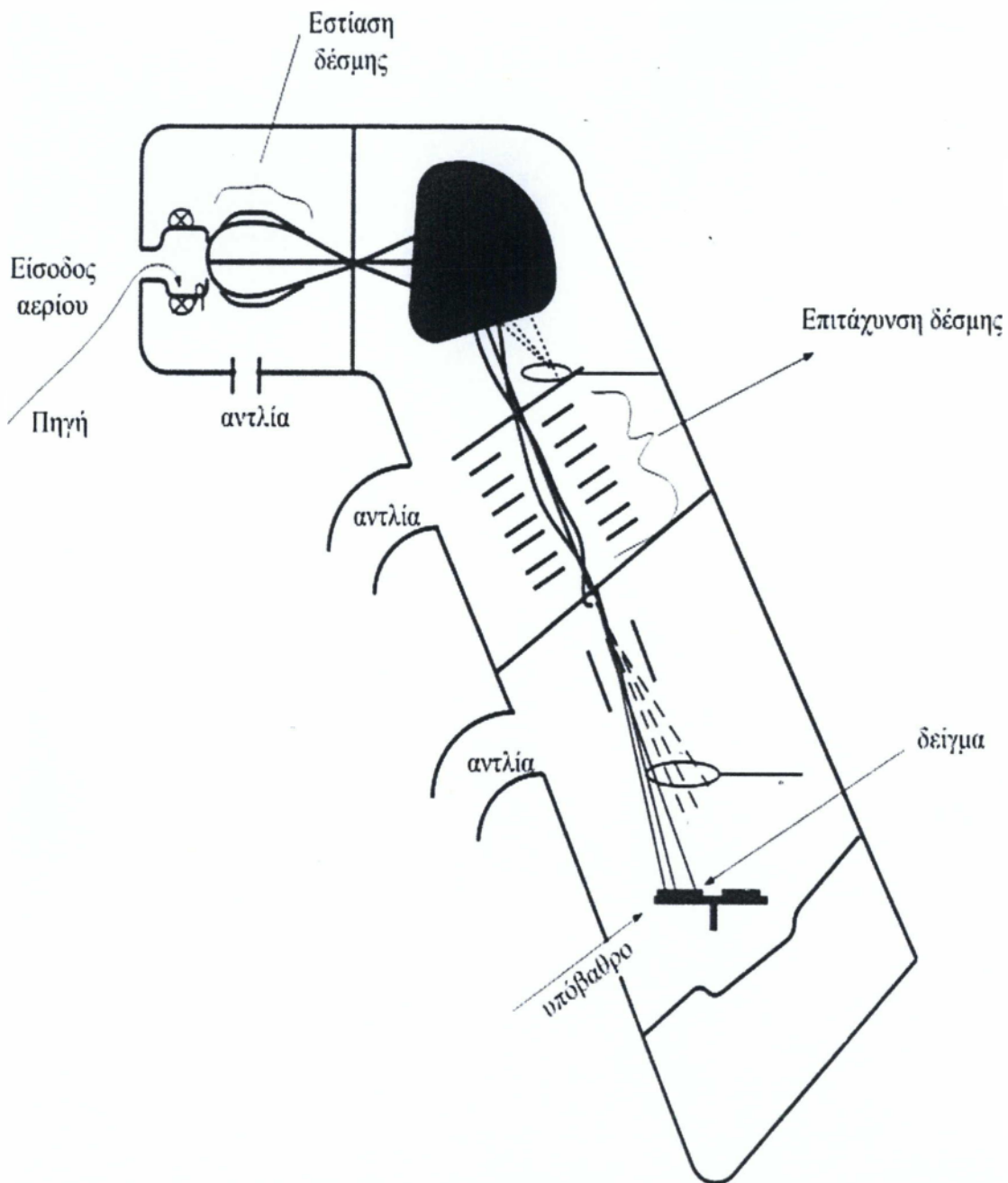
Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η αρχή λειτουργίας καθώς και τα κύρια μέρη από τα οποία αποτελούνται τα συστήματα εμφύτευσης ιόντων (ιοντικοί εμφυτευτές) υψηλής ενέργειας που υπάρχουν στο εμπόριο.

Τα ιόντα (B^+ , P^+ κ.α.) παράγονται στην πηγή ιόντων και στη συνέχεια, αφού γίνει διαχωρισμός από τα ανεπιθύμητα στοιχεία μέσω του διαχωριστή μάζας, εισέρχονται σε σύστημα ηλεκτρικών πεδίων όπου επιταχύνονται. Η ιοντική δέσμη ελέγχεται μέσω συστήματος οριζόντιας και κατακόρυφης απόκλισης και τέλος προσπίπτει στον κρύσταλλο ημιαγωγού που είναι τοποθετημένος στο κατάλληλο υπόστρωμα.

Ας υποθέσουμε τώρα ότι μία δέσμη ιόντων με μάζα ιόντος M , φορτίο ιόντος m E (όπου m είναι η κατάσταση φόρτισης του ιόντος) και ενέργεια ιόντος E κινείται προς τον στόχο. Η δέσμη περιορίζεται από ένα διάφραγμα με εμβαδόν A , πίσω από το οποίο τοποθετείται το πλακίδιο Si μέσα στην επιφάνεια που προβάλλεται από το διάφραγμα στο μεταλλικό στήριγμα του στόχου.

Το δείγμα (στόχος) βρίσκεται σε πολύ καλή ηλεκτρική επαφή με το στήριγμα του στόχου που συνδέεται με τον ολοκληρωτή φορτίου. Ηλεκτρόνια περνάνε από μέσα από τον ολοκληρωτή προς τον στόχο και εκεί εξουδετερώνουν τα φορτία των ιόντων που έχουν εμφυτευτεί στο πλακίδιο του πυριτίου. Έτσι, αν π.χ. ρεύμα ιόντων 10–9A σαρώνεται πάνω σε μία επιφάνεια με εμβαδόν $1m^2$ για 1s, η δόση για $m=1$ θα είναι ίση με $0,6 \times 10^{10}$ άτομα/ m^2 .

Αν το πάχος των στρωμάτων όπου έγινε η εμφύτευση των ιόντων είναι 600Å, είναι δυνατός ο έλεγχος της συγκέντρωσης ντοπαρίσματος στη στάθμη των 10^{21} ατόμων/ m^3 .



Σχήμα 4.7
Διάταξη ιοντικού εμφοτευτή

4.2.3 Ανόπτηση μετά την εμφύτευση ιόντων

Στη σύγχρονη τεχνολογία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (VLSI), η εμφύτευση έχει αντικαταστήσει τη διάχυση προσμίξεων που ήταν η βασική μέθοδος ντοπαρίσματος ημιαγωγών για την κατασκευή pn επαφών. Αυτό οφείλεται, όπως αναφέρθηκε, στη μεγάλη ακρίβεια ελέγχου της κατανομής των προσμίξεων για μεγάλη περιοχή τιμών του βάθους της επαφής, κάνοντας έτσι τη διαδικασία εμφύτευσης αξιόπιστη και την εφαρμογή της αναγκαία.

Παρόλα αυτά στη σφαίρα των εξαιρετικά ρηχών επαφών, το ζήτημα των ατελειών ως αποτέλεσμα της εμφύτευσης δημιουργεί πρόβλημα καθώς κατά τη διεργασία της εμφύτευσης ιόντων δημιουργούνται κρυσταλλικές ατέλειες στους ημιαγωγούς, όπως πλεγματικά κενά, ενδόθετα άτομα, εξαρμόσεις, συσσωματώματα, κλπ.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να ακολουθήσει η διεργασία της *θερμικής ανόπτησης*, σε θερμοκρασίες 600-1000°C, για να μεταφερθούν τα άτομα πρόσμιξης σε πλεγματικές θέσεις αντικατάστασης του πυριτίου μέχρι το όριο διαλυτότητας και για να εξαλειφθούν οι κρυσταλλικές ατέλειες που προκλήθηκαν κατά τη διεργασία της εμφύτευσης.

Στις θέσεις αντικατάστασης, τα άτομα πρόσμιξης αντικαθιστώντας τα άτομα πυριτίου και δημιουργώντας δεσμούς με τα γειτονικά άτομα πυριτίου παρέχουν ηλεκτρικούς φορείς και μεταβάλλουν την ειδική ηλεκτρική αντίσταση του πυριτίου. Όμως, ταυτόχρονα προκαλείται αυξημένη διάχυση των ατόμων πρόσμιξης, εξαιτίας των ατελειών κατά τη θερμική ανόπτηση, με αποτέλεσμα να μετακινείται η κατανομή τους και το βάθος της επαφής να αυξάνει κατά μερικές δεκάδες nm.

Η διάχυση όμως μετά από την εμφύτευση μπορεί να είναι πολύ γρήγορη και να προκαλέσει υπερβολική μετακίνηση της επαφής (μερικές εκατοντάδες nm) κατά τη διάρκεια των θερμικών κύκλων σε σύγκριση με τη μικρή διάχυση σε κατάσταση ισορροπίας. Το φαινόμενο της γρήγορης διάχυσης των ιόντων πρόσμιξης, μετά την εμφύτευση, καλείται *Μεταβατική Εμπλουτισμένη διάχυση*.^{vii}

Όμως, εναπομένουσες ατέλειες μετά την ανόπτηση μέσα ή κοντά στην περιοχή φορτίων χώρου των επαφών υποβαθμίζουν τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των επαφών, με αποτέλεσμα αυτές να αποκλίνουν από την ιδανική συμπεριφορά μια δίοδο επαφής pn.

Ο τύπος και το μέγεθος των ατελειών που δημιουργούνται εξαρτάται:

1. από το είδος των ιόντων
2. την ενέργεια
3. τη δόση
4. τη θερμοκρασία εμφύτευσης
5. την κρυσταλλική δομή του πλακιδίου.

Επίσης, άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το είδος των ατελειών είναι:

6. ο ρυθμός εμφύτευσης

^{vii} Τα χαρακτηριστικά της είναι τα εξής: η διάχυση των ιόντων πρόσμιξης μπορεί να είναι 102-106 φορές μεγαλύτερη από την διάχυση στην κατάσταση ισορροπίας, και η διάχυση των ιόντων ντοπαρίσματος αυξάνει με τον χρόνο, πλησιάζοντας τις τιμές ισορροπίας. Στην περίπτωση εμφύτευσης του Βορίου (B), η διάχυση TED είναι πολύ έντονη λόγω της μικρής ατομικής μάζας του και όταν οι συγκεντρώσεις είναι υψηλές (>10¹⁸cm⁻³) μπορεί να σχηματιστεί ένα λεπτό στρώμα υψηλής συγκέντρωσης ακίνητων συσσωματωμάτων B, ηλεκτρικά μη ενεργών. Για εμφυτεύσεις P ή As έχει παρατηρηθεί ουσιαστική διάχυση ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες.

7. η φύση των υλικών που καλύπτουν το δείγμα

Δυστυχώς, η εμφύτευση ιόντων είναι η κυριότερη αιτία καταστροφής της δομής του κρυσταλλικού υποστρώματος του πυριτίου.

Επιπλέον, είναι δυνατόν τα εμφυτευμένα δείγματα να έχουν κρυσταλλικές ατέλειες ακόμη και μετά από τη θερμική ανόπτηση. Τα χαρακτηριστικά της διεργασίας της ανόπτησης τα οποία καθορίζουν την εξάλειψη των κρυσταλλικών ατελειών είναι: η θερμοκρασία, η διάρκεια και η μέθοδος της ανόπτησης καθώς και ο ρυθμός αύξησης ή μείωσης της θερμοκρασίας στην οποία πραγματοποιείται αυτή.

4.3 Χαρακτηρισμός της εμφύτευσης προσμίξεων

Μετά το τέλος της κατανομής των προσμίξεων μπορούμε να αντλήσουμε κάποιες πληροφορίες από κάποιους ειδικούς σχηματισμούς ελέγχου σχετικά με την αντίσταση του φύλλου, το βάθος της επαφής και την κατανομή των προσμίξεων. Στην συνέχεια θα προσδιορίσουμε τα παραπάνω.

4.3.1 Μετρήσεις της αντίστασης φύλλου

Για να μετρήσουμε την αντίσταση του φύλλου συχνά χρησιμοποιούμε την μέθοδο των τεσσάρων ακίδων. Η αντίσταση φύλλου σε ένα κυκλικό υπόστρωμα δίνεται από

την σχέση $R_s = \frac{P}{x_j} = \left(\frac{V}{I}\right) \cdot \left(\frac{\pi}{\ln 2}\right) = 4,532(V/I)$, $d \ll D$ και $x_j \ll d$

4.3.2 Μετρήσεις του βάθους επαφής

Στην πραγματικότητα είναι αρκετά δύσκολο να υπολογίσουμε την απόσταση x_j από την επιφάνεια του ημιαγωγού. Ο τρόπος που χρησιμοποιούμε συνήθως για την μέτρηση του βάθους επαφής είναι οπτικός κ, ενώ ο προσδιορισμός του βάθους επαφής γίνεται με μηχανικό τρόπο.

Στην ουσία αντί να μετρήσουμε το x_j , θα μετρήσουμε το d , καθώς θα κόψουμε την πλακέτα σε μια γωνία της τάξης 1° έως 5° . Οπότε έχουμε την σχέση $d = \frac{x_j}{\sin \theta}$.

Στη συνέχεια η επαφή χρωματίζεται με κάποιο χημικό διάλυμα και μετά την εμφάνισή της το βάθος μετριέται με οπτικό τρόπο.

4.3.3 Μετρήσεις της κατανομής των προσμίξεων

Κάθε φορά που γίνεται μια μέτρηση για τον προσδιορισμό της κατανομής των προσμίξεων απομακρύνεται ένα λεπτό στρώμα πυριτίου, οπότε πρέπει να ακολουθηθεί μια νέα τεχνική μέτρησης, που όταν και αυτή τελειώσει πάλι θα απομακρυνθεί ένα δεύτερο στρώμα πυριτίου.

Παρόλο, που υπάρχουν πολλοί μέθοδοι κατανομής των προσμίξεων, η χρήση ραδιενεργών ισοτόπων έχει χαρακτηριστεί σαν καλύτερη από άποψη ακρίβειας. Η απομάκρυνση των στρωμάτων πυριτίου συνήθως γίνεται με χημικό τρόπο (ανοδίωση). Οι μέθοδοι αυτοί όμως συνήθως είναι αρκετά δύσκολοι και καταστροφικοί για το υπόστρωμα.

Έτσι, κάθε φορά, ανάλογα με το βάθος της επαφής διαλέγουμε κάποιες άλλες τεχνικές για να εκτιμηθεί η κατανομή των προσμίξεων. Στην περίπτωση που η επαφή δεν είναι και τόσο βαθιά, χρησιμοποιείται μια τεχνική μέθοδος που βασίζεται στην μεταβολή της χωρητικότητας του μικρού σήματος μιας διόδου Schottky σε συνάρτηση με την τάση πόλωσης.

Η προσεγγιστική σχέση που ακολουθεί υπολογίζει την συγκέντρωση των φορέων

$$N(x) = \left(\frac{-C^3}{q \cdot \epsilon_s \cdot A^2} \right) \times \left(\frac{dC}{dV} \right)^{-1}$$

Όπου C είναι η χωρητικότητα του μικρού σήματος, q το φορτίο, ϵ_s η ολική διηλεκτρική σταθερά του ημιαγωγού και A το εμβαδόν της επιφάνειας της διόδου.

Η απόσταση από την επιφάνεια δίνεται από τον τύπο : $x = \frac{\epsilon_s \cdot A}{C}$.

5

Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

Μικρολιθογραφία

Η λιθογραφία είναι ένα από τα πιο σημαντικά στάδια για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και σε αυτό το κομμάτι καθορίζονται και οι διαστάσεις των δομικών στοιχείων. Για τη συνεχή σμίκρυνση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ως προς τις διαστάσεις τους είναι απαραίτητη η χρήση νέων πηγών αρχιτεκτονικών μασκών. Έτσι, όχι μόνο είναι απαραίτητη η ακριβής σχεδίαση των δομών της μάσκας αλλά και η ακρίβεια της διαδικασίας κατασκευής της μάσκας.

Η διαδικασία της λιθογραφίας έχει να κάνει με τη μεταφορά ενός γεωμετρικού σχεδίου από μία μάσκα στην επιφάνεια ενός δισκίου Si με τη βοήθεια φωτοευαίσθητης ρητίνης (photoresist) που καλύπτει την επιφάνεια του Si. Τα μεταφερόμενα γεωμετρικά σχήματα είναι στοιχεία ή τμήματα ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, όπως μεταλλικές διασυνδέσεις, αντιστάσεις, επαφές περιοχών του transistor κ.α. Το σχέδιο μεταφέρεται αρχικά στη ρητίνη και στη συνέχεια στην επιφάνεια του Si με τη βοήθεια επιλεκτικής αφαίρεσης ακάλυπτων περιοχών. Η λιθογραφία συνήθως γίνεται αφού έχει προηγηθεί θερμική οξείδωση του δισκίου Si.

Η μάσκα σκιαγραφεί τα διάφορα μέρη του chip και το υπεριώδες φως θα προσπέσει μόνο στις ελεύθερες περιοχές τις οποίες αφήνει εκτεθειμένες η μάσκα. Το φωτοευαίσθητο υλικό είναι ένα γαλάκτωμα που πολυμερίζεται όταν εκτεθεί στο υπεριώδες φως. Το SiO₂ παίζει το ρόλο μάσκας για το Si και μέσω της λιθογραφίας γίνεται το άνοιγμα "παραθύρων" ή ενεργών περιοχών, έτσι ώστε να ακολουθήσει η εισαγωγή προσμίξεων ή άλλες διεργασίες στο Si.

Το SiO₂ καλύπτεται αρχικά με υγρή φωτοευαίσθητη ρητίνη η οποία στη συνέχεια ξηραίνεται. Μία μερικά διαπερατή από το φως, φωτογραφικά αρνητική, φωτομάσκα (από γυαλί ή Cr) τοποθετείται πάνω (ή κοντά) στην επιφάνεια του δισκίου με τη βοήθεια μικροσκοπίου. Στη μάσκα είναι τυπωμένο το σχέδιο που πρόκειται να μεταφερθεί στο Si.

5.1 Κατηγορίες λιθογραφίας

Η λιθογραφία χωρίζεται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το είδος της εμφάνισης που ακολουθείται.

1. *Λιθογραφία με υγρή εμφάνιση* με τη χρήση διαλυτών, όπου η εμφάνιση του πολυμερούς γίνεται με διάλυση σε κατάλληλο διαλύτη ή μίγμα αυτών.
2. *Λιθογραφία με ξηρή εμφάνιση* με πλάσμα οξυγόνου.

5.1.1 Λιθογραφία με υγρή εμφάνιση

Το κύριο χαρακτηριστικό της κατηγορίας αυτής είναι ότι προϋποθέτει πάχος πολυμερούς από 0.54 έως 1.0. Ο λόγος είναι ότι κατά τη διάρκεια της εγχάραξης του υποκείμενου στρώματος με το πλάσμα, το πολυμερές εγχαράσσεται με ρυθμό εγχάραξης μικρότερο από του υποκείμενου στρώματος. Επομένως, απαιτείται αρκετά μεγάλο πάχος για να αντέξει κατά τη διάρκεια της εγχάραξης και να μπορεί να

προστατεύει το υπόστρωμα. Ένας δεύτερος λόγος είναι ότι επειδή το υπόστρωμα σε σπάνιες περιπτώσεις είναι επίπεδο και επειδή υπάρχει μια τοπογραφία από τα προηγούμενα στάδια εγχάραξης κατά τη διάρκεια της κατασκευής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, το πάχος του υποστρώματος θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να καλύπτει την πιθανή τοπογραφία του υποστρώματος.

5.1.2 Λιθογραφία ξηρής εμφάνισης

Υπάρχουν δύο τεχνικές λιθογραφίας ξηρής εμφάνισης με πλάσμα.

1. Η λιθογραφία δύο στρωμάτων

Κατά την τεχνική αυτή το πολυμερές περιέχει ένα ανόργανο στοιχείο, όπως για παράδειγμα η σιλικόνη και αποτελεί το πάνω στρώμα, ενώ ένα άλλο κοινό οργανικό πολυμερές αποτελεί το κάτω στρώμα.

2. Επιφανειακή πυριτίαση και ξηρή εμφάνιση με πλάσμα

Ενώ στη λιθογραφία δύο στρωμάτων το πυρίτιο περιέχεται ήδη στο λεπτό επιφανειακό στρώμα του φωτοπολυμερούς, στην τεχνική της επιφανειακής πυριτίασης το πυρίτιο εισάγεται στο φωτοπολυμερές με την επίδραση κατάλληλου μέσου πυριτίασης σε κάποιο βήμα της λιθογραφικής διεργασίας.

5.1.3 Είδη λιθογραφίας ως προς το είδος της ακτινοβολίας

Οπτική λιθογραφία.

Οι λιθογραφικές διαδικασίες μπορούν να ταξινομηθούν με κριτήριο την ενέργεια που χρησιμοποιείται για την έκθεση της ρητίνης και των τύπων των μηχανημάτων που είναι αναγκαία για την διαδικασία αυτή. Η ποιότητα της εικόνας που θα αποτυπωθεί στο υμένιο εξαρτάται από τη μέθοδο έκθεσης, τα μηχανήματα και το υλικό της ρητίνης. Στην οπτική λιθογραφία η ρητίνη εκτίθεται σε ακτινοβολία στην περιοχή του κοντινού έως βαθέως υπεριώδους και πρόσφατα από 150-250nm.

Οπτική λιθογραφία Εγγύς Υπεριώδους

Οι θεμελιώδεις περιορισμοί της οπτικής αλληλεπίδρασης μπορούν να μειωθούν σε σημαντικό ποσοστό, αν το μήκος κύματος της πηγής ακτινοβολίας ελαττωθεί. Όταν η διακριτικότητα του εικονοστοιχείου πλησιάζει το μήκος κύματος της έκθεσης, η παραμόρφωση στη ρητίνη είναι σημαντική. Η χρήση ακτινοβολίας μικρότερου μήκους οδηγεί προς ακόμα πιο λεπτές δομές εικονοστοιχείων και άρα και την διακριτική ικανότητα προς τα κάτω. Για τον λόγο αυτό η οπτική λιθογραφία οδήγησε στην DUV περιοχή μηκών κύματος. Η ίδια επιθυμία οδήγησε και στην εξερεύνηση των τεχνικών λιθογραφίας ακτίνων X και ηλεκτρονικής δέσμης.

Οπτική λιθογραφία Μακράν Υπεριώδους

Τα πιο κρίσιμα σημεία αυτής της τεχνικής λιθογραφίας (200-250nm) είναι τα οπτικά της ευθυγράμμισης και τα υλικά της ρητίνης. Τα προβλήματα στα οπτικά της ευθυγράμμισης πηγάζουν από το γεγονός ότι σε αυτή την περιοχή μηκών κύματος τα υλικά των φακών που χρησιμοποιούνται δεν είναι διαπερατά στην ακτινοβολία, οπότε είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθούν υλικά, όπως ο χαλαζίας για την κατασκευή τους, τα οποία είναι πολύ ακριβά. Οι τυπικές ρητίνες θετικού τόνου που χρησιμοποιούνται στην ΝΥΥ δεν είναι κατάλληλες για την DUV λόγω της μη αποδεκτής απορρόφησής τους στα 200 – 250nm. Κατά συνέπεια έγινε απαραίτητη η ανάπτυξη νέων υλικών με ιδιότητες που απομακρύνονται στις απαιτήσεις της περιοχής αυτής.

Λιθογραφία Ηλεκτρονικής Δέσμης

Η τάση προς όλο και πιο μικρές διαστάσεις ώθησε την ανάπτυξη τεχνικών έκθεσης με πηγές ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας όπως είναι η ηλεκτρονική δέσμη. Αυτή η τεχνική χρησιμοποιείται για την παραγωγή μασκών για τη φωτολιθογραφία και την κατασκευή πολύπλοκων διατάξεων. Παρόλα αυτά η απόδοση της τεχνικής αυτής είναι μικρή και το κόστος της μεγάλο.

Λιθογραφία ακτίνων Χ

Η λιθογραφία ακτίνων Χ μοιάζει με την οπτική λιθογραφία στο ότι ολόκληρο το δισκίο εκτίθεται στη ροή της ακτινοβολίας μέσω μιας σχηματοποιημένης μάσκας. Άρα η δυνατότητα εφαρμογών μαζικής παραγωγής είναι μεγαλύτερη. Η λιθογραφία αυτή έχει ακόμα το πλεονέκτημα ενός ουσιαστικά άπειρου βάθους πεδίου, της υψηλής ανθεκτικότητας στη σωματιδιακή μόλυνση και της απουσίας στάσιμων κυμάτων. Επειδή το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι στην περιοχή των 0.5 - 3nm, η περίθλαση δεν αποτελεί πρόβλημα. Ένα σημαντικό πρόβλημα είναι η διαθεσιμότητα των ρητινών για αυτή την περιοχή των ενεργειών. Για να γίνουν δυνατές οι δομικές αλλαγές στη ρητίνη πρέπει η ακτινοβολία να μπορεί να απορριφθεί. Οι οργανικές ρητίνες με βάση τους υδρογονάνθρακες είναι συνήθως διαπερατές στις ακτίνες Χ. Άρα οι ρητίνες για αυτή τη λιθογραφία θα πρέπει να κατασκευαστούν έτσι που να περιέχουν άτομα υψηλού ατομικού βαθμού που να απορροφούν τις ακτίνες Χ.

5.2 Μάσκες

5.2.1 Κατασκευή μασκών

Οι μάσκες είναι ένα σημαντικό κομμάτι στις λιθογραφικές τεχνικές. Η πρόοδος στην τεχνολογία κατασκευής των μασκών αυξάνεται συνεχώς, εξασφαλίζοντας έτσι ένα μεγάλο βήμα εξέλιξης της λιθογραφίας αφού καθορίζουν την κρίσιμη διάσταση των δομών που σχηματίζονται στο δισκίο πυριτίου.

Μάσκα είναι ένα εργαλείο μεταφοράς προτύπων σχημάτων. Αποτελείται από ένα υμένιο και ένα υπόστρωμα. Το υμένιο καλύπτεται από μια ειδική μεμβράνη για την προστασία της μάσκας. Το πρότυπο σχήμα του υμενίου μεταφέρεται σε κατάλληλο

υποδοχέα για την κατασκευή μιας ηλεκτρονικής, ηλεκτρομηχανικής ή μηχανικής συσκευής.

Το υπόστρωμα της μάσκας σε πολλές περιπτώσεις είναι διαφανές στο μέσο μεταφοράς του σχήματος (συνήθως φως) ενώ η σχηματοποιημένη επιφάνεια πάνω σε αυτό είναι λιγότερο διαφανής ή αδιαφανής. Η μεταφερόμενη εικόνα ενδέχεται να περνάει μέσα από φακούς σμίκρυνσης ή 1:1 αποτύπωσης.

Οι τυπικές μάσκες τα τελευταία τριάντα χρόνια αποτελούνται από ένα λεπτό υμένιο χρωμίου 80-100 nm πάνω σε υπόστρωμα γυαλιού ή άμορφη πυρίτια (fused silica - SiO₂).

Το χρώμιο είναι αδιαφανές στο προσπίπτον μήκος κύματος (365, 248 ή 193 nm) ενώ η άμορφη πυρίτια διαφανής. Μια τέτοια μάσκα αναφέρεται ως χρώμιο σε γυαλί μάσκα ή δυαδικής έντασης μάσκα (Binary Intensity Mask). Η εγχάραξη του υμενίου χρωμίου για τη δημιουργία δομών επιτυγχάνεται με λιθογραφική τεχνική.

Οι μάσκες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κατασκευής ημιαγωγών ή σε βιομηχανίες που έχουν υιοθετήσει τις μεθόδους κατασκευής των ημιαγωγών έλκουν την καταγωγή τους από την παραδοσιακή λιθογραφική μέθοδο εκτύπωσης.

Η μάσκα μπορεί να μεταφέρει το σχήμα με πολλούς τρόπους. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί *ακτινοβολία ευρέως φάσματος ή μονοχρωματική*. Το υπόστρωμα μπορεί να είναι διαφανές στην προσπίπτουσα ακτινοβολία ή ανακλαστικό. Το υμένιο που φέρει το σχήμα μπορεί να είναι τελείως απορροφητικό ή μερικώς διαπερατό σε μάσκες διαπερατές ή τελείως απορροφητικό για ανακλαστικές μάσκες. Σε άλλες πάλι περιπτώσεις το σχηματοποιημένο υμένιο και το υπόστρωμα μιας μάσκας μπορεί να μεταβάλουν τη φάση της ακτινοβολίας.

5.2.2 Υποστρώματα Μασκών

Τα πρώτα χρόνια της βιομηχανίας των ημιαγωγών το υπόστρωμα της μάσκας είχε διαστάσεις 2x2 ίντσες. Από τότε άρχισε να αυξάνεται, ενώ σήμερα το καθιερωμένο μέγεθος είναι 6x6 ίντσες. Το πάχος αυξήθηκε επίσης από 0.060 ίντσες σε 0.25 ίντσες σήμερα (mask plate 6025). Μεταξύ των λόγων αυτής της αύξησης είναι η αύξηση του μεγέθους του τσιπ και η αύξηση του βήματος των συστημάτων έκθεσης.

Στην ιστορία της λιθογραφικής μεθόδου η σύσταση του υποστρώματος έχει υποστεί πολλές τροποποιήσεις. Τα πρώτα χρόνια της λιθογραφίας το καθιερωμένο υλικό ήταν το soda lime το οποίο αντικαταστάθηκε στη συνέχεια από το white crown καλύτερης ποιότητας λόγω λιγότερων ατελειών.

Αργότερα, όταν η θερμική διαστολή του γυαλιού κατά τη διαδικασία έκθεσης έγινε κρίσιμη, το white crown αντικαταστάθηκε από boro-silicate, γυαλί που παρουσιάζει μικρότερο συντελεστή θερμικής διαστολής.

Βελτίωση προήλθε με τη χρήση χαλαζία (Quartz) του οποίου ο συντελεστής θερμικής διαστολής είναι ακόμα μικρότερος. Επιπλέον, παρουσιάζει μεγαλύτερη διαπερατότητα σε ακτινοβολία 365 nm (υπεριώδης ακτινοβολία). Όταν η βιομηχανία προχώρησε από τα 365 nm στα 248 nm μετά στα 193 nm η διαπερατότητα σε αυτά τα μήκη κύματος έγινε καθοριστικής σημασίας.

Το απορροφητικό στρώμα πάνω από το γυαλί είναι μια ένωση του χρωμίου που αποτελείται από χρώμιο (Cr), άζωτο (N₂), οξυγόνο (O₂) και πιθανόν άλλα στοιχεία. Η σύνθεση του υμενίου χρωμίου αλλάζει από τη βάση προς την κορυφή. Η βάση βοηθά στην πρόσφυση του υμενίου του χρωμίου με το γυαλί, ενώ το ανώτερο στρώμα δρα σαν μη ανακλαστική επιφάνεια κατά τη διαδικασία έκθεσης. Το πάνω και κάτω

στρώμα του υμενίου αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό του συνολικού αδιαφανούς υμενίου.

Τυπικό πάχος είναι τα 100 nm με οπτική πυκνότητα 3.0, το οποίο ισοδυναμεί με διάδοση 0.1% (ή λιγότερο). Έχει χρησιμοποιηθεί επίσης και υμένιο χρωμίου μικρότερου πάχους (59- 73 nm).

5.2.3 Συστήματα κατασκευής μασκών

Στα πρώτα χρόνια της βιομηχανίας των ημιαγωγών, οι οπτικές μάσκες σχεδιάζονταν στο χέρι σε μεγέθυνση και αφού σμικρύνονταν στο επιθυμητό μέγεθος μεταφέρονταν το σχέδιο σε επιστρωμένα με φωτογραφικό γαλάκτωμα γυάλινα πλακίδια. Αργότερα, η σχεδίαση άρχισε να γίνεται στον υπολογιστή, το σχέδιο κόβονταν σε αδιαφανές πολυμερές με λεπίδα καθοδηγούμενη από τον υπολογιστή. Και πάλι ακολουθούσε σμίκρυνση και μεταφορά σε πλακίδιο γυαλιού με φωτογραφικό γαλάκτωμα. Στην πορεία των χρόνων η γυάλινη μάσκα με το φωτογραφικό γαλάκτωμα αναπαράγονταν σε γυαλί με επίστρωση χρωμίου. Η μάσκα αυτή ήταν πολύ πιο ανθεκτική για εκτύπωση εξ επαφής.

Το επόμενο βήμα ήταν να παραχθούν μάσκες γυαλιού με επίστρωση χρωμίου, χωρίς τη μεσολάβηση του σταδίου κατασκευής μάσκας γυαλιού με φωτογραφικό γαλάκτωμα. Η εγγραφή της μάσκας γίνονταν αρχικά με οπτική δέσμη και αργότερα με δέσμη ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση της οπτικής δέσμης το φως παραγόταν από λάμπα υδραργύρου. Το μέγεθος και το σχήμα της δέσμης καθορίζονταν από μηχανικά διαφράγματα ελεγχόμενα από ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η εξέλιξη της εγγραφής με οπτική δέσμη ήταν η αντικατάστασή της από δέσμη λέιζερ.

Η δέσμη λέιζερ δίνει μεγαλύτερη πυκνότητα ενέργειας και καλύτερο έλεγχο των εγγραφόμενων σχημάτων σε σύγκριση με τα μηχανικά διαφράγματα. Στα τέλη της δεκαετίας του '70 εισήχθησαν τα συστήματα εγγραφής με δέσμη ηλεκτρονίων (MEBES® systems - Manufacturing Electron Beam Exposure System). Σε αυτά τα συστήματα, εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων βομβαρδίζει κατάλληλο λιθογραφικό υλικό στις επιθυμητές περιοχές δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τα επιθυμητά σχήματα.

Για δεκαετίες, τα μοναδικά χαρακτηριστικά της δέσμης ηλεκτρονίων (έλεγχος από ηλεκτρονικό υπολογιστή εύκολα προγραμματιζόμενο, μεγάλη ακρίβεια, μεγάλος ρυθμός παραγωγής) ανέδειξαν τα συστήματα αυτά σε κύρια εργαλεία για την κατασκευή μασκών. Η εξέλιξη στην κατασκευή μασκών οδηγείται από τις ανάγκες της βιομηχανίας μικροηλεκτρονικών. Οι απαιτήσεις είναι πάντα προς την κατεύθυνση των μικρότερων και πιο πυκνών δομών αλλά και τη μεγαλύτερη ακρίβεια κατασκευής.

5.2.4 Λιθογραφικά υλικά για την κατασκευή μασκών

Τα λιθογραφικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη λιθογραφία δέσμης ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας (< 5 keV) πρέπει να είναι υλικά με πολύ υψηλή αντίσταση στην εγχάραξη, ώστε να γίνει εφικτή η χρήση πολύ λεπτών υμενίων τους, και αυτό διότι τα χαμηλής ενέργειας ηλεκτρόνια παρουσιάζουν σημαντική μείωση στο βάθος διείσδυσης.

Στην περίπτωση υλικών όπου εφαρμόζεται δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας (> 5 keV) απαιτούνται υλικά υψηλής ευαισθησίας και αυτό γιατί, λόγω του μεγάλου

βάθους διείσδυσης των ηλεκτρονίων, αυτά απορροφώνται σημαντικά από το υπόστρωμα και λιγότερο από το λιθογραφικό υλικό.

Η ανάπτυξη υλικών κατάλληλων για έκθεση με δέσμη ηλεκτρονίων περιλαμβάνει τη βελτιστοποίηση αυτών ως προς την ευαισθησία, τη διακριτική ικανότητα και την αντοχή στην εγχάραξη. Υλικά αυτής της κατηγορίας βασίζονται στο μηχανισμό διάσπασης της κύριας αλυσίδας και στο μηχανισμό χημικής ενίσχυσης.

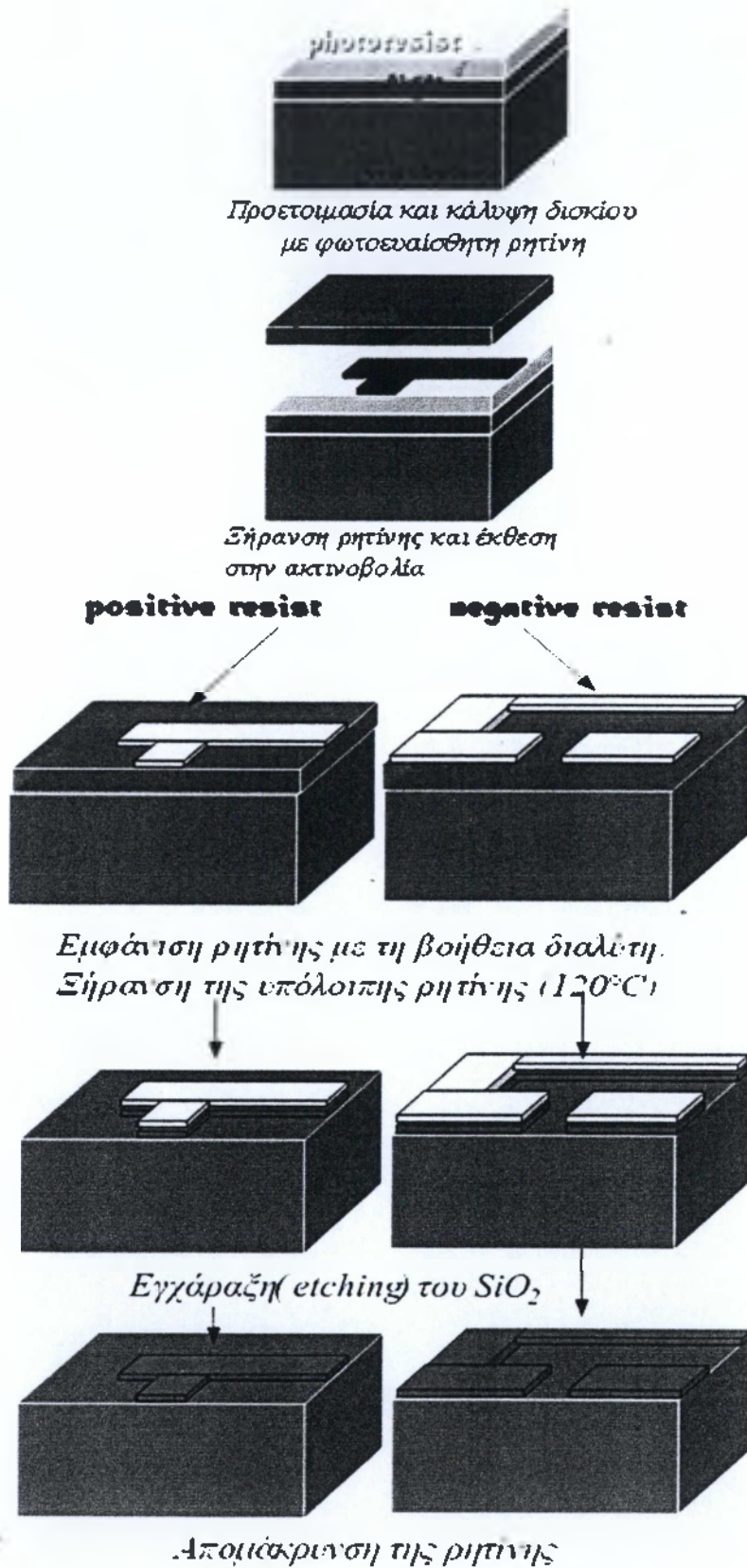
Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί και μοριακά λιθογραφικά υλικά που διαφοροποιούνται σημαντικά από τη βασική πλατφόρμα των συνηθισμένων υλικών που βασίζονται σε πολυμερή.

5.3 Φωτολιθογραφία

Η φωτολιθογραφία είναι μια φωτογραφική διαδικασία που χρησιμοποιείται για να κατασκευάσουμε ολοκληρωμένα κυκλώματα. Όπως αναφέρθηκε, κατά την φωτολιθογραφία ένα γεωμετρικό σχέδιο μεταφέρεται από μια μάσκα στην επιφάνεια ενός δισκίου πυριτίου με τη βοήθεια φωτοευαίσθητης ρητίνης, που καλύπτει τη επιφάνεια του Si. Συνεπώς μια δέσμη υπεριώδους φωτός που διαπερνά κατάλληλη μάσκα και προσπίπτει σε λεπτή φέτα πυριτίου, η οποία έχει καλυφθεί με οξείδιο και πάνω από το οξείδιο φωτοευαίσθητο υμένιο (φίλμ).

Η διαδικασία της φωτολιθογραφίας μπορεί να αναλυθεί με τα εξής πέντε στάδια:

1. Προετοιμασία και κάλυψη δισκίου με φωτοευαίσθητη ρητίνη.
2. Ξήρανση ρητίνης και έκθεση στην ακτινοβολία
3. Εμφάνιση ρητίνης με την παρουσία διαλύτη. Ξήρανση υπόλοιπης ρητίνης (120°C)
4. Εγχάραξη του SiO_2
5. Απομάκρυνση της ρητίνης.



Απομάκρυνση της ρητίνης

Σχήμα 5.1
Στάδια λιθογραφίας

Προετοιμασία και κάλυψη δισκίου με φωτοευαίσθητη ρητίνη

Η προετοιμασία του υποστρώματος πρέπει να γίνει με προσεχτικά βήματα έτσι ώστε να αποδεσμευτεί από οργανικές μολύνσεις και υγρασία για να μπορέσει να γίνει με επιτυχία το επόμενο βήμα, δηλαδή η επικάλυψη του υποστρώματος. Έτσι, οι επιφάνειες του υποστρώματος καθαρίζονται με αποιονισμένο νερό. Στην συνέχεια καθαρίζονται με ρεύμα αζώτου και ξηραίνονται σε φούρνο υπέρυθρου. Το φωτοευαίσθητο υλικό θα πρέπει να κολλά πολύ καλά στην επιφάνεια του στρώματος που πρόκειται να προστατέψει από τη χημική διάβρωση και να δίνει ξεκάθαρες και απότομες διαχωριστικές επιφάνειες, ώστε να γίνει στη συνέχεια με μεγάλη χωρική ακρίβεια η απομάκρυνση του διοξειδίου του πυριτίου.

Τα φωτοευαίσθητα υλικά είναι δύο ειδών: τα αρνητικά (negative photoresists) και τα θετικά φωτοευαίσθητα υλικά (positive photoresists). Στην περίπτωση των θετικών φωτοευαίσθητων υλικών, το τμήμα του φωτοευαίσθητου υλικού που εκτίθεται στο φως αποσυντίθεται και απομακρύνεται με πλύση για να παραμείνουν τα τμήματα που βρίσκονταν κάτω από τις αδιαφανείς περιοχές της μάσκας.

Η κάλυψη του δισκίου με φωτοευαίσθητη ρητίνη γίνεται, όπως με περιστροφή του υποστρώματος, όπου η ταχύτητα της περιστροφής προσδιορίζει και το τελικό πάχος του στρώματος.

Συγκεκριμένα, το φωτοευαίσθητο υλικό τοποθετείται σε μορφή μικρής σταγόνας διαλύματος στο κέντρο ενός wafer, το οποίο στη συνέχεια περιστρέφεται με αρκετές χιλιάδες στροφές το λεπτό και έτσι, λόγω του ιξώδους του, το διάλυμα εξαπλώνεται φυγοκεντρικά (spin coating) πάνω στο wafer όπου και θερμαίνεται με ζεστό αέρα ή υπέρυθη ακτινοβολία για να απομακρυνθεί ο διαλύτης.

Ξήρανση ρητίνης και έκθεση στην ακτινοβολία

Μετά την προετοιμασία και την κάλυψη του δισκίου με φωτοευαίσθητη ρητίνη πραγματοποιείται η διαδικασία της ξήρανσης σε ειδικούς φούρνους ή με υπέρυθη ακτινοβολία. Έτσι θα απομακρυνθεί το διαλυτικό από το φωτοαντιστατικό. Άρα λοιπόν το σύστημα θα εκτεθεί σε υπεριώδες φως ($\lambda = 0.2-0.4\mu$) το οποίο πολυμερίζει τα μόρια της ρητίνης (αρνητική) που εκτίθενται.

Εμφάνιση ρητίνης με την παρουσία διαλύτη. Ξήρανση υπόλοιπης ρητίνης(120°C)

Στη διαδικασία εμφάνισης, πραγματοποιείται χημική διάλυση με κατάλληλο υλικό και τα τμήματα του προστατευτικού υλικού που δεν εκτέθηκαν στο φως και δεν πολυμερίστηκαν απομακρύνονται. Το προστατευτικό υλικό που πολυμερίστηκε στη συνέχεια στερεώνεται θερμικά (hard bake) ώστε να μείνει ανεπηρέαστο στο βήμα διάβρωσης και μηχανικής χάραξης που θα ακολουθήσει.

Εγχάραξη του SiO₂

Για τη χάραξη του SiO₂ στις περιοχές όπου έχει αφαιρεθεί η ρητίνη, πρέπει να γίνει το άνοιγμα των περιοχών-παραθύρων που απαιτούνται για τα επόμενα κατασκευαστικά στάδια του Ο.Κ. Η διαδικασία αυτή καλείται εγχάραξη (etching) και

γίνεται με χημικά μέσα (wet etching) που περιέχουν οξύ και προσβάλλουν το SiO₂ χωρίς να προσβάλλουν τη ρητίνη που έχει απομείνει.

Η εγχάραξη γίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια και με τη βοήθεια δέσμης βαρέων ιόντων που προσβάλλει την πολυμερισμένη ρητίνη. Στην περίπτωση αυτή η εγχάραξη είναι ξηρή (dry etching).

Για το ταίριασμα μάσκας δισκίου με ακρίβεια χρησιμοποιείται συσκευή γνωστή ως optical stepper. Η οπτική λιθογραφία είναι κατάλληλη για περιπτώσεις όπου το μήκος κύματος της ακτινοβολίας είναι αρκετά μικρότερο από τη μικρότερη διάσταση του μεταφερόμενου σχεδίου, γιατί σε αντίθετη περίπτωση εμφανίζονται φαινόμενα περίθλασης που περιορίζουν την ακρίβεια της μεθόδου. Για διαστάσεις μικρότερες των 500 nm χρησιμοποιούνται ακτινοβολίες με μικρά μήκη κύματος, όπως ακτίνες X και δέσμη ηλεκτρονίων που αποτελεί την πλέον προηγμένη τεχνική λιθογραφίας (ebeam lithography).

Απομάκρυνση της ρητίνης

Το φωτοαντιστατικό απομακρύνεται είτε με διαλυτικά είτε οξειδωτικά στην υγρή φάση. Επίσης μπορούν να απομακρυνθούν και με πλάσμα οξυγόνου.



Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

Απόθεση υμενίων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΑΠΟΘΕΣΗ ΥΜΕΝΙΩΝ

Τα λεπτά υμένια, των οποίων το πάχος κυμαίνεται από λίγα nm έως και μερικά μm, έχουν ιδιότητες που είναι σημαντικά διαφορετικές από αυτές των στερεών υλικών και των επιφανειών. Οι διαφοροποιήσεις αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικές όταν τα πάχη τους είναι πολύ μικρά ή στα πρώτα στάδια ανάπτυξής τους.

Λεπτό υμένιο ονομάζουμε την μικροδομή που δημιουργείται από τα ατομικά στρώματα ενός υλικού που εναποτίθεται πάνω στην επιφάνεια ενός συμπαγούς υλικού όταν το πάχος του είναι τάξης μεγέθους μικρότερη από τις άλλες δύο.

Το να σχεδιάσουμε και να παρασκευάσουμε λεπτά υμένια είναι μια διαδικασία γενικά δύσκολη λόγω του γεγονότος ότι η φυσική που τα χαρακτηρίζει δεν είναι σε πολλές περιπτώσεις κατανοητή. Κάνοντας λόγο, λοιπόν, για τη πολυπλοκότητα που διέπει την παρασκευή των λεπτών υμενίων, θα πρέπει να αναφερθούμε και στη δυσκολία που εμφανίζεται όταν θέλουμε να καλύψουμε μεγάλες διαστάσεις υποστρώματα, με λεπτά υμένια, ενώ παράλληλα απαιτούμε μεγάλη ακρίβεια στην εναπόθεση του υλικού (π.χ. ομογενές πάχος υμενίου σε όλη την έκταση του υποστρώματος).

6.1 Επιμετάλλωση

Επιμετάλλωση είναι η διαδικασία σχηματισμού λεπτών μεταλλικών στρωμάτων τα οποία χρησιμεύουν για τις εσωτερικές διασυνδέσεις ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος, ως ωμικές επαφές, επαφές Schottky, επαφές περιοχών των transistors κ.α.

Η επιμετάλλωση μπορεί να γίνει με διάφορες τεχνικές οι σημαντικότερες των οποίων είναι η φυσική εναπόθεση ατμών και η χημική εναπόθεση ατμών. Τα μεταλλικά υλικά που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι κυρίως το Al, τα κράματά του και τα πυριτίδια που είναι ενώσεις του Si με ορισμένα μέταλλα.

6.1.1 Χημική Απόθεση Ατμών

Η χημική απόθεση ατμών είναι η μέθοδος εκείνη κατά την οποία οι ατμοί από ένα υλικό υψηλής χημικής δραστηριότητας αντιδρούν με άλλα αέρια που εισάγονται στο θάλαμο ανάπτυξης υμενίων, σχηματίζοντας έτσι μόρια μιας ένωσης που επικάθονται στο υπόστρωμα και δημιουργούν σιγά – σιγά ένα λεπτό υμένιο. Διαφέρει έτσι από τη μέθοδο PVD όπου το υλικό του στόχου μεταφέρεται είτε μέσω ατμών είτε μέσω εξοστρακιζομένων μορίων κατευθείαν στο υπόστρωμα.

Επειδή οι CVD μέθοδοι δεν χρειάζονται απαραίτητα κενό ή μεγάλη ηλεκτρική ισχύ, είναι προγενέστερες των μεθόδων PVD. Έναν ολόκληρο αιώνα πριν οι μέθοδοι CVD χρησιμοποιούνταν στην επίστρωση βολφραμίου πάνω σε νήματα γραφίτη για να επιμηκύνουν έτσι τη ζωή λυχνιών. Στις μέρες μας CVD μέθοδοι υψηλών

θερμοκρασιών παράγουν λεπτά υμένα στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών, επιστρώσεις σε κοπτικά εργαλεία, ακόμα και εξαρτήματα των μηχανών των ρουκετών/πυραύλων και των πυρηνικών αντιδραστήρων. Ειδικότερα, η ανάγκη για υψηλής ποιότητας επιταξιακά μονοκρυσταλλικά υμένα πυριτίου ή και ημιαγωγικών ενώσεων στην τεχνολογία των ηλεκτρονικών, μαζί με την ανάγκη για ταυτόχρονη παρασκευή παθητικών και μονωτικών στρωμάτων, έχει γίνει ο οδηγός της ανάπτυξης πολλών νέων μεθόδων CVD. Τα θεμελιώδη βήματα που συμβαίνουν σε κάθε διαδικασία CVD είναι τα ακόλουθα :

Το πρώτο αναφέρεται στη μεταφορά αερίων στη ζώνη αντίδρασης. Το δεύτερο περιλαμβάνει τις χημικές αντιδράσεις στην αέρια φάση ώστε να παραχθούν νέα προϊόντα και υποπροϊόντα. Το τρίτο περιλαμβάνει τη μεταφορά των αρχικών αντιδρώντων αλλά και των προϊόντων τους πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος. Το τέταρτο περιλαμβάνει τη φυσική και χημική προσρόφηση των αερίων στο υπόστρωμα καθώς και τη διάχυση τους πάνω στην επιφάνεια του υποστρώματος. Το πέμπτο βήμα περιλαμβάνει ετερογενείς αντιδράσεις που καταλύονται στην επιφάνεια του υποστρώματος και οδηγούνται στο σχηματισμό του υμενίου. Κατά το έκτο βήμα, δραστικά υποπροϊόντα των επιφανειακών αντιδράσεων απομακρύνονται (με πτητικό τρόπο) από την επιφάνεια του υποστρώματος. Τέλος, κατά το έβδομο βήμα γίνεται απομάκρυνση των υποπροϊόντων αυτών από τη ζώνη αντίδρασης.

6.1.2 Φυσική Απόθεση Ατμών

Η φυσική απόθεση ατμών γίνεται σε θάλαμο υψηλού κενού ($P < 10^{-7}$ Torr) και μπορεί να γίνει με δύο τεχνικές:

1. με εξάχνωση και
2. με θρυμματισμό (*sputtering*) του προς εναπόθεση υλικού

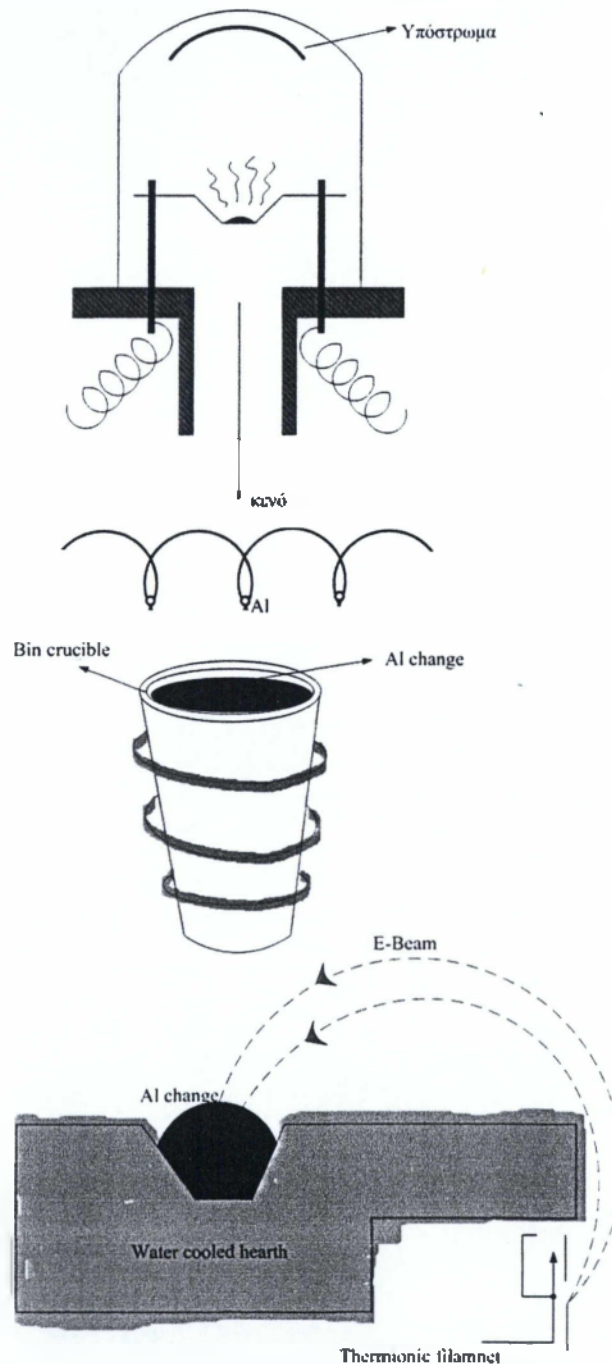
6.1.2.1 Εξάχνωση

Μπορεί να είναι θερμική όπου το μέταλλο τοποθετείται σε υποδοχέα από δύστηκτο υλικό (W, Mo, Ta) τροφοδοτούμενο από πηγή υψηλού ρεύματος έτσι ώστε το μέταλλο με μικρότερο σημείο τήξης να εξαχνώνεται. Το ίδιο αποτέλεσμα παράγεται και όταν η πηγή θέρμανσης είναι RF πηγίο γύρω από δοχείο δύστηκτου (*crucible*) υλικού BN, πορσελάνης κ.α. Η μέθοδος εξάχνωσης είναι χαμηλού κόστους αλλά παρουσιάζει το μειονέκτημα της μόλυνσης με προσμίξεις που λόγω των υψηλών θερμοκρασιών των χρησιμοποιούμενων δοχείων τήξης εκπέμπονται και εισέρχονται στο λεπτό στρώμα της εναπόθεσης. Βελτίωση στο πρόβλημα αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση εξάχνωτή ηλεκτρονικής δέσμης.

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται επίσης θάλαμος υψηλού κενού μέσα στον οποίο βρίσκεται το σύστημα εξάχνωσης. Την τήξη και εξάχνωση του υλικού προκαλεί δέσμη ηλεκτρονίων που παράγεται από θερμιονική εκπομπή καθοδικής λυχνίας. Η δέσμη επιταχύνεται και με τη βοήθεια μαγνητικού πεδίου κατευθύνεται στο στόχο- μέταλλο, όπου η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα προκαλώντας την τήξη και εξάχνωση του μετάλλου.

Η μέθοδος αυτή παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα όπως υψηλή καθαρότητα του film, ακρίβεια πάχους, υψηλούς ρυθμούς εναπόθεσης και σχετικά χαμηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας.

Είναι επίσης δυνατή η συνεξάχνωση περισσότερων του ενός υλικών και η προσθήκη της κατάλληλης διάταξης (στοιχείο Knudsen) με την οποία είναι δυνατή η εισαγωγή προσμίξεων στην περίπτωση film ημιαγωγού.



Σχήμα 6.1

Θάλαμοι κενού και πηγές θερμικής εξαχνωσης
Εξαχνωτής e δέσμης

6.1.2.2 Θρυμματισμός

Ο θρυμματισμός (sputtering) είναι μία φυσική διαδικασία που περιλαμβάνει επιτάχυνση βαρέων ιόντων, συνήθως Ar^+ , μέσω ηλεκτρικού πεδίου, και στη συνέχεια βομβαρδισμό του στόχου του προς εναπόθεση υλικού. Τα άτομα του στόχου, λόγω μεταφοράς ορμής, γίνονται πτητικά και μεταφέρονται σε μορφή ατμών στην επιφάνεια και στα επιθυμητά σημεία του υποστρώματος (Si) σχηματίζοντας λεπτά στρώματα (thin films). Οι τύποι των συστημάτων θρυμματισμού ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του χρησιμοποιούμενου ηλεκτρικού ή και μαγνητικού πεδίου. Συνηθέστεροι τύποι είναι DC, RF και magnetron sputtering (προσθήκη μαγνητικού πεδίου).

6.2 Εξοπλισμός για τις διαδικασίες κενού

Για την απόθεση λεπτών υμενίων πάνω σε ένα υπόστρωμα, πρέπει να εγκαταστήσουμε ένα σύστημα υψηλού κενού έτσι ώστε η απόθεση να γίνει υπό συνθήκες υψηλής καθαρότητας.

Με τον όρο «κενό» αναφερόμαστε στην ύπαρξη κάποιου χώρου πίεσης που είναι χαμηλότερη από την ατμοσφαιρική. Ο χώρος αυτός, στον οποίο με κατάλληλη διαδικασία έχουμε καταφέρει να κατεβάσουμε την πίεση και να την διατηρούμε σε τιμές χαμηλότερες από την ατμοσφαιρική αναφέρεται συνήθως ως θάλαμος κενού.

Τα τελευταία χρόνια η δημιουργία κενού παίζει σημαντικό ρόλο στην τεχνολογία και χρησιμοποιείται ευρύτατα από χημικούς, φυσικούς, βιολόγους και μηχανικούς που εργάζονται στην έρευνα και τη βιομηχανική παραγωγή.

Η μονάδα μέτρησης της πίεσης στο διεθνές σύστημα (SI) είναι το Pascal ($1Pa=1N/m^2$). Στην πράξη συνήθως χρησιμοποιείται το mbar που δεν ανήκει στο SI.

Σε πολλά εργαστήρια υπάρχουν ακόμη όργανα βαθμολογημένα σε torr.

Η σχέση μεταξύ των διάφορων μονάδων πίεσης είναι : **100 Pa=1 mbar=0.76 torr**

Το εύρος των πιέσεων που μπορούν να επιτευχθούν στην πράξη σε θάλαμο κενού, που διατηρείται σε θερμοκρασία δωματίου, εκτείνεται σε 18 τουλάχιστον τάξεις μεγέθους και μπορεί να διαιρεθεί σε 5 περιοχές ανάλογα με τις αντίστοιχες εφαρμογές του κενού.

Το ευρύ φάσμα των εφαρμογών που απαιτούν ένα χαμηλής πίεσεως περιβάλλον αντικατοπτρίζεται σε μια αντίστοιχη ποικιλομορφία των σχεδιασμένων συστημάτων κενού.

Ένα χαρακτηριστικό σύστημα που παρουσιάζεται στο σχήμα χρησιμοποιείται για την εξάχνωση των μετάλλων σε συνθήκες κενού. Το σύστημα άντλησης αποτελείται από μία πολυβάθμια αντλία διάχυσης και υποστηρίζεται από μία περιστροφική μηχανική αντλία.

Πολλές φορές είναι επιθυμητό να μπορούμε να βάλουμε νέα υποστρώματα στο πάνω μέρος του θαλάμου χωρίς να διακοπεί η λειτουργία των αντλιών. Γι' αυτό χρησιμοποιείται ειδικός μηχανισμός. Έτσι αποφεύγεται η επίπονη για την αντλία

θέρμανση – ψύξη λαδιών. Δηλαδή, για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος του κάθε κύκλου άντλησης είναι καλύτερο η αντλία διάχυσης να λειτουργεί συνεχώς, ώστε να αποφεύγεται η αναμονή για τη θέρμανση ή την ψύξη του λαδιού της αντλίας.

Αυτό σημαίνει ότι η αντλία πρέπει πάντα να ανιχνεύει κενό της τάξης του 10^{-1} Torr ή και περισσότερο, επίσης η αντλία πρέπει να υποστηρίζεται από παρόμοια πίεση στο σύστημα εξάτμισης.

Ένα διπλό κύκλωμα αντλιών-κενού που αποτελείται από τρεις βαλβίδες, εκτός των βαλβίδων εξαέρωσης, χρειάζεται για να ολοκληρωθεί ο μηχανισμός κενού.

Όταν αρχίζει η λειτουργία παραγωγής κενού και το λάδι είναι ψυχρό, οι βαλβίδες υψηλού-κενού και οι προκαταρκτικές βαλβίδες πρέπει να είναι κλειστές και η πρώτη βαλβίδα σύνδεσης περιστροφικής διάχυσης πρέπει να είναι ανοικτή. Μόλις το λάδι θερμανθεί ένα υψηλό κενό δημιουργείται πάνω από την αντλία διάχυσης. Η πρώτη βαλβίδα σύνδεσης περιστροφικής διάχυσης κλείνει, απομονώνοντας έτσι την αντλία διάχυσης και η προκαταρκτική βαλβίδα ανοίγει, επιτρέποντας έτσι στην περιστροφική αντλία να δημιουργήσει κενό στον θάλαμο της τάξεως των 10^{-1} torr.

Τέλος, η προκαταρκτική βαλβίδα κλείνει, ενώ η πρώτη βαλβίδα σύνδεσης περιστροφικής διάχυσης και η βαλβίδα υψηλού κενού ανοίγουν, επιτρέποντας στην αντλία διάχυσης να φέρει όλο το φορτίο άντλησης. Αντιστρέφοντας τη φορά των βαλβίδων στο σύστημα μπορούμε εναλλακτικά να αντλήσουμε ή να τροφοδοτήσουμε με αέρα με εύκολο σχετικά τρόπο. Η ίδια λειτουργική διαδικασία ακολουθείται σε άλλα συστήματα διάχυσης-άντλησης όπως το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο όπου η ευκολία αλλαγής δειγμάτων είναι χαρακτηριστικό του οργάνου. Προκειμένου να εξαλείψουμε τον ανθρώπινο σφάλμα, οι κύκλοι άντλησης έχουν αυτοματοποιηθεί χρησιμοποιώντας αισθητήρες πίεσης ελεγχόμενοι από υπολογιστή, οι οποίοι ενεργοποιούν τις βαλβίδες ηλεκτρικά.

Εξαρτήματα άξια αναφοράς σε αυτά τα συστήματα κενού είναι η βαλβίδα υψηλού κενού και τα οπτικά ρυθμιστικά διαφράγματα, που είναι σχεδιασμένα να έχουν υψηλή αγωγιμότητα. Κρυσταλλική ψύξη του φράγματος αποτρέπει το λάδι να εισέλθει στο θάλαμο κενού. Για να εξασφαλίσουμε τα κατάλληλα επίπεδα πίεσης για τη λειτουργία των αντλιών τοποθετούμε θερμοζεύγη στις προκαταρκτικές και τις πρώτες βαλβίδες σύνδεσης περιστροφικής διάχυσης.

Αυτά λειτουργούν σε πιέσεις από 10^{-3} torr έως 1 atm. Οι μετρητές ιονισμού, αντίθετα, είναι ευαίσθητοι σε επίπεδα κενού μεταξύ 10^{-3} και 10^{-10} torr κι έτσι τοποθετούνται έτσι ώστε να μετρούν την πίεση στο θάλαμο κενού. Στην πραγματικότητα όλες οι αναφερόμενες πιέσεις κατά την απόθεση λεπτών υμενίων, την επεξεργασία και τις δραστηριότητες χαρακτηρισμού προέρχονται από τους μετρητές ιονισμού.

6.3 Αντλίες παρασκευής κενού

6.3.1 Αντλίες προσρόφησης

Οι αντλίες προσρόφησης είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να χρησιμοποιούνται για την επίτευξη κενού της τάξης των 10^{-2} torr. Οι αντλίες αυτές δεν καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια και είναι αρκετά απλές στη χρήση τους. Μέσα σε μεταλλικό δοχείο όγκου 2-3 λίτρων φέρεται πορώδης ζεόλιθος (ο ζεόλιθος είναι κεραμικό με υψηλό βαθμό πορώδους). Γύρω από το δοχείο τοποθετείται δοχείο από φελιζόλ (μονωτικό) που γεμίζει με υγρό άζωτο. Αφού ψυχθεί ο πορώδης ζεόλιθος

πραγματοποιείται άνοιγμα με χρήση βαλβίδας για τη σύνδεση του δοχείου με το ζεόλιθο με το θάλαμο κενού. Τότε αέρια από το θάλαμο συμπυκνώνονται και προσροφώνται – παγιδεύονται από τον πορώδη ζεόλιθο. Μέσα σε διάστημα περίπου 3,5 ωρών μπορεί να επιτευχθεί χαμηλό κενό σε θάλαμο όγκου 100 λίτρων. Μετά τη θέρμανση του στους 250° C, ο ζεόλιθος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ξανά.

6.3.2 Περιτροφικές αντλίες

Οι κατηγορίες περιστροφικών αντλιών είναι δύο και είναι οι εξής:

1. η αντλία με ελάσματα και
2. η αντλία περιστροφικού εμβόλου.

6.3.2.1 Αντλία με ελάσματα

Οι αντλίες με ελάσματα είναι μια κατηγορία αντλιών που πραγματοποιούν το αναγκαίο προκαταρκτικό κενό για τη λειτουργία των αντλιών υψηλού και υπερυψηλού κενού. Οι αντλίες αυτές διακρίνονται σε δύο κατηγορίες.

Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν αυτές που έχουν ένα έλασμα που ολισθαίνει μέσα σε ένα κοίλο κυλινδρικό τύμπανο. Το έλασμα βρίσκεται σε επαφή με ένα έκκεντρο μηχανισμό που καλείται «περιστροφέας» και που ουσιαστικά είναι ένας μεταλλικός κύλινδρος, ο οποίος στρέφεται γύρω από ένα ανεξάρτητο δικό του άξονα.

Η άλλη κατηγορία περιλαμβάνει τις αντλίες που έχουν δύο ή τρία ελάσματα μέσα στο κοίλο κυλινδρικό τύμπανο. Λόγω της έκκεντρης τοποθέτησης του κυλίνδρου, ο χώρος που βρίσκεται δεξιά του ελάσματος, που είναι συνδεδεμένος με την είσοδο, αυξάνεται κατά την περιστροφή, οπότε η πίεση ελαττώνεται και ο αέρας αναρροφάται.

Αντίθετα, στον χώρο που βρίσκεται αριστερά του ελάσματος ο αέρας συμπιέζεται και διώχνεται από την έξοδο καυσαερίων. Για διάφορους λόγους καλύτερης λειτουργίας η αντλία είναι βυθισμένη μέσα σε ειδικό ορυκτέλαιο. Με αυτού του τύπου αντλίες, μπορούμε να παράγουμε κενό γύρω στα 0.01 torr. Για την επίτευξη χαμηλότερου κενού μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε αντλίες δύο βαθμίδων, όπου το κενό φθάνει στα 10^{-5} torr.

6.3.2.2 Αντλία με περιστροφικό έμβολο

Σε αυτή την περιστροφική αντλία ο έκκεντρος μηχανισμός περιστρέφεται γύρω από στροφαλοφόρο άξονα μέσα στο έμβολο και το ωθεί να περιστραφεί σε τροχιά μέσα στο στάτορα, σχεδόν ακουμπώντας τον.

Το τμήμα του εμβόλου που γλιστρά έχει σχήμα ορθογωνίου και σχηματίζει ένα ενιαίο σώμα με το έμβολο. Αυτό το τμήμα γλιστρά μέσα σε ένα κυλινδρικό μπουλόνι και κινείται εμπρός και πίσω καθώς το έμβολο περιστρέφεται σε τροχιά μέσα στο στάτορα.

Οι αντλίες αυτού του τύπου είναι συνήθως μονής βαθμίδας, παράγουν πιέσεις κοντά στα 10mtorr και γενικά είναι μικρότερης ακρίβειας από τις αντλίες με ελάσματα.

Η ταχύτητα άντλησης φθάνει τα 100 L/sec και με διπλά έμβολα σε ένα κοινό άξονα φθάνει τα 200 L/sec.

6.3.3 Αντλίες διάχυσης

Πρόκειται για κλασικές αντλίες υψηλού και υπερυψηλού κενού. Για να λειτουργήσουν χρειάζονται προκαταρκτικό κενό (π.χ από περιστροφική αντλία) της τάξης των 10^{-1} mbar.

Το κενό που μπορούν να δημιουργήσουν είναι στην περιοχή των $10^{-6} - 10^{-11}$ mbar ανάλογα βέβαια με την ισχύ τους και τις διαρροές του θαλάμου. Οι αντλίες διάχυσης περιλαμβάνουν ένα βραστήρα στον οποίο θερμαίνεται λάδι χαμηλής πίεσεως ατμών και έτσι δημιουργείται στο εσωτερικό της αντλίας μια πίεση της τάξης μερικών mbar. Ο ατμός αυτός στη συνέχεια εκρέει από το εσωτερικό της αντλίας διαμέσου διάφορων ακροφυσίων, συμπυκνώνεται σε τοιχώματα, τα οποία ψύχονται από νερό ή αέρα και επιστρέφει στον βραστήρα στη βάση της αντλίας παρέχοντας έτσι μία διεργασία που επαναλαμβάνεται (θερμοδυναμικός κύκλος).

Ο υψηλής ταχύτητας ατμός, ο οποίος εξέρχεται από τα ακροφύσια, συγκεντρώνει και συμπιέζει το αέριο, το οποίο εισέρχεται στην αντλία από την είσοδο, ώστε να επιτυγχάνεται με τον τρόπο αυτό η άντληση. Μειονεκτήματα αυτού του τύπου αντλίας είναι η πιθανή μόλυνση του θαλάμου κενού από το λάδι της αντλίας .

6.3.4 Τουρμπομοριακές αντλίες

Οι τουρμπομοριακές αντλίες τύπου αξονικής ροής χρησιμοποιήθηκαν για πρώτη φορά πριν 45 περίπου χρόνια. Από τότε μέχρι και σήμερα, η χρήση τους υπήρξε εντυπωσιακή. Τώρα πλέον αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά εξαρτήματα της τεχνολογίας του υπερυψηλού κενού.

Σε σύγκριση με τις αντλίες διάχυσης, η κύρια διαφορά τους στηρίζεται στην μεγαλύτερη απόσταση από την οποία τα μόρια εισέρχονται στα τμήματα της αντλίας, τα οποία μεταδίδουν ενέργεια στην εισερχόμενη μοριακή ροή. Γενικά συγκρινόμενη με τους άλλους συμπιεστές, η τουρμπομοριακή αντλία αξονικής ροής έχει τη μεγαλύτερη ογκομετρική ικανότητα για δεδομένο μέγεθος ή διάμετρο. Σε αυτόν τον τύπο της αντλίας, το περιστροφικό τμήμα είναι ομοαξονικό με τον στάτορα του κινητήρα. Ο συμπιεστής αξονικής ροής αποτελείται από εναλλασσόμενους λεπιδωτούς περιστροφείς και στάτορες.

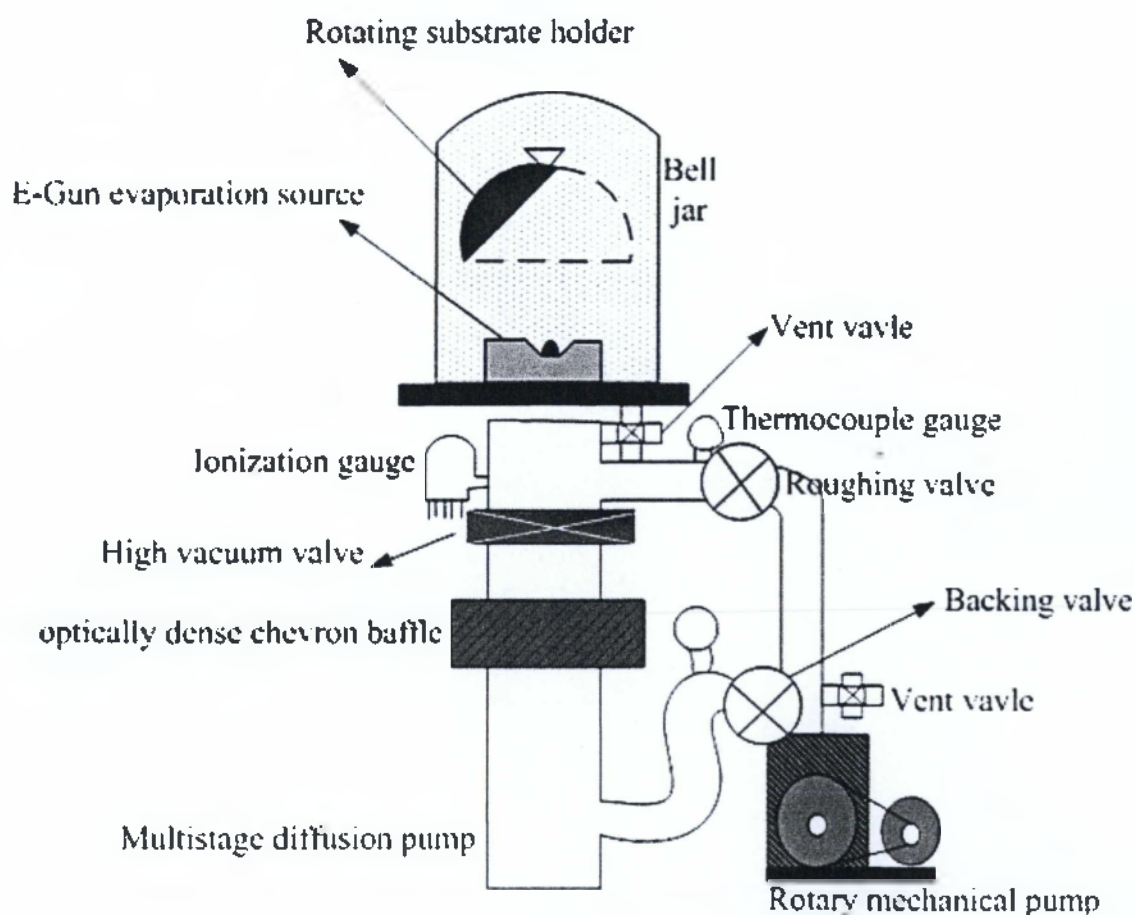
Τέτοιοι συμπιεστές σε περιβάλλον υψηλού κενού παράγουν έναν λόγο συμπίεσης ανά στάδιο (ανά ζεύγος περιστροφέα – στάτορα), που είναι σχεδόν 10 φορές μεγαλύτερος από εκείνον σε συνηθισμένες πιέσεις. Αυτό παράγει έναν ικανοποιητικό λόγο συμπίεσης, αν πούμε για 10 στάδια, έτσι ώστε να δημιουργείται μια χρήσιμη αντλία υψηλού κενού .

Για να περιγράψουμε τον μηχανισμό άντλησης μιας τουρμπομοριακής αντλίας αξονικής ροής αρκεί να θεωρήσουμε μια τέτοια αντλία σαν μια συσκευή μεταφοράς ορμής, όπου τα αντλούμενα μόρια του αερίου συγκρουόμενα με τα κινούμενα επικλινή πτερύγια της αντλίας επιταχύνονται σε καθορισμένη κατεύθυνση.

Πιο συγκεκριμένα, τα αντλούμενα μόρια του αερίου κινούνται προς τα κινούμενα επικλινή πτερύγια της αντλίας, λόγω της διαφοράς πίεσης μεταξύ του υπό άντληση χώρου (ο οποίος αρχικά αντλείται από την μηχανική αντλία) και της περιοχής γύρω από την κινούμενη επιφάνεια της αντλίας (όπου λόγω της υψηλής ταχύτητας

περιστροφής της η στατική πίεση είναι πολύ μικρότερη σε σύγκριση με αυτήν του υπό άντληση χώρου).

Συγκρουόμενα τώρα τα μόρια του αερίου με τα επικλινή πτερύγια της αντλίας επιταχύνονται σε καθορισμένη κατεύθυνση. Στην περιοχή αυτή που κατευθύνθηκαν, η πίεση είναι μεγαλύτερη της αρχικής (υψηλός λόγος συμπίεσης) λόγω συσσώρευσης περισσότερων μορίων αερίου. Η βαθμίδα αυτή της πίεσης μεταξύ του εισόδου και του σημείου εξόδου της τουρμποαντλίας διατηρείται μέσω μηχανικής αντλίας η οποία διοχετεύει συνεχώς το αέριο προς την ατμόσφαιρα .



Σχήμα 6.2

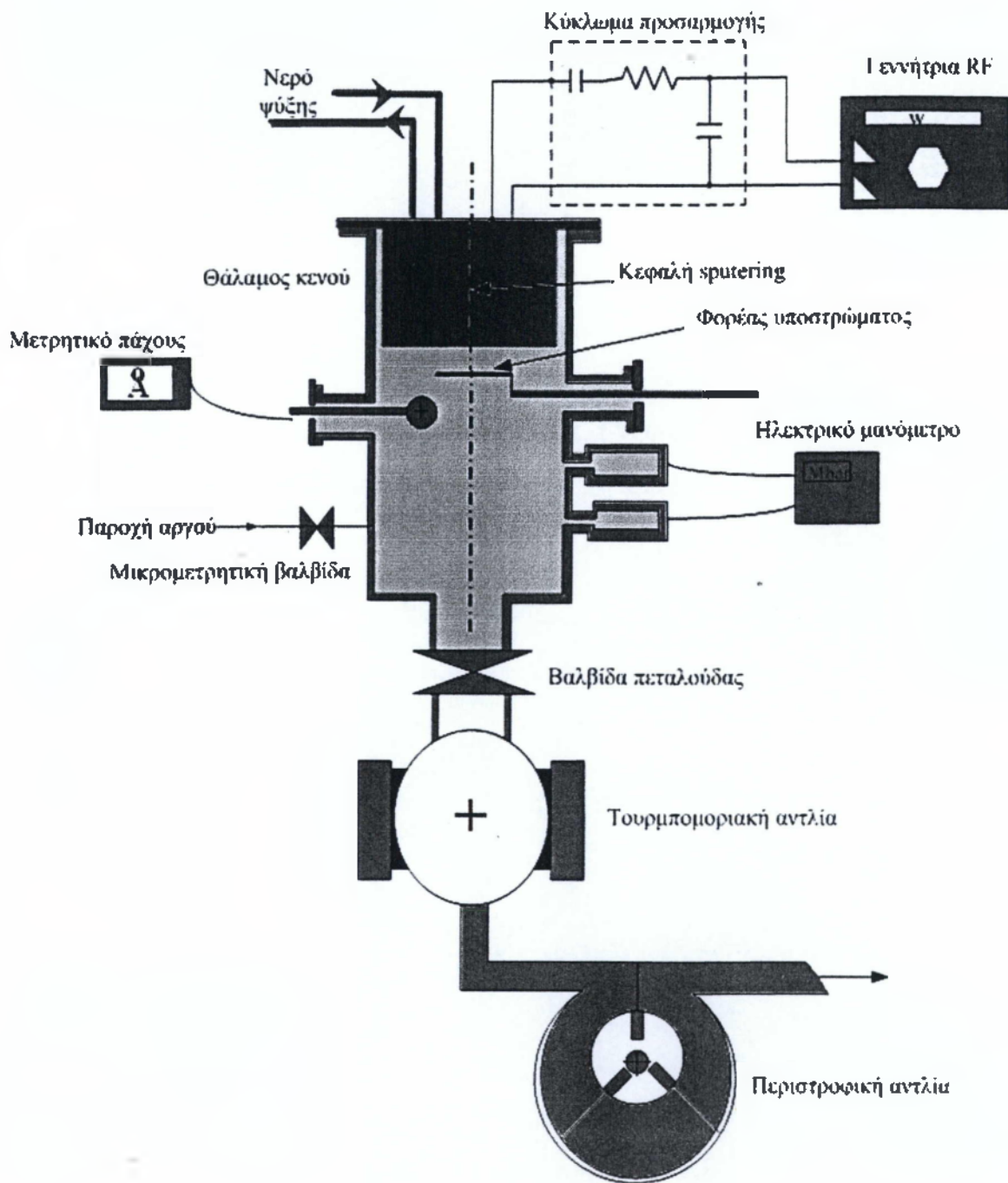
Χαρακτηριστικό σύστημα απόθεσης υπό συνθήκες κενού

6. 4 Sputtering

Η τεχνική αυτή είναι σήμερα από τις πιο διαδεδομένες τεχνικές απόθεσης και αυτή που χρησιμοποιείται ευρύτερα στην επιστήμη λεπτών υμενίων καθώς και σε βιομηχανική κλίμακα κυρίως για την παρασκευή επιστρωμάτων με σχετικά μεγάλο πάχος.

Κατά τη διαδικασία αυτή μια ηλεκτρική εκκένωση (αέριο φορτισμένων σωματιδίων) διατηρείται πάνω από τον στόχο. Αυτός διατηρείται σε μια αρνητική τάση μερικών εκατοντάδων Volts, δηλαδή αποτελεί μια κάθοδο, οπότε και βομβαρδίζεται από τα θετικά ιόντα των αερίων που αποτελούν το πλάσμα Έτσι, άτομα του στόχου αποκτούν μεγάλη ενέργεια και αποσπώνται από τον στόχο είτε αυτούσια είτε υπό μορφή ενώσεως με το αέριο του πλάσματος. Μερικά από αυτά ξαναγυρνάνε στο στόχο, άλλα αποτίθενται στις εσωτερικές επιφάνειες του θαλάμου κενού και άλλα στην πορεία τους συναντούν το υπόστρωμα όπου συμπυκνώνονται και σχηματίζουν ένα λεπτό υμένιο.

Η όλη διαδικασία (καθοδική sputtering) μπορεί να συγκριθεί με μια λεπτόκοικη αμμοθύελα, όπου η ορμή των σωματιδίων άμμου είναι καθοριστικότερη ποσότητα από την ίδια τους την ενέργεια. Στις περισσότερες περιπτώσεις για την παραγωγή πλάσματος χρησιμοποιείται το ευγενές αέριο Αργό, διότι τα άτομά του είναι το ίδιο μεγάλα με τα άτομα των συνηθισμένων μετάλλων και επιπλέον υπάρχει σε μεγάλες ποσότητες. Επίσης, δεν σχηματίζει ανεπιθύμητες ενώσεις στην επιφάνεια του στόχου επειδή είναι ευγενές. Όταν τα ιόντα Αργού προσκρούουν στην επιφάνεια του στόχου, ουδετεροποιούνται προσλαμβάνοντας ηλεκτρόνια και μερικά «θάβονται» στην επιφάνεια του στόχου, ενώ τα περισσότερα εξοστρακίζονται προς τα πίσω, όπου και επαναϊονίζονται με αποτέλεσμα η όλη διαδικασία να είναι αυτοσυντηρούμενη. Για να αυξηθεί ο ρυθμός του sputtering άρχισαν να χρησιμοποιούνται μαγνητικά πεδία (μάγνητρον sputtering) που εστιάζουν το πλάσμα στον στόχο. Με την κατανόηση του πόσο σημαντική ήταν η χρήση μαγνητικών πεδίων στη ρύθμιση του ρυθμού παρασκευής υμενίων, η μέθοδος sputtering άρχισε να γίνεται όλο και πιο ενδιαφέρουσα για βιομηχανική χρήση.



Σχήμα 6.3
 Συνολική σχηματική αναπαράσταση της RF magnetron sputtering

6.4.1 Μάγνητρον sputtering

Οι μονάδες sputtering διακρίνονται σε DC και RF. Οι πρώτες χρησιμοποιούνται για την παρασκευή δειγμάτων που είναι αγωγίμα (κυρίως μέταλλα), ενώ οι δεύτερες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην ανάπτυξη υμενίων κεραμικών υλικών .

Η αρχή λειτουργίας των δύο διατάξεων είναι παρόμοια: Ωστόσο, στις πρώτες η τάση είναι συνεχής και στις δεύτερες εναλλασσόμενη με συχνότητα στην περιοχή των ραδιοκυμάτων . Οι DC μονάδες δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απόθεση μη αγωγίμων υλικών, διότι αυτά δρουν σαν πυκνωτές. Αν ο στόχος είναι μονωτής, τότε το αγωγίμο ηλεκτρόδιο της καθόδου που βρίσκεται πίσω από αυτόν έλκει αρχικά τα θετικά ιόντα του αργού που συσσωρεύεται στην αναλωμένη επιφάνεια του στόχου. Αυτό το θετικό φορτίο που συσσωρεύεται έχει σαν αποτέλεσμα να απωθεί τα θετικά ιόντα αργού που καταφθάνουν στην επιφάνεια του στόχου.

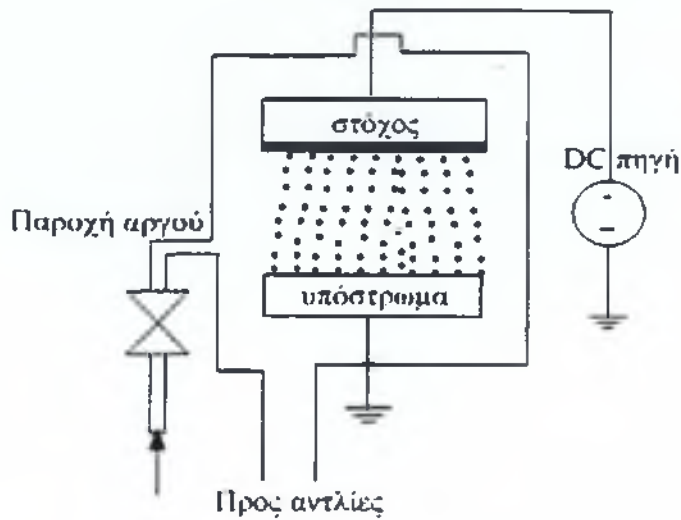
Η συσσώρευση του φορτίου φθάνει τελικά σε τέτοιο βαθμό που διακόπτεται ολοκληρωτικά η διαδικασία. Έχουμε στην ουσία έναν πλήρως φορτισμένο πυκνωτή. Για να συνεχιστεί η διαδικασία sputtering θα πρέπει να αναστρέψουμε τη πολικότητα της πηγής, ώστε η κάθοδος να γίνει άνοδος, να έλξει αρκετά ηλεκτρόνια που θα εξουδετερώσουν το συσσωρευμένο θετικό φορτίο της επιφάνειας του στόχου, για να συνεχιστεί η διαδικασία με αναστροφή πάλι της πολικότητας. Τα ηλεκτρόνια λόγω της πολύ μικρής μάζας τους συγκριτικά με τη μάζα των θετικών ιόντων επιταχύνονται πολύ πιο γρήγορα από τα θετικά ιόντα. Θα πρέπει η συχνότητα που εφαρμόζουμε να είναι αρκετά μεγάλη, ώστε τα θετικά ιόντα να μην προλαβαίνουν να αλλάξουν κατεύθυνση από το ανάστροφο πεδίο (αυτό που κατευθύνει τα ιόντα μακριά από το στόχο).

Για αυτό το λόγο η συχνότητα που χρησιμοποιούμε είναι της τάξης των MHz. Βασική κυκλωματική διαφορά της RF magnetron από τη DC είναι η ύπαρξη κυκλώματος προσαρμογής στην πρώτη. Λόγω του ότι η τάση είναι εναλλασσόμενη στην RF sputtering , αυτή συμπεριφέρεται εν μέρει σαν χωρητικότητα και εν μέρει σαν ωμική αντίσταση.

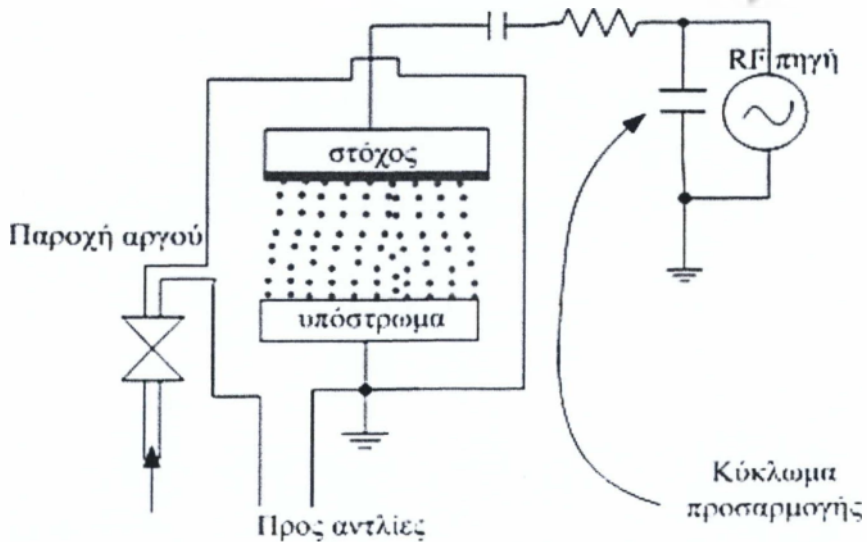
Ο χωρητικός χαρακτήρας της συσκευής δημιουργεί ανάκλαση ενός μέρους της ισχύος που παρέχουμε (παρέχει άεργο ισχύ στο σύστημα) με αποτέλεσμα να χρειάζεται η πηγή να παρέχει μεγαλύτερο ρεύμα για την απόδοση της ίδιας πραγματικής ισχύος στο σύστημα, αν δεν είχε χωρητικό χαρακτήρα. Η λύση είναι φυσικά η χρήση επαγωγής που θα αντισταθμίζει τη συμπεριφορά της χωρητικότητας που επιδεικνύει το σύστημα. Με αυτόν τον τρόπο η πηγή είναι σαν να βλέπει μια αντίσταση και το ρεύμα που θα αναγκάζεται να παρέχει είναι πολύ μικρότερο. Η επαγωγή είναι ρυθμιζόμενη, γιατί η συμπεριφορά του πλάσματος είναι διαφορετική ανάλογα με τις συνθήκες απόθεσης (γεωμετρία του στόχου, πίεση του αερίου).

Στο κύκλωμα προσαρμογής χρησιμοποιούνται επίσης πυκνωτές για την ακριβή προσαρμογή της πηγής με το θάλαμο sputtering και για τυχόν επαγωγική συμπεριφορά των αγωγών διασύνδεσης.

DC MAGNETRON SPUTTERING

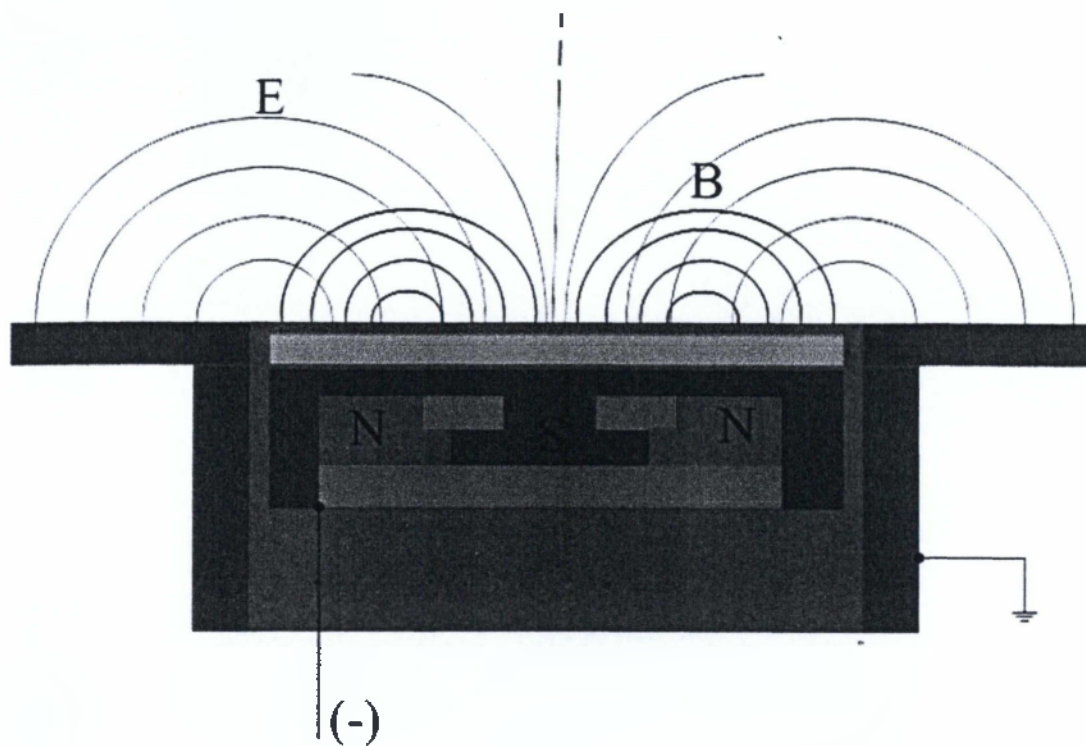


RF MAGNETRON SPUTTERING



Σχήμα 6.4

Απλοποιημένα διαγράμματα DC και RF magnetron sputtering.



Σχήμα 6.5

Τομή μιας τυπικής κεφαλής magnetron sputtering.

Με κόκκινο και μπλε χρώμα είναι οι μαγνητικές γραμμές που δημιουργεί ο ισχυρός δακτυλιοειδής μαγνήτης καθώς και οι δυναμικές γραμμές του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από την εφαρμογή κατάλληλης τάσης.



Κ Ε Φ Α Λ Α Ι Ο

Ολοκληρωμένες
αντιστάσεις και
πυκνωτές- Τρανζίστορ
MOSFET

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΕΣ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΥΚΝΩΤΕΣ - ΤΡΑΝΖΙΣΤΟΡ ΜΟΣΦΕΤ

Η κατασκευή των αντιστάσεων στα ολοκληρωμένα κυκλώματα δεν απαιτεί κάποια ιδιαίτερη τεχνική. Πραγματοποιείται με εκμετάλλευση και κατάλληλη χρήση στρωμάτων που παράγονται τόσο με τη διπολική τεχνολογία όσο και με τις τεχνολογίες MOS και CMOS.

7.1 Ολοκληρωμένες αντιστάσεις

Οι αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα ονομάζονται **ολοκληρωμένες αντιστάσεις**. Το κριτήριο με το οποίο θα επιλέξουμε τα υλικά και τον τύπο των ολοκληρωμένων αντιστάσεων έχει να κάνει με την επιθυμητή τιμή της αντίστασης, έτσι ώστε το κύκλωμα να δουλεύει σωστά, καθώς και από τις κατασκευαστικές προδιαγραφές τους που θα πρέπει να ικανοποιούνται. Οι πιο γνωστοί και σημαντικοί τύποι ολοκληρωμένων αντιστάσεων είναι οι εξής:

1. Αντιστάσεις τύπου διάχυσης
2. Αντιστάσεις λεπτών στρωμάτων (thin films)

7.1.1 Αντιστάσεις τύπου διάχυσης

Οι αντιστάσεις τύπου διάχυσης κατασκευάζονται με βάση το ενεργό στρώμα του πυριτίου που χρησιμοποιείται για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Το πυρίτιο το οποίο αρχικά έχει μεγάλη ειδική αντίσταση, έχει την ικανότητα της επιλεκτικής διαμόρφωσης της τιμής της μέσω της εισαγωγής των καταλλήλων προσμίξεων δοτών (π.χ. P,As) ή αποδεκτών (B,Ga), κάτι που είναι μεγάλο πλεονέκτημα.

Η εισαγωγή των προσμίξεων αυτών γίνεται με διάχυση ή εμφύτευση ιόντων των πιο πάνω στοιχείων σε επιλεγμένες περιοχές της επιφάνειας του δισκίου. Η τελική τιμή της ολοκληρωμένης αντίστασης του υλικού (μήκος, πλάτος και βάθος διάχυσης).

Στη συνέχεια θα χρησιμοποιήσουμε SiO_2 για την απομόνωση της αντίστασης από τα γειτονικά στοιχεία του κυκλώματος και την προστασία από ανεπιθύμητες προσμίξεις με τα κατάλληλα ανοίγματα για τις ωμικές μεταλλικές επαφές που κατασκευάζονται συνήθως με Al. Στην τομή μιας ολοκληρωμένης αντίστασης υπάρχει μια περιοχή αντίθετης νόθευσης (N τύπου στην προκειμένη περίπτωση) η οποία απομονώνει την αντίσταση από το υπόλοιπο υπόστρωμα σχηματίζοντας μια ανορθωτική επαφή PN σε ανάστροφη πόλωση. Η περιοχή αυτή λέγεται **νησίδα απομόνωσης** και εμποδίζει τα ρεύματα διαρροής προς το υπόστρωμα.

Μια δεύτερη χρήση της είναι για την απομόνωση άλλων ολοκληρωμένων στοιχείων. Ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα των αντιστάσεων τύπου διάχυσης είναι ο μεγάλος όγκος που καταλαμβάνουν. Για παράδειγμα για μεγάλες τιμές αντίστασης

(πάνω από 10KΩ) απαιτείται μεγάλο μήκος (σε μαιανδρικό σχήμα) και ο συνολικός όγκος είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν που απαιτείται για την κατασκευή ενεργητικών στοιχείων (transistors, διόδων κ.α.).

Ένα χαρακτηριστικό μέγεθος που χρησιμοποιείται στην περίπτωση των ολοκληρωμένων αντιστάσεων είναι η αντίσταση που συμβολίζεται με R_s ή R_o και ορίζεται ως εξής:

$$R_s = \frac{\rho}{d} \quad (1)$$

Όπου : ρ η ειδική αντίσταση του υλικού και d το πάχος

$$\text{Αν } (1) \xrightarrow{\rho=(n\mu e)^{-1}} R_s = \frac{1}{N\mu d \cdot e} \quad (\text{θεωρώντας πλήρη ιονισμό του ημιαγωγού } (n-N))$$

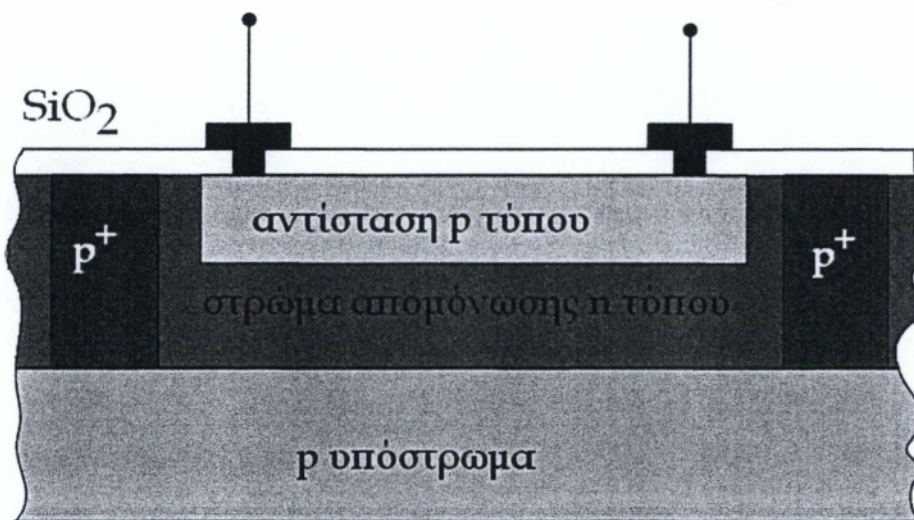
Όπου N : η συγκέντρωση προσμίξεων θεωρούμενη σταθερή για ομοιόμορφη κατανομή.

$$\text{Πιο συγκεκριμένα ισχύει η σχέση } R_s = \frac{1}{e \cdot \mu \int N(x) dx}$$

Όπου $N(x)$ η κατανομή προσμίξεων συναρτήσει του βάρους

$$\text{Με την βοήθεια της σχέσης } R = \frac{\rho \cdot \ell}{d \cdot w} \text{ έχουμε: } R = R_s \cdot \frac{\ell}{w} \text{ ή } R = R_s \cdot k$$

Όπου k ο αριθμός των ισοδύναμων τετραγώνων της επιφάνεια της ολοκληρωμένης αντίστασης.



Σχήμα 7.1

Αντίσταση διάχυσης τύπου p

Στο παραπάνω σχήμα παρουσιάζεται μια αντίσταση διάχυσης p-τύπου η οποία στην ουσία εκμεταλλεύεται τη διάχυση βάσης ενός διπολικού τρανζίστορ ενώ το n-τύπου στρώμα του συλλέκτη δρα σαν στρώμα απομόνωσης και οριοθέτησης του σχήματος και της έκτασης της p-τύπου αντίστασης.

Αν παρατηρήσουμε στο σχήμα αντιλαμβανόμαστε την ύπαρξη ενός παρασιτικού, κατακόρυφου pnp τρανζίστορ μεταξύ του p- στρώματος της αντίστασης (δρα σαν εκπομπός), του n-στρώματος απομόνωσης (δρα σαν βάση) και του p-υποστρώματος (που δρα σα συλλέκτης). Παράλληλα, παρουσιάζονται και παρασιτικές χωρητικότητες στην επαφή της αντίστασης με το στρώμα απομόνωσης και στην επαφή του στρώματος απομόνωσης με το υπόστρωμα.

7.1.2 Αντιστάσεις λεπτών υμενίων (thin films)

Οι αντιστάσεις αυτές κατασκευάζονται στην επιφάνεια του chip με διάφορες μεθόδους εναπόθεσης (σε υψηλό κενό) λεπτών υμενίων καθαρών μετάλλων ή κραμάτων. Η κατασκευή τους απαιτεί συνήθως περισσότερα του ενός βήματα. Αυτό όμως αντισταθμίζεται από το πλεονέκτημα της εξοικονόμησης όγκου στο chip καθώς επίσης και από τη δυνατότητα χρησιμοποίησης ποικιλίας υλικών με διαφορετικές τιμές ειδικής αντίστασης. Έτσι, με τη χρησιμοποίηση Al είναι δυνατή η επίτευξη χαμηλών τιμών αντίστασης (Ω), ενώ με δύστηκτα μέταλλα ή κράματα (W, Ta, Ni-Cr κ.α.) είναι δυνατή η δημιουργία αντιστάσεων υψηλότερων τιμών (K Ω).

7.2 Ολοκληρωμένοι πυκνωτές

Οι ολοκληρωμένοι πυκνωτές απαιτούν σημαντικό όγκο γιατί θεωρούνται αδρανή στοιχεία. Όπως οι ολοκληρωμένες αντιστάσεις έτσι και οι ολοκληρωμένοι πυκνωτές παίζουν καθοριστικό ρόλο για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Οι ολοκληρωμένοι πυκνωτές χωρίζονται σε 2 κατηγορίες:

1. τους MOS πυκνωτές και
2. τους p-n πυκνωτές

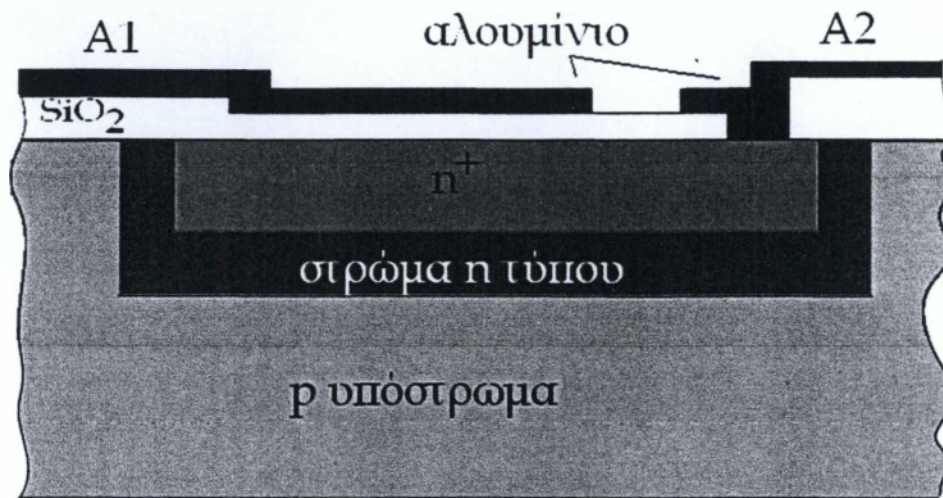
7.2.1 MOS πυκνωτές

Οι πυκνωτές MOS κατασκευάζονται με βάση την δομή μέταλλο - οξείδιο - ημιαγωγός.

Στο σχήμα 7.2 που ακολουθεί παρουσιάζεται η δομή ενός MOS πυκνωτή. Ο πάνω οπλισμός του πυκνωτή αποτελείται από αλουμίνιο, ενώ εκτός από μέταλλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πολυκρυσταλλικό πυρίτιο. Ο κάτω οπλισμός αποτελείται από ένα στρώμα πυριτίου έντονα ντοπαρισμένο (n^+ -τύπου). Τους δύο οπλισμούς διαχωρίζει το λεπτό μονωτικό στρώμα του διοξειδίου του πυριτίου με πάχος της τάξης των 500Å.

Και σε αυτήν την περίπτωση, η δημιουργία του n^+ οπλισμού δεν αποτελεί μια ξεχωριστή (customized) διαδικασία που γίνεται ειδικά για την κατασκευή του πυκνωτή MOS. Έτσι, η n^+ περιοχή στον πυκνωτή MOS σχηματίζεται είτε κατά τη διαδικασία των εμφυτεύσεων ή διαχύσεων εκπομπού στα διπολικά τρανζίστορ είτε κατά τη διαδικασία των εμφυτεύσεων ή διαχύσεων για τη δημιουργία πηγών και απαγωγών στην τεχνολογία MOS. Στο παράδειγμα του σχήματος παρουσιάζεται η εκμετάλλευση της διπολικής τεχνολογίας για την κατασκευή του πυκνωτή MOS. Το

στρώμα n-τύπου μέσα στο οποίο κατασκευάζεται ο n^+ οπλισμός δεν είναι τίποτε άλλο από το επιταξιακό στρώμα του συλλέκτη στη διπολική τεχνολογία (με ειδική αντίσταση της τάξης του 0.5 Ohm/cm). Σε αυτό το στρώμα παραλείπεται το στάδιο σχηματισμού της βάσης και πραγματοποιείται το στάδιο της διάχυσης ή εμφύτευσης του n^+ τύπου εκπομπού. Μεταξύ του επιταξιακού στρώματος του συλλέκτη και του υποστρώματος δημιουργείται μια παρασιτική pn επαφή που εισάγει μια παρασιτική χωρητικότητα (παράλληλα προς την παρασιτική δίοδο).



Σχήμα 7.2
Πυκνωτής MOS

Επίσης, το n^+ στρώμα του οπλισμού εισάγει μια μικρή αντίσταση της τάξης των 5-10 Ohm σε σειρά με τον πυκνωτή MOS. Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί μια βασική διαφορά μεταξύ του πυκνωτή επαφής και του πυκνωτή MOS. Ο πυκνωτής επαφής απαιτεί ανάστροφη πόλωση της επαφής και κατά συνέπεια είναι ένας πολωμένος πυκνωτής, ενώ ο πυκνωτής MOS είναι ένας μη πολωμένος πυκνωτής.

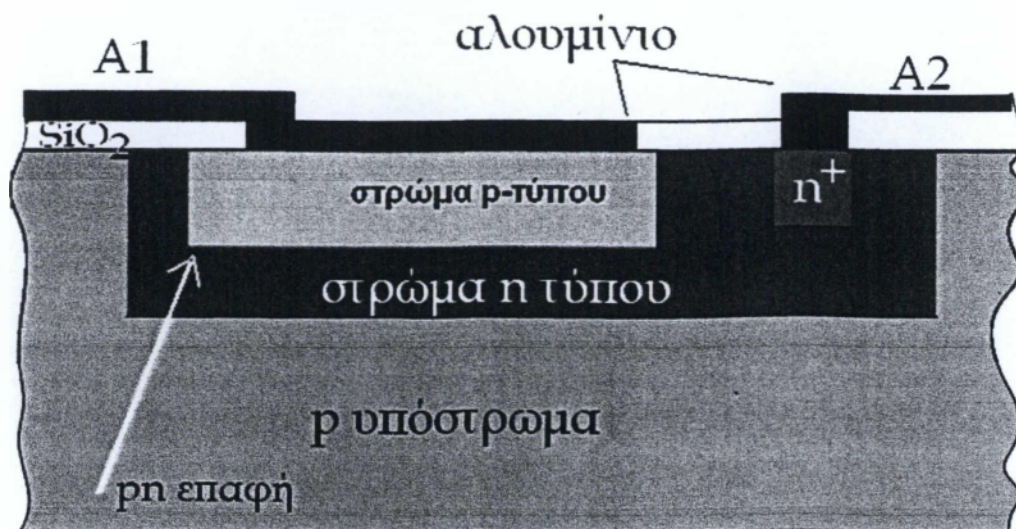
7.2.2 p-n πυκνωτές

Στο σχήμα 7.3 απεικονίζεται η δομή ενός πυκνωτή επαφής, όπου γίνεται εκμετάλλευση της χωρητικότητας που παρουσιάζει μια p-n επαφή.

Στο σχήμα καταδεικνύεται η p-n επαφή μεταξύ της p-τύπου διάχυσης και του επιταξιακού στρώματος n-τύπου η οποία δρα ως χωρητικότητα όταν πολωθεί ανάστροφα και σε αυτήν στηρίζεται η λειτουργία της δομής ως πυκνωτή.

Παράλληλα όμως, όπως φαίνεται στο σχήμα, δημιουργείται και μια παρασιτική pn επαφή μεταξύ του επιταξιακού n-τύπου στρώματος και του υποστρώματος.

Η παρασιτική αυτή επαφή εισάγει και τη δική της παρασιτική χωρητικότητα. Για την ελαχιστοποίηση αυτής της παρασιτικής χωρητικότητας και τη μόνωση του ενεργού πυκνωτή από άλλα στοιχεία, ώστε αυτός να διατηρείται στην επιθυμητή κατάσταση της ανάστροφης πόλωσης, το υπόστρωμα τίθεται στην πιο αρνητική τάση.



Σχήμα 7.3
Πυκνωτής επαφής p-n

7.3 Τρανζίστορ MOSFET

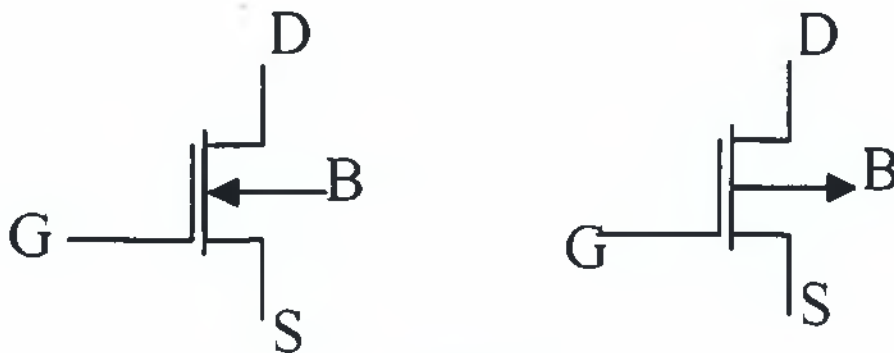
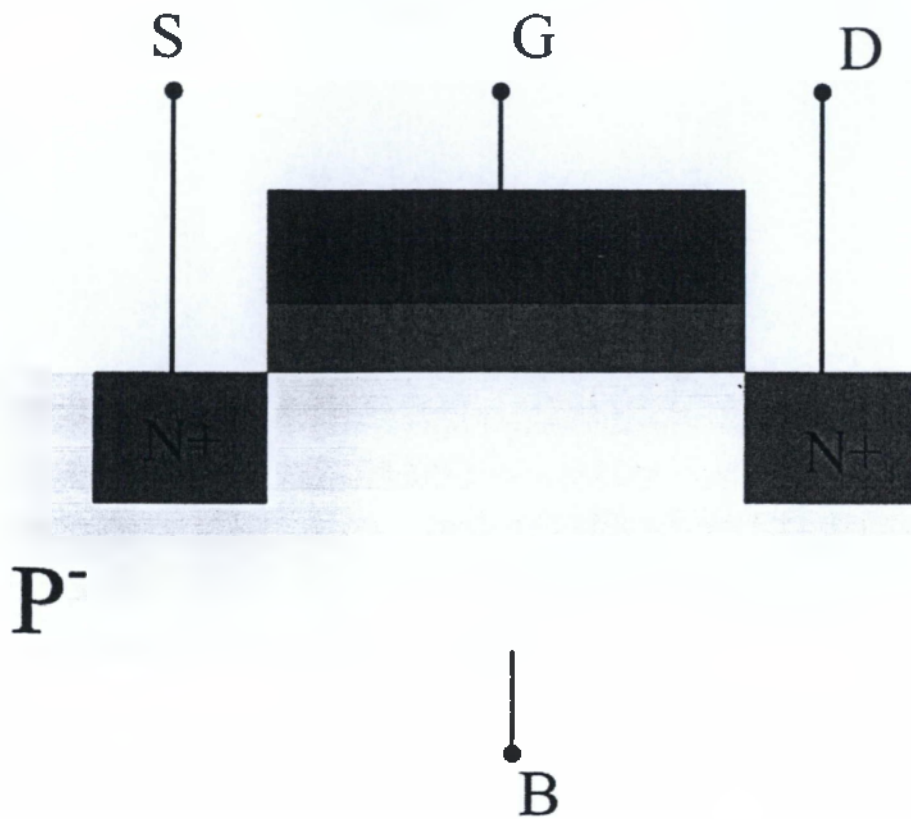
7.3.1 Δομή MOSFET

Το MOSFET ή αλλιώς και MOS είναι μια διάταξη τριών υλικών, μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού, όπως δεικνύεται στο σχήμα που ακολουθεί. Η δομή αυτή δικαιολογεί την επικρατούσα ονομασία του στοιχείου ως MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ή απλώς MOS τρανζίστορ.

Η κατασκευή του MOSFET γίνεται με διαδοχική επίπεδη διαστρωμάτωση υλικών (planar process), με φωτολιθογραφικές μεθόδους. Στο σχήμα διακρίνουμε το ημιαγωγικό υλικό, το οποίο είναι ελαφρώς νοθευμένο με Si τύπου p⁻, (εάν πρόκειται για τρανζίστορ διαύλου n, δηλαδή, nMOS), που αποτελεί το υπόστρωμα (substrate), πάνω στο οποίο δομείται το τρανζίστορ.

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. 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 μονοξειδίου του πυριτίου, SiO₂. Στη συνέχεια της διεργασίας, πάνω από το μονωτικό υλικό εναποτίθεται αγώγιμο μεταλλικό υλικό. Το μέταλλο αποτελεί την πύλη G (Gate) του τρανζίστορ. Συχνά, αντί μετάλλου, χρησιμοποιείται αγώγιμο πολυκρυσταλλικό πυρίτιο, (Poly, polycrystalline silicon), για καθαρά κατασκευαστικούς λόγους.



Σχήμα 7.4
Δομή MOSFET διαύλου-n, σε τομή
Σύμβολο n-MOS και Σύμβολο p-MOS

Με την ανάπτυξη των τριών στρωμάτων μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού, είναι φανερό ότι, σχηματίζεται ένας πυκνωτής, ο οποίος έχει για παράλληλους οπλισμούς την πύλη και το υπόστρωμα και ως διηλεκτρικό το SiO_2 . Το ηλεκτρικό πεδίο αυτού του πυκνωτή ελέγχει τη ροή του ρεύματος στον διάυλο ηλεκτρικής αγωγής, που σχηματίζεται, υπό ορισμένες συνθήκες πόλωσης, μεταξύ του απαγωγού D και πηγής S.

Στο σχήμα απεικονίζονται και τα σύμβολα για MOSFET διαύλου n και διαύλου p. Στα σύμβολα αυτά διακρίνεται ο ακροδέκτης B (bulk), που δηλώνει το σώμα του τρανζίστορ. Ο ακροδέκτης αυτός, σε ολοκληρωμένα κυκλώματα, συνδέεται μονίμως

στο χαμηλότερο δυναμικό για τρανζίστορ διαύλου-p, ή στο ψηλότερο δυναμικό για τρανζίστορ διαύλου-p. Επίσης, σε άλλες τεχνολογίες ο ακροδέκτης **B** συνδέεται μονίμως με την πηγή.

Χαρακτηριστικά γνωρίσματα του MOSFET είναι:

α) οι πολύ μικρές φυσικές διαστάσεις του.

β) η χαμηλή κατανάλωση ισχύος.

γ) η μεγάλη αντίσταση εισόδου της τάξης των $10^{14} \Omega$.

δ) η δυνατότητα κατασκευής με διεργασία επίπεδης διαστρωμάτωσης υλικών.

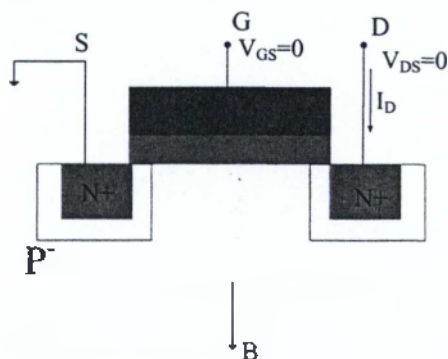
Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών βοηθάει στην ανάπτυξη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας ολοκλήρωσης, VLSI (Very Large Scale Integration).

7.3.2 Λειτουργία σε διαφορετικές συνθήκες πόλωσης

Για να κατανοήσουμε τη λειτουργία του MOSFET, θα διακρίνουμε κάποιες περιπτώσεις διαφορετικών συνθηκών πόλωσης για να μπορέσουμε να εξετάσουμε διαδοχικά τη συμπεριφορά του.

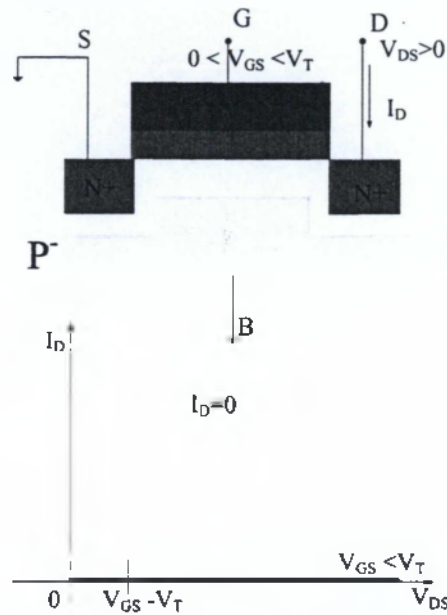
Σε όλες τις περιπτώσεις θεωρούμε το υπόστρωμα **B** του τρανζίστορ καθώς και την πηγή **S** συνδεδεμένα προς τη γη.

1. Αρχικά όλοι οι ακροδέκτες του τρανζίστορ βρίσκονται σε μηδενικό δυναμικό, με αποτέλεσμα το τρανζίστορ να βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας. Στην κατάσταση ισορροπίας σχηματίζονται δύο δίοδοι μεταξύ των περιοχών υψηλής νόθευσης n^+ και του υποστρώματος. Σε κάθε μία δίοδο διακρίνεται η περιοχή απογύμνωσης (depletion region). Επομένως, λόγω της παρουσίας των περιοχών αυτών, ο απαγωγός **D** και η πηγή **S** του τρανζίστορ βρίσκονται σε ηλεκτρική απομόνωση μεταξύ τους και άρα $I_D=0$.

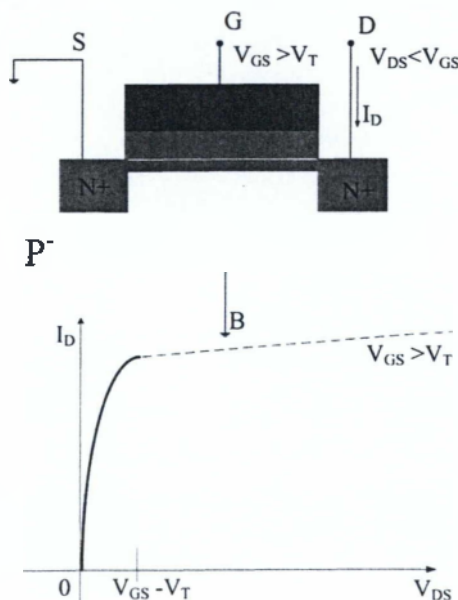


2. Σαν δεύτερη περίπτωση διακρίνουμε την συνθήκη $0 < V_{GS} < V_T$, όπου η πύλη του τρανζίστορ συνδέεται σε θετικό δυναμικό χαμηλής τιμής. Αφού το σύμπλεγμα μετάλλου-ημιαγωγού σχηματίζει έναν πυκνωτή, η παρουσία του θετικού δυναμικού συνεπάγεται τη συγκέντρωση θετικών φορτίων στην πύλη **G** του τρανζίστορ και αρνητικών φορτίων στο υπόστρωμα **B**. Το αρνητικό φορτίο στο υπόστρωμα δημιουργείται από τα δέσμια άτομα αποδεκτών που παραμένουν μετά την απώθηση των οπών από την περιοχή κοντά στο SiO_2 προς το υπόστρωμα.

Έτσι, κάτω από το μονωτικό υλικό δημιουργείται αρχικά μια νέα περιοχή απογύμνωσης που εκτείνεται από την πηγή μέχρι τον απαγωγό. Στην κατάσταση αυτή το ρεύμα απαγωγού είναι μηδενικό, ανεξάρτητα από το δυναμικό του απαγωγού, αφού δεν υπάρχουν ελεύθεροι φορείς αγωγιμότητας στην περιοχή απογύμνωσης.

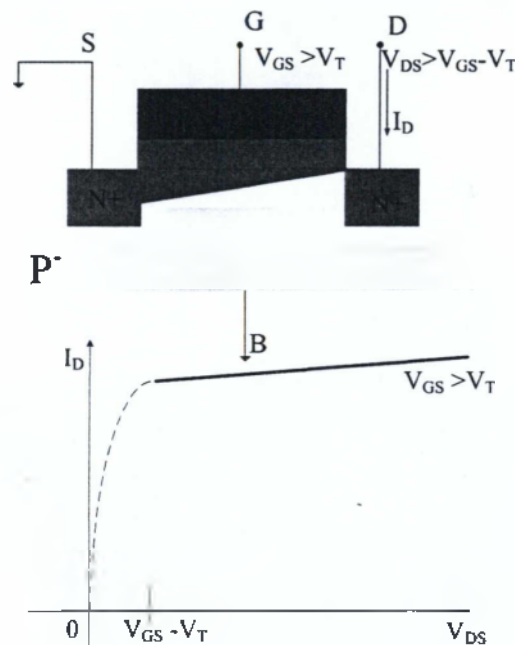


3. Στην περίπτωση που το θετικό δυναμικό της πύλης ξεπεράσει κάποια τιμή, $V_{GS} > V_T$, τότε η περιοχή του υποστρώματος κάτω από την πύλη αναστρέφεται, δηλαδή, από ημιαγωγός τύπου-p μετατρέπεται σε ημιαγωγό τύπου-n. (κατάσταση αντιστροφής). Οπότε, ένας αγωγικός διάυλος τύπου-n σχηματίζεται μεταξύ απαγωγού 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** (Threshold voltage) και συμβολίζεται ως V_T .



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, το δε ρεύμα I_D δια του διαύλου μεταβάλλεται σχεδόν γραμμικά με την τάση V_{DS} . Στην περίπτωση αυτή λέμε ότι, το τρανζίστορ λειτουργεί στην **ωμική του περιοχή**, (ohmic region).

4. 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 από ότι στην περιοχή του απαγωγού.



Σχήμα 7.5
Το MOSFET σε διάφορες καταστάσεις πόλωσης

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), . Στην κατάσταση αυτή το ρεύμα δια του διαύλου παραμένει σχεδόν σταθερό ανεξάρτητα από την τάση του απαγωγού. Τότε λέμε ότι το τρανζίστορ λειτουργεί στην περιοχή του κόρου (saturation region).

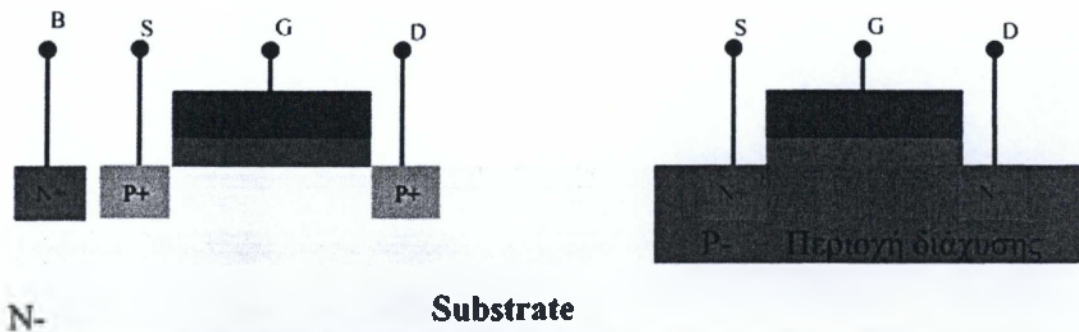
Μεγαλύτερες τιμές της V_{DS} , πέραν της οριακής τιμής, μειώνουν το ενεργό μήκος του διαύλου, με συνέπεια μια μικρή γραμμική αύξηση του ρεύματος του απαγωγού I_D .

Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως διαμόρφωση του μήκους του διαύλου και δικαιολογεί την κλίση της χαρακτηριστικής I-V του MOSFET στην περιοχή του κόρου.

7.3.3 Συμπληρωματικά MOSFET

Η τεχνολογία σήμερα προσφέρει τη δυνατότητα υλοποίησης nMOS και pMOS τρανζίστορ πάνω στο ίδιο υπόστρωμα. Η τεχνολογία αυτή ονομάζεται CMOS (Complementary MOS). Εάν χρησιμοποιηθεί υπόστρωμα τύπου-n, αυτό προσφέρεται για την άμεση υλοποίηση pMOS τρανζίστορ.

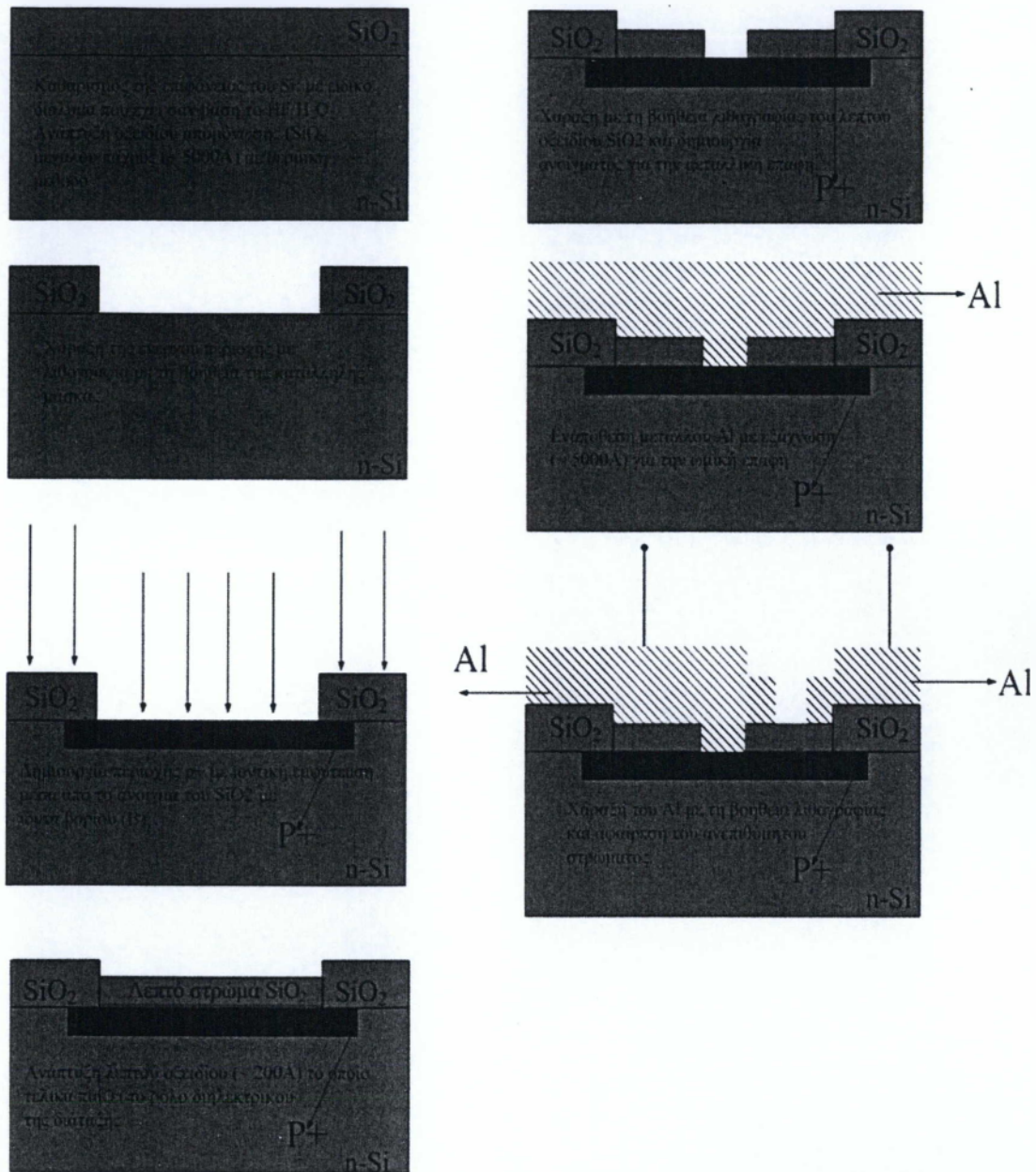
Για την υλοποίηση των nMOS τρανζίστορ δημιουργείται αρχικά μια τάφρος (well or tub), στην οποία προστίθενται προσμίξεις τύπου-p, όπως δεικνύεται στο σχήμα. Μέσα στην τάφρο κατασκευάζονται τα nMOS τρανζίστορ, όπως προαναφέραμε. Κατά την υλοποίηση, μεταξύ των δυο τύπων τρανζίστορ, δημιουργούνται περιοχές απομόνωσης για αποφυγή ανεπιθύμητων επιδράσεων.



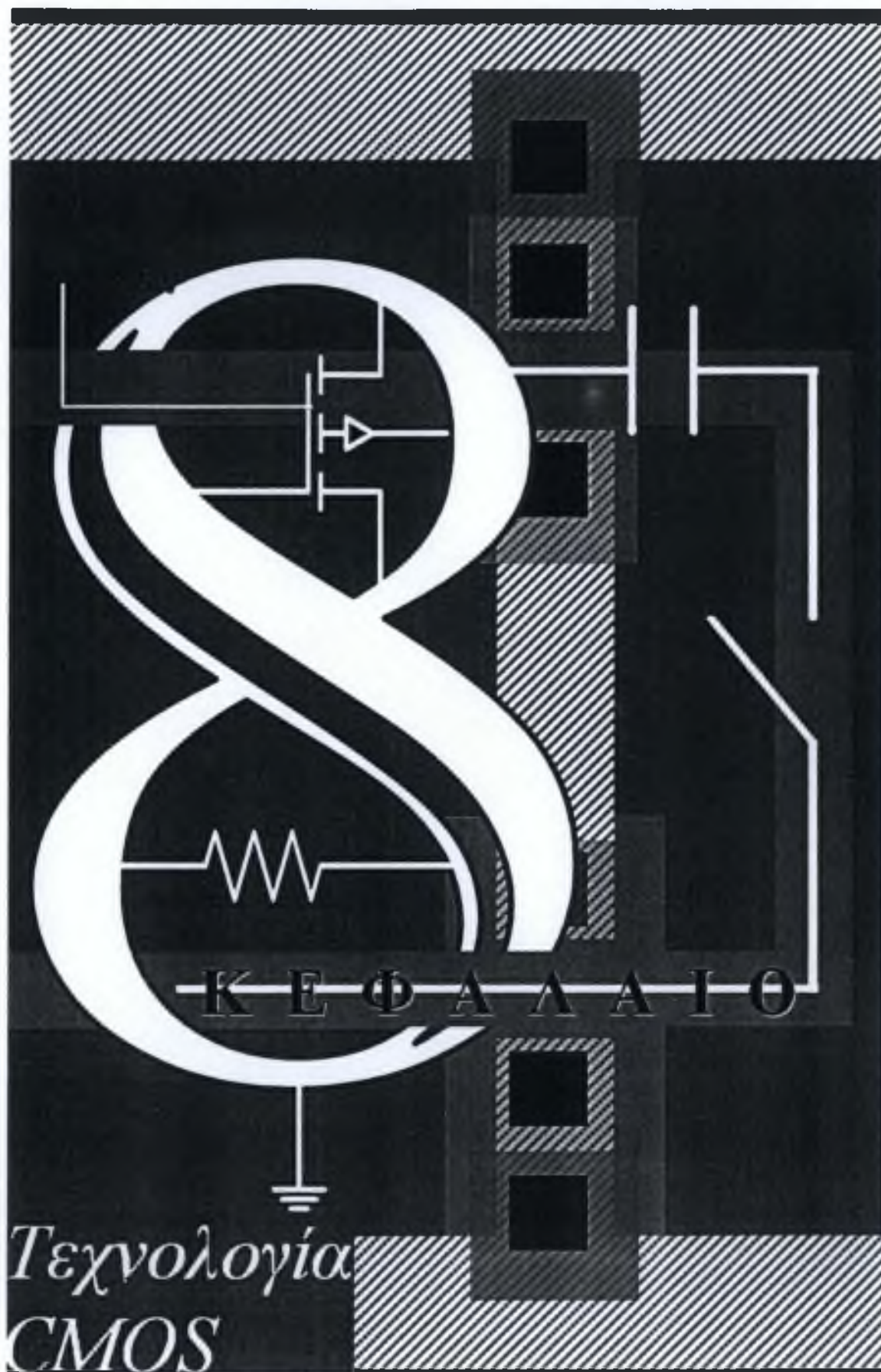
Σχήμα 7.6
Τεχνολογία CMOS, περιοχή διάχυσης

7.4 Κατασκευαστικά στάδια Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

7.4.1 Κατασκευή διόδου MOS



Σχήμα 7.7
Κατασκευαστικά στάδια διόδου MOS πυριτίου



8.1 Τεχνολογία CMOS

Από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα και μέχρι την προηγούμενη δεκαετία περίπου η κυριαρχία των διπολικών τεχνολογιών στη σχεδίαση τηλεπικοινωνιακών συστημάτων υψηλών επιδόσεων ήταν αδιαφιλονίκητη. Τα δύο βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ένα διπολικό απέναντι σε ένα MOS τρανζίστορ είναι η μεγαλύτερη διαγωγιμότητά του (κατά δύο τάξεις μεγέθους περίπου) για δεδομένο ρεύμα, κάτι που φυσικά μεταφράζεται άμεσα στην δυνατότητα ελάττωσης της κατανάλωσης, καθώς επίσης και η υψηλότερη συχνότητα μοναδιαίου κέρδους, η οποία επιτρέπει τη λειτουργία του συστήματος σε υψηλότερες συχνότητες.

Το πρόβλημα όμως παραμένει όταν απαιτείται η ολοκλήρωση τόσο του αναλογικού όσο και του ψηφιακού τμήματος σε μία ψηφίδα πυριτίου. Θα πρέπει στο σημείο αυτό να επεξηγήσουμε περαιτέρω τη σκοπιμότητα της ολοκλήρωσης του αναλογικού τμήματος μαζί με το ψηφιακό. Ένας βασικός λόγος είναι, όπως αναφέραμε και παραπάνω, καθαρά οικονομικός έτσι έχουμε την ελάττωση του κόστους και του μεγέθους της συσκευής. Υπάρχουν όμως και άλλα δύο βασικά πλεονεκτήματα που προσφέρει η πλήρης ολοκλήρωση. Από σχεδιαστικής απόψεως, εάν επιχειρήσουμε να κατασκευάσουμε χωριστά τα δύο τμήματα και μετά να τα συνδέσουμε με καλώδια (bonding wires) στο εσωτερικό της διάταξης, θα αντιμετωπίσουμε προβλήματα προσαρμογής στα σημεία σύνδεσης, καθώς τα bonding wires εισάγουν παρασιτικές χωρητικότητες και επαγωγές που απαιτούν προσεκτική μοντελοποίηση, ενώ τελικά για την προσαρμογή θα χρειαστεί να καταφύγουμε σε παθητικά δίκτυα αποτελούμενα από διακριτά στοιχεία. Αυτό αυξάνει την κατανάλωση, το κόστος αλλά και το μέγεθος της συσκευής. Η προσαρμογή αντίθετα είναι αρκετά ευκολότερη στο εσωτερικό της ίδιας ψηφίδας πυριτίου.

Ένα επιπλέον προτέρημα της πλήρους ολοκλήρωσης σχετίζεται με τα χαρακτηριστικά των σύγχρονων τεχνολογιών αναφορικά με τη συμπεριφορά των στοιχείων κάτω από διαφορετικές συνθήκες (για παράδειγμα, διακύμανση θερμοκρασίας ή τάσης τροφοδοσίας) και με τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια κατά το layout. Είναι γνωστό ότι οι τιμές των αντιστάσεων σε μία συμβατική CMOS τεχνολογία έχουν ανοχές της τάξης του 20%, ενώ και οι διαστάσεις των τρανζίστορ εμπεριέχουν επίσης έναν παράγοντα σφάλματος που μόνο στατιστικά μπορεί να προβλεφθεί. Εάν όμως ο σχεδιαστής γνωρίζει εκ των προτέρων ότι όλο το κύκλωμα θα υλοποιηθεί με την ίδια τεχνολογία, είναι δυνατόν να διαμορφώσει κατάλληλα το layout, ώστε αυτές οι διακυμάνσεις να αλληλοαναιρούνται και να απορροφώνται από τα στοιχεία χωρίς να διαταράσσεται σοβαρά η λειτουργία του κυκλώματος. Κατ' αυτόν τον τρόπο μπορεί να περιοριστεί επίσης και το μέγεθος των επιπτώσεων από θερμοκρασιακές διακυμάνσεις ή ανομοιομορφία στη νόθευση του υποστρώματος σε διαφορετικά σημεία του κυκλώματος.

Με βάση το σκεπτικό αυτό αναπτύχθηκαν κάποιες τεχνολογίες με σκοπό την ενοποίηση των δύο τμημάτων, διατηρώντας παράλληλα τις υψηλές επιδόσεις της διπολικής τεχνολογίας. Παράδειγμα είναι η τεχνολογία πυριτίου-γερμανίου διπολικών

τρανζίστορ ετεροεπαφής (SiGe HBT – Heterojunction Bipolar Transistor). Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει τη σχεδίαση τόσο ψηφιακών όσο και αναλογικών RF κυκλωμάτων σε συχνότητες λειτουργίας που πλησιάζουν την περιοχή των οπτικών επικοινωνιών (μερικές δεκάδες GHz), υποφέρει όμως από το πολύ υψηλό κόστος κατασκευής που τη χαρακτηρίζει. Μια δεύτερη πρόταση είναι η τεχνολογία BiCMOS, η οποία επιτρέπει, όπως φαίνεται και από το όνομά της, την ολοκλήρωση διπολικών και CMOS τρανζίστορ στην ίδια ψηφίδα πυριτίου. Το μειονέκτημα είναι και σε αυτή την περίπτωση οικονομικό, καθώς είναι ακριβότερη από μια συμβατική τεχνολογία πυριτίου (και φυσικά από μια συμβατική CMOS τεχνολογία), ενώ και τα διπολικά τρανζίστορ που δίνει έχουν υποδεέστερες επιδόσεις από αυτά μιας κλασικής διπολικής τεχνολογίας.

Φαίνεται λοιπόν ότι, με δεδομένα τα χαρακτηριστικά που εξασφαλίζουν την κυριαρχία των τεχνολογιών CMOS στη σχεδίαση ψηφιακών συστημάτων (χαμηλό κόστος και υψηλή πυκνότητα ολοκλήρωσης), η απαίτηση για πλήρη ολοκλήρωση θα μπρούσε να ικανοποιηθεί αν τα τρανζίστορ που κατασκευάζονται από αυτές τις τεχνολογίες αποκτήσουν ανταγωνιστικές επιδόσεις ως προς τα διπολικά. Όσον αφορά τη συχνότητα λειτουργίας, παρατηρούμε ότι η διαρκής βελτίωση της τεχνολογίας, και ιδιαίτερα η μείωση των γεωμετρικών διαστάσεων, δίνει πλέον τη δυνατότητα για την κατασκευή MOS τρανζίστορ που είναι εξίσου γρήγορα με τα διπολικά (αγγίζοντας ή και ξεπερνώντας το όριο των 100GHz για τεχνολογίες της τάξης του 0.1μm). Το πρόβλημα της χαμηλής διαγωγιμότητας παραμένει, αλλά μπορεί να αντισταθμιστεί ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής από την καλύτερη γραμμικότητα και το χαμηλότερο θόρυβο που γενικά παρουσιάζουν τα CMOS τρανζίστορ. Το αποτέλεσμα είναι ότι όλο και περισσότερα εμπορικά τηλεπικοινωνιακά συστήματα κατασκευάζονται εξ' ολοκλήρου σε τεχνολογίες CMOS. Η τεχνολογία CMOS αποτελεί έναν από τους ακρογωνιαίους λίθους της σύγχρονης τεχνολογίας ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Χαρακτηριστικά Τεχνολογίας CMOS

1. Η λειτουργία ενός CMOS κυκλώματος ελάχιστα επηρεάζεται από θόρυβο
2. Ελάχιστη στατική κατανάλωση ισχύος
3. Τα κύτταρα λογικής έχουν ιδανικά δυναμικά εξόδου
4. Οι χρόνοι ανόδου/καθόδου είναι της ίδιας τάξης
5. Τα βασικά κύτταρα απαιτούν μικρή επιφάνεια υλοποίησης. Έτσι, η πυκνότητα ολοκλήρωσης είναι πολύ μεγάλη
6. Μετάδοση σωστή και των δύο λογικών σταθμών (0, 1) από πύλες μετάδοσης (πολυπλέκτες, μανταλωτές, καταχωρητές)

8.2 Εισαγωγή στην σχεδίαση οικογένειας λογικών πυλών CMOS

Οι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά στη σχεδίαση λογικών πυλών οικογένειας CMOS και να οδηγήσουν σε λανθασμένη λειτουργία είναι πολλές. Οι πιο συχνές είναι οι εξής:

1. Θόρυβος στις εισόδους πυλών
2. Λανθασμένα τρανζίστορ
3. Λανθασμένες συνδέσεις σε τρανζίστορ
4. Λανθασμένοι λόγοι τρανζίστορ στη λογική με λόγο διαστάσεων
5. Καταμερισμός φορτίου ή ακατάλληλα ρολόγια σε δυναμικές πύλες

Αν καταφέρουμε και κατασκευάσουμε μια συμπληρωματική πύλη CMOS, τότε ο μόνος τρόπος για να εξασφαλίσουμε πως θα λειτουργεί πάντα αξιόπιστα είναι να την τροφοδοτήσουμε με σωστές τροφοδοσίες ισχύος.

Ένα σημαντικό τμήμα του κύκλου σχεδίασης ενός ολοκληρωμένου CMOS αφιερώνεται στη βελτιστοποίηση της ταχύτητας του κυκλώματος.

Επομένως ισχύει ο τύπος $t_{\text{eff}} = k \cdot \frac{C_{\text{load}}}{\beta_{\text{eff}} V_{\text{DD}}}$.

k είναι η σταθερά ($\approx 2-4$). Το β_{eff} είναι το ενεργό β της αλυσίδας του οδηγού «πάνω» ή «κάτω». Το β_{eff} επηρεάζεται από τον αριθμό και το μέγεθος των εν-σειρά (ή παράλληλων) τρανζίστορ στον οδηγό «πάνω» (χρόνος ανόδου) ή στον οδηγό «κάτω» (χρόνος καθόδου). C_{load} είναι η χωρητικότητα που φαίνεται από την πύλη η οποία εξαρτάται από το μέγεθος των τρανζίστορ στην πύλη, το μέγεθος και τον αριθμό των τρανζίστορ στα οποία είναι συνδεδεμένη η πύλη και τη χωρητικότητα διασυνδέσεων μεταξύ μιας πύλης και αυτών που οδηγεί. Και τέλος V_{DD} είναι η τάση τροφοδοσίας ισχύος. Ένα σημαντικό τμήμα του κύκλου σχεδίασης ενός ολοκληρωμένου CMOS θα πρέπει να αφιερωθεί στη βελτιστοποίηση της ταχύτητας του κυκλώματος.

Η ταχύτητα μιας πύλης επηρεάζεται από τους ακόλουθους παράγοντες:

1. Τον αριθμό και μέγεθος των τρανζίστορ της πύλης (εν σειρά ή παράλληλα).
2. Τον αριθμό και μέγεθος των τρανζίστορ στα οποία είναι συνδεδεμένη η πύλη.
3. Το φορτίο χωρητικότητας εξόδου της πύλης.
4. Την χωρητικότητα διασυνδέσεων μεταξύ μίας πύλης και αυτών που οδηγεί.
5. Τους χρόνους ανόδου και καθόδου του σήματος εισόδου.

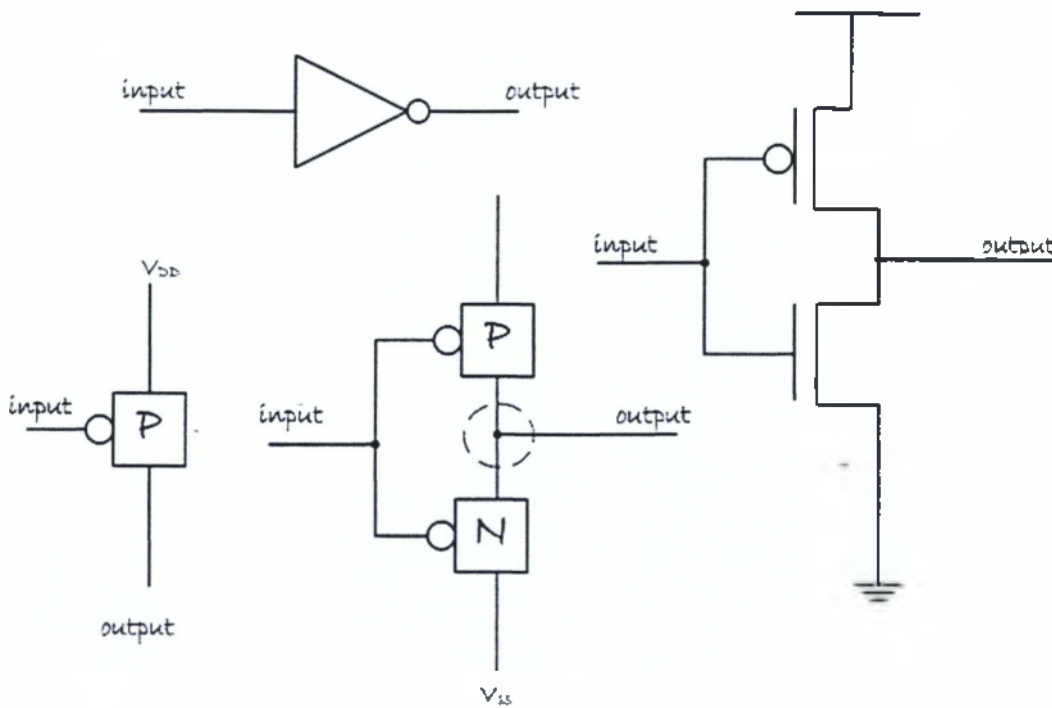
Κανόνες για το πώς σχεδιάζεται ένα κύκλωμα σε συμπληρωματική λογική CMOS με κριτήριο την ταχύτητα:

1. Χρησιμοποίηση πυλών NAND όπου αυτό είναι δυνατό
2. Τοποθέτηση αντιστροφών σε κόμβους με μεγάλο βαθμό οδήγησης
3. Αποφυγή χρήσης δομών NOR κυρίως σε περιπτώσεις μεγάλου βαθμού εισόδου και μεγάλου βαθμού οδήγησης
4. Χρησιμοποίηση βαθμού οδήγησης κάτω από 5-10
5. Χρησιμοποίηση πυλών ελάχιστου μεγέθους σε κόμβους με μεγάλο βαθμό οδήγησης για την ελαχιστοποίηση του φορτίου
6. Διατήρηση των απότομων ακμών ανόδου/καθόδου

7. Σε σχεδιασμούς με κριτήριο την ισχύ ή την επιφάνεια, η χρήση συμπληρωματικών πυλών με μεγάλο βαθμό οδήγησης θα οδηγήσει σε κύκλωμα που θα δουλεύει πάντα εάν δίνεται ικανός χρόνος

8.3 Αναστροφέας τεχνολογίας CMOS

Η δομή συμπληρωματικών MOS τρανζίστορ (Complementary MOS - CMOS) αποτελείται από ένα MOSFET p-καναλιού (PMOS) σε σειρά με ένα MOSFET n-καναλιού (NMOS). Η δομή CMOS μπορεί να λειτουργήσει ως αναστροφέας, ενώ ο κατάλληλος συνδυασμός δομών CMOS μπορεί να δώσει λειτουργίες που αντιστοιχούν σε λογικές πύλες NOR και NAND. Στο σχήμα που ακολουθεί μπορούμε να διακρίνουμε διάφορες σχηματικές απεικονίσεις σχεδιασμού ενός αναστροφέα.

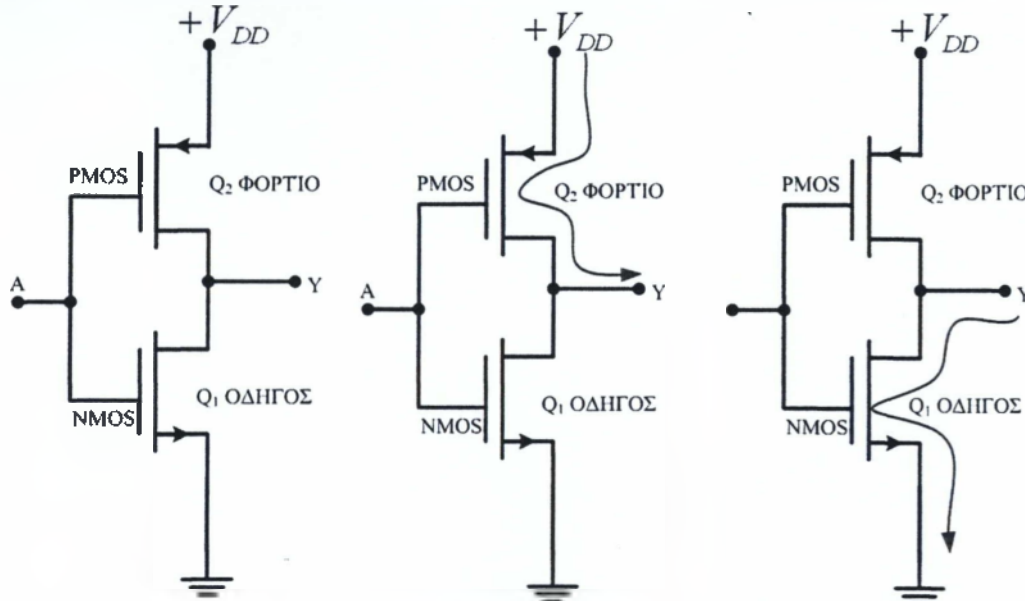


Σχήμα 8.1

Διάφορες σχηματικές απεικονίσεις αναστροφέα

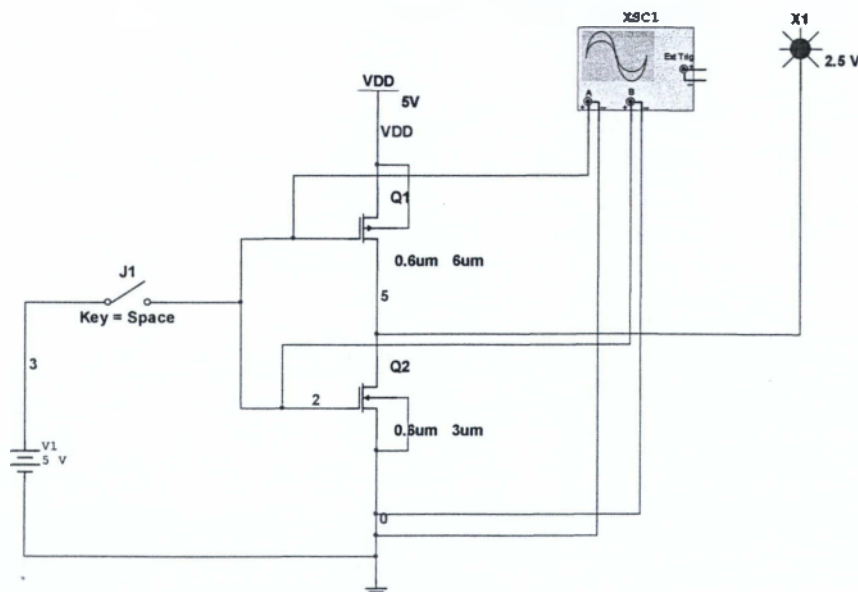
8.3.1 Σχεδίαση

Στον αναστροφέα CMOS τον ρόλο του φορτίου «αναλαμβάνει» το PMOS τρανζίστορ, ενώ το NMOS τρανζίστορ αποτελεί τη βαθμίδα οδήγησης (διακόπτη) του αναστροφέα. Το βασικό πλεονέκτημα του αναστροφέα CMOS είναι η μηδενική κατανάλωση ενέργειας όταν αυτός βρίσκεται σε κάποια σταθερή λογική κατάσταση. Ενέργεια καταναλώνεται μόνο όταν ο αναστροφέας μεταβαίνει από τη μια λογική κατάσταση στην άλλη.



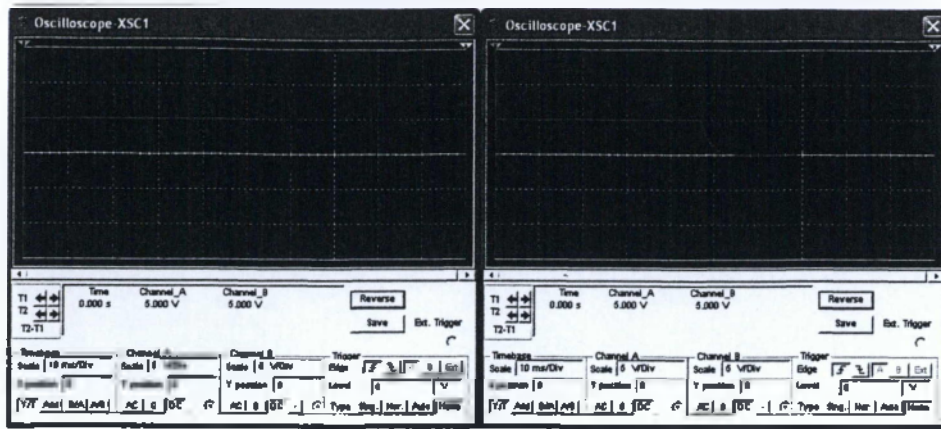
Σχήμα 8.2

Λειτουργία αναστροφέα σε συνάρτηση της εισόδου του.



Σχήμα 8.3

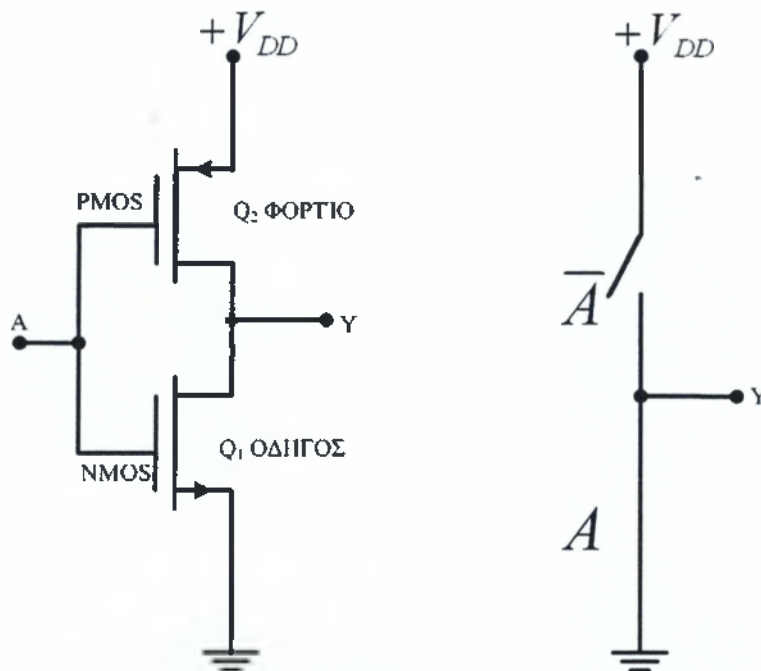
Κύκλωμα αναστροφέα



Σχήμα 8.4

Αποτέλεσμα προσομοίωσης αναστροφεία

Στο ολοκληρωμένο κύκλωμα του σχήματος φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο συνυπάρχουν ένα PMOS και ένα NMOS τρανζίστορ στο ίδιο τοπ. Το PMOS τρανζίστορ κατασκευάζεται μέσα σε ένα φρεάτιο n-τύπου. Η ηλεκτρική του απομόνωση από το NMOS εξασφαλίζεται αυτόματα από την πόλωση του αναστροφεία.

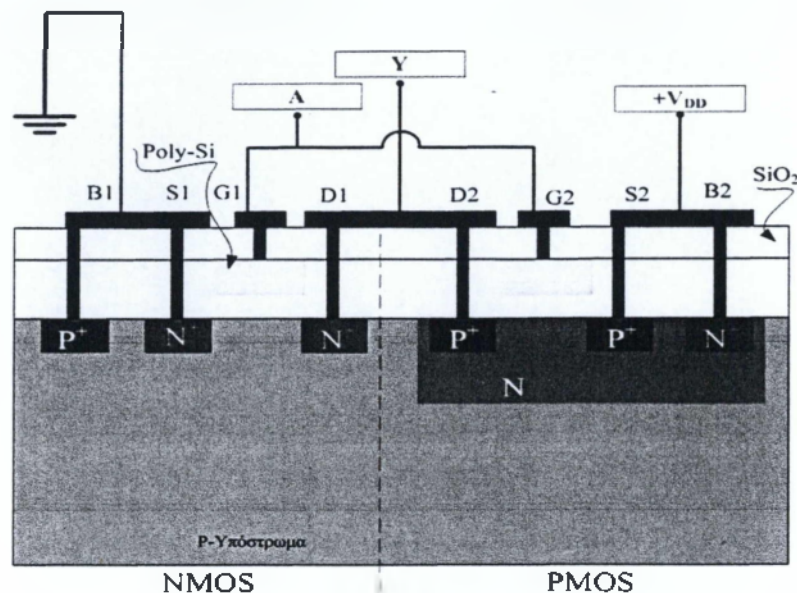


Σχήμα 8.5

Κύκλωμα αναστροφεία CMOS, και ισοδύναμο ιδανικό κύκλωμα διακοπών.

Πραγματικά, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, η πηγή του PMOS (S_2) βρίσκεται σε ηλεκτρική επαφή με το σώμα του φρεατίου n-τύπου (B_2) ενώ κάτι αντίστοιχο συμβαίνει και με την πηγή S_1 του NMOS και το p-τύπου υπόστρωμα. Το

θετικό δυναμικό που εφαρμόζεται στο S_2 και κατά συνέπεια στο n-τύπου φρεάτιο και η γείωση του S_1 και του p-τύπου υποστρώματος ισοδυναμούν με την ανάπτυξη μιας ανάστροφης πόλωσης μεταξύ του n- τύπου φρεατίου και του p-τύπου υποστρώματος η οποία διασφαλίζει την απομόνωση μεταξύ των δύο τρανζίστορ.



Σχήμα 8.6

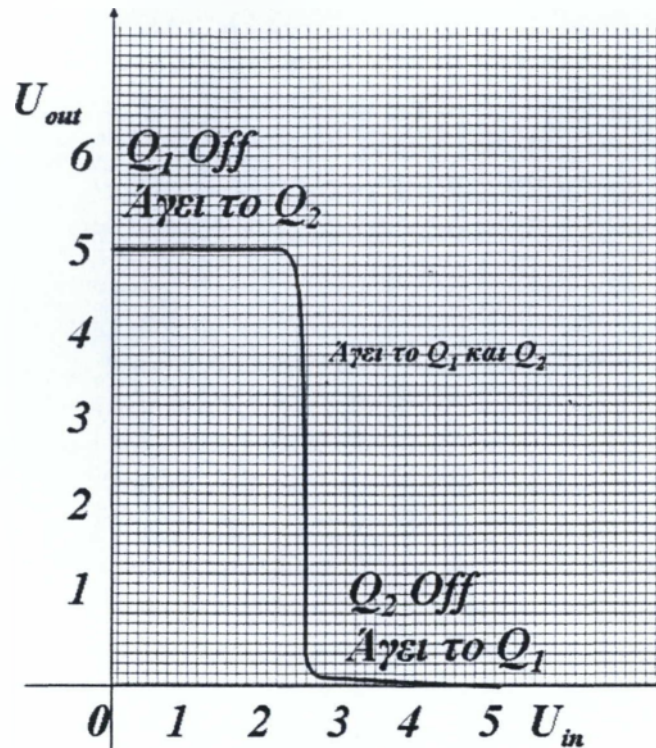
Ολοκληρωμένο κύκλωμα αναστροφεία

Όσον αφορά την κατασκευή τους, το τρανζίστορ PMOS καταλαμβάνει περισσότερο χώρο πάνω στο τσιπ σε σύγκριση με το NMOS. Η κατασκευαστική αυτή ιδιαιτερότητα επιβάλλεται από την ανάγκη του φορτίου και του οδηγού να διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα όταν άγουν.

Η αγωγιμότητα, σε ένα τρανζίστορ PMOS, οφείλεται στις οπές, οι οποίες έχουν τη μισή ευκινησία από τα ηλεκτρόνια (που είναι οι φορείς του ρεύματος στο NMOS). Το ρεύμα i_D του MOSFET είναι ανάλογο της ευκινησίας των ελευθέρων φορέων και του λόγου W/L του μήκους του FET προς το μήκος του καναλιού. Κατά συνέπεια, για να αντισταθμιστεί η διαφορά στην ευκινησία το PMOS κατασκευάζεται με μεγαλύτερο λόγο W/L σε σχέση με το NMOS.

8.3.2 Προσομοίωση – Μελέτη

Στο σχήμα παρουσιάζεται η χαρακτηριστική μεταφοράς ενός αναστροφεία CMOS με τάση πόλωσης $V_{DD}=5V$ και τάσεις κατωφλίου $V_{Tp} = 2V$ και $V_{Tn} = -2V$ για τα τρανζίστορ PMOS και NMOS αντίστοιχα. Για χαμηλές τιμές της εισόδου μπορεί να άγει το PMOS, αλλά είναι σε κατάσταση αποκοπής το NMOS, οπότε το ρεύμα i_D είναι μηδέν. Κάτι αντίστοιχο με αλλαγή ρόλων μεταξύ των δύο τρανζίστορ συμβαίνει σε υψηλές τιμές του σήματος εισόδου. Τα δύο τρανζίστορ άγουν ταυτόχρονα μόνο κατά τη μετάβαση από τη μια λογική κατάσταση στην άλλη.



Σχήμα 8.5

Χαρακτηριστική μεταφοράς του αναστροφέα CMOS

Οι εξισώσεις που ισχύουν για τον σχεδιασμό μιας τεχνολογία MOS είναι οι εξής:

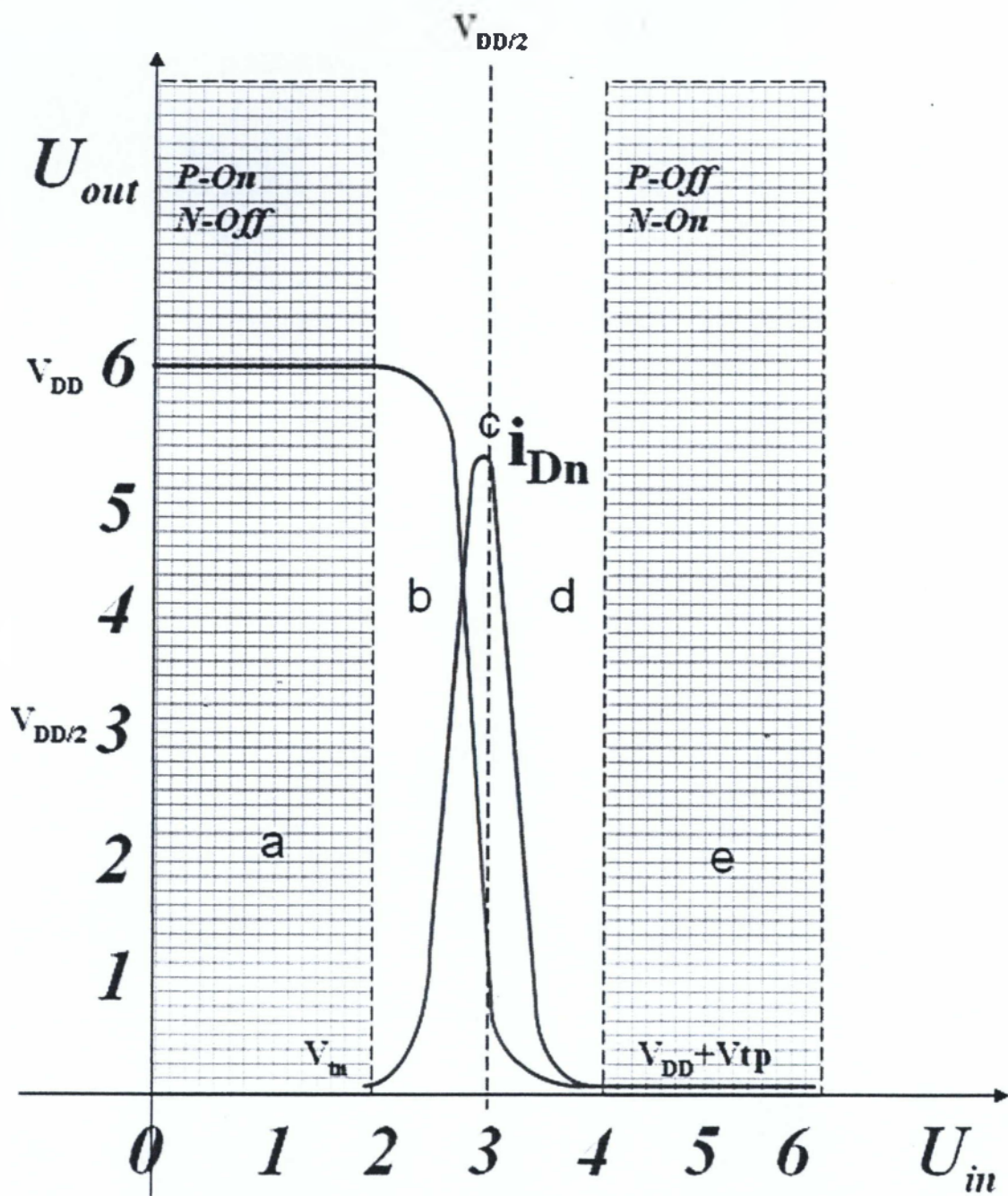
Περιοχές λειτουργίας	Εξίσωση	Συνθήκη
Αποκοπής	$I_{ds} = 0$	$V_{gs} \leq V_t$
Γραμμική	$I_{ds} = \beta [(V_{gs} - V_t)] V_{ds} - \frac{V_{ds}^2}{2}$	$0 < V_{ds} < V_{gs} - V_t$
Κόρου	$I_{ds} = \beta \frac{(V_{gs} - V_t)^2}{2}$	$0 < V_{gs} - V_t < V_{ds}$

Πίνακας 8.1

$$\text{Με } \beta = \frac{\mu\epsilon}{t_{ox}} \left(\frac{W}{L} \right)$$

β συντελεστής κέρδους, μ κινητικότητα φορέων, ϵ επιδεκτικότητα μονωτή πύλης, t_{ox} πάχος μονωτή πύλης, W/L λόγος διαστάσεων

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μια ακόμη χαρακτηριστική μεταφοράς με τα ίδια δυναμικά κατωφλίου όπως και πριν και με την τάση πόλωσης αλλαγμένη στα $V_{DD}=6V$. Παρουσιάζεται επίσης και το ρεύμα που διαρρέει το NMOS, i_{Dn} ($= -i_{Dp}$), το οποίο έχει μη μηδενική τιμή μόνο κατά τη μετάβαση μεταξύ καταστάσεων. Στο ίδιο σχήμα καταδεικνύονται πέντε περιοχές λειτουργίας αντί των απλουστευμένων τριών για τις οποίες έγινε αναφορά στο προηγούμενο σχήμα. Οι τρεις περιοχές έγιναν πέντε επειδή η μεταβατική περιοχή μπορεί να αναλυθεί σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του αναστροφέα (b, c και d) στο επόμενο σχήμα .



Σχήμα 8.8

Χαρακτηριστική μεταφοράς του αναστροφέα CMOS, με $V_{DD}=6V$ και τάσεις $V_T(Q1)=2V$ και $V_T(Q2)=-2V$.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και οι προϋποθέσεις με τις οποίες η δομή του αναστροφέα CMOS μπορεί να βρεθεί σε μια από τις πέντε αυτές καταστάσεις. Το σημείο μεταγωγής βρίσκεται στο μισό του πλάτους τροφοδοσίας. Στη διάρκεια της μετάβασης και τα δύο τρανζίστορ άγουν (παλμός ρεύματος).

Περιοχή	συνθήκη	λειτουργία	
		PMOS	NMOS
a	$0 \leq u_m < V_{Tn}$	γραμμική	αποκοπή
b	$V_{Tn} \leq u_m < V_{DD}/2$	γραμμική	κόρος
c	$u_m = V_{DD}/2$	κόρος	κόρος
d	$V_{DD}/2 < u_m \leq V_{DD} + V_{Tp}$	κόρος	γραμμική
e	$u_m > V_{DD} + V_{Tp}$ ^{viii}	αποκοπή	γραμμική

Πίνακας 8.2

Όπως ήδη έχει αναφερθεί το βασικότερο πλεονέκτημα στη χρήση CMOS σχεδίασης είναι η εξαιρετικά μικρή κατανάλωση ισχύος. Επειδή και οι διατάξεις των MOSFET είναι σε σειρά, το ρεύμα ηρεμίας επαγωγού καθορίζεται από τη διάταξη που δεν άγει.

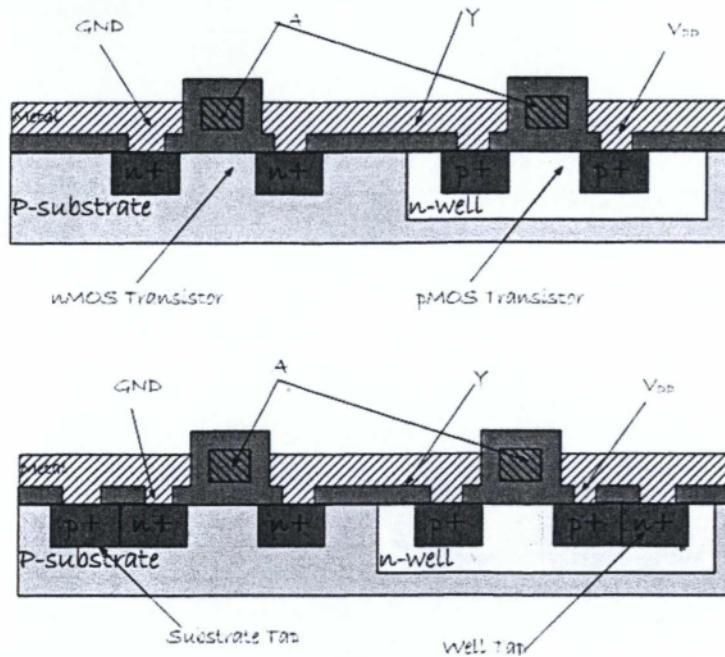
Η απώλεια ισχύος αυξάνεται όταν το σήμα εισόδου μεταγεται από χαμηλό σε υψηλό και το αντίθετο. Ο λόγος είναι απλός. Στην μέση μετάβαση από χαμηλό σε υψηλό και το αντίθετο, και τα δύο MOSFET άγουν. Αυτό σημαίνει ότι το ρεύμα επαγωγού αυξάνεται προσωρινά. Αφού η μετάβαση είναι πολύ γρήγορη, εμφανίζεται μόνο όπως πολύ μικρός παλμός ρεύματος. Το γινόμενο όπως τάσης τροφοδοσίας επαγωγού και οι μικροί παλμοί ρεύματος σημαίνει ότι η μέση δυναμική απώλεια ισχύος είναι μεγαλύτερη από την απώλεια ισχύος ηρεμίας. Με διαφορετικά λόγια, μια διάταξη CMOS καταναλώνει περισσότερη μέση ισχύ όταν μεταβαίνει από την μια κατάσταση στην άλλη παρά όταν βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας.

Ωστόσο, αφού οι παλμοί του ρεύματος είναι πολύ σύντομοι, η μέση απώλεια ισχύος είναι πολύ μικρή ακόμη και όταν οι διατάξεις CMOS αλλάζουν κατάσταση. Στην πραγματικότητα, η μέση απώλεια ισχύος είναι τόσο μικρή ώστε τα κυκλώματα CMOS συχνά χρησιμοποιούνται για εφαρμογές που λειτουργούν με μπαταρία, όπως οι υπολογιστές τσέπης, τα ψηφιακά ρολόγια, και τα ακουστικά βαρηκοΐας.

^{viii} Συνθήκη αποκοπής PMOS $u_{GSp} > V_{Tp} \Rightarrow u_m - V_{DD} > V_{Tp} \Rightarrow u_m > V_{DD} + V_{Tp}$

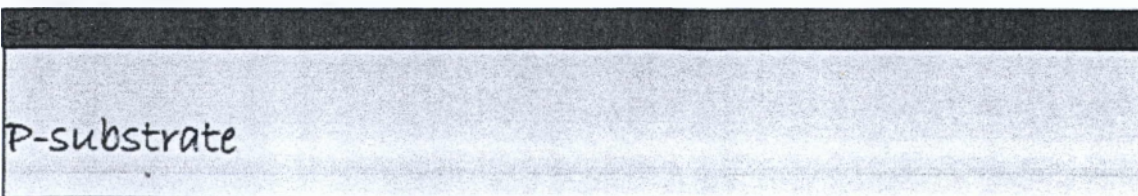
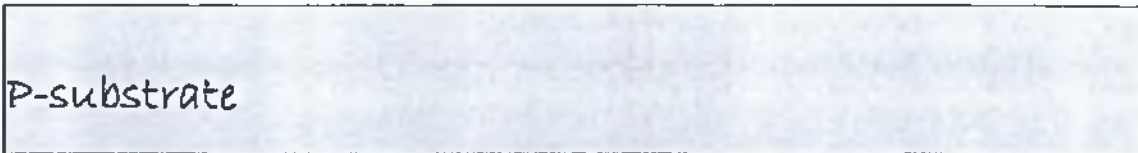
8.3.3 Τα Βήματα κατασκευής του αναστροφέα CMOS

Οι μάσκες που θα χρησιμοποιήσουμε είναι οι εξής:

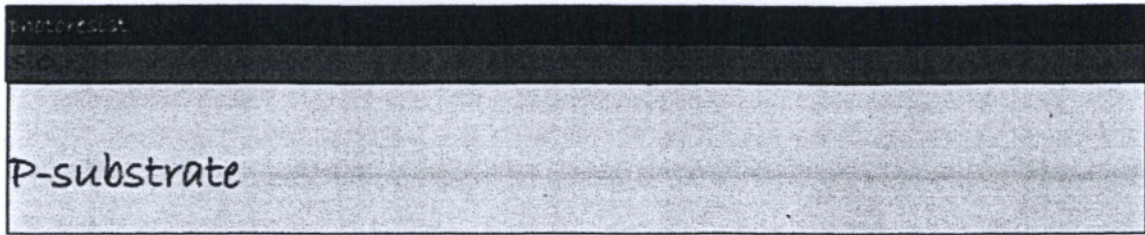


Σχήμα 8.9

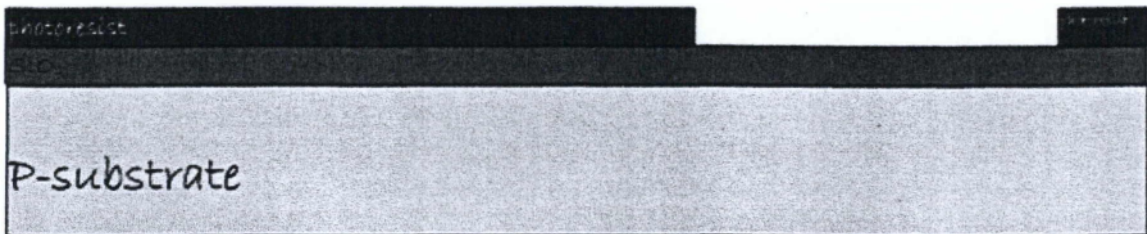
Αρχικά θα κατασκευάσουμε το n-well και όπου σαν πρώτη διαδικασία είναι η οξείδωση σε υψηλή θερμοκρασία (900-1200°C)



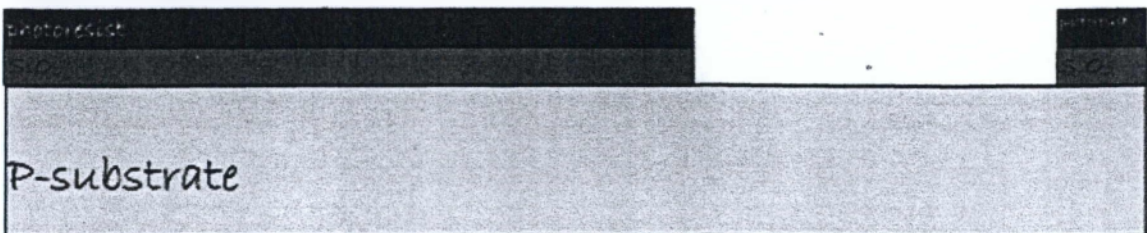
Μετά την οξείδωση σε υψηλή θερμοκρασία θα γίνει η τοποθέτηση φωτοευαίσθητου υλικού



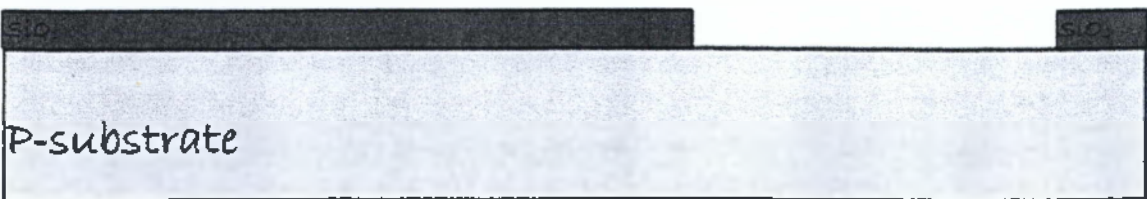
Ακολουθεί η έκθεση στο φως των περιοχών του n-well



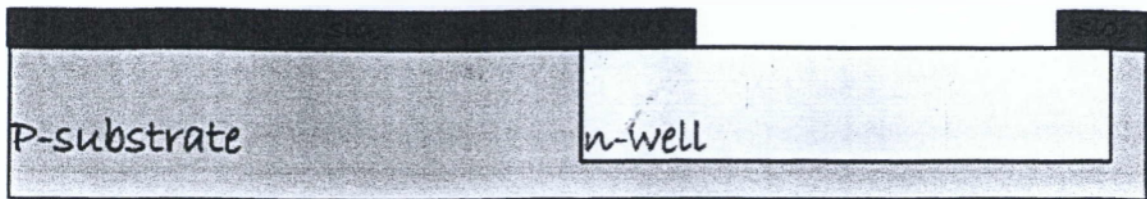
Επόμενη διαδικασία είναι η αφαίρεση του οξειδίου με χημικά



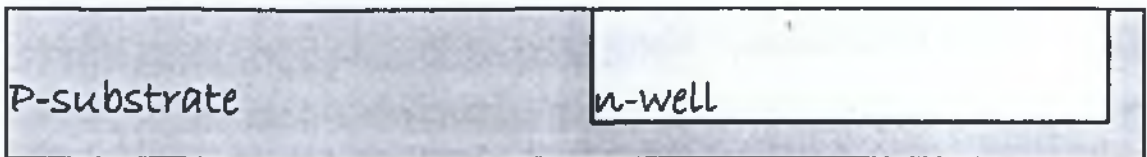
Έπειτα θα αφαιρέσουμε το φωτοευαίσθητο υλικό



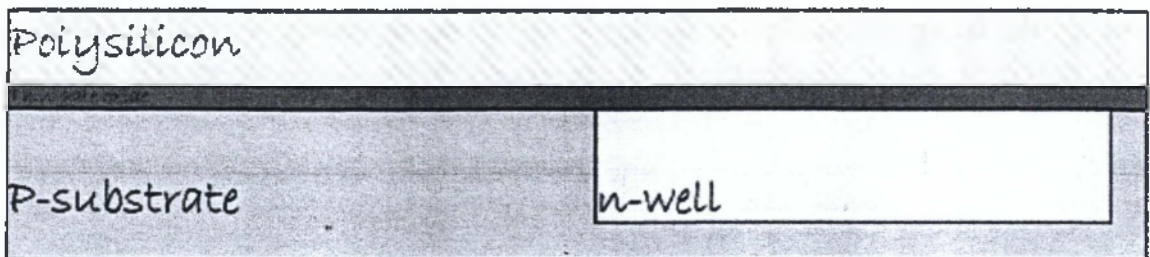
Επόμενη διαδικασία είναι η δημιουργία του n-well με διάχυση ή εμφύτευση ιόντων



Αμέσως μετά γίνεται η αφαίρεση του οξειδίου με χημικά

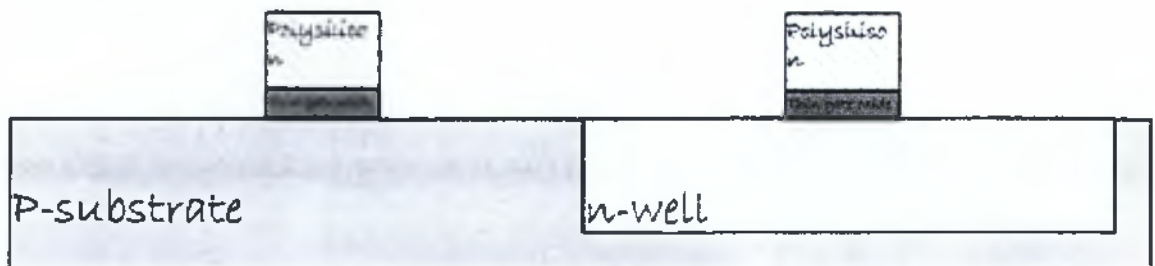


Επόμενο σημαντικό βήμα είναι η κατασκευή των αγωγών πολυπυριτίου. Έτσι, αρχικά θα δημιουργήσουμε ένα λεπτό στρώμα οξειδίου πάνω στο οποίο θα γίνει η απόθεση του πολυπυριτίου

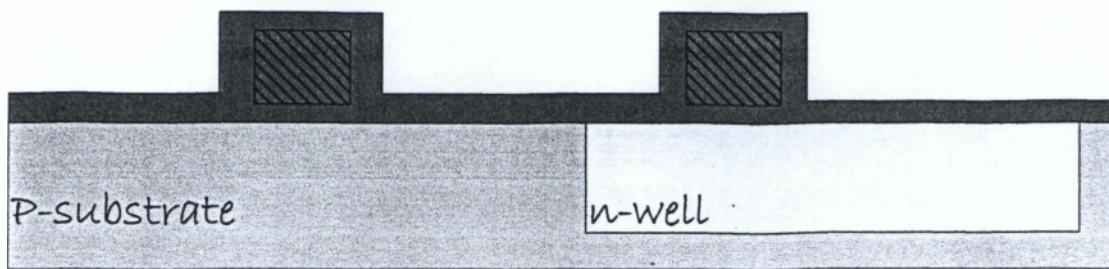


Τα επόμενα βήματα που πρέπει να γίνουν είναι τα εξής :

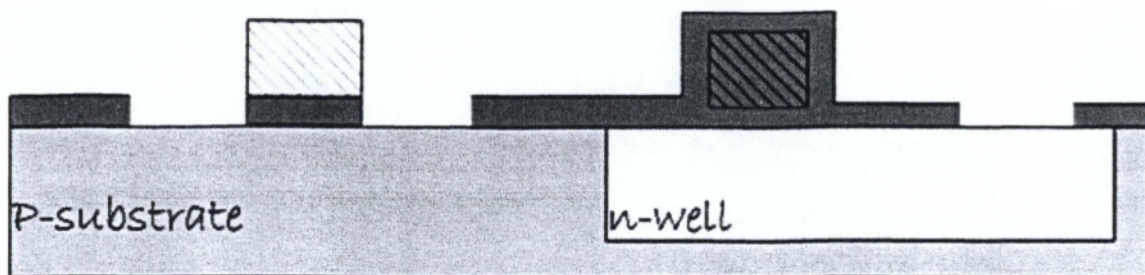
1. τοποθέτηση φωτοευαίσθητου υλικού
2. έκθεση στο φως των περιοχών εκτός του πολυπυριτίου
3. αφαίρεση του πολυπυριτίου και του οξειδίου με χημικά
4. αφαίρεση του φωτοευαίσθητου υλικού από τις περιοχές πολυπυριτίου



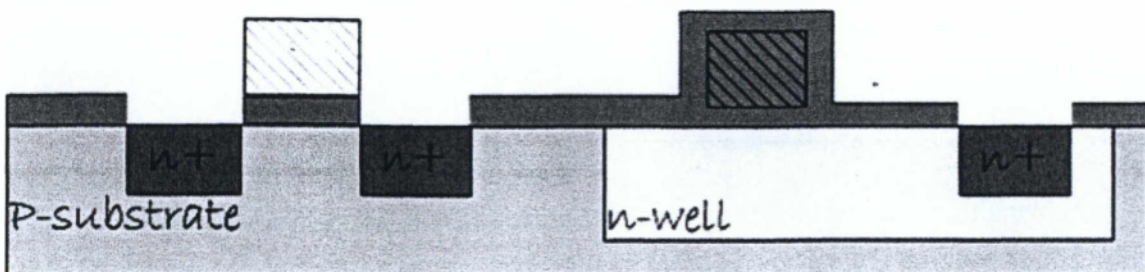
Έπειτα θα δημιουργήσουμε ένα στρώμα οξειδίου για τη κατασκευή των περιοχών n-diffusion



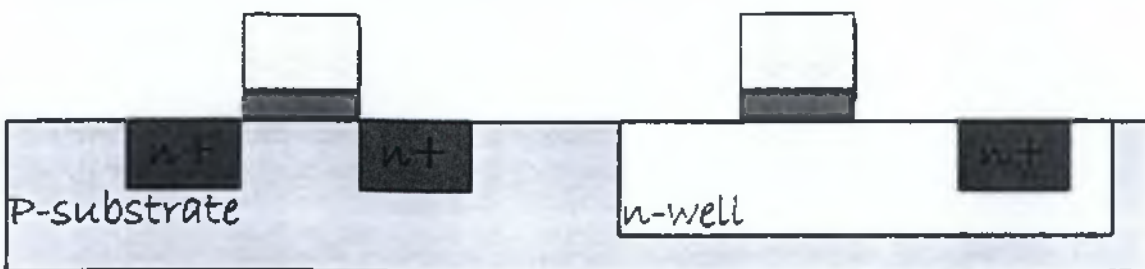
Η αφαίρεση του οξειδίου στις n-diffusion περιοχές με χρήση photoresist είναι η επόμενη διαδικασία που απεικονίζεται στο παρακάτω σχήμα



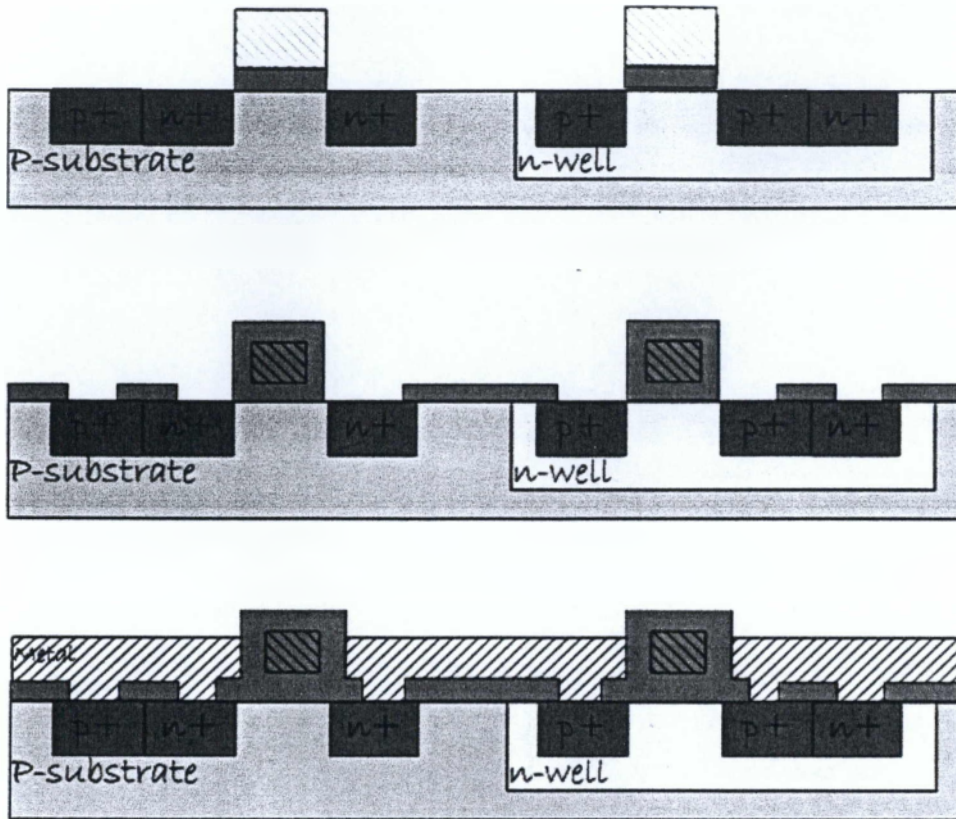
Αμέσως μετά θα δημιουργήσουμε τις n-diffusion περιοχές με διάχυση ή εμφύτευση ιόντων



Υστερα γίνεται η αφαίρεση του στρώματος οξειδίου



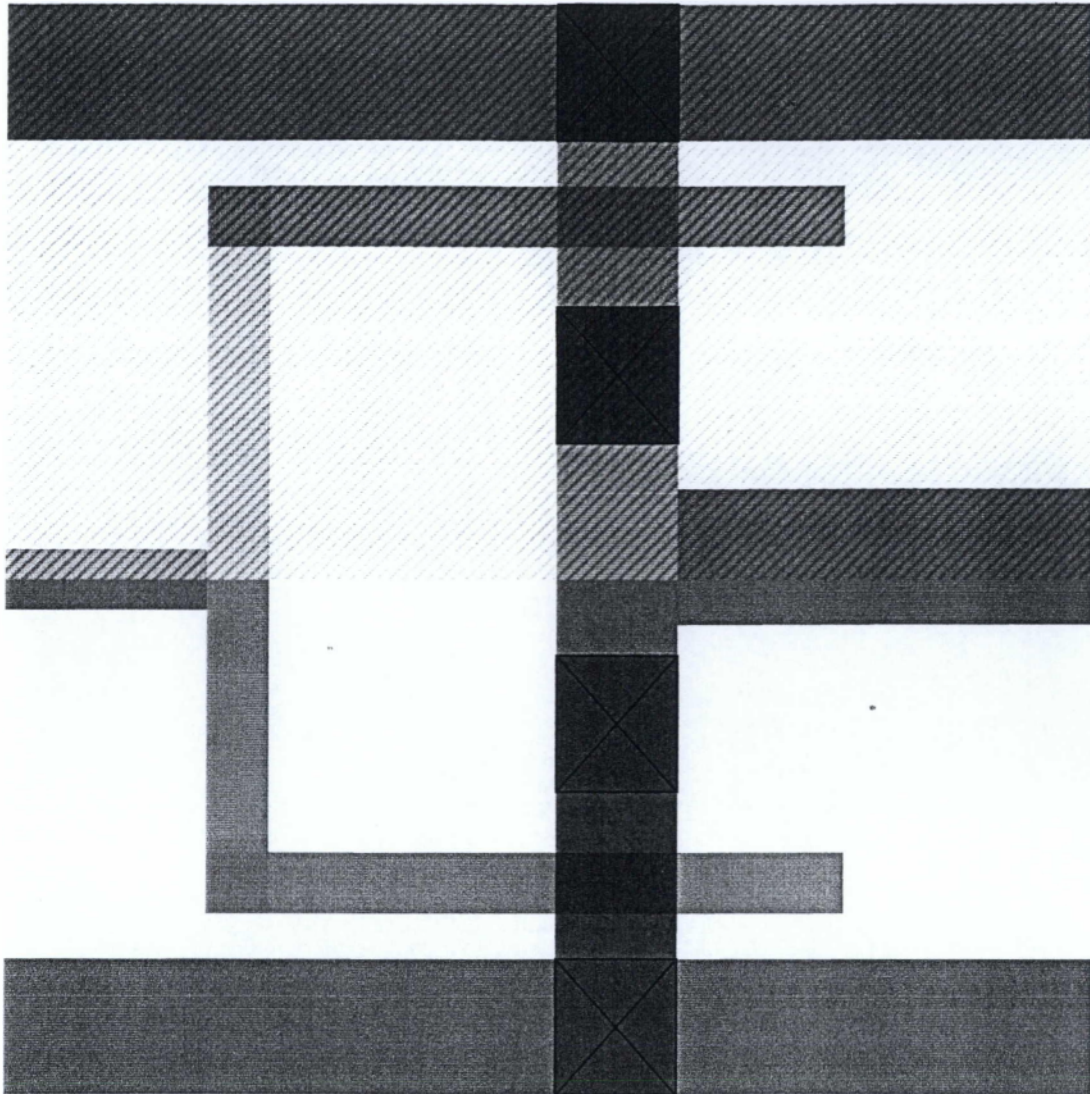
Έχοντας κατασκευάσει τις περιοχές n-diffusion, θα κατασκευάσουμε και τις περιοχές p-diffusion με τα ίδια βήματα που ακολουθήσαμε και στην πρώτη περίπτωση οπότε έχουμε τα εξής σχήματα.



Σχήμα 8.10
 Στάδια κατασκευής αναστροφέα CMOS

8.3.4 Υλοποίηση σε φυσικό επίπεδο (Layout)

Το φυσικό σχέδιο του αναστροφέα CMOS θα το σχεδιάσουμε στο πρόγραμμα Magic και θα πρέπει η μορφή του να είναι όπως το παρακάτω σχήμα



Σχήμα 8.11

Στη συνέχεια θα περιγράψουμε αναλυτικά τα βήματα κατασκευής του και θα απεικονίσουμε τα βήματα αυτά σε σχήματα.

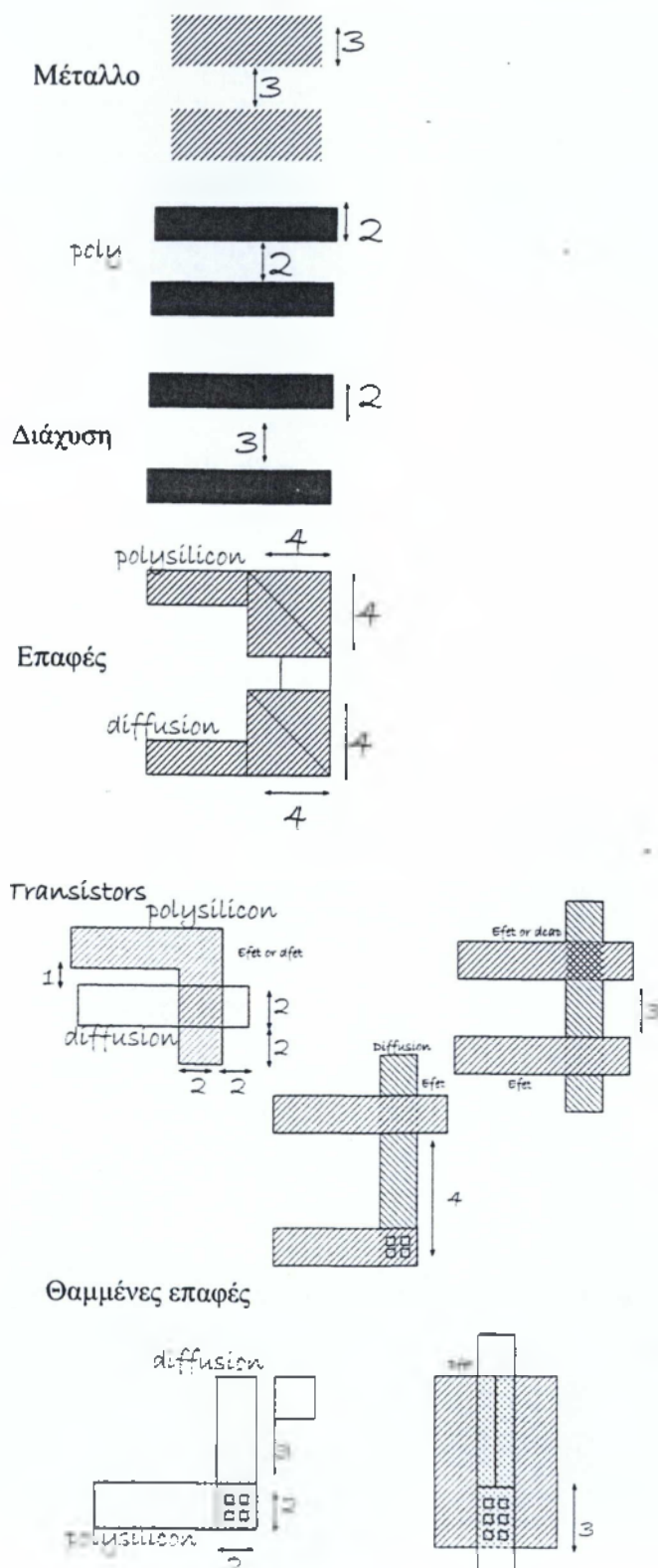
Κανόνες Σχεδίασης

Οι κανόνες σχεδίασης περιγράφουν τα ελάχιστα μεγέθη των αγωγών των τρανζίστορ και τις ελάχιστες αποστάσεις μεταξύ αυτών.

Οι κανόνες σχεδίασης καθορίζονται:

1. είτε σε μικρόμετρα (μm) ή νανόμετρα (nm)

2. είτε με βάση μια παράμετρο λ
 Το λ ορίζεται ως το $\frac{1}{2}$ του ελάχιστου μήκους καναλιού του τρανζίστορ. Παράδειγμα:
 για ελάχιστο μήκος $0.18\mu\text{m} = 180\text{nm} \rightarrow \lambda = 0.09\mu\text{m}$



Σχήμα 8.12
 Κανόνες σχεδίασης

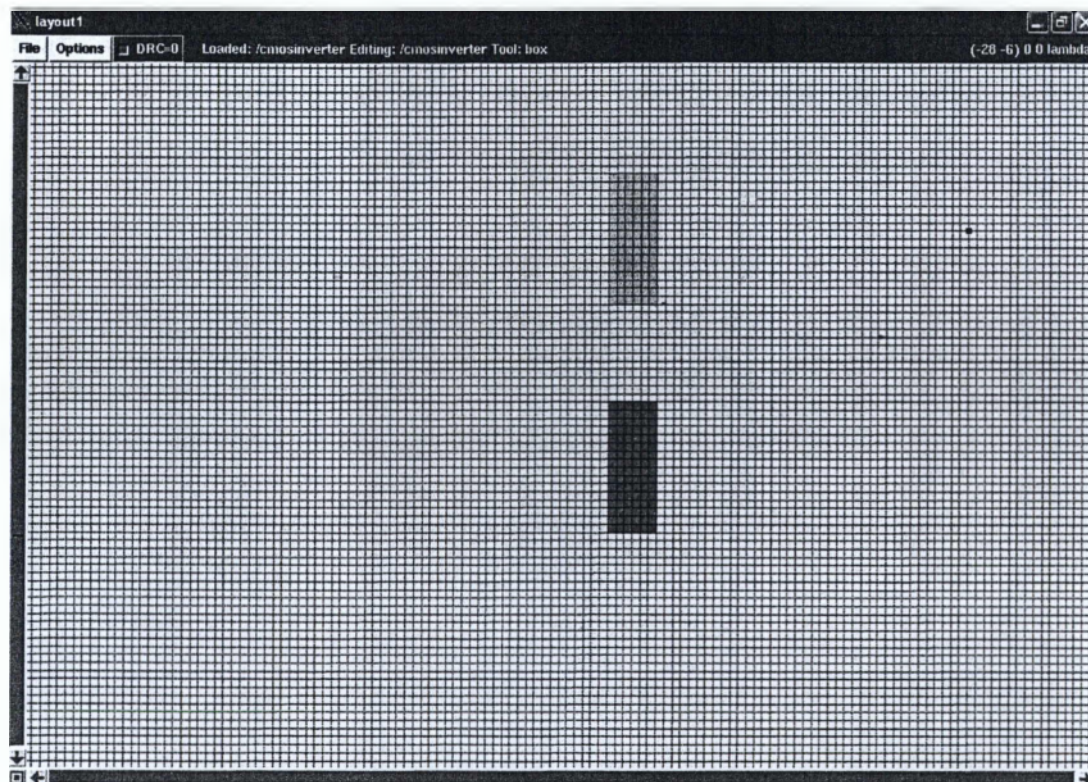
Οι μάσκες σύμφωνα με το πρόγραμμα, τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε είναι οι εξής:



Αρχικά θα σχεδιάσουμε την περιοχή διάχυσης του τρανζίστορ PMOS και NMOS αντίστοιχα. Οι περιοχές αυτές θα έχουν διαστάσεις ύψος 16 (κουτάκια) × πλάτος 6 οι κάθε μία και θα έχουν απόσταση μεταξύ τους 12 κουτάκια. Οι εντολές που θα πρέπει να εισάγουμε για να σχεδιάσουμε αυτές τις περιοχές είναι :

Paint pdiff για το PMOS τρανζίστορ

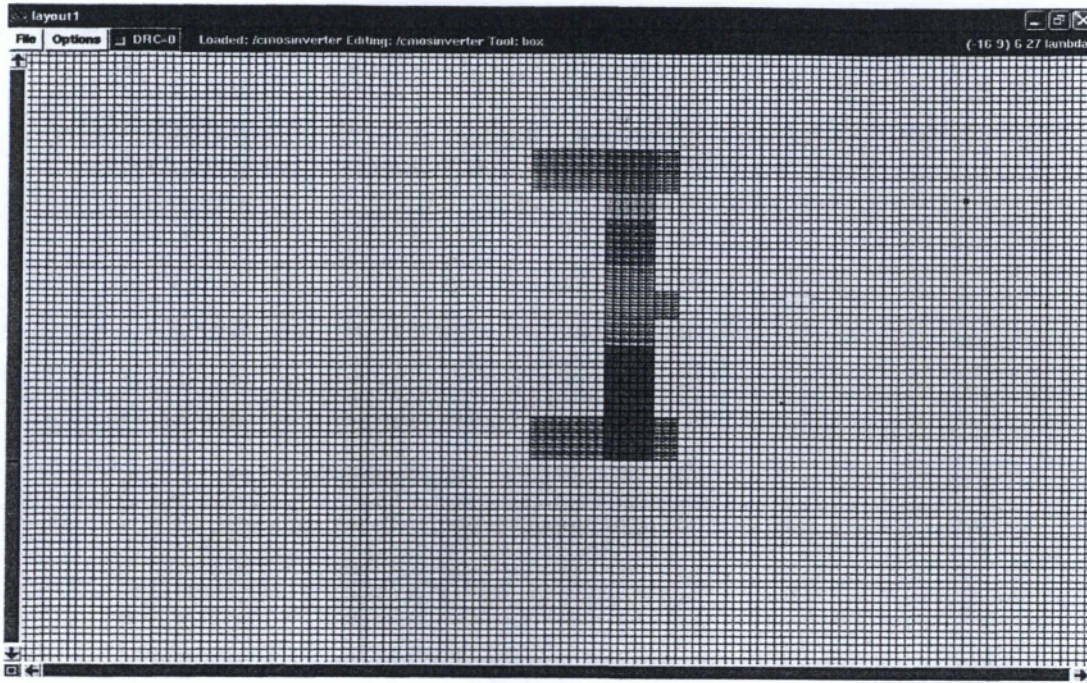
Paint ndiff για το NMOS τρανζίστορ



Σχήμα 8.13

Δημιουργία περιοχών τρανζίστορ PMOS και NMOS

Στη συνέχεια θα σχεδιάσουμε τις περιοχές μετάλλου στο πάνω και στο κάτω μέρος των περιοχών των τρανζίστορ PMOS και NMOS αλλά και στην απόσταση που χωρίζει αυτά τα δύο, έτσι ώστε να σχηματιστεί η V_{out} . Οι διαστάσεις θα είναι για το πάνω και το κάτω μέρος ύψος 6 × πλάτος 18, για τα μεσαία τμήμα ύψος 24 × πλάτος 6 και η εντολή είναι : Paint metal

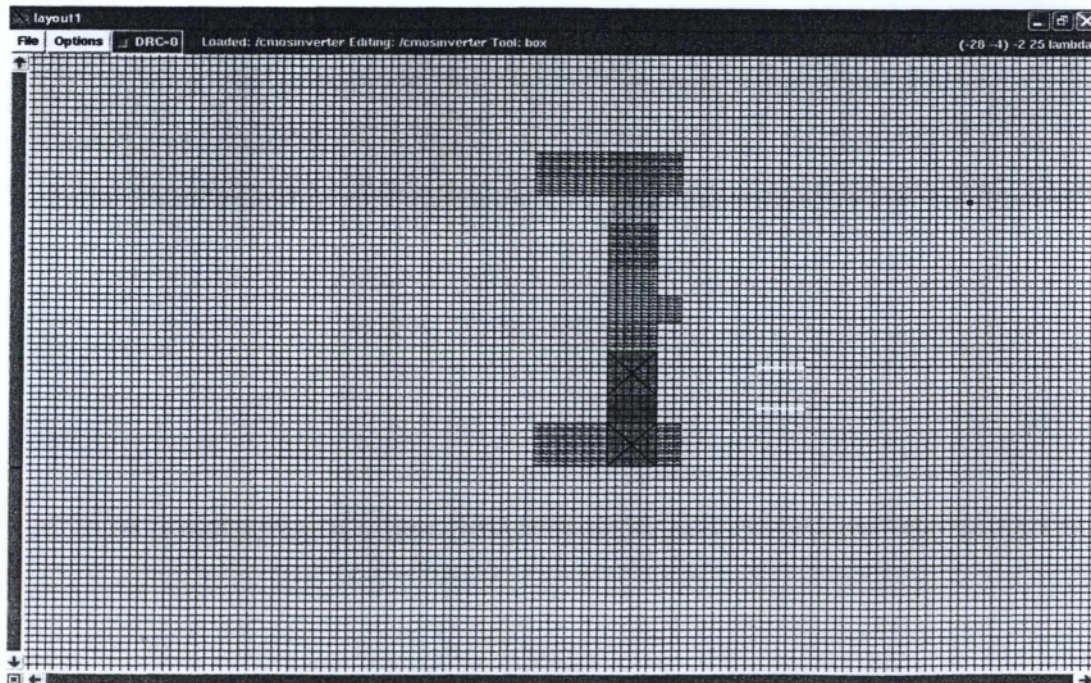


Σχήμα 8.14
Δημιουργία περιοχών μετάλλου

Έπειτα αυτό που έχουμε να κάνουμε είναι να δημιουργήσουμε τις περιοχές όπου η διάχυση του κάθε τρανζίστορ «ακουμπά» πάνω στις περιοχές μετάλλου που δημιουργήσαμε. Για το κάθε τρανζίστορ έχουμε ξεχωριστές εντολές.

Για τις περιοχές μετάλλου-και τρανζίστορ NMOS πληκτρολογούμε την εντολή :

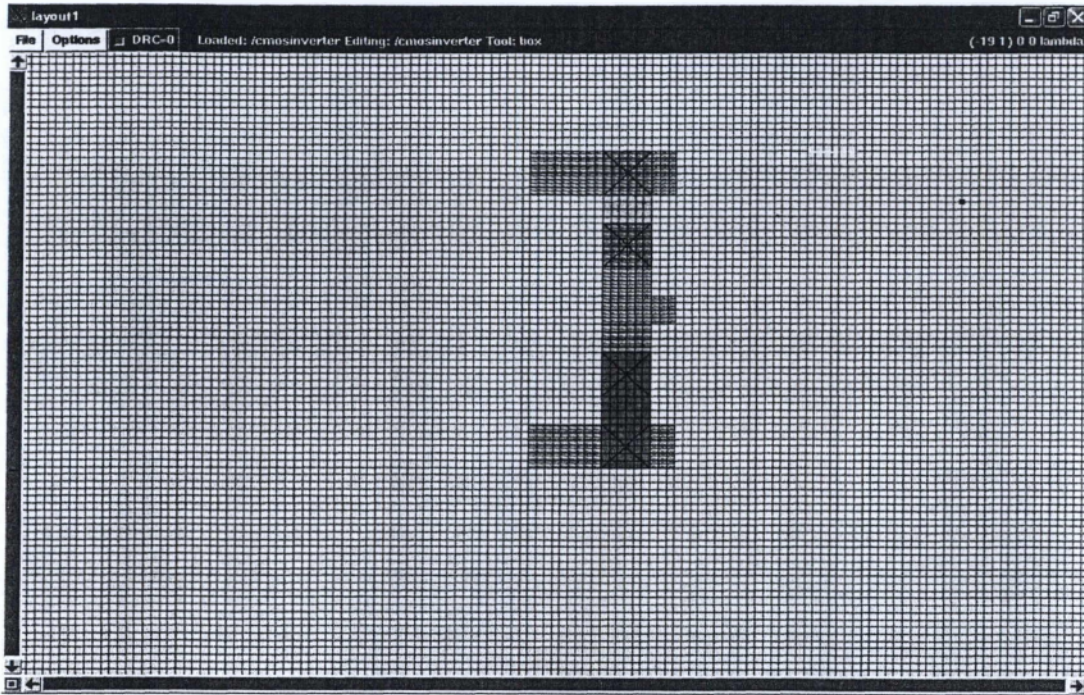
Paint ndc



Σχήμα 8.15
Δημιουργία περιοχών μετάλλου-διάχυσης

Παρομοίως για τις περιοχές μετάλλου-και τρανζίστορ PMOS πληκτρολογούμε την εντολή :

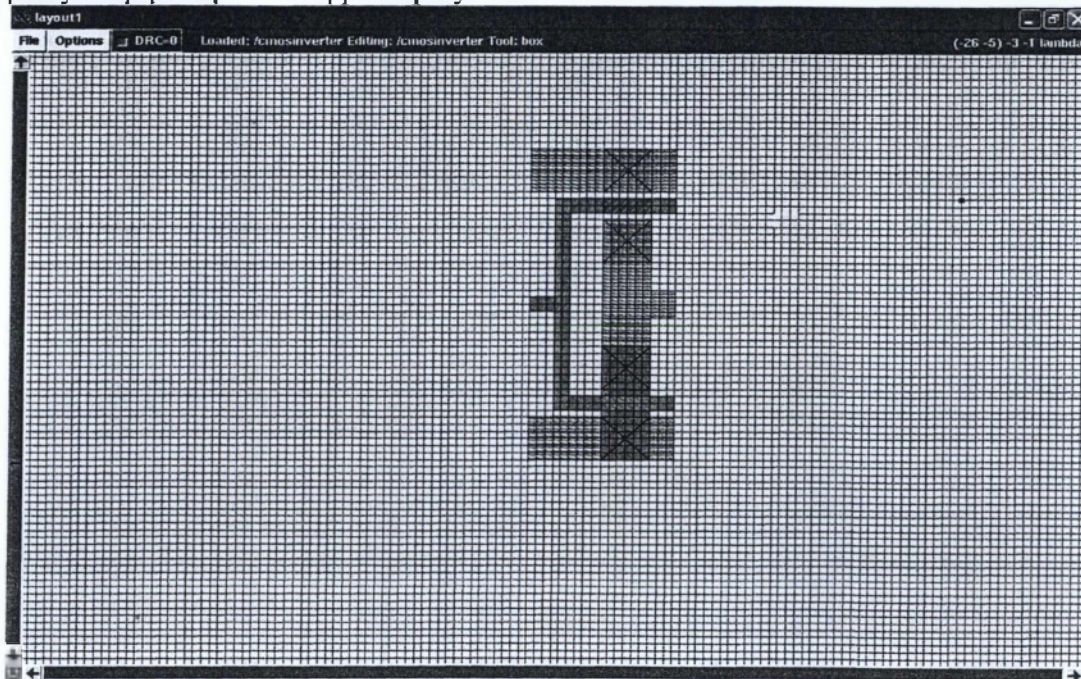
Paint pdc



Σχήμα 8.16

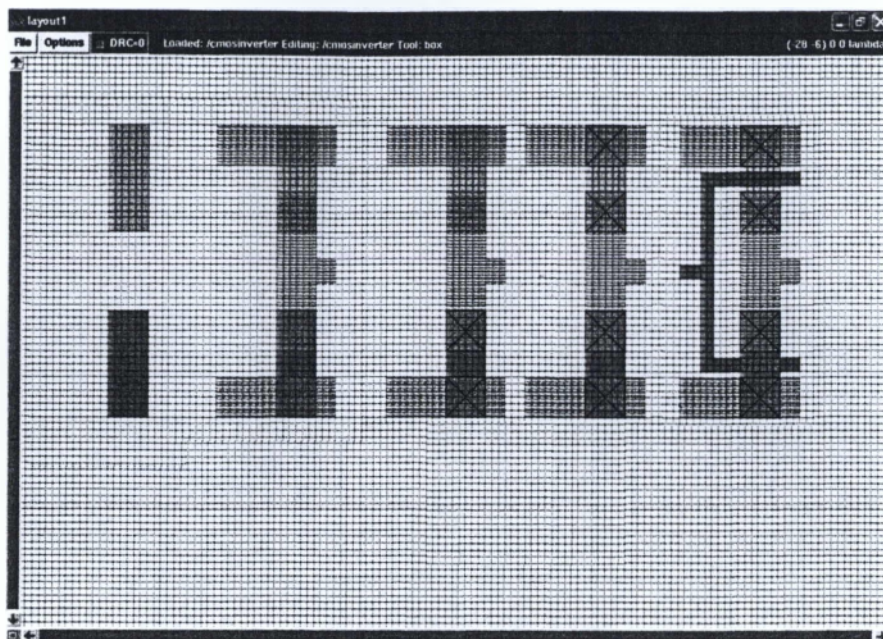
Δημιουργία περιοχών μετάλλου-διάχυσης

Επόμενη διαδικασία είναι να δημιουργήσουμε τις περιοχές όπου ενώνονται τα δύο τρανζίστορ με την εντολή paint poly



Σχήμα 8.17

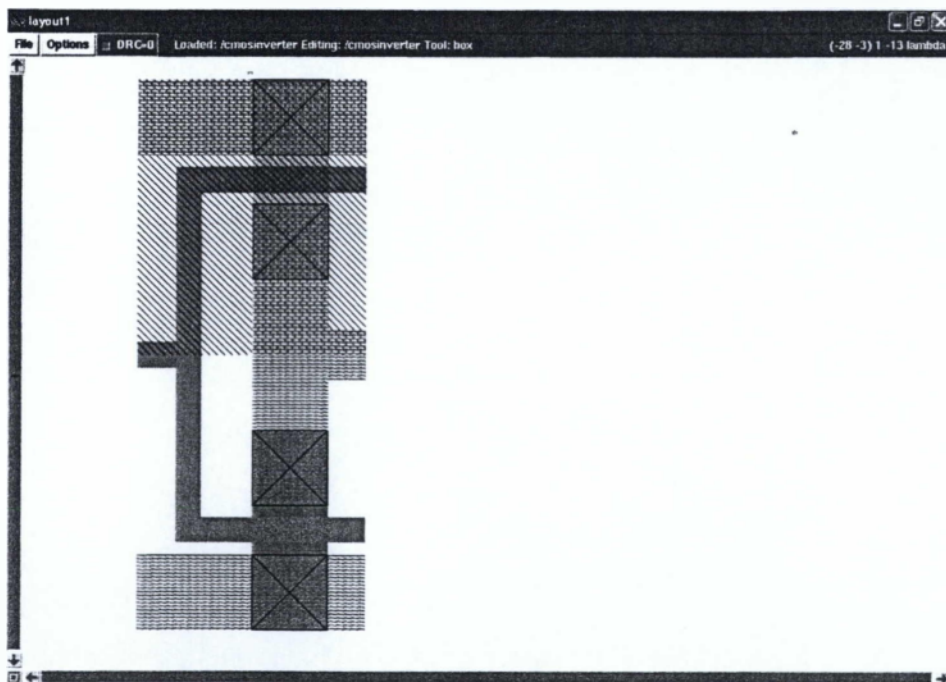
Δημιουργία περιοχών poly



Σχήμα 8.18

Διαδοχικά βήματα σχεδίασης αναστροφέα CMOS

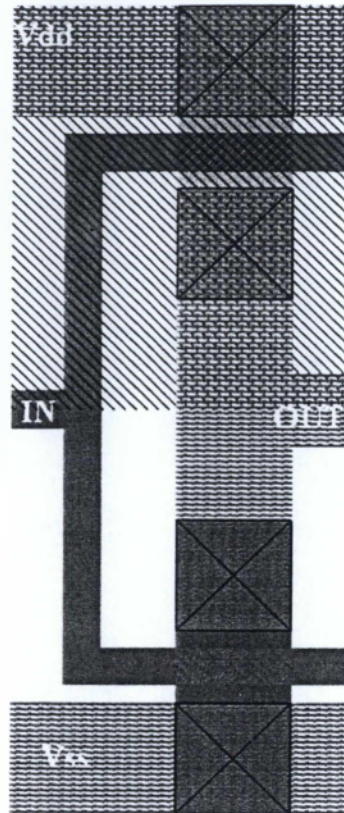
Επόμενο βήμα είναι να δημιουργήσουμε μια περιοχή n-well, όπου εκεί το PMOS είναι σχεδιασμένο, στην περιοχή του p-diffusion και την πάνω πλευρά του metall. Αυτό θα γίνει με την εντολή paint nwell



Σχήμα 8.19

Δημιουργία n-well στην περιοχή του PMOS

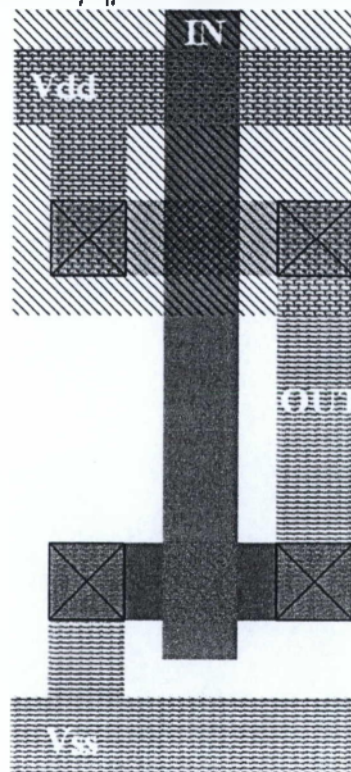
Μπορούμε να προσθέσουμε κάποιο επεξηγηματικό κείμενο πάνω στο σχήμα μας με την εντολή label και το κείμενο που θέλουμε να αποτυπωθεί, οπότε το τελικό μας σχήμα είναι το ακόλουθο.



Σχήμα 8.20

Τελικό σχήμα αναστροφέα CMOS

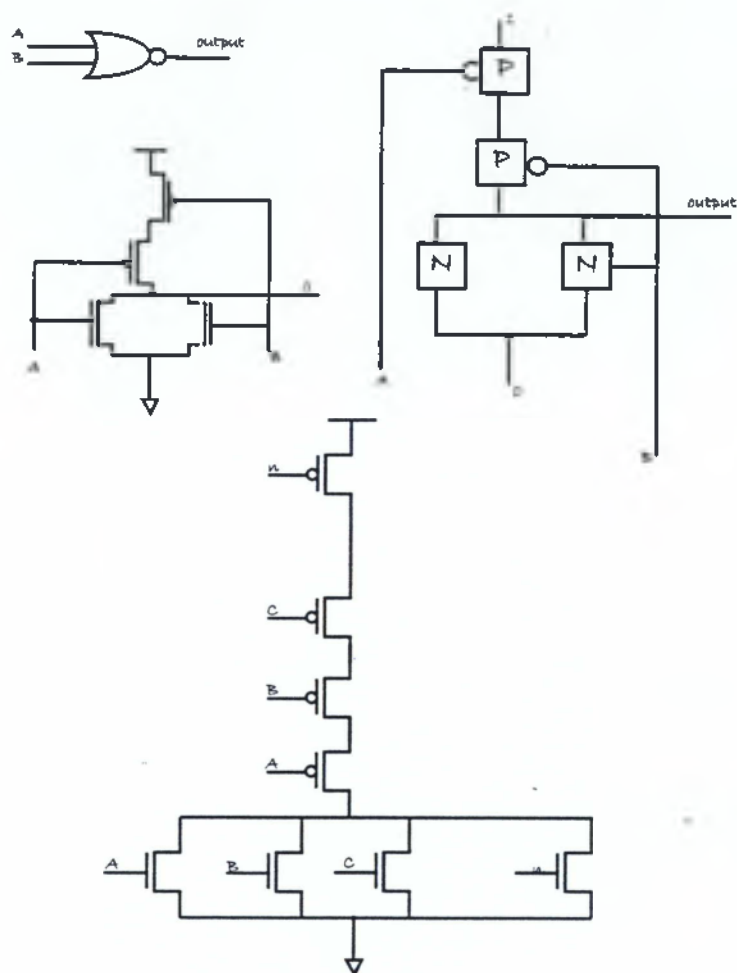
Μια διαφορετική σχεδίαση σε επίπεδο φυσικού σχεδίου του αναστροφέα τεχνολογίας CMOS που σχεδιάζεται με τα ίδια βήματα είναι και το παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8.21

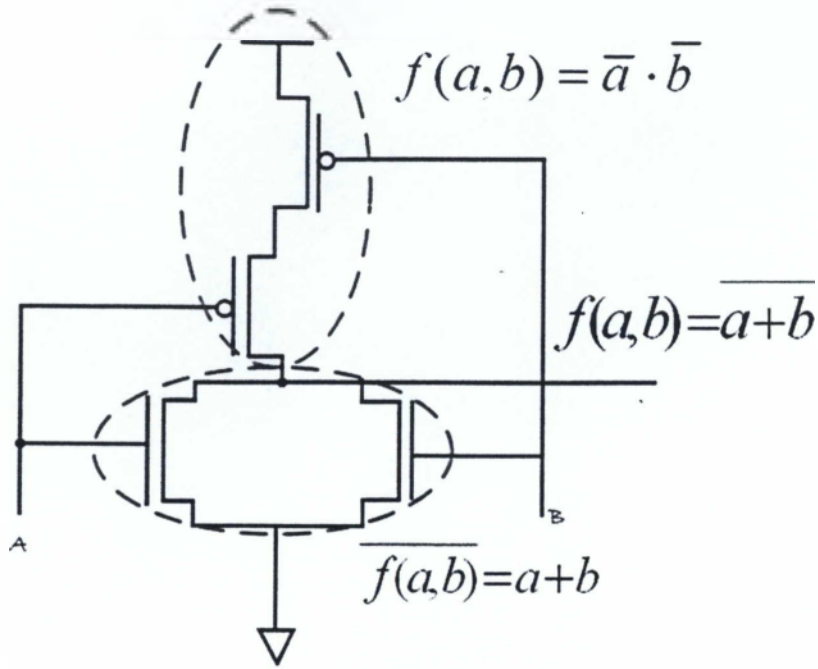
Διαφορετική σχεδίαση αναστροφέα CMOS

8.4 Πύλη NOR τεχνολογίας CMOS



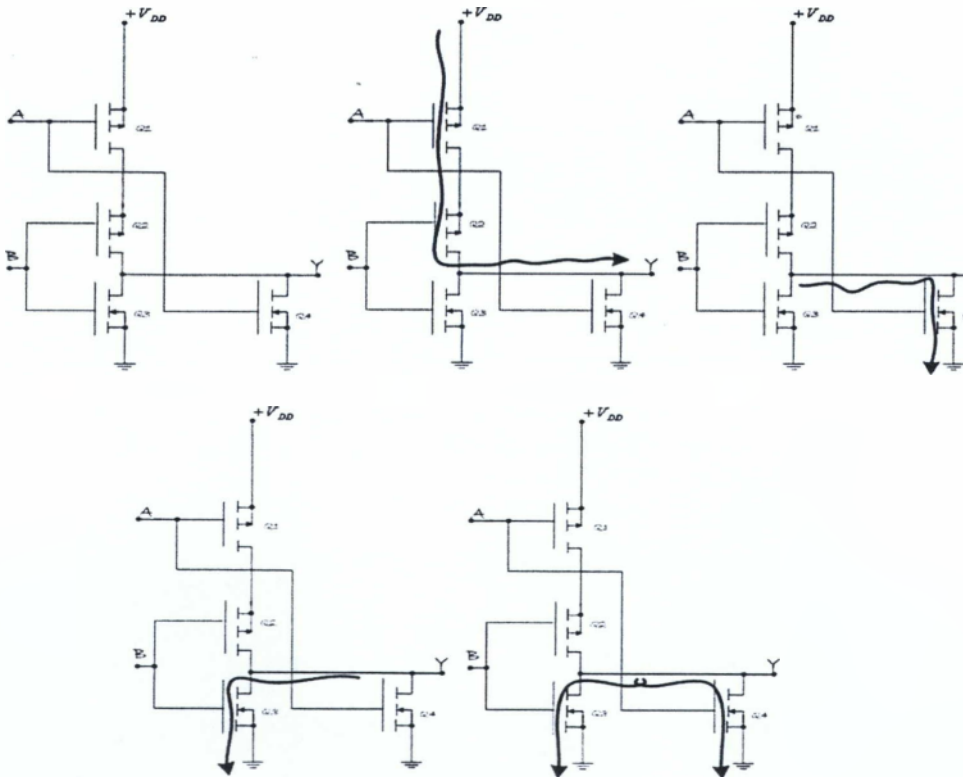
Σχήμα 8.22

Διαφορετικές απεικονίσεις πύλης NOR



Σχήμα 8.23

Συναρτήσεις εισόδου και εξόδου πύλης NOR

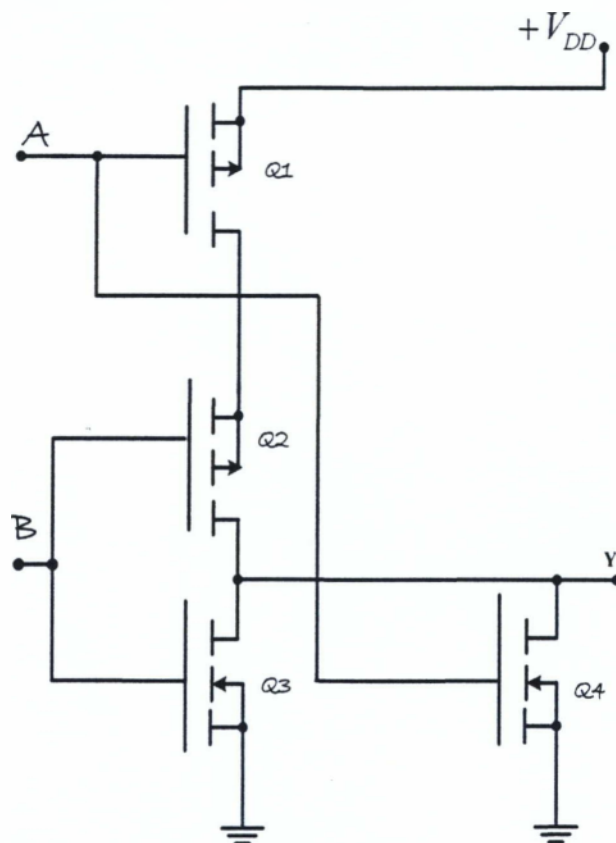


Σχήμα 8.24

Λειτουργία πύλης NOR σε συνάρτηση της εισόδου της

8.4.1 Σχεδίαση

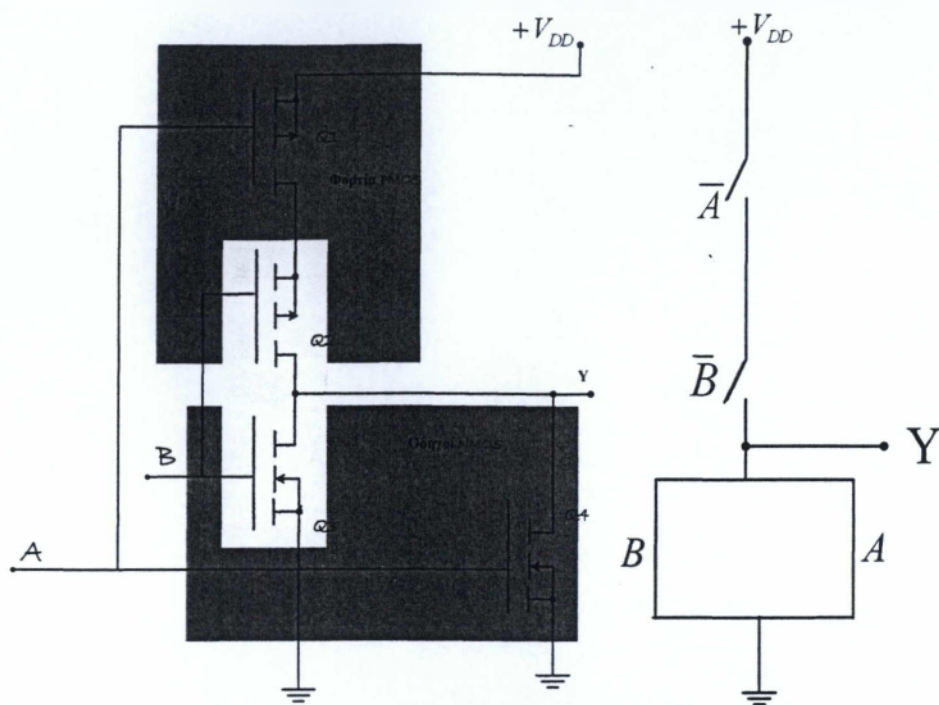
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται η συνδεσμολογία CMOS NOR σε τρεις διαφορετικές απεικονίσεις με διαφορετικούς τρόπους κάθε φορά ώστε να κατανοηθεί η λειτουργία της. Αρχικά σχηματίζονται δύο δομές CMOS. Η πρώτη αποτελείται από το ζευγάρι των Q1 και Q4 και η δεύτερη από το ζευγάρι Q2 και Q3. Το τελευταίο ζευγάρι Q2 και Q3 παρουσιάζεται σε κίτρινο πλαίσιο στο δεύτερο σχήμα για να καταδειχθεί η ύπαρξη της δομής CMOS.



Σχήμα 8.25
Κύκλωμα CMOS NOR

Το επόμενο σχήμα αναλύει την πύλη CMOS NOR σε ένα φορτίο που αποτελείται από τα δύο PMOS τρανζίστορ (Q1 και Q2) συνδεδεμένα σε σειρά και σε έναν οδηγό που αποτελείται από τα δύο NMOS τρανζίστορ (Q3 και Q4) συνδεδεμένα παράλληλα. Από το σχήμα που παρουσιάζεται το ιδανικό κύκλωμα διακοπών παρατηρούμε ότι η έξοδος έρχεται σε κατάσταση υψηλού δυναμικού, V_H , δηλαδή λογικό "1", μόνο όταν και τα δύο τρανζίστορ Q1 και Q2 άγουν (διακόπτες κλειστοί). Η έξοδος θα έρχεται σε χαμηλό δυναμικό, V_L , όταν ένα εκ των τρανζίστορ Q3 και Q4 άγει (διακόπτης κλειστός).

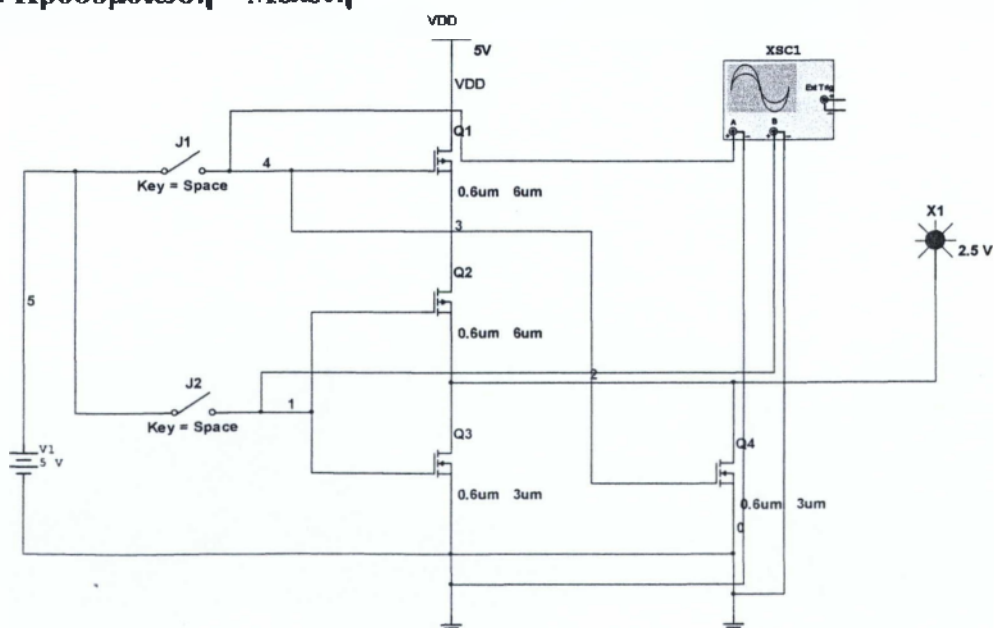
Λόγω της συμπληρωματικότητας, παρατηρούμε επίσης στο σχήμα με το κύκλωμα των διακοπών, ότι όταν το Q_4 είναι κλειστός διακόπτης το Q_1 είναι ανοικτός διακόπτης. Το ίδιο συμβαίνει και με το ζευγάρι Q_2 και Q_3 .



Σχήμα 8.26
CMOS NOR

παρουσίαση φορτίων και οδηγιών
ιδανικό κύκλωμα διακοπών.

8.4.2 Προσομοίωση – Μελέτη

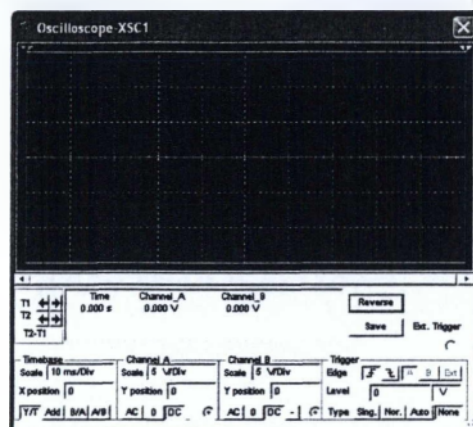


Σχήμα 8.27

Κύκλωμα πύλης NOR CMOS

Ακολουθεί αναλυτική περιγραφή των τεσσάρων δυνατών ενδεχομένων στη λειτουργία της πύλης NOR.

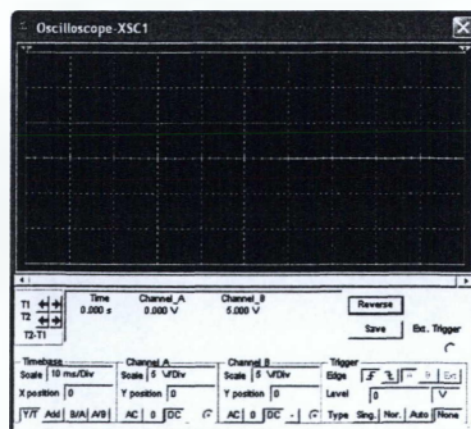
1. **0 0 → 1** Όταν και οι δύο εισοδοι βρίσκονται σε κατάσταση χαμηλού δυναμικού, τα τρανζίστορ Q_1 και Q_2 άγουν ενώ τα Q_3 και Q_4 βρίσκονται σε αποκοπή. Τα τρανζίστορ Q_1 και Q_2 συμπεριφέρονται σαν κλειστοί διακόπτες σε σειρά και από τη μικρή τους αντίσταση το δυναμικό της εξόδου αποκτά υψηλή τιμή μέσω της V_{DD} (λογικό "1").



Σχήμα 8.28

Αποτέλεσμα προσομοίωσης πύλης NOR όταν και οι δύο εισοδοι σε κατάσταση χαμηλού δυναμικού

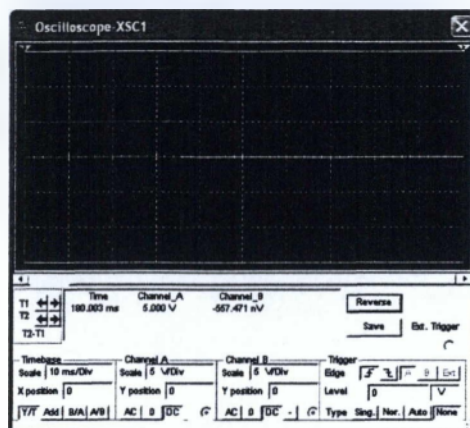
2. **0 1 → 0** Όταν η είσοδος A βρίσκεται σε χαμηλό δυναμικό και η B σε υψηλό τότε λόγω της υψηλής στάθμης της εισόδου B το Q_3 θα άγει και θα φέρνει την έξοδο σε χαμηλό δυναμικό μέσω της γείωσης. Να σημειωθεί ότι η έξοδος Y αποκόπτεται από τη V_{DD} επειδή το τρανζίστορ Q_2 (το αντίστοιχο PMOS που συνδέεται με την είσοδο B) αποκόπτεται.



Σχήμα 8.29

Αποτέλεσμα προσομοίωσης πύλης NOR όταν η είσοδος A βρίσκεται σε υψηλό δυναμικό και η είσοδος B σε χαμηλό

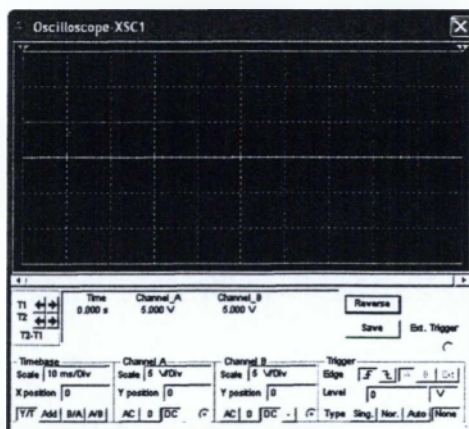
3. $1\ 0 \rightarrow 0$ Όταν η είσοδος A βρίσκεται σε υψηλό δυναμικό και η είσοδος B σε χαμηλό, τότε λόγω της υψηλής στάθμης της εισόδου A το Q4 θα άγει και θα φέρνει την έξοδο σε χαμηλό δυναμικό μέσω της γείωσης, λογικό "0". Η έξοδος Y αποκόπτεται από τη V_{DD} επειδή το τρανζίστορ Q1 (το αντίστοιχο PMOS που συνδέεται με την είσοδο A) αποκόπτεται.



Σχήμα 8.30

Αποτέλεσμα προσομοίωσης πύλης NOR όταν η είσοδος A βρίσκεται σε υψηλό δυναμικό και η είσοδος B σε χαμηλό

4. $1\ 1 \rightarrow 0$ Με παρόμοιο σκεπτικό με αυτό των περιπτώσεων 2 και 3 η έξοδος Y θα βρίσκεται σε κατάσταση λογικού "0" με τα τρανζίστορ Q3 και Q4 να άγουν φέρνοντας την έξοδο σε χαμηλό δυναμικό και τα Q1 και Q2 να βρίσκονται σε αποκοπή. Το ενδεχόμενο αυτό εικονίζεται στο σχήμα με το ιδανικό κύκλωμα διακοπών.



Σχήμα 8.31

Αποτέλεσμα προσομοίωσης πύλης NOR όταν και οι δύο εισοδοί σε κατάσταση υψηλού δυναμικού

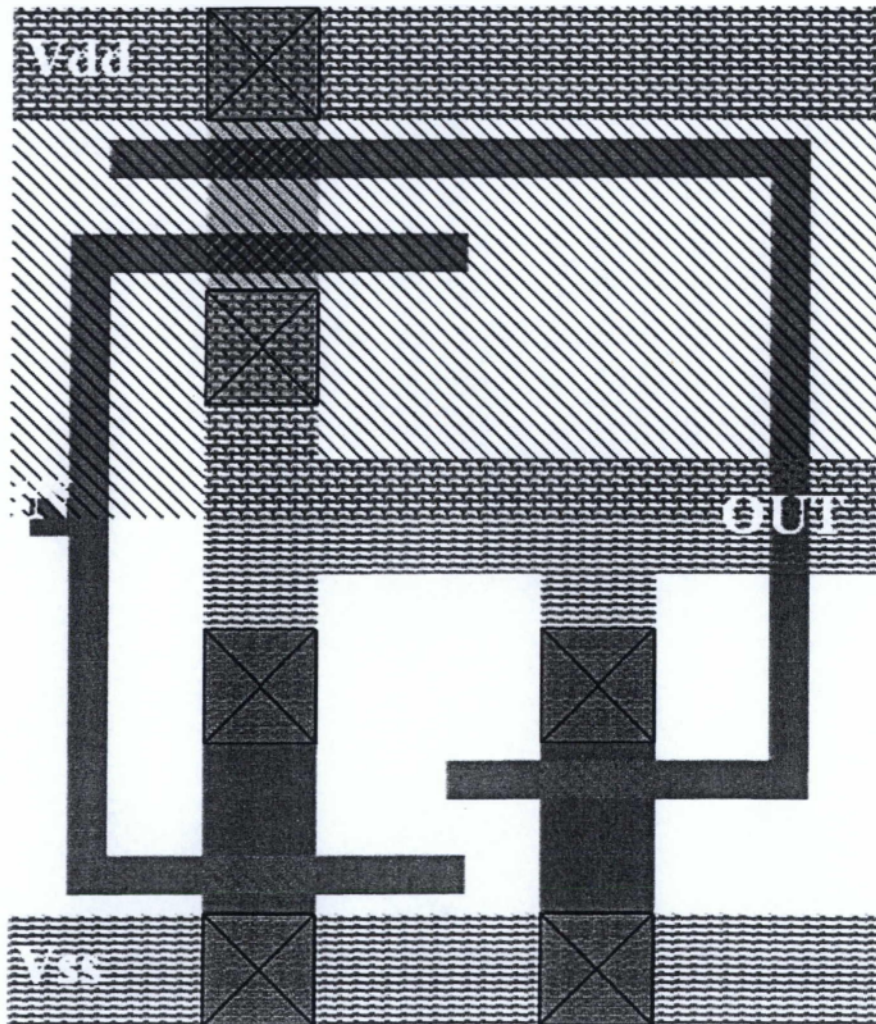
Ο πίνακας αληθείας της NOR είναι ο εξής

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Πίνακας 8.3

8.4.3 Υλοποίηση σε φυσικό επίπεδο (Layout)

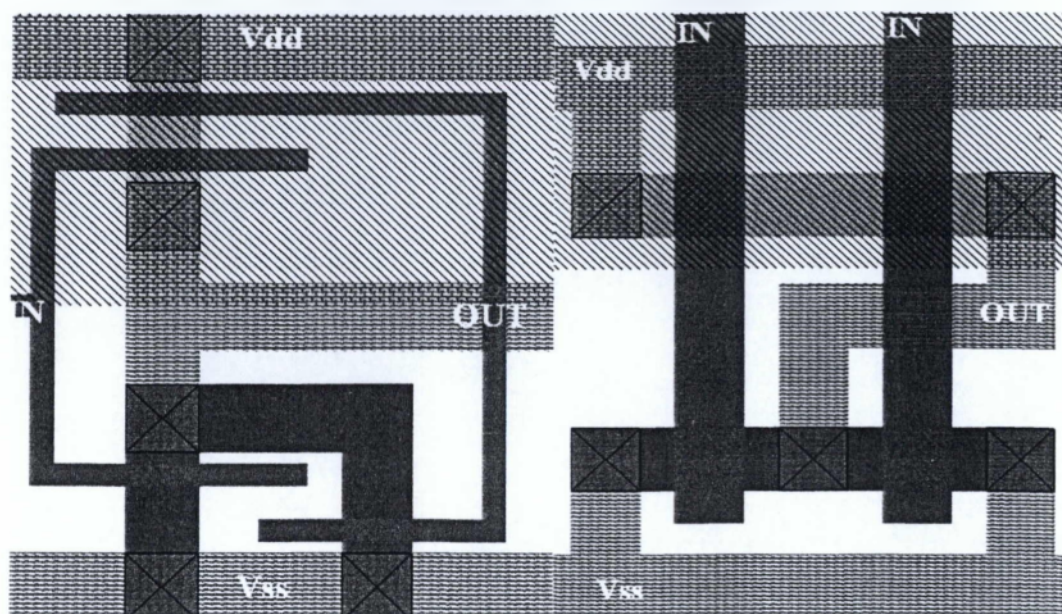
Ακολουθώντας τα ίδια βήματα για την υλοποίηση του αναστροφέα τεχνολογίας CMOS σχεδιάζουμε και την πύλη NOR τεχνολογία CMOS .



Σχήμα 8.32

Υλοποίηση πύλης NOR- τεχνολογία CMOS σε φυσικό επίπεδο

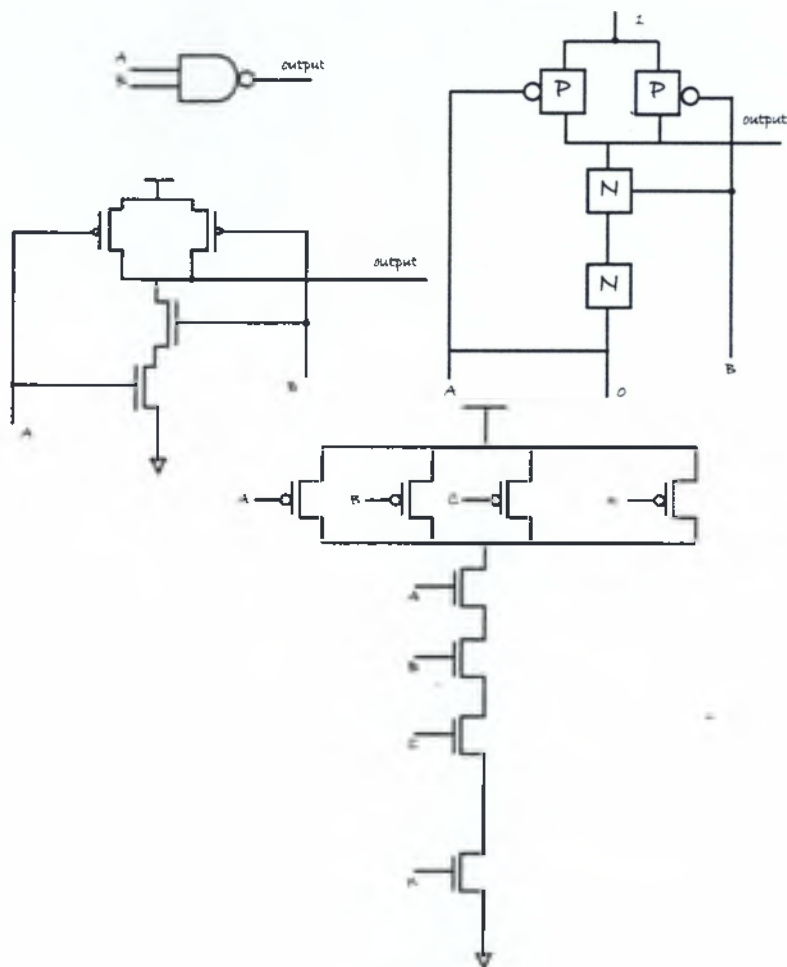
Υπάρχουν και εδώ διαφορετικές αναπαραστάσεις για την Υλοποίηση πύλης NOR- τεχνολογία CMOS σε φυσικό επίπεδο, όπως τα παρακάτω σχήματα.



Σχήμα 8.33

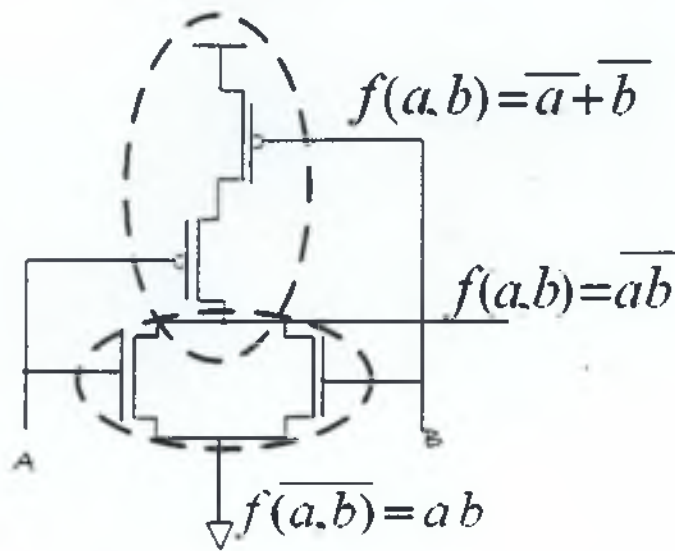
Διαφορετική σχεδίαση πύλης NOR- τεχνολογία CMOS

8.5 Πύλη NAND τεχνολογίας CMOS

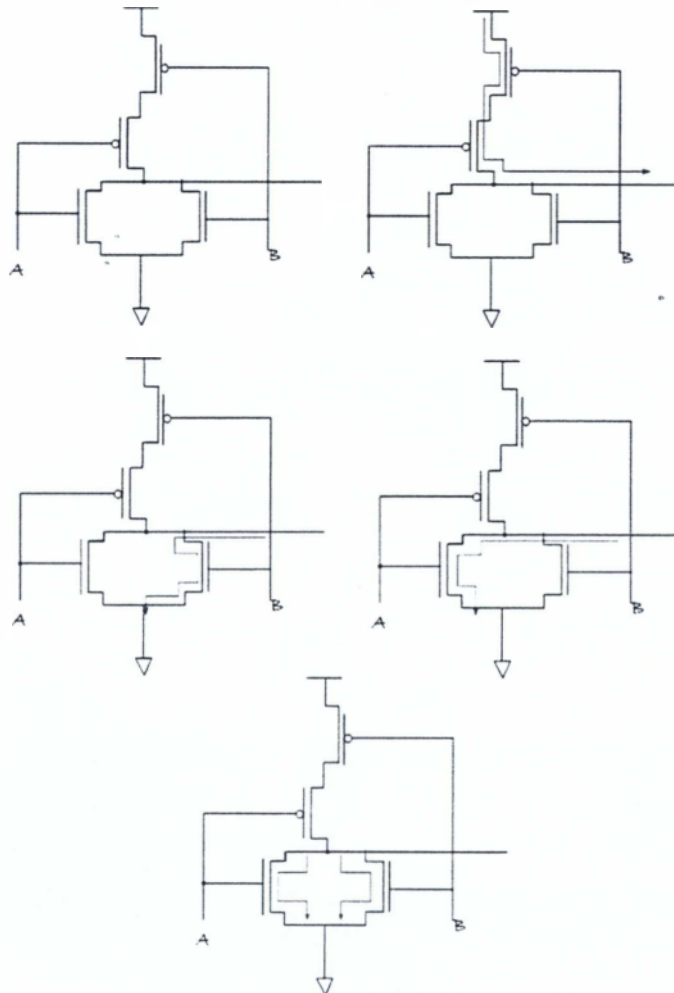


Σχήμα 8.34

Διάφορες απεικονίσεις πυλών NAND

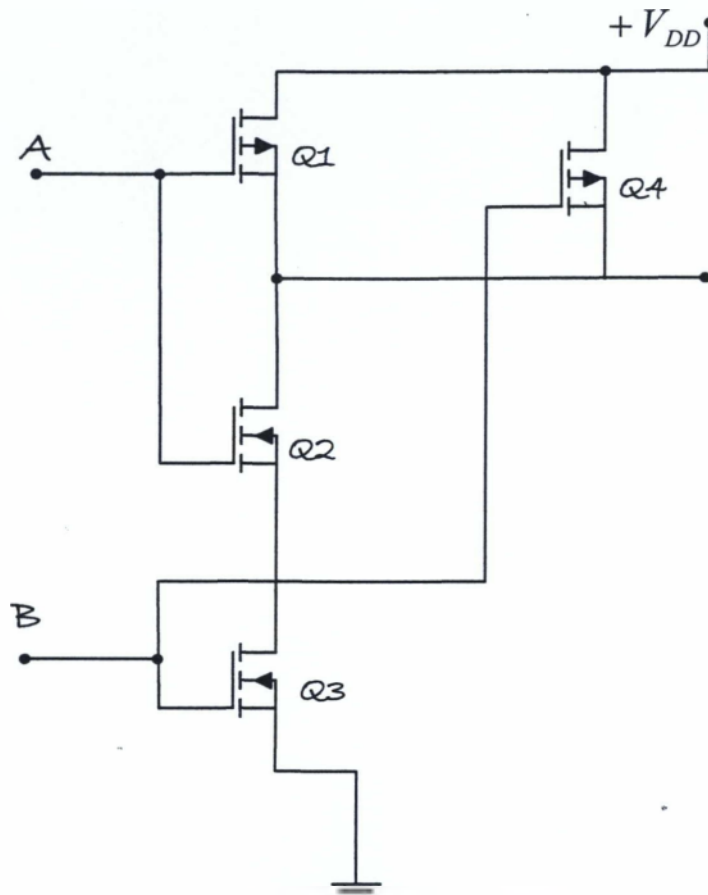


Σχήμα 8.35
Συναρτήσεις εισόδου και εξόδου πύλης NAND



Σχήμα 8.36
Λειτουργία πύλης NAND σε συνάρτηση της εισόδου της

8.5.1 Σχεδίαση

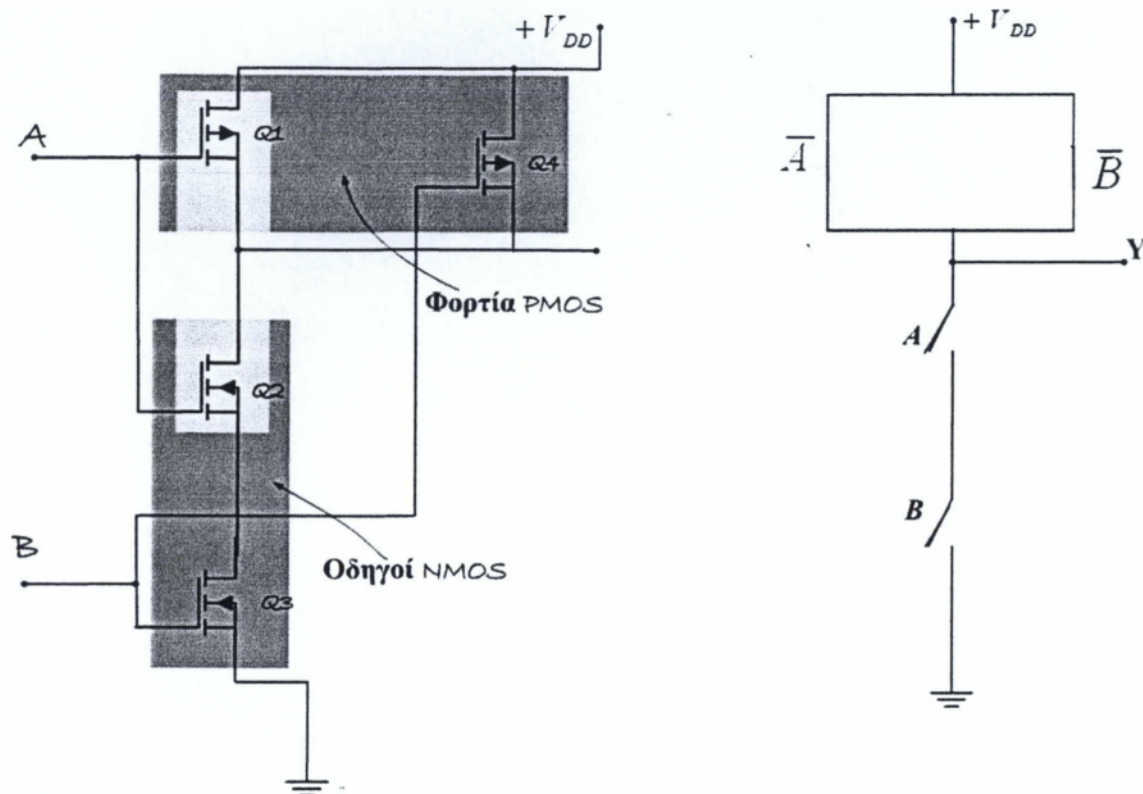


Σχήμα 8.37
CMOS NAND

Στη συνδεσμολογία CMOS NAND του σχήματος, τα MOS τρανζίστορ Q_1 και Q_4 είναι p-καναλιού (PMOS) και τα Q_2 και Q_3 είναι n-καναλιού (NMOS).

Ουσιαστικά τώρα παρατηρούμε ότι σε αντίθεση με τη NOR-CMOS τα δύο PMOS συνδέονται παράλληλα για να σχηματίσουν τη βαθμίδα φορτίου, ενώ τα δύο NMOS συνδέονται σε σειρά για να σχηματίσουν τη βαθμίδα οδήγησης.

8.5.2 Προσομοίωση – Μελέτη

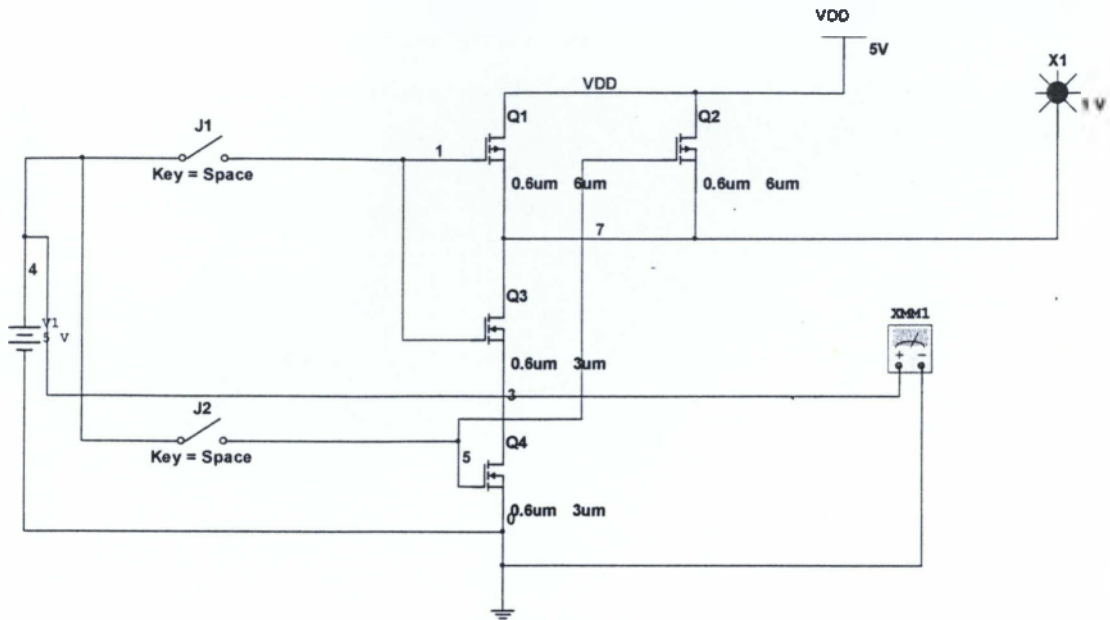


Σχήμα 8.38
CMOS NAND

παρουσίαση φορτίων και οδηγών
ιδανικό κύκλωμα διακοπών.

Όταν και οι δύο εισόδοι βρίσκονται σε υψηλή στάθμη, λογικό "1", οι δύο διακόπτες A και B της βαθμίδας οδήγησης θα είναι κλειστοί (τα τρανζίστορ Q_2 και Q_3 άγουν), με αποτέλεσμα η έξοδος να έρχεται σε χαμηλό δυναμικό (λογικό "0").

Όταν τώρα έστω μια από τις εισόδους βρεθεί σε χαμηλή στάθμη το αντίστοιχο NMOS τρανζίστορ αποκόπτεται ενώ το συμπληρωματικό του θα άγει (π.χ Q_3 OFF, Q_4 ON) και θα φέρνει την έξοδο Y μέσω της μικρής του αντίστασης σε κατάσταση υψηλού δυναμικού (λογικό "1"), επιβεβαιώνοντας έτσι τη δράση της συγκεκριμένης συνδεσμολογίας ως πύλης NAND.



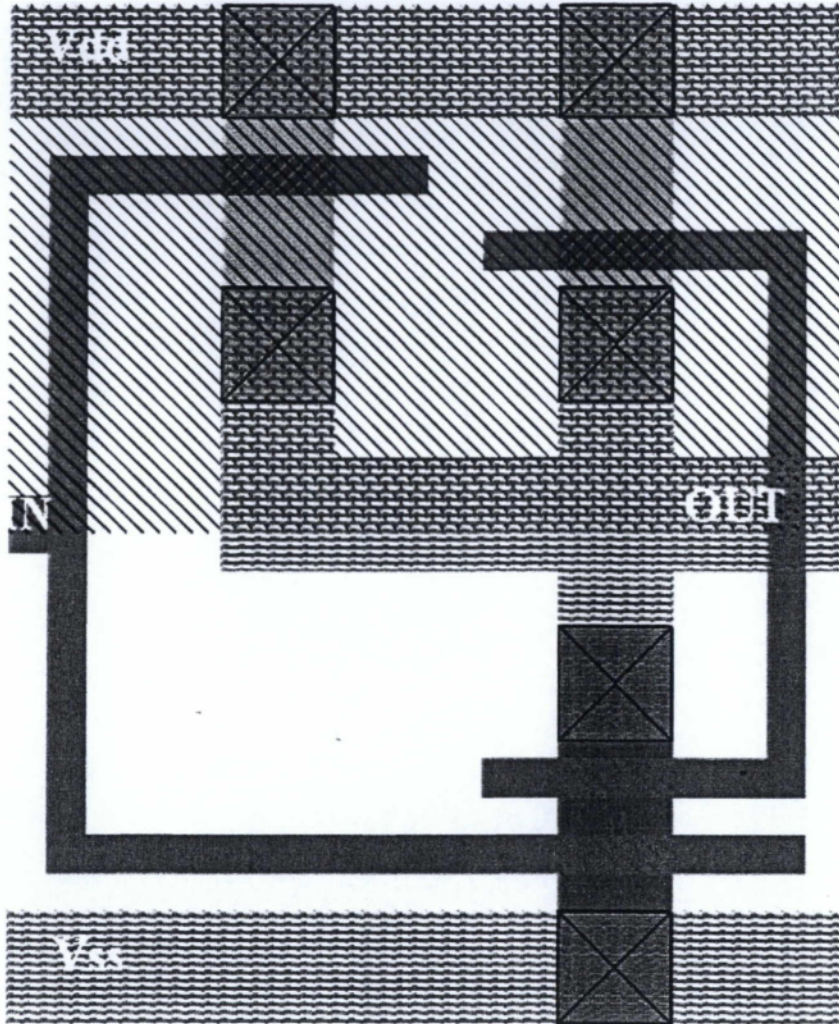
Σχήμα 8.39
Κύκλωμα CMOS NAND

A	B	Y	LED	V _{LED}
0	0	1	1	5
0	1	1	1	5
1	0	1	1	5
1	1	0	0	0

Πίνακας 8.4

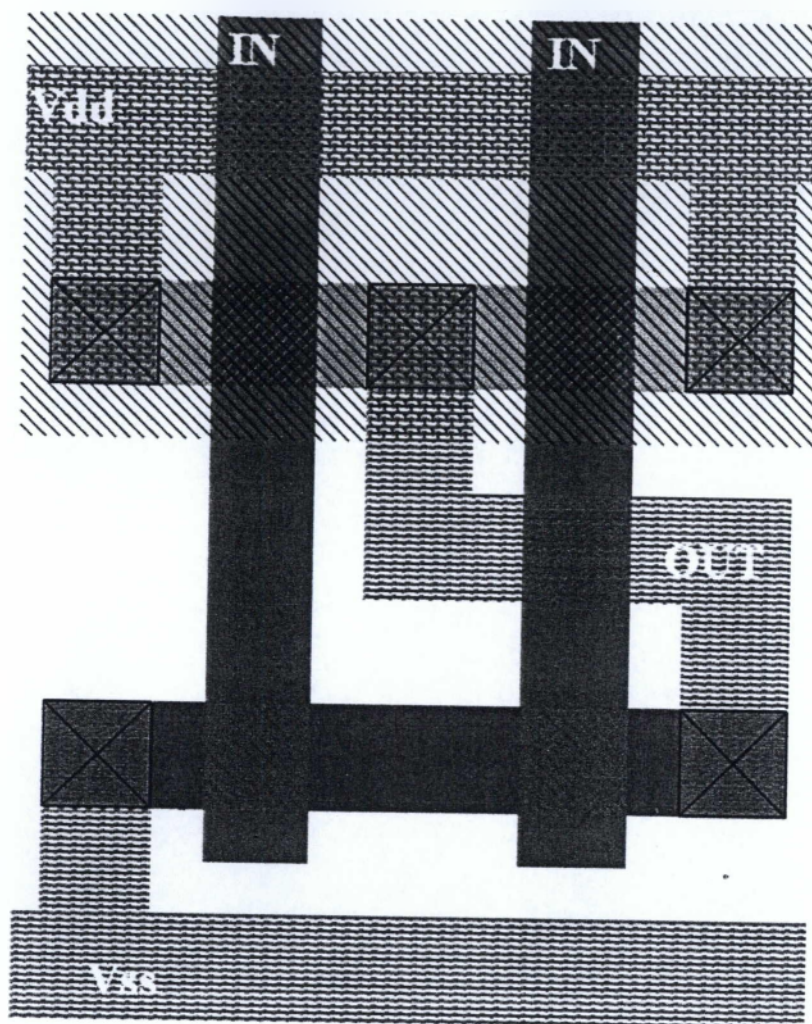
8.5.3 Υλοποίηση σε φυσικό επίπεδο (Layout)

Ακολουθούμε ακριβώς την ίδια διαδικασία με την υλοποίηση του αναστροφέα και της πύλης NOR για να κατασκευάσουμε το φυσικό επίπεδο την πύλης NAND CMOS.



Σχήμα 8.40
Κύκλωμα NAND CMOS

Μια διαφορετική υλοποίηση την πύλης NAND CMOS αποτυπώνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 8.41
NAND CMOS 2



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Vapaille R. Castagne : "Dispositifs et Circuits Integres Semiconducteurs", Dunod Paris (1987).
2. S.M.Sze : "Semiconductor Devices, Physics and Technology", Willey (1985).
3. Κ. Καγκαράκης : "Ημιαγωγοί. Θεωρίες, Υλικά και Τεχνολογίες", Αθήνα (1985).
4. E.H.Nicollian, J.R.Brews:"MOS Physics and Technology", Willey.
5. E.S.Yang: Microelectronic Devices, McGraw – Hill (1988).
6. S.O.Kasap. Principles of Electronic Materials and Devices. McGraw – Hill (2002).
7. R.S.Muller, Th. I. Kamins:"Devices Electronics for Integrated Circuits", Wiley (1986).
8. Α.Αλεξανδρής , Διπλωματική Εργασία ,ΔΠΜΣ «Μικροσυστήματα και Νανοδιατάξεις» ΕΜΠ 2004.
9. Τεχνολογία Υλικών / 3η Έκδοση / Εκδόσεις .Κ.Ε. ΣΑΒΒΑΚΗΣ.
10. Βασική Ηλεκτρονική / 4η Έκδοση / Εκδόσεις Α.Τζιόλα / Albert Paul Malvino
11. Ηλεκτρονική / 6η Έκδοση / Εκδόσεις Τζιόλα / Malvino
12. Εφαρμοσμένα Ηλεκτρονικά / 3η Έκδοση / Εκδόσεις Τζιόλα / Schuler
13. Α. Βλάχος, Διπλωματική Εργασία Β 'Δομικός Χαρακτηρισμός Νανοδομημένων Πολυστρωματικών Υμενίων με Περίθλαση Ακτίνων Χ' (Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Επιστήμης Υλικών, Πάτρα, 2004).
14. Π. Πουλόπουλος, Διδακτορική Διατριβή 'Ανάπτυξη και Ιδιότητες Μεταλλικών Υμενίων Διαμορφωμένης Δομής' (Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 1996).
15. Α. Σπανού, Διπλωματική Εργασία Β 'Μελέτη της Ανάπτυξης Μεταλλικών Νανοκρυσταλλικών Υμενίων με Μικροσκοπία Σάρωσης Ακίδας AFM' (Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Επιστήμης Υλικών, Πάτρα, 2004).
16. www.tee.gr

17. www.esyd.gr
18. Πολυμερή στη Μικροηλεκτρονική, Σημειώσεις του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών:Επιστήμη Πολυμερών και Εφαρμογές της. Τσουκαλάς, Δ. (2005). Τεχνολογία μικροσυστημάτων. Αθήνα, Τομέας φυσικής, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.
19. Προσομοίωση της λιθογραφίας ηλεκτρονικής Δέσμης- Διδακτορική Διατριβή Τσικρίκας Α Νικόλαος Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο- Σχολή Εφαρμοσμένων μαθηματικών και Φυσικών επιστημών
20. Π. Πουλόπουλος, Σημειώσεις στο μάθημα Επιστήμη Επιφανειών – Λεπτά Υμένια, Τμήμα Επιστήμης των Υλικών, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα (2004).
21. Διπλωματική εργασία Β Παρασκευή μεταλλικών νανοκρυσταλλικών υμενίων με τη μέθοδο sputtering Μανουράς Θεόδωρος Πανεπιστήμιο Πατρών – Σχολή Θετικών Επιστημών Τμήμα Επιστήμης Των Υλικών
22. Παππά Σπυριδούλα του Δημητρίου, Διπλωματική εργασία- Παρασκευή με τη μέθοδο SPUTTERING, χαρακτηρισμός και ιδιότητες λεπτών μαγνητικών υμενίων Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών Τομέας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας
23. Γιάννης Ε. Παπανάνος, “Μικροηλεκτρονικά Κυκλώματα για Τηλεπικοινωνιακές Εφαρμογές”, ΠΑΠΑΣΩΤΗΡΙΟΥ-ΕΠΙΣΕΥ/ΕΜΠ, Αθήνα 1998.
24. Σχεδίαση Ολοκληρωμένου Μίκτη σε Τεχνολογία CMOS 0.35μm - Διπλωματική εργασία- του Ανδρέα Α. Στεργίου - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και μηχανικών Υπολογιστών Τομέας Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και συστημάτων Πληροφορικής
25. Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, Τόμος 23 – Εμφύτευση
26. Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, Τόμος 24 - Επιταξία
27. Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, Τόμος 26 – Ηλεκτρονική, ημιαγωγοί
28. Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, Τόμος 36 – Κρυστάλλωση και ανάπτυξη κρυστάλλων
29. Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, Τόμος 47
30. Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, Τόμος 48
31. Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, Τόμος 51 – Πυρίτιο
32. Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, Τόμος 55

33. Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, Τόμος 58

34. Πάπυρος Λαρούς Μπριτάνικα, Τόμος 59