



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.

# Τεχνολογία Κατασκευής Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων

*Μελέτη*

---

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
του  
ΕΥΣΤΑΘΙΟΥ ΑΡΓΥΡΑΚΑΚΗ

Επιβλέπων: Γιάννης Λιαπέρδος  
Καθηγητής Εφαρμογών

Σπάρτη, Νοέμβριος 2015

---



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ Τ.Ε.

Copyright ©. – All rights reserved. Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος  
Ευστάθιος Αργυρακάκης, 2015.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

#### **ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ενυπογράφως ότι είμαι αποκλειστικός συγγραφέας της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας, για την ολοκλήρωση της οποίας κάθε βοήθεια είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται λεπτομερώς στην εργασία αυτή. Έχω αναφέρει πλήρως και με σαφείς αναφορές, όλες τις πηγές χρήσης δεδομένων, απόψεων, θέσεων και προτάσεων, ιδεών και λεκτικών αναφορών, είτε κατά κυριολεξία είτε βάση επιστημονικής παράφρασης. Αναλαμβάνω την προσωπική και ατομική ευθύνη ότι σε περίπτωση αποτυχίας στην υλοποίηση των ανώτερων δηλωθέντων στοιχείων, είμαι υπόλογος έναντι λογοκλοπής, γεγονός που σημαίνει αποτυχία στην Πτυχιακή μου Εργασία και κατά συνέπεια αποτυχία απόκτησης του Τίτλου Σπουδών, πέραν των λοιπών συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων. Δηλώνω, συνεπώς ότι αυτή η Πτυχιακή Εργασία προετοιμάστηκε και ολοκληρώθηκε από εμένα προσωπικά και αποκλειστικά και ότι, αναλαμβάνω πλήρως όλες τις συνέπειες του νόμου στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής άλλης πνευματικής ιδιοκτησίας.

(Υπογραφή)

.....

Ευστάθιος Αργυρακάκης, *Νοέμβριος 2015*

## **Περίληψη**

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα αποτελούν ένα σύνολο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων ή διαφορετικά ένα κύκλωμα στο οποίο όλα ή μερικά από τα στοιχεία του, είναι άρρηκτα συνδεδεμένα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ολοκληρωμένων κυκλωμάτων ανάλογα με την διαδικασία κατασκευής και το λειτουργικό τους ρόλο. Στη συνέχεια, θα αναφερθούμε εκτενώς στις διάφορες τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Στο κεφάλαιο 1 θα κάνουμε μια εκτενή αναφορά στα ολοκληρωμένα κυκλώματα, την μορφή τους, τους τύπους τους και το πώς αυτά ταξινομούνται. Στη συνέχεια στο κεφάλαιο 2, αναφερόμαστε στη τεχνική της φωτολιθογραφίας, τη διαδικασία που ακολουθείται, τις μάσκες και τα φωτοευαίσθητα υλικά που χρησιμοποιούνται. Στην τεχνική της εμφύτευσης ιόντων, αναφερόμαστε στο κεφάλαιο 3. Παρουσιάζεται η τεχνική, όλη η διαδικασία που χρησιμοποιείται, τα είδη των μασκών, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα. Επιπλέον γίνεται αναφορά στον υπολογιστών της κατανομής καθώς και στη συσκευή που χρησιμοποιείται κατά την εμφύτευση ιόντων. Στο επόμενο κεφάλαιο (κεφάλαιο 4) γίνεται αναφορά στην τεχνική της διάχυσης. Αναλύεται η διαδικασία που ακολουθείται καθώς και οι τύποι διάχυσης. Τέλος στα κεφάλαιο 5 και 6 αναφερόμαστε στην οξείδωση και την επιμετάλλωση αντίστοιχα. Αναφέρονται οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται σε κάθε μία από αυτές τις δύο τεχνικές καθώς και τα είδη της επιμετάλλωσης.

### **Λέξεις Κλειδιά**

ολοκληρωμένα κυκλώματα, IC, chip, φωτοδιάχυση, χημική χάραξη, εμφύτευση ιόντων, ανόπτηση, διάχυση, επιμετάλλωση, οξείδωση

## **Abstract**

Integrated circuits are a set of electronic circuits in which all or some of its elements are inextricably linked. There are various types of integrated circuits, depending on the manufacturing process and their functional role. Then, we will refer in detail to the various techniques used in the manufacture of integrated circuits.

In Chapter 1, we do an extensive reference to integrated circuits, their form, their types and how they are sorted. Then in chapter 2, we refer to the technique of photolithography, the process followed, masks and photoresists used. The technique of ion implantation refer to Chapter 3 presents the technique, the entire process used, types of masks, their advantages and disadvantages. Further reference is made to the computer of the allocation as well as the device used during the ion implantation. The next chapter (Chapter 4) refers to the technique of diffusion. It analyzes the process followed and the diffusion types. Finally, in Chapter 5 and 6 refer to oxidation and plating respectively. Indicate the process used in each of these two techniques and the types of plating.

## **Keywords**

integrated circuit, IC, chip, microchip, photolithography, ion implantation, diffusion, oxidation, metallization

## **Ευχαριστίες**

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Ιωάννη Λιαπέρδο για την επίβλεψη αυτής της πτυχιακής εργασίας , για την καθοδήγηση του και την εξαιρετική συνεργασία που είχαμε. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου για την καθοδήγηση και την ηθική συμπαράσταση που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Σπάρτη, Νοέμβριος 2015

Ευστάθιος Αργυρακάκης

## Περιεχόμενα

Περίληψη .....	7
Λέξεις Κλειδιά .....	7
Abstract .....	9
Keywords.....	9
Ευχαριστίες .....	13
Περιεχόμενα .....	14
Κατάλογος Εικόνων.....	16
Κατάλογος πινάκων .....	18
Πρόλογος .....	20
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα ολοκληρωμένα κυκλώματα.....	22
1.1 Τύποι ολοκληρωμένων κυκλωμάτων .....	26
1.2 Ταξινόμηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων .....	28
1.3 Είδη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων .....	29
1.3.1 Αναλογικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα .....	29
1.3.2 Ψηφιακά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα .....	31
Κεφάλαιο 2: Φωτολιθογραφία.....	33
2.1 Εισαγωγή.....	33
2.2 Αλληλουχία βημάτων για την παραγωγή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος με την χρήση φωτολιθογραφίας.....	38
2.3 Χημική χάραξη – Διάβρωση (Etching) .....	42
Κεφάλαιο 3: Εμφύτευση Ιόντων.....	44
3.1 Εισαγωγή.....	44
3.2 Εισαγωγή στην εμφύτευση ιόντων στους ημιαγωγούς .....	45
3.2.1 Πλεονεκτήματα εμφύτευσης ιόντων.....	47
3.2.2 Προβλήματα κατά την εμφύτευση ιόντων.....	48
3.3 Κατανομές Εμφύτευσης Ιόντων.....	49
3.4 Συσκευές Εμφύτευσης Ιόντων .....	56
3.5 Μάσκες Εμφύτευσης Ιόντων .....	60
3.6 Ανόπτηση μετά την εμφύτευση.....	63
Κεφάλαιο 4: Διάχυση.....	65
4.1 Εισαγωγή.....	65

4.2 Τύποι διάχυσης.....	66
4.3 Η θεωρία της διάχυσης.....	71
4.4 Η πρακτική διαδικασία της διάχυσης.....	75
4.4.1 Οξείδωση κατά τη διάχυση.....	77
4.4.2 Πολλαπλές η διαδοχικές διαχύσεις.....	78
4.5 Μάσκες διάχυσης .....	79
4.6 Προσμίξεις και τα χαρακτηριστικά τους.....	82
4.7 Συστήματα διάχυσης .....	83
Κεφάλαιο 5: Οξείδωση .....	88
5.1 Εισαγωγή.....	88
5.2 Θερμική οξείδωση .....	89
5.2.1 Διαδικασία οξείδωσης.....	92
5.3 Χημική εναπόθεση (CVD).....	95
5.4 Λεπτά οξείδια πύλης (gate-oxide) .....	96
Κεφάλαιο 6: Επιμετάλλωση.....	99
6.1 Εισαγωγή.....	99
6.2 Επιμετάλλωση στα VLSI .....	102
6.3 Διαδικασία επιμετάλλωσης.....	103
6.4 Μέθοδοι εναπόθεσης.....	105
6.5 Συσκευές εναπόθεσης .....	107
Βιβλιογραφία.....	110

## Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1: Ολοκληρωμένο κύκλωμα.....	23
Εικόνα 2: Κύκλωμα σε συμβατική και ολοκληρωμένη μορφή [2] .....	23
Εικόνα 3: Αναλογικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα [8].....	30
Εικόνα 4: Κοινές λογικές πύλες [8] .....	31
Εικόνα 5: Ευθυγράμμιση μάσκας [9].....	33
Εικόνα 6: Θετικό και αρνητικό φωτοευαίσθητο υλικό [9] .....	36
Εικόνα 7: Θετικό και αρνητικό φωτοευαίσθητο υλικό [10] .....	37
Εικόνα 8: Διαφορές μοτίβων από θετικό και αρνητικό φωτοευαίσθητο υλικό [2] .....	38
Εικόνα 9: Εμφύτευση ιόντων [17] .....	44
Εικόνα 10: Περιοδικός Πίνακας [4].....	46
Εικόνα 11: Αλληλεπιδράσεις ιόντων και ατόμων [18] .....	50
Εικόνα 12: Πυρηνική και ηλεκτρονική διακοπή .....	51
Εικόνα 13: Προβαλλόμενη περιοχή μέσα στο πυρίτιο σαν συναρτήσεις της ενέργειας εμφύτευσης για διάφορες προσμίξεις της ομάδας III [4] .....	54
Εικόνα 14: Προβαλλόμενη περιοχή μέσα στο πυρίτιο σαν συναρτήσεις της ενέργειας εμφύτευσης για διάφορες προσμίξεις της ομάδας IV [4] .....	55
Εικόνα 15: Σύστημα Εμφύτευσης Ιόντων [16].....	56
Εικόνα 16: Συσκευή Εμφύτευσης Ιόντων .....	57
Εικόνα 17: Πηγή ιόντων [17].....	58
Εικόνα 18: Μαγνήτης διαχωρισμού μάζης [17] .....	59
Εικόνα 19: Επιταχυντής [17] .....	59
Εικόνα 20: Εμφύτευση ιόντων [20] .....	61
Εικόνα 21: Μάσκες και εμφύτευση ιόντων [18].....	61
Εικόνα 22: Πάχος μάσκας και βάθος εμφύτευσης [19] .....	62
Εικόνα 23: Διάχυση [22] .....	66
Εικόνα 24: Κίνηση ατόμου στο κρύσταλλο πυριτίου [23] .....	67
Εικόνα 25: Διάχυση Υποκατάστασης [21].....	68
Εικόνα 26: Διάμεση διάχυση [21].....	70
Εικόνα 27: Διάχυση δύο βημάτων [24] .....	77
Εικόνα 28: Κλίβανος από θερμαινόμενη αντίσταση σε σωλήνα .....	84
Εικόνα 29: Ενεργό Ηλεκτρόδιο πύλης [28] .....	90
Εικόνα 30: Πολυεπίπεδη επιμετάλλωση [28].....	91
Εικόνα 31: Διάταξη αντιδραστήρα θερμικής οξειδωσης .....	91
Εικόνα 32: Κατασκευαστικά στάδια για την ανάπτυξη λεπτού οξειδίου πύλης [2] .....	97
Εικόνα 33: α, β, c: Θάλαμος κενού και πηγές θερμικής εξάχνωσης, d: εξαχνωτής e δέσμης [2] .....	104
Εικόνα 34: Διαδικασία επιμετάλλωσης [31].....	108



## **Κατάλογος πινάκων**

Πίνακας 1: Τύποι ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [7].....	27
Πίνακας 2: Υλικά προς χημική χάραξη και τα αντίστοιχα διαλύματα που απαιτούνται .....	42
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικές τιμές της Γκαουσιανής [4] .....	53

## **Πρόλογος**

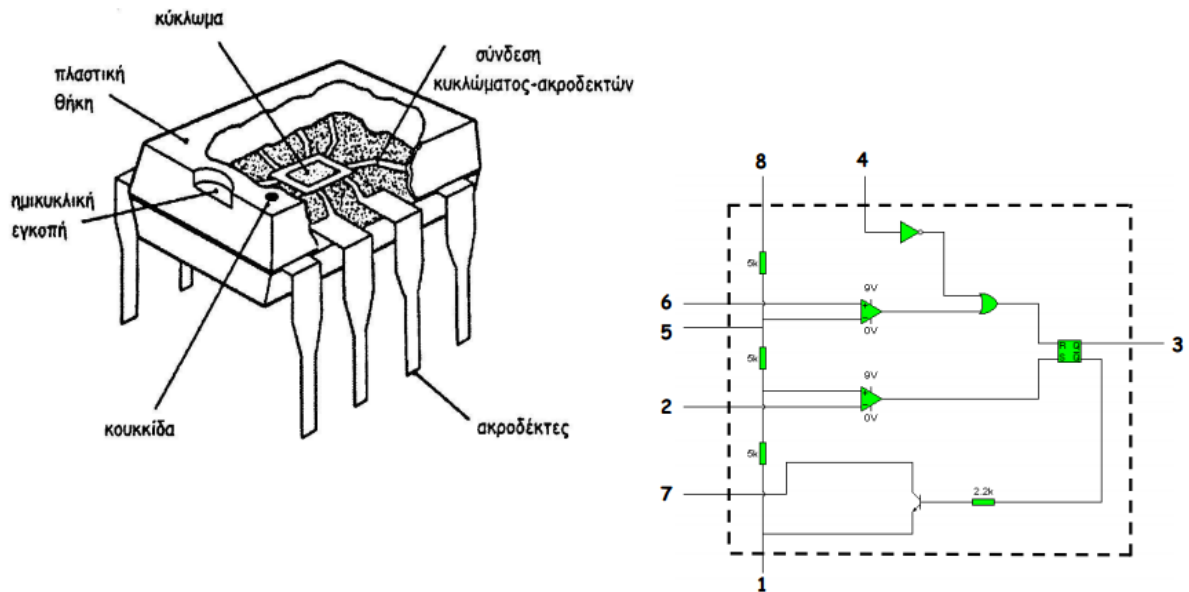
Τα τελευταία χρόνια, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα έχουν παρουσιάσει τεράστια πρόοδο. Υπάρχουν σε κάθε συσκευή της καθημερινής μας ζωής όπως για παράδειγμα οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και οι τηλεοράσεις.

Έτσι επιλέξαμε να αναλύσουμε τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η εργασία αυτή έχει μόνο θεωρητικό μέρος για το οποίο χρησιμοποιήθηκε τόσο ελληνική όσο και ξενόγλωσση βιβλιογραφία.

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή στα ολοκληρωμένα κυκλώματα

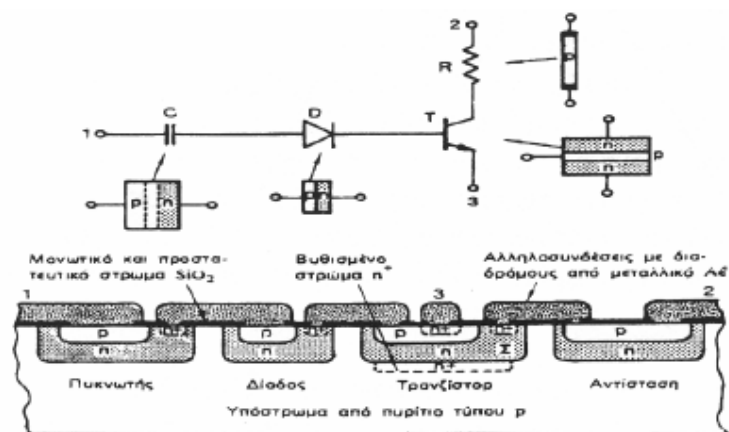
Μέχρι πρόσφατα (δεκαετία του '60), τα ηλεκτρικά κυκλώματα των διαφόρων εφαρμογών περιείχαν λυχνίες είτε στοιχεία ημιαγωγών τα οποία ήταν ενεργητικά (πηγές, ενισχυτές, ανορθωτές, τρανζίστορ κ.α.) ή παθητικά (αντίσταση, πυκνωτής, δίοδος, πηνίο, διατάξεις κατανάλωσης ή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας στους πυκνωτές αντικατάστασης κ.α.). Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο ειδών στοιχείων είναι ότι τα ενεργά στοιχεία τροφοδοτούν ένα σήμα και αυξάνουν την ισχύ του ενώ τα παθητικά στοιχεία προκαλούν την απώλεια ισχύος ενός σήματος. Ένα βασικό χαρακτηριστικό των πρώτων ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι ο διακριτός χαρακτήρας των διαφόρων στοιχείων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με αγωγούς ή αγωγίμες διασυνδέσεις (στην περίπτωση των τυπωμένων σε πλακέτα κυκλωμάτων). Τα κυκλώματα αυτά ονομάζονται κυκλώματα διακριτών (discrete) στοιχείων και αποτελούν τη βάση της συμβατικής Ηλεκτρονικής.

Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα ή μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα (που αναφέρεται επίσης ως ένα IC, chip, ή ένα microchip) είναι ένα σύνολο ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και συνδεδεμένων λογικών πυλών πάνω σε φύλλα μικρών κρυστάλλων ημιαγωγών (chip) κατά κύριο λόγο κατασκευασμένα από πυρίτιο (Si). Το chip περιλαμβάνει ηλεκτρικά στοιχεία όπως τρανζίστορς, διόδους αντιστάσεις και πυκνωτές. Τα στοιχεία αυτά είναι συνδεδεμένα μέσα στο chip ώστε να σχηματίζουν ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα και δεν είναι δυνατός ο διαχωρισμός ή η αντικατάσταση των στοιχείων που το αποτελούν. Το chip αυτό του ημιαγωγού, έχει επιφάνεια μικρότερη από 1 mm<sup>2</sup> και πάχος από 100 – 400μm. Το chip τοποθετείται πάνω σε μεταλλικό ή πλαστικό στέλεχος και οι συνδέσεις συγκολλούνται σε εξωτερικά “ποδαράκια”, έτσι σχηματίζεται ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα. Στην ακόλουθη εικόνα μπορούμε να δούμε τη μορφή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.



Εικόνα 1: Ολοκληρωμένο κύκλωμα

Ενώ στην επόμενη φαίνεται ένα συμβατικό κύκλωμα διακριτών στοιχείων που περιλαμβάνει αντίσταση πυκνωτή, δίοδο και τρανζίστορ και η κατασκευή του σε ολοκληρωμένη μορφή, όπου όλα τα στοιχεία του καθώς και οι αγωγίμες διασυνδέσεις περιέχονται στην επιφάνεια (βάθους μερικών  $\mu\text{m}$ ) ενός chip πυριτίου.



Εικόνα 2: Κύκλωμα σε συμβατική και ολοκληρωμένη μορφή [2]

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα διαφέρουν από τα συμβατικά κυκλώματα διακριτών στοιχείων στο ότι τα στοιχεία τους δεν μπορούν να διαχωριστούν ή να αποσυνδεθούν από το κύκλωμα του εσωτερικού του ολοκληρωμένου πακέτου. Η σύνδεση του ολοκληρωμένου με το υπόλοιπο εξωτερικό κύκλωμα γίνεται μόνο με τους εξωτερικούς του ακροδέκτες (ποδαράκια).

Ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα έχει πολύ μικρότερο μέγεθος από ένα διακριτό κύκλωμα κατασκευασμένο από ανεξάρτητα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα μπορούν να γίνουν πολύ συμπαγή, παρότι μπορεί να αποτελούνται μέχρι και από αρκετά δισεκατομμύρια τρανζίστορ και άλλα ηλεκτρονικά στοιχεία σε μια περιοχή στο μέγεθος ενός νυχιού. Το πλάτος της κάθε διεξαγωγής γραμμής σε ένα κύκλωμα μπορεί να γίνει όλο και μικρότερο, καθώς εξελίσσεται η τεχνολογία. Το 2008 έπεσε κάτω από 100 nanometers, και σήμερα είναι δεκάδες nanometers.

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα άρχισαν να χρησιμοποιούνται για δύο κυρίως λόγους. Πρώτα απ' όλα πειράματα έδειξαν ότι οι διατάξεις με ημιαγωγό έχουν την δυνατότητα να εκτελούν λειτουργίες των σωλήνων κενού. Επιπλέον κατά τα μέσα του 20<sup>ου</sup> αιώνα, σημειώθηκε μεγάλη πρόοδος στον τομέα κατασκευής διατάξεων ημιαγωγών. Η προσθήκη μεγάλου αριθμού μικροσκοπικών τρανζίστορ σε ένα μικρό chip αποτέλεσε τεράστια πρόοδο στην κατασκευή κυκλωμάτων με τη χρήση διακριτών ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Η μαζική παραγωγή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, η αξιοπιστία τους και η κατασκευή τους σαν building blocks για τον σχεδιασμό κυκλωμάτων εξασφάλισε την ταχεία υιοθέτηση τυποποιημένων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στη θέση των διακριτών transistors.

Από όσα έχουμε αναφέρει μέχρι τώρα, θα μπορούσαμε να ορίσουμε ένα ολοκληρωμένο κύκλωμα ως ένα κύκλωμα στο οποίο όλα ή μερικά από τα στοιχεία του, είναι άρρηκτα συνδεδεμένα και ηλεκτρικά διασυνδεδεμένα έτσι ώστε να θεωρείται ότι αποτελούν μία μονάδα για τον σκοπό που κατασκευάστηκαν. Τα κυκλώματα που υπόκεινται στον προηγούμενο ορισμό, κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας πολλές διαφορετικές τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των thin-film τρανζίστορ, τεχνολογία παχέος film (thick film), ή υβριδικό ολοκληρωμένο κύκλωμα. Ωστόσο, σε γενικές γραμμές η χρήση του όρου ολοκληρωμένο κύκλωμα σχετίζεται με την κατασκευή ενός κυκλώματος αρχικά γνωστό ως ένα μονολιθικό ολοκληρωμένο κύκλωμα.

Τα δύο κύρια πλεονεκτήματα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε σχέση με τα διακριτά κυκλώματα είναι το κόστος και η απόδοσή τους. Το χαμηλό κόστος τους οφείλεται στο γεγονός ότι κατασκευάζονται σαν μία ενιαία chip με την χρήση της φωτολιθογραφίας, αντί να κατασκευάζονται σαν ένα τρανζίστορ τη φορά. Επιπλέον, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα χρησιμοποιούν πολύ λιγότερα υλικά σε σχέση με τα διακριτά κυκλώματα. Όσον αφορά την απόδοσή τους, είναι αρκετά υψηλή επειδή τα συστατικά τους έχουν την δυνατότητα να εναλλάσσονται γρήγορα και να καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια (σε σχέση με τα αντίστοιχα διακριτά κυκλώματα), σαν αποτέλεσμα του μικρού μεγέθους και την ελάχιστη απόσταση των συστατικών τους. Από το 2012, τα chip καταλαμβάνουν μερικά τετραγωνικά χιλιοστά περίπου  $450 \text{ mm}^2$ , με έως και 9 εκατομμύρια transistors ανά  $\text{mm}^2$ . Επιπλέον τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, έχουν μικρό μέγεθος κατασκευής με αποτέλεσμα το μικρό μέγεθος και το βάρος των ηλεκτρονικών συσκευών στις οποίες χρησιμοποιούνται, φτηνή και εύκολη κατασκευή καθώς και μεγάλη αξιοπιστία στη λειτουργία τους.

Ωστόσο, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα παρουσιάζουν και μειονεκτήματα. Ανάμεσα στα 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. Επιπλέον, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεγάλης ισχύος κυκλώματα. Τα μειονεκτήματα αυτά όμως αντισταθμίζονται από τη δυνατότητα μαζικής παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε μικρό χρονικό διάστημα.

Σήμερα, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα χρησιμοποιούνται σχεδόν σε όλες τις ηλεκτρονικές συσκευές και έχουν επιφέρει επανάσταση στον κόσμο των ηλεκτρονικών. Υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα και άλλες ψηφιακές οικιακές συσκευές αποτελούν αναπόσπαστα κομμάτια της σύγχρονης κοινωνίας και κατέστησαν δυνατά λόγω του χαμηλού κόστους των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

## **1.1 Τύποι ολοκληρωμένων κυκλωμάτων**

Πριν μερικά χρόνια ήταν δυνατή η κατασκευή μόνο απλών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Τα μεγάλης κλίμακας ολοκληρωμένα κυκλώματα περιορίζονται σε λίγα μόνο τρανζίστορ, και ο χαμηλός βαθμός ενοποίησης σήμαινε ότι η διαδικασία σχεδιασμού ήταν σχετικά απλή. Όμως, καθώς η τεχνολογία προχώρησε, εκατομμύρια τρανζίστορ μπορούν να τοποθετηθούν σε ένα chip.

Η πυκνότητα (κλίμακα) ολοκλήρωσης (scale of integration) 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 100nm. Οι απαιτήσεις για αύξηση της πυκνότητας ολοκλήρωσης και μείωσης του κόστους έδωσαν εντυπωσιακή ώθηση, τα τελευταία χρόνια, στην ταχύτητα μείωσης των διαστάσεων. Στον Πίνακα 1, βλέπουμε συγκεντρωτικά, τους διάφορους τύπους ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Συντομογραφία	Πλήρες όνομα	Αριθμός τρανζίστορ	Αριθμός λογικών πυλών
SSI	small-scale integration	1-10	1 – 12
MSI	medium-scale integration	10 – 500	13 -99
LSI	large-scale integration	500 – 20000	100 – 9999
VLSI	very large-scale integration	20000 – 1000000	10000 – 99999
ULSI	ultra-scale integration	πάνω από 1000000	πάνω από 100000

Πίνακας 1: Τύποι ολοκληρωμένων κυκλωμάτων [7]

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η επίπεδη τεχνολογία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων περιλαμβάνει τις ακόλουθες ανεξάρτητες διεργασίες:



Κάποιοι από αυτούς είναι οι ακόλουθοι: οξείδωση, φωτολιθογραφία και χημική χάραξη, διάχυση προσμίξεων, εμφύτευση ιόντων και επιμετάλλωση. Στη συνέχεια, θα αναλύσουμε εκτενέστερα όλους αυτούς τους τρόπους κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

## 1.2 Ταξινόμηση ολοκληρωμένων κυκλωμάτων

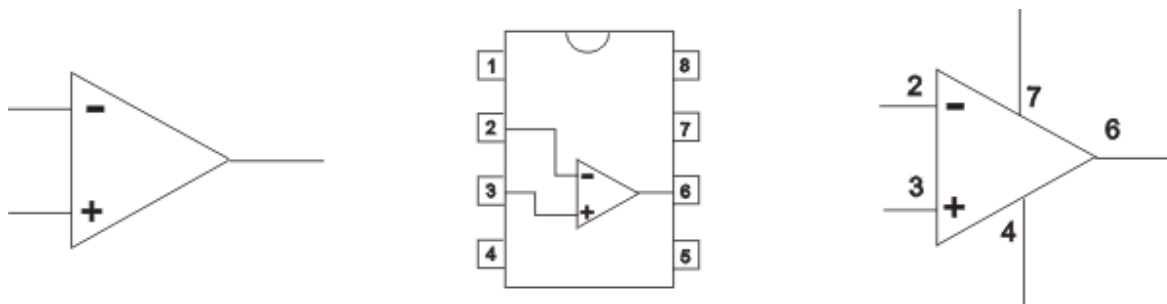
Μπορούμε να ταξινομήσουμε τα ολοκληρωμένων κυκλωμάτων σε πολλές διαφορετικές κατηγορίες. Για παράδειγμα, μπορούν να ταξινομηθούν είτε με βάση την κατασκευαστική τους διαδικασία και τη δομή τους είτε με βάση το λειτουργικό τους ρόλο στις διάφορες εφαρμογές. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι τα κυκλώματα με όλα τα στοιχεία τους και τις διασυνδέσεις κατασκευασμένα στο ίδιο τμήμα μονοκρυσταλλικού Si μέσα σε βάθος μερικών μικρών, αποκαλούνται και μονολιθικά ολοκληρωμένα κυκλώματα. Υπάρχουν όμως και ολοκληρωμένα κυκλώματα των οποίων όλα τα στοιχεία και οι αγωγίμες διασυνδέσεις κατασκευάζονται μέσα σε λεπτά στρώματα υλικών (πάχους μερικών  $\mu\text{m}$ ) που έχουν εναποτεθεί πάνω σε μονωτικά υποστρώματα (γυαλί,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ , κεραμικά κ.α.). Τα κυκλώματα αυτά αποκαλούνται κυκλώματα λεπτών στρωμάτων ή λεπτού υμενίου (thin films). Συνδυασμός των δύο πιο πάνω κατηγοριών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι τα υβριδικά κυκλώματα καθώς και τα κυκλώματα πολλαπλών chip (multi chip) με τα οποία είναι δυνατή η κατασκευή ενός ηλεκτρονικού υποσυστήματος. Η πλειονότητα των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στις διάφορες εφαρμογές είναι μονολιθικού τύπου λόγω των σημαντικών οικονομικών τους πλεονεκτημάτων. Τέλος ταξινομώντας τα ολοκληρωμένα κυκλώματα με βάση το λειτουργικό τους ρόλο σ' ένα σύστημα διακρίνουμε τα αναλογικά και τα ψηφιακά.

### **1.3 Είδη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων**

Όπως αναφέραμε και παραπάνω, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα περιλαμβάνουν εξαιρετικά μικρού μεγέθους ηλεκτρονικά κυκλώματα στην πραγματικότητα περιλαμβάνουν κυριολεκτικά χιλιάδες μικροσκοπικά τρανζίστορ μέσα στο ίδιο κέλυφος. Υπάρχουν χιλιάδες είδη ολοκληρωμένων κυκλωμάτων όπου το καθένα είναι σχεδιασμένο για να κάνει μια ελαφρώς διαφορετική δουλειά από τους "γειτονικούς" τύπους του. Ακόμα και η ακριβής θέση ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος στο κύκλωμα δεν εξαρτάται σχεδόν απόλυτα από τα τρανζίστορ που συνθέτουν το ολοκληρωμένο κύκλωμα. Αυτό που φαίνεται δύσκολο είναι να ανακαλύψει κανείς τι κάνουν όλα αυτά τα χιλιάδες είδη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Γενικότερα, τα ολοκληρωμένα κυκλώματα χωρίζονται χονδρικά σε δυο άκρως γενικευμένες κύριες κατηγορίες την αναλογική (γνωστή ως γραμμική) και την ψηφιακή.

#### **1.3.1 Αναλογικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα**

Τα αναλογικά κυκλώματα συνήθως περιέχουν αντιστάτες, πυκνωτές, καθώς και πηνία, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ορισμένες διατάξεις αναλογικών κυκλωμάτων υψηλών συχνοτήτων. Αναλογικά ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι εκείνα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κυκλώματα ήχου ή ορισμένες μορφές κυκλωμάτων ελέγχου. Ίσως οι πιο κοινοί τύποι των αναλογικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι εκείνοι που αποτελούν την οικογένεια των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων γνωστών ως τελεστικοί ενισχυτές ή op-amps.



Εικόνα 3: Αναλογικά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα [8]

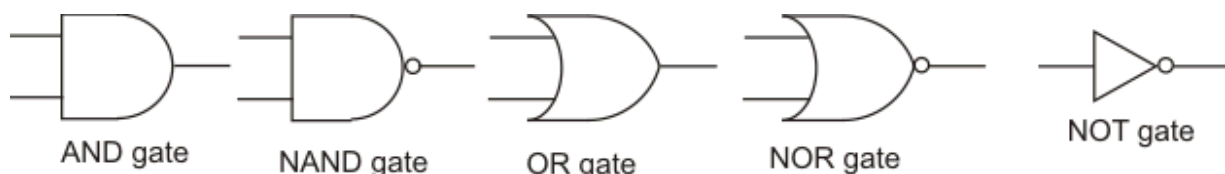
Οι τελεστικοί ενισχυτές συχνά απεικονίζονται σε ένα ηλεκτρονικό διάγραμμα του κυκλώματος με το σύμβολο που φαίνεται στο παραπάνω σχήμα όπου μπορεί να φανεί ότι το εξάρτημα έχει δυο εισόδους (σημειώνονται με + και -) και μια έξοδο (σχήμα 2.1). Συνηθίζεται επίσης να απεικονίζεται ο τελεστικός ενισχυτής σε ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα στο εσωτερικό του κελύφους ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος που δείχνει τις ακίδες ακροδεκτών όπως φαίνεται στο σχήμα. Τέλος, μερικές φορές, ο τελεστικός ενισχυτής εμφανίζεται στο διάγραμμα του κυκλώματος με τους πραγματικά αριθμημένους ακροδέκτες του αλλά το σχήμα του κελύφους δεν σχεδιάζεται. Και οι τρεις μέθοδοι είναι απολύτως σωστοί και αυτό πραγματικά εξαρτάται από το επίπεδο της λεπτομέρειας που απαιτείται σε ένα διάγραμμα κυκλώματος μαζί με την προσωπική προτίμηση για ποια μέθοδος θα χρησιμοποιηθεί.

Ενώ το σύμβολο ενός op-amp είναι σχετικά απλό θα πρέπει να ξέρετε ότι ο op-amp μπορεί να περιέχει πολλές εκατοντάδες εξαρτήματα στο εσωτερικό του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Ένας op-amp είναι ένα είδος ηλεκτρονικού εξαρτήματος τύπου "μαύρο κουτάκι" που δεν χρειάζεται να γνωρίζεται τι έχει μέσα αλλά πρέπει να γνωρίζετε πως λειτουργεί.

### 1.3.2 Ψηφιακά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα

Ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα είναι εκείνα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κυκλώματα υπολογιστών καθώς επίσης και σε μερικές μορφές των κυκλωμάτων ελέγχου. Τα ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση λογικών συναρτήσεων και την αποθήκευση ψηφιακών δεδομένων. Τυπικά παραδείγματα τέτοιων κυκλωμάτων αποτελούν οι λογικές πύλες, οι μικρο-επεξεργαστές και οι ημιαγωγικές μνήμες. Ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται επίσης για τη μετάδοση της πληροφορίας και την αλληλεπίδραση με τα φυσικά μεγέθη του περιβάλλοντος (αναλογικά σήματα).

Οι απλούστεροι τύποι ψηφιακών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι αυτοί που υλοποιούν τις ψηφιακές πύλες. Όπως οι αναλογικοί op-amps αυτά συνήθως αντιμετωπίζονται σαν ένα απλό "μαύρο κουτάκι" αλλά στην πραγματικότητα είναι κατασκευασμένα από πολλά μεμονωμένα τρανζίστορ μέσα στο ολοκληρωμένο κύκλωμα.



Εικόνα 4: Κοινές λογικές πύλες [8]

Τα ψηφιακά κυκλώματα διαχειρίζονται την πληροφορία ως μία σειρά από διακριτά "ψηφία" σε αντίθεση με τα αναλογικά κυκλώματα, τα οποία επεξεργάζονται μεγέθη από ένα συνεχές πεδίο τιμών. Η πλειοψηφία των ψηφιακών συστημάτων χρησιμοποιεί δύο μόνον "ψηφία", υλοποιώντας τη δυαδική λογική.

Στα ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα κάθε δυαδικό ψηφίο (λογική κατάσταση - 0 και 1) αντιπροσωπεύεται από μία φυσική ποσότητα τάσης ή ρεύματος. Για την αποφυγή σφαλμάτων λόγω της αναπόφευκτης παρουσίας θορύβου σε κάθε ψηφιακό κύκλωμα, η τάση ή το ρεύμα που αντιστοιχεί σε κάθε δυαδικό στοιχείο δεν έχει μία συγκεκριμένη τιμή. Αντιθέτως, κάθε λογική κατάσταση αντιστοιχεί σε μία προκαθορισμένη περιοχή τιμών τάσης ή ρεύματος. Οι περιοχές αυτές προσδιορίζουν τις λογικές στάθμες των δύο ψηφίων.

Τα ψηφιακά κυκλώματα λειτουργούν με τέτοιον τρόπο, ώστε να απορρίπτεται κάθε προστιθέμενος θόρυβος, εφόσον αυτός είναι μικρότερος από ένα προκαθορισμένο επίπεδο. Για παράδειγμα, εάν στην ονομαστική στάθμη τάσης  $V_0$  του λογικού ψηφίου 0 προστεθεί θόρυβος  $V_N$ , το αποτέλεσμα  $V_0 + V_N$  θα εξακολουθήσει να αντιπροσωπεύει το ψηφίο 0, εάν συνεχίζει να βρίσκεται μέσα στην προκαθορισμένη περιοχή τιμών του ψηφίου 0.

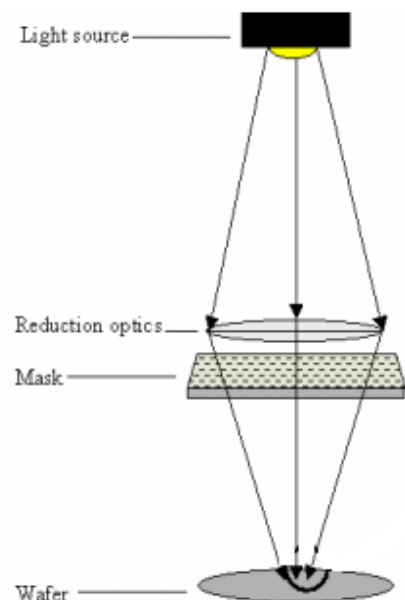
Τα ψηφιακά ηλεκτρονικά κυκλώματα αντλούν την απαιτούμενη ενέργεια για τη λειτουργία τους και την αναγέννηση του σήματος μέσω δύο γραμμών τροφοδοσίας. Η θετικότερη συμβολίζεται με  $V_{CC}$ , ενώ η αρνητικότερη (γείωση - GND) αποτελεί συνήθως (όχι πάντοτε) την τάση αναφοράς (0V) του συστήματος.

## Κεφάλαιο 2: Φωτολιθογραφία

### 2.1 Εισαγωγή

Μια από τις τεχνικές κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι η τεχνική της φωτολιθογραφίας. Με την τεχνική της φωτολιθογραφίας μια δέσμη υπεριώδους φωτός (UV) διαπερνά ένα ειδικό φράγμα, μία κατάλληλη μάσκα και προσπίπτει σε λεπτή φέτα πυριτίου καλυμμένη με οξείδιο και πάνω από το οξείδιο με φωτοευαίσθητο υμένιο (film). Με αυτή τη διαδικασία μεταφέρεται ένα γεωμετρικό σχέδιο από τη 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.

Η μάσκα σκιαγραφεί τα διάφορα μέρη του chip και το υπεριώδες φως θα προσπέσει μόνο στις περιοχές εκείνες που τις αφήνει εκτεθειμένες η μάσκα. Το φωτοευαίσθητο υλικό είναι ένα γαλάκτωμα που πολυμερίζεται όταν εκτεθεί στο υπεριώδες φως. Κατά τη διαδικασία εμφάνισης του film οι περιοχές του υμενίου στις οποίες δεν έπεσε το φως απομακρύνονται καθώς διαλύονται σε κατάλληλο χημικό όπως το τριχλωροαιθυλένιο (σε αντίθεση με αυτές που πολυμερίστηκαν οι οποίες παραμένουν). Έτσι το chip



Εικόνα 5: Ευθυγράμμιση μάσκας [9]

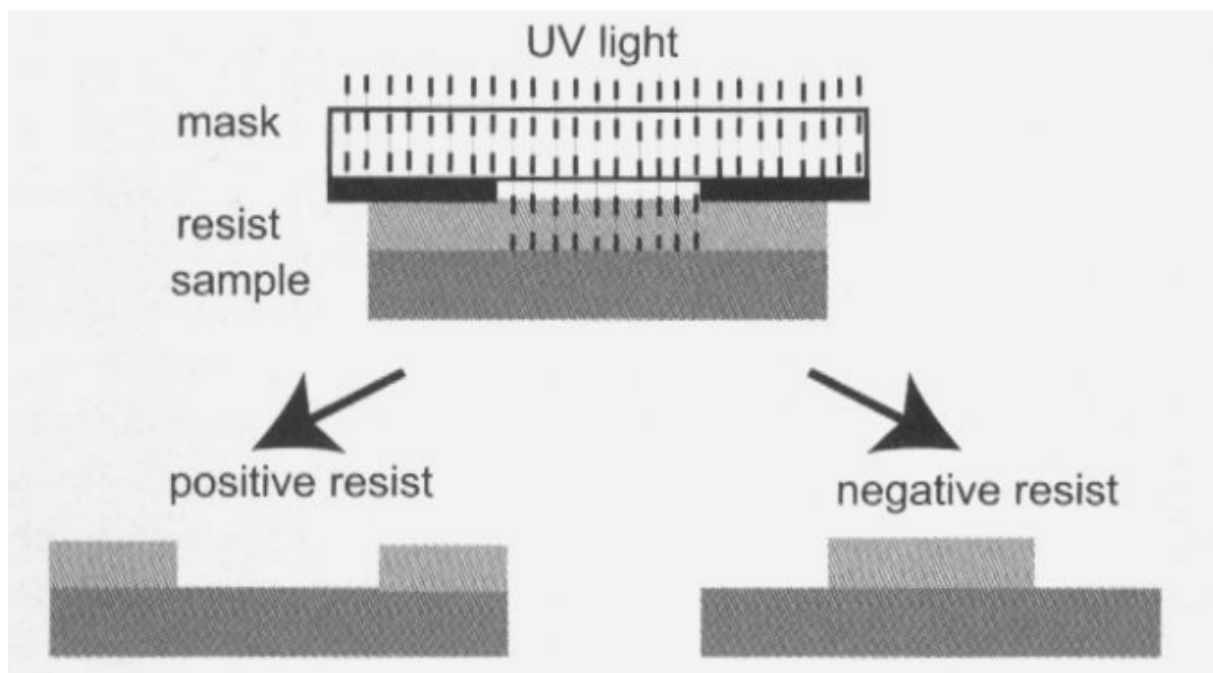
περιλαμβάνει προστατευμένες και μη προστατευμένες περιοχές από υμένιο περιοχές.

Οι μη προστατευμένες από το υμένιο περιοχές υποβάλλονται σε χημική χάραξη (εμβάπτιση σε διάλυμα HCl) για απομάκρυνση του οξειδίου του πυριτίου από αυτές και στη συνέχεια υπόκεινται σε επεξεργασία που αλλάζει τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Κατόπιν οι πολυμερισμένες περιοχές του υμενίου απομακρύνονται και αυτές με χρήση χημικού διαλυτικού (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) σε συνδυασμό με μηχανική χάραξη. Προστίθεται νέο στρώμα υλικού και η διαδικασία επαναλαμβάνεται στρώμα-στρώμα. Όταν η πολυστρωματική δομή ολοκληρωθεί, με αυτήν την επαναλαμβανόμενη διαδικασία, ακολουθεί η επιμετάλλωση. Και για την επιμετάλλωση, στην πολυστρωματική δομή επιστρώνεται φωτοευαίσθητο υλικό το οποίο εκτίθεται σε υπεριώδη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία η οποία προσπίπτει σε αυτό περνώντας δια μέσου μιας μάσκας. Το πάχος του φωτοευαίσθητου στρώματος καθορίζεται από τη ρευστότητα της φωτοευαίσθητης ουσίας και την ταχύτητα περιστροφής της συσκευής. Ο ρόλος της μάσκας σε αυτήν την περίπτωση, είναι ο καθορισμός όλων των ηλεκτρικών συνδέσεων μεταξύ των διαφόρων μερών του chip. Το film εμφανίζεται και τα μη εκτεθειμένα στο φως (μη πολυμερισμένα) μέρη του απομακρύνονται. Στη συνέχεια, το μέταλλο που δεν προστατεύεται από το υμένιο απομακρύνεται για να σχηματιστούν έτσι οι ηλεκτρικές συνδέσεις. Στο τελικό στάδιο, το chip ελέγχεται και συσκευάζεται (test & package).

Σε διαδικασίες μαζικής παραγωγής, η χρήση της μάσκας σε κάθε βήμα που περιγράφηκε προηγουμένως γίνεται σε περισσότερα του ενός chip κάθε φορά. Με μια βηματική διαδικασία (stepping process) σε ένα μεγάλο υπόβαθρο πυριτίου σχηματίζονται chips το ένα δίπλα στο άλλο. Το υπόβαθρο του πυριτίου μετακινείται βηματικά κάτω από τη μάσκα και υπό την έκθεση της UV ακτινοβολίας. Με τον τρόπο αυτό επαναλαμβάνονται οι ίδιες διαδικασίες φωτολιθογραφίας από chip σε chip χρησιμοποιώντας την ίδια μάσκα.

Το φωτοευαίσθητο υλικό (photoresist) για το οποίο έγινε αναφορά στην προηγούμενη περιγραφή της φωτολιθογραφίας χαρακτηρίζεται ως αρνητικό (negative photoresist). Στην τεχνική της φωτολιθογραφίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί και θετικό φωτοευαίσθητο υλικό (positive photoresist). Το δισκίο επικαλύπτεται με ένα ειδικό υλικό που είτε καταστρέφεται από την υπεριώδη ακτινοβολία (positive resist) είτε σκληραίνει (negative photoresist) όταν εκτεθεί σε αυτή όπως φαίνεται στις ακόλουθες εικόνες. Στην περίπτωση αυτή 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. Σε κάθε περίπτωση, το φωτοευαίσθητο υλικό που θα παραμείνει 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, του αλουμινίου ή του πολυκρυσταλλικού πυριτίου, ανάλογα με την περίπτωση, από τις μη προστατευμένες περιοχές.

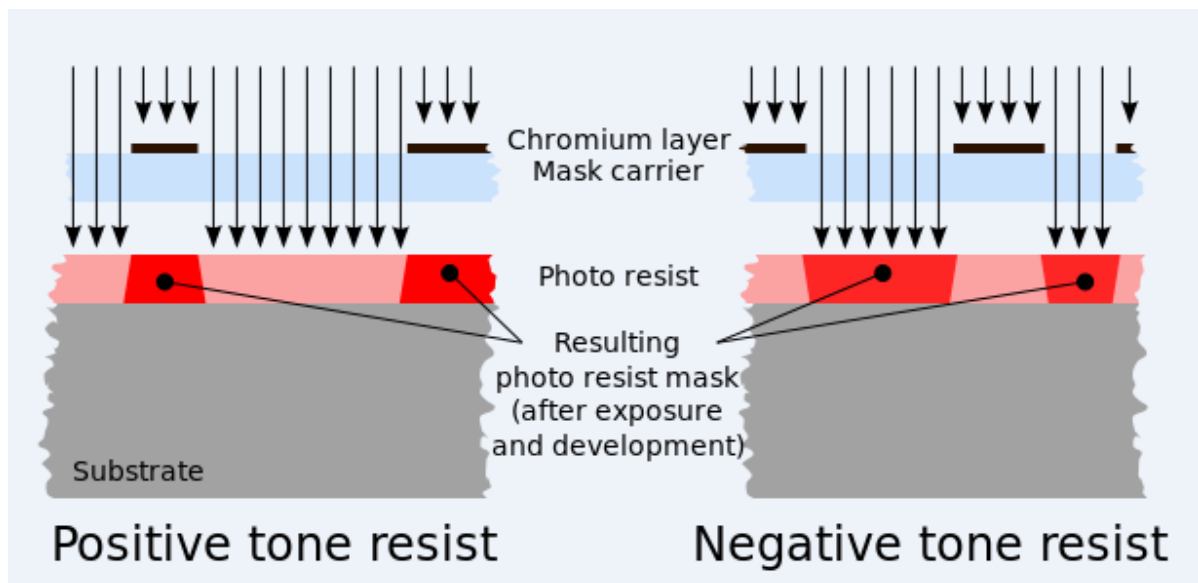




Εικόνα 6: Θετικό και αρνητικό φωτοευαίσθητο υλικό [9]

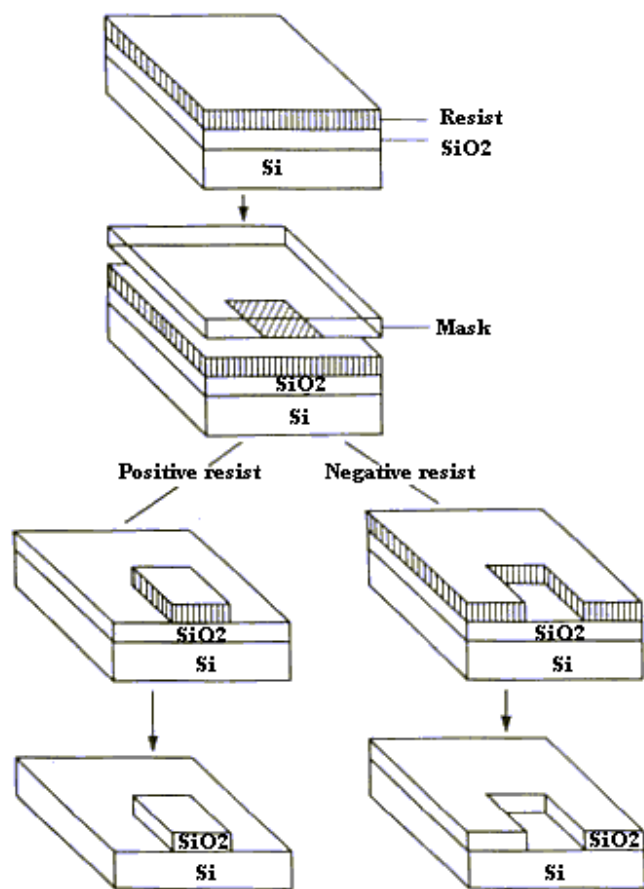
Στην περίπτωση που το φωτοευαίσθητο υλικό φωτολιθογραφίας χαρακτηρίζεται ως αρνητικό (negative photoresist), το τμήμα που εκτίθεται στην ακτινοβολία, παραμένει αδιάλυτο. Πιο συγκεκριμένα με την έκθεση στην UV ακτινοβολία, το στρώμα πολυμερίζεται και σαν αποτέλεσμα είναι πιο δύσκολο να διαλυθεί. Ως εκ τούτου, στην περίπτωση της αρνητικής φωτολιθογραφίας, αφαιρούνται τα μη εκτεθειμένα τμήματα. Η μάσκα που χρησιμοποιείται περιέχει το αντίστροφο σχέδιο από αυτό που πρόκειται να απομακρυνθεί.

Αντίθετα όταν χαρακτηρίζεται ως θετικό, το τμήμα που εκτίθεται στην ακτινοβολία γίνεται διαλυτό και αφαιρείται ενώ το υπόλοιπο παραμένει αδιάλυτο. Για να το πετύχουμε αυτό, το τμήμα που εκτίθεται στην υπεριώδη ακτινοβολία αλλάζει χημική δομή και γίνεται περισσότερο διαλυτό. Η μάσκα σε αυτή την περίπτωση είναι ένα ακριβές αντίγραφο του σχήματος που πρέπει να σχηματιστεί στο στρώμα. Αυτό απεικονίζεται και στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 7: Θετικό και αρνητικό φωτοευαίσθητο υλικό [10]

Το παρακάτω σχήμα δείχνει τις διαφορές που δημιουργείται από τη χρήση θετικού και αρνητικού φωτοευαίσθητου υλικού.



Εικόνα 8: Διαφορές μοτίβων από θετικό και αρνητικό φωτοευαίσθητο υλικό [2]

## 2.2 Αλληλουχία βημάτων για την παραγωγή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος με την χρήση φωτολιθογραφίας

Στη συνέχεια θα ακολουθήσει μία αναλυτική παρουσίαση των βημάτων για την παραγωγή ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

1. Δημιουργούνται και ελέγχονται σε ηλεκτρονικό υπολογιστή κατασκευαστικά σχέδια σε μεγάλη κλίμακα για ευκολότερο χειρισμό των λεπτομερειών.

2. Από τα σχέδια αυτά κατασκευάζονται με σμίκρυνση οι αντίστοιχες μάσκες. Το σχέδιο του κυκλώματος αποτελείται από διάφορα επίπεδα μάσκας. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, αντί της φωτολιθογραφίας μπορεί πολλές φορές να χρησιμοποιηθεί η λιθογραφία ηλεκτρονικής δέσμης πάνω σε υλικά μάσκας ευαίσθητα σε ηλεκτρόνια. Μπορούν έτσι να αναδειχτούν μικρότερες λεπτομέρειες στη σχεδίαση αφού αυτές εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Το μήκος κύματος μιας δέσμης ηλεκτρονίων είναι πολύ μικρότερο από αυτό της UV ακτινοβολίας.
3. Παρασκευάζεται κάτω από ελεγχόμενες συνθήκες μια ράβδος μονοκρυσταλλικού πυριτίου εξαιρετικά υψηλής καθαρότητας.
4. Η ράβδος πυριτίου χωρίζεται με διαμάντι σε λεπτές φέτες – wafers (δηλαδή στα ελληνικά μπισκότα λόγω της διατομής τους σε σχήμα κυκλικού δίσκου) οι οποίες στη συνέχεια λειαίνονται σε πολλαπλά στάδια για να αποκτήσουν μια πολύ λεία επιφάνεια που μοιάζει με καθρέπτη.
5. Το κάθε μπισκότο καλύπτεται με μονωτικό στρώμα οξειδίου του πυριτίου.
6. Επάνω στο μονωτικό στρώμα οξειδίου αναπτύσσεται προστατευτικό υμένιο που όπως και το film σε μια συνηθισμένη κάμερα είναι ευαίσθητο στο φως. 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 (soft bake).

7. Ακολουθεί η έκθεση του μπισκότου σε υπεριώδες φως το οποίο διαμέσου της κατάλληλης μάσκας προσπίπτει στο φωτοευαίσθητο film. Στις περιοχές του φιλμ όπου η μάσκα αφήνει το φως να πέσει το προστατευτικό υλικό πολυμερίζεται (φωτοπολυμερισμός).
8. Σε μια διαδικασία εμφάνισης που περιλαμβάνει χημική διάλυση με τριχλωροαιθυλένιο τα τμήματα του προστατευτικού υλικού που δεν εκτέθηκαν στο φως και δεν πολυμερίστηκαν από μακρύνονται. Το προστατευτικό υλικό που πολυμερίστηκε στη συνέχεια στερεώνεται θερμικά (hard bake) ώστε να μείνει ανεπηρέαστο στο βήμα διάβρωσης και μηχανικής χάραξης που θα ακολουθήσει.
9. Ακολουθεί μια διαδικασία χημικής χάραξης etching. Σε αυτήν τη διαδικασία απο μακρύνεται το μη προστατευμένο μονωτικό υλικό δημιουργώντας έτσι ένα σχέδιο (pattern) από μη προστατευμένες περιοχές πυριτίου οι οποίες περιστοιχίζονται από άλλες περιοχές με πυρίτιο που προστατεύεται από οξείδιο του πυριτίου το οποίο με κατάλληλες μάσκες διατηρήθηκε και δε χάραχτηκε χημικά.
10. Οι μη προστατευμένες – εκτεθειμένες – περιοχές του πυριτίου υποβάλλονται σε μια διαδικασία αλλαγής των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται doping και περιλαμβάνει διαχύσεις ή εμφυτεύσεις προσμίξεων και θερμική επεξεργασία. Τα βήματα 5-10 επαναλαμβάνονται προκειμένου να αναπτυχθεί στρώμα – στρώμα μια πολυστρωματική δομή η οποία μπορεί να περιλαμβάνει τόσο μονωτικά όσο και αγωγικά στρώματα.
11. Αφού κατασκευαστούν όλα τα επιμέρους τμήματα πάνω στο chip ακολουθεί η διαδικασία της επιμετάλλωσης για την ηλεκτρική διασύνδεση των επιμέρους τμημάτων. Πρώτο βήμα σε αυτή τη διαδικασία αποτελεί η εναπόθεση μετάλλου πάνω στο chip.
12. Στην επιφάνεια του μετάλλου τοποθετείται φωτοευαίσθητο (στο UV) υλικό.

13. Υπεριώδες φως προσπίπτει διαμέσου κατάλληλης μάσκας πάνω στο φωτοευαίσθητο υλικό. Η μάσκα είναι έτσι φτιαγμένη ώστε να μπορεί να οριοθετήσει τις μεταλλικές συνδέσεις μεταξύ των διαφόρων μερών του chip.
14. Με κατάλληλα χημικά απομακρύνονται οι περιοχές από το φωτοευαίσθητο υλικό στις οποίες η μάσκα ήταν αδιαφανής μη επιτρέποντας να πέσει το φως σε αυτές.
15. Με μια διαδικασία χημικής χάραξης απομακρύνεται το μέταλλο που δεν προστατεύεται από φωτοευαίσθητο υλικό. Μένει έτσι το μέταλλο των μεταλλικών συνδέσεων το οποίο παρουσιάζει μια τέτοια κατανομή πάνω στο chip όπως αυτή που καθόρισε η μάσκα
16. Στα σύγχρονα ολοκληρωμένα κυκλώματα μέσα από επανάληψη της προαναφερθείσας διαδικασίας είναι δυνατό να κατασκευάζονται πολλαπλά επίπεδα επιμετάλλωσης χωρισμένα με μονωτικά στρώματα για αποφυγή ανεπιθύμητων βραχυκυκλωμάτων.
17. Μετά την ολοκλήρωση της τελευταίας φάσης της επιμετάλλωσης τα ολοκληρωμένα που παράχθηκαν ελέγχονται για τις επιδόσεις τους.
18. Με τη βοήθεια διαμαντιού, τα chips διαχωρίζονται μεταξύ τους ώστε να αποτελέσουν αυτόνομα ολοκληρωμένα κυκλώματα.
19. Το κάθε chip συσκευάζεται σε μια προστατευτική θήκη και τοποθετούνται κατάλληλοι μεταλλικοί ακροδέκτες που θα παίξουν το ρόλο των εισόδων, των εξόδων και των συνδέσεων τροφοδοσίας του ολοκληρωμένου κυκλώματος.
20. Ακολουθεί νέος έλεγχος λειτουργίας και αξιοπιστίας και προώθηση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων στους κατασκευαστές ηλεκτρονικών συσκευών.

### 2.3 Χημική χάραξη – Διάβρωση (Etching)

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα πιο κοινά υλικά που υπόκεινται σε χημική χάραξη κατά τις επίπεδες διεργασίες της μικροηλεκτρονικής και τα αντίστοιχα διαλύματα (etching solutions) που απαιτούνται.

Υλικό	Διάλυμα
SiO <sub>2</sub>	HF
πολυκρυσταλλικό Si	HF
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Φωσφορικό οξύ εν βρασμώ
Αλουμίνιο	Φωσφορικό οξύ

Πίνακας 2: Υλικά προς χημική χάραξη και τα αντίστοιχα διαλύματα που απαιτούνται

Από τα υλικά του πίνακα, το SiO<sub>2</sub> και το Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> χρησιμοποιούνται ως μονωτικά υλικά με το SiO<sub>2</sub> να χρησιμοποιείται παράλληλα και σαν μάσκα στις επίπεδες διεργασίες. Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο χρησιμοποιείται ως αγώγιμο υλικό πύλης σε κάποια MOS τρανζίστορ ενώ το αλουμίνιο είναι το κύριο υλικό για τις επιμεταλλώσεις και τη δημιουργία ακροδεκτών και ηλεκτρικών συνδέσεων μεταξύ των επιμέρους τμημάτων ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος.

Το Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> έχει παρόμοιες ιδιότητες με το SiO<sub>2</sub> αλλά παρέχει μεγαλύτερη προστασία έναντι των ανεπιθύμητων προσμίξεων και γενικότερα έχει καλύτερες επιδόσεις ως παθητικό στρώμα (passivation layer). Το Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> απομακρύνεται με τη χρήση βραστού φωσφορικού οξέως όμως το φωτοευαίσθητο υλικό δεν μπορεί να δράσει προστατευτικά έναντι αυτού του οξέως σε αντίθεση με το διοξείδιο του πυριτίου που μπορεί να δράσει προστατευτικά. Για το λόγο αυτό, στην

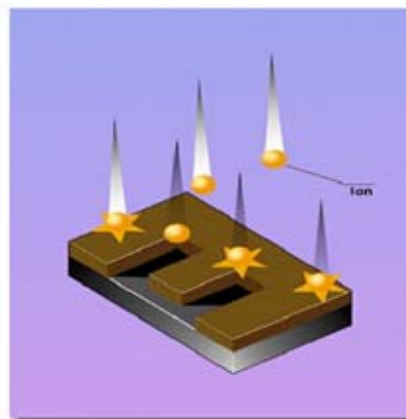
περίπτωση του  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ρόλο μάσκας διαδραματίζει το  $\text{SiO}_2$  και όχι το φωτοευαίσθητο υλικό. Έτσι το  $\text{Si}_3\text{N}_4$  συνήθως συναντάται στη μικροηλεκτρονική σε ρόλο παθητικού στρώματος που περιβάλλεται (sandwich) από στρώματα  $\text{SiO}_2$



## Κεφάλαιο 3: Εμφύτευση Ιόντων

### 3.1 Εισαγωγή

Η εμφύτευση ιόντων (ion implantation) είναι μια διαδικασία της μηχανικής υλικών με την οποία τα ιόντα ενός υλικού επιταχύνονται με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού πεδίου και επιδρούν με το στερεό σώμα. Αυτή η διαδικασία χρησιμοποιείται για να αλλάξει τη φυσική ή τη χημική κατάσταση ενός υλικού ή ακόμα και να μεταβάλει τις ηλεκτρικές ιδιότητες ενός στερεού. Η εμφύτευση ιόντων



Εικόνα 9: Εμφύτευση ιόντων [17]

χρησιμοποιείται στην κατασκευή συσκευών ημιαγωγών και στο φινίρισμα μετάλλων, αλλά έχει και διάφορες εφαρμογές στην έρευνα επιστήμη των υλικών. Τα ιόντα μπορούν και μεταβάλλουν τη στοιχειακή σύνθεση του στερεού στο οποίο εμφυτεύονται, ενώ αν τα ιόντα διαφέρουν σε σύνθεση από τον στόχο, σταματούν στον στόχο και να παραμείνουν εκεί. Επιπλέον, μπορούν να προκαλέσουν πολλές χημικές και φυσικές αλλαγές στο υλικό που εφαρμόζονται με τη μεταφορά ενέργειας και της ορμής τους στα ηλεκτρόνια και στον πυρήνα των ατόμων του υλικού. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη δομική αλλαγή του στόχου λόγω του ότι η κρυσταλλική δομή του στόχου μπορεί να αλλαχθεί ή ακόμα και να καταστραφεί από τις ενεργειακές συγκρούσεις. Επειδή τα ιόντα έχουν μάζα συγκρίσιμη με εκείνη των ατόμων του στόχου, μπορεί να έχουν μεγαλύτερη αστοχία σε σχέση με τις δέσμες ηλεκτρονίων. Αν η ενέργεια των ιόντων είναι αρκετά υψηλή (συνήθως μερικές δεκάδες MeV) ώστε να ξεπεραστεί το φράγμα Coulomb, μπορεί ακόμη και να υπάρξει και το φαινόμενο της μεταστοιχείωσης.

### 3.2 Εισαγωγή στην εμφύτευση ιόντων στους ημιαγωγούς

Όσον αφορά, τους ημιαγωγούς, η ιοντική εμφύτευση είναι η εισαγωγή επιλεγμένων ιονισμένων προσμίξεων μέσα σ' ένα υπόστρωμα, όπως ο κρύσταλλος Si, σε χαμηλή θερμοκρασία. Τα ιόντα κατά την εισαγωγή τους στον ημιαγωγό χάνουν σταδιακά την ενεργεία τους καθώς συγκρούονται με τα άτομα πυριτίου μέχρι την εναπόθεση τους στην τελική τους θέση. Κατά την ολοκλήρωση της εμφύτευσης ιόντων, ακολουθεί θερμική επεξεργασία για την αποκατάσταση των διαταραχών του κρυσταλλικού πλέγματος που πιθανόν να έχουν δημιουργηθεί από τις συγκρούσεις μεταξύ των ατόμων.

Η ιοντική εμφύτευση πραγματοποιείται με τη βοήθεια ενός συστήματος ιοντικού εμφυτευτή που παράγει δέσμη ιόντων προσμίξεων. Κατά την εμφύτευση ιόντων παρέχεται μια ευελιξία που δεν είναι δυνατή με τη διάχυση όπως θα δούμε στη συνέχεια. Μερικά χαρακτηριστικά παραδείγματα εμφύτευσης ιόντων είναι τα διπολικά τρανζίστορ όπου η βάση τους μπορεί να εμφυτευθεί μέσα από τον εκπομπό. Στα MOS μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εμφύτευση ιόντων για να ρυθμιστεί με ακρίβεια η τάση κατωφλίου. Επιπλέον μπορούν να κατασκευαστούν με εμφύτευση ιόντων αντιστάσεις μεγάλης τιμής με πολύ χαμηλούς θερμικούς συντελεστές. 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.).

Με την εμφύτευση ιόντων ο σχεδιαστής δεν έχει πλήρη έλεγχο της κατανομής των προσμίξεων, διότι η δόση των ιόντων καθορίζει μεν την ολική συγκέντρωση των προσμίξεων που αποτίθενται στο πυρίτιο αλλά όχι τη μορφή και τη θέση της κατανομής τους, η οποία εξαρτάται από την ενέργεια εμφύτευσης και τη θερμική επεξεργασία που ακολουθεί την εμφύτευση. Η καταστροφή

του υλικού περιορίζει την ενέργεια εμφύτευσης, σε τρόπο ώστε το μέγιστο βάθος εμφύτευσης είναι συνήθως μικρότερο από 1μm από την επιφάνεια. Η εμφύτευση ιόντων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή για τον κύκλο ανακατανομής της διάχυσης ώστε να επιτευχθούν βαθύτερες κατανομές της πρόσμιξης.

Η εισαγωγή προσμίξεων σε ένα ημιαγωγό αλλάζει πολλές από τις ηλεκτρικές ιδιότητες, όπως: τον τύπο των φορέων πλειονότητας, τη συγκέντρωση των φορέων, την ευκινησία των φορέων, το χρόνο ζωής του πλεονάσματος φορέων και τα εσωτερικά ηλεκτρικά πεδία του ημιαγωγού.

Οι προσμίξεις που έχουν ενεργειακές στάθμες κοντά στις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους είναι αυτές που ανήκουν στις ομάδες III και IV του περιοδικού συστήματος, είναι δηλαδή οι προσμίξεις αντικατάστασης που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση της συγκέντρωσης των φορέων και του τύπου των φορέων πλειονότητας μέσα στο υλικό.

Period	I <sup>A</sup>	II <sup>A</sup>	III <sup>A</sup>	IV <sup>A</sup>	V <sup>A</sup>	VI <sup>A</sup>	VII <sup>A</sup>	Noble Gases										
1	1 H 1.008							2 He 4.003										
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012						10 Ne 20.18										
3	11 Na 22.99	12 Mg 24.31						18 Ar 39.95										
4	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 51.99	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
5	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc 98	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3
6	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	57 La 138.9	72 Hf 178.5	73 Ta 180.8	74 W 183.9	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po 209	85 At 210	86 Rn 222
7	87 Fr 223	88 Ra 226	89 Ac 227.0	104 Unq 261	105 Unp 262	106 Unh 263	107 Uns 262											

Annotations in the image:

- Alkali Ions:** Points to Group I<sup>A</sup>.
- Deep Level Impurities in Silicon:** A double-headed arrow between Groups III<sup>A</sup> and V<sup>A</sup>.
- Shallow Acceptors:** Points to Group III<sup>A</sup>.
- Elemental Semiconductors:** Points to Group IV<sup>A</sup>.
- Shallow Donors:** Points to Group V<sup>A</sup>.

Εικόνα 10: Περιοδικός Πίνακας [4]

### 3.2.1 Πλεονεκτήματα εμφύτευσης ιόντων

Η εμφύτευση ιόντων παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα. Τα 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. Επιπλέον επιτρέπει τον ακριβή έλεγχο του βάθους και της κατανομής της εμφύτευσης.

Η εμφύτευση ιόντων παρέχει ακριβή έλεγχο της πυκνότητας και του βάθους των προσμίξεων που κατατίθενται στο υπόστρωμα. Αυτό είναι δυνατό επειδή τόσο η επιτάχυνση όσο και η δέσμη των ιόντων ελέγχονται εξωτερικά σε σχέση με την συσκευή στην οποία πραγματοποιείται η εμφύτευση. Ο εμφυτευτής ιόντων σχηματίζει ένα απλό ηλεκτρικό κύκλωμα. Με την παρακολούθηση του ρεύματος στο κύκλωμα μπορεί να επιτευχθεί σημαντική ακρίβεια στην εμφυτευόμενη δόση ιόντων. Επίσης, δεδομένου ότι το ρεύμα της δέσμης ιόντων μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια κατά τη διάρκεια της εμφύτευσης, μπορεί να εισαχθεί μια συγκεκριμένη ποσότητα ιόντων. Η δυνατότητα έλεγχου της ποσότητας του εμφυτεύματος σε συνδυασμό με την ομοιομορφία του εμφυτεύματος πάνω από την επιφάνεια του πλακιδίου, καθιστούν την εμφύτευση ιόντων ελκυστική για την κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, δεδομένου ότι αυτό προκαλεί σημαντική βελτίωση στην ποιότητα τους.

Λόγω του ακριβή έλεγχου της ποσότητας της εμφύτευσης ιόντων, είναι δυνατόν να εμφυτευτούν πολύ μικρές δοσολογίες έτσι ώστε να μπορούν να ληφθούν πολύ μεγάλες τιμές της αντίστασης φύλλου. Αυτές οι υψηλές αντιστάσεις φύλλων είναι χρήσιμες για την απόκτηση αντιστάσεων μεγάλης αξίας για τα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Πολύ χαμηλές ποσότητες και χαμηλή

ενέργειας εμφυτεύσεις χρησιμοποιούνται επίσης για την προσαρμογή της τάσης κατωφλίου των MOSFET αλλά και σε άλλες εφαρμογές.

Ένα προφανές πλεονέκτημα της εμφύτευσης είναι ότι μπορεί να γίνει σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, αυτό σημαίνει ότι ενισχυμένα στρώματα μπορούν να εμφυτεύονται χωρίς να διαταραχθούν προηγούμενες διαχεόμενες περιοχές. Αυτό σημαίνει ότι μια μικρότερη τάση για πλευρική εξάπλωση.

Τέλος ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι η μεγάλη ποικιλία ως προς τα υλικά των масκών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν (υλικά φωτοαντίστασης, οξειδίου και μέταλλα).

### **3.2.2 Προβλήματα κατά την εμφύτευση ιόντων**

Στα μέρες μας υπάρχουν πλάκες πυριτίου μεγάλης διαμέτρου. Τέτοιες πλάκες είναι απαραίτητες στα VLSI. Αυτό καθιστά το έργο της ομοιόμορφης εμφύτευσης μίας πλάκας πυριτίου όλο και πιο δύσκολο. Αυτό με τη σειρά του έχει επίδραση στην αντίσταση φύλλου. Η εμφύτευση ιόντων αποτελεί μια διαδικασία καθαρισμού, διότι τα μολυσμένα ιόντα απομακρύνονται από τη δέσμη πριν χτυπήσουν το στόχο. Υπάρχουν αρκετές πηγές μόλυνσης ειδικά κοντά στο τέλος της πορείας, η οποία μπορεί να οδηγήσει σε μολυσμένα ιόντα μέχρι και 10 τοις εκατό περισσότερο από την προβλεπόμενη δόση, για παράδειγμα, τα άτομα μετάλλου χτυπούν στα τοιχώματα του θαλάμου, στα δοχεία νερού στο άνοιγμα της μάσκας και ούτω καθεξής.

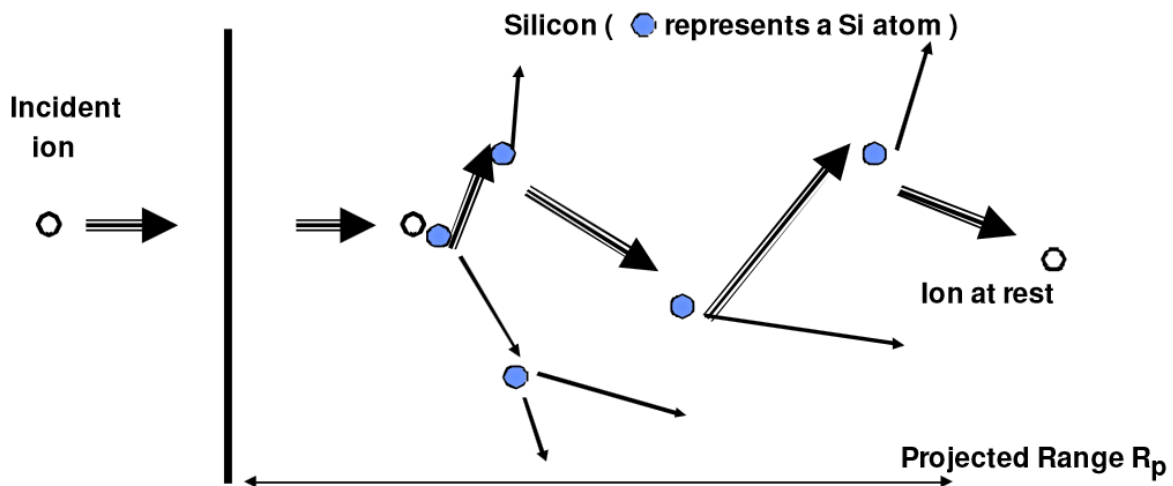
Η σύγχυση των ατόμων πυριτίου στην επιφάνεια του ύστερα από κάποια διαδικασία εμφύτευσης είναι συχνά σε τέτοιο βαθμό που αυτή η περιοχή δεν έχει πλέον κρυσταλλική δομή, αλλά είναι

κάπως άμορφη. Για την αποκατάσταση των ζημιών σε μία πλάκα πυριτίου θα πρέπει να υποβληθεί σε μια διαδικασία ανόπτησης (annealing). Η διαδικασία της ανόπτησης συνήθως περιλαμβάνει την θέρμανση των πλακιδίων σε κάποια υψηλή θερμοκρασία συχνά στην περιοχή των 1000°C για ένα κατάλληλο χρονικό διάστημα, όπως για παράδειγμα τα 30 λεπτά.

### **3.3 Κατανομές Εμφύτευσης Ιόντων**

Όταν τα ιόντα εισέρχονται σ' ένα υλικό, χάνουν ενέργεια λόγω της αλληλεπίδρασης τους με αυτό. Για τον υπολογισμό της κατανομής των προσμίξεων λαμβάνουμε υπ' όψη δύο είδη αλληλεπιδράσεων:

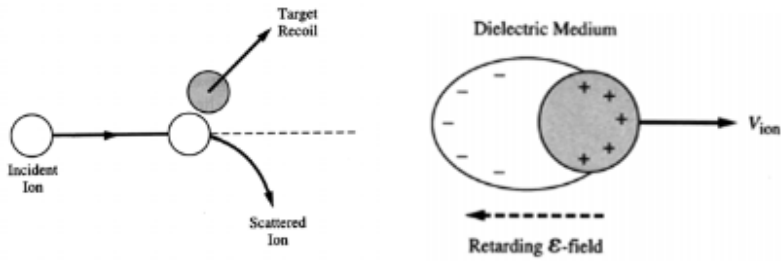
1. Τις κρούσεις μεταξύ ιόντων και των πυρήνων των ατόμων του στόχου -που κυριαρχούν για βαριά ιόντα και μικρές ενέργειες. Σε αυτή την περίπτωση παρατηρούνται ζημίες στο υπόστρωμα.
2. Τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ιόντων και των ηλεκτρικών νεφών των ατόμων του στόχου - που κυριαρχούν για ελαφρά ιόντα και υψηλές ενέργειες. Σε αυτή την περίπτωση από τις διεγέρσεις των ηλεκτρονίων παράγεται θερμότητα.



Εικόνα 11: Αλληλεπιδράσεις ιόντων και ατόμων [18]

Από τις αλληλεπιδράσεις των ιόντων και των πυρήνων του ατόμου επηρεάζεται η κινητική κατάσταση και των δύο. Οι πυρήνες του ατόμου σταματούν λόγω της ενεργείας που μεταφέρεται από τα ιόντα σε αυτούς αυτό το φαινόμενο ονομάζεται πυρηνική διακοπή (nuclear stopping). Η αλληλεπίδραση μεταξύ τους μπορεί να είναι αρκετά ισχυρή για να εκτοπίσει το άτομο Si από τη θέση τους (μόλις 15eV που απαιτούνται για να εκτοπιστεί ένα Si άτομο). Ωστόσο, το εκτοπισμένο άτομο Si μπορεί να έχει αρκετή κινητική ενέργεια για να εκτοπίσει διάφορα άλλα άτομα Si. Τα ιόντα από αρσενικό και φώσφορο χάνουν την ενέργειά τους κυρίως από την πυρηνική διακοπή. Επιπλέον μπορούν να προκληθούν σημαντικές ζημιές στον κρύσταλλο, όταν η δόση εμφυτεύματος υπερβίνει τα  $5E13/cm^2$ .

Η ηλεκτρονική διακοπή (electronic stopping) οφείλεται στην μεταφορά ενέργειας από τα ιόντα προς τα ηλεκτρόνια του κρύσταλλου Si. Κυρίως, τα ιόντα βορίου χάνουν την ενέργειά τους ως επί το πλείστον από την ηλεκτρονική διακοπή. Ηλεκτρονική διακοπή δεν αποτελεί αιτία για τις βλάβες στον κρύσταλλο.



Εικόνα 12: Πυρηνική και ηλεκτρονική διακοπή

Για τον θεωρητικό υπολογισμό της κατανομής των ιόντων μέσα στο υλικό, δεχόμαστε ότι το υπόστρωμα είναι άμορφο. Αν θεωρήσουμε ότι το υπόστρωμα είναι κρυσταλλικό, όπως συμβαίνει στους ημιαγωγούς και η δέσμη των ιόντων σχηματίζει γωνία μερικών μόνο μοιρών με κάποια από τις κύριες κρυσταλλικές διευθύνσεις, εμφανίζεται το φαινόμενο του καναλισμού (channeling) των ιόντων. Κατά το φαινόμενο του καναλισμού, ορισμένα βαριά ιόντα, όπως το αρσένιο, διανύουν έως και 50 φορές μεγαλύτερη απόσταση σε σχέση με το άμορφο υλικό. Για να αποφευχθούν τέτοιες συμπεριφορές και το υπόστρωμα να φαίνεται σαν άμορφο, η εμφύτευση ιόντων πραγματοποιείται συνήθως με μία κλίση των  $7^\circ$  μοιρών σε σχέση με την κάθετη στο υπόστρωμα.

Οι πραγματικές αποστάσεις που διανύθηκαν από τα ιόντα μπορεί να είναι τεθλασμένες. Έτσι σαν απόσταση λαμβάνεται υπόψη η μέση απόσταση που διανύθηκε παράλληλα προς τη διεύθυνση της δέσμης. Αυτή ονομάζεται προβαλλόμενη περιοχή ή εμβέλεια και συμβολίζεται με  $R_p$ .

Η κατανομή ιόντων μέσα στο υλικό συμβολίζεται με  $N(x)$  έχει τη μορφή Γκαουσιανής (Gaussian) κατανομής και δίνεται από τη σχέση:



$$N(x) = N_p e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}}$$

όπου:

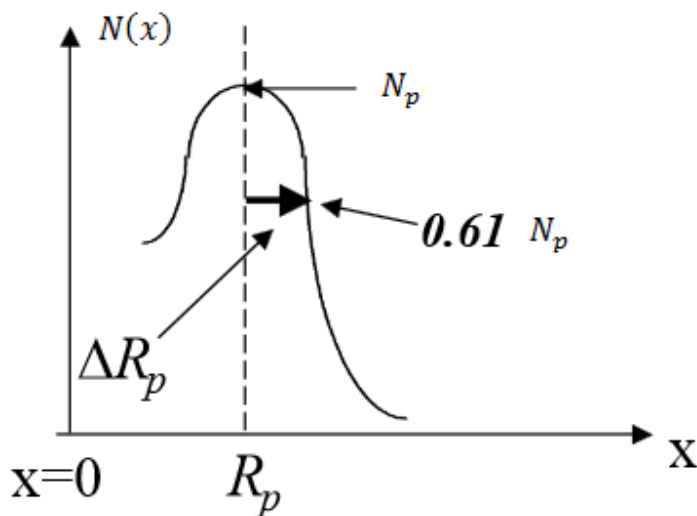
$x$ : η απόσταση μέσα στο αποτύπωμα μετρούμενη από την επιφάνεια του.

$R_p$ : η προβαλλόμενη περιοχή

$\Delta R_p$ : η απόκλιση μέσα στην προβαλλόμενη περιοχή

$N_p$ : η μέγιστη συγκέντρωση ιόντων μέσα στο υλικό.

Ενώ η γραφική παράσταση που δείχνει την κατανομή των εμφυτευμένων προσμίξεων συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του Si.



Γραφική Παράσταση 1: Κατανομή των εμφυτευμένων προσμίξεων συναρτήσει της απόστασης από την επιφάνεια του Si.  
[16]

Η ολική δόση ιόντων  $N_s$ , σε αριθμό ιόντων ανά τετραγωνικό εκατοστό, βρίσκεται από τη σχέση:

$$N_s = \int_{-\infty}^{+\infty} N(x) dx$$

η οποία δίνει:

$$N_s = \Delta R_p * N_p * \sqrt{2\pi} \Rightarrow N_p = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} = \frac{0.4N_s}{\Delta R_p}$$

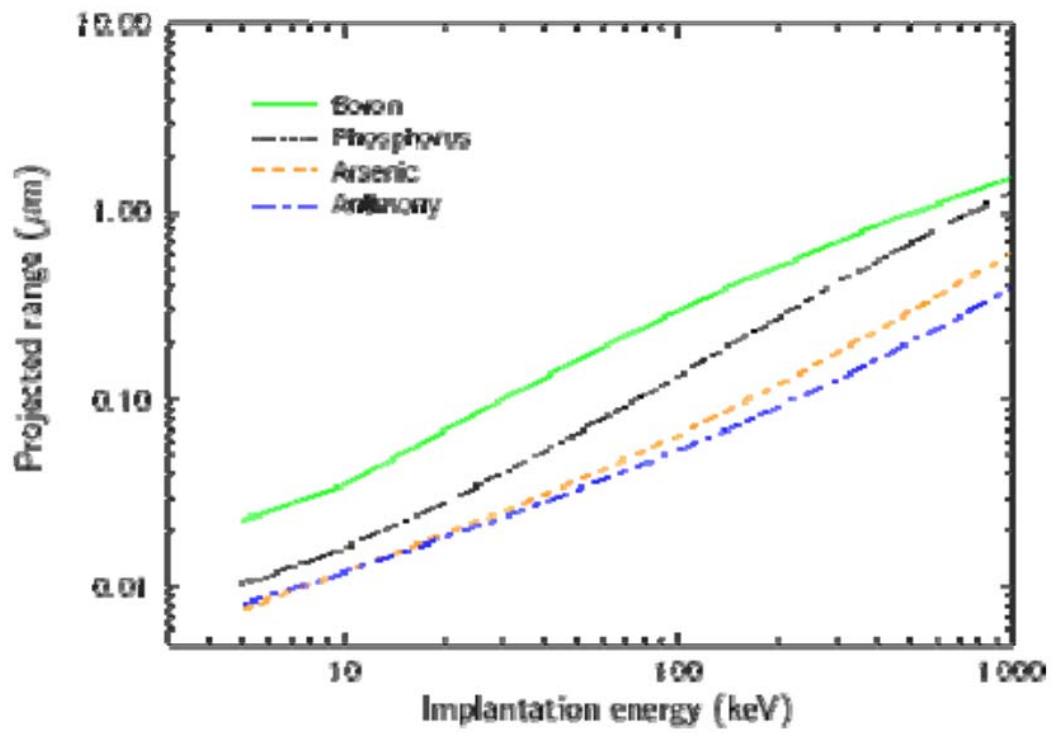
Από τη παραπάνω σχέση φαίνεται ότι η μέγιστη συγκέντρωση ιόντων, εξαρτάται από την ολική δόση,  $N_s$ , και την απόκλιση  $\Delta R_p$ . Η απόκλιση είναι συνάρτηση του είδους του ιόντος και της ενέργειας εμφύτευσης.

Στον ακόλουθο πίνακα, δίνονται διάφορες χαρακτηριστικές τιμές της Γκαουσιανής.

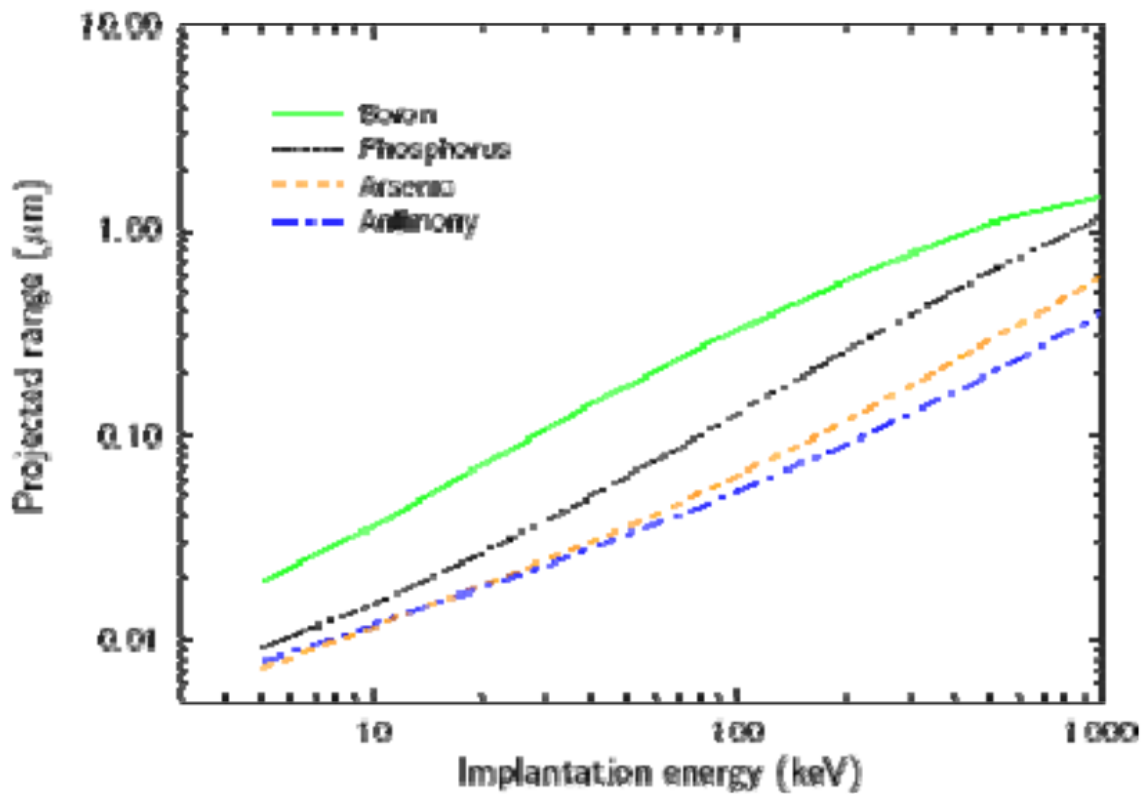
$N(x)/N_p$	1	0,5	0,1	0,01	0,001	0,0001
$x = R_p \pm$	0	1,2 $\Delta R_p$	2 $\Delta R_p$	3 $\Delta R_p$	3,7 $\Delta R_p$	4,3 $\Delta R_p$

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικές τιμές της Γκαουσιανής [4]

Ενώ στα ακόλουθα σχήματα δίνονται η προβαλλόμενη περιοχή και η απόκλιση για διάφορες προσμίξεις των ομάδων III και V στο πυρίτιο αντίστοιχα.



Εικόνα 13: Προβαλλόμενη περιοχή μέσα στο πυρίτιο σαν συναρτήσεις της ενέργειας εμφύτευσης για διάφορες προσμίξεις της ομάδας III [4]



Εικόνα 14: Προβαλλόμενη περιοχή μέσα στο πυρίτιο σαν συναρτήσεις της ενέργειας εμφύτευσης για διάφορες προσμίξεις της ομάδας IV [4]

Η αντίσταση φύλλου που συνδέεται με μια συγκεκριμένη εμφύτευση δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$R_s = (q * N_s * \mu)^{-2}$$

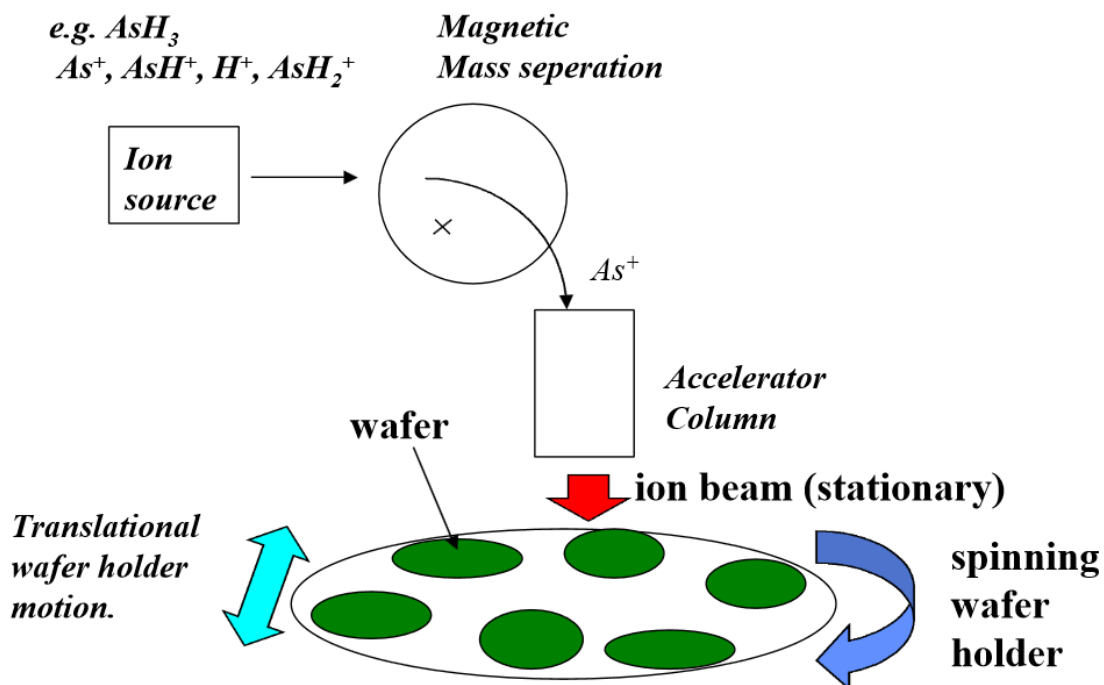
όπου η συγκέντρωση φορέων  $n_o$  (ή  $p_o$ ) δίνεται κατά προσέγγιση από την σχέση:  $n_s = \frac{N_s}{2.54R_p}$ . Η

τιμή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της ευκινησίας των φορέων.

Η πραγματική αντίσταση φύλλου εξαρτάται από τον κύκλο ανάπτυξης. Αν η θερμοκρασία ανάπτυξης είναι επαρκής για να ενεργοποιήσει όλα τα εμφυτευμένα ιόντα, η αντίσταση φύλλου θα πλησιάζει την τιμή που υπολογίζεται από την παραπάνω σχέση.

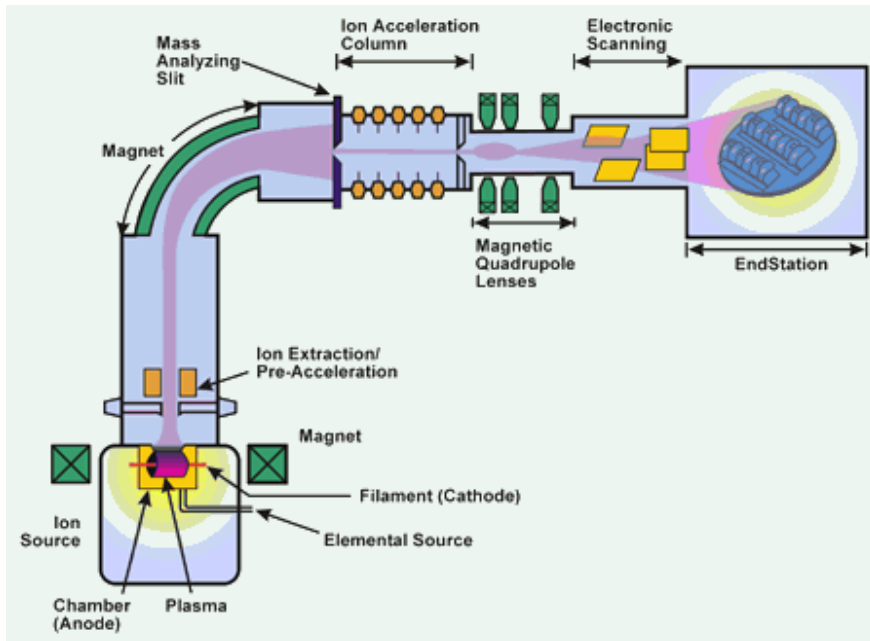
### 3.4 Συσκευές Εμφύτευσης Ιόντων

Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η διαδικασία που ακολουθείται από ένα τυπικό σύστημα εμφύτευσης ιόντων. Τυπικές τιμές ενεργειών ενός ιοντικού εμφυτευτή είναι 1-300 kV, ενώ οι δόσεις των ιόντων μπορεί να κυμαίνονται από  $10^{10}$ - $10^{17}$  ιόντα/cm<sup>2</sup> ενώ η ακρίβεια κάθε δόσης είναι μικρότερη του 0,5%. Με τον όρο δόση είναι ο αριθμός των επιταχυνόμενων ιόντων ανά cm<sup>2</sup> επιφάνειας του ημιαγωγού.



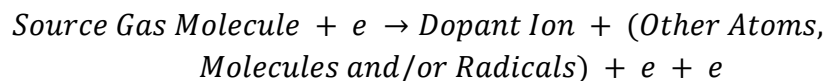
Εικόνα 15: Σύστημα Εμφύτευσης Ιόντων [16]

Ένα τυπικό σύστημα ιόντων εμφύτευση φαίνεται στο παρακάτω σχήμα ενώ παρακάτω θα περιγράψουμε την αρχή λειτουργίας του συστήματος.



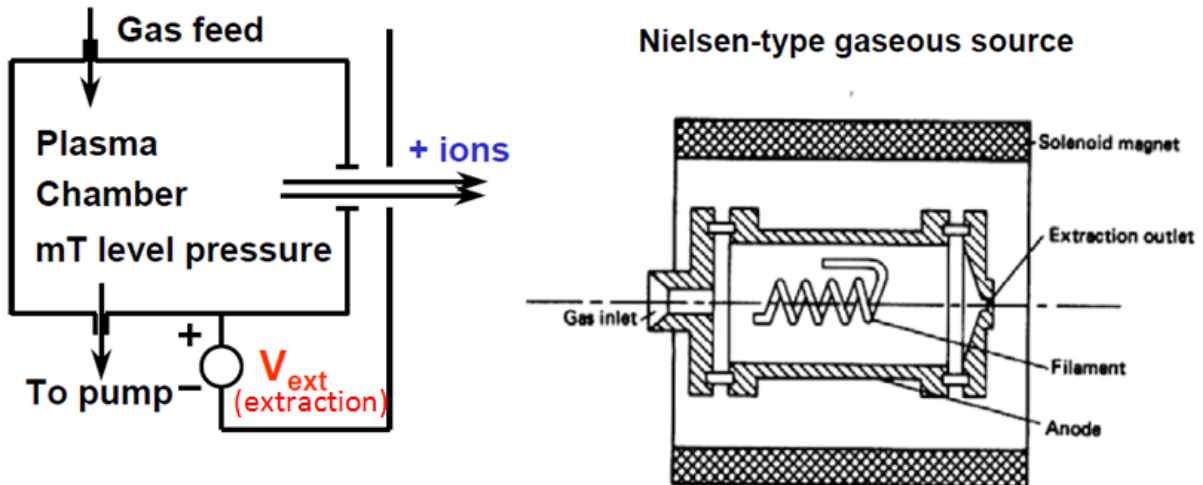
Εικόνα 16: Συσκευή Εμφύτευσης Ιόντων

Τα ιόντα δημιουργούνται στην πηγή ιόντων (Ion Source) με ηλεκτρική εκκένωση (εκφόρτιση) η οποία συντηρείται από τους ατμούς του υλικού που θέλουμε να ιονιστεί. Τυπικά υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το  $\text{BF}_3$  για εμφύτευση βορίου, η φωσφίνη ( $\text{PH}_3$ ) για την φωσφόρο και η αρσίνη ( $\text{ASH}_3$ ) για το αρσενικό ( $\text{ASH}_5$ ). Η σχέση στη συνέχεια περιγράφει την διαδικασία που πραγματοποιείται στην πηγή ιόντων:



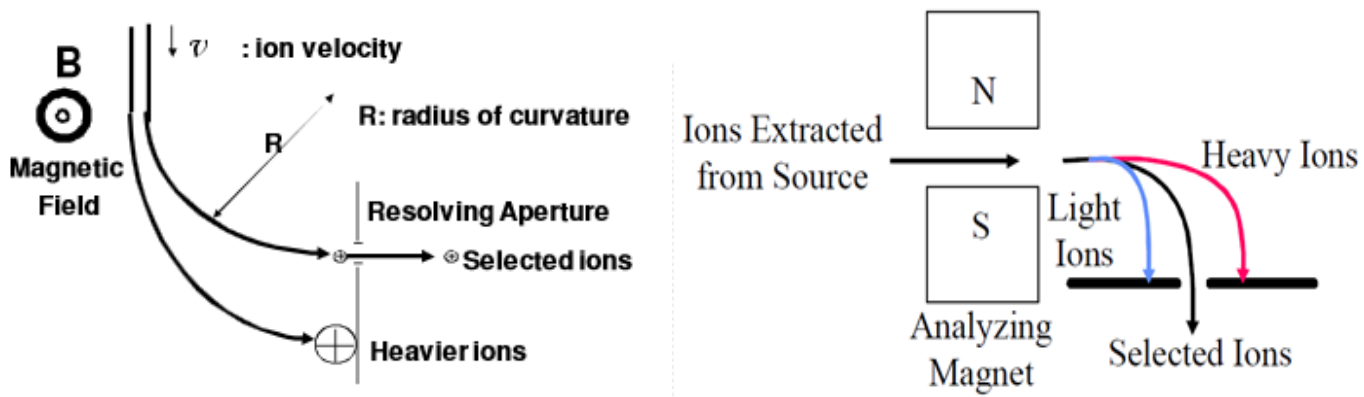
Στην ακόλουθη εικόνα βλέπουμε αναλυτικά μια πηγή ιόντων. Η αντίσταση πυρακτώσεως (filament) εκπέμπει ηλεκτρόνια, τα οποία επιταχύνονται ώστε να αποκτήσουν αρκετή ενέργεια.

Τα θετικά ιόντα έλκονται από την πλευρά εξόδου του θαλάμου πηγής (plasma chamber), ο οποίος ωθείται από ένα μεγάλο αρνητικό δυναμικό σε σχέση με την αντίσταση πυρακτώσεως. Στη συνέχεια, ένα ηλεκτρόδιο εξόδου οδηγεί τα ιόντα έξω από την πηγή ιόντων και κατευθύνονται προς το μαγνητικό αναλυτή.



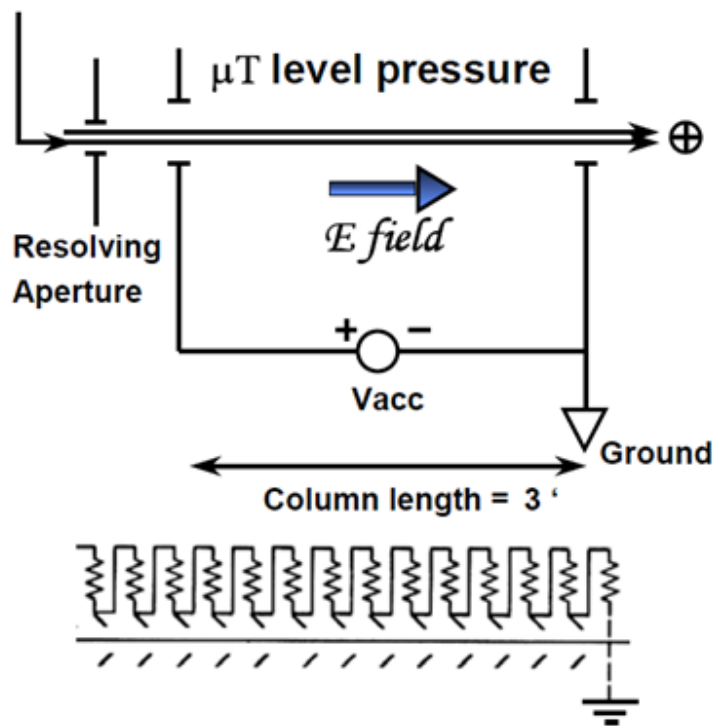
Εικόνα 17: Πηγή ιόντων [17]

Επειδή μαζί με τα επιθυμητά ιόντα υπάρχουν και πολλές άλλες ουσίες, όπως για παράδειγμα, μαζί με το βόριο  $B^+$  υπάρχουν  $O^+$ ,  $OH^+$ ,  $N^+$ ,  $N_2^+$  κ.α.), χρησιμοποιείται ένας μαγνήτης (magnet) διαχωρισμού μάζας για την επιλογή του επιθυμητού ιόντος. Η επιλογή των ιόντων γίνεται με την προσαρμογή του μαγνητικού πεδίου, με αποτέλεσμα μόνο κάποια επιλεγμένα ιόντα να εισέρχονται στον επιταχυντή. Στις δύο επόμενες εικόνες φαίνεται αναλυτικά ο διαχωρισμός των ιόντων από τον μαγνήτη διαχωρισμού μάζας.



Εικόνα 18: Μαγνήτης διαχωρισμού μάζης [17]

Στην συνέχεια τα ιόντα επιτυγχάνονται μέχρι την επιθυμητή ενέργεια (Ion Acceleration Column). Ένας τυπικός επιταχυντής φαίνεται την διπλανή εικόνα. Η τάση επιτάχυνσης κυμαίνεται από 20 kV μέχρι 250 kV. Σε ορισμένες περιπτώσεις εμφύτευσης ιόντων, ο μαγνήτης



Εικόνα 19: Επιταχυντής [17]

διαχωρισμού μάζης χρησιμοποιείται αφού τα ιόντα επιταχύνονται σε υψηλής ενέργειας. Κατόπιν η δέσμη ιόντων εστιάζεται σε διάμετρο τυπικά  $\frac{1}{4}$  της ίντσας (Magnetic Quadrupole Lenses). Για να επιτευχθεί ομοιόμορφο ντοπάρισμα των πλακετών που έχουν διάμετρο αρκετών ιντσών, σαρώνουμε την επιφάνεια των υποστρωμάτων αλλά με ηλεκτροστατική σάρωση (Electronic



Scanning). Χρησιμοποιείται επίσης μηχανική σάρωση με κίνηση των υποστρωμάτων αλλά με λιγότερο ομοιόμορφα αποτελέσματα. Λίγο πριν από το στόχο η δέσμη ιόντων αποκλίνει ηλεκτροστατικά κατά  $6^\circ$  ώστε να απομακρυνθούν τα τυχόν ουδέτερα άτομα που μπορεί να υπάρχουν στη δέσμη.

Η σάρωση μπορεί να επαναληφθεί αρκετές φορές με αποτέλεσμα να παρέχεται ένα εξαιρετικά ομοιόμορφη εμφύτευση ιόντων στην επιφάνεια του πλακιδίου. Σε κάποιες περιπτώσεις, περιλαμβάνονται αυτόματες εγκαταστάσεις χειρισμού πλακιδίων για να επιταχυνθεί η διαδικασία της εμφύτευσης σε πολλά πλακίδια ανά ώρα.

Η εμφύτευση ιόντων μπορεί να γίνει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος ή με θερμαινόμενα υποστρώματα. Κάποια θέρμανση των υποστρωμάτων συμβαίνει κατά την εμφύτευση σε θερμοκρασία δωματίου που εξαρτάται από την ενέργεια που αποτίθεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

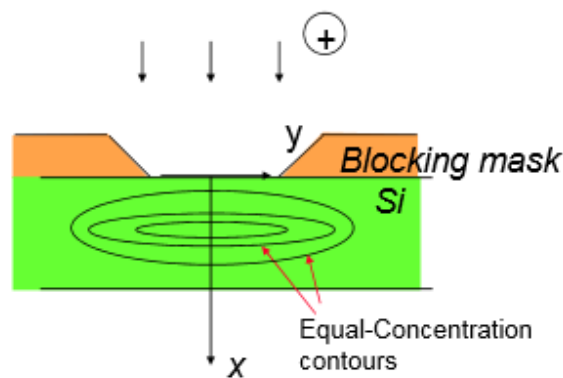
Η ιοντική δέσμη ελέγχεται μέσω συστήματος οριζόντιας και κατακόρυφης απόκλισης και τέλος προσπίπτει στον κρύσταλλο ημιαγωγού που είναι τοποθετημένος στο κατάλληλο υπόστρωμα.

### **3.5 Μάσκες Εμφύτευσης Ιόντων**

Μια μεγάλη ποικιλία από υλικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή μασκών για την επιλεκτική εμφύτευση ιόντων διότι τα ιόντα απορροφούνται κατά ένα ποσοστό από όλα τα στερεά. Για να είναι αποτελεσματική μια μάσκα πρέπει το πάχος του υλικού της να είναι αρκετό ώστε να απορροφά όλη τη δόση ιόντων που προσπίπτουν στην επιφάνεια της. Έτσι το ελάχιστο πάχος  $t_m$  μιας μάσκας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

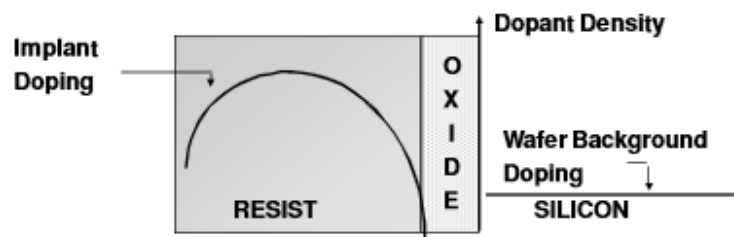
$$t_m = R_p + 4.3 \Delta R_p$$

όπου τα  $R_p$  και  $\Delta R_p$  αναφέρονται στο υλικό της μάσκας. Υπάρχουν εκτεταμένοι πίνακες που δίνουν την “ικανότητα σταματήματος (hold)” (το κράτημα) του κάθε υλικού, για κάθε ιόν, με δεδομένη ενέργεια. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται ένα παράδειγμα χρήσης μάσκας κατά την εμφύτευση ιόντων.



Εικόνα 20: Εμφύτευση ιόντων [20]

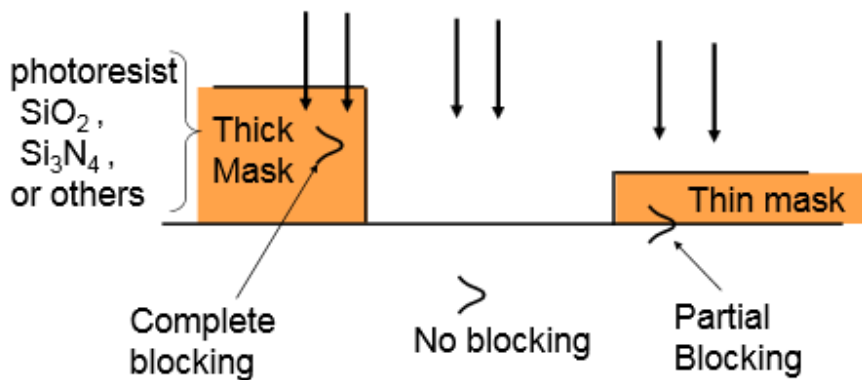
Διάφορα υλικά λεπτού υμενίου μπορούν να χρησιμοποιηθεί ως μάσκα κατά την εμφύτευση ιόντων, όπως οξείδιο, νιτρίδιο, πολυπυριτίου, κλπ. Ωστόσο, ο πιο



Εικόνα 21: Μάσκες και εμφύτευση ιόντων [18]

ευρέως χρησιμοποιούμενος συνδυασμός είναι όσα έχουν αντίσταση μεγαλύτερη του οξειδίου. Πάχος από 1 έως 5,1  $\mu\text{m}$  είναι το πιο συνηθισμένο που συναντώνται σε επεξεργασία πυρίτιο. Το οξείδιο του πυριτίου επιβραδύνει τα ιόντα με τον ίδιο ρυθμό με το πυρίτιο. Αντίθετα το νιτρίδιο του πυριτίου αποτελεί ένα πολύ ισχυρότερο εμπόδιο στην ιόντα σε σχέση με πυρίτιο.

Παχιά (thick) ή λεπτά (thin) υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προστατεύσουν περιοχές του πυριτίου από την εμφύτευση. Η επιλογή του υλικού καθορίζει την δύναμη διακοπής (Stopping Power) της μάσκας. Τα πιο παχιά υλικά είναι πιο αποτελεσματικά. της μάσκας μπορεί να επηρεάσει το βάθος της εμφύτευση όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 22: Πάχος μάσκας και βάθος εμφύτευσης [19]

Ενδεικτικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εμφυτεύσεις ιόντων χαμηλής ενέργειας (<100 keV) είναι τα SiO<sub>2</sub>, νιτρίδιο του πυριτίου και φωτοαντιστατικά (photoresists). Αν πάρουμε το Si σαν υλικό αναφοράς, οι σχετικές ικανότητες σταματήματος των υλικών αυτών για ιόντα βορίου ή φωσφόρου στα 40 keV είναι 1,26, 1,62 και 0,75 αντίστοιχα. Προφανώς το νιτρίδιο του πυριτίου είναι καλύτερο υλικό για μάσκα, αλλά το διοξείδιο του πυριτίου και τα φωτοαντιστατικά είναι υλικά που χρησιμοποιούνται σε πολλές από τις άλλες διαδικασίες κατασκευής των διατάξεων και γι' αυτό είναι πολύ διαδεδομένα σαν υλικό μάσκας εμφύτευσης.

Για εμφυτεύσεις υψηλής ενέργειας (ή εμφυτεύσεις μεγάλου βάθους) χρησιμοποιούνται μάσκες από βαρέα μέταλλα, όπως ο χρυσός, λευκόχρυσος, το ταντάλιο ή το βολφράμιο. Η σχετική ισχύς

σταματήματος αυτών των υλικών είναι μεταξύ 2 και 4 για εμφυτεύσεις βορίου και φωσφόρου στο 1 MeV.

Όταν επιθυμούμε να επιτύχουμε το μέγιστο εμφύτευσης κοντά στην επιφάνεια του Si, πραγματοποιούμε την εμφύτευση μέσα από ένα στρώμα SiO<sub>2</sub> που στη συνέχεια θα απομακρυνθεί.

### **3.6 Ανόπτηση μετά την εμφύτευση**

Αφού τα ιόντα έχουν εμφυτευθεί, έχουν καταταθεί κυρίως σε ενδιάμεσες θέσεις στη δομή του κρυσταλλικού πυριτίου, και η περιοχή της επιφάνειας στην οποία η εμφύτευση έλαβε χώρα θα έχει καταστραφεί σε μεγάλο βαθμό από την επίδραση των ιόντων υψηλής ενέργειας. Η σύγχυση των ατόμων πυριτίου στην επιφάνεια είναι συχνά σε τέτοιο βαθμό που αυτή η περιοχή δεν έχει πλέον κρυσταλλική δομή, αλλά είναι κάπως άμορφη. Για την επαναφορά της επιφάνειας αυτής και την κρυσταλλική δομή, τα εμφυτευμένα ιόντα πρέπει να τοποθετηθούν σε υποκατάστατες περιοχές στην κρυσταλλική δομή. Για την αποκατάσταση των ζημιών σε μία πλάκα πυριτίου θα πρέπει να υποβληθεί σε μια διαδικασία ανόπτησης (annealing). Η διαδικασία της ανόπτησης συνήθως περιλαμβάνει την θέρμανση των πλακιδίων σε κάποια υψηλή θερμοκρασία συχνά στην περιοχή των 1000°C για ένα κατάλληλο χρονικό διάστημα, όπως για παράδειγμα τα 30 λεπτά. Ένας κύκλος ανόπτησης είναι αρκετός ακόμη και αν έχουν γίνει πολλαπλές εμφυτεύσεις ιόντων και σαν τέτοιος μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια διαδικασία θερμική οξειδωσης ή διάχυσης που ακολουθεί την εμφύτευση. Κατά την ανόπτηση γίνεται και κάποια ανακατανομή των ιόντων λόγω της διάχυσης.

Η επιτυχία της ανόπτησης συνήθως μετριέται σε όρους του κλάσματος των προσμίξεων που είναι ηλεκτρικά ενεργή, όπως διαπιστώθηκε πειραματικά χρησιμοποιώντας την τεχνική Hall Effect. Στα VLSI, η ανόπτηση δεν χρησιμοποιείται απλά για την αποκατάσταση των ζημιών και την ενεργοποίηση του εμφυτεύματος, αλλά για να ελαχιστοποιήσει την διάχυση, έτσι ώστε τα ρηγά εμφυτεύματα παραμένουν ρηγά. Αυτό έχει αυξήσει την ερευνητική δραστηριότητα στον τομέα της ταχείας θερμικής ανόπτησης (Rapid Thermal Annealing - RTA), όπου οι χρόνοι συγκολλήσεως είναι της τάξεως του δευτερολέπτου. Η τεχνική RTA χρησιμοποιεί λαμπτήρες βολφραμίου-αλογόνου ή ταινίες αντίστασης γραφίτη για να θερμάνει τις πλάκες πυριτίου από τη μία ή τις αμφότερες πλευρές, όπως έναντι των συμβατικών μεθόδων ανόπτησης κλιβάνου όπου οι χρόνοι είναι της τάξης των λεπτών.

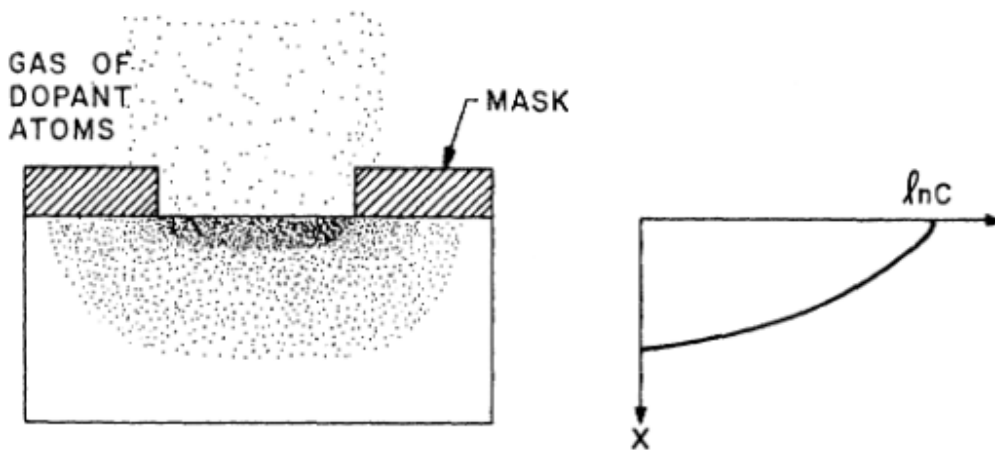
## Κεφάλαιο 4: Διάχυση

### 4.1 Εισαγωγή

Η διάχυση είναι μία πολύ δημοφιλής τεχνική για τη δημιουργία εντοπισμένων επαφών στους ημιαγωγούς και χρησιμοποιείται για τον σχηματισμό επαφών από p σε n και αντίστροφα σε υψηλή θερμοκρασία κλιβάνου. Σαν μάσκα για τη διάχυση των περισσοτέρων προσμίξεων αντικατάστασης στο πυρίτιο χρησιμοποιείται το διοξείδιο του πυριτίου. Ανοίγοντας με μία διαδικασία φωτοχάραξης παράθυρα στη στιβάδα του οξειδίου του πυριτίου, που καλύπτει το θερμικά οξειδωμένο πυρίτιο, είναι δυνατό να εισάγουμε προσμίξεις σε επιλεγμένες περιοχές του υποστρώματος και να δημιουργούμε επαφές p-n, που θα αποτελέσουν τμήμα των διατάξεων ημιαγωγού. Τα άτομα πρόσμιξης που εισάγονται στην επιφάνεια ενός δίσκου πυριτίου διαχέονται στο πλέγμα λόγω της τάσης τους να μετακινούνται από περιοχές με υψηλή σε περιοχές με χαμηλή συγκέντρωση. Η διάχυση χρησιμοποιείται επίσης για την ανακατανομή των προσμίξεων που έχουν εισαχθεί στον ημιαγωγό με οποιοδήποτε τρόπο. Διάχυση των ατόμων πρόσμιξης σε κρύσταλλο πυριτίου πραγματοποιείται μόνο σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες, τυπικά από 900 έως 1100°C.

Αν και οι θερμοκρασίες που αναφέραμε παραπάνω είναι πολύ υψηλές, βρίσκονται αρκετά κάτω από το σημείο τήξης του πυριτίου, η οποία είναι 1.420°C. Ο ρυθμός με τον οποίο οι διάφορες προσμίξεις διαχέονται σε πυρίτιο θα είναι της τάξης του 1μm ανά ώρα στο εύρος θερμοκρασίας προαναφέρθηκε, ενώ το βάθος διείσδυσης είναι της τάξης από 0,3 έως 30μm. Σε θερμοκρασία δωματίου, η διαδικασία της διάχυσης είναι εξαιρετικά αργή, γιατί οι προσμίξεις μπορούν να παγώσουν στην θέση που τοποθετήθηκαν.

Στη διαδικασία της διάχυσης, τα άτομα διαχέονται σε αέρια φάση με τη χρήση του πηγές με οξείδιο. Η συγκέντρωση της διαχεόμενης ουσίας μειώνεται μονοτονικά στην επιφάνεια, και το βάθος κατανομής της πρόσμιξης καθορίζεται κυρίως από τη θερμοκρασία και το χρόνο διάχυσης.



Εικόνα 23: Διάχυση [22]

## 4.2 Τύποι διάχυσης

Η διάχυση σε έναν ημιαγωγό μπορεί να θεωρηθεί ως μια κινήσεων των ατόμων που έχουν διαχυθεί στο κρυσταλλικό πλέγμα. Η διάχυση των προσμίξεων σε στερεή μορφή ακολουθεί είναι παρόμοια με την διαδικασία όπου περίσσιοι φορείς δημιουργούν ανομοιόμορφα σε έναν ημιαγωγό που προκαλούν κλίση φορέα. Σε κάθε περίπτωση, η διάχυση είναι αποτέλεσμα της τυχαίας κίνησης, και τα σωματίδια διαχέονται προς την κατεύθυνση όπου υπάρχει μειωμένη συγκέντρωση. Η τυχαία κίνηση των ατόμων πρόσμιξης σε ένα στερεό είναι αρκετά περιορισμένη εκτός εάν η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή. Έτσι η διάχυση των προσμίξεων στο πυρίτιο επιτυγχάνεται σε υψηλή θερμοκρασία όπως αναφέρεται παραπάνω.

Όταν το άτομο της διαχεόμενης ουσίας βρίσκεται σε ένα κρύσταλλο πυριτίου, παγιδεύεται σε ένα περιοδικό δυναμικό που ορίζεται από το πλέγμα όπως φαίνεται στην ακόλουθη εικόνα. Η πιθανότητα άλματος ενός ατόμου από τη μία θέση στην επόμενη αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 24: Κίνηση ατόμου στο κρύσταλλο πυριτίου [23]

Υπάρχουν κυρίως δύο τύποι φυσικών μηχανισμών με τους οποίους οι προσμίξεις μπορούν να διαχυθούν στο πλέγμα. Αυτοί είναι:

### 1. Διάχυση Αντικατάστασης (Substitutional Diffusion)

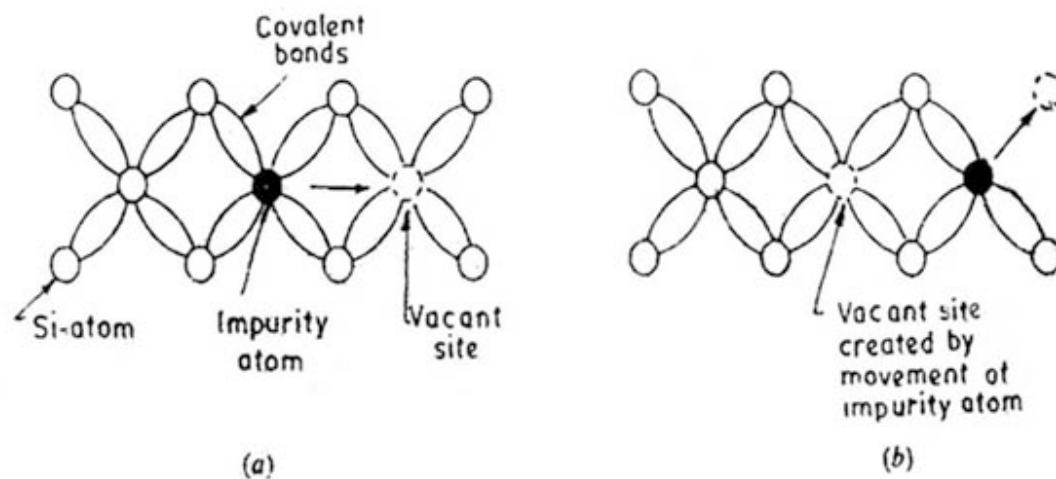
Σε υψηλή θερμοκρασία πολλά άτομα στον ημιαγωγό κινούνται εκτός του πλέγματος, αφήνοντας κενές θέσεις στο εσωτερικό του όπου τα άτομα πρόσμιξης μπορεί να κινηθούν. Έτσι, οι προσμίξεις, μπορούν να διαχυθούν στις κενές θέσεις, καταλαμβάνουν τη θέση τους στον κρύσταλλο και μετά ψύχεται. Έτσι, κατά την διάχυση, πραγματοποιείται η αντικατάσταση των αρχικών ατόμων κρυστάλλου με τα άτομα προσμίξεων.

Για τις προσμίξεις αντικατάστασης είναι απαραίτητο να εμφανιστεί ένα πλεγματικό κενό στην κατάλληλη διεύθυνση και γειτονικό προς μία θέση που έχει καταληφθεί από άτομο πρόσμιξης. Η ενέργεια δημιουργίας πλεγματικού κενού (φαινόμενο Schottky) είναι σχετικά μεγάλη 2-3eV,



με αποτέλεσμα να έχουμε πολύ μικρότερους συντελεστές διάχυσης για τις προσμίξεις αντικατάστασης σε σχέση με τις ενδοπλεγματικές προσμίξεις σε δεδομένη θερμοκρασία.

Με άλλα λόγια, τα άτομα πρόσμιξης διαχέονται μεταβαίνοντας από μια θέση στο πλέγμα σε κάποια γειτονική με υποκατάσταση ενός ατόμου πυριτίου που έχει κενωθεί, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι διακεκομμένοι κύκλοι κατέχουν θέσεις στο πλέγμα ισορροπίας ενώ οι μαύρες τελείες αντιπροσωπεύουν τα διαχεόμενα άτομα.



Εικόνα 25: Διάχυση Υποκατάστασης [21]

Ο μηχανισμός διάχυσης αντικατάστασης εφαρμόζεται κατά τις πιο κοινές διαχύσεις, όπως βόριο, φωσφόρο, και το αρσενικό. Αυτά τα άτομα προσμίξεων είναι πάρα πολύ μεγάλα για να χωρέσουν σε διάκενα ή κενά, οπότε ο μόνος τρόπος που μπορούν να εισέλθουν στο κρύσταλλο πυριτίου είναι με την αντικατάσταση ατόμων Si.

Για να είναι δυνατόν ένα τέτοιο άτομο πρόσμιξης να κινηθεί σε ένα γειτονικό κενό σημείο, θα πρέπει να ξεπεράσει εμπόδιο της ενέργειας που οφείλεται στη διάσπαση των ομοιοπολικών δεσμών του. Η πιθανότητα να έχει αρκετή θερμική ενέργεια του για να πετύχει το παραπάνω

είναι ανάλογο με εκθετική συνάρτηση της θερμοκρασίας. Επίσης, η δυνατότητά τους να κινούνται εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των κενών γειτονικών θέσεων. Η κένωση μίας παρακείμενης θέσης σε ένα άτομο Si οφείλεται στην θερμική διακύμανση του πλέγματος, η πιθανότητα ενός τέτοιου γεγονότος είναι και πάλι εκθέτης της θερμοκρασίας.

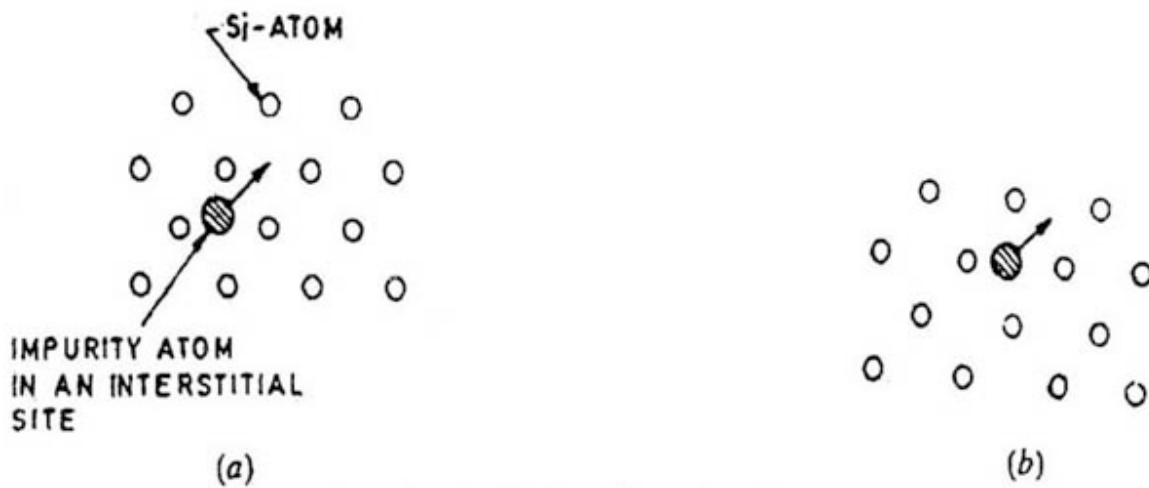
Το ποσοστό των αλάτων των ατόμων πρόσμιξης σε συνήθεις θερμοκρασίες είναι πολύ αργή, για παράδειγμα περίπου 1 άλμα ανά 1.050 χρόνια σε θερμοκρασία δωματίου! Ωστόσο, ο ρυθμός διάχυσης μπορεί να επιταχυνθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε θερμοκρασία 1000°C, η διάχυση αντικατάστασης των προσμίξεων πραγματοποιείται σε λογικές χρονικές κλίμακες.

## **2. Διάχυση μέσω διαπλεγματικών θέσεων (Interstitial Diffusion)**

Σε αυτόν τον τύπο διάχυσης, το άτομο πρόσμιξης δεν αντικαθιστά άτομα πυριτίου, αλλά, αντίθετα, κινείται μέσα στα διάμεσα στο πλέγμα. Για τις διαπλεγματικές προσμίξεις, η πιθανότητα να υπάρχει μία κενή θέση γειτονική προς μία κατειλημμένη θέση κατά τη διεύθυνση της διάχυσης είναι μεγάλη και η ενέργεια που απαιτείται για μια τέτοια μετάβαση (transition) είναι μικρή, περίπου 1eV, με αποτέλεσμα να εμφανίζουν μεγάλους συντελεστές διάχυσης. Οι κύριοι τύποι προσμίξεων που διαχέονται στον εν λόγω μηχανισμός είναι ο χρυσός, ο χαλκός και το νικέλιο. Ιδιαίτερα, ο χρυσός, εισάγεται στο πυρίτιο για να μειώσει το χρόνο ζωής του φορέα και ως εκ τούτου είναι χρήσιμο για την αύξηση της ταχύτητας στα ψηφιακά ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Λόγω του μεγάλου μεγέθους των ατόμων του μετάλλου, συνήθως δεν υποκαθιστάτε το πλέγμα πυριτίου. Για να κατανοήσουμε το μηχανισμό διαπλεγματικών προσμίξεων, ας εξετάσουμε μια μονάδα του πλέγματος διαμαντιών του πυριτίου που έχει πέντε ενδιάμεσα κενά. Κάθε ένα από

τα κενά είναι αρκετά μεγάλο για να περιέχει ένα άτομο προσμίξεων. Ένα άτομο πρόσμιξης που βρίσκεται σε ένα τέτοιο κενό μπορεί να κινηθεί σε ένα γειτονικό κενό, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 26: Διάμεση διάχυση [21]

Και σε αυτόν τον τρόπο πρέπει να ξεπεράσουμε ένα δυνητικό εμπόδιο που οφείλεται στο πλέγμα. Οι περισσότερες γειτονικές ενδιάμεσες περιοχές είναι κενές και η συχνότητα κίνησης μειώνεται. Και πάλι, ο ρυθμός διάχυσης είναι πολύ αργός σε θερμοκρασία δωματίου αλλά είναι αποδεκτός σε κανονική θερμοκρασία λειτουργίας στους  $1.000^{\circ}\text{C}$ . Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ο ρυθμός διάχυσης εξαιτίας της διαπλεγματικής κίνησης είναι πολύ μεγαλύτερος από ότι στις προσμίξεις αντικατάστασης. Αυτό είναι δυνατό επειδή οι ενδιάμεσες προσμίξεις μπορούν να χωρέσουν στα κενά μεταξύ των ατόμων πυριτίου. Για παράδειγμα, το λίθιο δρα ως δότης προσμίξεων στο πυρίτιο, αλλά δεν χρησιμοποιείται συνήθως επειδή τα άτομα εξακολουθούν να κινούνται ακόμα και σε θερμοκρασίες δωματίου, και ως εκ τούτου δεν παγώνουν στην θέση τους. Αυτό ισχύει από στις περισσότερες άλλες προσμίξεις που χρησιμοποιούνται στην

διαπλεγματοειδή διάχυση, έτσι η μακροπρόθεσμη σταθερότητα της συσκευής δεν μπορεί να διασφαλιστεί με αυτόν τον τύπο των προσμίξεων.

### 4.3 Η θεωρία της διάχυσης.

Η διάχυση έχει στατιστική φύση και σχετίζεται με την τυχαία κίνηση των ενεργητικών (energetic) σωματίων. Έτσι, αν υπάρχει μία βαθμίδα (gradient) της συγκέντρωσης των σωματίων αυτών, εμφανίζεται μια καθαρή ροή σωματίων από περιοχές μεγάλης συγκέντρωσης προς περιοχές μικρότερης συγκέντρωσης.

Ο ρυθμός διάχυσης των προσμίξεων σε ημιαγωγόν πλέγμα εξαρτάται από το μηχανισμό διάχυσης, τη θερμοκρασία, τις φυσικές ιδιότητες της πρόσμιξης, τις ιδιότητες του περιβάλλοντος πλέγματος, τη βαθμίδα συγκέντρωσης των προσμίξεων και τη γεωμετρία της μητρικής του ημιαγωγού.

Η συμπεριφορά των σωματιδίων διάχυσης διέπεται από τον νόμο του Fick, η οποία όταν λυθεί για κατάλληλες οριακές συνθήκες, οδηγεί σε διάφορες κατανομές της ρυπαίνουσα ουσίας, τα λεγόμενα προφίλ (profil) τα οποία προσεγγίζονται κατά τη διάρκεια της πραγματικής διαδικασίας διάχυσης.

Το 1855, ο Fick μελέτησε τη σχέση μεταξύ της μεταφοράς ενός υλικού σε ένα διάλυμα και της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή. Ο Fick υπέθεσε ότι σε ένα αραιό υγρό ή αέριο διάλυμα, σε συνθήκες απουσίας μεταφοράς, η μεταφορά των ατόμων διαλυμένης ουσίας ανά μονάδα επιφάνειας σε μια μονοδιάστατη ροή μπορεί να περιγραφεί από την ακόλουθη εξίσωση.

$$F = -D \frac{\partial N(x, t)}{\partial x} = -\frac{\partial F(x, t)}{\partial x}$$

όπου  $F$  είναι ο ρυθμός μεταφοράς των ατόμων της διαλυμένης ουσίας ανά μονάδα επιφάνειας της πυκνότητας ροής διάχυσης (άτομα /  $\text{cm}^2\text{-sec}$ ),  $N$  είναι η συγκέντρωση των ατόμων διαλυμένης ουσίας (αριθμός ατόμων ανά μονάδα όγκου /  $\text{cm}^3$ ), και  $x$  είναι η κατεύθυνση της ροής διαλυμένης ουσίας. Στην παραπάνω σχέση, υποτίθεται ότι το  $N$  είναι μια συνάρτηση του  $x$  και  $t$  μόνο, όπου  $t$  είναι ο χρόνος διάχυσης, και το  $D$  είναι η σταθερά διάχυσης (που αναφέρεται επίσης ως συντελεστής διάχυσης ή διαχύσεως) και έχει μονάδες  $\text{cm}^2 / \text{sec}$ .

Η παραπάνω εξίσωση ονομάζεται Πρώτος Νόμος του Fick σχετικά με τη διάχυση και δηλώνει ότι η τοπική ταχύτητα μεταφοράς (τοπικός ρυθμός διάχυσης) της διαλυμένης ουσίας ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου είναι ανάλογη με τη βαθμίδα συγκέντρωσης της διαλυμένης ουσίας, και ορίζει τη σταθερά της αναλογικότητας, όπως η σταθερά διαχύσεως της διαλυμένης ουσίας. Το αρνητικό πρόσημο είναι εξαιτίας της αντίθετης κατεύθυνσης της ροής της ουσίας και της συγκέντρωσης. Δηλαδή, η ύλη ρέει προς την κατεύθυνση όπου υπάρχει μειωμένη συγκέντρωσης διαλυτής ουσίας.

Ο πρώτος νόμος του Fick εφαρμόζεται σε προσμίξεις που χρησιμοποιούνται στο πυρίτιο. Σε γενικές γραμμές οι προσμίξεις δεν κινούνται σε ηλεκτρικό πεδίο, έτσι ο συνήθης όρος drift mobility (που εφαρμόζεται σε ηλεκτρόνια και οπές υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου) και σχετίζεται με την παραπάνω εξίσωση μπορεί να παραλειφθεί. Σε αυτή την εξίσωση το  $N$  είναι γενικά συνάρτηση του  $x$ ,  $y$ ,  $z$  και  $t$ .

Η μεταβολή της συγκέντρωσης της διαλυτής ουσίας με το χρόνο θα πρέπει να είναι η ίδια με την τοπική ελάττωση της ροής διάχυσης, με την απουσία μιας πηγής ή αποχέτευσης. Αυτό προκύπτει από το νόμο της διατήρησης της ύλης. Ως εκ τούτου, μπορούμε να γράψουμε την ακόλουθη εξίσωση:

$$\frac{\partial N(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial F(x, t)}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial N(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left[ D \frac{\partial N(x, t)}{\partial x} \right]$$

Όταν η συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας είναι χαμηλή, η σταθερά διάχυσης σε μια δεδομένη θερμοκρασία μπορεί να θεωρηθεί ως σταθερή. Έτσι προκύπτει ο δεύτερος νόμος του Fick που δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{\partial N(x, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 N(x, t)}{\partial x^2}$$

Δυστυχώς, ο συντελεστής διάχυσης για τον φωσφόρο, το βόριο και το αρσενικό, τις τρεις προσμίξεις που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στο πυρίτιο, εξαρτάται από τη συγκέντρωση του υλικού που διαχέεται, από την κατανομή των προσμίξεων του υποστρώματος καθώς και από τη θερμοκρασία.

Για ιδανικά υλικά διάχυσης (με  $D$  ανεξάρτητο από το  $x$ ), η παραπάνω εξίσωση έχει λυθεί για έναν αριθμό οριακών συνθηκών. Δύο από αυτές τις οριακές συνθήκες εφαρμόζονται στη διάχυση προσμίξεων στους ημιαγωγούς. Η πρώτη από αυτές αφορά την περίπτωση κατά την οποία το υπόστρωμα του ημιαγωγού περιβάλλεται από μια συνεχώς αναπληρούμενη σταθερά συγκέντρωση ατόμων πρόσμιξης και ονομάζεται διάχυση σταθεράς πηγής (constant source diffusion). Η δεύτερη οριακή συνθήκη αφορά την περίπτωση, κατά την οποία σαν πηγή διάχυσης χρησιμοποιείται ένα λεπτό στρώμα ατόμων πρόσμιξης που έχει αποτεθεί πάνω στο υπόστρωμα του πυριτίου και ονομάζεται διάχυση περιορισμένης πηγής (limited source diffusion) που ακολουθεί την Gaussian κατανομή.

### Διάχυση Σταθεράς Πηγής

Σε αυτή την περίπτωση, η συγκέντρωση προσμίξεων στην επιφάνεια του ημιαγωγού παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου διάχυσης. Οπότε:

$$N(o, t) = N_s = \text{σταθερό}$$

Η παραπάνω εξίσωση λαμβάνεται από το πρώτο νόμο του Fick όπου κατά την διάχυση σε ένα υλικό που οι αρχικές αλλαγές στη συγκέντρωση παραμένουν στο ίδιο επίπεδο δηλαδή  $x = 0$ , και το  $N_s$  τείνει στο 0. Έτσι η προηγούμενη εξίσωση μπορεί να γραφεί ως:

$$N(o, t) = N_s = \text{σταθερό} \quad \text{και} \quad N(x, t) = 0$$

Αν το υλικό που διαχέεται είναι διαφορετικό από την ειδική αντίσταση του υλικού, μία διασταύρωση δημιουργείται στα σημεία όπου η συγκέντρωση του υλικού που διαχέεται είναι ίση με τη συγκέντρωση που ήδη υπάρχει στο υπόστρωμα.

Η τεχνική της σταθερής πηγής διάχυσης, χρησιμοποιείται συνήθως κατά την κατασκευή μονολιθικών ολοκληρωμένων κυκλωμάτων κατά την απομόνωση (isolation) και τη διάχυση εκπομπού (emitter diffusion) επειδή διατηρεί μια υψηλή συγκέντρωση επιφάνεια με συνεχή εισαγωγή της διαχεόμενης ουσίας.

Υπάρχει ένα άνω όριο στη συγκέντρωση του κάθε είδους πρόσμειξης που μπορούν να διαχυθούν στον ημιαγωγό σε κάποια θερμοκρασία. Αυτή η μέγιστη συγκέντρωση η οποία καθορίζει την επιφανειακή συγκέντρωση σε συνεχή διάχυση πηγής ονομάζεται το στερεό διαλυτότητα της πρόσμειξης.

### **Διάχυση Περιορισμένης Πηγής**

Στην περίπτωση αυτή, μια περιορισμένη ποσότητα προσμίξεως τοποθετείται στην επιφάνεια του κρυστάλλου και η διάχυση διεξάγεται από αυτή τη σταθερή ποσότητα διαχεόμενης ουσίας. του

ντοπαρίσματος. Ακολουθείται Gaussian κατανομή. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι ενώ η επιφανειακή συγκέντρωση μειώνεται με τη πάροδο του χρόνου, η διάχυση προχωρεί και η περιοχή κάτω από την καμπύλη παραμένει σταθερή.

#### **4.4 Η πρακτική διαδικασία της διάχυσης**

Ο φυσικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται για τη διάχυση είναι ουσιαστικά ο ίδιος με αυτόν που χρησιμοποιείται κατά την οξείδωση. Όλα ουσιαστικά τα συστήματα παραγωγής χρησιμοποιούν για τη διάχυση διατάξεις ανοιχτού σωλήνα, αν και είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί η διάχυση και υπό μειωμένη πίεση, σε κλειστό σωλήνα από τηγμένο χαλαζία. Οι πηγές διάχυσης υπάρχουν σε στερεά, υγρή και αέρια μορφή για τα περισσότερα υλικά προσμίξεων.

Στην πράξη η διάχυση πραγματοποιείται σε δύο στάδια (two step diffusion) για μεγαλύτερη επιτυχία της επιθυμητής κατανομής των προσμίξεων. Το πρώτο στάδιο είναι μία πολύ ρηχή διάχυση σταθερής πηγής που ονομάζεται προαπόθεση (predeposition) που πραγματοποιείται για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Το δεύτερο στάδιο χρησιμοποιεί το αποτέλεσμα της προαπόθεσης σαν πηγή για μία διάχυση περιορισμένης πηγής (limited source) συνήθως σε μία οξειδωτική ατμόσφαιρα και ονομάζεται ανακατανομή (redistribution).

Η δύο σταδίων διάχυση αποτελείται από ένα στάδιο εναπόθεσης και ένα στάδιο drive-in. Στην πρώτη βαθμίδα α σταθερά διαχύσεως πηγή πραγματοποιείται για ένα μικρό χρονικό διάστημα, συνήθως σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, ας πούμε, 1000°C. Στο τελευταίο στάδιο, η παροχή ακαθαρσία είναι διακοπής και η υπάρχουσα ντοπαρίσματος αφήνεται να διαχυθεί μέσα στο



σώμα του ημιαγωγού, η οποία είναι τώρα διατηρείται σε διαφορετική θερμοκρασία, ας πούμε 1200°C, σε μία οξειδωτική ατμόσφαιρα. Το στρώμα οξειδίου που σχηματίζεται στην επιφάνεια του ελαστικού του πλακιδίου κατά την διάρκεια αυτού του σταδίου να αποτρέπει την περαιτέρω ακαθαρσίες από την είσοδο, ή εκείνα που έχουν ήδη κατατεθεί από διάχυση έξω. Το τελικό προφίλ ακαθαρσίας είναι μία συνάρτηση της κατάστασης διάχυσης, όπως η θερμοκρασία, ο χρόνος, και συντελεστές διάχυσης, για κάθε βήμα.

1. Κατά την προαπόθεση, ένας σταθερός αριθμός ατόμων πρόσμιξης εναποτίθενται στο πυριτίου κατά τη διάρκεια ενός σύντομου χρονικού διαστήματος, σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες, όπως για παράδειγμα, 1000 ° C. Η ποσότητα προσμίξεων  $Q$ , που μεταφέρεται μέσα από την επιφάνεια κατά το χρονικό διάστημα  $t_1$ , δίνεται από τη σχέση:

$$Q = 2N_{01} \left( \frac{D_1 t_1}{\pi} \right)^{1/2}$$

όπου  $N_{01}$  είναι η επιφανειακή συγκέντρωση κατά τη διάρκεια της διάχυσης σταθερής πηγής και  $D_1$  είναι ο συντελεστής διάχυσης για το διαχεόμενο υλικό στη θερμοκρασία προαπόθεσης.

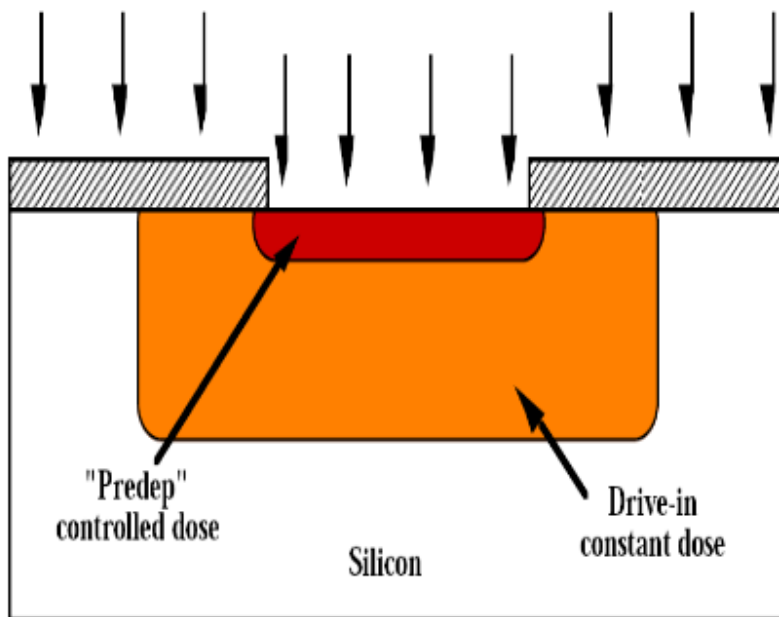
2. Στο στάδιο της ανακατανομής, απενεργοποιείται η διάχυση της πηγής και οι ποσότητες η ποσότητα της διαχυμένης ουσίας που έχει προστεθεί κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου αφήνεται να διαχυθεί στο πυριτίου. Η συγκέντρωση των προσμίξεων κατά τη διάρκεια της ανακατανομής δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$N(x, t_1, t_2) = \left( \frac{2N_{01}}{\pi} \right) \left( \frac{D_1 t_1}{D_2 t_2} \right)^{1/2} \exp \left( - \frac{x^2}{4D_2 t_2} \right)$$

όπου ο δείκτης “2” αναφέρεται στην ανακατανομή.

Αυτή η εξίσωση ισχύει μόνο όταν  $D_1 t_1 < D_2 t_2$ , πράγμα που συμβαίνει συνήθως, διότι το στάδιο της προαπόθεσης πραγματοποιείται συνήθως σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία από το στάδιο της ανακατανομής και επομένως με πολύ μικρότερο συντελεστή διάχυσης.

Στην ακόλουθη εικόνα φαίνεται η διάχυση δύο βημάτων.



Εικόνα 27: Διάχυση δύο βημάτων [24]

#### 4.4.1 Οξείδωση κατά τη διάχυση

Το στάδιο της ανακατανομής συνοδεύεται συνήθως από οξείδωση, έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία στιβάδα οξειδίου του πυριτίου που θα χρησιμοποιηθεί σαν στρώμα απομόνωσης για τις επόμενες διαδικασίες.

Η οξείδωση αυτή προκαλεί από τη μία κατανάλωση πυριτίου και επομένως μετατόπιση της επιφάνειας του πυριτίου, και από την άλλη καταμερισμό των προσμίξεων μεταξύ του οξειδίου (όπου γίνονται αδρανείς) και του πυριτίου (όπου παραμένουν ενεργές). Για παράδειγμα, το βόριο ενσωματώνεται εύκολα μέσα στο αναπτυσσόμενο οξείδιο, με αποτέλεσμα τη μείωση της επιφανειακής συγκέντρωσής του στο πυρίτιο.

Αν χρησιμοποιείται υγρά οξείδωση κατά το στάδιο της ανακατανομής του βορίου, η ταχεία ανάπτυξη του οξειδίου μπορεί να απομακρύνει το 80% του βορίου της προαπόθεσης. Για το λόγο αυτό, κατά την έναρξη της ανακατανομής του βορίου χρησιμοποιείται αδρανής ατμόσφαιρα ή ξηρό οξυγόνο και στη συνέχεια ένας κύκλος με υδρατμούς, μέχρι να πετύχουμε το επιθυμητό πάχος οξειδίου.

Η αποβολή του φωσφόρου από το οξείδιο κατά τη διάρκεια της οξείδωσης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της επιφανειακής συγκέντρωσής του στην επιφάνεια του πυριτίου. Το αποτέλεσμα ονομάζεται φαινόμενο “snow-plow”, συνίσταται σε μια φαινομένη μείωση της ενέργειας ενεργοποίησης της διάχυσης από 3.6 σε 2.5eV, η οποία αντιπροσωπεύει σημαντική αύξηση του συντελεστή διάχυσης.

#### **4.4.2 Πολλαπλές η διαδοχικές διαχύσεις**

Έχει παρατηρηθεί ότι οι διαχύσεις που περιλαμβάνουν δύο ή περισσότερα είδη προσμίξεων δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Ειδικά στις διαδοχικές διαχύσεις για τον σχηματισμό των περιοχών βάσης και εκπομπού ενός διπολικού τρανζίστορ παρατηρείται ότι η επαφή βάσης-συλλέκτη κάτω από την περιοχή εκπομπού δεν βρίσκεται στο ίδιο βάθος με την επαφή βάσης-

συλλέκτη έξω από την περιοχή του εκπομπού. Όταν ο εκπομπός είναι από φωσφόρο και η βάση από βόριο, η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι πιο βαθιά κάτω από τον εκπομπό. Αυτή ονομάζεται εμπλουτισμένη διάχυση κάτω από τον εκπομπό (emitter push). Όταν ο εκπομπός είναι από αρσενικό και η βάση από βόριο, η επαφή βάσης-συλλέκτη είναι πιο ρηχή κάτω από τον εκπομπό. Αυτό ονομάζεται επιβράδυνση του εκπομπού (emitter pull).

Ο “εμπλουτισμός” της διάχυσης κάτω από τον εκπομπό οφείλεται σε απόζευξη του συμπλέγματος φωσφόρος-διπλά φορτισμένο πλεγματοκέντρο, η οποία ελευθερώνει πλεγματοκέντρα για τη διάχυση και του βορίου. Έτσι το ποσοστό της διάχυσης του βορίου που πραγματοποιείται κατά τη διάχυση του φωσφόρου εμφανίζει πολύ μεγαλύτερο συντελεστή διάχυσης. Επειδή ο παράγοντας αυτός εμπλουτισμού μπορεί να είναι της τάξης του 100, το φαινόμενο αυτό είναι αρκετά έντονο.

Η επιβράδυνση του εκπομπού συμβαίνει εξ αιτίας της δημιουργίας συμπλεγμάτων αρσενικού-πλεγματοκέντρου, που μειώνουν τον αριθμό των πλεγματοκενών, που διατίθενται για το βόριο. Το φαινόμενο αυτό είναι πολύ ασθενέστερο από τον εμπλουτισμό που οφείλεται στον φωσφόρο. Τα συμπλέγματα αρσενικού-πλεγματοκέντρου δεν εμφανίζονται αν χρησιμοποιηθεί για τη προαπόθεση εμφύτευση ιόντων και επομένως τότε δεν εμφανίζεται επιβράδυνση του εκπομπού.

#### **4.5 Μάσκες διάχυσης**

Τα ολοκληρωμένα κυκλώματα βασίζονται στην κατασκευή επιπεδικών διατάξεων με επιλεκτικό ντοπάρισμα περιοχών του υποστρώματος. Για την πραγματοποίηση αυτού του επιλεκτικού

ντοπαρίσματος είναι απαραίτητη η χρήση υλικών που δρουν σαν μάσκες για τη διάχυση προσμίξεων. Το πιο δημοφιλές υλικό για μάσκες διάχυσης είναι το θερμικά αναπτυσσόμενο διοξείδιο του πυριτίου. Τα παράθυρα για τη διάχυση δημιουργούνται στο οξείδιο με κάποια φωτολιθογραφική μέθοδο. Το πάχος του οξειδίου, που απαιτείται για να είναι η μάσκα αποτελεσματική, εξαρτάται από το υλικό διάχυσης, τη θερμοκρασία διάχυσης και τη διάρκεια της διαδικασίας υψηλής θερμοκρασίας.

Οι συντελεστές διάχυσης του βορίου, του αρσενικού και του φωσφόρου μέσα στο διοξείδιο του πυριτίου είναι δύο-τρεις τάξεις μεγέθους μικρότεροι από τους αντίστοιχους συντελεστές στο πυρίτιο. Αντίθετα, άλλες ουσίες, όπως το γάλλιο, το ίνδιο και το αλουμίνιο, έχουν συντελεστές διάχυσης στο διοξείδιο του πυριτίου της ίδιας τάξης μεγέθους όπως και στο πυρίτιο. Επομένως, το διοξείδιο του πυριτίου δεν είναι αποτελεσματική μάσκα γι' αυτές τις προσμίξεις και πρέπει να αποφεύγεται η μόλυνση της διαδικασίας από αυτά τα σχετικά γρήγορα διαχεόμενα υλικά.

Ο μηχανισμός διάχυσης του βορίου και του αρσενικού μέσα στο άμορφο θερμικό οξείδιο είναι πολύ διαφορετικός από τον μηχανισμό διάχυσης στον μονοκρυστάλλο πυριτίου. Αν υπάρχει αρκετή συγκέντρωση ατόμων προσμίξεων, περίπου  $10^{19}\text{cm}^{-3}$ , το οξείδιο μετατρέπεται βαθμιαία σε ντοπαρισμένο γυαλί. Όταν όλο το οξείδιο μετατραπεί σε ντοπαρισμένο γυαλί, τότε αυτό γίνεται πηγή για τη διάχυση προσμίξεων μέσα στο υπόστρωμα του πυριτίου και δεν είναι πια μάσκα.

Επειδή ο συντελεστής διάχυσης του αρσενικού στο διοξείδιο του πυριτίου είναι περίπου μία τάξη μεγέθους μικρότερος από αυτόν του βορίου, το ίδιο πάχος οξειδίου μπορεί να χρησιμεύσει σαν μάσκα για το βόριο και για το αρσενικό. Ο συντελεστής διάχυσης του αντιμονίου στο διοξείδιο του πυριτίου εμφανίζει ισχυρότερη εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Έτσι, σε

θερμοκρασίες μέχρι  $1050^{\circ}\text{C}$  το πάχος οξειδίου που χρειάζεται για τη διάχυση του φωσφόρου είναι αρκετό και για το αντιμόνιο ενώ σε θερμοκρασίες πάνω από  $1150^{\circ}\text{C}$  απαιτούνται μεγαλύτερα πάχη οξειδίου.

Σαν μάσκες διάχυσης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν στρώματα απόθεσης διοξειδίου του πυριτίου ή νιτρίδιου του πυριτίου. Τα οξείδια απόθεσης είναι συνήθως λιγότερο πυκνά από τα θερμικά οξείδια γι' αυτό οι μάσκες που κατασκευάζονται από αυτά θα πρέπει να έχουν μεγαλύτερο πάχος. Το νιτρίδιο του πυριτίου είναι θαυμάσια μάσκα διάχυσης, αλλά τα πρόσθετα στάδια διαδικασίας που απαιτούνται για την απόθεση και τη χάραξή του έχουν σαν αποτέλεσμα την περιορισμένη χρήση του.

Οι πραγματικές διαστάσεις της περιοχής διάχυσης είναι λίγο μεγαλύτερες από τα παράθυρα της μάσκας λόγω της πλευρικής διάχυσης. Επειδή οι οριακές συνθήκες για πλάγια διάχυση είναι διαφορετικές από αυτές για κάθετη διάχυση, τα βάθη των πλευρικών επαφών είναι ελαφρά μικρότερα από αυτά που μετρώνται κάθετα από την επιφάνεια.

Η πλευρική διάχυση επιδρά με διάφορους τρόπους στις ηλεκτρικές ιδιότητες των επαφών. Η πιο βασική συνέπεια της πλευρικής διάχυσης είναι ότι η τομή της επαφής με την επιφάνεια του πυριτίου βρίσκεται κάτω από το προστατευτικό στρώμα του οξειδίου του πυριτίου. Με τον τρόπο αυτό οι επαφές μπορούν να έχουν αναπαραγωγίμα χαρακτηριστικά αντίστροφης τάσης κατάρρευσης, ενώ στις μη προστατευμένες επαφές κυριαρχούν οι τυχαίες επιφανειακές συνθήκες.

Ένα άλλο αποτέλεσμα της πλευρικής διάχυσης είναι ότι η επιφανειακή απόσταση μεταξύ δύο περιοχών διάχυσης μπορεί να γίνει μικρότερη από τις διαστάσεις που επιτρέπει η διαδικασία φωτολιθογραφίας. Αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά των

πλευρικών τρανζίστορς pnp. Μία ανεπιθύμητη πλευρά της πλευρικής διάχυσης είναι η αύξηση της χωρητικότητας επαφής λόγω της αύξησης της επιφάνειάς της.

#### 4.6 Προσμίξεις και τα χαρακτηριστικά τους

Η επιλογή του υλικού πρόσμιξης επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του ολοκληρωμένου κυκλώματος. Το βόριο και φωσφόρο είναι τα βασικά υλικά προσμίξεων για τα περισσότερα ολοκληρωμένα κυκλώματα. Το αρσενικό και αντιμόνιο, τα οποία είναι διαλυτά στο πυρίτιο και διαχέονται αργά, χρησιμοποιούνται συνήθως πριν από την επεξεργασία ή κατά το δεύτερο στρώμα διάχυσης. Ο χρυσός και το ασήμι διαχέονται πολύ γρήγορα. Δρουν ως κέντρα ανασυνδυασμού και έτσι μειώνουν το χρόνο ζωής του φορέα.

Το βόριο αποτελεί σχεδόν την αποκλειστική επιλογή ως διαχεόμενη ουσία στο πυρίτιο καθώς άλλες ουσίες έχουν διάφορους περιορισμούς ως εξής:

Το γάλλιο έχει σχετικά μεγάλο συντελεστή διάχυσης στο  $\text{SiO}_2$ , και η συνηθισμένη τεχνική της μάσκας δεν είναι λειτουργική. Το ίνδιο είναι μικρού ενδιαφέροντος λόγω του υψηλού επιπέδου αποδέκτη  $0,16\text{eV}$ , σε σύγκριση με το  $0,01\text{eV}$  του βόριου, το οποίο δείχνει ότι δεν γίνεται όλες αυτές οι ουσίες να ιονίζονται σε θερμοκρασία δωματίου για να παραχθεί μία οπή. Τέλος το αλουμίνιο αντιδρά έντονα με το οξυγόνο που υπάρχει στο πυρίτιο.

Η επιλογή ενός συγκεκριμένου n-τύπου ντοπαρίσματος δεν είναι τόσο περιορισμένη ώστε για τα p-τύπου. Οι προσμίξεις n-τύπου, όπως τα φώσφορο, αντιμόνιο και αρσενικό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα στάδια της επεξεργασίας των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η

συνεχής διάχυση του φωσφόρου είναι πολύ μεγαλύτερη από ότι για τα Sb και As, και είναι συγκρίσιμο με το βόριο, το οποίο έχει μικρότερο χρόνο διάχυσης.

### **Προσμίξεις σε VLSI**

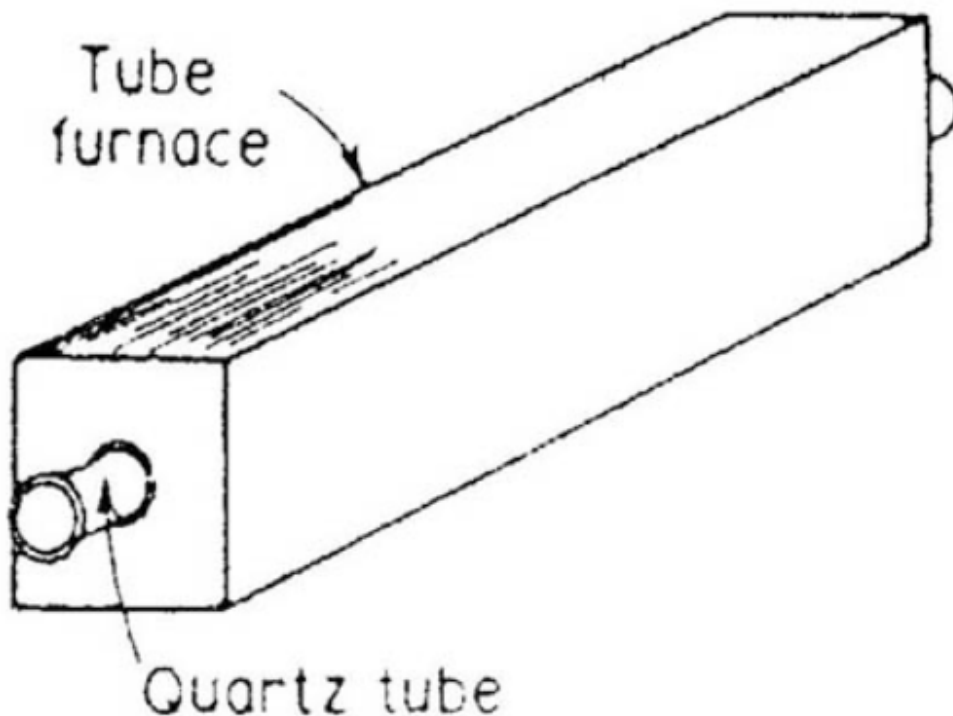
Οι κοινές προσμίξεις στην κατασκευή κυκλωμάτων VLSI είναι τα βόριο, φώσφορο και αρσενικό. Ο φωσφόρος είναι χρήσιμος όχι μόνο ως πρόσμιξη πομπού και βάσης, αλλά και στην γρήγορη απορρόφηση μεταλλικών διαχεόμενων ουσιών, όπως το Cu και το An που δημιουργούν προβλήματα διαρροής. Έτσι, το φώσφορο είναι απαραίτητο στον τομέα της τεχνολογίας VLSI. Ωστόσο, στα n-p-n τρανζίστορ χρησιμοποιείται αρσένιο που έχει καλύτερα χαρακτηριστικά. Ως εκ τούτου, στα VLSI, η χρήση του φωσφόρου ως ενεργό παράγοντα ντοπαρίσματος γίνεται σε μικρές δόσεις καθώς η χαμηλής θερμοκρασία επεξεργασίας θα πρέπει να περιορίζεται στη χρήση του ως βάση προσμίξεως των p-n-p. Το αρσενικό είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό πρόσμιξης για την πηγή και την αποχέτευση στο n-MOSFETs κανάλι.

### **4.7 Συστήματα διάχυσης**

Πηγές διάχυσης υπάρχουν σε στερεά, υγρή και αέρια κατάσταση για τα περισσότερα υλικά προσμίξεων. Το υλικό που διαχέεται στο πυρίτιο, καθορίζει τη φύση της πηγής πρόσμιξης. Η τεχνική των δύο βημάτων διάχυσης που περιγράφηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται ευρέως, καθώς η συγκέντρωση της διαχεόμενης ουσίας και τα προφίλ μπορούν να ελέγχονται προσεκτικά. Ο τύπος της κατανομής προσμίξεων (ERFC ή Gaussian) καθορίζεται από την επιλογή των συνθηκών λειτουργίας.



Για τους διάφορους τύπους διάχυσης (και οξειδωση) χρησιμοποιείται συνήθως ένας κλίβανος, ή ειδικός φούρνος χαλαζία με ροή αδρανούς αερίου ( $N_2$ ,  $Ar$ ), που δημιουργείται από μια θερμαινόμενη αντίσταση σε σωλήνα. Ο σωλήνας έχει ένα μακρύ (περίπου 2 έως 3 μέτρα) κοίλο άνοιγμα μέσα στο οποίο ένας σωλήνας από χαλαζία διαμέτρου περίπου 100 - 150mm τοποθετείται, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι μεταξύ 800-1200°C.



Εικόνα 28: Κλίβανος από θερμαινόμενη αντίσταση σε σωλήνα

Η θερμοκρασία του κλιβάνου διατηρείται περίπου στους 1.000°C. Η θερμοκρασία εντός του κλιβάνου ελέγχεται με μεγάλη ακρίβεια, έτσι ώστε η θερμοκρασία περίπου στο 1/2°C της τοπικής θερμοκρασίας μπορεί να διατηρηθεί ομοιόμορφα πάνω από ένα "θερμή ζώνη" για

περίπου 1m μήκος. Αυτό επιτυγχάνεται από τρία αυτόνομο γειτονικά στοιχεία αντίστασης. Οι γκοφρέτες πυριτίου προς επεξεργασία στοιβάζονται κάθετα σε υποδοχές στον φορέα χαλαζία και εισάγεται στον κλιβάνο. Δηλαδή, τα δισκίδια 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.

Στη συνέχεια θ' αναφερθούμε στις κυριότερες πηγές διάχυσης φωσφόρου, βορίου και αρσενικού.

### **Πηγές διάχυσης φωσφόρου.**

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα διάχυσης φωσφόρου χρησιμοποιούν σαν πηγή προσμίξεων οξυχλωρίδιο του φωσφόρου ( $\text{POCl}_3$ ), που είναι υγρό, ή φωσφίνη ( $\text{PH}_3$ ), που είναι αέριο τοξικό. Και στις δύο περιπτώσεις το συστατικό της πηγής αντιδρά με οξυγόνο για να σχηματίσει πεντοξείδιο του φωσφόρου ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) μέσα στον σωλήνα του φούρνου διάχυσης. Το στερεό  $\text{P}_2\text{O}_5$  έχει χρησιμοποιηθεί σαν πηγή φωσφόρου με άζωτο σαν αέριο φορέα. Πρέπει όμως να διατηρείται σε θερμοκρασία 200-300°C και επομένως πρέπει να υπάρχει μία αύξουσα θερμοβαθμίδα από την πηγή προς τα υποστρώματα ώστε να αποφευχθεί η απόθεσή του στα τοιχώματα του φούρνου. Τέλος έχουν αναπτυχθεί επιπεδικές στερεές πηγές φωσφόρου που αποτελούνται από κεραμικό υπόστρωμα που περιέχει  $\text{P}_2\text{O}_5$  και οξείδιο του ασβεστίου ( $\text{CaO}$ ). Τα

υποστρώματα αυτά τοποθετούνται μαζί με τις πλακέτες πυριτίου σε ένα φορέα από χαλαζία και σε κάθε τρίτη εγκοπή του φορέα, σε τρόπο ώστε κάθε πλακέτα πυριτίου να βρίσκεται απέναντι από ένα κεραμικό υπόστρωμα.

Ανεξάρτητα από το είδος της πηγής, στην πράξη η διάχυση φωσφόρου γίνεται από ένα στρώμα γυαλιού φωσφορούχου πυριτίου που αναπτύσσεται πάνω στο υπόστρωμα. Το γυαλί του φωσφορούχου πυριτίου απομακρύνεται μετά το τέλος της διαδικασίας με υδροχλωρικό οξύ.

### **Πηγές διάχυσης βορίου.**

Το βόριο είναι ένα σχεδόν αποκλειστική επιλογή ως ακαθαρσία δέκτη σε πυρίτιο. Έχει μέτριο συντελεστή διάχυσης, περίπου  $10-16 \text{ m}^2/\text{sec}$  στους  $1150^\circ\text{C}$ , η οποία είναι βολική κυρίως για ελεγχόμενη διάχυση. Έχει ένα στερεό όριο διαλυτότητας περίπου  $5 \times 10^{26}$  άτομα /  $\text{m}^3$ , έτσι ώστε η συγκέντρωση επιφάνειας μπορεί να ποικίλει, αλλά οι περισσότερες επαναλήψιμα αποτελέσματα λαμβάνονται όταν η συγκέντρωση είναι περίπου  $1.024 / \text{m}^3$ , το οποίο είναι τυπικό για διαχύσεις τρανζίστορ βάσης. Οι πηγές διάχυσης βορίου διατίθενται σε διάφορες μορφές όπως και οι πηγές φωσφόρου.

Το τριοξείδιο του βορίου ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) είναι μία δημοφιλής στερεά πηγή που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμοκρασίες από  $600$  ως  $1200^\circ\text{C}$ . Το τριβρωμιούχο βόριο είναι μία υγρή πηγή, που χρησιμοποιείται -όπως το οξυχλωρίδιο του φωσφόρου- σε αναβραστήρα ελεγχόμενης θερμοκρασίας μέσα από τον οποίο περνάει άζωτο. Το οξυγόνο αντιδρά με το  $\text{BBr}_3$  μέσα στο σωλήνα του φούρνου και σχηματίζει  $\text{B}_2\text{O}_3$ . Η πιο διαδεδομένη αέρια πηγή βορίου είναι το διβοράνιο ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) ένα ισχυρά τοξικό υλικό.

Οι στερεές επιπεδικές πηγές είναι πιο διαδεδομένες για το βόριο παρά για το φωσφόρο. Ένας τύπος αποτελείται από οξειδωμένα υποστρώματα από πεπιεσμένο νιτρίδιο του βορίου (BN) που σχηματίζει  $B_2O_3$ . Άλλος τύπος συνίσταται από υποστρώματα γυαλιού-κεραμικού που περιέχουν  $B_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MgO$  και  $BaO$ .

Όπως στην περίπτωση του φωσφόρου, η πραγματική πηγή της διάχυσης είναι ένα στρώμα γυαλιού βοριοχού πυριτίου σε επαφή με την επιφάνεια του πυριτίου. Το γυαλί βοριοχού πυριτίου απομακρύνεται -πιο δύσκολα από το φωσφορούχο πυρίτιο- σε διάλυμα  $HNO_3$  και  $HF$ . Συνήθως πραγματοποιείται μία σύντομη υγρή οξείδωση στο τέλος της προαπόθεσης του βορίου, ώστε να διευκολυνθεί η απομάκρυνση του γυαλιού βορίου.

### **Πηγές διάχυσης αρσενικού.**

Πολλές ενώσεις που περιέχουν αρσενικό είναι πολύ τοξικές και γι' αυτό το λόγο οι διαχύσεις με αρσενικό αποφεύγονταν για πολλά χρόνια στη βιομηχανία. Αντί γι' αυτό χρησιμοποιούσαν αντιμόνιο για τα θαμμένα στρώματα, παρ' όλο που δίνει μεγαλύτερη αντίσταση φύλλου από το αρσενικό. Οι βελτιώσεις στις τεχνικές χειρισμού των τοξικών αερίων έκαναν την αρσίνη ( $AsH_3$ ) μία βιώσιμη πηγή διάχυσης ανοιχτού σωλήνα για το αρσενικό. Επίσης σαν πηγές αρσενικού χρησιμοποιούνται και ντοπαρισμένα οξειδιά του.

## Κεφάλαιο 5: Οξείδωση

### 5.1 Εισαγωγή

Η οξείδωση του πυριτίου είναι μία απαραίτητη διαδικασία κατά την διάρκεια της κατασκευής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Για το σκοπό αυτό απαιτείται η κατανόηση των μηχανισμών της οξείδωσης καθώς και η δυνατότητα κατασκευής οξειδίων υψηλής ποιότητας τόσο ως προς τη δομή όσο και ως προς τις φυσικές και ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Ο έλεγχος των ηλεκτρικών ιδιοτήτων του  $\text{SiO}_2$  γίνεται κυρίως με τη μέθοδο χαρακτηριστικών χωρητικότητας-τάσης  $C(V)$  πάνω σε ειδικές διατάξεις MOS (Metal-oxide-semiconductor) που στην προκειμένη περίπτωση αποτελούνται από τα υλικά  $\text{Al-SiO}_2\text{-Si}$ . Τέλος μπορούμε να πούμε ότι ο έλεγχος της παρασκευής και των ιδιοτήτων των οξειδίων του πυριτίου εξασφαλίζει την αξιόπιστη αναπαραγωγή και λειτουργία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Στην κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, ο όρος "οξείδωση" χρησιμοποιείται για τη μετατροπή του πυριτίου σε διοξείδιο του πυριτίου. Παίρνουμε το πυρίτιο και να το τροποποιήσετε για να πάρει διοξείδιο του πυριτίου. Υπό αυτή την έννοια, είναι παρόμοια με το ντόπινγκ, όπου τύπου N ή τύπου P υλικά προστίθεται σε πυρίτιο και να το τροποποιήσετε.

Αυτό μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους όπως:

1. θερμική οξείδωση με ή χωρίς την παρουσία υδρατμών
2. ηλεκτροχημική οξείδωση
3. χημικής εναπόθεσης (CVD: Chemical Vapor Deposition).
4. ηλεκτρολυτική μέθοδος (Ηλεκτροχημική ανοδίωση)

## 5. μέθοδος πλάσματος (plasma oxydation).

Οι μέθοδοι παρασκευής των οξειδίων επιλέγονται ανάλογα με το έργο που αυτά καλούνται να επιτελέσουν σ' ένα κύκλωμα. Ωστόσο, η μέθοδος θερμικής οξείδωσης χρησιμοποιείται ευρέως στην τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων πυριτίου.

Στο τρανζίστορ CMOS, το οξείδιο είναι ένα ουσιαστικό συστατικό στην πύλη, ονομάζεται οξείδιο πύλης και αποτελεί ένα ουσιώδες μέρος της δομής του. Επιπλέον χρησιμοποιείται για την προστασία της επιφάνειας του πυριτίου, δηλαδή αποτελεί ένα στρώμα παθητικοποίησης. Το διοξείδιο του πυριτίου είναι στην πραγματικότητα γυαλί υψηλής καθαρότητας. Είναι ένα καλό μονωτικό υλικό και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται ως μονωτής μεταξύ των καλωδίων και μεταξύ των τρανζίστορ. Για αυτό το λόγο αποτελεί ένα βασικό συστατικό μέρος του ολοκληρωμένου κυκλώματος.

### 5.2 Θερμική οξείδωση

Η θερμική οξείδωση είναι ένας τρόπος για να παραχθεί ένα λεπτό στρώμα οξειδίου (συνήθως διοξείδιο του πυριτίου) επί της επιφάνειας ενός πλακιδίου. Η τεχνική αναγκάζει έναν οξειδωτικό παράγοντα να διαχυθεί μέσα στην γκοφρέτα πυριτίου σε υψηλή θερμοκρασία και αντιδρά με αυτό. Ο ρυθμός αύξησης του αζώτου, συχνά προβλέπεται από το μοντέλο Deal-Grove.

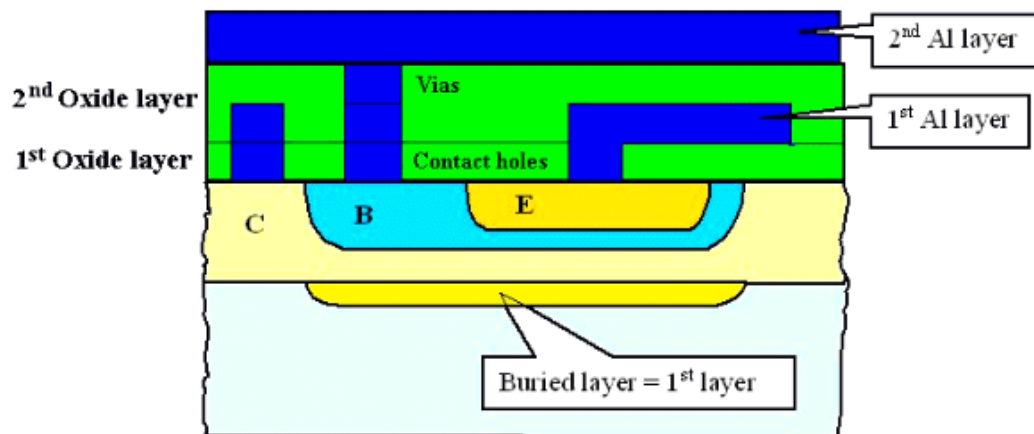
Η λειτουργία ενός στρώματος διοξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) σε ένα τσιπ είναι πολλαπλών χρήσεων. Το  $\text{SiO}_2$  διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην τεχνολογία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, διότι κανένα άλλο ημιαγώγιμο υλικό δεν έχει φυσικό οξείδιο το οποίο να είναι σε θέση να επιτύχει όλες τις ιδιότητες του  $\text{SiO}_2$ . Ο ρόλος του  $\text{SiO}_2$  στην κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων συνοψίζεται στα ακόλουθα σημεία:

- Δρα ως μάσκα διάχυσης επιτρέποντας επιλεκτική διάχυση σε γκοφρέτες πυριτίου μέσα από το παράθυρο χαραγμένα σε οξείδιο.
- Χρησιμοποιείται για επιφανειακή παθητικοποίηση (surface passivation), δηλαδή την δημιουργία ενός προστατευτικού στρώματος  $\text{SiO}_2$  στην επιφάνεια του πυριτίου. Προστατεύει από την υγρασία και άλλους ατμοσφαιρικούς ρύπους.
- Χρησιμεύει ως μονωτής στην επιφάνεια του νερού. Έχει υψηλή σχετική διηλεκτρική σταθερά, η οποία επιτρέπει μεταλλικές γραμμές να περάσουν πάνω από τις ενεργές περιοχές του πυριτίου.
- Το  $\text{SiO}_2$  δρα ως το ενεργό ηλεκτρόδιο πύλης στη MOS δομή της συσκευής.



Εικόνα 29: Ενεργό Ηλεκτρόδιο πύλης [28]

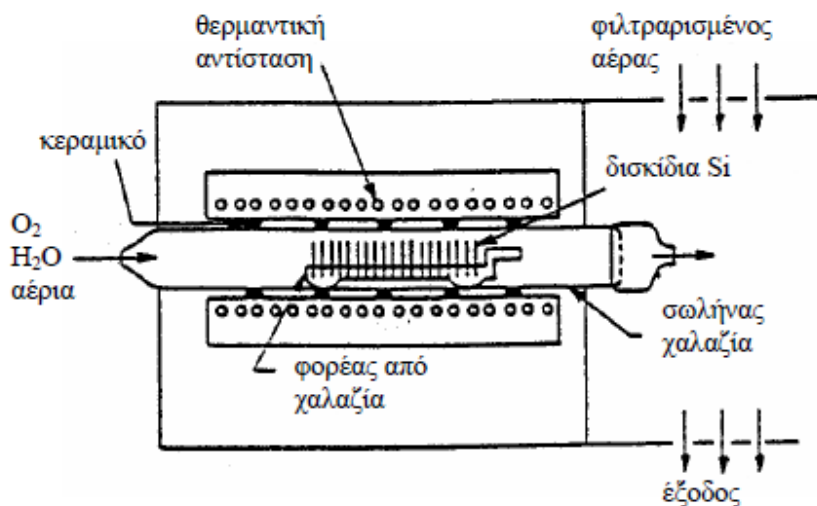
- Χρησιμοποιείται για να την απομόνωση μία συσκευή από την άλλη.
- Παρέχει ηλεκτρική απομόνωση της πολυεπίπεδης επιμετάλλωση που χρησιμοποιείται σε VLSI.



Εικόνα 30: Πολυεπίπεδη επιμετάλλωση [28]

Είναι σημαντικό το γεγονός ότι το πυρίτιο σχηματίζει εύκολα ένα προστατευτικό οξείδιο, ειδάλως θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μονωτήρες για την προστασία της επιφάνειας.

Η θερμική οξείδωση του Si πραγματοποιείται σε ειδικές διατάξεις που καλούνται αντιδραστήρες οξείδωσης και φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα.



Εικόνα 31: Διάταξη αντιδραστήρα θερμικής οξείδωσης



Τα κύρια μέρη της διάταξης θερμικής οξείδωσης είναι ο φούρνος που παρέχει θερμαντική ισχύ με τη βοήθεια ηλεκτρικής αντίστασης και ο κυλινδρικός σωλήνας από χαλαζία (quartz tube) που είναι ανοικτός από το ένα άκρο του ενώ από το άλλο φέρει ακροφύσιο για την είσοδο του αερίου  $O_2$  και των υδρατμών. Επιπλέον αποτελείται από τον φορέας για την οξείδωση των δισκιδίων Si. Ο φορέας είναι από χαλαζία και έχει κατάλληλες υποδοχές για πολλά δισκίδια. Διαθέτει σύστημα ελέγχου και σταθεροποίησης της θερμοκρασίας (temperature controller) και σύστημα ελέγχου της ροής των οξειδωτικών αερίων μέσα στο φούρνο. Τέλος με τη βοήθεια συνδεδεμένου υπολογιστή και τη διάταξη του φούρνου επιτυγχάνονται:

1. Η άνοδος της θερμοκρασίας μέχρι την επιθυμητή τιμή με σταθερό βήμα που επιλέγεται κατάλληλα.
2. Ο συνεχής έλεγχος της θερμοκρασίας.
3. Ο έλεγχος της ροής των αερίων οξείδωσης μέσα στο φούρνο.
4. Ο χρόνος οξείδωσης και ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας στην αρχική τιμή λειτουργίας.

### **5.2.1 Διαδικασία οξείδωσης**

Η διαδικασία μπορεί να χωριστεί σε θερμική οξείδωση ή ηλεκτροχημική οξείδωση. Η θερμική οξείδωση που βασίζεται στην θέρμανση μπορεί να χωριστεί περαιτέρω σε ξηρή και υγρή οξείδωση. Στη ξηρή οξείδωσης χρησιμοποιείται οξυγόνο, ενώ στην υγρή το πυρίτιο οξειδώνεται με ατμό ή υδρατμούς. Στην υγρή οξείδωση διοχετεύεται το  $O_2$  μέσα σε λουτρό  $H_2O$  υψηλής

καθαρότητας και στη συνέχεια μέσα στο φούρνο. Επίσης μπορεί να γίνει και με απ' ευθείας ροή ατμού πάνω στο οξειδούμενο Si.

Η υγρή οξείδωση είναι ταχύτερη 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 ξηρή οξείδωση δίνει οξείδια με καλύτερες φυσικές και ηλεκτρικές ιδιότητες όμως ο ρυθμός ανάπτυξης τους είναι σχετικά χαμηλός.

Η γνώση της κινητικής της οξείδωσης και ο ακριβής έλεγχος του πάχους των οξειδίων έχουν ιδιαίτερη σημασία για την ποιότητα τους και κάποια συνέπεια στην συμπεριφορά και αξιοπιστία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

Η συνολική αντίδραση μπορεί να γραφτεί ως εξής:



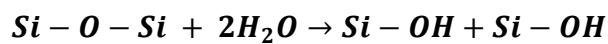
Αξίζει να σημειώσουμε μερικές από τις σημαντικές ιδιότητες του διοξειδίου του πυριτίου. Πρώτον προσκολλάται καλά στο πυρίτιο. Δεύτερον είναι ένα πολύ καλό μονωτικό υλικό με πολύ υψηλή τάση διάσπασης.

Η τάση διάσπασης είναι περίπου 10 MV/cm, μια πολύ λεπτή πύλη οξειδίου ή διοξειδίου του πυριτίου και θα λειτουργεί ως ένα καλό μονωτικό υλικό. Το διοξείδιο του πυριτίου έχει μια τετραεδρική δομή. Για κάθε άτομο πυριτίου υπάρχουν τέσσερα άτομα οξυγόνου και κάθε άτομο οξυγόνου υπάρχουν δύο άτομα πυριτίου στην πραγματική μορφή κρυστάλλων. Αν πάρουμε ένα μόνο μόριο κάθε άτομο πυριτίου συνδέεται με δύο άτομα οξυγόνου. Αν έχουμε μια καθαρή

ενιαίο κρυσταλλική μορφή χαλαζία, η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη, περίπου  $2,6\text{g/cm}^3$ . Ενώ αν πάρουμε άμορφη δομή που ονομάζεται λιωμένο διοξείδιο του πυριτίου η πυκνότητα είναι περίπου  $2,2\text{g/cm}^3$ . Έτσι υπάρχει κάποια διακύμανση μεταξύ των διαφόρων μορφών του πυριτίου.

Όταν το καθαρό πυριτίου (Si) αντιδρά με το οξυγόνο ( $\text{O}_2$ ) σχηματίζει διοξείδιο του πυριτίου.

Όταν πυρίτιο αντιδρά με το νερό, σχηματίζει δεσμούς Si-OH. Η αντίδραση δίνεται παρακάτω:



Η δομή που σχηματίζεται είναι περισσότερο πορώδης από τη δομή του καθαρού διοξειδίου του πυριτίου. Έτσι, όταν χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο χωρίς υγρασία, ονομάζεται ξηρή οξείδωση και το οξείδιο που σχηματίζεται είναι καλής ποιότητας. Είναι πυκνό και μεγαλώνει σε ένα αργό ρυθμό. Είναι σημαντικό το νερό να παραμένει έξω από το σύστημα. Το ξηρό οξείδιο καλής ποιότητας χρησιμοποιείται για την κατασκευή δομών όπως πύλη οξειδίου.

Κατά τη διάρκεια της θερμικής οξείδωσης της επιφάνειας του Si, ένα επιφανειακό στρώμα του Si αναλώνεται για τη δημιουργία του  $\text{SiO}_2$ . Ο υπολογισμός του πάχους του στρώματος αυτού βασίζεται στο συλλογισμό ότι ένα άτομο Si απαιτείται για τη δημιουργία ενός μορίου  $\text{SiO}_2$ , οπότε ισχύει:

$$N_{\text{Si}} * X_{\text{Si}} = N_{\text{SiO}_2} * X_{\text{OX}}$$

όπου:  $N_{\text{Si}} * X_{\text{Si}}$ : άτομα/ $\text{cm}^3$

και  $N_{\text{Si}}, X_{\text{OX}}$ : πάχη των Si και  $\text{SiO}_2$

Τελικά υπολογίζεται:  $X_{\text{Si}} = 0,44 * X_{\text{OX}}$

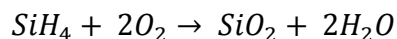
Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στην πράξη καθώς η ελεύθερη επιφάνεια του SiO<sub>2</sub> που αναπτύχθηκε θερμικά βρίσκεται σε μία υψομετρική διαφορά με την επιφάνεια του Si και αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα για τα επόμενα κατασκευαστικά βήματα (π.χ. εναπόθεση λεπτών στρωμάτων).

### **5.3 Χημική εναπόθεση (CVD)**

Κατά τις επίπεδες διεργασίες της μικροηλεκτρονικής, το SiO<sub>2</sub> και το Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> και το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο εναποτίθενται στο πυρίτιο με την τεχνική της χημικής εναπόθεσης ατμών (Chemical Vapor Deposition - CVD). Η τεχνική CVD περιλαμβάνει την υλοποίηση μιας χημικής αντίδρασης σε υψηλή θερμοκρασία χρησιμοποιώντας ένα αέριο όπως το υδρογόνο ή το άζωτο σαν αέριο φορέα.

#### **Διοξείδιο του πυριτίου**

Η εναπόθεση του διοξειδίου του πυριτίου γίνεται με την αντίδραση μεταξύ σιλανίου (SiH<sub>4</sub>) και οξυγόνου σε θερμοκρασίες 200-500°C χρησιμοποιώντας N<sub>2</sub> σαν αέριο φορέα:

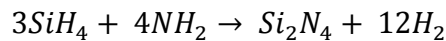


Η παραπάνω αντίδραση επιτρέπει την εναπόθεση διοξειδίου του πυριτίου ακόμη και πάνω από μια επιμετάλλωση αλουμινίου. Αυτό καθίσταται εφικτό λόγω του σχετικά χαμηλού εύρους θερμοκρασιών της αντίδρασης συγκριτικά με το σημείο τήξης του αλουμινίου (660°C).

Παράλληλα, υπάρχει η δυνατότητα κατά τη διάρκεια της εναπόθεσης να διοχετεύονται στο αέριο φορέα και προσμίξεις έτσι ώστε να παραχθεί ένα ντοπαρισμένο οξείδιο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν πηγή για διάχυση προσμίξεων μέσα στο πυρίτιο.

### Νιτρίδιο του πυριτίου (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

Η εναπόθεση νιτρίδιου του πυριτίου επιτυγχάνεται με αλληλεπίδραση σιλανίου και αμμωνίας γύρω στους 700°C με βάση την αντίδραση:



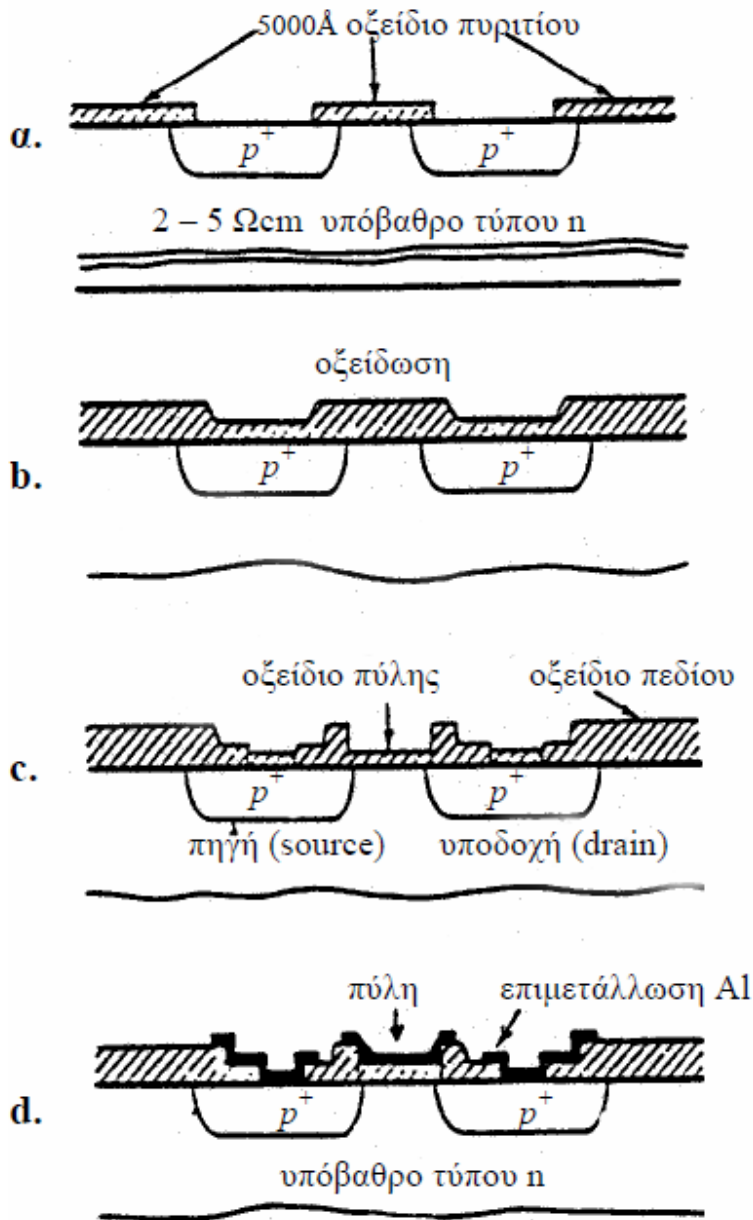
παρέχοντας ένα πολύ πυκνό διηλεκτρικό με εξαιρετικές ιδιότητες για δράση ως passivation layer.

### **5.4 Λεπτά οξειδία πύλης (gate-oxide)**

Οι ραγδαίες εξελίξεις στην περιοχή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων υψηλής πυκνότητας (VLSI), απαιτούν την ανάπτυξη πολύ λεπτών οξειδίων υψηλής ποιότητας τα οποία χρησιμοποιούνται κυρίως σαν διηλεκτρικά πύλης (gate-oxide) των MOSFET. Κάτω από το οξείδιο της πύλης σχηματίζεται ο αγωγίμος διάυλος (channel) από φορείς μειονότητας που συνδέει την πηγή (source) με την υποδοχή (drain) του MOSFET αφού πολωθεί η διάταξη σε κατάσταση αντιστροφής (inversion). Η ποιότητα του οξειδίου πύλης και κυρίως της διεπιφάνειας Si-SiO<sub>2</sub> επηρεάζει τις χαρακτηριστικές των MOSFET.

Εκτός από την απαίτηση του πολύ μικρού πάχους (80 – 300Å) τα οξειδία αυτά θα πρέπει να έχουν και άλλες ιδιότητες όπως καλή ομοιογένεια, υψηλή τάση κατάρρευσης, μικρή πυκνότητα φορτίων και καταστάσεων στη διεπιφάνεια Si-SiO<sub>2</sub>. Έχει διαπιστωθεί πως η παρουσία υγρασίας κατά την ανάπτυξη λεπτών οξειδίων, (πάχους μικρότερου από 200 Å) επηρεάζει σημαντικά τα χαρακτηριστικά του. Γι' αυτό η ξηρή οξείδωση είναι η καταλληλότερη μέθοδος παρασκευής

τους. Στην ακόλουθη εικόνα φαίνονται τα κατασκευαστικά βήματα για την ανάπτυξη λεπτού οξειδίου πύλης ενός transistor MOSFET.



Εικόνα 32: Κατασκευαστικά στάδια για την ανάπτυξη λεπτού οξειδίου πύλης [2]

Τα βήματα είναι τα ακόλουθα:

- a. Άνοιγμα "παραθύρων" στο SiO<sub>2</sub> για τον καθορισμό της ενεργού περιοχής
- b. Ανάπτυξη προστατευτικού οξειδίου
- c. Ανάπτυξη λεπτού οξειδίου πύλης
- d. Επιμετάλλωση για τη δημιουργία ωμικών επαφών σε πηγή, πύλη, υποδοχή του MOSFET.

## Κεφάλαιο 6: Επιμετάλλωση

### 6.1 Εισαγωγή

Είναι η διαδικασία σχηματισμού λεπτών μεταλλικών στρωμάτων τα οποία χρησιμεύουν στις 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 (Er, Pt, W κ.α.).

Η επιμετάλλωση είναι το τελικό στάδιο στην επεξεργασία του πυριτίου και χρησιμοποιούνται στα ολοκληρωμένα κυκλώματα για τη διασύνδεση με τον αγωγό αλουμινίου. Αυτή η διαδικασία παράγει μια λεπτή μεταλλική μεμβράνη που χρησιμεύσει ως το απαιτούμενο πρότυπο για τη διασύνδεση των διαφόρων συστατικών στο chip. Μια άλλη χρήση της επιμετάλλωσης είναι να παράγει επιμεταλλωμένες περιοχές που ονομάζονται bonding pads στην περιφέρεια του chip για τη συγκόλληση των καλωδίων από το πακέτο στο chip. Τα καλώδια σύνδεσης είναι καλώδια χρυσού διαμέτρου 25μm, και τα τακάκια σύνδεσης είναι περίπου 100×100 mm<sup>2</sup> για την τοποθέτηση των πεπλατυσμένων άκρων των συρμάτων συγκόλλησης.

Το αλουμινίο (Al) είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο υλικό για την επιμετάλλωση των περισσότερων ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και των διακριτών διόδων και τρανζίστορ. Το πάχος της μεμβράνης είναι περίπου 1μm και πλάτος αγωγού περίπου 2 - 25μm. Η χρήση του αλουμινίου προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:



- Έχει ως σχετικά καλή αγωγιμότητα.
- Είναι εύκολο να δημιουργηθούν λεπτά υμενία Al με εξάτμιση υπό κενό.
- Έχει καλή πρόσφυση στην επιφάνεια του διοξειδίου του πυριτίου.
- Το αλουμίνιο σχηματίζει καλούς μηχανικούς δεσμούς με το πυρίτιο με τήξη σε περίπου 500°C ή με κράματα σε θερμοκρασία 577°C.
- Το αλουμίνιο σχηματίζει χαμηλή ωμική αντίσταση που έρχεται σε επαφή με p-τύπου και n-τύπου πυρίτιο.
- Μπορεί να εφαρμοστεί και να διαμορφωμένο με μια ενιαία διαδικασία εναπόθεσης και χαραξής.

Ωστόσο, το αλουμίνιο έχει ορισμένους περιορισμούς:

- Κατά τη διάρκεια της δημιουργίας πακέτων, αν η θερμοκρασία αυξηθεί πολύ, δηλαδή στους 600°C, ή αν υπάρχει υπερθέρμανση λόγω του ρεύματος υπέρτασης, το Al μπορεί να λιώσει και να διεισδύσει στο οξείδιο του πυριτίου και να προκαλέσει βραχυκύκλωμα. Με επαρκή έλεγχο και δοκιμών, οι αποτυχίες μπορεί να ελαχιστοποιηθεί.
- Τα καλώδια συνδέονται με τα τακάκια συγκόλλησης στο chip, αφού το πακέτο μολύβδου είναι συνήθως επιχρυσωμένο. Σε αυξημένες θερμοκρασίες, μία αντίδραση προκαλεί σχηματισμό διαμεταλλικών ενώσεων, γνωστή ως purple plague. Η purple plague είναι ένα από τα έξι φάσεις που μπορεί να συμβεί όταν ο χρυσός και το αλουμίνιο ενωθούν. Λόγω ανόμοιων ρυθμό διάχυσης του χρυσού και του αλουμινίου, δημιουργούνται κενά κατά τη διάρκεια της purple plague. Αυτά τα κενά μπορεί να οδηγήσουν σε εξασθένηση

των δεσμών ή ακόμα και ολική καταστροφική. Το πρόβλημα συνήθως λύνεται με τη χρήση καλωδίων αλουμίνιο ή άλλο μέταλλο, που μπορεί να υποβληθεί σε αυξημένες θερμοκρασίες. Μία μέθοδος είναι να χρησιμοποιηθεί ένα στρώμα χρυσού πάνω και κάτω από το χρώμιο. Το χρώμιο δρα ως ένα φράγμα διάχυσης για το χρυσό και προσκολλάται καλά τόσο στο οξείδιο όσο και στο χρυσό. Ο χρυσός έχει κακή πρόσφυση σε οξείδιο επειδή δεν είναι οξείδιο. Ωστόσο, η διαδικασία χρώμιο-χρυσού είναι συγκριτικά δαπανηρή, και έχει μια ανεξέλεγκτη αντίδραση με το πυρίτιο.

- Το αλουμίνιο μπορεί να προκαλέσει σημαντικές υλικές μεταφορών στα μέταλλα. Αυτό συμβαίνει λόγω της κινητικότητας των ατόμων λόγω της επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου και της σύγκρουσης των ηλεκτρονίων με τα άτομα, η οποία οδηγεί σε μεταφορά ορμής. Σε αγωγούς λεπτής μεμβράνης με επαρκή πυκνότητα ρεύματος κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της συσκευής, η μεταφοράς μπορεί να γίνει σε πολύ χαμηλότερη θερμοκρασία.

Σε γενικές γραμμές οι επιθυμητές ιδιότητες για την επιμετάλλωση των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι οι ακόλουθες:

- Χαμηλή αντίσταση.
- Εύκολο να σχηματίσουν.
- Εύκολο στην χάραξη του μοτίβου παραγωγής.
- Σταθερή σε οξειδωτικό περιβάλλον.
- Μηχανική σταθερότητα με καλή πρόσφυση και χαμηλή πίεση.

- Ομαλότητα της επιφάνειας.
- Σταθερότητα σε όλα τα στάδια, συμπεριλαμβανομένου των υψηλών θερμοκρασιών, της τήξης, της ξηρή ή υγρή οξείδωση, την απορρόφηση του γυαλί φωσφόρου (ή οποιοδήποτε άλλο υλικό) παθητικοποίησης και την επιμετάλλωση.
- Καμία αντίδραση με τελικό μέταλλο, αλουμίνιο.
- Να μην μολύνουν τη συσκευή, την πλακέτα, ή συσκευές που εργάζονται.
- Να εμφανίζει καλά χαρακτηριστικά συσκευής και χρόνο ζωής.

## 6.2 Επιμετάλλωση στα VLSI

Στα VLSI, η εφαρμογή της επιμετάλλωσης μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις ομάδες: πύλες MOSFET, επαφές και διασυνδέσεις. Η επιμετάλλωση διασυνδέει χιλιάδες MOSFETs ή διπολικές συσκευές που χρησιμοποιούν μεταλλικά μοτίβα λεπτής γραμμής. Είναι το ίδιο όπως η επιμετάλλωση πύλης σε MOSFET. Η επιμετάλλωση σε άμεση επαφή με τον ημιαγωγό ονομάζεται επιμετάλλωση επαφής. Μια ταινία πολυπυριτίου χρησιμοποιείται όπως στην επιμετάλλωση πύλης για τη διασύνδεση των συσκευών MOS. Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται ως μέταλλο επαφής, σε συσκευές και σε δεύτερο επίπεδο ως διασύνδεση με τον έξω κόσμο. Αρκετά νέα προγράμματα για την επιμετάλλωση έχουν προταθεί για την παραγωγή ωμικών επαφών σε έναν ημιαγωγό. Σε αρκετές περιπτώσεις έχει προταθεί μια δομή πολλαπλών στρώσεων που περιλαμβάνει ένα φράγμα διάχυσης. Τα τιτάνιο, πλατίνα και χρυσό ή τιτάνιο, παλλάδιο και η δέσμη χρυσού αποτελούν μια επιτυχημένη τεχνολογία για την παροχή σύνδεσης υψηλής αξιοπιστίας με τον έξω κόσμο. Η εφαρμογή οποιουδήποτε καθεστώτος επιμετάλλωσης σε VLSI

εξαρτάται από διάφορες απαιτήσεις. Εντούτοις, οι σημαντικές απαιτήσεις είναι η σταθερότητα της επιμετάλλωσης καθ' όλη τη διαδικασία κατασκευής του ολοκληρωμένου κυκλώματος και η αξιοπιστία της κατά τη διάρκεια της πραγματικής χρήσης των συσκευών.

### **6.3 Διαδικασία επιμετάλλωσης**

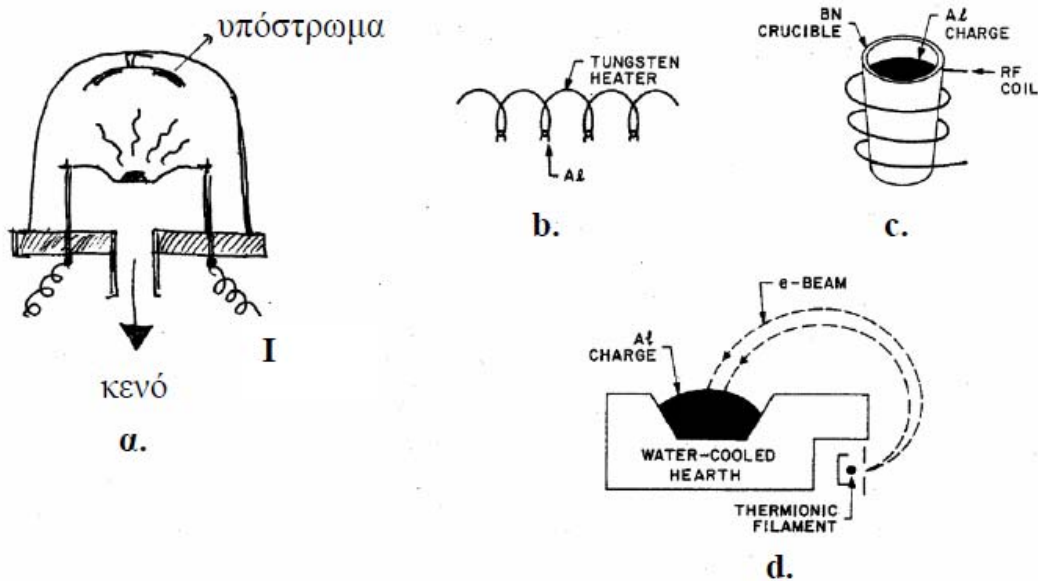
Υπάρχουν δύο είδη επιμετάλλωσης, η χημική εναπόθεση ατμών (CVD) και η φυσική εναπόθεση ατμών. Όπως έχουμε περιγράψει παραπάνω, η χημική εναπόθεση ατμών (CVD) είναι η εναπόθεση ενός στερεού υλικού επάνω σε ένα θερμαινόμενο υπόστρωμα μέσω διάσπασης ή χημικής αντίδρασης των ενώσεων που περιέχονται κατά το πέρασμα του αερίου πάνω από το υπόστρωμα. Πολλά υλικά όπως τα νιτρίδιο πυριτίου, διοξείδιο του πυριτίου, μη-κρυσταλλικό και κρυσταλλικό πυρίτιο μπορούν να εναποτίθενται μέσω της μεθόδου CVD. Όσον αφορά τη φυσική εναπόθεση ατμών υπάρχουν δύο διαφορετικές μέθοδοι, η εξάχνωση (evaporation) και ο θρυμματισμός (sputtering). Ωστόσο, η μέθοδος CVD προσφέρει κάποια σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως η εξαιρετική κάλυψη, η μεγάλη απόδοση και η επεξεργασία σε χαμηλή θερμοκρασία.

Παρόλα αυτά, και οι δύο αυτές μέθοδοι έχουν τρία πανομοιότυπα βήματα:

1. Μετατροπή ενός συμπυκνωμένου υλικού (όπως ένα στερεό) σε αέρια κατάσταση ή ατμό.
2. Μεταφορά του αερίου από την πηγή προς το υπόστρωμα, και
3. Συμπύκνωση του αερίου πηγή στο υπόστρωμα

#### **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 επαγωγική αντίσταση γύρω από δοχείο δύστηκτου (crucible) υλικού BN, πορσελάνης κ.α.



Εικόνα 33: α, b, c: Θάλαμος κενού και πηγές θερμικής εξαχνωσης, d: εξαχνωτής e δέσμης [2]

Η μέθοδος εξαχνωσης είναι χαμηλού κόστους αλλά παρουσιάζει το μειονέκτημα της μόλυνσης με προσμίξεις λόγω των υψηλών θερμοκρασιών που χρησιμοποιούνται στα δοχεία τήξης και εκπέμπονται και εισέρχονται στο λεπτό στρώμα της εναπόθεσης. Η χρήση εξαχνωτή ηλεκτρονικής δέσμης (electron beam evaporator) μπορεί να βελτιώσει την κατάσταση. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιείται επίσης θάλαμος υψηλού κενού μέσα στον οποίο βρίσκεται το σύστημα εξαχνωσης. Την τήξη και εξαχνωση του υλικού προκαλεί μία 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.

### **Θρυμματισμός**

Ο θρυμματισμός (sputtering) είναι μία φυσική διαδικασία που περιλαμβάνει επιτάχυνση βαρέων ιόντων, συνήθως  $Ar^+$ , μέσω ηλεκτρικού πεδίου, και στη συνέχεια βομβαρδισμό του στόχου με το 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).

### **6.4 Μέθοδοι εναπόθεσης**

Στη μέθοδο εξάτμισης, η οποία είναι η πιο απλή, ένα film εναποτίθεται από τη συμπύκνωση του ατμού στο υποστρώμα. Το υπόστρωμα διατηρείται σε χαμηλότερη θερμοκρασία από εκείνη του ατμού. Όλα τα μέταλλα εξατμίζονται όταν θερμαίνεται σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες. Διάφορες μέθοδοι θέρμανσης χρησιμοποιούνται για την επίτευξη αυτών των θερμοκρασιών. Για παράδειγμα, για την εναπόθεση του Al, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επαγωγική αντίσταση (RF), βομβαρδισμός ηλεκτρονίων (electron-gun) ή θέρμανση με λέιζερ. Για πυρίμαχα μέταλλα, ο

βομβαρδισμός ηλεκτρονίων είναι πολύ συχνός, αφού η θέρμανση με ηλεκτρική αντίσταση έχει χαμηλή απόδοση. Ο βομβαρδισμός ηλεκτρονίων μπορεί να προκαλέσει βλάβη ακτινοβολίας, αλλά με θερμική επεξεργασία είναι δυνατόν να αποτραπεί. Αυτή η μέθοδος έχει πλεονέκτημα επειδή οι εξατμίσεις πραγματοποιούνται σε χαμηλή πίεση. Αυτό καθιστά την παγίδευση του αερίου αμελητέα. Η θέρμανση της εξάτμισης πηγής με επαγωγική αντίσταση θα μπορούσε να αποδειχθεί ο καλύτερος συμβιβασμός στην παροχή μεγάλων throughput, καθαρό περιβάλλον, και ελάχιστα επίπεδα βλάβης ακτινοβολίας.

Στη μέθοδο απόπτωσης, το υλικό βομβαρδίζεται από ενεργητικά ιόντα για να απελευθερώσει κάποια άτομα. Αυτά τα άτομα, στη συνέχεια συμπυκνώνονται στο υποστρώματος για σχηματισμό ενός film. Αυτού του είδους η επιμετάλλωση, σε αντίθεση με την εξάτμιση, είναι καλά ελεγχόμενη και εφαρμόσιμη σε όλα τα μέταλλα, σε κράματα, ημιαγωγούς και μονωτές. Η μέθοδος της επαγωγικής αντίστασης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για απόθεση μετάλλου. Η εναπόθεση film κράματος με επιμετάλλωση είναι δυνατή επειδή η σύνθεση του film είναι κλειδωμένο στη σύνθεση του στόχου. Αυτό ισχύει ακόμη και όταν υπάρχει σημαντική διαφορά στα ποσοστών των συστατικών του κράματος. Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι ενώσεις μπορούν να εναποτίθενται με επιμετάλλωση του μετάλλου. Έτσι, αέρια όπως το μεθάνιο, η αμμωνία, το άζωτο, και το διβόραιο μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο θάλαμο διασκόρπισης και να κατατέθει καρβίδιο, νιτρίδιο και βορίδιο, αντίστοιχα. Αυτή η τεχνική ονομάζεται αντιδραστική επιμετάλλωση. Η επιμετάλλωση πραγματοποιείται σε σχετικά υψηλές πιέσεις (0,1 έως 1 pascal ή Pa). Οι ταινίες συνήθως καταλήγουν συμπεριλαμβανομένης μικρή ποσότητα του φυσικού αερίου. Η επιμετάλλωση είναι μια φυσική διαδικασία στην οποία το film εναποτίθενται και εκτίθεται σε βομβαρδισμό ιόντων. Ο βομβαρδισμός ιόντων μπορεί να προκαλέσει βλάβη αφού μπορεί να οδηγεί σε ανεπιθύμητα εσωτερικά ηλεκτρικά πεδία που επηρεάζουν την συσκευή.

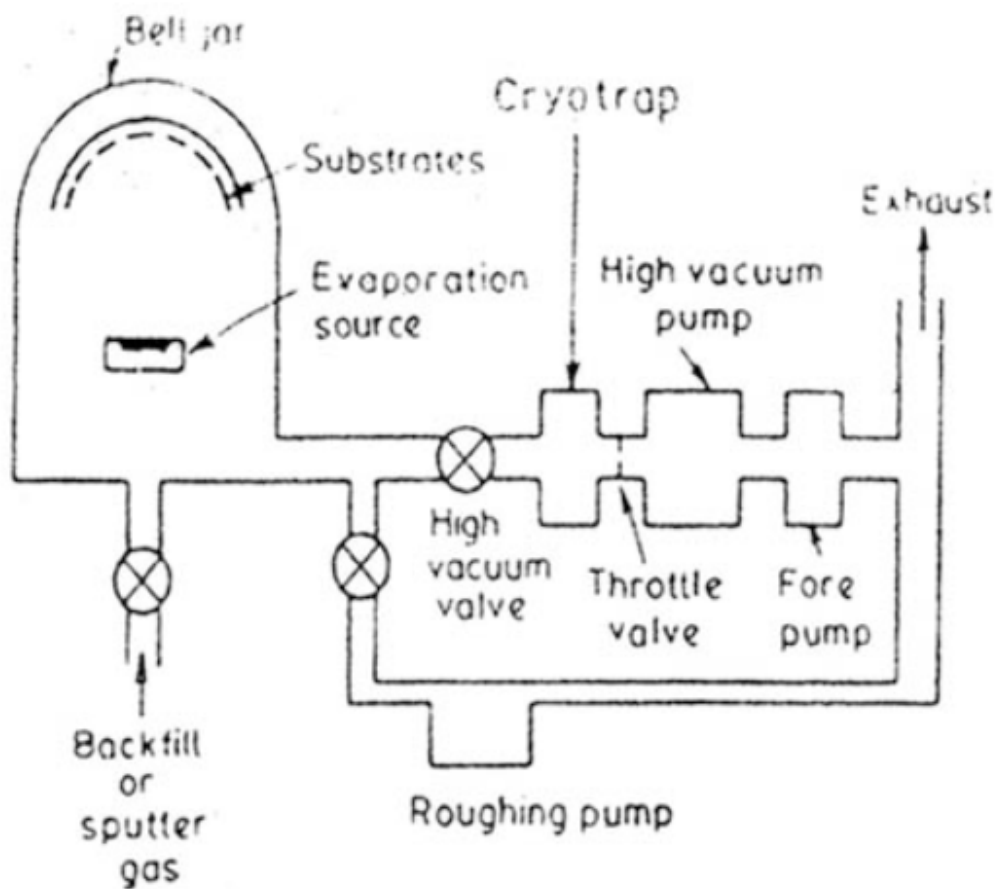
Ωστόσο, τέτοιες ζημιές μπορεί να αποτρεπούν σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες (<500°C), εκτός αν η ζημιά είναι τόσο σοβαρή ώστε να προκαλέσει μη αναστρέψιμη βλάβη του διηλεκτρικού πύλης.

## 6.5 Συσκευές εναπόθεσης

Η επιμετάλλωση γίνεται συνήθως σε θαλάμους κενού. Μια μηχανική αντλία μπορεί να μειώσει την πίεση από 10 σε 0,1 Pa. Τέτοια πίεση είναι επαρκής για LPCVD. Μία αντλία ελαίου-διάχυσης μπορεί να μειώσει την πίεση στα  $10^{-5}$  Pa και με τη βοήθεια μίας παγίδας υγρού αζώτου σε  $10^{-7}$  Pa. Εκτός από το σύστημα άντλησης, μετρητές πίεσης και ελέγχου, αναλυτές αερίων, αισθητήρες θερμοκρασίας και η δυνατότητα καθαριότητας της επιφάνειας των πλακιδίων με backspattering, έλεγχο της μόλυνσης και των πολλαπλών φυσικών αερίων, καθώς και η χρήση του αυτοματισμού θα πρέπει να αξιολογηθούν.

Μια τυπική συσκευή εξάτμισης υψηλού κενού φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.





Εικόνα 34: Διαδικασία επιμετάλλωσης [31]

Η συσκευή αποτελείται από ένα θάλαμο κενού, ένα ανοξείδωτο κυλινδρικό δοχείο από χάλυβα που κλείνεται στο επάνω και σφραγίζεται στη βάση από μία τσιμούχα. Ξεκινώντας με ατμοσφαιρική πίεση το δοχείο εκκενώνεται από μία αντλία στα 20 Pa ή ενός συνδυασμού μηχανικής αντλίας και υγρού ψυχρού αζώτου που μειώνει την Ιο πίεση περίπου στα 0,5 Pa. Σε κατάλληλη πίεση, ο θάλαμος κενού ανοίγει σε ένα σύστημα άντλησης υψηλού κενού που συνεχίζει να μειώνει η πίεση. Το υψηλού κενού σύστημα άντλησης μπορεί να αποτελείται από παγίδα υγρού ψυχρού αζώτου και μία αντλία ελαίου-διάχυσης, μια παγίδα και turbomolecular αντλία, ή μία παγίδα και ένα κλειστό κύκλωμα cryopump αντλίας ήλιου. Η cryopump λειτουργεί

ως παγίδα και πρέπει να αναγεννιέται σε τακτά χρονικά διαστήματα, η turbomolecular και οι αντλίες διάχυσης λειτουργούν ως αντλίες μεταφοράς, αποβάλλοντας το φυσικό αέριο τους σε μία προαντλία. Το σύστημα άντλησης σε υψηλό κενό φέρνει το θάλαμο κενού σε χαμηλή πίεση που είναι ανεκτή για τη διαδικασία εναπόθεσης.

Όλα τα συστατικά στο θάλαμο καθαρίζονται χημικά και ξηραίνονται. Η απουσία μολύνσεων από το νάτριο είναι ζωτικής σημασίας κατά την επίστρωση διατάξεων MOS.

Το σύστημα θρυμματισμού λειτουργεί με περίπου 1 Pa πίεση αργού κατά τη διάρκεια της απόθεσης film. Στον θρυμματισμό, μία βαλβίδα πεταλούδας θα πρέπει να τοποθετηθεί μεταξύ της παγίδας και του συστήματος άντλησης υψηλού κενού. Η πίεση αερίου αργού μπορεί να διατηρηθεί με τη μείωση της αποτελεσματικής ταχύτητα άντλησης της αντλίας υψηλού κενού, ενώ χρησιμοποιείται η πλήρης ταχύτητα άντλησης της παγίδας για υδρατμό. Οι υδρατμοί και το οξυγόνο είναι επιζήμια για την ποιότητα της ταινίας με πιέσεις περίπου 10-2 Pa.

## Βιβλιογραφία

### 1. Ηλεκτρονικά βιβλία

[1] Ολοκληρωμένα κυκλώματα:

[http://www.lib.ntua.gr/gr/el\\_sources/ebooks/kagiafas/CHAPTER11.pdf](http://www.lib.ntua.gr/gr/el_sources/ebooks/kagiafas/CHAPTER11.pdf)

[2] Ολοκληρωμένα κυκλώματα:

[https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CCwQFjAC&url=http%3A%2F%2Fcourses.dbnet.ntua.gr%2Ffsr%2F8606%2Ffylad%2Ftsamak%2Ftsamak%2Ftsamak.pdf&ei=MP2GVdKYFqmywOpxpcQ&usq=AFQjCNHqsHmwyNJBV4aq\\_wNpotBPI1LdKA&sig2=YOHOdaJ8sAOt6OD7AWUH5Q&bvm=bv.96339352,d.bGQ](https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0CCwQFjAC&url=http%3A%2F%2Fcourses.dbnet.ntua.gr%2Ffsr%2F8606%2Ffylad%2Ftsamak%2Ftsamak%2Ftsamak.pdf&ei=MP2GVdKYFqmywOpxpcQ&usq=AFQjCNHqsHmwyNJBV4aq_wNpotBPI1LdKA&sig2=YOHOdaJ8sAOt6OD7AWUH5Q&bvm=bv.96339352,d.bGQ)

[3] Λιούπης Δ.; Στεφανιδάκης Μ., Βασικές Έννοιες Ψηφιακών Κυκλωμάτων, Πανεπιστήμιο Πατρών. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://www.ceidnotes.net/view/%CE%A8%CE%B7%CF%86%CE%B9%CE%B1%CE%BA%CE%AC+%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CE%B9%CE%BA%CE%AC/Digital%20Electronics%20book.pdf>

[4] Καπνίτσας Α.; Καραγκούνης Α., Ψηφιακά Ολοκληρωμένα Κυκλώματα CMOS, Τεχνικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα (Τ.Ε.Ι) Στερεάς Ελλάδας, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών, Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών ΤΕ. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

[http://www.eln.teilam.gr/sites/default/files/\\_%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%9A%CE%9B%CE%97%CE%A1%CE%A9%CE%9C%CE%95%CE%9D%CE%91\\_%CE%9A%CE%A5%CE%9A%CE%9B%CE%A9%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%91\\_0.pdf](http://www.eln.teilam.gr/sites/default/files/_%CE%9F%CE%9B%CE%9F%CE%9A%CE%9B%CE%97%CE%A1%CE%A9%CE%9C%CE%95%CE%9D%CE%91_%CE%9A%CE%A5%CE%9A%CE%9B%CE%A9%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%91_0.pdf)

[5] Αραπογιάννη Α., Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://opencourses.uoa.gr/courses/DI31/>

2. Πηγές από το διαδίκτυο

[6] Ολοκληρωμένο κύκλωμα. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CE%BB%CE%BF%CE%BA%CE%BB%CE%B7%CF%81%CF%89%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%BF\\_%CE%BA%CF%8D%CE%BA%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9F%CE%BB%CE%BF%CE%BA%CE%BB%CE%B7%CF%81%CF%89%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%BF_%CE%BA%CF%8D%CE%BA%CE%BB%CF%89%CE%BC%CE%B1)

[7] Integrated circuit. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated\\_circuit](https://en.wikipedia.org/wiki/Integrated_circuit)

[8] Ολοκληρωμένο κύκλωμα. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

[http://ilektroaytomatismoi.blogspot.gr/2014/05/263\\_22.html](http://ilektroaytomatismoi.blogspot.gr/2014/05/263_22.html)

[9] Φωτολιθογραφία. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

[http://www.physics.upatras.gr/~mytilinaiou/lecture4\\_06.pdf](http://www.physics.upatras.gr/~mytilinaiou/lecture4_06.pdf)

[10] Photoresist. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Photoresist>

[11] Positive and Negative Photoresist. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://www.ece.gatech.edu/research/labs/vc/theory/PosNegRes.html>

[12] Κατασκευή διατάξεων μικροηλεκτρονικής. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY482/notes/manufacturing.pdf>

[13] Ion implantation. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Ion\\_implantation](https://en.wikipedia.org/wiki/Ion_implantation)

[14] Ion implantation and Diffusion. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://www.faadooengineers.com/threads/918-VLSI-Techniques-Diffusion-Ion-Implantation-Etching-Photo-Lithography>

[15] Ion implantation. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://www.circuitstoday.com/ion-implantation>

[16] Ion implantation. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<https://www.eng.tau.ac.il/~yosish/courses/vlsi1/I-5-ion-implantation.pdf>

[17] Ion implantation. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

[https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0CEkQFjAFahUKEwi7houhx5HHAhWBNT4KHd20DYg&url=https%3A%2F%2Fece.uwaterloo.ca%2F~bcui%2Fcontent%2FNE%2520343%2FChapter%25208%2520Ion%2520implantation%2520\\_%2520I.pptx&ei=pM3BVbukPIHr-AHd6bbACA&usg=AFQjCNEJHgZSpqzqIpAghg57\\_SOEOkyaUw&sig2=Jzyv-Ci5mGs62MMsmM9N-A](https://www.google.gr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0CEkQFjAFahUKEwi7houhx5HHAhWBNT4KHd20DYg&url=https%3A%2F%2Fece.uwaterloo.ca%2F~bcui%2Fcontent%2FNE%2520343%2FChapter%25208%2520Ion%2520implantation%2520_%2520I.pptx&ei=pM3BVbukPIHr-AHd6bbACA&usg=AFQjCNEJHgZSpqzqIpAghg57_SOEOkyaUw&sig2=Jzyv-Ci5mGs62MMsmM9N-A)

[18] Introduction to ion implantation. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://people.rit.edu/lffeee/IMPLANT.pdf>

[19] Introduction to ion implantation. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

[http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee143/fa10/lectures/Lec\\_08.pdf](http://www-inst.eecs.berkeley.edu/~ee143/fa10/lectures/Lec_08.pdf)

[20] Ion implantation. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://users.ece.gatech.edu/~alan/ECE6450/Lectures/ECE6450L5-Ion%20Implantation.pdf>

[21] Diffusion of Impurities for IC Fabrication. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://www.circuitstoday.com/diffusion-of-impurities-for-ic-fabrication>

[22] Diffusion. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://personal.cityu.edu.hk/~appkchu/AP4120/8.PDF>

[23] Diffusion in Silicon. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

[http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS&COMPONENTS/Xe\\_damage/Diffusionin%20siliconpdf.pdf](http://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/MATERIALS&COMPONENTS/Xe_damage/Diffusionin%20siliconpdf.pdf)

[24] DIFFUSION, OXIDATION AND ION IMPLANTATION. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://www.newagepublishers.com/samplechapter/001946.pdf>

[25] Oxidation – Basics. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://nptel.ac.in/courses/103106075/29>

[26] Oxidation Process in IC Fabrication. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://www.circuitstoday.com/oxidation-process-in-ic-fabrication>

[27] Thermal oxidation. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal\\_oxidation](https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_oxidation)

[28] INTEGRATED CIRCUIT FABRICATION (OXIDATION). Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<https://inahza.files.wordpress.com/2012/03/2-2-integrated-circuit-fabrication-process-oxidation-student.pdf>

[29] Metallization Process. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://www.circuitstoday.com/metallization-process>

[30] Chemical Vapor Deposition (CVD). Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://www.circuitstoday.com/chemical-vapour-deposition-cvd>

[31] Metallization Process. Διαθέσιμο από το διαδικτυακό τόπο:

<http://www.circuitstoday.com/metallization-process>