



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικό και Καποδιστριακό  
Πανεπιστήμιο Αθηνών

---

**Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων**

**Ενότητα Α: Τεχνολογία Σχεδίασης Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων**

**Κεφάλαιο 2: Ανάπτυξη Κρυστάλλων-Προετοιμασία δισκίων-Επιταξία.**

Αραπογιάννη Αγγελική

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών.

---



1. Σκοποί ενότητας .....	4
2. Περιεχόμενα ενότητας.....	4
3. Η κρυσταλλική δομή του Si .....	4
4. Ατέλειες στους κρυστάλλους.....	5
5. Καθαρισμός του πυριτίου.....	6
6. Ανάπτυξη μονοκρυστάλλων πυριτίου .....	7
6.1 Η μέθοδος Czochralski .....	7
6.2 Η μέθοδος Κινητής Ζώνης (Float Zone).....	11
7. Προετοιμασία Πλακετών (Δισκίων).....	13
8. Επιταξία.....	15

## 1. Σκοποί ενότητας

Στο πρώτο μέρος, αναπτύσσονται οι μεθοδολογίες και οι τεχνικές φυσικού σχεδιασμού και κατασκευής των Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων σε 5 υποενότητες. Η δεύτερη υπο-ενότητα περιγράφει τις κρυσταλλικές δομές, την προετοιμασία των δισκίων και τη διαδικασία της ειπταξίας.

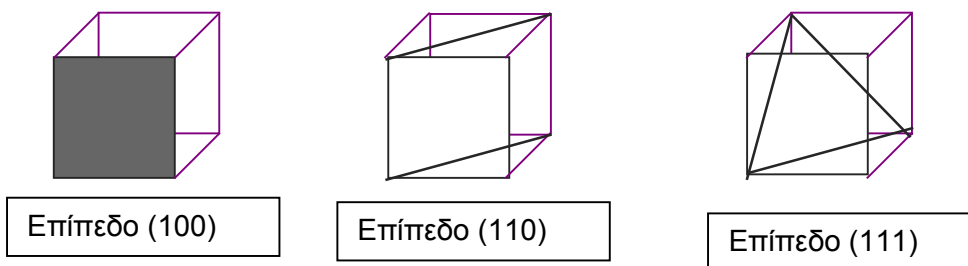
## 2. Περιεχόμενα ενότητας

Το πυρίτιο είναι το υλικό που κυριαρχεί ακόμη σήμερα στη βιομηχανία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, παρ' όλο που έχουν γίνει προσπάθειες να χρησιμοποιηθούν και άλλα υλικά όπως το Ge, το GaAs κ.ά. Αυτό οφείλεται κυρίως στη μεγάλη φυσική και χημική σταθερότητα του Si με τη θερμοκρασία και στις εξαιρετικές ιδιότητες της φυσικής προστατευτικής στιβάδας του SiO<sub>2</sub>. Επειδή δε το Si χρησιμοποιείται με την κρυσταλλική του μορφή για την κατασκευή των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, κρίνεται απαραίτητη η γνώση ορισμένων κρυσταλλογραφικών χαρακτηριστικών του και της επίδρασης του προσανατολισμού του κρυστάλλου πάνω στη διαδικασία κατασκευής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων.

## 3. Η κρυσταλλική δομή του Si

Το πυρίτιο είναι ένα στοιχείο της Ομάδας IV του περιοδικού πίνακα. Έχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους και κρυσταλλώνεται με πλεγματική δομή διαμαντιού (κυβικό εδροκεντρωμένο σύστημα). Η ελάχιστη απόσταση μεταξύ δύο ατόμων Si είναι 2,35 Å ενώ η ακμή του κύβου στο πλέγμα διαμαντιού είναι 5,428 Å.

Τα κρυσταλλογραφικά επίπεδα παρίστανται σε ένα σύστημα ορθογωνίων αξόνων από τους δείκτες Miller, οι οποίοι ορίζονται σαν τα αντίστροφα των τομών του επιπέδου με τους κύριους άξονες, κανονικοποιημένα έτσι ώστε οι δείκτες να είναι ακέραιοι αριθμοί. Στο σχήμα 2.1 φαίνονται τρία από τα βασικά κρυσταλλικά επίπεδα και οι δείκτες Miller αυτών.



Σχήμα 2. 1: Δείκτες Miller

Λόγω της συμμετρίας ενός κυβικού κρυστάλλου (και δεδομένου ότι θεωρούμε ότι ο κρύσταλλος είναι φτιαγμένος από έναν άπειρο αριθμό όμοιων κύβων), τα επίπεδα που παρίστανται από τα (100), (010), (001), (-100), (0-10) και (00-1) είναι ισοδύναμα. Κατά σύμβαση αυτή η οικογένεια επιπέδων συμβολίζεται σαν {100}. Επίσης είναι χρήσιμο να ορίσουμε ένα σύνολο διευθύνσεων καθέτων προς τα κρυσταλλικά επίπεδα. Για έναν κυβικό κρύσταλλο π.χ. η διεύθυνση [111] είναι κάθετη προς το επίπεδο (111). Το σύνολο των διευθύνσεων για ένα ισοδύναμο σύνολο επιπέδων συμβολίζεται με <111>.

Στην πράξη έχει βρεθεί ότι υπάρχουν σημαντικές διαφορές σε ορισμένες φυσικές παραμέτρους και επομένως στις επιδόσεις των διατάξεων, ανάλογα με το κρυσταλλικό επίπεδο που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή τους. Για όλες σχεδόν τις διατάξεις χρησιμοποιείται Si με κρυσταλλογραφικούς προσανατολισμούς (111) ή (100). Όλοι οι άλλοι προσανατολισμοί εν γένει απορρίπτονται.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι προσδιορισμού του προσανατολισμού ενός κρυστάλλου πυριτίου. Αυτοί χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: σε οπτικούς και με ακτίνες-Χ. Στις οπτικές μεθόδους, είτε απαιτούνται προηγούμενες γνώσεις για τον τρόπο παραγωγής του κρυστάλλου είτε οδηγούν σε καταστροφή του. Για το λόγο αυτό προτιμάται η μέθοδος περίθλασης με ακτίνες-Χ, η οποία όμως απαιτεί πιο πολύπλοκο εξοπλισμό.

Γενικά ο κρυσταλλογραφικός προσανατολισμός επιδρά στην κατασκευή των διατάξεων κατά τρεις τρόπους: στο διαχωρισμό των τσιπς της πλακέτας, στην ισότροπη απόθεση των επιταξιακών στρωμάτων και στη μείωση των επιφανειακών καταστάσεων φορτίων στις διατάξεις MOS.

#### 4. Ατέλειες στους κρυστάλλους

Στην πράξη είναι αδύνατον να αναπτυχθούν απόλυτα τέλειοι κρύσταλλοι. Επίσης κρυσταλλογραφικές ατέλειες μπορεί να δημιουργηθούν και κατά τις διαδικασίες επεξεργασίας του κρυστάλλου και των δισκίων Si. Οι ατέλειες αυτές μπορούν να διαιρεθούν σε σημειακές ατέλειες, γραμμικές ατέλειες και εκτεταμένες ατέλειες.

- α) **Σημειακές ατέλειες.** Η στοιχειώδης σημειακή ατέλεια είναι το πλεγματικό κενό (vacancy), κατά την οποία θερμικές διαταραχές προκαλούν την μετακίνηση ενός ατόμου από μια πλεγματική θέση προς την επιφάνεια. Αυτή ονομάζεται ατέλεια Schottky και η ενέργεια δημιουργίας της,  $E_s$ , στο πυρίτιο είναι 2,3eV. Η πυκνότητα,  $n_s$ , κατά τη θερμοδυναμική ισορροπία των ατελειών Schottky δίνεται από τη σχέση:  $n_s = N \exp\left(\frac{-E_s}{kT}\right)$  όπου  $N$  είναι η πυκνότητα ατόμων του κρυστάλλου ( $5,02 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-3}$  για το Si),  $k$  η σταθερά του Boltzmann και  $T$  η θερμοκρασία σε βαθμούς Kelvin. Ένα ενδοπλεγματικό άτομο (interstitial atom) είναι ένα άτομο τοποθετημένο σε μια θέση του κρυσταλλικού πλέγματος που κανονικά θα ήταν κενή. Υπάρχουν πέντε τέτοιες κενές θέσεις στην κυβική παράσταση του κρυσταλλικού πλέγματος διαμαντιού. Η ενέργεια δημιουργίας ενός ενδοπλεγματικού ατόμου είναι συγκρίσιμη με αυτή του πλεγματικού κενού. Το ζεύγος πλεγματικό κενό - ενδοπλεγματικό άτομο ονομάζεται ατέλεια Frenkel. Αυτή συμβαίνει όταν μια θερμική διαταραχή αναγκάζει ένα πλεγματικό άτομο να κινηθεί από μια θέση του πλέγματος σε ένα γειτονικό ενδοπλεγματικό κενό. Η ενέργεια δημιουργίας της ατέλειας αυτού του τύπου,  $E_F$ , είναι μεταξύ 0,5 και 1eV, δηλ. σημαντικά μικρότερη από αυτή της ατέλειας Schottky. Η πυκνότητα στη θερμοδυναμική ισορροπία των ατελειών Frenkel,  $n_F$ , δίνεται από τη σχέση:

$$n_F = \sqrt{NN'} \exp\left(\frac{-E_F}{2kT}\right)$$

όπου  $N'$  είναι η πυκνότητα των ενδοπλεγματικών θέσεων που υπάρχουν ( $3,14 \cdot 10^{22} \text{cm}^{-3}$  για το Si). Αυτή η εξίσωση ισχύει μόνο σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας. Η πυκνότητα των ατελειών Frenkel σε έναν πραγματικό κρύσταλλο είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την τιμή θερμοδυναμικής ισορροπίας. Ο σχηματισμός ενός πλεγματικού κενού έχει σαν αποτέλεσμα το σπάσιμο τεσσάρων ομοιοπολικών δεσμών. Ο σχηματισμός ενός πλεγματικού κενού γειτονικού σε ένα υπάρχον πλεγματικό κενό ονομάζεται divacancy και απαιτείτο σπάσιμο ακόμα δύο ομοιοπολικών δεσμών. Επομένως απαιτεί μικρότερη ενέργεια. Η divacancy συναντάται συχνά στο Si. Ξένα άτομα μπορούν να μπουν στο πλέγμα του Si είτε

στα ενδοπλεγματικά κενά είτε σε αντικατάσταση ατόμων Si. Μερικοί τύποι προσμίξεων βρίσκονται συνήθως σε ενδοπλεγματικές θέσεις όπως π.χ. το νικέλιο, ο ψευδάργυρος, ο χαλκός, ο σίδηρος, το κοβάλτιο και το μαγνήσιο. Άλλες, όπως ο χρυσός, βρίσκονται είτε σε ενδοπλεγματικές θέσεις (περίπου 10%) είτε σε θέσεις αντικατάστασης. Υπάρχει όμως μια σημαντική τάξη προσμίξεων, οι οποίες σε μικρές συγκεντρώσεις, βρίσκονται συνήθως σε θέσεις αντικατάστασης. Αυτά είναι τα στοιχεία των Ομάδων III και V του περιοδικού πίνακα και κυρίως τα βόριο, αργίλιο, γάλλιο, ίνδιο, φωσφόρος, αρσενικό και αντιμόνιο. Αυτά τα στοιχεία είναι υπεύθυνα για τη μεγάλη κλίμακα ηλεκτρικών αγωγιμοτήτων που μπορούμε να πετύχουμε στο Si καθώς και για τη δυνατότητα δημιουργίας περιοχών μέσα στις οποίες επικρατεί είτε η αγωγιμότητα των οπών είτε η αγωγιμότητα των ηλεκτρονίων. Η αντικατάσταση ατόμων Si από άτομα προσμίξεων έχει σαν αποτέλεσμα την εμφάνιση μηχανικών τάσεων (stress) μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα, λόγω του διαφορετικού ενεργού τους μεγέθους. Ένα τέλειο κρυσταλλικό πλέγμα επιτυγχάνεται μόνο όταν η απόσταση των ατόμων δημιουργεί συνθήκες ελάχιστης ενέργειας. Από τις προσμίξεις αντικατάστασης, το αρσενικό είναι το μόνο που ταιριάζει τέλεια στο πλέγμα του Si διότι έχει ίση ενεργό ακτίνα με αυτό. Από μεταλλουργική άποψη, υπάρχει ένα όριο στη συγκέντρωση των προσμίξεων που μπορούν να μπουν στο κρυσταλλικό πλέγμα χωρίς να διαταράξουν σοβαρά τη δομή του. Το όριο αυτό ονομάζεται όριο στερεάς διαλυτότητας (solid solubility) της πρόσμιξης.

β) **Εξαρθρώσεις (dislocations) ή γραμμικές ατέλειες** σχηματίζονται από την επίδραση τάσεων πάνω στον κρύσταλλο καθώς ψύχεται από το τήγμα.

Παραμορφώσεις χείλους ή ορίου (edge dislocations) εμφανίζονται όπου τελειώνει ένα πρόσθετο φύλλο (επίπεδο) ατόμων. Η ενέργεια που συνδέεται με τη δημιουργία μιας τέτοιας παραμόρφωσης είναι περίπου 30eV/ατομικό μήκος. Ανάλογες είναι οι παραμορφώσεις βίδας, με ενέργεια δημιουργίας μεταξύ 10 και 20 eV/ατομικό μήκος.

γ) **Σφάλματα στρωμάτωσης (stacking faults)** συμβαίνουν όταν υπάρχει απόκλιση από την κανονική σειρά απόθεσης των διαφόρων επιπέδων του κρυστάλλου και μόνο όταν τα διαδοχικά στρώματα είναι διαφορετικά. Αυτό μπορεί να συμβεί κατά την επιταξιακή ανάπτυξη ή όταν έχουν δημιουργηθεί κλειστές περιοχές ατελειών μέσα στον κρύσταλλο κατά τη διάρκεια διαδικασιών υψηλής θερμοκρασίας μετά την ανάπτυξη του κρυστάλλου (π.χ. οξειδωση).

δ) **Διδυμοποίηση (twinning)** συμβαίνει όταν δύο τμήματα του κρυστάλλου με διαφορετικούς προσανατολισμούς μοιράζονται ένα κοινό επίπεδο ατόμων. Αυτό μπορεί να συμβεί αν το πυρίτιο υποστεί πίεση (restriction) κατά την ανάπτυξή του από το τήγμα.

ε) **Κοκκώδη όρια (grain boundaries)** εμφανίζονται μεταξύ μονοκρυσταλλικών περιοχών ενός πολυκρυσταλλικού υλικού. Έχουν σημαντική επίδραση στην επεξεργασία και στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά των ημιαγωγών. Στρώματα πολυκρυσταλλικού πυριτίου χρησιμοποιούνται στην κατασκευή ορισμένων διατάξεων MOS.

## 5. Καθαρισμός του πυριτίου

Το πυρίτιο είναι το δεύτερο σε αφθονία συστατικό του φλοιού της γης. Συναντάται σε διάφορες ενώσεις, κυρίως όμως σε συνδυασμό με το οξυγόνο στο SiO<sub>2</sub>. Στο πυρίτιο που χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη κρυστάλλων για την κατασκευή διατάξεων ημιαγωγών είναι απαραίτητο να περιορίσουμε όλες τις ηλεκτρικά ενεργές προσμίξεις σε συγκεντρώσεις μικρότερες από ένα μέρος στο δισεκατομμύριο (1ppb) σε ατομική βάση.

Το πρώτο βήμα στον καθαρισμό του Si είναι η αναγωγή του SiO<sub>2</sub> σε Si. Το αποτέλεσμα είναι Si μεταλλουργικής ποιότητας με καθαρότητα 98%. Για να καθαριστεί παραπέρα το Si αυτό μετατρέπεται κατά προτίμηση σε HSiCl<sub>3</sub>, το οποίο κατόπιν καθαρίζεται με απόσταξη. Πολυκρυσταλλικό πυρίτιο

ποιότητας ημιαγωγού παίρνουμε με αντίδραση του  $\text{HSiCl}_3$  με  $\text{H}_2$  σε θερμοκρασίες μεταξύ 1000 και 1200°C. Το πολυκρυσταλλικό πυρίτιο αποτίθεται πάνω σε ένα λεπτό κύλινδρο από πολυκρυσταλλικό πυρίτιο που χρησιμοποιείται σαν αντίσταση θέρμανσης. Για αποθέσεις μεγάλης διαμέτρου, τυπικά 200mm, ο χρόνος απόθεσης είναι μερικές εκατοντάδες ώρες.

## 6. Ανάπτυξη μονοκρυστάλλων πυριτίου

Αφού παραχθεί το στοιχειώδες Si υψηλής καθαρότητας, υφίσταται κατάλληλη επεξεργασία ώστε να πάρει τη μορφή μονοκρυστάλλου με αυστηρά προκαθορισμένη περιεκτικότητα προσμίξεων, οι οποίες καθορίζουν το είδος της αγωγιμότητας (τύπου p ή n) και την ειδική αντίσταση του ημιαγωγού. Η μονοκρυσταλλική μορφή του Si είναι απαραίτητη για την κατασκευή διατάξεων ημιαγωγών διότι τα κοκκώδη όρια που εμφανίζονται στα πολυκρυσταλλικά υλικά μειώνουν την ευκινησία των φορέων και εμποδίζουν τον έλεγχο των χαρακτηριστικών των επαφών p-n.

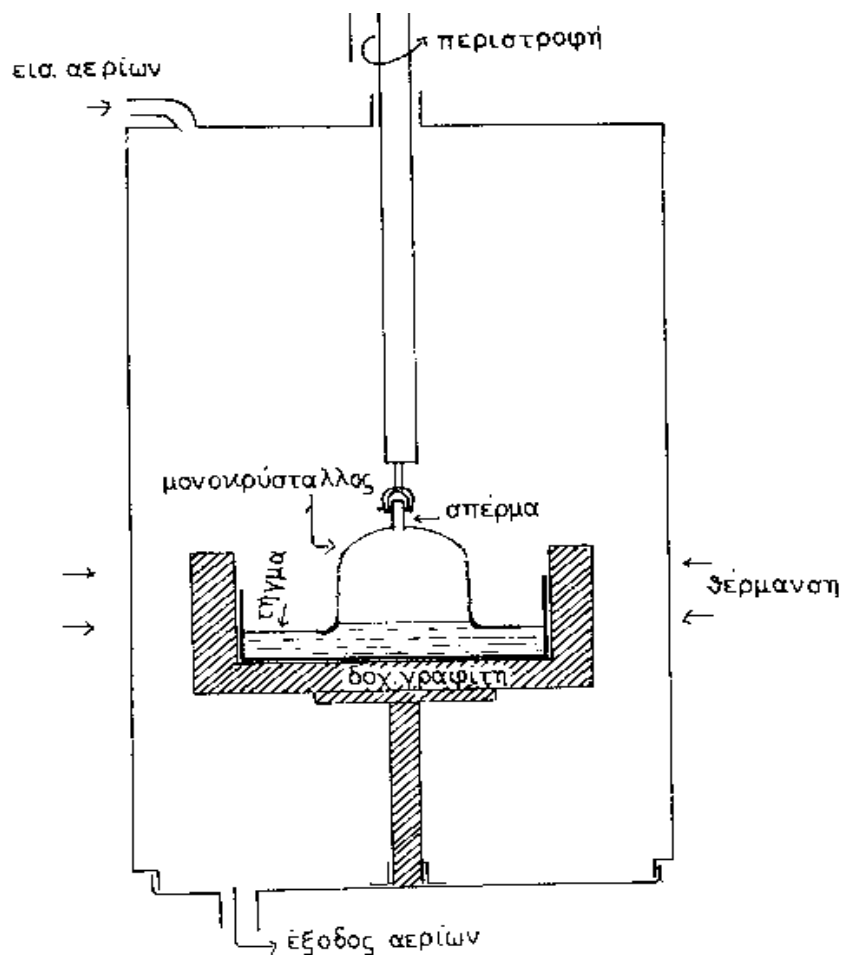
Δύο είναι οι βασικές απαιτήσεις της συνεχώς αναπτυσσόμενης βιομηχανίας ημιαγωγών. Πρώτον, απαιτήσεις ως προς την ποιότητα του κρυστάλλου και των πλακετών που προέρχονται από αυτόν, λόγω της αυξανόμενης πυκνότητας των στοιχείων που περιλαμβάνουν τα ολοκληρωμένα κυκλώματα και δεύτερον, απαιτήσεις για αύξηση της διαμέτρου των πλακετών ( η οποία τείνει να φτάσει τα 200mm) που αποσκοπεί στην αύξηση της παραγωγής.

Σήμερα δύο μέθοδοι χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά για την ανάπτυξη κρυστάλλων ποιότητας ημιαγωγού: Η μέθοδος Czochralski, με την οποία παράγεται το μεγαλύτερο μέρος του Si που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ολοκληρωμένων κυκλωμάτων. Η δεύτερη μέθοδος είναι η μέθοδος κινητής ζώνης, που χρησιμοποιείται για την παραγωγή κρυστάλλων κυρίως για την κατασκευή διάκριτων διατάξεων ισχύος.

### 6.1 Η μέθοδος Czochralski

Η μέθοδος Czochralski ανακαλύφθηκε το 1917 και χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την παρασκευή υλικού ημιαγωγών από τους Teal και Little το 1950. Η διαδικασία Czochralski συνίσταται στη βύθιση ενός μικρού “σπέρματος” (seed) μονοκρυστάλλου σε λιωμένο Si και στο αργό τράβηγμα του σπέρματος αυτού με ταυτόχρονη περιστροφή του.

Η συσκευή που χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη κρυστάλλων με τη μέθοδο Czochralski φαίνεται στο σχήμα 2.2. Η συσκευή αυτή αποτελείται από ένα δοχείο από τηγμένο χαλαζία μέσα στο οποίο τοποθετείται πολυκρυσταλλικό πυρίτιο ποιότητας ημιαγωγού. Το δοχείο αυτό είναι τοποθετημένο μέσα σε έναν υποδοχέα από γραφίτη. Όλο αυτό το σύστημα βρίσκεται μέσα σε ένα κλειστό θάλαμο σε ατμόσφαιρα συνήθως Αργού υπό πίεση είτε ελαφρώς μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική είτε μειωμένη 1 ως 50 torr. Το πυρίτιο μέσα στο σύστημα δοχείου-υποδοχέα θερμαίνεται είτε με RF είτε με θερμαντική αντίσταση μέχρι να λιώσει.



Σχήμα 2. 2: Η συσκευή παραγωγής κρυστάλλων.

Η θέρμανση με αντίσταση προσφέρει ορισμένα πλεονεκτήματα σε σχέση με τη θέρμανση με RF, όπως: χαμηλότερο κόστος συντήρησης, χαμηλότερο αρχικό κεφάλαιο για εξοπλισμό, ευκολία επέκτασης σε μεγαλύτερους φόρτους και πιο αποδοτική χρήση ισχύος, γι' αυτό και προτιμάται σήμερα.

Κρύσταλλοι Czochralski αναπτύσσονται με προσανατολισμούς (100) ή (111). Το αρχικό "σπέρμα" μονοκρυστάλλου με τον επιθυμητό κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό, αναρτάται σ' ένα περιστρεφόμενο υποδοχέα (chuck) και βυθίζεται μέσα στο λειωμένο Si ενώ η θερμοκρασία μειώνεται μόλις κάτω από το σημείο τήξεως του Si (super cooling). Όταν το σύστημα αποκτήσει θερμική ισορροπία, το σπέρμα τραβιέται αργά από το τήγμα ενώ ταυτόχρονα το σπέρμα και το τήγμα περιστρέφονται. Αυτή η περιστροφική κίνηση παρέχει έναν βαθμό ανάμιξης, που ελαχιστοποιεί τη συγκέντρωση των αποβαλλομένων ατόμων προσμίξεων στη διεπιφάνεια ψύξης και βοηθάει να πάρουμε έναν κρύσταλλο με σχετικά ομοιόμορφη συγκέντρωση προσμίξεων κατά το μεγαλύτερο μέρος του μήκους του. Αυτή η κίνηση βοηθάει επίσης στην ελάττωση των ακτινικών μεταβολών πάνω στην εγκάρσια διατομή του κρυστάλλου. Αντίθετες στροφές χρησιμοποιούνται για να εμποδίσουν το σπέρμα και το τήγμα να περιστρέφονται μαζί. Μια Ιαπωνική προσέγγιση χρησιμοποιεί εφαρμογή μαγνητικού πεδίου στο τήγμα για να βελτιώσει επίσης την ακτινική ομοιομορφία.

Τυπικοί βιομηχανικοί κρύσταλλοι κατασκευάζονται σήμερα με διαμέτρους από 75 ως 125 mm ούτως ώστε μετά από γυάλισμα να παράγονται ομοιόμορφοι κρύσταλλοι με διαμέτρους που να κυμαίνονται



μέσα σε όρια  $\pm 50$   $\mu\text{m}$  της ονομαστικής τους τιμής, ενώ το τυπικό μήκος των κρυστάλλων αυτών φτάνει το 1m. Για τον αυτόματο έλεγχο της διαμέτρου του αναπτυσσόμενου κρυστάλλου χρησιμοποιείται ένας ανιχνευτής υπερέυθρου εστιασμένος στον φωτεινό μηνίσκο που σχηματίζεται από το τήγμα που γειτονεύει άμεσα με (εφάπτεται προς) τον στερεοποιημένο κρύσταλλο. Η ταχύτητα τραβήγματος αλλά και η ισχύς του φούρνου ρυθμίζονται αυτόματα ώστε η διάμετρος να διατηρείται σταθερή.

Η κρυσταλλική τελειότητα των κρυστάλλων που αναπτύσσονται με τη σύγχρονη μέθοδο Czochralski είναι θαυμάσια. Μια τεχνική που αναπτύχθηκε από τον Dash το 1958 έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή κρυστάλλων ελεύθερων από εξαρθρώσεις (dislocations). Το αρχικό κρυσταλλικό "σπέρμα" έχει διάμετρο 5-8 mm. Αφού βυθιστεί μέσα στο τήγμα, τραβιέται με ταχύτητα που μειώνει τη διάμετρο του κρυστάλλου για μικρό διάστημα. Στη συνέχεια ο κρύσταλλος αφήνεται να αυξηθεί γρήγορα κατά διάμετρο, μέχρι να φτάσει το τελικό του μέγεθος. Αυτή η διαδικασία σχηματισμού λαιμού (necking) εμποδίζει τη δημιουργία παραμορφώσεων και ο κρύσταλλος αναπτύσσεται ελεύθερος από αυτές.

Προσμίξεις τόσο επιθυμητές όσο και ανεπιθύμητες εισχωρούν στο Si που αναπτύσσεται με την τεχνική Czochralski. Οι επιθυμητές προσμίξεις είναι τα στοιχεία (dopants) που προστίθενται για να καθορίσουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες του κρυστάλλου. Από τις μη επιθυμητές προσμίξεις είναι κυρίως το οξυγόνο, το οποίο προέρχεται από το δοχείο χαλαζία. Το οξυγόνο περιέχεται σε συγκέντρωση 10-50ppm τιμή που πλησιάζει το όριο διαλυτότητας του οξυγόνου στο Si. Το οξυγόνο αυτό είναι ηλεκτρικά ενεργό υπό τη μορφή σταθμών δοτών, εκτός αν ο κρύσταλλος θερμανθεί μεταξύ 600 και 700°C και κατόπιν ψυχθεί απότομα σε θερμοκρασία μεταξύ 500 και 300°C. Μετά τον κύκλο θέρμανσης είναι δυνατόν να συγκεντρωθεί το Οξυγόνο γύρω από κρυσταλλικές ατέλειες, όπως είναι τα πλεγματικά κενά και τα ενδοπλεγματικά άτομα. Οι κλειστές περιοχές ατελειών που σχηματίζονται έτσι μπορούν να αποβούν σημαντικές για τον καθορισμό της απόδοσης παραγωγής των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεγάλης κλίμακας.

Οι επιθυμητές προσμίξεις (dopants) συνήθως προστίθενται στο τήγμα με τη μορφή σκόνης ισχυρά ντοπαρισμένου Si. Η πρόσμιξη διατηρείται -σε λογικά όρια- ομοιόμορφα κατανομημένη μέσα στο τήγμα με την αναδευτική δράση της περιστροφής του σπέρματος και του δοχείου. Καθώς όμως ο κρύσταλλος στερεοποιείται, η συγκέντρωση των προσμίξεων που ενσωματώνονται σ' αυτόν είναι διαφορετική από τη συγκέντρωση μέσα στο τήγμα. Ο λόγος της συγκέντρωσης των προσμίξεων μέσα στο στερεό,  $N_s$ , προς αυτή στο τήγμα,  $N_L$ , ονομάζεται σταθερά διαχωρισμού (segregation) ή κατανομής,  $k$ . Η τιμή του  $k$  εξαρτάται από το στοιχείο πρόσμιξης. Η τιμή της σταθεράς  $k$  για διάφορες προσμίξεις αντικατάστασης στο Si φαίνεται στον πίνακα 2.1. Η κατανομή των προσμίξεων σαν συνάρτηση της αξονικής θέσης,  $x$ , κατά μήκος του κρυστάλλου δίνεται από τη σχέση:

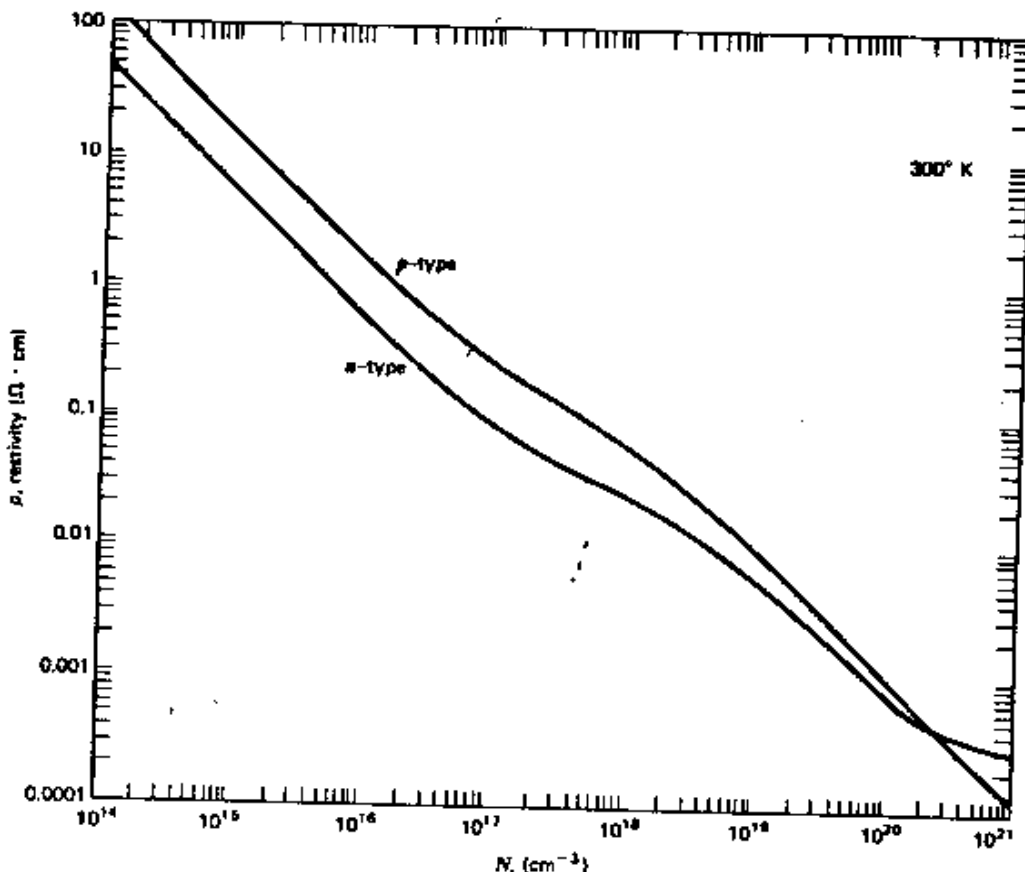
$$N_s \left( \frac{x}{l} \right) = k N_{L0} \left( 1 - \frac{x}{l} \right)^{k-1}$$

όπου  $N_{L0}$  είναι η αρχική συγκέντρωση προσμίξεων στο τήγμα και  $l$  είναι το ολικό μήκος του κρυστάλλου. Επομένως το ντοπάρισμα του κρυστάλλου δεν είναι σταθερό κατά μήκος του άξονά του. Επειδή π.χ. το βόριο έχει μεγαλύτερο συντελεστή διαχωρισμού, η αξονική διακύμανση της συγκέντρωσής του είναι μικρότερη από τη διακύμανση που θα παρουσίαζε η συγκέντρωση οποιασδήποτε άλλης πρόσμιξης αντικατάστασης στον ίδιο κρύσταλλο.

Οι αξονικές διακυμάνσεις των προσμίξεων δεν είναι ιδιαίτερα κρίσιμες για τις εφαρμογές στα μικροκυκλώματα διότι ο κρύσταλλος κόβεται σε λεπτές φέτες κάθετα προς τον άξονα ώστε να σχηματίζονται πλακέτες που χωρίζονται σύμφωνα με την ειδική αντίσταση που εμφανίζουν.

Πίνακας 1: Συντελεστές διαχωρισμού των προσμίξεων αντικατάστασης στο Si

Στοιχείο	k
B	0.80
Al	0.0020
Ga	0.0080
In	0.0004
P	0.35
As	0.30
Sb	0.023



Σχήμα 2. 3: Η ειδική αντίσταση σαν συνάρτηση της συγκέντρωσης προσμίξεων στο πυρίτιο στους 300o K.

Η εξάρτηση της ειδικής αντίστασης του Si από την συγκέντρωση των προσμίξεων φαίνεται στο διάγραμμα του σχ. 2.3. Οι αξονικές διακυμάνσεις της συγκέντρωσης της πρόσμιξης είναι σημαντικές μόνο από την άποψη της απόδοσης παραγωγής (yield) χρήσιμων πλακετών από έναν κρύσταλλο. Μια τεχνική για τη μείωση αυτών των διακυμάνσεων είναι ο προγραμματισμός της πίεσης, κάτω από την οποία αναπτύσσεται ο κρύσταλλος. Καθώς η πίεση μειώνεται οι πτητικές προσμίξεις απομακρύνονται από το τήγμα, επιτρέποντας μια πιο ομοιόμορφη συγκέντρωση προσμίξεων στον κρύσταλλο.

Μεγαλύτερης σημασίας είναι η μεταβολή της συγκέντρωσης των προσμίξεων σε συνάρτηση με την ακτινική απόσταση από τον άξονα. Σε κρυστάλλους που αναπτύχθηκαν με τη μέθοδο Czochralski παρατηρήθηκαν striations της πρόσμιξης. Αυτές οφείλονται στην ανομοιογένεια του θερμικού περιβάλλοντος κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης του κρυστάλλου. Επειδή η μικροσκοπική ταχύτητα ανάπτυξης εξαρτάται από την τοπική θερμοκρασία, το ποσοστό της πρόσμιξης που ενσωματώνεται ποικίλλει ελαφρά με τη θέση μέσα στον κρύσταλλο. Η ειδική αντίσταση κατά μήκος μιας πλακέτας κρυστάλλου που αναπτύχθηκε με τη μέθοδο Czochralski κυμαίνεται μέχρι 20% της ονομαστικής της

τιμής. Αυτές οι διακυμάνσεις μπορεί να έχουν ανταγωνιστικό αποτέλεσμα πάνω στην απόδοση παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων μεγάλης επιφάνειας.

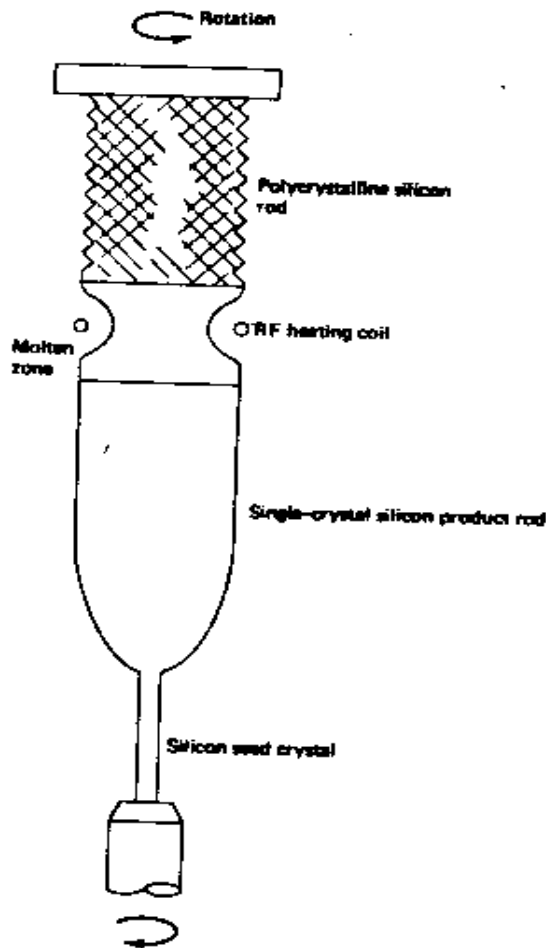
Η μέθοδος Czochralski προτιμάται σήμερα για την παραγωγή κρυστάλλων Si διότι εμφανίζει τα παρακάτω πλεονεκτήματα:

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

## 6.2 Η μέθοδος Κινητής Ζώνης (Float Zone)

Η μέθοδος κινητής ζώνης για την ανάπτυξη κρυστάλλων εισήχθη από τον H.C. Theurer. Η διαδικασία αυτή εμφανίζει πλεονεκτήματα ως προς τη μέθοδο Czochralski, για την ανάπτυξη ορισμένων μόνο τύπων κρυστάλλων. Στη συσκευή κινητής ζώνης το λιωμένο Si δεν περιέχεται μέσα σε δοχείο και επομένως δεν υφίσταται μόλυνση από το οξυγόνο, όπως στη μέθοδο Czochralski. Έτσι, αν ο κρύσταλλος πρέπει να έχει ειδική αντίσταση μεγαλύτερη από 25 Ωcm είναι απαραίτητο να παραχθεί με τη μέθοδο αυτή. Ωστόσο, με τη μέθοδο κινητής ζώνης είναι δύσκολο να πετύχουμε κρυστάλλους με διάμετρο μεγαλύτερη από 75mm. Οι κρύσταλλοι που αναπτύσσονται, μπορεί να έχουν προσανατολισμό (100) ή (111).

Η συσκευή για ανάπτυξη κρυστάλλων με τη μέθοδο κινητής ζώνης φαίνεται στο σχήμα 2.4. Ένας κύλινδρος πολυκρυσταλλικού πυριτίου μήκους μέχρι 100cm αναρτάται κατακόρυφα από μια υποδοχή (chuck) στο επάνω μέρος ενός θαλάμου-φούρνου, μέσα σε ατμόσφαιρα συνήθως Αργού υπό μειωμένη πίεση. Ένα "σπέρμα" μονοκρυστάλλου εφαρμόζεται σε μια υποδοχή στο κάτω μέρος του θαλάμου. Ένα πηνίο RF τοποθετείται έτσι ώστε να δημιουργεί μια ζώνη τηγμένου Si στο κάτω μέρος του κυλίνδρου. Η τηγμένη αυτή ζώνη συγκρατείται στη θέση της από ένα συνδυασμό επιφανειακής τάσης και φαινομένων ανύψωσης (levitation), που οφείλονται στο πεδίο RF. Το σπέρμα φέρεται σε επαφή με το τήγμα Si και κατόπιν τραβιέται με ταυτόχρονη περιστροφή, σε τρόπο ώστε να σχηματισθεί μια περιοχή μειωμένης διαμέτρου (necking) ακολουθούμενη από μια κωνική περιοχή μέχρι την τελική επιθυμητή διάμετρο. Αυτό αποσκοπεί, όπως και στη μέθοδο Czochralski στο να παραχθεί ένας κρύσταλλος ελεύθερος παραμορφώσεων (dislocations). Η τηγμένη ζώνη, που έχει πλάτος γύρω στα 2cm, μετακινείται προς τα πάνω κατά μήκος του πολυκρυσταλλικού κυλίνδρου μέχρι να αναπτυχθεί όλος ο κρύσταλλος. Πολλαπλά περάσματα της τηγμένης ζώνης (από τον κρύσταλλο) μέσα σε κενό μπορούν να μειώσουν την περιεκτικότητα του κρυστάλλου σε προσμίξεις λόγω πτητικότητας των προσμίξεων μέσα στην τηγμένη ζώνη. Με τη μέθοδο αυτή έχουν κατασκευαστεί κρύσταλλοι με ειδική αντίσταση μέχρι 30000 Ωcm.



Σχήμα 2. 4: Η συσκευή ανάπτυξης κρυστάλλων με τη μέθοδο κινητής ζώνης.

Οι επιθυμητές προσμίξεις (dopants) μπορούν να προστεθούν στους κρυστάλλους κινητής ζώνης με διάφορες μεθόδους. Οι προσμίξεις μπορεί να περιέχονται ομοιόμορφα μέσα στο αρχικό πολυκρυσταλλικό υλικό ή να εισάγονται με μηχανικό τρόπο κομμάτια ισχυρά ντοπαρισμένου Si περιοδικά κατά μήκος του πολυκρυσταλλικού κυλίνδρου. Πιο ομοιόμορφο ντοπαρίσμα μπορεί να επιτευχθεί αν συμπεριληφθεί μια προγραμματισμένη συγκέντρωση φωσφίνης ( $\text{PH}_3$ ) ή διβορανίου ( $\text{B}_2\text{H}_6$ ) στην ατμόσφαιρα που περιβάλλει τον αναπτυσσόμενο κρύσταλλο.

Εξ αιτίας του μη σταθερού θερμικού περιβάλλοντος στην τηγμένη ζώνη, είναι συνηθισμένη η εμφάνιση ακτινικών διακυμάνσεων της ειδικής αντίστασης του πυριτίου της τάξης του 40%. Είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ντοπαρίσμα φωσφόρου υψηλής ομοιομορφίας αν υποβάλλουμε τον καθαρό κρύσταλλο σε ρεύμα θερμικών νετρονίων που μετατρέπει μερικά από τα άτομα πυριτίου σε φωσφόρο.

Υπάρχουν δύο βασικά μειονεκτήματα στη διαδικασία κινητής ζώνης. Πρώτον, η ψυχόμενη διεπιφάνεια είναι πολύπλοκη, διότι η συγκράτηση του τήγματος εξαρτάται από την επιφανειακή τάση. Αυτό αυξάνει τη δυσκολία με την οποία μπορούν να αναπτυχθούν βιομηχανικά κρύσταλλοι με μηδενική παραμόρφωση (zero dislocation). Δεύτερον, η διαδικασία είναι πιο δαπανηρή από τη μέθοδο Czochralski διότι το αρχικό υλικό πρέπει να είναι αποκλειστικά πολυκρυσταλλικός κύλινδρος ενώ στη μέθοδο Czochralski μπορούν να χρησιμοποιηθούν κύλινδροι ή σπασμένα κομμάτια πολυπυριτίου ή ακόμη ανακυκλούμενοι μονοκρύσταλλοι όπως τα αποκομμένα άκρα του τελικού κρυστάλλου.

## 7. Προετοιμασία Πλακετών (Δισκίων)

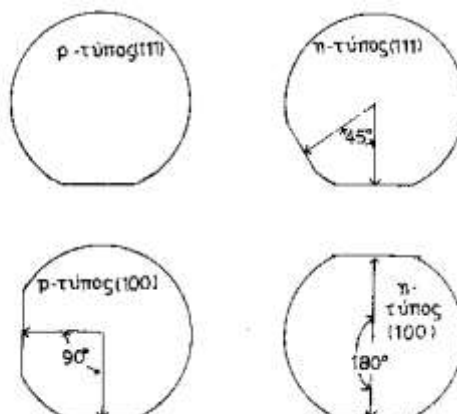
Η μετάβαση από τον μεγάλο μονοκρύσταλλο στο δισκίο το οποίο θα είναι κατάλληλο να υποστεί τη διαδικασία κατασκευής ενός ολοκληρωμένου κυκλώματος περιλαμβάνει διάφορα στάδια. Αυτά είναι: α) Καθορισμός της διαμέτρου, β) Προσανατολισμός, γ) Κοπή των δισκίων, δ) Απόξυση (Etching), ε) Λείανση και στ) Καθαρισμός.

### α) Καθορισμός της διαμέτρου.

Η βιομηχανία έχει υιοθετήσει ορισμένες διαμέτρους σαν τυπικές ούτως ώστε και ο εξοπλισμός για την αυτοματοποίηση των διαδικασιών παραγωγής ολοκληρωμένων κυκλωμάτων να μπορεί να τυποποιηθεί. Τυπικές διαμέτροι δισκίων είναι 50, 75 και 100 mm. Εξ αιτίας των διακυμάνσεων της διαδικασίας ανάπτυξης του κρυστάλλου, οι τελειωμένοι κρύσταλλοι θα παρουσιάζουν διακυμάνσεις στη διάμετρό τους, γι' αυτό είναι συνηθισμένο να αναπτύσσεται ο κρύσταλλος κατά μερικά χιλιοστά περισσότερο από την επιθυμητή του τιμή. Κατόπιν, ο κρύσταλλος ακονίζεται μέχρι μια διάμετρο περίπου 0.4 mm μεγαλύτερη από την επιθυμητή τιμή. Το ακόνισμα αφήνει μια κατεστραμμένη επιφάνεια που πρέπει να απομακρυνθεί με μια διαδικασία που ακολουθεί.

### β) Προσανατολισμός.

Για να έχουμε μια διεύθυνση αναφοράς για την ευθυγράμμιση του κυκλώματος και για να μπορούμε να προσδιορίσουμε τον τύπο του κρυστάλλου, κάθε κρύσταλλος έχει ένα ή δύο τροχισμένα επίπεδα τοποθετημένα με ακρίβεια σε καθορισμένα κρυσταλλικά επίπεδα (σχ.2.5). Ο προσανατολισμός του κρυστάλλου προσδιορίζεται με μια τεχνική σκέδασης ακτίνων X. Τα συστήματα παραγωγής διατηρούν τον προσανατολισμό των εγκοπών μέσα σε όρια  $\pm 0,5^\circ$ . Η πρώτη μάσκα που αποτυπώνεται στην πλακέτα προσανατολίζεται σε σχέση με την εγκοπή αναφοράς. Αυτό εξασφαλίζει ότι το δισκίο θα κόβεται κατά μήκος των φυσικών επιπέδων απόσχισης κατά τον χωρισμό των τσιπς. Σ' αυτό το σημείο η καταστροφή από το τρόχισμα απομακρύνεται με ένα ισοτροπικό γυαλιστικό (HF, HNO<sub>3</sub> & CH<sub>3</sub>COOH). Το αποτέλεσμα είναι ένας γυαλισμένος κρύσταλλος Si με διάμετρο μέσα σε όρια  $\pm 0.1\text{mm}$  από το επιθυμητό μέγεθος.



Σχήμα 2. 5: Εγκοπές προσανατολισμού των δισκίων Si

### γ) Κοπή των δισκίων.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος για την κοπή του κρυστάλλου σε δισκία χρησιμοποιεί ένα πριόνι με λεπίδα εσωτερικού κύκλου, που συγκρατείται περιφερειακά κατά το εξωτερικό χείλος. Η λεπίδα συνίσταται από έναν πυρήνα από ανοξείδωτο ασάλι, πάχους 100-150 μm με επίστρωση ένα πλέγμα διαμαντιού/νικελίου κατά την εσωτερική περιφέρεια. Κατά την κοπή του κάθε δισκίου χάνεται ένα πάχος Si τουλάχιστον 250μm, που ισοδυναμεί με απώλεια ποσοστού Si πάνω από 30% σε έναν κρύσταλλο.

Σε μερικές περιπτώσεις το χείλος του δισκίου στρογγυλεύεται στο σημείο αυτό, τυπικά με ακτίνα 50-100μm. Αυτό εμποδίζει πιθανά ξεφτίσματα του απότομου χείλους και μειώνει το σχηματισμό στην περιφέρεια “μαξιλारीού” κατά την επίστρωση των φωτοευπαθών υλικών (λιθογραφία).

#### **δ) Etching.**

Η διαδικασία κοπής των δισκίων έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας άγριας επιφάνειας που χαρακτηρίζεται από γδαρσίματα γεμάτα από κρυσταλλικά σωμάτια. Αυτή η καταστροφή απομακρύνεται με ισοτροπική απόξυση του Si (HF, HNO<sub>3</sub> & CH<sub>3</sub>COOH). Αυτή η διαδικασία απομακρύνει 50-80μm πυριτίου. Επίσης κατά τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται κατά ένα ποσοστό στρογγύλεμα του χείλους του δισκίου. Επειδή το γυάλισμα που ακολουθεί γίνεται συνήθως μόνο στην μπροστινή επιφάνεια του δισκίου, αυτή η διαδικασία απόξυσης καθορίζει την ποιότητα του τελειώματος της πίσω επιφάνειας της πλακέτας.

Σ' αυτό το σημείο της διαδικασίας γίνεται διαλογή των πλακετών σύμφωνα με το πάχος τους και σύμφωνα με την ειδική τους αγωγιμότητα.

#### **ε) Γυάλισμα.**

Το “τελείωμα” της μπροστινής επιφάνειας του δισκίου γίνεται με μια διαδικασία που λέγεται “χημικο-μηχανικό” γυάλισμα. Το γυαλιστικό συστατικό είναι ένα κολλοειδές αιώρημα λεπτών σωματιδίων SiO<sub>2</sub> σε αλκαλικό υδατικό διάλυμα με PH 10-12.

Η διαδικασία γυαλίσματος αποτελείται από δύο στάδια, από τα οποία κατά το πρώτο απομακρύνονται 50μm και κατά το δεύτερο αμελητέο πάχος Si. Καθώς η φωτολιθογραφία προοδεύει, πολλοί ισχυρίζονται ότι η τελειότητα του γυαλίσματος της επιφάνειας δεν είναι κρίσιμη. Ωστόσο σε πολλές περιπτώσεις εξακολουθούμε να ενδιαφερόμαστε για αυστηρά επίπεδη επιφάνεια. Στην εκτύπωση με προβολή π.χ. η ολική απόκλιση από το επίπεδο δεν επιτρέπεται να είναι μεγαλύτερη από 1-6μm.

#### **στ) Τελικό γυάλισμα και καθάρισμα.**

Στην τελική φάση το γυαλιστικό συστατικό και τα ίχνη από τα μέσα στήριξης των πλακετών πρέπει να απομακρυνθούν. Η διαδικασία καθαρισμού συνήθως περιλαμβάνει διαλυτικά, απορρυπαντικά, ξέβγαλμα με απιονισμένο νερό και στέγνωμα με άζωτο. Τα δισκία κατόπιν παρατηρούνται κάτω από εστιασμένο φωτισμό για να αναδειχθούν μικροσκοπικά γδαρσίματα, εξογκώματα ή θόλωση.

Γενικά περί καθαρότητας χώρων και χειρισμών (απιονισμένο νερό, τάξη 100 π.χ. σημαίνει λιγότερα από 100 σωμάτια διαμέτρου >0.5μm ανά κυβικό πόδι ή περίπου 900 σωμάτια ανά κυβικό μέτρο).

## 8. Επιταξία

Η επιταξιακή ανάπτυξη, όπως χρησιμοποιείται στην κατασκευή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, είναι μια χημική διαδικασία υψηλής θερμοκρασίας με την οποία ένα μονοκρυσταλλικό στρώμα αναπτύσσεται πάνω σε ένα υπόστρωμα παρόμοιας κρυσταλλικής δομής.

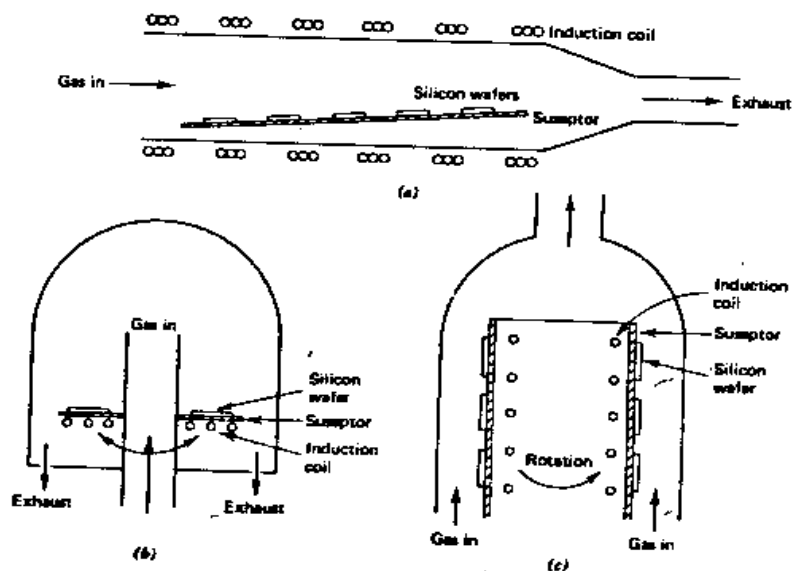
Στα διπολικά τρανζίστορ μονωμένης επαφής χρησιμοποιείται **ομοεπιταξία** για την ανάπτυξη ενός στρώματος Si τύπου-n πάχους 3-10μm πάνω σε ένα υπόστρωμα τύπου-p ειδικής αντίστασης 10 Ωcm και πάχους 150 ως 500μm. Το στρώμα αυτό τύπου-n είναι το ενεργό μέρος του τρανζίστορ και αποτελεί υπόστρωμα εξαιρετικής κρυσταλλικής ποιότητας και με σχεδόν ομοιόμορφη κατανομή προσμίξεων.

Στα κυκλώματα ολοκληρωμένης λογικής με έγχυση I<sup>2</sup>L (Integrated Injection Logic), ένα στρώμα τύπου-n αναπτύσσεται με επιταξία πάνω σε ένα ισχυρά ντοπαρισμένο υπόστρωμα τύπου p<sup>+</sup>.

Στα κυκλώματα CMOS πάνω σε σάπφυρο, χρησιμοποιείται **ετεροεπιταξία** για την ανάπτυξη ενός στρώματος 1μm από ελαφρά ντοπαρισμένο πυρίτιο τύπου-p. Ο κρυσταλλικός προσανατολισμός του πυριτίου πάνω σε σάπφυρο είναι (100).

Η βασική διαδικασία που ακολουθείται για την ομο- και ετερο-επιταξία είναι παρόμοια. Σαν παράδειγμα παίρνουμε τη διαδικασία για την ομοεπιταξία. Αυτή συνίσταται στο πέρασμα μιας χημικής ένωσης του Si σε αέρια μορφή πάνω από θερμαινόμενα υποστρώματα. Η υψηλή θερμοκρασία αναγκάζει τη χημική ένωση του πυριτίου να αποσυντεθεί, είτε με χημική αντίδραση, είτε με πυρόλυση, και τα άτομα του Si αφήνονται να τακτοποιηθούν πάνω στο κρυσταλλικό πλέγμα του υποστρώματος αν υπάρχουν οι κατάλληλες συνθήκες. Π.χ. οι αποστάσεις των ατόμων του υποστρώματος και του αποτιθέμενου υλικού να είναι σχεδόν ίσες, το αποτιθέμενο υλικό να μπορεί να προβλέπει τον κρυσταλλογραφικό προσανατολισμό του υποστρώματος, να μπορούμε ν' αυξήσουμε τη θερμοκρασία του υποστρώματος όσο χρειάζεται για να αποσυντεθεί ή να αναχθεί το υλικό της πηγής χωρίς να αποσυντεθεί το υπόστρωμα, τέλος, το υπόστρωμα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να εξασφαλίζει απόθεση χρησιμοποιήσιμων διαστάσεων.

Οι ενώσεις του Si που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι: SiCl<sub>4</sub>, HSiCl<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SiCl<sub>2</sub> & SiH<sub>4</sub>. Για τις ενώσεις του χλωρίου η αποσύνθεση γίνεται με χημική αναγωγή με υδρογόνο και συμβαίνει πάνω στο υπόστρωμα. Για το σιλάνιο (SiH<sub>4</sub>) η αποσύνθεση είναι πυρολυτική και συμβαίνει μέσα στο ρεύμα του αερίου πάνω από το υπόστρωμα. Η συσκευή που χρησιμοποιείται για την επιταξιακή ανάπτυξη μπορεί να έχει μια από τις τρεις μορφές που φαίνονται στο σχ. 2.6. Τα υποστρώματα (δισκία) τοποθετούνται πάνω σε πλάκες γραφίτη με επίστρωση από καρβίδιο του πυριτίου, που ονομάζονται υποδοχείς (susceptors). Για τη θέρμανση χρησιμοποιείται μερικές φορές θερμαντική αντίσταση στα συστήματα "τηγανίτας" αλλά η θέρμανση με RF είναι η βασική πηγή ισχύος στην Επιταξία.



Σχήμα 2. 6: Τρεις τύποι αντιδραστήρων για την επιταξία

Ας θεωρήσουμε σαν παράδειγμα τυπικού συστήματος έναν οριζόντιο αντιδραστήρα που χρησιμοποιεί σιλάνιο σαν πηγή πυριτίου. Ο θάλαμος αντίδρασης, από τηγμένο χαλαζία, ψύχεται με νερό για να εμποδιστεί η απόθεση του Si στα τοιχώματά του. Ο υποδοχέας, που θερμαίνεται με RF, είναι τοποθετημένος με ελαφριά κλίση ως προς τη ροή του αερίου, ώστε να εξασφαλίζεται πιο ομοιόμορφη απόθεση καθ' όλο το μήκος του υποδοχέα. Το αέριο φορέας είναι υδρογόνο εξαιρετικά υψηλής καθαρότητας και καταναλίσκεται σε μεγάλες ποσότητες, τυπικά 100 l/min, για να δημιουργεί κανονική ταχύτητα ροής. Καθώς το αέριο περνά πάνω από τον θερμό υποδοχέα (τυπικά 1050°C) δημιουργείται ένα στάσιμο στρώμα, του οποίου το πάχος εξαρτάται από την ταχύτητα του αερίου. Αν θεωρηθεί ότι όλη η μεταβολή της θερμοκρασίας συμβαίνει μέσα σ' αυτό το στάσιμο στρώμα, ο μηχανισμός απόθεσης συνίσταται σε διάχυση των μορίων του σιλανίου μέσα από το στάσιμο στρώμα. Καθώς αυτά τα μόρια φτάνουν σε θερμοκρασία αποσύνθεσης (περίπου 500°C), οι δεσμοί υδρογόνου-Si σπάνε. Τα άτομα του πυριτίου κατεβαίνουν προς το υπόστρωμα και τα μόρια του υδρογόνου γυρίζουν στο ρεύμα του αερίου. Αν η συγκέντρωση των μορίων που αποτίθενται γίνει πολύ μεγάλη, τα άτομα πυριτίου συνενώνονται ενώ βρίσκονται ακόμη μέσα στο στάσιμο στρώμα. Μερικά από αυτά ανασηκώνονται λόγω κύτωσης και σαρώνονται μέσα στο κινούμενο ρεύμα πάνω από το στάσιμο στρώμα ενώ τα υπόλοιπα πέφτουν πάνω στα υποστρώματα και δημιουργούν σοβαρές ατέλειες στα αναπτυσσόμενα στρώματα. Αυτή η αύξηση της συγκέντρωσης στην αέρια φάση περιορίζει την ταχύτητα ανάπτυξης σε ένα σύστημα με σιλάνιο. Η απόδοση της διαδικασίας απόθεσης με σιλάνιο πλησιάζει το 35% για μικρές συγκεντρώσεις.

Επειδή η συγκέντρωση του σιλανίου μειώνεται καθώς το αέριο διατρέχει κατά μήκος του υποδοχέα, είναι απαραίτητο να μειώνεται το πάχος του στάσιμου στρώματος σε συνάρτηση με την απόσταση, ώστε να πετύχουμε ομοιόμορφη ταχύτητα απόθεσης σε όλα τα δισκία. Αυτό μπορούμε να το πετύχουμε δίνοντας στον υποδοχέα μια μικρή γωνία κλίσης ως προς τη ροή του αερίου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του εμβαδού της ενεργού διατομής κάθετα προς τη ροή του αερίου και επομένως την αύξηση της ταχύτητας του αερίου και τη μείωση του πάχους του στάσιμου στρώματος. Για μια δεδομένη γωνία κλίσης του υποδοχέα υπάρχει μία άριστη ταχύτητα ροής αερίου για ομοιόμορφη ανάπτυξη. Για να ελαχιστοποιηθούν οι διακυμάνσεις ανάπτυξης κατά μήκος του υποδοχέα, χρησιμοποιείται ορθογώνιος θάλαμος αντιδραστήρα.



Η ταχύτητα ανάπτυξης σε ένα σύστημα σιλανίου μπορεί να ρυθμιστεί γραμμικά σε μία περιοχή από 0,1 ως 1μm/min, με ρύθμιση του λόγου σιλάνιο προς υδρογόνο. Αποθέσεις με σιλάνιο γίνονται σε θερμοκρασίες συνήθως μεταξύ 1050 και 1100°C. Επιταξία που χρησιμοποιεί SiCl<sub>4</sub>, HSiCl<sub>3</sub> ή H<sub>2</sub>SiCl<sub>2</sub> σε υδρογόνο έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία αερίου HCl το οποίο είναι ένα αποξυστικό (etchant) για το πυρίτιο στη θερμοκρασία των 1100 ως 1150°C. Αυτό δεν προκαλεί υποβάθμιση της ποιότητας του στρώματος αν υπάρχει αρκετό υδρογόνο. Οι μεγαλύτεροι ρυθμοί αποσύνθεσης κατά την παραγωγή υψηλής ποιότητας επιταξιακών στρωμάτων επιτυγχάνεται με συστήματα που χρησιμοποιούν H<sub>2</sub>SiCl<sub>2</sub>. Αυτός ο τύπος συστήματος είναι επίσης ο λιγότερο ευαίσθητος στη θερμοκρασία αποσύνθεσης.

Το ντοπάρισμα των επιταξιακών στρωμάτων επιτυγχάνεται αν συμπεριλάβουμε ελεγχόμενες ποσότητες υδριδίων των στοιχείων πρόσμιξης μέσα στο ρεύμα του αερίου. Τα αέρια που χρησιμοποιούνται συνήθως για ντοπάρισμα είναι η φωσφίνη (PH<sub>3</sub>), η αρσίνη (AsH<sub>3</sub>) και το διβοράνιο (B<sub>2</sub>H<sub>6</sub>). Το ντοπάρισμα είναι γραμμική συνάρτηση του λόγου των μορίων της αερίου πρόσμιξης προς τα μόρια της πηγής πυριτίου μέσα στο ρεύμα του αερίου και σε μεγάλη κλίμακα. Υπάρχει επίσης και πιθανότητα διάχυσης προς τα έξω των προσμίξεων από το υπόστρωμα κατά τη διάρκεια της επιταξιακής ανάπτυξης.

Μια τυπική διαδικασία επιταξιακής ανάπτυξης περιλαμβάνει στάδια για την επιτόπια προετοιμασία των υποστρωμάτων. Αν τα υποστρώματα είναι από πυρίτιο θα έχουν ένα λεπτό στρώμα φυσικού οξειδίου. Αυτό μπορεί να απομακρυνθεί με αναγωγή με υδρογόνο στους 1250°C για 10 ως 20 min. Ακολουθεί απόξυση με αέριο μικρής περιεκτικότητας σε HCl ή SF<sub>6</sub> για 5min στους 1250°C, για να απομακρυνθούν τα ανώτερα στρώματα του πυριτίου πριν να κατέβουν τα υποστρώματα στη θερμοκρασία απόθεσης. Αν πρέπει να αποτεθούν επιταξιακά στρώματα σε πυρίτιο με προσανατολισμό (111), είναι συνηθισμένο να χρησιμοποιούνται ελαφρά αποπροσανατολισμένα υποστρώματα. Ο αποπροσανατολισμός είναι τυπικά 3 ως 4° προς την πλησιέστερη <100> διεύθυνση από ένα επίπεδο (111). Αυτό βοηθάει να αναπαραχθούν στο επιταξιακό στρώμα σκαλοπάτια που τυχόν υπάρχουν στο υπόστρωμα. Τα επιταξιακά στρώματα γενικά περιέχουν τις ίδιες ατέλειες με το υπόστρωμα. Η παρουσία ξένων σωματιών πάνω στο υπόστρωμα συνήθως οδηγεί σε σφάλματα στρωμάτωσης (stacking faults).

# Σημειώματα

## Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την 1.0

## Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Αραπογιάννη Αγγελική, 2014. Αραπογιάννη Αγγελική. «Σχεδίαση Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων. Ενότητα Α. Κεφάλαιο 2: Ανάπτυξη Κρυστάλλων-Προετοιμασία δισκίων-Επιταξία.». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI31/>.

## Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

## Διατήρηση Σημειωμάτων

- Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:
- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

## Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

### Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες

- Σχήματα 2.2, 2.3, 2.4, 2.6: Original from: R. Colclaser. *Microelectronics Processing and Device Design*. New York, NY: John Wiley & Sons, 1980.

## Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.

