



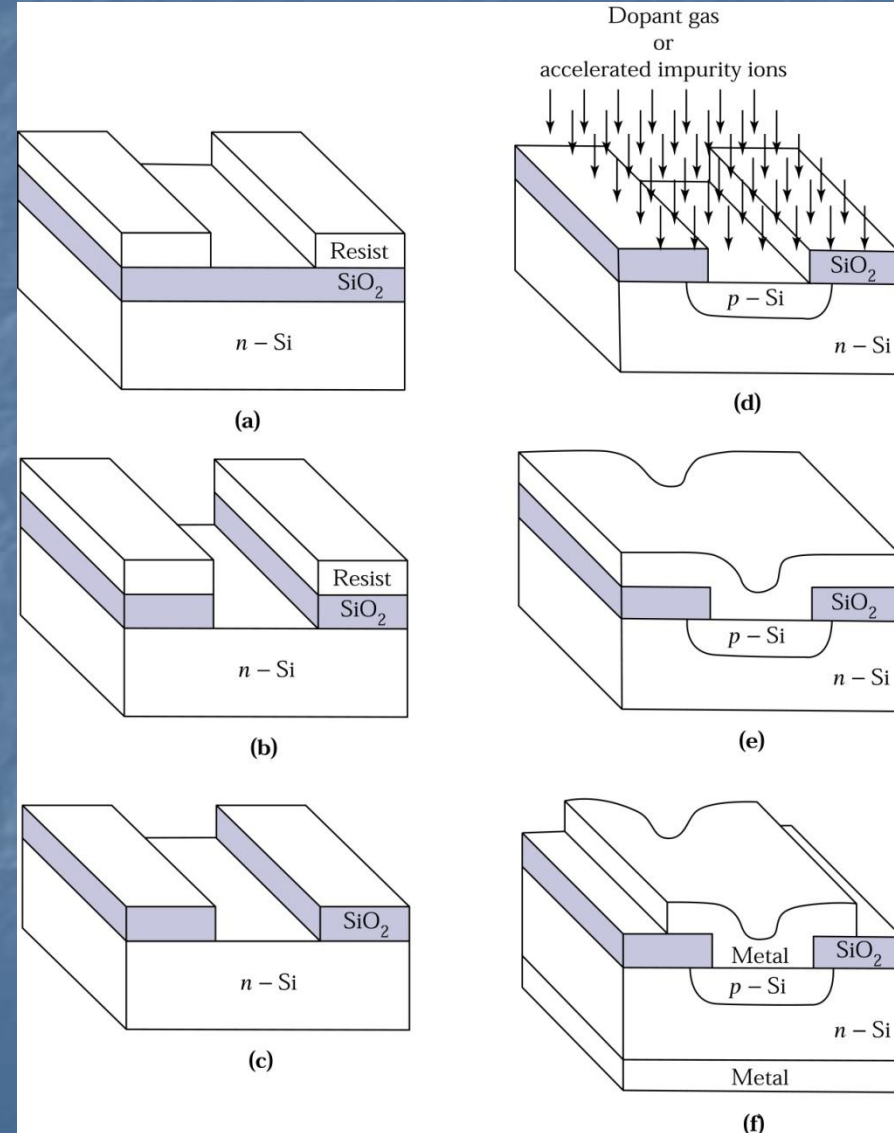
Η ΕΠΑΦΗ P-N

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ
Αναπληρωτής Καθηγητής
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
2022



1. Τι είναι η επαφή p-n

Ως επαφή p-n ορίζεται, εντελώς απλουστευτικά, η συνένωση δυο τμημάτων αντιθέτου τύπου του αυτού ημιαγωγού που κατασκευάζεται όμως στην πράξη με διάφορες διαδικασίες που έχουν αναπτυχθεί ειδικά για το σκοπό αυτό (διάχυση από την αέριο φάση, ιοντική εμφύτευση). Παρ' όλο το ότι η μετάβαση από τον ένα τύπο ημιαγωγού στον άλλο πραγματοποιείται σταδιακά κατά την κατασκευή της επαφής, εν τούτοις θεωρούμε απότομο πέρασμα από τον ένα τύπο στον άλλο (abrupt junction) για διευκόλυνση της μαθηματικής διαπραγμάτευσης.





2. Κατάσταση Ισορροπίας

$$\begin{cases} E_{Cp} - E_{Cn} = E_{Vp} - E_{Vn} = E_0 \\ E_0 = +|q_e| V_{bi} \end{cases}$$

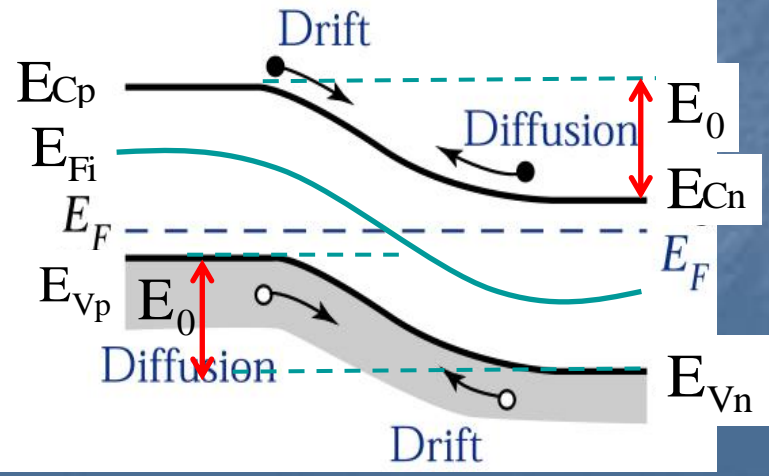
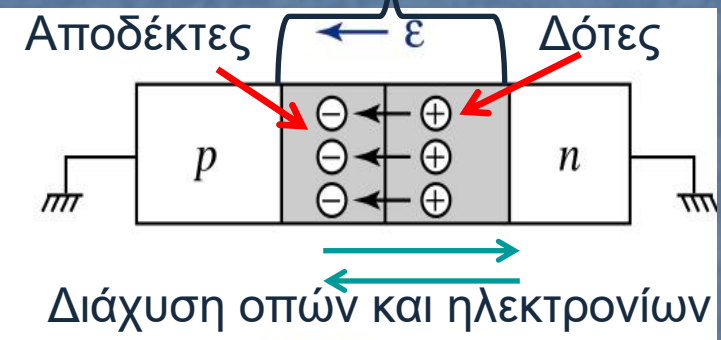
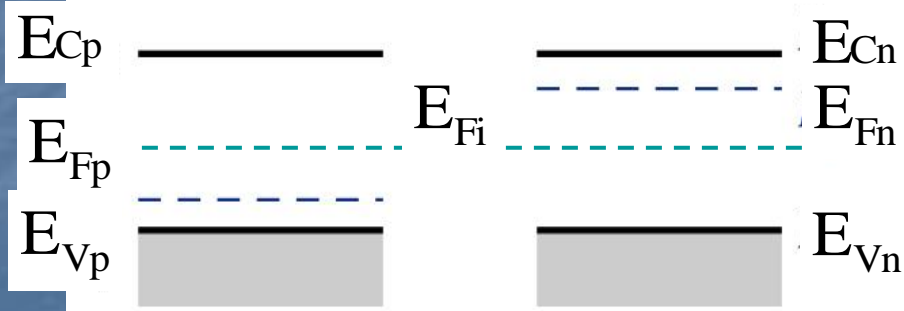
$$n_n = N_C \cdot e^{-\frac{(E_{Cn} - E_F)}{k_B T}}$$

$$n_p = N_C e^{-\frac{(E_{Cp} - E_F)}{k_B T}}$$

Περιοχή απογύμνωσης φορέων και ανάπτυξης ηλεκτρικού πεδίου

$$\frac{n_n}{n_p} = e^{-\frac{(E_{Cn} - E_{Cp})}{k_B T}} = e^{\frac{E_0}{k_B T}} \Rightarrow E_0 = k_B T \ln \frac{n_n}{n_p}$$

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{|q_e|} \ln \frac{n_n}{n_p} = \frac{k_B T}{|q_e|} \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}$$





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
 ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
 Φωτονική»

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = \begin{cases} -\frac{\rho}{\epsilon_s} = -\frac{|q_e|N_D}{\epsilon_s}, & 0 < x \leq x_n, & (1) \\ -\frac{\rho}{\epsilon_s} = -\frac{(-|q_e|)N_A}{\epsilon_s} = \frac{|q_e|N_A}{\epsilon_s}, & -x_p \leq x \leq 0, & (2) \end{cases}$$

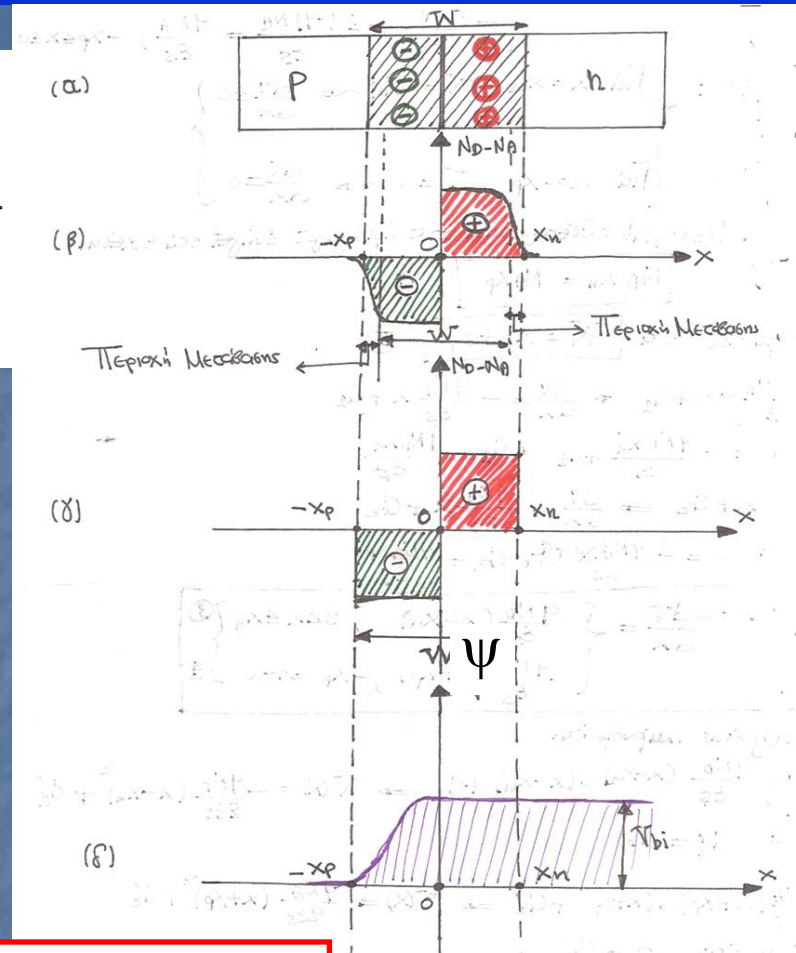
$$x = x_n, \psi = V_{bi} \Rightarrow \frac{d\psi}{dx} = 0$$

$$x = -x_p, \psi = 0 \Rightarrow \frac{d\psi}{dx} = 0$$

$$N_D x_n = N_A x_p \quad (\text{Ηλεκτρική ουδετερότητα})$$

$$W = x_n + x_p$$

$$\psi(x) = \begin{cases} V_{bi} - \frac{|q_e|N_D}{2\epsilon_s} (x - x_n)^2, & 0 < x \leq x_n \\ \frac{|q_e|N_A}{2\epsilon_s} (x + x_p)^2, & -x_p \leq x < 0 \end{cases}$$





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
 ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
 Φωτονική»

Η συνέχεια του δυναμικού για $x=0$ απαιτεί:

$$V_{bi} - \frac{|q_e| N_D}{2\epsilon_s} x_n^2 = \frac{|q_e| N_A}{2\epsilon_s} x_p^2 \Rightarrow V_{bi} = \frac{|q_e|}{2\epsilon_s} (N_D x_n x_n + N_A x_p x_p) = \frac{|q_e|}{2\epsilon_s} N_D x_n (x_n + x_p) = \frac{|q_e|}{2\epsilon_s} N_D x_n W$$

Έχουμε όμως ότι:

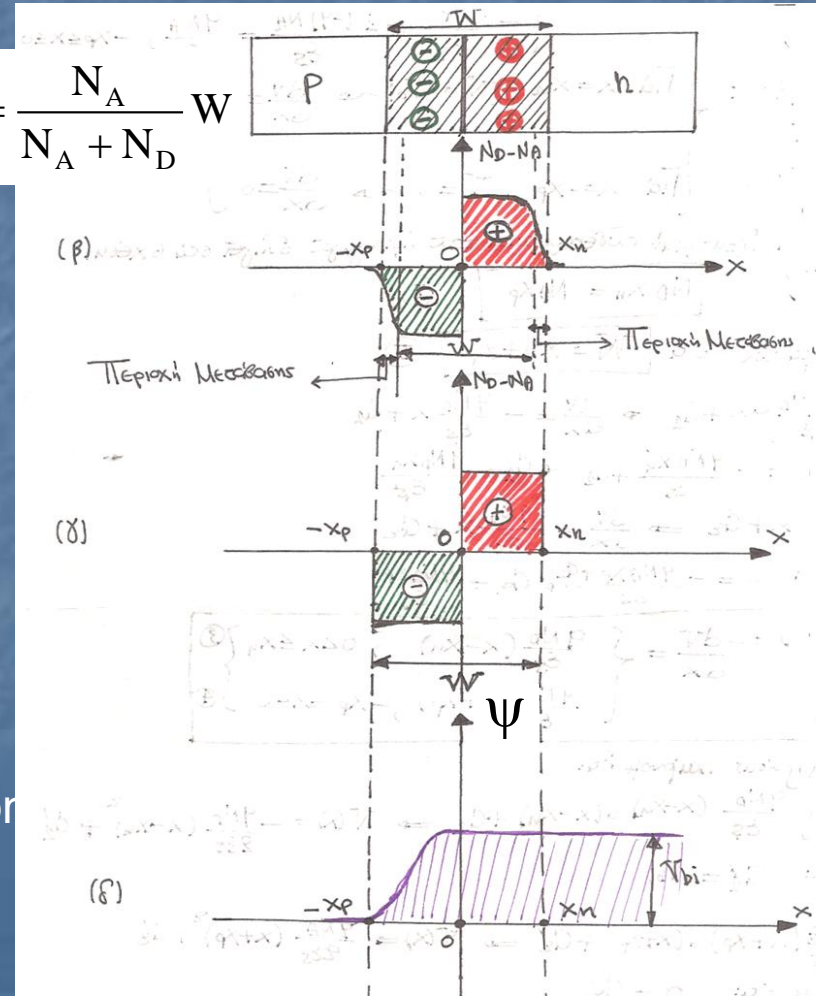
$$N_A x_p = N_D x_n \Rightarrow \frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D} \Rightarrow \frac{x_n}{x_n + x_p} = \frac{N_A}{N_A + N_D} \Rightarrow x_n = \frac{N_A}{N_A + N_D} W$$

Κατά συνέπεια:

$$V_{bi} = \frac{|q_e|}{2\epsilon_s} \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} W^2 \Rightarrow$$

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{|q_e|} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) V_{bi}}$$

Η περιοχή απογύμνωσης δεν εκτείνεται στο ίδιο βάθος στις περιοχές τύπου p και n. Αυτό ισχύει μόνο εάν $N_A = N_D$. Γενικά εκτείνεται σε περισσότερο βάθος στο τμήμα με την χαμηλότερη νόθευση, από όπου πρέπει να έχουμε και την πιο παρατεταμένη διάχυση.



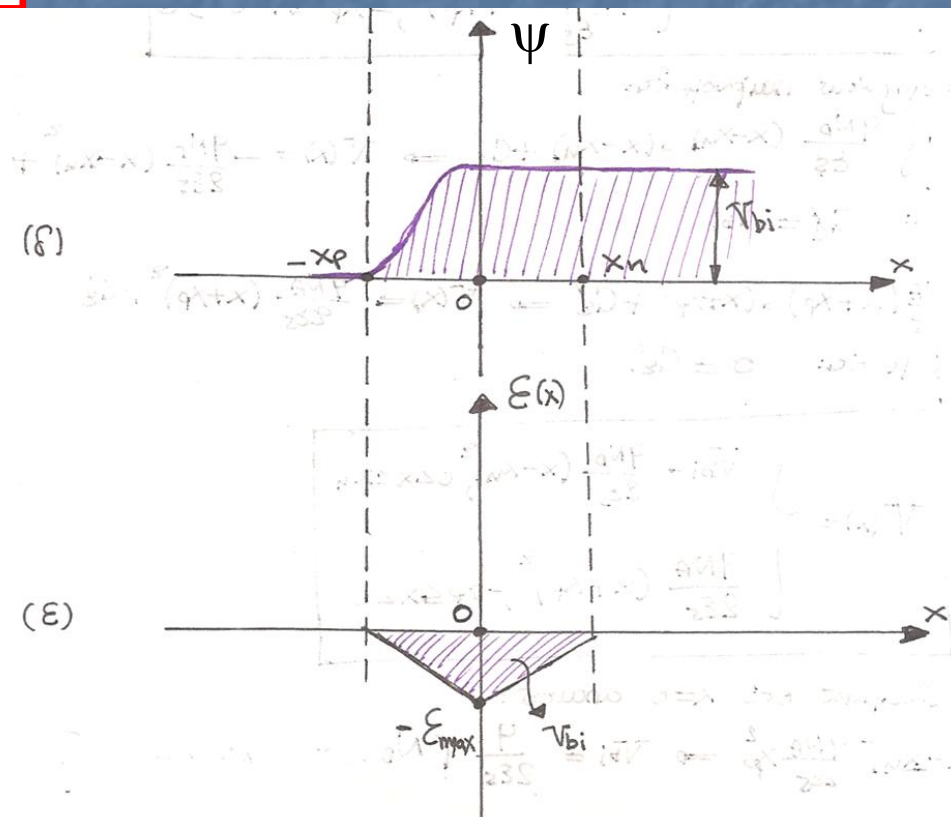


Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{d\psi}{dx} = \begin{cases} \frac{|q_e| N_D}{\epsilon_s} (x - x_n), & 0 < x \leq x_n \\ -\frac{|q_e| N_A}{\epsilon_s} (x + x_p), & -x_p \leq x \leq 0 \end{cases}$$

$$\mathcal{E}_{\max} = \mathcal{E}(x = 0) = \frac{|q_e| N_D}{\epsilon_s} x_n = \frac{|q_e| N_A}{\epsilon_s} x_p$$

$$V_{bi} = \frac{1}{2} \mathcal{E}_{\max} W$$





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
 ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
 Φωτονική»

[Μονομερώς απότομη επαφή p-n]. Ονομάζεται η επαφή p-n που το ένα τμήμα της είναι πολύ πιο ισχυρά νοθευμένο από το άλλο. Το τμήμα αυτό συμβολίζεται ως p⁺ ή n⁺ αντίστοιχα. Στην περίπτωση αυτή να εξαχθούν οι εκφράσεις της περιοχής απογύμνωσης, του δυναμικού κατά μήκος της επαφής και του ηλεκτρικού πεδίου κατά μήκος της επαφής. Δεχθείτε ότι η επαφή είναι p⁺-n.

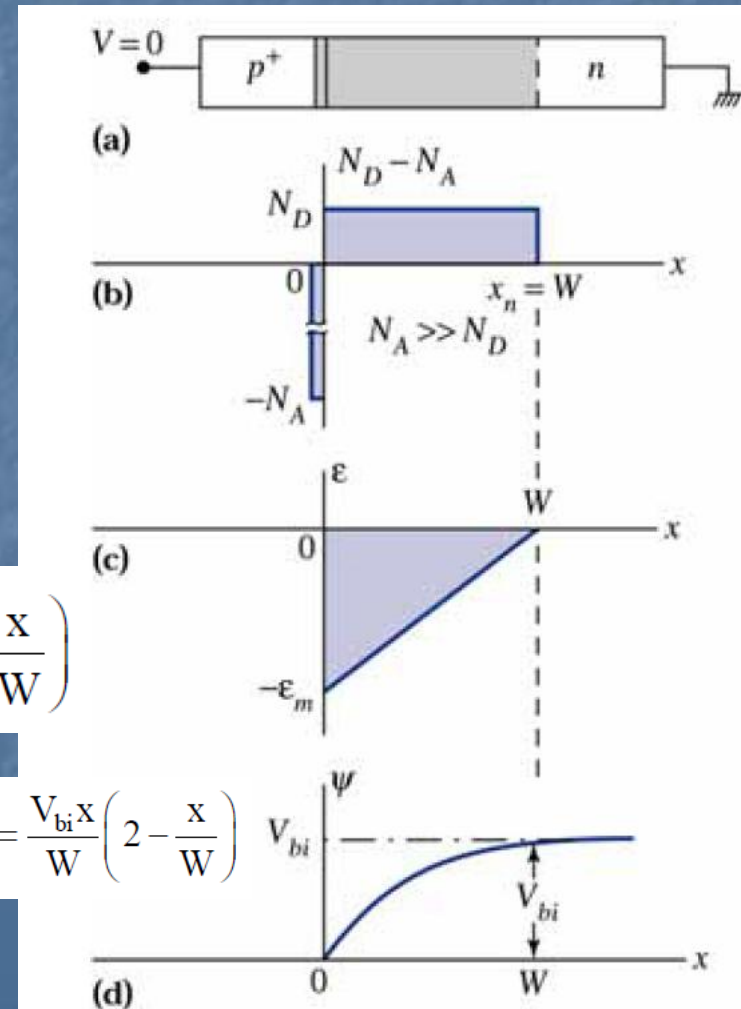
Απάντηση: Δεδομένου ότι η επαφή είναι p⁺-n θα ισχύει ότι N_A >> N_D. Άρα:

$$\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} = \frac{1 + \frac{N_D}{N_A}}{N_D} \approx \frac{1}{N_D}$$

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{|q_e|} \frac{V_{bi}}{N_D}} \approx x_n$$

$$\mathbf{E}(x) = \frac{|q_e| N_D}{\varepsilon_s} (x - x_n) \approx \frac{|q_e| N_D}{\varepsilon_s} (x - W) = -\frac{|q_e| N_D W}{\varepsilon_s} \left(1 - \frac{x}{W}\right)$$

$$\psi(x) = -\int_0^x \mathbf{E}(x) dx = \frac{|q_e| N_D W}{\varepsilon_s} \int_0^x \left(1 - \frac{x}{W}\right) dx = \frac{|q_e| N_D W}{\varepsilon_s} \left(x - \frac{x^2}{2W}\right) \Rightarrow \psi(x) = \frac{V_{bi} x}{W} \left(2 - \frac{x}{W}\right)$$





3. Ορθή Πόλωση

(α) Το εξωτερικά εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι αντίθετο του αυτοαναπτυσσόμενου στην περιοχή απογύμνωσης.

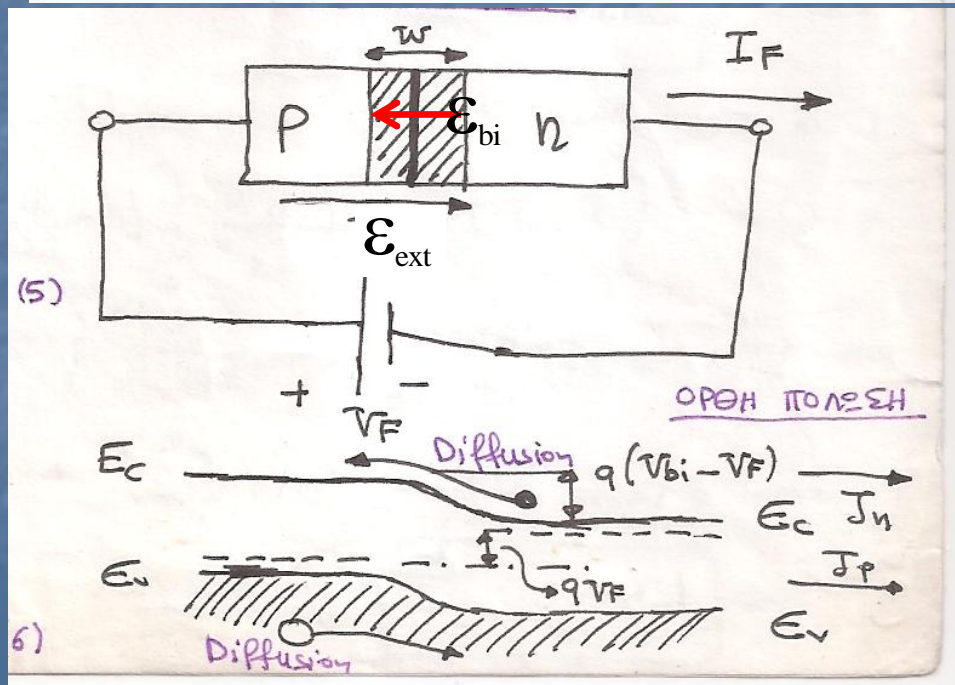
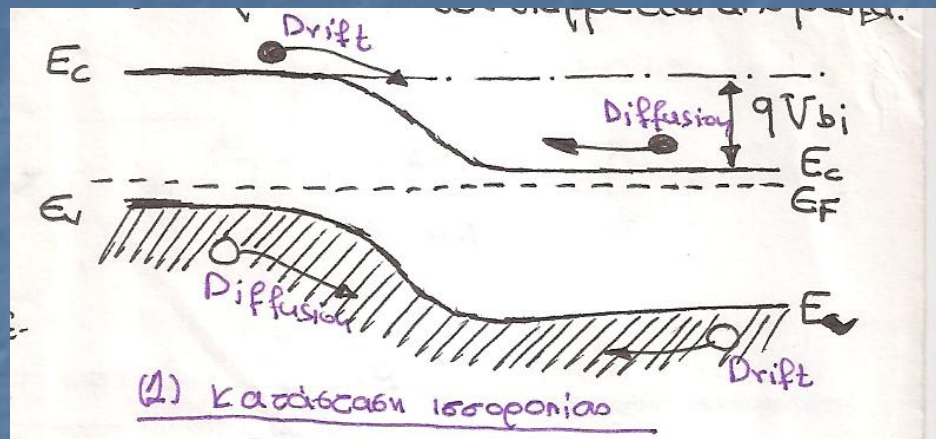
(β) Οι φραγμοί δυναμικής ενέργειας για τη διάχυση μειώνονται σε

$$|q_e| (V_{bi} - V_F)$$

Η διάχυση ευνοείται, ενώ η ολίσθηση όχι.

(γ) Το εύρος της περιοχής απογύμνωσης μειώνεται.

(ε) Δύο ομόρροπα ρεύματα διαχύσεως διαρρέουν την επαφή. Ισχυρό ρεύμα ορθής φοράς (mA).





4. Ανάστροφη Πόλωση

(α) Το εξωτερικά εφαρμοζόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι ομόρροπο του αυτοαναπτυσσόμενου στην περιοχή απογύμνωσης.

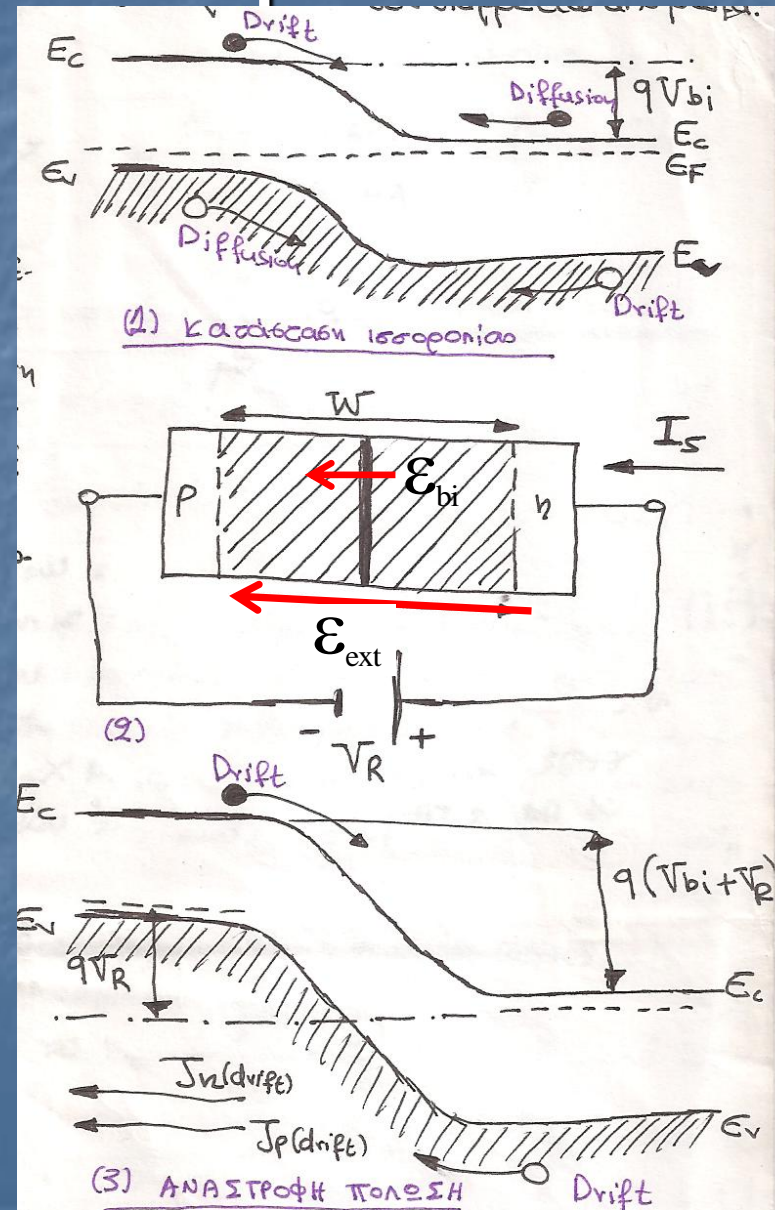
(β) Οι φραγμοί δυναμικής ενέργειας για τη διάχυση αυξάνονται σε

$$|q_e| (V_{bi} + V_R)$$

Η ολίσθηση ευνοείται, ενώ η διάχυση όχι.

(γ) Το εύρος της περιοχής απογύμνωσης αυξάνεται.

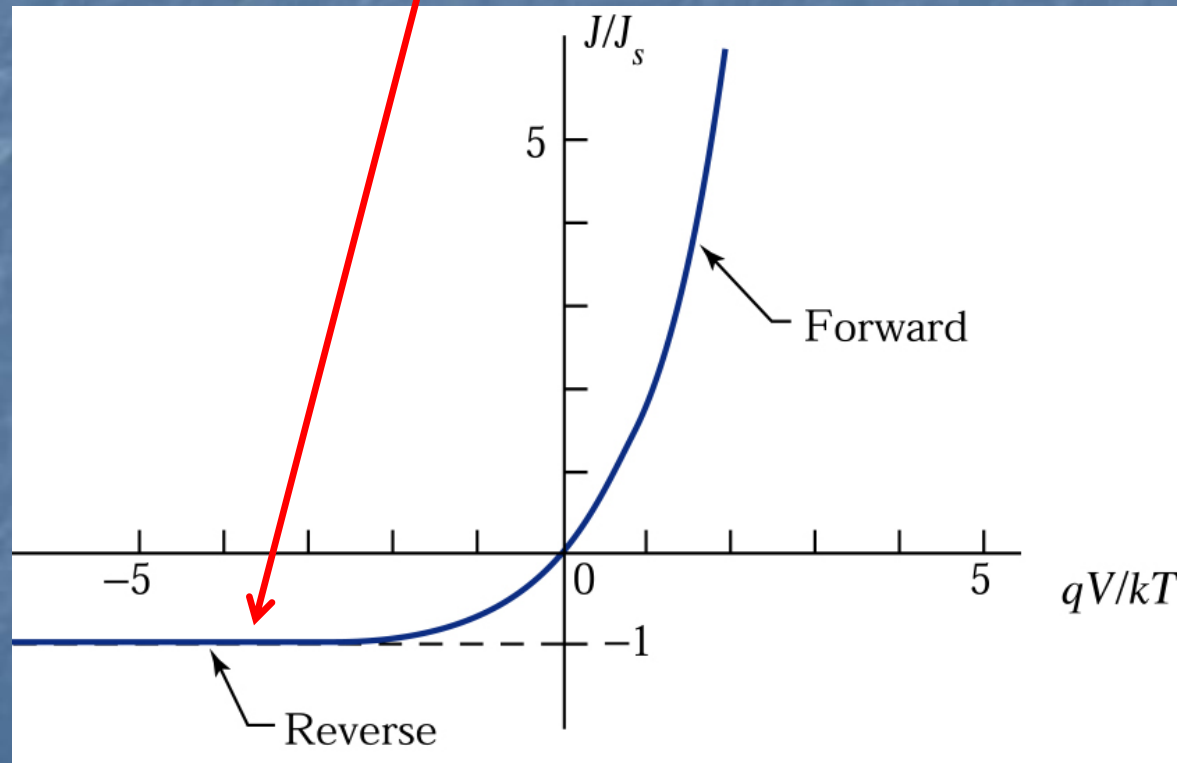
(ε) Δύο ομόρροπα ρεύματα ολίσθησης διαρρέουν την επαφή. Ασθενές ρεύμα κόρου ανάστροφης φοράς (μA).





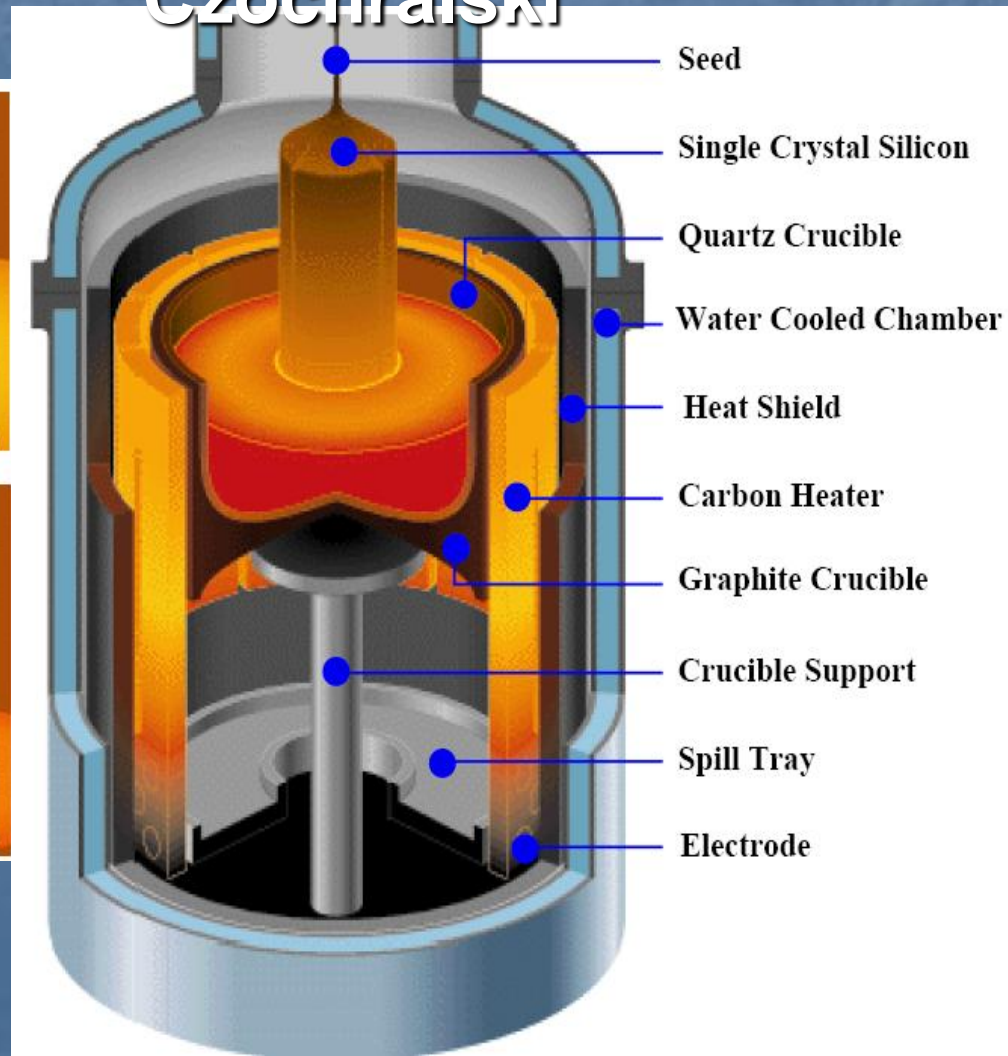
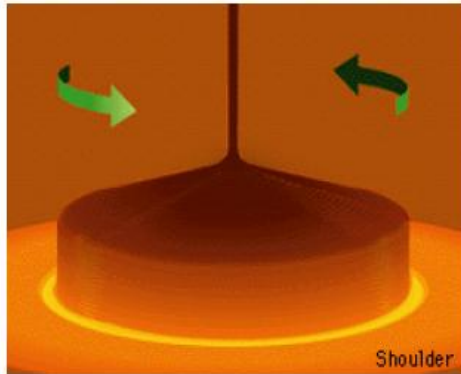
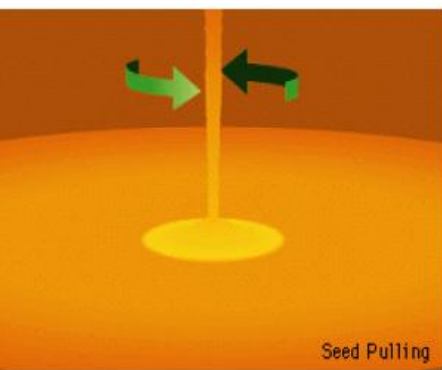
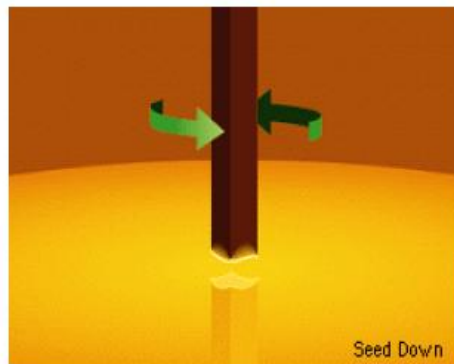
5. Γενική Έκφραση του Ρεύματος

$$J = J_s \left(e^{\frac{|q_e|V}{k_B T}} - 1 \right), \quad J_s = \frac{|q_e| D_p P_{n(\infty)}}{\underbrace{\sqrt{D_p \tau_p}}_{L_p}} + \frac{|q_e| D_n n_{p(\infty)}}{\underbrace{\sqrt{D_n \tau_n}}_{L_n}}$$



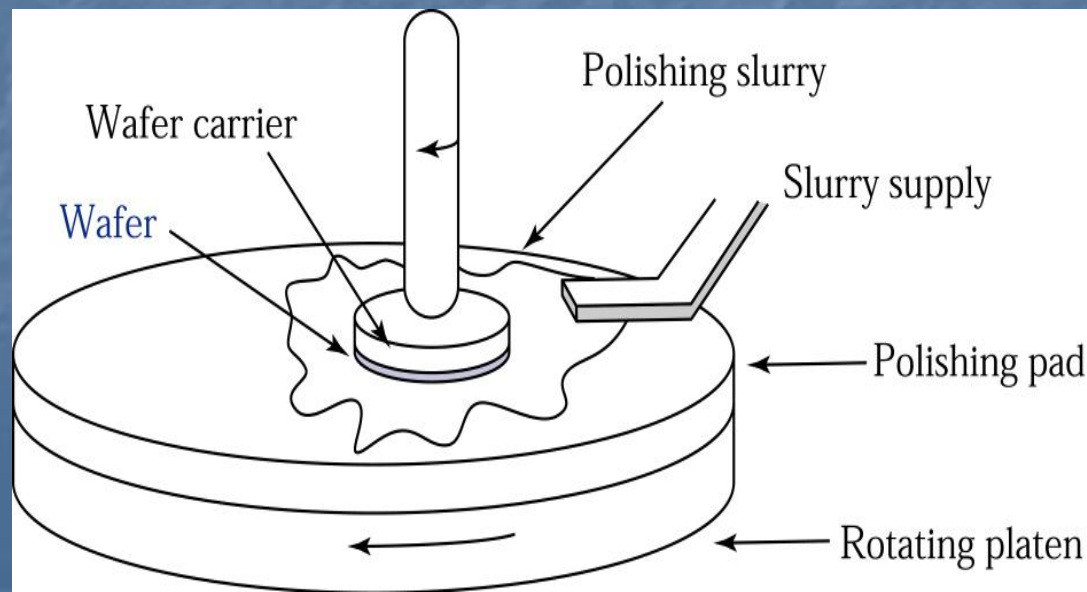
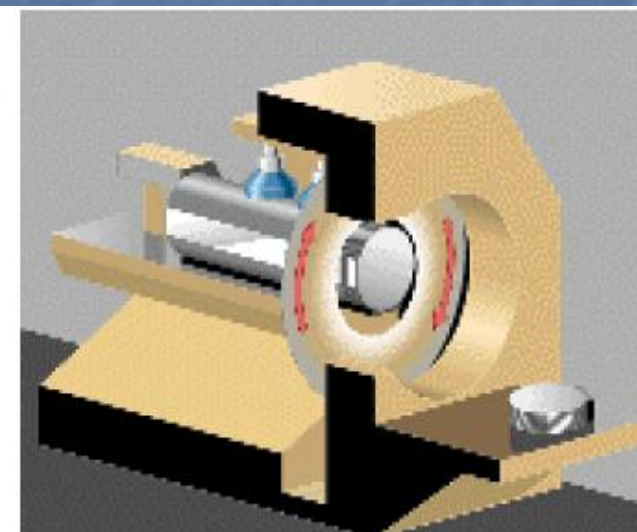
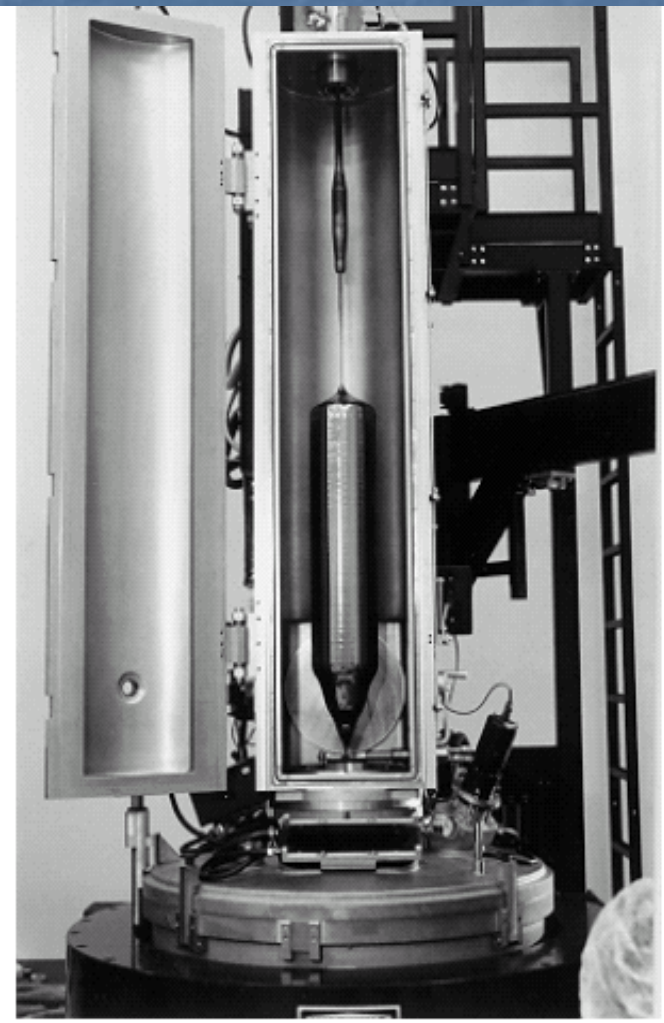


6. Ανάπτυξη μονοκρυστάλλων ομοιόμορφα νοθευμένων Ημιαγωγών – Μέθοδος Czochralski



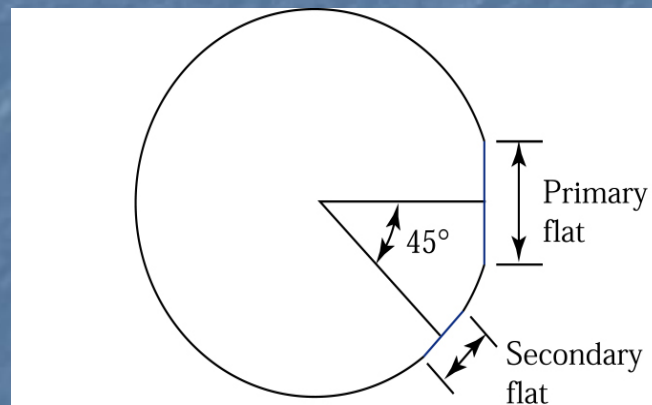
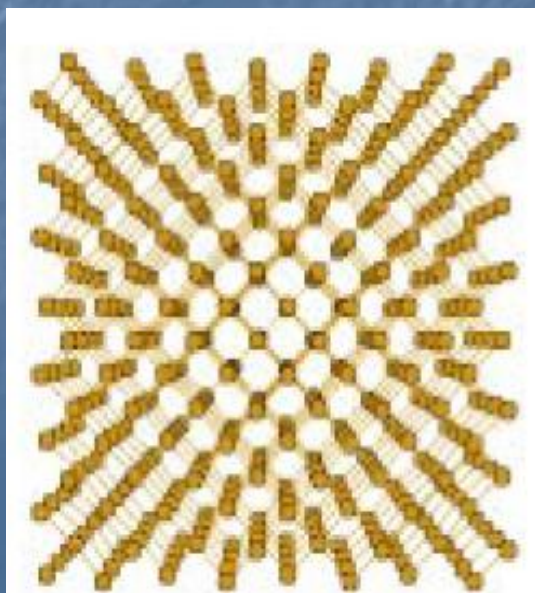


Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

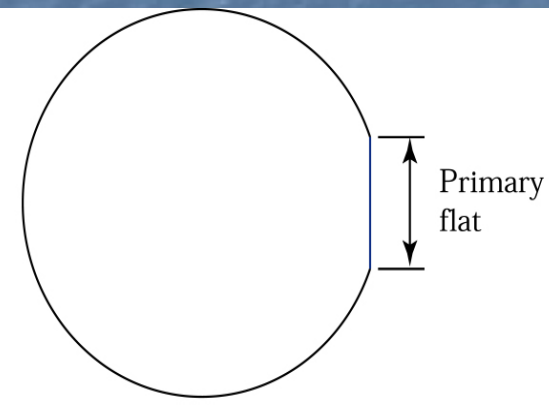




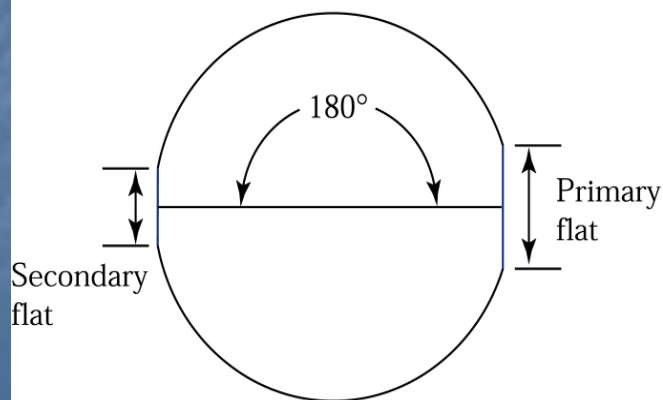
Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»



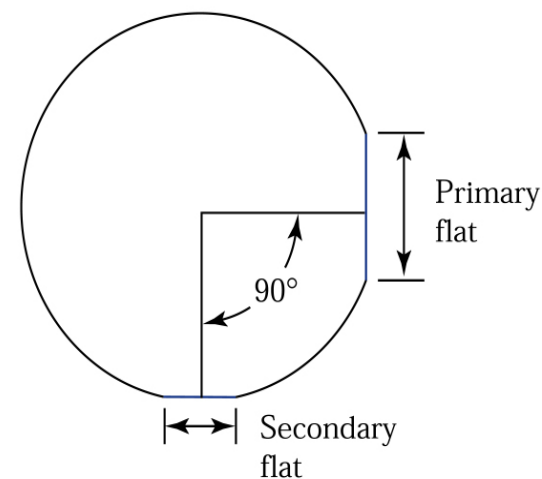
{111} *n*-type



{111} *p*-type



{100} *n*-type



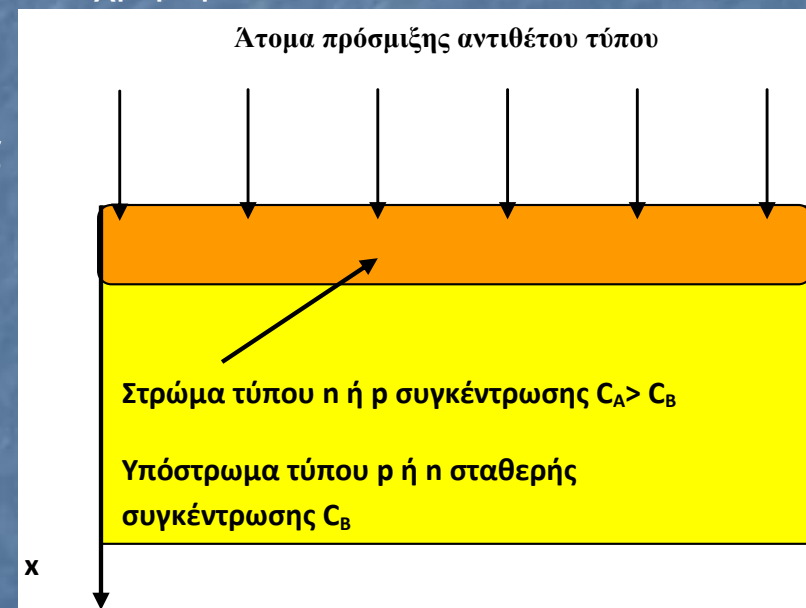
{100} *p*-type



7. Αρχές κατασκευής και βασικά μεγέθη επαφής p-n

► Οι επαφές p-n κατασκευάζονται με εισαγωγή προσμίξεων σε υπόστρωμα ημιαγωγού ήδη νοθευμένο ομοιόμορφα με προσμίξεις αντιθέτου τύπου. Το υπόστρωμα είναι ένα δισκίο ημιαγωγού τύπου p ή n στο οποίο εισάγονται προσμίξεις αντιθέτου τύπου με συγκέντρωση $C_A(x)$ (πολύ μεγαλύτερη από αυτή του υποστρώματος C_B) που είναι συνάρτηση του βάθους του υποστρώματος, γεγονός που υπαγορεύεται από την φύση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται.

► Οι προσμίξεις αυτές εισάγονται στο υπόστρωμα με μεθόδους που θα αναπτυχθούν στα επόμενα. Μετά τη διαδικασία εισόδου τους στο υπόστρωμα, τα άτομά τους δεν βρίσκονται όλα σε θέσεις αντικατάστασης στο πλέγμα του ημιαγωγού και απαιτείται ένα στάδιο ανόπτησης σε υψηλή θερμοκρασία ώστε αυτές διαχεόμενες στο στερεό υπόστρωμα να καταλάβουν τέτοιες θέσεις δρώντας σαν δότες ή αποδέκτες. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται ενεργοποίηση των προσμίξεων. Το επιθυμητό είναι το σύνολο της πρόσμιξης να ενεργοποιηθεί μετά την ανόπτηση. Τότε αναφερόμαστε σε πλήρη ενεργοποίησή της και η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων ή οπών που παρέχει ισούται αριθμητικά με αυτή της πρόσμιξης. Στην περίπτωση αυτή συμβολικά γράφουμε ότι :



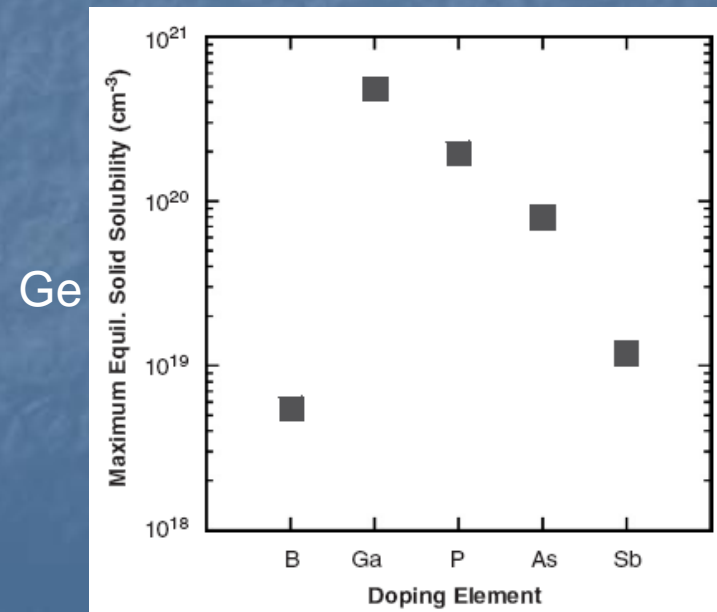
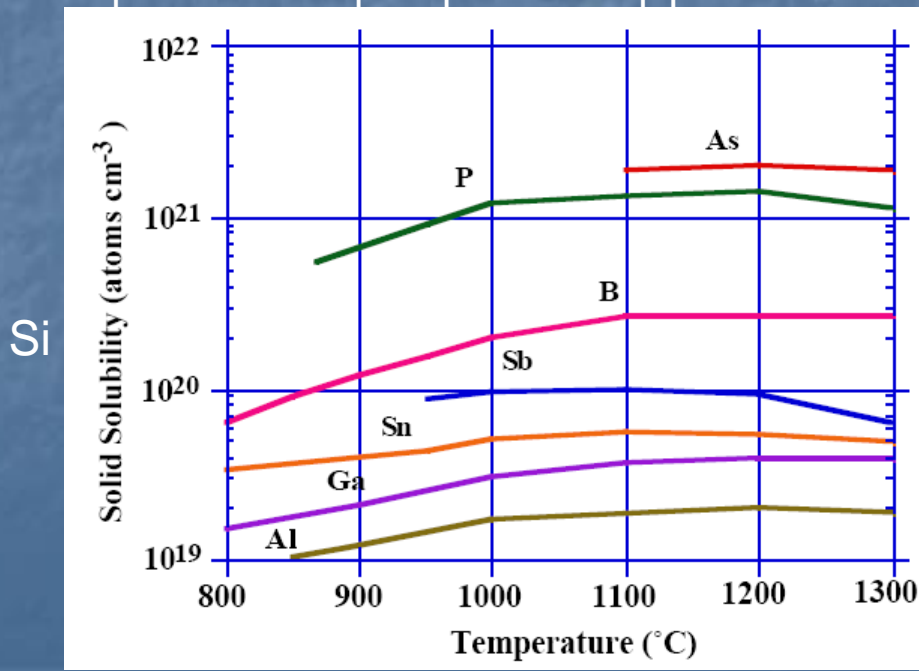
$$C_A = C_A^+ = N_D = n, \text{ για δοτη}$$

$$C_A = C_A^- = N_A = p, \text{ για αποδεκτη}$$



Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

Η μέγιστη ποσότητα της πρόσμιξης, η οποία μπορεί να εισαχθεί στο υπόστρωμα του ημιαγωγού χωρίς να οδηγήσει στην δημιουργία ξεχωριστής φάσης (precipitation) σε αυτό καθορίζεται από το όριο διαλυτότητάς της στο υπόστρωμα. Εάν η πρόσμιξη εισαχθεί σε συγκέντρωση αρκετά χαμηλότερη από το όριο διαλυτότητάς της στο υπόστρωμα, κατά τις διάφορες θερμικές διεργασίες που συνδέονται με τη νόθευση του ημιαγωγού το σύστημα συμπεριφέρεται σαν ένα στερεό διάλυμα (solid solution) με διαλύτη το υπόστρωμα και διαλυμένη ουσία την πρόσμιξη. Εάν η πρόσμιξη εισαχθεί σε συγκεντρώσεις συγκρίσιμες με το όριο διαλυτότητάς της στο υπόστρωμα, τότε κατά την πραγματοποίηση των θερμικών διεργασιών που θα ακολουθήσουν, θα δημιουργηθούν ιζηματοειδείς σχηματισμοί (precipitates) της πρόσμιξης στο υπόστρωμα που συνιστούν ξεχωριστή φάση σε αυτό με δυσμενή για την τεχνολογία επακόλουθα, γιατί το τμήμα της κατανομής της πρόσμιξης που θα ιζηματοποιηθεί θα είναι ηλεκτρικά ανενεργό.

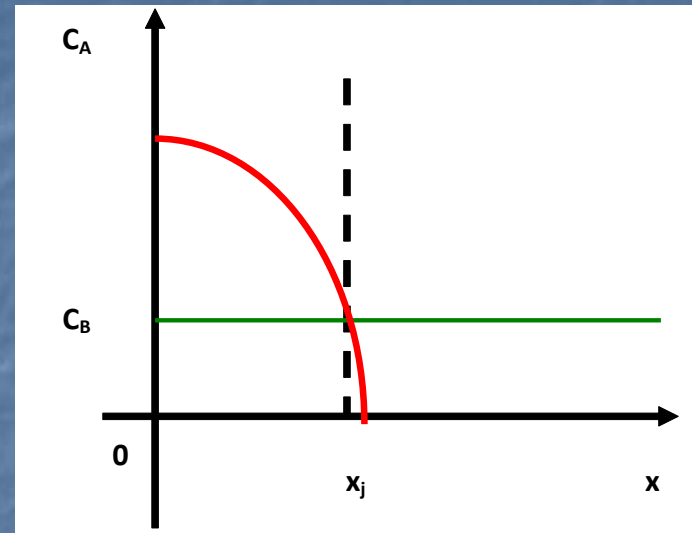




Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

► Το βάθος x_j της επαφής (junction depth) ορίζεται σαν η απόσταση από την επιφάνεια του υποστρώματος όπου η συγκέντρωση (cm^{-3}) της εισαγόμενης πρόσμιξης (τύπου p ή n) $C_A(x)$, που είναι συνάρτηση του βάθους λόγω του τρόπου με τον οποίο πραγματοποιείται η νόθευση, γίνεται ίση με τη συγκέντρωση της αντιθέτου τύπου (n ή p) πρόσμιξης του υποστρώματος C_B , που συνήθως είναι ομοιόμορφα νοθευμένο. Δηλαδή :

$$C_A(x = x_j) = C_B$$



► Αντίσταση φύλλου της επαφής (sheet resistance)

Θα ξεκινήσουμε πρώτα από την αντίσταση ενός ομοιόμορφα νοθευμένου (έστω τύπου n) τμήματος ενός ημιαγωγού με υπολογίσιμες διαστάσεις (L,W,H) .

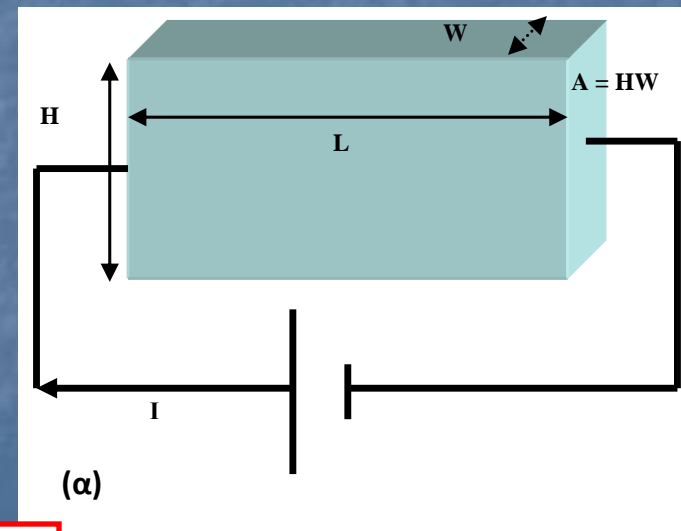
$$J = \frac{I}{A} = n|q_e|v = n|q_e|\mu_n E = \sigma E = \frac{1}{\rho} E \Rightarrow \rho = \frac{1}{n|q_e|\mu_n} \text{ (}\Omega \text{ cm)}$$

$$R = \rho \frac{L}{A} = \rho \frac{L}{WH} \text{ (}\Omega \text{)}$$

Εάν στο παραπάνω τμήμα $L = W$, τότε:

$$R = \frac{\rho}{H} = R_s$$

Ω/\square (Ohm/square)



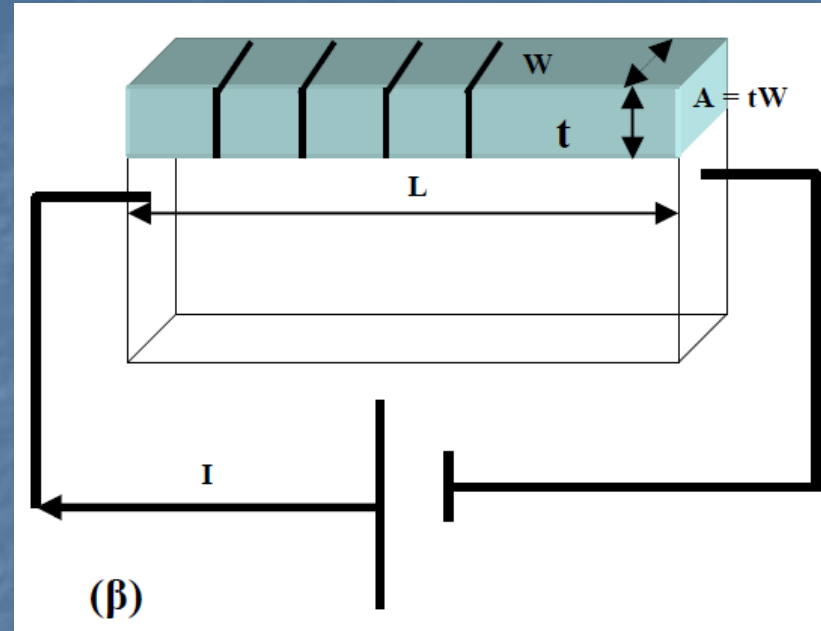


Η εισαγωγή της έννοιας της αντίστασης φύλλου μας βοηθά να χειριστούμε την περίπτωση όπου έχουμε ομοιόμορφα νοθεύσει ένα λεπτό υμένιο του παραπάνω τμήματος του ημιαγωγού, όπου πρακτικά το πάχος του t είναι αμελητέο και ουσιαστικά μιλούμε για επιφανειακή πυκνότητα ρεύματος.

$$\rho = R_s t \Rightarrow R_s = \frac{1}{\sigma t} = \frac{1}{|q_e| n \mu_n t}$$

Χωρίζοντας δε το υμένιο σε πλήθος τετραγώνων N διαστάσεων $W \times W$ θα έχουμε ότι η αντίστασή του θα είναι :

$$R = R_s N, \text{ με } N = \frac{L}{W}$$





Η περίπτωση μιας επαφής p-n είναι ουσιαστικά η περίπτωση ενός μη ομοιόμορφα νοθευμένου λεπτού τμήματος του ημιαγωγού, στο οποίο συνυπάρχει η ανομοιόμορφη κατανομή της εισαχθείσας πρόσμιξης και η ομοιόμορφη κατανομή της πρόσμιξης του υποστρώματος.

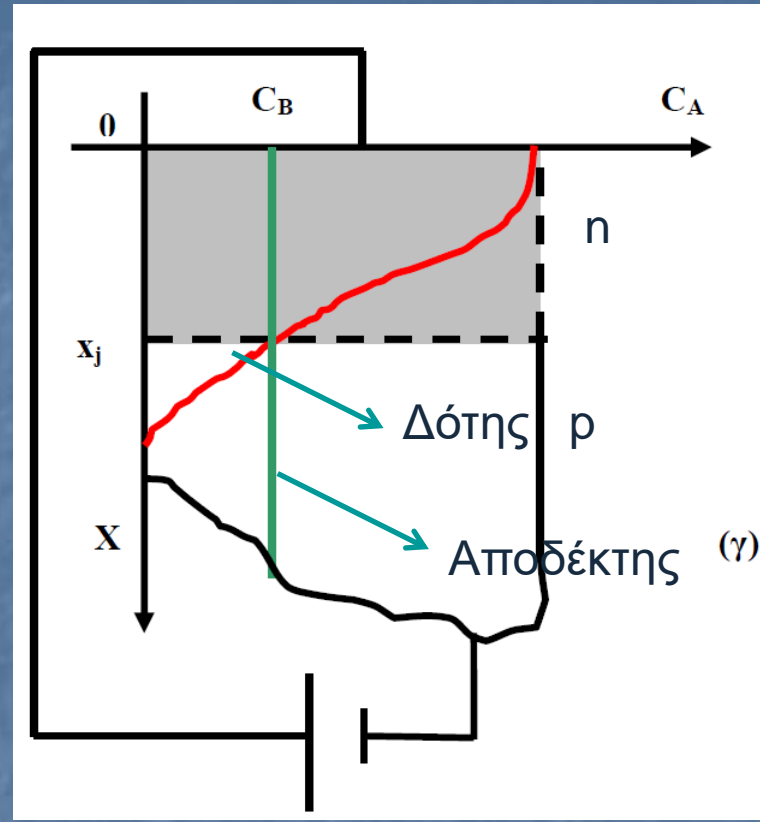
$$\bar{\sigma} = \frac{1}{x_j} q_e \int_0^{x_j} [n(x) - N_A] \mu_n [n(x)] dx$$

$$R_s = \frac{1}{\bar{\sigma} x_j} = \frac{1}{q_e \int_0^{x_j} [n(x) - N_A] \mu_n [n(x)] dx}$$

όπου $n(x)$ η κατανομή των ηλεκτρονίων που εισάγει η συγκέντρωση των δοτών και $C_B = N_A$ η συγκέντρωση των αποδεκτών του υποστρώματος.

Στην αντίθετη περίπτωση :

$$R_s = \frac{1}{\bar{\sigma} x_j} = \frac{1}{q_e \int_0^{x_j} [p(x) - N_D] \mu_p [p(x)] dx}$$





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

Παράδειγμα (Ολοκληρωμένος αντιστάτης). Ένας τρόπος κατασκευής ενός ολοκληρωμένου αντιστάτη εικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα. Ουσιαστικά σχηματίζεται με τοπική εισαγωγή πρόσμιξης τύπου p σε υπόστρωμα τύπου n και αντιστρόφως. Στα άκρα του αντιστάτη σχηματίζονται λιθογραφικά επαφές μετάλλου για την ροή του ρεύματος δια μέσου αυτού. Για να εμποδίζεται η ανάπτυξη ρεύματος διαρροής προς το υπόστρωμα ο αντιστάτης απομονώνεται από αυτό μέσω ενός μονωτικού στρώματος.

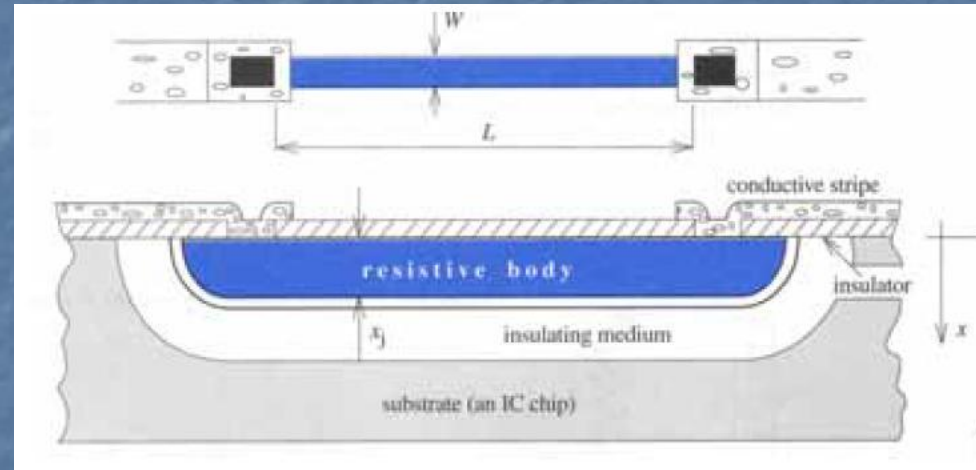
Με βάση τα παραπάνω:

- (α) Σχεδιάστε έναν αντιστάτη $3,5\text{K}\Omega$ χρησιμοποιώντας ένα λεπτό στρώμα τύπου p ή n με αντίσταση φύλλου $200\ \Omega/\square$, εάν η μικρότερη διάσταση που μπορεί να επιτευχθεί με την τεχνολογία που διαθέτετε είναι $1\ \mu\text{m}$.
- (β) Εάν ο αντιστάτης που απαιτείται είναι $0,5\ \text{K}\Omega$ και διαθέτομε τέσσερα σώματα με αντιστάσεις φύλλου $R_{s1}=5\ \Omega/\square$, $R_{s2}=200\ \Omega/\square$, $R_{s3}=1,5\ \text{K}\Omega/\square$, $R_{s4}=4\ \text{K}\Omega/\square$, ποιο από τα τέσσερα θα επιλέγατε; Σχεδιάστε έναν αντιστάτη εάν η μικρότερη διάσταση που μπορεί να επιτευχθεί με την τεχνολογία που διαθέτετε είναι $1\ \mu\text{m}$.

Λύση:

(α) Θα έχουμε ότι :

$$R = R_s \frac{L}{W} \Rightarrow \frac{L}{W} = \frac{R}{R_s} = \frac{3500\ \Omega}{200\ \Omega} = 17,5$$



Σκοπός είναι να κατασκευαστεί ο αντιστάτης με τις μικρότερες δυνατές διαστάσεις. Με δεδομένο ότι $L > W$, επιλέγοντας τη μικρότερη διάσταση για το πλάτος του αντιστάτη θα έχουμε ότι $W = 1\ \mu\text{m}$ και κατά συνέπεια $L = 17,5\ \mu\text{m}$.



(β) Πρέπει να επιλέξουμε το σώμα με την αντίσταση φύλλου που βρίσκεται πλησιέστερα στην τιμή της αντίστασης που επιθυμούμε προκειμένου ο λόγος $L/W > 1$ να είναι ο μικρότερος δυνατός με βάση τη σχέση

$$\frac{L}{W} = \frac{R}{R_s}$$

ώστε να επιτύχουμε τις μικρότερες δυνατές διαστάσεις.

Άρα επιλέγουμε την $R_{s2} = 200\Omega$ / □

Έτσι :

$$\frac{L}{W} = \frac{R}{R_{s2}} = \frac{500\Omega}{200\Omega} = 2,5$$

Με δεδομένο ότι $L > W$, επιλέγοντας τη μικρότερη διάσταση για το πλάτος του αντιστάτη θα έχουμε ότι $W = 1\mu\text{m}$ και κατά συνέπεια $L = 2,5\mu\text{m}$.



Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

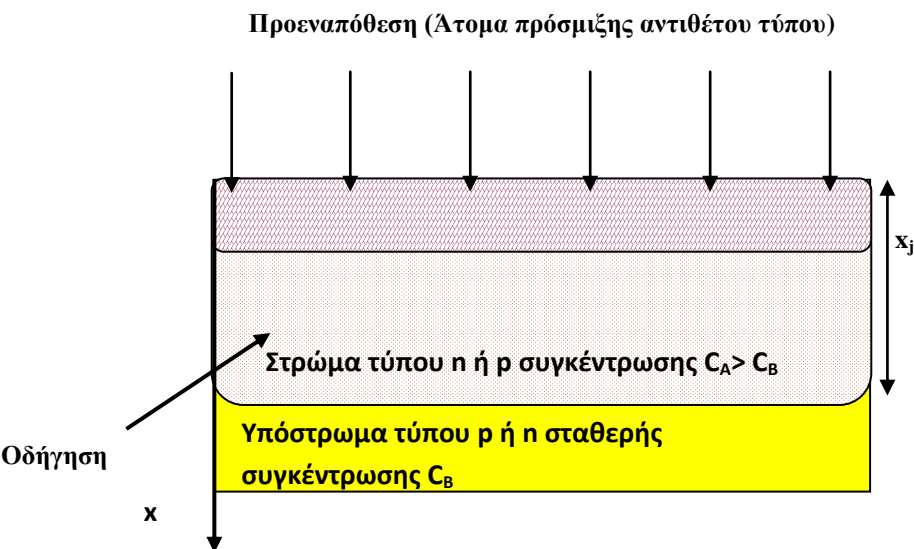
► Η εισαγωγή των προσμίξεων σε ημιαγωγό για την πραγματοποίηση επαφών p-n, ανεξάρτητα από την μέθοδο που επιλέγεται, ακολουθεί δύο στάδια που εικονίζονται στο Σχήμα και είναι:

A) Το στάδιο της προεναπόθεσης ή εισαγωγής της πρόσμιξης (prededposition). Αυτό εξαντλείται στην εισαγωγή της επιθυμητής ποσότητας πρόσμιξης στο ημιαγωγίμο υπόστρωμα. Κατά το στάδιο αυτό το σημαντικό μέγεθος είναι η δόση Q της εισαγόμενης πρόσμιξης που αντιπροσωπεύει το πλήθος των ατόμων της που εισάγονται ανά cm^2 του υποστρώματος.

$$Q (\text{cm}^{-2}) = \text{Άτομα πρόσμιξης} / \text{cm}^2$$

Κατά το στάδιο της προεναπόθεσης η σχέση που συνδέει τη δόση με την κατανομή της πρόσμιξης είναι η ακόλουθη (προφανής):

$$Q (\text{cm}^{-2}) = \int C_A (x,t) dx$$



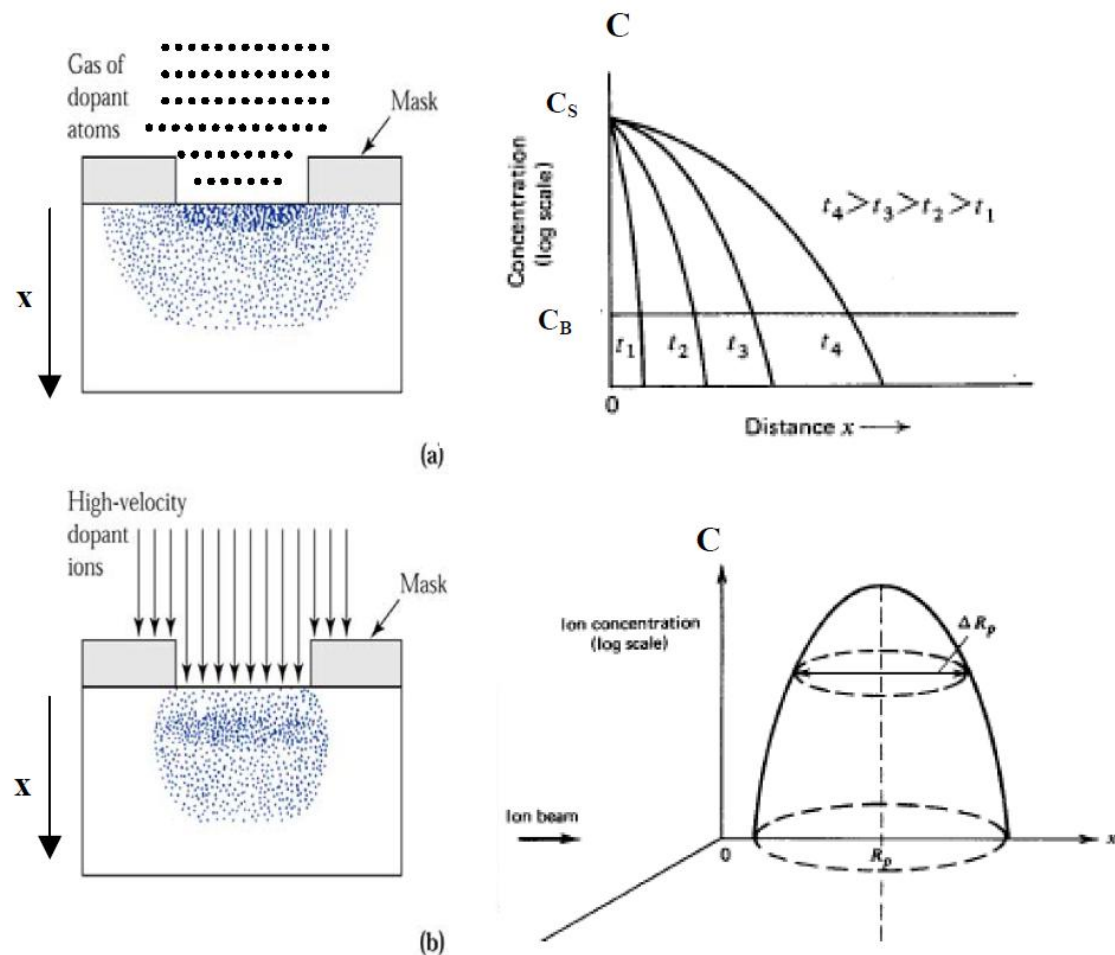


Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ» ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών – Φωτονική»

1) Προεναπόθεση με τη μέθοδο της Διάχυσης από την αέριο φάση. Υπήρξε και η κυρίαρχη μέχρι τα μέσα του 1970. Η εισαγωγή της πρόσμιξης γίνεται σε περιβάλλον όπου τα άτομα της βρίσκονται στην αέριο φάση και σε υψηλή θερμοκρασία ($>500\text{ }^\circ\text{C}$). Τα άτομα της πρόσμιξης διαχέονται στο υπόστρωμα εμφανίζοντας μια κατανομή συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος.

Το κύριο χαρακτηριστικό γνώρισμα της μεθόδου είναι ότι η επιφανειακή συγκέντρωση της πρόσμιξης παραμένει σταθερή καθ' όλο τον χρόνο που διαρκεί η διαδικασία εισαγωγής της πρόσμιξης. Η τελική κατανομή τους εξαρτάται από τη θερμοκρασία, τη μάζα των ιόντων της πρόσμιξης και τον χρόνο που διαρκεί η διαδικασία της προεναπόθεσης (για μεγαλύτερο χρόνο η πρόσμιξη κατανέμεται βαθύτερα).

2) Κατά τη μέθοδο της Ιοντικής Εμφύτευσης τα ιόντα της πρόσμιξης εισάγονται στο υπόστρωμα με τη χρήση ενός «πυροβόλου ιόντων» που ονομάζεται ιοντικός εμφυτευτής. Η τελική κατανομή τους προσεγγίζει στην ιδανική περίπτωση αυτή της γκαουσιανής. Εξαρτάται (η μέση τιμή και η τυπική της απόκλιση) από την ενέργεια με την οποία τα ιόντα εισάγονται στο υπόστρωμα και την μάζα των εμφυτευομένων ιόντων. Είναι δε (θεωρητικά) διαδικασία θερμοκρασίας δωματίου.





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

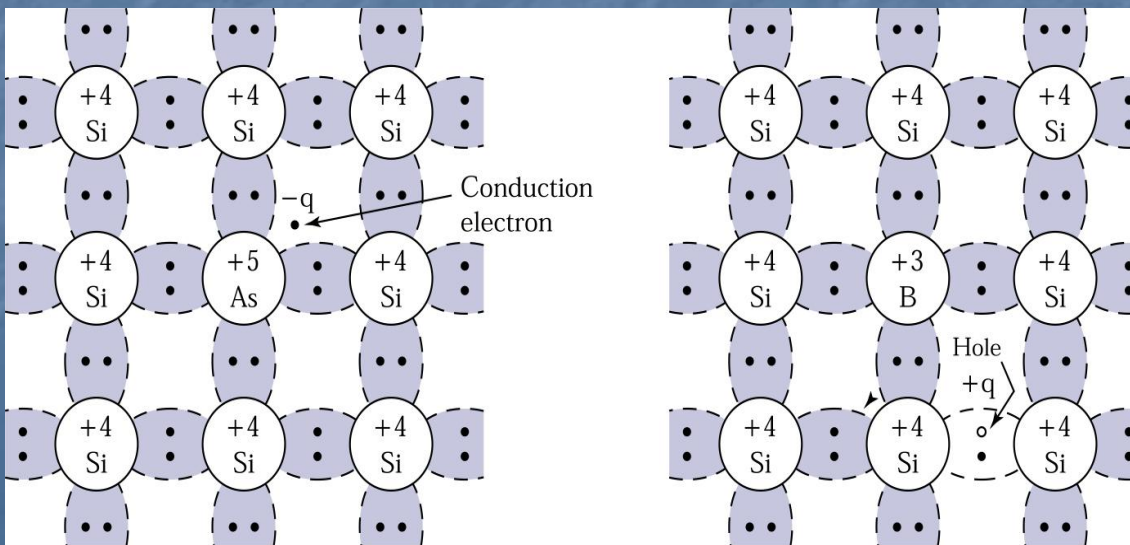
Β) Το στάδιο της οδήγησης (drive – in) της πρόσμιξης. Είναι το στάδιο που ακολουθεί αυτό της προεναπόθεσης και είναι ένα στάδιο ανόπτησης (annealing) του υποστρώματος σε υψηλή θερμοκρασία ($500-1200^{\circ}\text{C}$) ανάλογα με την εφαρμογή και το σημείο τήξεως του υποστρώματος. Πρόκειται ουσιαστικά για ένα στάδιο διάχυσης της πρόσμιξης που έχει εισαχθεί κατά την προεναπόθεση στο στερεό υπόστρωμα και εξυπηρετεί έναν τριπλό σκοπό:

(i) Την οδήγηση της πρόσμιξης σε βάθος στο υπόστρωμα ώστε να επιτευχθεί το επιθυμητό βάθος επαφής x_j .
(ii) Την ενεργοποίηση (activation) της πρόσμιξης, δηλαδή την υποβοήθηση των ατόμων της στο να καταλάβουν θέσεις αντικατάστασης στο κρυσταλλικό πλέγμα του υποστρώματος ώστε να μπορούν να δράσουν σαν δότες ή αποδέκτες.

(iii) Την αποκατάσταση της κρυσταλλικής δομής του υποστρώματος που έχει αλλοιωθεί κατά το στάδιο της προεναπόθεσης όταν σαν μέθοδος εισαγωγής της πρόσμιξης έχει χρησιμοποιηθεί η ιοντική εμφύτευση.

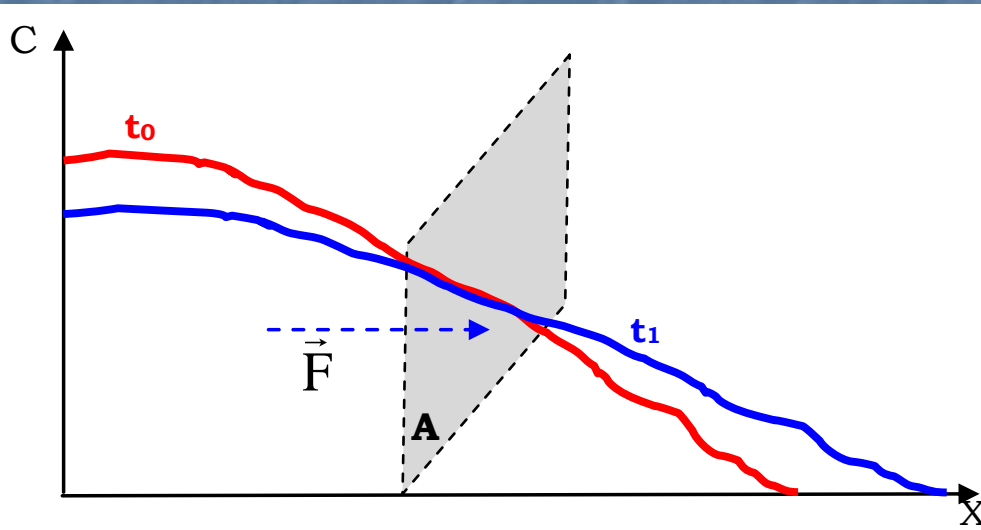
Κατά συνέπεια κατά το στάδιο αυτό τα μεγέθη που κυρίως ενδιαφέρουν είναι :

- Το τελικό βάθος της επαφής x_j , όπως αυτό έχει ορισθεί στην προηγούμενη παράγραφο.
- Η χωροχρονική κατανομή της συγκέντρωσης $C_A(x,t)$ πρόσμιξης στο υπόστρωμα, που συνιστά και το λεγόμενο χημικό προφίλ της (chemical profile/chemical concentration).





8. Μακροσκοπική περιγραφή της διάχυσης προσμίξεων σε Ημιαγωγούς

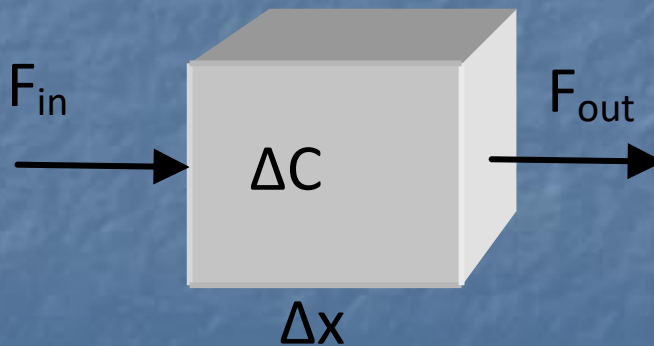


Διάχυση: Αυθόρμητη ροή ατόμων πρόσμιξης λόγω βαθμίδας συγκέντρωσής τους στο σώμα.

Ροή (flux) των διαχεόμενων προσμίξεων: ορίζεται ως το πλήθος των ατόμων τους που διαχέεται προς μία κατεύθυνση ανά μονάδα επιφανεΐας και χρόνου. Η ροή συμβολίζεται με F και μετράται σε $m^{-2} sec^{-1}$

$$F = -D \frac{dC}{dx}$$

1ος νόμος του Fick



$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = - \frac{\Delta F}{\Delta x} = - \frac{F_{out} - F_{in}}{\Delta x}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial F}{\partial x} \Rightarrow \frac{\partial C}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} \left(-D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \Rightarrow \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

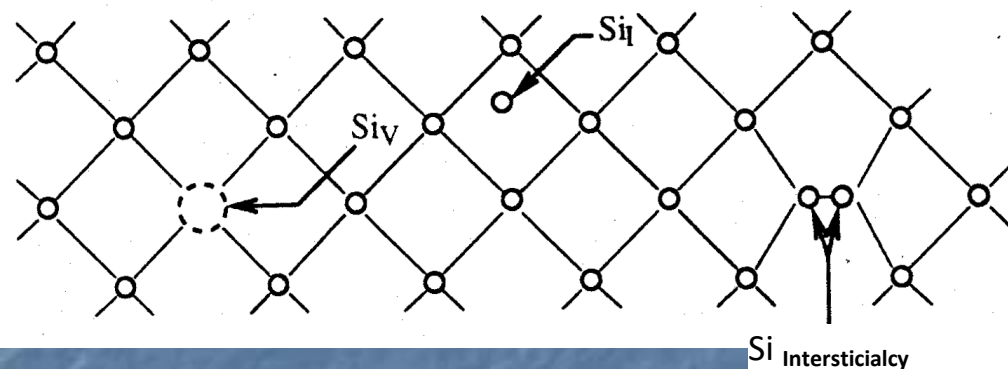
2ος νόμος του Fick



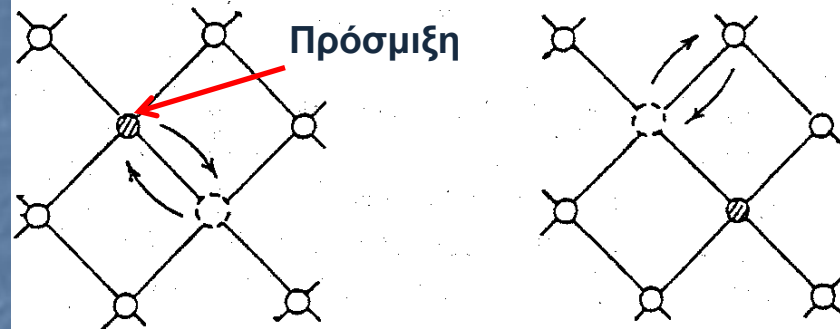
Ο συντελεστής διάχυσης της πρόσμιξης εμπεριέχει:

(α) Τον μικροσκοπικό μηχανισμό της διάχυσης των ατόμων της στον ημιαγωγό. Αυτή πραγματοποιείται μέσω των σημειακών ατελειών του κρυστάλλου.

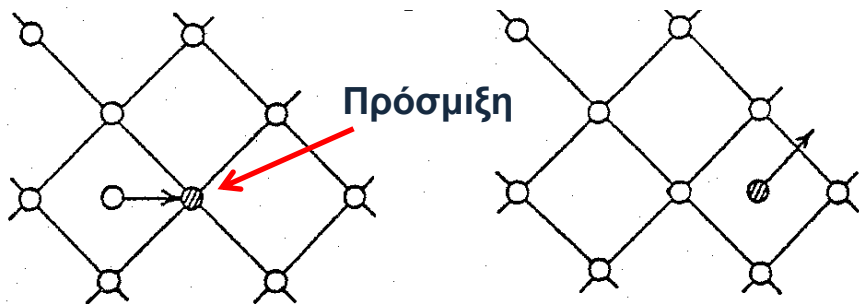
Σημειακές Ατέλειες στο Si



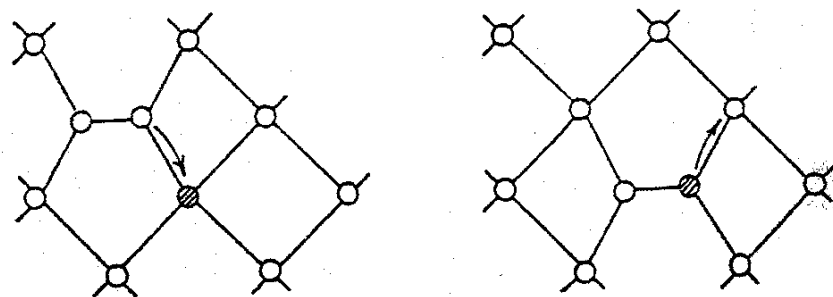
Διάχυση μέσω vacancies (Sb)



Διάχυση μέσω interstitials (B, P)



Διάχυση μέσω interstitialcy





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
 ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
 Φωτονική»

(β) Τη θερμοκρασιακή εξάρτηση του φαινομένου. Σε αντίθεση με τους φορείς αγωγιμότητας (ηλεκτρόνια και οπές), τα άτομα των προσμίξεων απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες για να διαχυθούν.

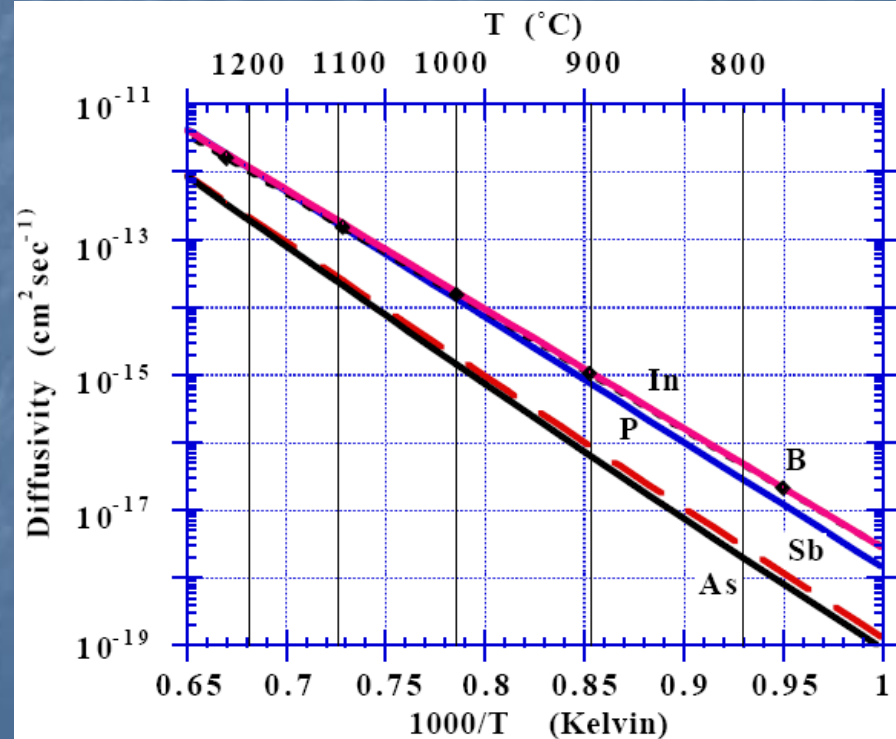
Ο συντελεστής διάχυσης εξαρτάται και από την συγκέντρωση των ενδογενών φορέων αγωγιμότητας του συγκεκριμένου ημιαγωγού στη δεδομένη θερμοκρασία.

► Με τον όρο ενδογενείς συνθήκες διάχυσης εννοούμε αυτές που διαμορφώνονται όταν η συγκέντρωση της διαχεόμενης πρόσμιξης είναι μικρότερη από αυτή των ενδογενών φορέων αγωγιμότητας n_i του ημιαγωγού στη δεδομένη θερμοκρασία. Τότε:

$$C_A < n_i, \quad D_A = D_0 e^{-\frac{E_A}{k_B T}}$$

Για το Si (A= Si, B ,In, As, Sb, P)

	Si	B	In	As	Sb	P	Units
D^0	560	1.0	1.2	9.17	4.58	4.70	$\text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$
E_A	4.76	3.5	3.5	3.99	3.88	3.68	eV



► Στην αντίθετη περίπτωση έχουμε εξωγενείς συνθήκες διάχυσης και η κατάσταση περιπλέκεται.



9. Μέθοδοι επίλυσης της εξίσωσης διάχυσης σε Ημιαγωγούς

(α) Η μέθοδος της υπέρθεσης

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνήθως για την μελέτη της διάχυσης μιας πρόσμιξης σε άπειρο ή ημιάπειρο υπόστρωμα ημιαγωγού, το οποίο βρίσκεται σε επαφή με μια πηγή πρόσμιξης. Κατά την εφαρμογή της μεθόδου θεωρούμε ότι η πηγή της πρόσμιξης είναι μια υπέρθεση πηγών στοιχειώδους πάχους. Κατά συνέπεια η διάχυση της πρόσμιξης περιγράφεται από το άθροισμα των λύσεων που αφορούν κάθε στοιχειώση πηγή. Βασικό σημείο στην τεχνική αυτή είναι η απόδειξη του ότι η κατανομή μετά τη διάχυση μιας αρχικής δ-κατανομής πρόσμιξης είναι γκαουσιανή.

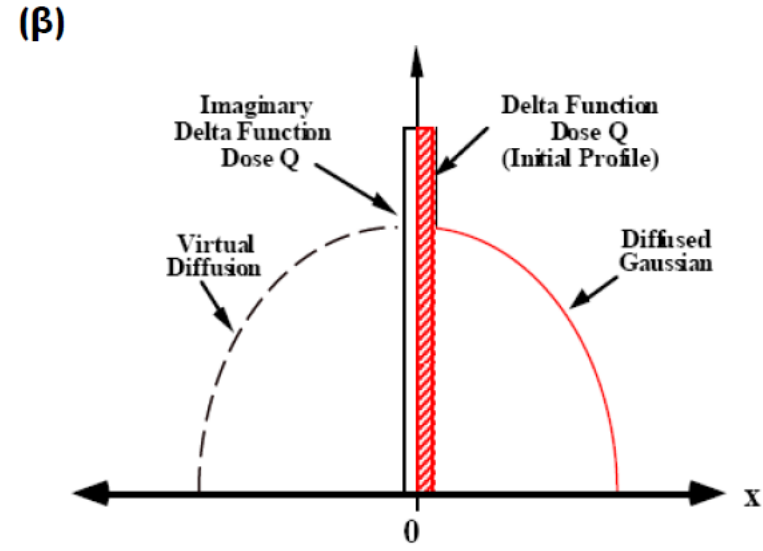
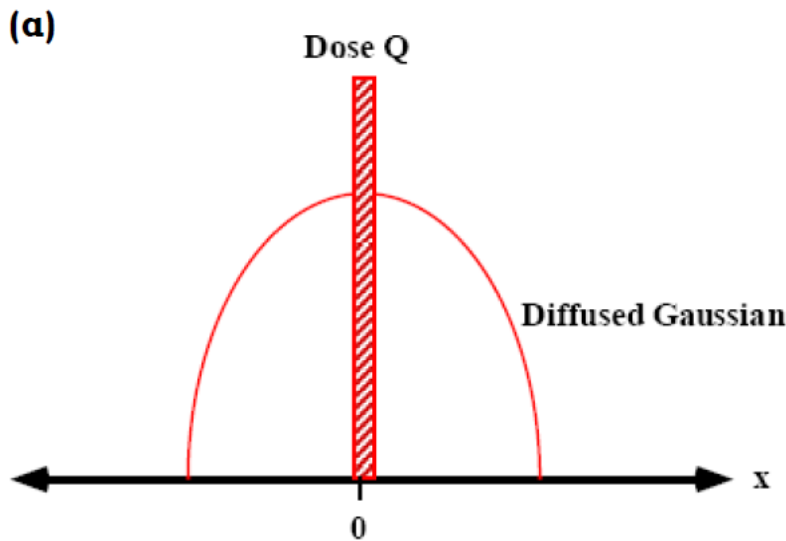
Εφαρμογή 1 (Διάχυση σταθερής ποσότητας πρόσμιξης με κατανομή δ- συνάρτησης):

(α) Θεωρείστε ότι σε κάποιο βάθος σε έναν ημιαγωγό έχει εισαχθεί κατά την προεναπόθεση μια συγκεκριμένη ποσότητα πρόσμιξης Q (άτομα/cm²). Η αρχική κατανομή της θεωρούμε ότι είναι μια πολύ στενή γκαουσιανή στο όριο της δ- συνάρτησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα και κατά συνέπεια μπορούμε να θεωρήσουμε ότι διαχέεται σε άπειρο υπόστρωμα.

(α). Έτσι για $t=0$ η αρχική κατανομή της συγκέντρωσης της πρόσμιξης έχει τη μορφή :
 $C(x,0) = \delta(x)Q$

Βρείτε τη χωροχρονική εξέλιξη της κατανομής της πρόσμιξης κατά την ανόπτηση που ακολουθεί στο στάδιο της οδήγησης θεωρώντας σταθερό συντελεστή διάχυσης D .

(β) Πως διαμορφώνεται το παραπάνω αποτέλεσμα αν η αρχική κατανομή βρίσκεται ακριβώς στην επιφάνεια του ημιαγωγού, όπως στο σχήμα (β);



(α) Στην περίπτωση αυτή έχουμε να λύσουμε την εξίσωση διάχυσης

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

με τις ακόλουθες ομάδες οριακών συνθηκών που πρέπει να πληροί η κατανομή της πρόσμιξης, θεωρώντας ότι η αρχή του συστήματος συντεταγμένων βρίσκεται στο κέντρο της αρχικής κατανομής :

(I) Για $t=0$,

$$\begin{cases} C(x,0) \rightarrow 0, & \text{για } x > 0 \\ C(x,0) \rightarrow \infty, & \text{για } x = 0 \end{cases}$$

(II)

$$\int_{-\infty}^{+\infty} C(x,t) dx = Q$$

Είναι εύκολο να διαπιστωθεί ότι η λύση που ικανοποιεί την παραπάνω εξίσωση με τις οριακές συνθήκες (I) και (II) είναι η :

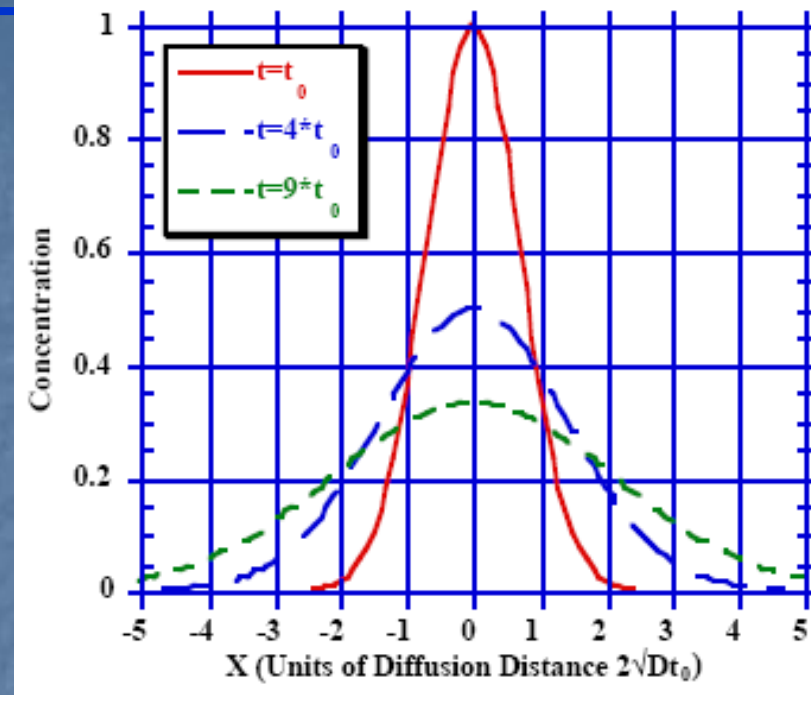
$$C(x,t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$



Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

Παρατηρούμε λοιπόν ότι :

- Η κατανομή της πρόσμιξης κατά τη διάχυση είναι γκαουσιανή, συμμετρική ως προς την αρχή των αξόνων (και κατά συνέπεια την θέση της κορυφής της αρχικής κατανομής), που εξελίσσεται χρονικά διατηρώντας τη μορφή της, όπως φαίνεται στο Σχήμα.
- Η κατανομή της πρόσμιξης διευρύνεται σε πλάτος και μειώνεται σε ύψος, ώστε το ολοκλήρωμά της που αντιπροσωπεύει τη δόση να παραμένει σταθερό.
- Η μέγιστη συγκέντρωση της κατανομής της πρόσμιξης σε κάθε χρονική στιγμή



$$C(0, t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi Dt}} \text{ μεταβάλλεται με το χρόνο σαν } 1/\sqrt{t}$$

(β) Στην περίπτωση αυτή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το πρόβλημα ισοδυναμεί με αυτό μια διπλάσιας δόσης $2Q$ που βρίσκεται με το κέντρο της στην επιφάνεια του ημιαγωγού, όπου θέτουμε και την αρχή των αξόνων. Έτσι η πρόσμιξη διαχέεται εκατέρωθεν της αρχής σε ένα άπειρο υπόστρωμα που κατά το ήμισυ είναι εικονικό. Έτσι η λύση θα είναι εντελώς ανάλογη με την περίπτωση (α) θέτοντας στην αντίστοιχη σχέση δόση $2Q$:

$$C(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi Dt}} \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$



(β) Η μέθοδος του χωρισμού των μεταβλητών

Είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται κυρίως για την διαπραγμάτευση της διάχυσης σε χωρία πεπερασμένου μήκους στα όρια των οποίων απαιτούνται συγκεκριμένες συνθήκες ανάλογα με το πρόβλημα. Στην περίπτωση αυτή μια μερική λύση του προβλήματος γράφεται αρχικά σαν γινόμενο δυο συναρτήσεων, μιας που εξαρτάται από το χρόνο και μιας από τη θέση. Δηλαδή :

$$C(x, t) = X(x)T(t)$$

Επομένως αντικαθιστώντας την στην εξίσωση της διάχυσης έχουμε ότι :

$$X \frac{dT}{dt} = DT \frac{d^2X}{dx^2} \Rightarrow \frac{1}{DT} \frac{dT}{dt} = \frac{1}{X} \frac{d^2X}{dx^2}$$

Κατά συνέπεια έχουμε ότι το ένα μέλος που εξαρτάται μόνο από το χρόνο ισούται με ένα που εξαρτάται μόνο από τη θέση. Αυτό μπορεί να συμβαίνει μόνο εάν και τα δύο μέλη ισούνται με μια σταθερά που για λόγους μαθηματικού χειρισμού τίθεται $-\lambda^2$. Άρα :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{DT} \frac{dT}{dt} = -\lambda^2 \Rightarrow \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} = -\lambda^2 \Rightarrow T(t) = e^{(-\lambda^2 Dt)} \\ \frac{1}{X} \frac{d^2X}{dx^2} = -\lambda^2 \Rightarrow X(x) = A \sin(\lambda x) + B \cos(\lambda x) \end{array} \right.$$



Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

Κατά συνέπεια μια μερική λύση του προβλήματος είναι η :

$$C(x, t) = [A \sin(\lambda x) + B \cos(\lambda x)] e^{(-\lambda^2 Dt)}$$

Κατά συνέπεια η γενική λύση είναι επαλληλία λύσεων της παραπάνω μορφής, δηλαδή :

$$C(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} [A_m \sin(\lambda_m x) + B_m \cos(\lambda_m x)] e^{(-\lambda_m^2 Dt)}$$

Οι σταθερές A_m , B_m , λ_m προσδιορίζονται από τις αρχικές και οριακές συνθήκες του προβλήματος. Μια χρήσιμη σχέση που συνήθως απαιτείται για τον προσδιορισμό των παραπάνω σταθερών είναι η :

$$\int_0^{\ell} \sin\left(\frac{p\pi x}{\ell}\right) \sin\left(\frac{m\pi x}{\ell}\right) dx = \begin{cases} 0, & m \neq p \\ \frac{1}{2}\ell, & m = p \end{cases}$$



Εφαρμογή 2 (Εξωδιάχυση πρόσμιξης από ομοιόμορφα νοθευμένο τμήμα ημιαγωγού πεπερασμένου μήκους): Θεωρείστε ένα στρώμα ημιαγωγού πάχους 1 νοθευμένο αρχικά ομοιόμορφα με συγκέντρωση πρόσμιξης C_0 . Εάν από αυτό πραγματοποιείται εξωδιάχυση της πρόσμιξης και από τις δύο πλευρές ποια θα είναι η χωροχρονική κατανομή της πρόσμιξης κατά τη διάχυση θεωρώντας ότι η συγκέντρωσή της στις δύο επιφάνειες πέφτει στο μηδέν με την έναρξη της διαδικασίας και διατηρείται εκεί ;

Λύση :

Στην περίπτωση αυτή έχουμε να λύσουμε την εξίσωση διάχυσης

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

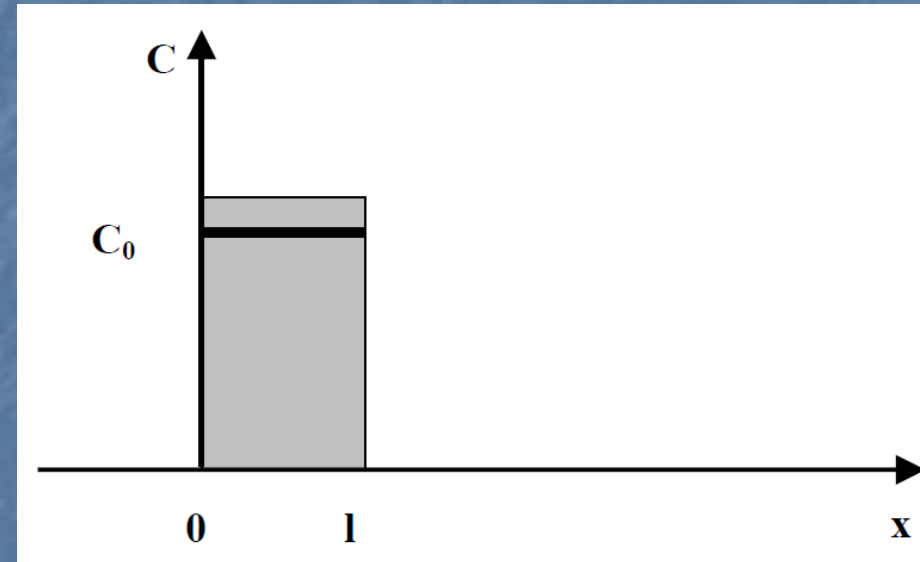
με αρχική συνθήκη :

$$(I) \text{ Για } t=0, \quad C(x,0) = C_0, \quad \text{για } 0 < x < \ell$$

και οριακές συνθήκες :

$$(II) \text{ Για } t > 0, \quad C(x,t) = 0, \quad \text{για } x=0 \text{ και } x = \ell$$

Η γενική λύση με την μέθοδο χωρισμού των μεταβλητών είναι :





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

$$C(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} [A_m \sin(\lambda_m x) + B_m \cos(\lambda_m x)] e^{(-\lambda_m^2 Dt)}$$

Με βάση τις οριακές συνθήκες έχουμε ότι :

Για $x=0$

$$\sum_{m=1}^{\infty} [A_m \sin(0) + B_m \cos(0)] e^{(-\lambda_m^2 Dt)} = 0 \Rightarrow \sum_{m=1}^{\infty} B_m e^{(-\lambda_m^2 Dt)} = 0 \Rightarrow B_m = 0$$

Για $x=l$

$$\sum_{m=1}^{\infty} [A_m \sin(\lambda_m l)] e^{(-\lambda_m^2 Dt)} = 0 \Rightarrow \sin(\lambda_m l) = 0 \Rightarrow \lambda_m l = m\pi \Rightarrow \lambda_m = \frac{m\pi}{l}$$

Με βάση την αρχική συνθήκη :

$$C_0 = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin\left(\frac{m\pi}{l} x\right)$$

Πρέπει να προσδιοριστεί η A_m .

$$C_0 = \sum_{m=1}^{\infty} A_m \sin\left(\frac{m\pi}{l} x\right) \Rightarrow \int_0^l C_0 \sin\left(\frac{p\pi}{l} x\right) dx = \sum_{m=1}^{\infty} \int_0^l A_m \sin\left(\frac{m\pi}{l} x\right) \sin\left(\frac{p\pi}{l} x\right) dx$$

Από το άπειρο άθροισμα το δεξιού μέλους μόνο ένας όρος είναι διάφορος του μηδενός, για $m=p$. Άρα :



Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

$$\int_0^{\ell} C_0 \sin\left(\frac{m\pi}{\ell} x\right) dx = A_m \frac{\ell}{2} \Rightarrow A_m = \frac{2C_0}{\ell} \int_0^{\ell} \sin\left(\frac{m\pi}{\ell} x\right) dx = \frac{2C_0}{\ell} \frac{\ell}{m\pi} \int_0^{\ell} \sin\left(\frac{m\pi}{\ell} x\right) d\left(\frac{m\pi}{\ell} x\right)$$

$$= \frac{2C_0}{m\pi} \left[-\cos\left(\frac{m\pi}{\ell} \ell\right) + \cos(0) \right] = \frac{2C_0}{m\pi} \left[-\cos(m\pi) + 1 \right] \xrightarrow{\cos(m\pi) \neq 1, m=1,3,5\dots}$$

$$A_m = \frac{4C_0}{m\pi}, \quad m = 1, 3, 5..$$

Άρα:

$$C(x, t) = \frac{4C_0}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)} \sin\left[\frac{(2n+1)\pi}{\ell} x\right] e^{-\left[\frac{(2n+1)\pi}{\ell}\right]^2 Dt}, \quad n=0,1,2,3,\dots$$

Παρατήρηση: Αναπτύσσοντας την παραπάνω σειρά έχουμε ότι :

$$C(x, t) = \frac{4C_0}{\pi} \left[e^{-\frac{\pi^2}{\ell^2} Dt} \sin\left(\frac{\pi}{\ell} x\right) + \frac{1}{3} e^{-\frac{9\pi^2}{\ell^2} Dt} \sin\left(\frac{3\pi}{\ell} x\right) + \frac{1}{5} e^{-\frac{25\pi^2}{\ell^2} Dt} \sin\left(\frac{5\pi}{\ell} x\right) + \dots \right]$$

Παρατηρούμε ότι οι διαδοχικοί όροι της σειράς σβήνουν με ραγδαία αυξανόμενο εκθετικό ρυθμό και ύστερα από κάποιο χρόνο (συγκεκριμένα $t > \frac{\ell^2}{\pi^2 D}$) επιζεί πρακτικά μόνο ο πρώτος όρος και η κατανομή της πρόσμιξης περιγράφεται ικανοποιητικά από τη σχέση :

$$C(x, t) \approx \frac{4C_0}{\pi} \left[\exp\left(-\frac{\pi^2 Dt}{\ell^2}\right) \sin\left(\frac{\pi x}{\ell}\right) \right], \quad \text{για } t > \frac{\ell^2}{\pi^2 D}$$



Είναι προφανές από τη μέχρι τώρα ανάλυση ότι η ποσότητα Dt είναι χαρακτηριστική της διάχυσης μιας, δεδομένου ότι η ποσότητα \sqrt{Dt} (που έχει διαστάσεις μήκους) αποτελεί ένα μέτρο της έκτασης στην οποία διαχέεται η αρχική κατανομή της πρόσμιξης. Έτσι ένα στάδιο διάχυσης χαρακτηρίζεται από το παραπάνω γινόμενο που ονομάζεται θερμικό απόθεμα (thermal budget) της διαδικασίας και αποτελεί ένα μέτρο της θερμικής ενέργειας που αποδόθηκε στο στερεό υπόστρωμα στο χρόνο που διήρκεσε η διάχυση της πρόσμιξης.

Μερικές χαρακτηριστικές περιπτώσεις που αφορούν σταθερό συντελεστή διάχυσης της πρόσμιξης σε κάθε θερμοκρασία είναι οι εξής :

- Στην περίπτωση όπου στην ίδια θερμοκρασία πραγματοποιούνται διαδοχικά στάδια διάχυσης μιας πρόσμιξης με διαφορετική χρονική διάρκεια το καθένα, η συνολική διεργασία περιγράφεται από το ενεργό (φαινόμενο) γινόμενο :

$$(Dt)_{\text{eff}} = Dt_1 + Dt_2 + Dt_3 + \dots = D (t_1 + t_2 + t_3 + \dots)$$

- Στην περίπτωση όπου στην ίδια θερμοκρασία πραγματοποιούνται διαδοχικά στάδια διάχυσης μιας πρόσμιξης σε διαφορετική θερμοκρασία και χρονική διάρκεια το καθένα, η συνολική διεργασία περιγράφεται από το ενεργό (φαινόμενο) γινόμενο :

$$(Dt)_{\text{eff}} = D_1 t_1 + D_2 t_2 + D_3 t_3 + \dots$$

όπου σε κάθε θερμοκρασία θα έχουμε διαφορετικό συντελεστή διάχυσης. Δεδομένου ότι ο συντελεστής διάχυσης παρουσιάζει εκθετική εξάρτηση από τη θερμοκρασία, από τα παραπάνω στάδια αυτό που θα κυριαρχήσει ως προς τη διαμόρφωση της τελικής κατανομής της πρόσμιξης θα είναι αυτό που πραγματοποιείται στην υψηλότερη θερμοκρασία.



Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

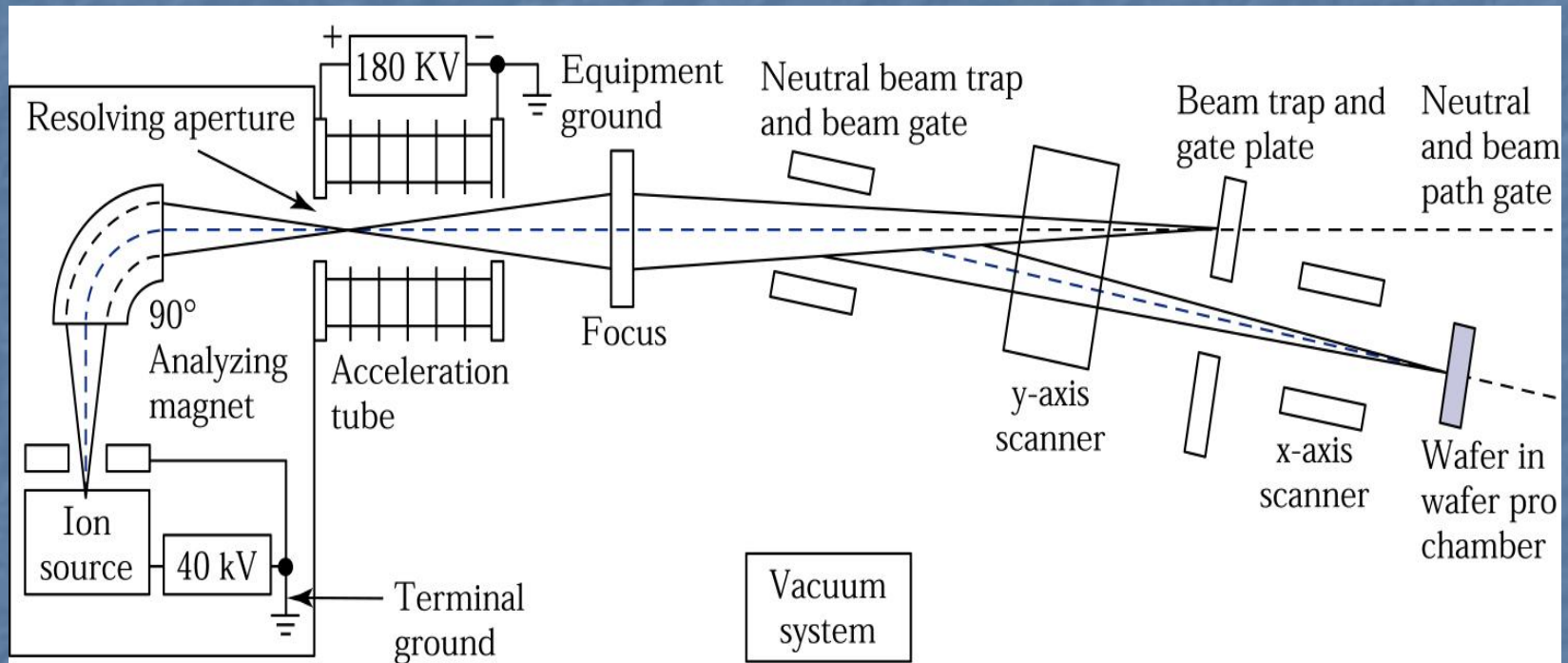
- • • Σύμφωνα με τα παραπάνω μπορούμε να υπολογίσουμε το χρονικό διάστημα t_2 που απαιτείται σε θερμοκρασία T_2 (με συντελεστή διάχυσης D_2) για να προκαλέσει την ίδια διάχυση στην πρόσμιξη που θα προκαλούσε χρονικό διάστημα t_1 σε θερμοκρασία T_1 (με συντελεστή διάχυσης D_1). Οι δύο διεργασίες απαιτούν ουσιαστικά το ίδιο θερμικό απόθεμα και επομένως :

$$D_1 t_1 = D_2 t_2 \Rightarrow t_2 = \frac{D_1}{D_2} t_1$$



9. Δημιουργία επαφών p-n με Ιοντική Εμφύτευση

Κατά τη μέθοδο της ιοντικής εμφύτευσης τα ιόντα της πρόσμιξης εισάγονται στο υποστρώμα με τη χρήση ενός «πυροβόλου ιόντων» που ονομάζεται ιοντικός εμφυτευτής. Η αρχή λειτουργίας του εικονίζεται στο ακόλουθο Σχήμα (βλ. Sze Ch.13)



Η ιοντική εμφύτευση είναι θεωρητικά διαδικασία θερμοκρασίας δωματίου.

Τα κυρίως πλεονεκτήματα της ιοντικής εμφύτευσης είναι ότι εξασφαλίζει απόλυτο έλεγχο της συνολικά εισαγόμενης δόσης πρόσμιξεων και του βάθους εισαγωγής της. Επίσης εξασφαλίζει καλύτερο έλεγχο της τοπικής εισαγωγής της πρόσμιξης σε αντίθεση με τη Διάχυση από την αέριο φάση όπου η πρόσμιξη διαχέεται σημαντικά και πλευρικά. Το μεγαλύτερο μειονέκτημα της ιοντικής εμφύτευσης είναι το ότι προκαλεί καταστροφή του υποστρώματος, η ανακατασκευή του οποίου γίνεται κατά το στάδιο της οδήγησης προκαλώντας διάφορα ανεπιθύμητα φαινόμενα.

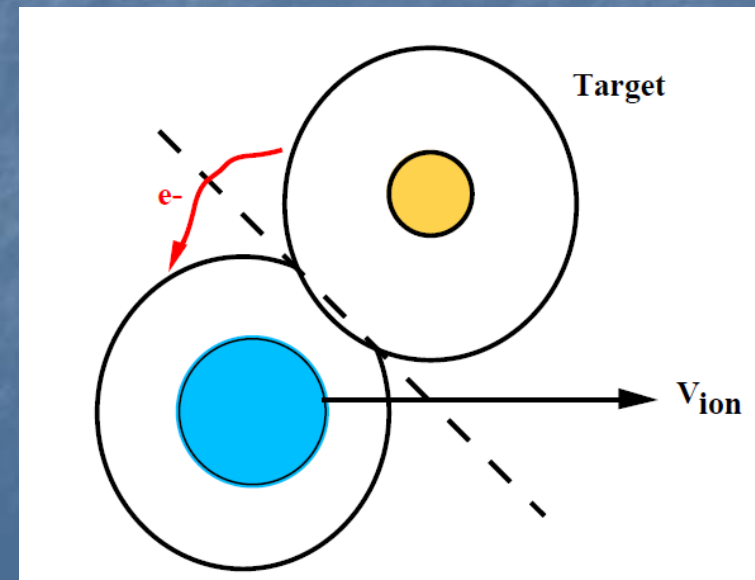
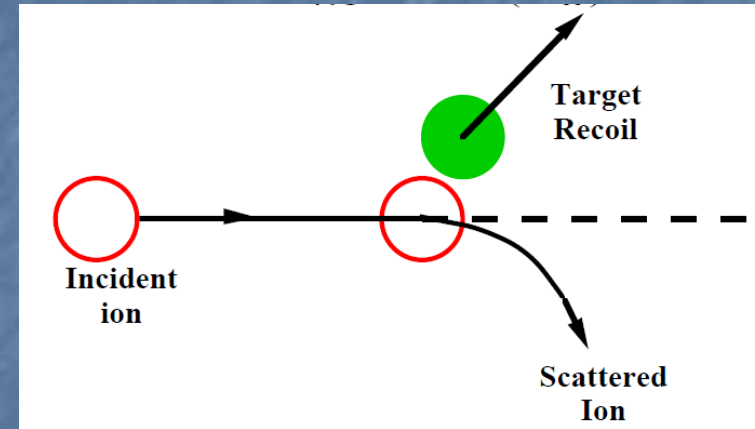


I. Προεναπόθεση:

Τα άτομα της πρόσμιξης προσπίπτουν στο υπόστρωμα με ενέργειες της τάξεως των keV. Επιβραδύνονται μέσα στον κρύσταλλο μέσω δύο μηχανισμών:

(α) Της πυρηνικής ανασχεσης (nuclear stopping) που είναι η σύγκρουσή τους με τους πυρήνες των ατόμων του ημιαγωγού. Η διαδικασία εκτοπίζει Άτομα του ημιαγωγού από τις πλεγματικές τους θέσεις.

(β) Της ηλεκτρονικής ανασχεσης (electronic stopping) που είναι η αλληλεπίδρασή των ηλεκτρονικών νεφών τους με τα ηλεκτρονικά νέφη των ατόμων του ημιαγωγού.





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

Η τελική κατανομή τους προσεγγίζει (στην ιδανική περίπτωση όπου δεν έχουμε φαινόμενα εμπροσθοσκέδασης και οπισθοσκέδασης των εμφυτευόμενων ιόντων) αυτή της γκαουσιανής:

$$C_A(x) = C_p e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}}$$

Προβεβλημένη εμβέλεια (projected Range)

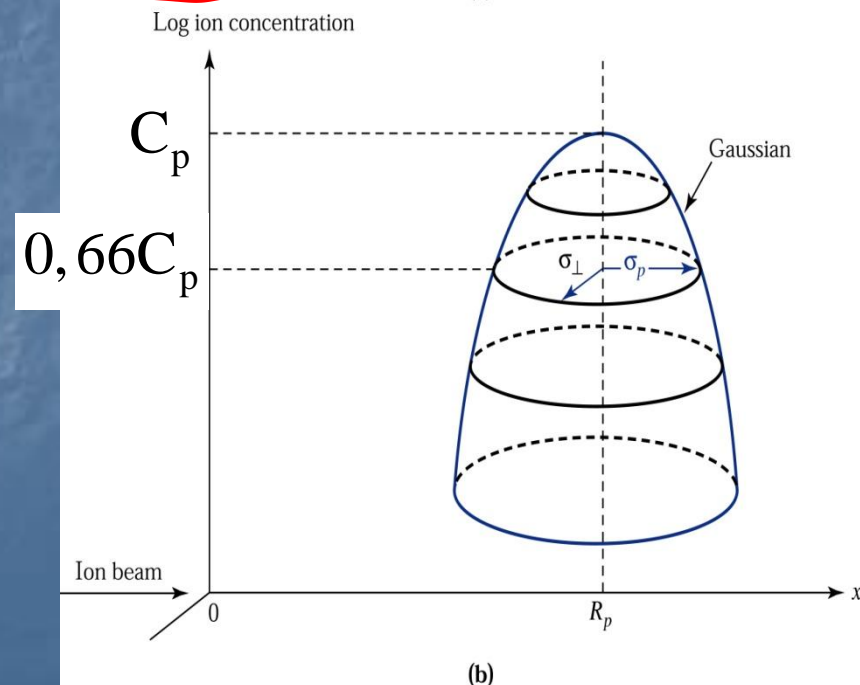
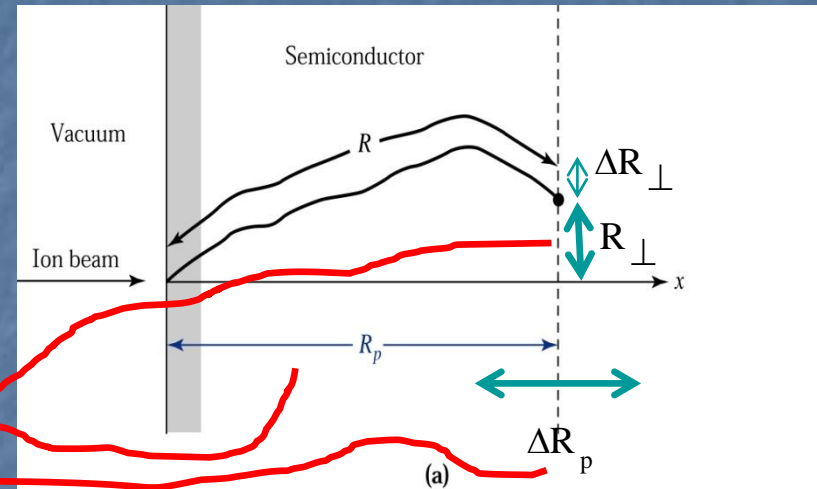
Τυπική απόκλιση (Std Deviation)

Lateral Straggling

Εξαρτώνται από την ενέργεια και τη μάζα των εμφυτευομένων προσμίξεων.

Η συνολική εισαγόμενη δόση θα είναι:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} C_p e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2\Delta R_p^2}} dx \Rightarrow Q = \sqrt{2\pi} C_p \Delta R_p$$

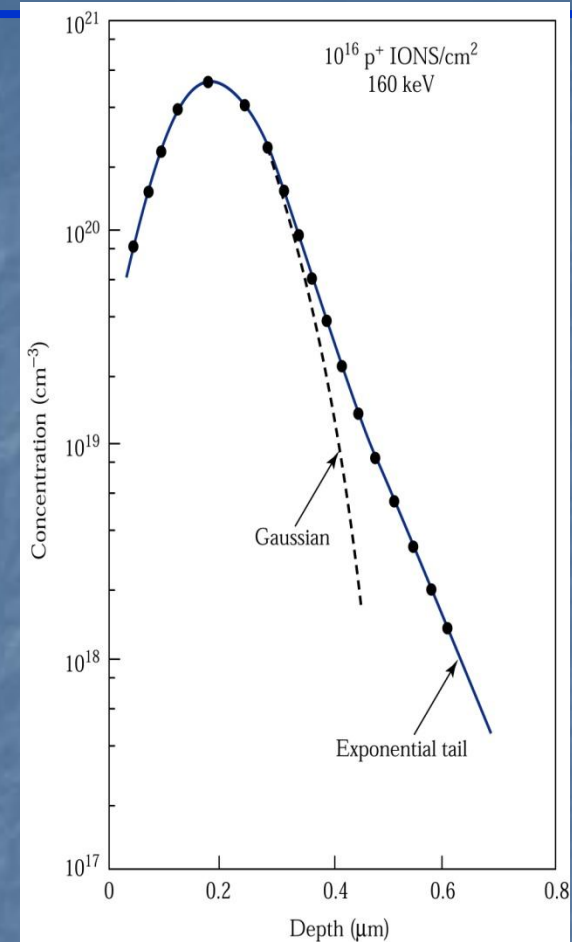




Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
 ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
 Φωτονική»

Δεδομένα για το Si

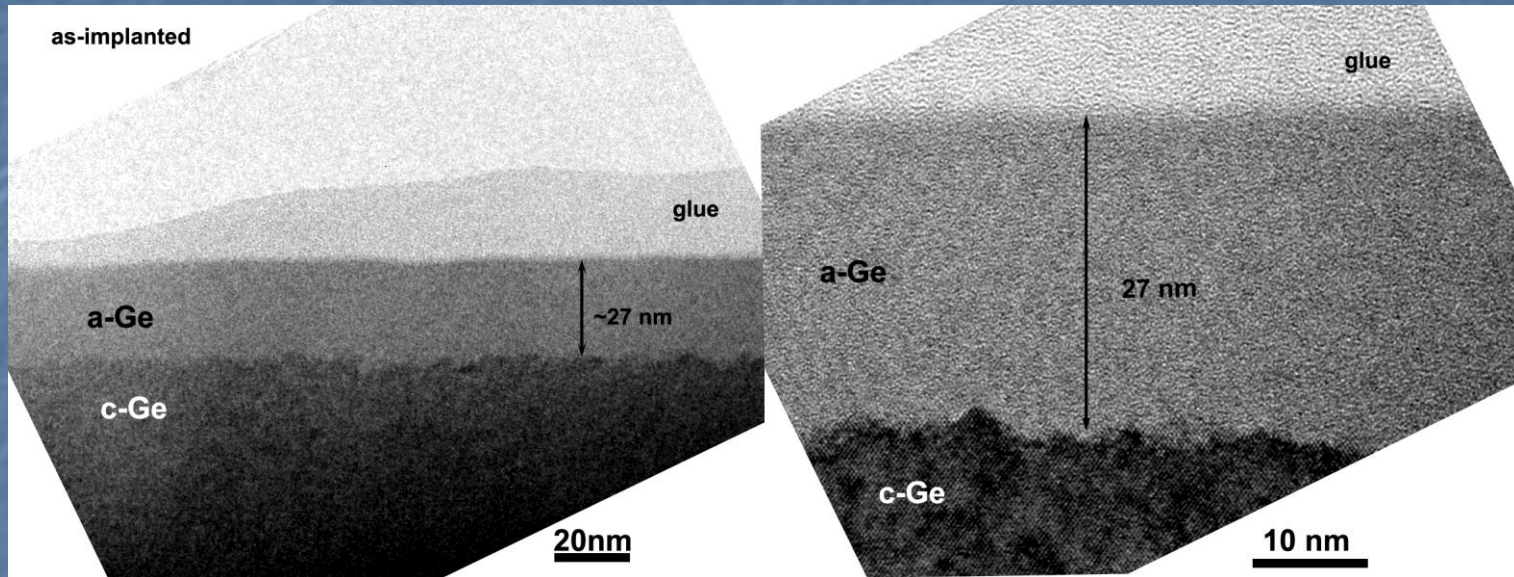
Energy (keV)	Phos		As		Sb		Boron	
	Range (μm)	Std Dev (μm)	Range (μm)	Std Dev (μm)	Range (μm)	Std Dev (μm)	Range (μm)	Std Dev (μm)
10	0.0199	0.0064	0.0084	0.0043	0.0121	0.0058	0.0473	0.0249
20	0.0342	0.0125	0.0156	0.0075	0.0219	0.0100	0.0826	0.0384
30	0.0473	0.0179	0.0226	0.0102	0.0306	0.0133	0.114	0.0483
40	0.0598	0.0229	0.0294	0.0128	0.0385	0.0162	0.143	0.0562
50	0.0717	0.0275	0.0362	0.0152	0.0459	0.0187	0.171	0.0628
60	0.0833	0.0317	0.0429	0.0176	0.0528	0.0209	0.198	0.0685
70	0.0947	0.0356	0.0495	0.0198	0.0594	0.0229	0.223	0.0736
80	0.105	0.0393	0.0561	0.0220	0.0656	0.0248	0.248	0.0780
90	0.116	0.0428	0.0626	0.0241	0.0716	0.0265	0.272	0.0821
100	0.127	0.0461	0.0692	0.0261	0.0773	0.0280	0.296	0.0857
120	0.148	0.0522	0.0821	0.0301	0.0883	0.0309	0.341	0.0922
140	0.169	0.0579	0.0950	0.0339	0.0985	0.0334	0.385	0.0978
160	0.189	0.0630	0.107	0.0375	0.108	0.0357	0.428	0.102
180	0.210	0.0678	0.120	0.0411	0.117	0.0378	0.469	0.107
200	0.229	0.0723	0.133	0.0446	0.126	0.0397	0.509	0.110





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

Οι υψηλές ενέργειες και δόσεις αμορφοποιούν το υπόστρωμα



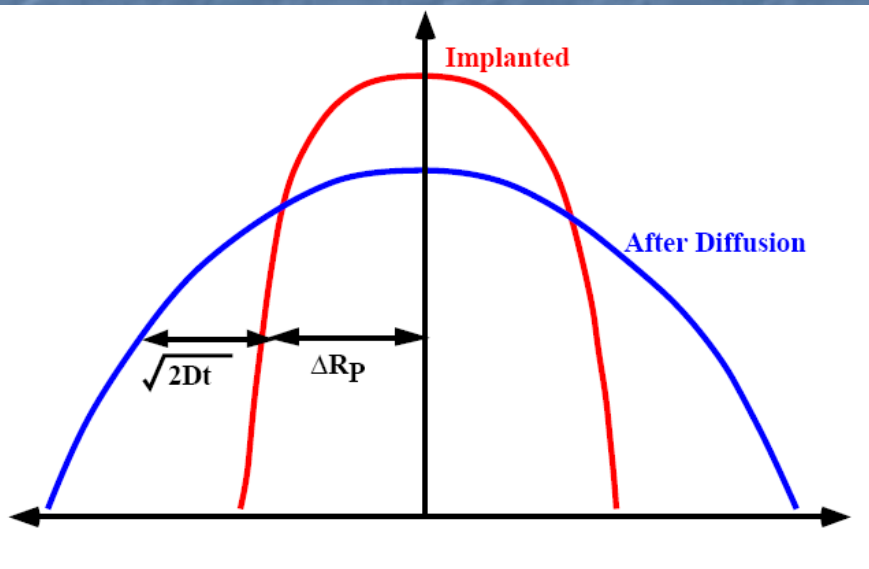
Εμφύτευση P ($11\text{keV}/10^{15}\text{cm}^{-2}$) σε Ge.



II. Οδήγηση

Εάν η οδήγηση της εμφυτευμένης πρόσμιξης Α διαρκεί χρόνο t σε θερμοκρασία T με συντελεστή διάχυσης D_A θα έχουμε σε ενδογενείς συνθήκες διάχυσης ότι η κωροχρονική εξέλιξη του ιδανικού γκαουσιανού προφίλ της εμφυτευμένης πρόσμιξης κατά την οδήγηση δίδεται από την έκφραση:

$$C_A(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi(\Delta R_p^2 + 2D_A t)}} e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2D_A t)}}$$

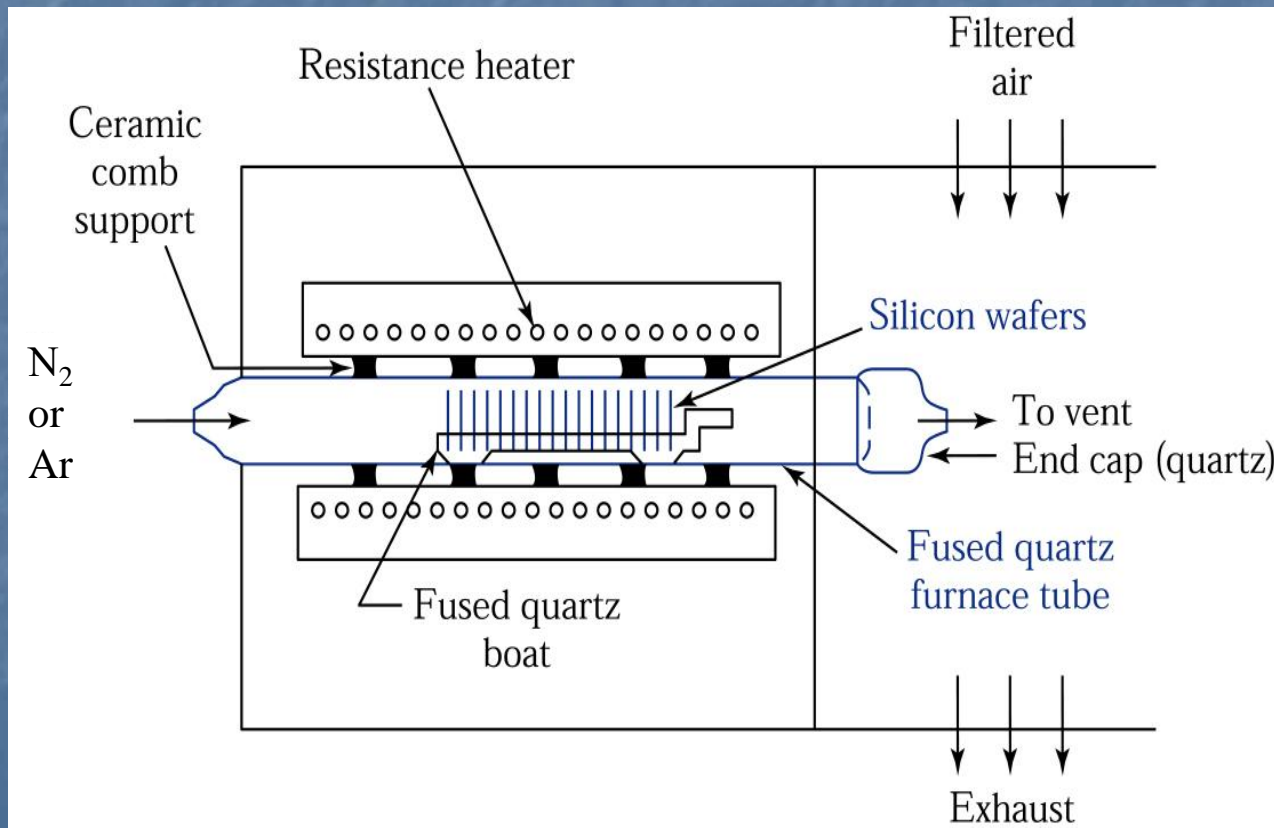


Κατά την οδήγηση επαναकुσταλλοποιείται και το αμορφοποιημένο υπόστρωμα.



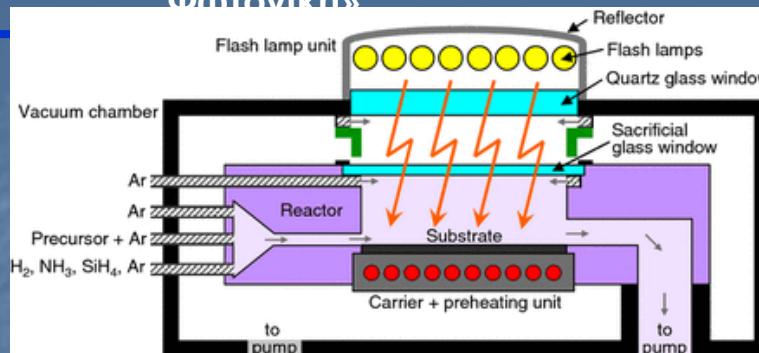
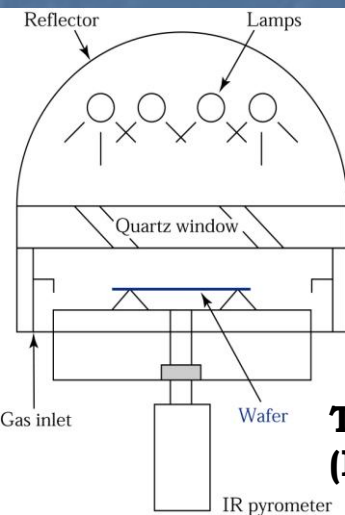
III. Είδη Οδήγησης (Annealing):

Συμβατική σε φούρνο (Furnace Annealing-FA) Διάρκεια σε min-hr. Μαζική σε πολλά wafers. Θέρμανση σε όλο το βάθος του wafer. Θερμοκρασία έως 1250°C . Απόλυτος έλεγχος της θερμοκρασίας. Ρυθμός ανόδου/καθόδου θερμοκρασίας: $10^{\circ}\text{C} / \text{min}$. Standby: 400°C .





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
 ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών – Φωτονική»



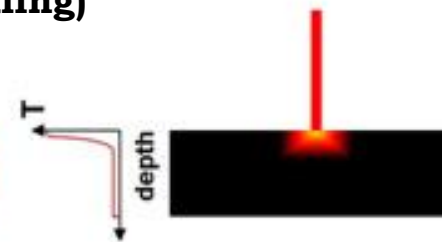
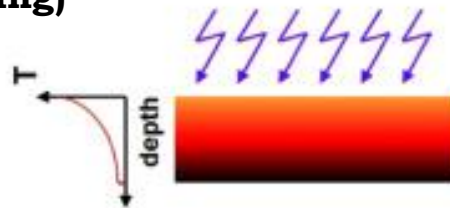
RTA

FLA

Laser

**Ταχεία Θερμική
(Rapid Thermal Annealing)**

(Flash Lamp Annealing)



- **whole wafer** is heated
- $T_{BS} \approx T_{FS}$
- 1 – 100 s
- up to 1300°C
- halogen lamps
- broad spectrum,
~ 800 nm
- wafer by wafer

- **surface** is heated
- $T_{BS} < T_{FS}$
- 100 μ s – 100 ms
- up to 2000°C
- Xe flash lamp
- broad spectrum,
~ 400 nm
- one wafer one shot

- **only surface** is heated
- $T_{BS} \ll T_{FS}$
- 1 – 1000 ns
- up to 2000°C and more
- pulsed lasers
- discrete lines
(interference effects!)
- scanning of a wafer

depend on material properties



Εφαρμογή-Παράδειγμα 3 (Υπολογισμός του βάθους επαφής κατά την προεναπόθεση με ιοντική εμφύτευση θεωρώντας ιδανική γκαουσιανή κατανομή της πρόσμιξης). Μια επαφή p-n κατασκευάζεται σε υποστρώμα Πυριτίου τύπου n με ιοντική εμφύτευση Βορίου ενέργειας 80keV. Εάν η δόση του Βορίου είναι $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-2}$ και η συγκέντρωση δοτών του υποστρώματος τύπου n είναι 10^{15}cm^{-2} να υπολογισθεί το βάθος επαφής x_j . Θεωρείστε ότι μετά την εμφύτευση το προφίλ της πρόσμιξης είναι γκαουσιανό με στοιχεία $R_p = 230 \text{nm}$ και $\Delta R_p = 62 \text{nm}$.

Λύση: Το βάθος της επαφής ορίζεται σαν η απόσταση από την επιφάνεια όπου η συγκέντρωση της εισαγόμενης πρόσμιξης γίνεται ίση με αυτήν της πρόσμιξης του υποστρώματος C_B , δηλαδή :

$$C_{\text{Bor}}(x = x_j) = C_p e^{-\frac{(x_j - R_p)^2}{2\Delta R_p^2}} = C_B \Rightarrow -\frac{(x_j - R_p)^2}{2\Delta R_p^2} = \ln\left(\frac{C_B}{C_p}\right) \Rightarrow (x_j - R_p)^2 = 2\Delta R_p^2 \ln\left(\frac{C_p}{C_B}\right) \Rightarrow$$
$$(x_j - R_p) = \pm \sqrt{2\Delta R_p^2 \ln\left(\frac{C_p}{C_B}\right)} \Rightarrow x_j = R_p \pm \sqrt{2\Delta R_p^2 \ln\left(\frac{C_p}{C_B}\right)}$$

Οι δύο δυνατές λύσεις υποδηλώνουν τις δύο πιθανές τομές του γκαουσιανού προφίλ της πρόσμιξης με τη συγκέντρωση του υποστρώματος C_B που είναι συμμετρικές ως προς την R_p . Παράλληλα έχουμε ότι:



$$C_p = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} = \frac{2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}}{62 \times 10^{-7} \text{ cm} \sqrt{2\pi}} = 1,29 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$$

Κατά συνέπεια παίρνουμε ότι:

$$x_j = 230 \text{ nm} \pm 300 \text{ nm}$$

Δεκτή γίνεται μόνον η λύση

$$x_j = 530 \text{ nm}$$

Δεδομένου ότι η άλλη υποδηλώνει βάθος επαφής εκτός των ορίων του υποστρώματος (η επιφάνεια του οποίου είναι στο $x = 0$).



Εφαρμογή-Παράδειγμα 4 (Υπολογισμός του βάθους επαφής κατά την οδήγηση πρόσμιξης μετά από ιοντική εμφύτευση με ιδανική γκαουσιανή κατανομή). Μια επαφή p-n κατασκευάζεται σε υπόστρωμα Πυριτίου τύπου n συγκέντρωσης δοτών $C_B = 10^{15} \text{cm}^{-3}$ με ιοντική εμφύτευση Βορίου ενέργειας 30keV. Μετά το στάδιο της προεναπόθεσης η κατανομή του Βορίου είναι ιδανική γκαουσιανή με στοιχεία $R_p = 0,114 \mu\text{m}$ και $\Delta R_p = 0,0483 \mu\text{m}$. Η δόση του εμφυτευμένου Βορίου είναι $1,2 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}$. Εάν το στάδιο της οδήγησης πραγματοποιείται με ανόπτηση στους 950°C για 60min και σε ενδογενείς συνθήκες διάχυσης να υπολογισθεί το τελικό βάθος της επαφής x_j .

Λύση : Δεδομένου ότι μετά την προεναπόθεση με ιοντική εμφύτευση το προφίλ του Βορίου είναι ιδανικό γκαουσιανό, η κατανομή του κατά την οδήγηση θα δίδεται από την έκφραση:

$$C_{\text{Bor}}(x, t) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi(\Delta R_p^2 + 2D_A t)}} e^{-\frac{(x-R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2D_A t)}}$$

Το βάθος της επαφής ορίζεται σαν η απόσταση από την επιφάνεια όπου η συγκέντρωση της εισαγόμενης πρόσμιξης γίνεται ίση με αυτήν της πρόσμιξης του υποστρώματος C_B , δηλαδή :

$$C_B = \frac{Q}{\sqrt{2\pi(\Delta R_p^2 + 2D_{\text{Bor}} t)}} e^{-\frac{(x_j - R_p)^2}{2(\Delta R_p^2 + 2D_{\text{Bor}} t)}} \Rightarrow (x_j - R_p)^2 = 2(\Delta R_p^2 + 2D_{\text{Bor}} t) \ln \left(\frac{Q}{\sqrt{2\pi(\Delta R_p^2 + 2D_{\text{Bor}} t)}} \frac{1}{C_B} \right)$$



Ο συντελεστής διάχυσης του Βορίου στους 950 °C είναι:

$$D_{\text{Bor}} = D_0 \exp\left(-\frac{E_A}{k_B T}\right) = 1,0 \exp\left(-\frac{3,5 \text{ eV}}{8,61 \times 10^{-5} \frac{\text{eV}}{\text{K}} \times 1223 \text{ K}}\right) \text{cm}^2 \text{sec}^{-1} = 3,67 \times 10^{-15} \text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$$

Κατά συνέπεια έχουμε ότι:

$$(x_j - R_p)^2 = 2 \left[(0,0483)^2 \times 10^{-8} \text{cm}^2 + 2 \times 3,67 \times 10^{-15} \text{cm}^2 \text{sec}^{-1} \times 3600 \text{sec} \right] \ln \left(\frac{1,2 \times 10^{13} \text{cm}^2}{\sqrt{6,28 \times 5 \times 10^{-11} \times 10^{15} \text{cm}^2}} \right)$$
$$\Rightarrow (x_j - R_p)^2 = 6,5 \times 10^{-10} \text{cm}^2 \Rightarrow x_j - R_p = \pm 0,255 \mu\text{m}$$

Δεκτή είναι η λύση με το (+) που δίνει βάθος επαφής εντός του υποστρώματος Πυριτίου και κατά συνέπεια:

$$x_j = R_p + 0,255 \mu\text{m} = 0,114 \mu\text{m} + 0,255 \mu\text{m} = 0,369 \mu\text{m}$$



Εφαρμογή-Παράδειγμα 5: Θεωρείστε την κατασκευή μίας επαφής p-n με εφύτευση βορίου 150 – 200 KeV σε υπόστρωμα Si τύπου n και ανόπτηση στους 1100°C. Εάν οι επιθυμητές τιμές για την επαφή αυτή είναι $\rho_s = 900 \Omega/\square$ και $x_j = 3\mu\text{m}$, ενώ η συγκέντρωση του υποστρώματος n είναι $C_B = 1 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ ποια είναι η δόση βορίου που πρέπει να εμφυτευτεί; Θεωρείστε ότι η ενέργεια της εμφύτευσης είναι τέτοια ώστε η αρχική κατανομή της πρόσμιξης να είναι τύπου δ-συνάρτησης εφαπτόμενης στην επιφάνεια του υποστρώματος.

Λύση: Από την εκφώνηση καταλαβαίνουμε ότι το προφίλ της εμφυτευμένης πρόσμιξης κατά την προεναπόθεση είναι αυτό της Εφαρμογής 1.

Θα έχουμε δε ότι:

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{R_s x_j} = \frac{1}{(900 \Omega / \square)(3 \times 10^{-4} \text{ cm})} = 3,7 \Omega \text{ cm}^{-1}$$

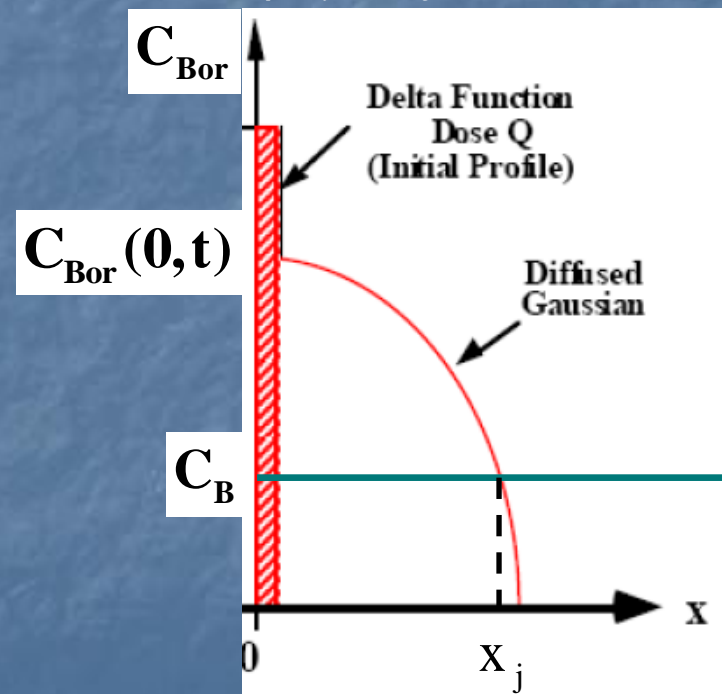
Κατά το στάδιο της οδήγησης το αρχικό προφίλ διαχέεται ως γκαουσιανό.

Ανατρέχοντας στις καμπύλες Irvin (P-type Gaussian Diffusion)

βρίσκουμε ότι η απαιτούμενη

επιφανειακή συγκέντρωση του βορίου μετά τη λήξη της οδήγησης θα είναι:

$$C_{\text{Bor}}(0, t) = 4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$





Επομένως θα έχουμε ότι:

$$C_{\text{Bor}}(0, t) e^{-\frac{x_j^2}{4(D_{\text{Bor}} t)_{\text{drive-in}}}} = C_B \Rightarrow (D_{\text{Bor}} t)_{\text{drive-in}} = \frac{x_j^2}{4 \ln\left(\frac{C(0, t)}{C_B}\right)} = 3,7 \times 10^{-9} \text{ cm}^2$$

Άρα:

$$C_{\text{Bor}}(0, t) = \frac{Q}{\sqrt{\pi(D_{\text{Bor}} t)_{\text{drive-in}}}} \Rightarrow Q = C_{\text{Bor}}(0, t) \sqrt{\pi(D_{\text{Bor}} t)_{\text{drive-in}}} = 4,3 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$$

Το στάδιο της οδήγησης πραγματοποιήθηκε στους 1100°C όπου ο συντελεστής διάχυσης του Βορίου είναι :

$$D_{\text{Bor}} = 1,5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}$$

Κατά συνέπεια το στάδι της οδήγησης διήρκεσε:

$$t_{\text{drive-in}} = \frac{(D_{\text{Bor}} t)_{\text{drive-in}}}{D_{\text{Bor}}} = \frac{3,7 \times 10^{-9} \text{ cm}^2}{1,5 \times 10^{-13} \text{ cm}^2 \text{ sec}^{-1}} = 6,8 \text{ h}$$



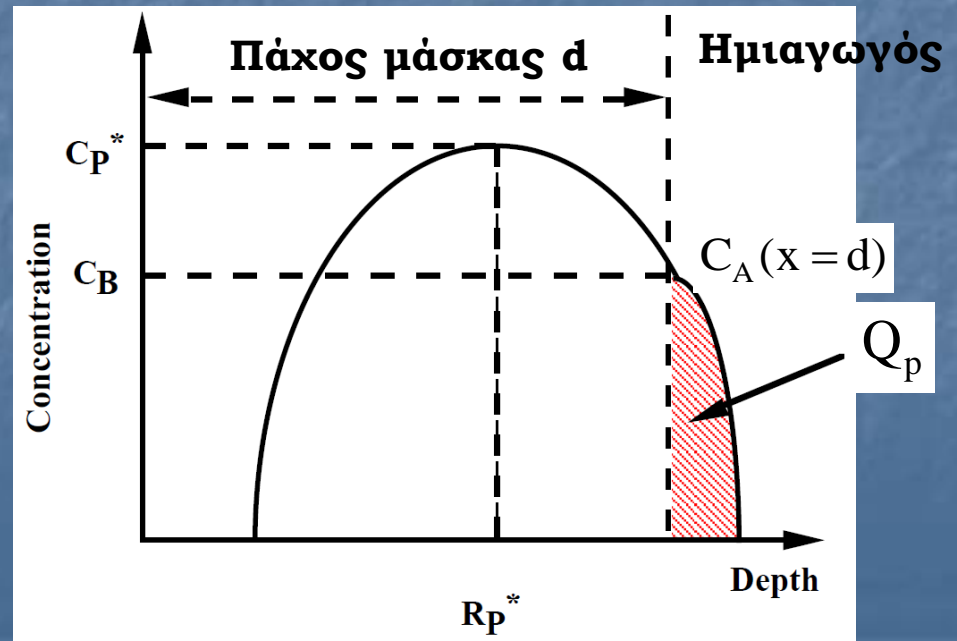
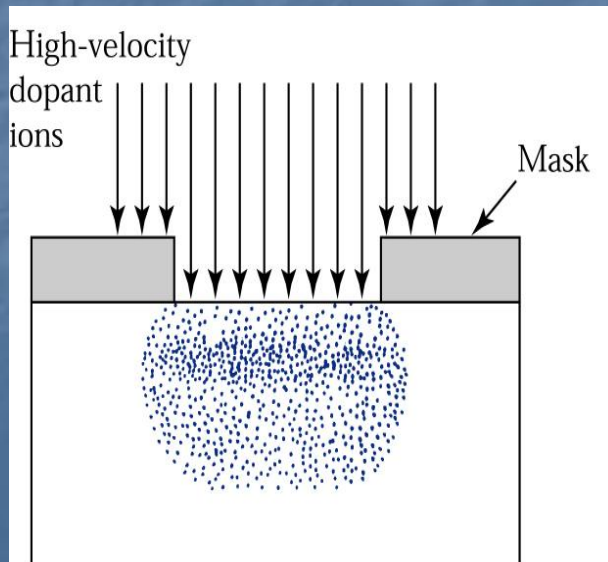
IV. Τοπική Εμφύτευση (Local Implant) μέσω μάσκας:

Δεν θα πρέπει η πρόσμιξη να διαπεράσει το υλικό της μάσκας. Έστω:

$$R_p^*, \Delta R_p^*$$

η προβλεπόμενη εμβέλεια των εμφυτευόμενων ατόμων πρόσμιξης και η τυπική της απόκλιση στο υλικό της μάσκας. Τότε θα πρέπει:

$$C_A(x=d) = C_p^* e^{-\frac{(d-R_p^*)^2}{2\Delta R_p^{*2}}} \leq C_B$$





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»

Το τμήμα της εμφυτευόμενης δόσης που θα διαπεράσει τη μάσκα κατά την προεναπόθεση θα είναι:

$$Q_p = \frac{Q}{\sqrt{2\pi\Delta R_p^*}} \int_d^\infty e^{-\frac{(x-R_p^*)^2}{2\Delta R_p^*}} dx \Rightarrow Q_p = \frac{Q}{\sqrt{2\pi\sigma_p^*}} \int_d^\infty e^{-\frac{(x-R_p^*)^2}{2\sigma_p^{*2}}} dx = \frac{Q}{\sqrt{2\pi\sigma_p^*}} \int_d^\infty e^{-\left(\frac{x-R_p^*}{\sqrt{2}\sigma_p^*}\right)^2} dx \xrightarrow{\frac{x-R_p^*}{\sqrt{2}\sigma_p^*}=y \rightarrow dx=\sqrt{2}\sigma_p^* dy}$$

$$Q_p = \frac{Q}{\sqrt{2\pi\sigma_p^*}} \int_{\frac{d-R_p^*}{\sqrt{2}\sigma_p^*}}^\infty e^{-y^2} \sqrt{2}\sigma_p^* dy \xrightarrow{\int_x^\infty e^{-y^2} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erfc}(x)} Q_p = \frac{Q}{\sqrt{2\pi\sigma_p^*}} \sqrt{2}\sigma_p^* \frac{\sqrt{\pi}}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{d-R_p^*}{\sqrt{2}\sigma_p^*}\right) \Rightarrow$$

$$Q_p = \frac{Q}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{d-R_p^*}{\sqrt{2}\sigma_p^*}\right)$$

Για να είναι αποτελεσματική η μάσκα θα πρέπει:

$$\frac{d-R_p^*}{\sqrt{2}\sigma_p^*} \gg 1$$

από όπου προκύπτει (γιατί;) ότι:

$$\frac{e^{-u^2}}{u} = 2\sqrt{\pi}T, \text{ με } T = \frac{Q_p}{Q} \text{ και } u = \frac{d-R_p^*}{\sqrt{2}\sigma_p^*}$$



10. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

1. **Φορτίο ηλεκτρονίου** : $q_e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Cb}$

Ατομική μονάδα μάζας $m_u = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kgr}$

Σταθερά Boltzmann : $k_B = 8,61 \times 10^{-5} \text{ eV/ } ^\circ\text{K}$

2. **Για το πυρίτιο** : $n_i (900^\circ\text{C}) = 2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$, $n_i (1100^\circ\text{C}) = 6 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.

3. Οι προβεβλημένες εμβέλειες και οι διακυμάνσεις των κυριότερων προσμίξεων στο πυρίτιο :

Energy (keV)	Phos		As		Sb		Boron	
	Range (μm)	Std Dev (μm)	Range (μm)	Std Dev (μm)	Range (μm)	Std Dev (μm)	Range (μm)	Std Dev (μm)
10	0.0199	0.0064	0.0084	0.0043	0.0121	0.0058	0.0473	0.0249
20	0.0342	0.0125	0.0156	0.0075	0.0219	0.0100	0.0826	0.0384
30	0.0473	0.0179	0.0226	0.0102	0.0306	0.0133	0.114	0.0483
40	0.0598	0.0229	0.0294	0.0128	0.0385	0.0162	0.143	0.0562
50	0.0717	0.0275	0.0362	0.0152	0.0459	0.0187	0.171	0.0628
60	0.0833	0.0317	0.0429	0.0176	0.0528	0.0209	0.198	0.0685
70	0.0947	0.0356	0.0495	0.0198	0.0594	0.0229	0.223	0.0736
80	0.105	0.0393	0.0561	0.0220	0.0656	0.0248	0.248	0.0780
90	0.116	0.0428	0.0626	0.0241	0.0716	0.0265	0.272	0.0821
100	0.127	0.0461	0.0692	0.0261	0.0773	0.0280	0.296	0.0857
120	0.148	0.0522	0.0821	0.0301	0.0883	0.0309	0.341	0.0922
140	0.169	0.0579	0.0950	0.0339	0.0985	0.0334	0.385	0.0978
160	0.189	0.0630	0.107	0.0375	0.108	0.0357	0.428	0.102
180	0.210	0.0678	0.120	0.0411	0.117	0.0378	0.469	0.107
200	0.229	0.0723	0.133	0.0446	0.126	0.0397	0.509	0.110



4. Οι συντελεστές διάχυσης των κυριότερων προσμιξεων στο πυρίτιο :

(α) Σε ενδογενείς συνθήκες :

	Si	B	In	As	Sb	P	Units
D^0	560	1.0	1.2	9.17	4.58	4.70	$\text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$
E_A	4.76	3.5	3.5	3.99	3.88	3.68	eV

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

$$\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x)$$

$$\text{erf}(0) = 0$$

$$\text{erf}(\infty) = 1$$

$$\text{erf}(x) \approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} x, \text{ για } x \ll 1$$

$$\text{erfc}(x) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{e^{-x^2}}{x}, \text{ για } x \gg 1$$

$$\frac{d}{dx} \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{-x^2}$$

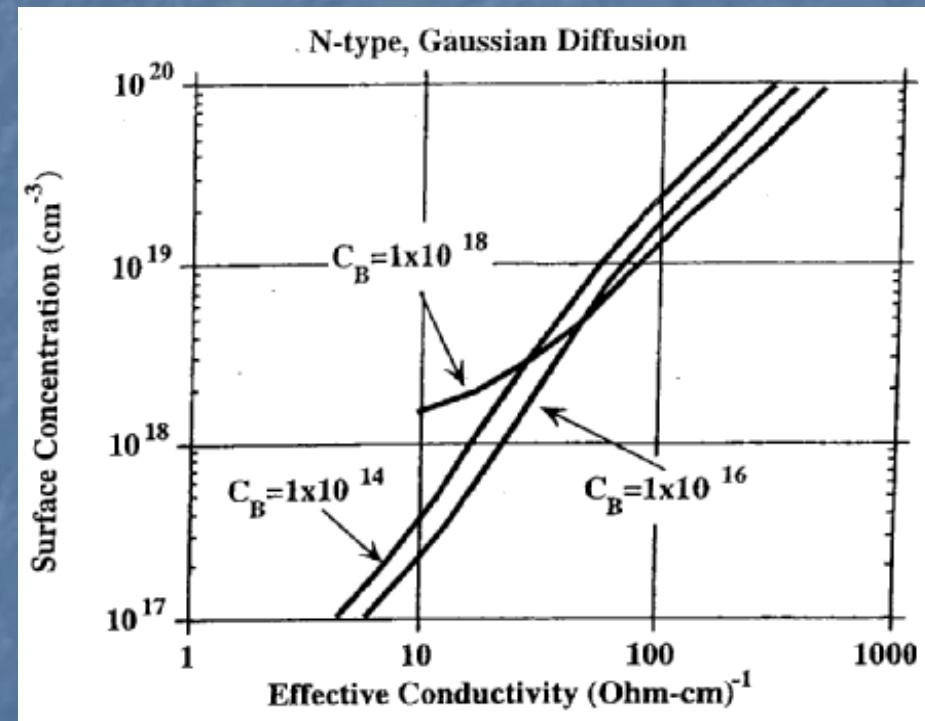
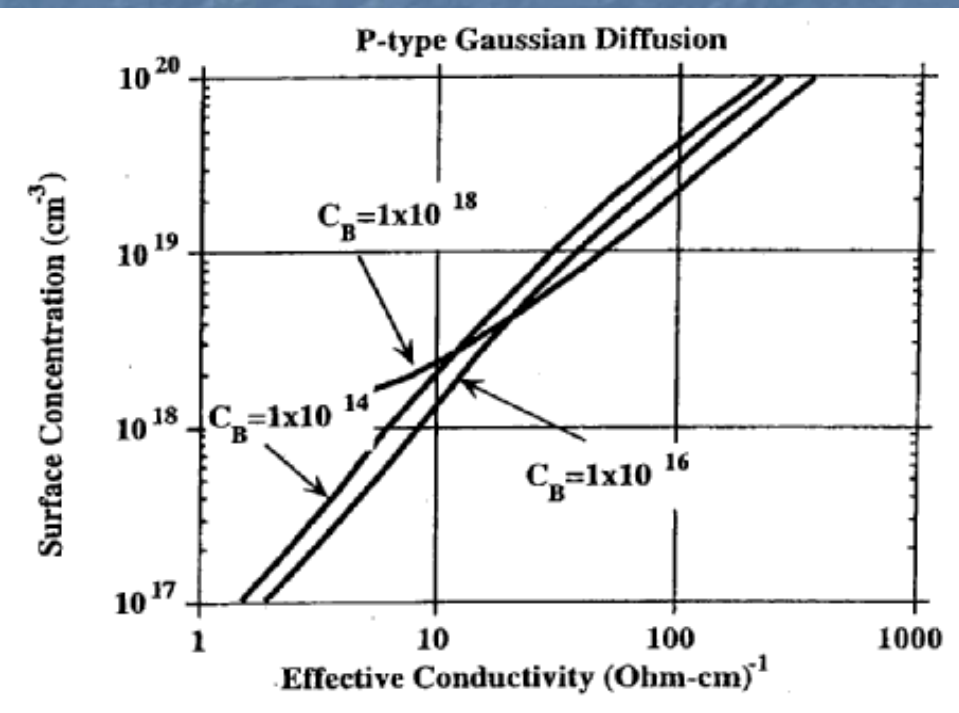
$$\frac{d^2}{dx^2} \text{erf}(x) = -\frac{4}{\sqrt{\pi}} x e^{-x^2}$$

$$\int_0^{\infty} \text{erfc}(x) dx = \frac{1}{\sqrt{\pi}}$$

$$\int_0^x \text{erfc}(y') dy' = x \text{erfc}(x) + \frac{1}{\sqrt{\pi}} (1 - e^{-x^2})$$

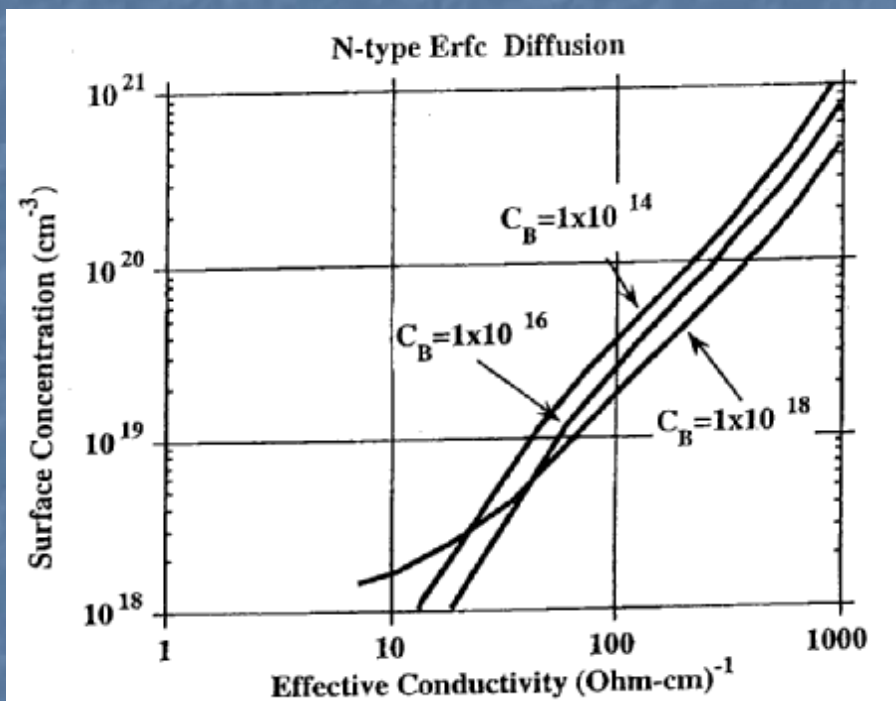
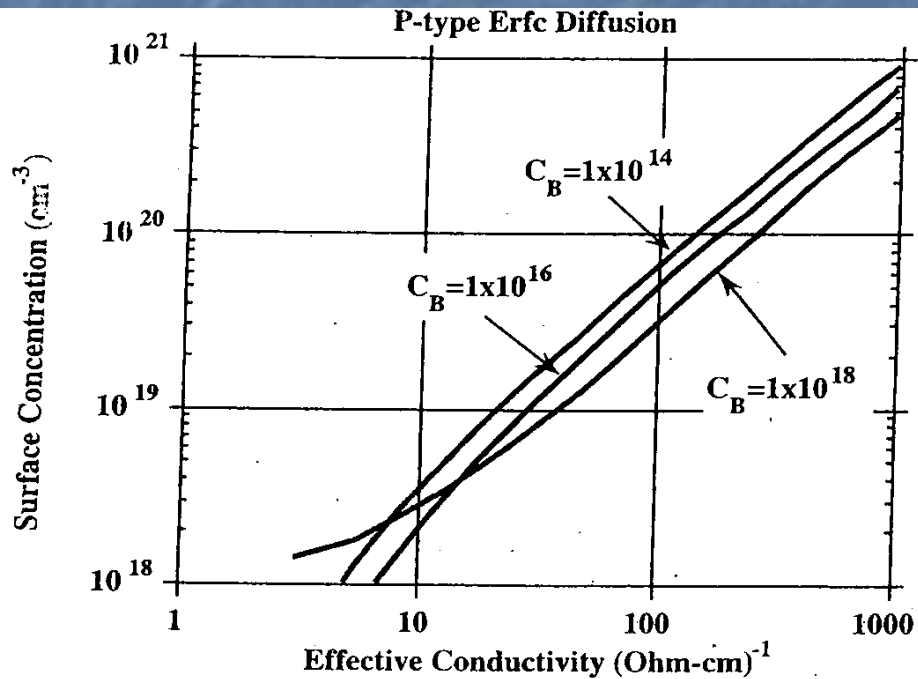


6. Οι καμπύλες Irvin. Αυτές δίνουν την επιφανειακή συγκέντρωση της πρόσμιξης που εισάγεται για τον σχηματισμό της επαφής συναρτήσει της συγκέντρωσης της πρόσμιξης του υποστρώματος και της απαιτούμενης αγωγιμότητας $\bar{\sigma}$ της επαφής για προσμίξεις τύπου n και p γκαουσιανής κατανομής και κατανομής συμπληρωματικής συνάρτησης σφάλματος, που είναι και οι κατανομές που απαντώνται στην πράξη ανάλογα με την μέθοδο νόθευσης που χρησιμοποιείται.





Δ.ΣΚΑΡΛΑΤΟΣ «ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΣΤΕΡΕΑΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ»
ΠΜΣ «Προχωρημένες Σπουδές στη Φυσική» - Ειδίκευση: «Φυσική και Τεχνολογία Υλικών –
Φωτονική»





11. Διάβασμα

S.M.Sze, “Semiconductor Devices: Physics and Technology”, 3rd Edition, John Wiley and Sons, 2012

- 1) Chapter 3, ΕΝΟΤΗΤΕΣ 3.1, 3.2, p.82-94
- 2) Chapter 14, ΕΝΟΤΗΤΕΣ 14.1, 14.4, p. 466-476, 483-490