



ΟΠΤΙΚΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ

Μάθημα 2ο - 3ο Στοιχεία φυσικής στερεάς κατάστασης - Ημιαγωγοί Επαφές

Αρ. Τσίπουρας, Phd

Email: aris@di.uoa.gr



Περιεχόμενα

- Φυσικά χαρακτηριστικά διατάξεων στερεάς κατάστασης
 - Πολυπλοκότητα διατάξεων στερεάς κατάστασης
 - Κρυσταλλικά υλικά
 - Ιδιότητες – ηλεκτρονικές καταστάσεις- εξίσωση Schrödinger
 - Μέταλλα – ημιαγωγοί και μονωτές
 - Δομή ζώνης μερικών ημιαγωγών
 - Ενδογενείς –εξωγενείς ημιαγωγοί
- Επαφές P-N
 - Μή πολωμένη επαφή
 - Επαφή P-N υπό πόλωση
- Μορφοποίηση δομής ζωνών στους ημιαγωγούς
 - Κράματα υλικών (Alloys)
 - Σύνθετοι ημιαγωγοί
 - Ετεροδομές



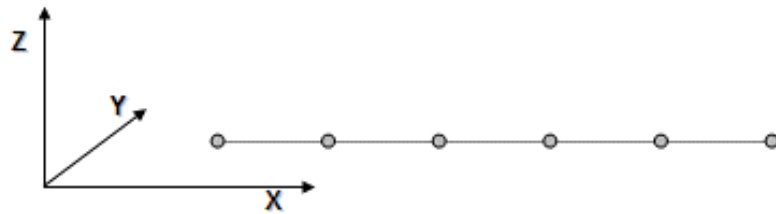
Φυσικά χαρακτηριστικά στερεών

- Η συμπεριφορά των διατάξεων στερεάς κατάστασης καθορίζεται από την συμπεριφορά ενός πολυ μεγάλου αριθμού ηλεκτρονίων e κινούμενων ανάμεσα από θετικά φορτισμένα άτομα
- Πυκνότητα $e \approx 6.022 \cdot 10^{23}/\text{cm}^{-3}$
- Ημιαγωγοί: Δομή που παρουσιάζει συμμετρία και τάξη =
= **κρυσταλλική δομή**
- Τα e κινούνται σε μια καλά καθορισμένη περιοδική δομή ιόντων

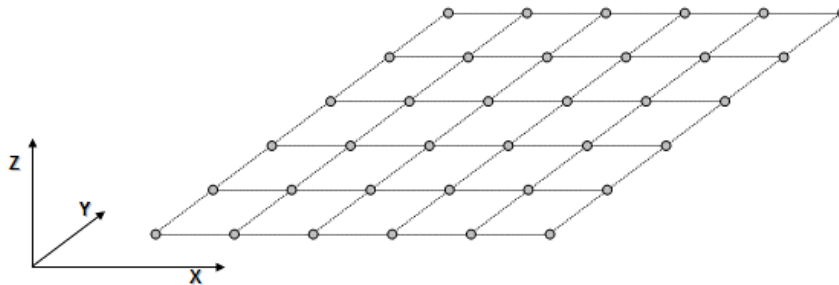


Κρυσταλλική δομή

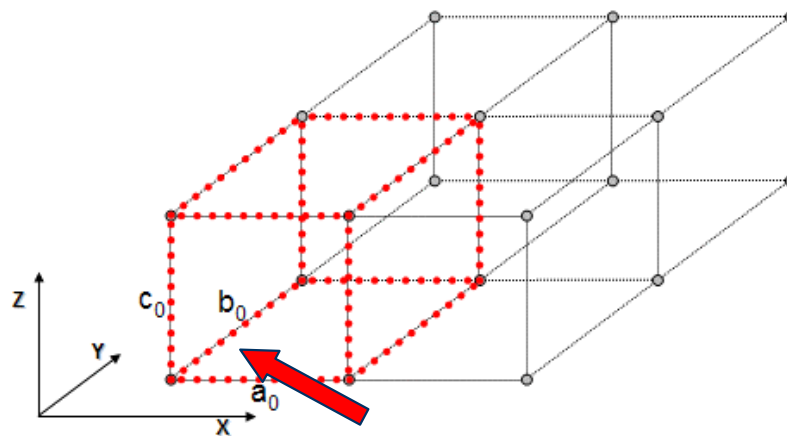
- Οι κρύσταλλοι κατασκευάζονται από ταυτόσημα κομμάτια (ένα άτομο ή ομάδα ατόμων) και παρουσιάζουν περιοδική δομή



μονοδιάστατο πλέγμα



δυσδιάστατο πλέγμα.



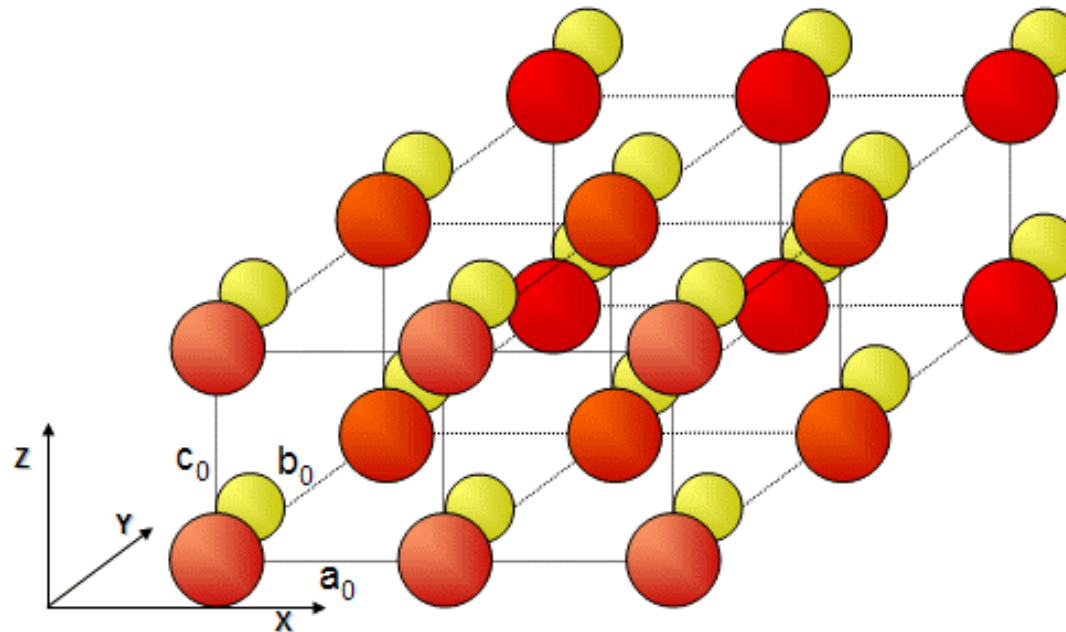
τριδιάστατο πλέγμα ή χωρόπλεγμα
Πλέγμα Bravais

μοναδιαία κυψελίδα (a_0, b_0, c_0) του πλέγματος



Ο κρύσταλλος

- Εάν στα σημεία του πλέγματος τοποθετήσουμε άτομα ύλης τότε έχουμε σχηματίσει ένα κρύσταλλο

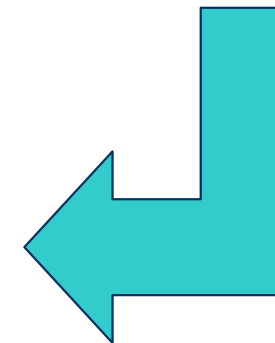




Κρυσταλλικά συστήματα

Bravais lattice	Parameters	Simple (P)	Volume centered (I)	Base centered (C)	Face centered (F)
Triclinic	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} \neq \alpha_{23} \neq \alpha_{31}$				
Monoclinic	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$ $\alpha_{12} \neq 90^\circ$				
Orthorhombic	$a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				
Tetragonal	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				
Trigonal	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} < 120^\circ$				
Cubic	$a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha_{12} = \alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				
Hexagonal	$a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha_{12} = 120^\circ$ $\alpha_{23} = \alpha_{31} = 90^\circ$				

ημιαγωγοί



Τεχνητές δομές: Υπερπλέγματα – κβαντικά φρέατα

Πχ: $(\text{GaAs})_x/(\text{AlAs})_x$, GaAsInP/InP



Ιδιότητες στερεών

Η περιγραφή του e μέσα στον κρύσταλλο γίνεται με τη βοήθεια της εξίσωσης Schrodinger:

$$\left[\frac{-\hbar^2}{2m_e} \nabla^2 + U(r) \right] \psi(r) = E \psi(r)$$

$U(r)$ είναι το δυναμικό υποβάθρου που βλέπουν τα ηλεκτρόνια
 $U(r) = U(r+R)$

Θεώρημα Bloch: μας δίνει τη μορφή της κυματοσυνάρτησης και δείχνει ότι οι ιδιοτιμές ψ_k είναι το γινόμενο ενός επιπέδου κύματος επί μια χωρική συνάρτηση $u(r)$ που έχει την ίδια περιοδικότητα με το δυναμικό και το πλέγμα

$$\psi_k(r) = e^{ikr} u_k(r) \quad \text{με} \quad u_k(r) = u_k(r+R)$$



Φερμιόνια και μποζόνια

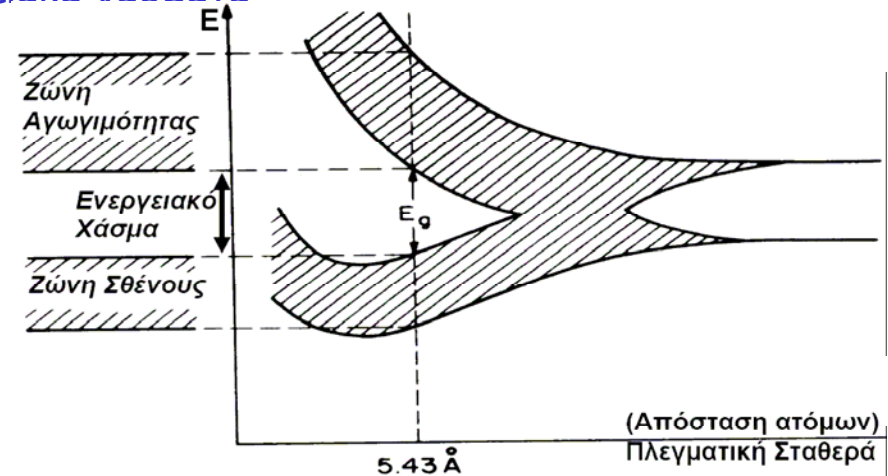
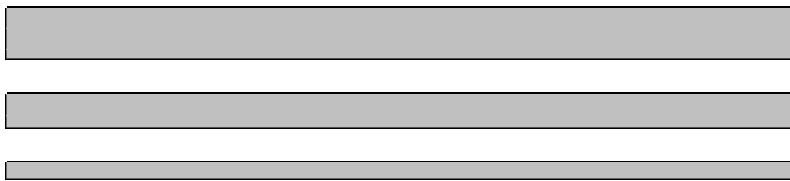
- Τα **ΦΕΡΜΙΟΝΙΑ FERMIONS** – λέξη δημιουργημένη από το όνομα του Enrico Fermi – είναι σωματίδια τα οποία υπακούουν στην κατανομή Fermi – Dirac .
- Τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι δύο
 - το spin καθενός είναι «ημιακέραιο» κι αυτο θα πει ότι η τιμή είναι ημιακέραιο πολλαπλάσιο ($1/2, 3/2, \dots$) της σταθεράς \hbar . $\hbar = h/2\pi = 1, 055.10^{-34} \text{ Js}$
 - υπακούουν στην Απαγορευτική Αρχή του Pauli, στο « απαγορεύεται η συγκατοίκηση »
 - Στοχειώδη σωματίδια, πρωτόνιο, νετρόνιο
- τα **ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ** υπακούουν στην Απαγορευτική Αρχή. Είναι φερμιόνια
- Τα **BOSONS** – λέξη δημιουργημένη από το όνομα του Ινδού φυσικού S.N. Bose
- Τα βασικά τους χαρακτηριστικά είναι δύο
 - το spin καθενός είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της σταθεράς \hbar του Πλανκ.
 - ΔΕΝ υπακούουν στην Απαγορευτική Αρχή του Pauli, στο «απαγορεύεται η συγκατοίκηση »
- τα **ΦΩΤΟΝΙΑ** δεν έχουν κανένα πρόβλημα να καταλάβουν όλα μαζί την ίδια κβαντική κατάσταση και μάλιστα το προτιμούν. Είναι Μποζόνια



Ενεργειακές ζώνες στα στερά II

- Από την εξίσωση Schrodinger προκύπτουν οι ιδιοτιμές της ενέργειας των e συναρτήσει του k δηλαδή της κρυσταλλικής ορμής.

- ✓ Όταν δύο άτομα έρχονται σε μικρή απόσταση, σύμφωνα με τη θεωρία των μοριακών τροχιακών, τα προϋπάρχοντα ατομικά τροχιακά καταργούνται και στη θέση τους δημιουργούνται νέα τροχιακά ισάριθμα με αυτά που καταργούνται.
- ✓ Δηλαδή τελικά το ενεργειακό φάσμα θα αποτελείται από ζώνες επιτρεπομένων ενεργειών μεταξύ των οποίων παρεμβάλλονται ενεργειακά χάσματα



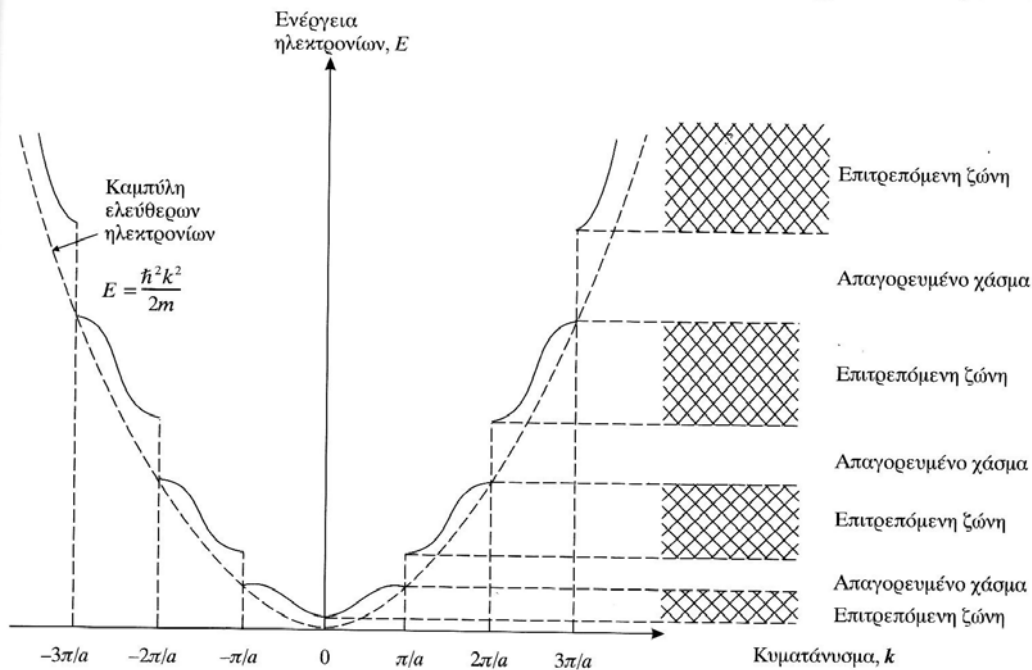
Καθώς προχωράμε από κάτω προς τα πάνω Το ΠΛΑΤΟΣ των ζωνών αυξάνεται και Το αντίστοιχο ΧΑΣΜΑ ελαττώνεται

Ο καθοριστικός παράγων είναι το εάν «είναι γεμάτη ή όχι» η τελευταία εποίκισμένη ενεργειακή ζώνη του κρυστάλλου

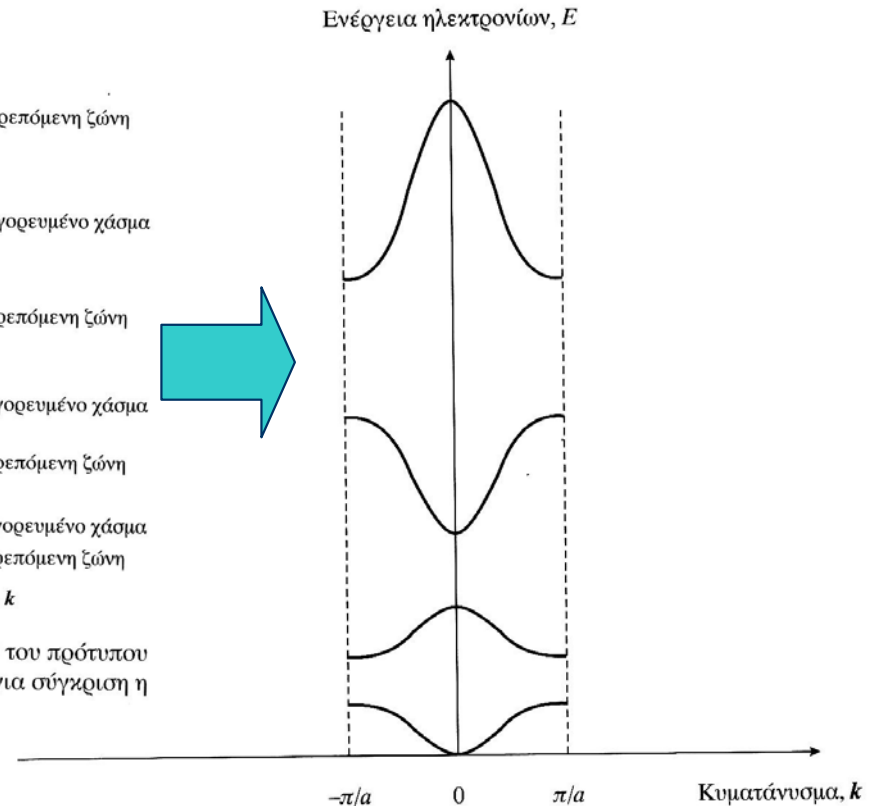


Ενεργειακές ζώνες στα στερά II

- Όταν $U(r)$ είναι μονοδιάστατο δυναμικό $U(x)$ τότε $U(x) = U(x+a) = U(x+2a) = \dots$
Με a την περιοδικότητα του πλέγματος



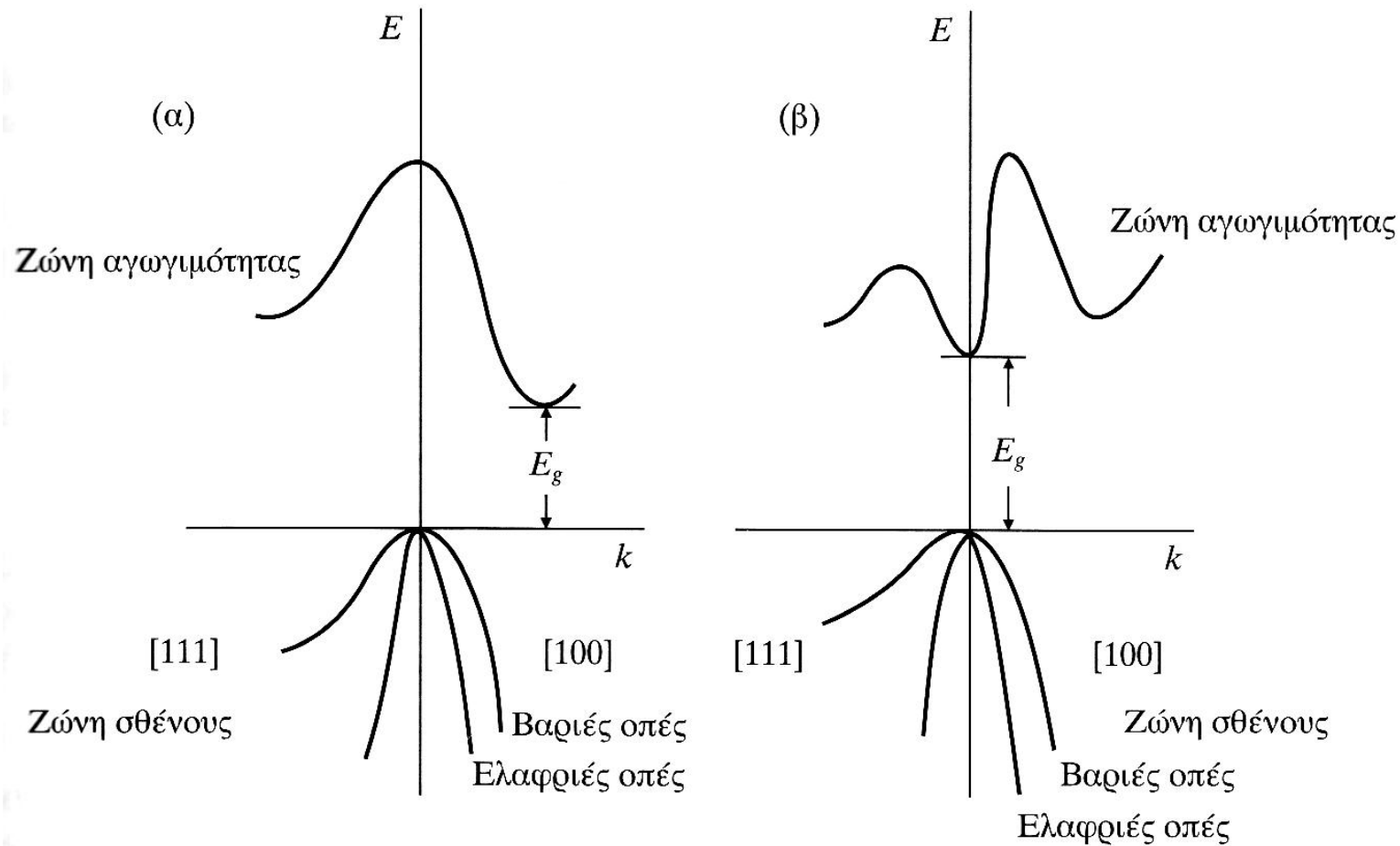
ΕΙΚ. 2.5(α) Σχέση $E - k$ των ηλεκτρονίων που υπόκεινται στην κατανομή δυναμικού του πρότυπου Kronig - Penney και αντίστοιχη δομή ενεργειακών ζωνών. Επίσης, παρουσιάζεται για σύγκριση η σχέση $E - k$ για ελεύθερα ηλεκτρόνια.



ΕΙΚ. 2.5(β) Αναπαράσταση πρώτης ζώνης, της σχέσης $E - k$ που παρουσιάστηκε στην Εικ. 2.5(α). Αυτή η αναπαράσταση παράγεται με τη μεταφορά των τμημάτων της καμπύλης $E - k$, έτσι ώστε όλα τα τμήματα να βρίσκονται μεταξύ του $k = -\pi/a$ και $k = +\pi/a$, που περιλαμβάνουν την πρώτη ζώνη Brillouin.



Παραδείγματα



ΕΙΚ. 2.6 Σχέση του $E - k$ για πραγματικά στερεά: (α) πυρίτιο (το οποίο έχει έμμεσο χάσμα) και (β) αρσενίδιο γαλλίου (το οποίο έχει άμεσο χάσμα). Το σχήμα δείχνει τις ζώνες αγωγιμότητας και σθένους και το ενεργειακό χάσμα μεταξύ τους. Σημειώστε ότι (i) το k επιλέγεται για διαφορετικές κατευθύνσεις του κρυστάλλου στα αριστερά και δεξιά και (ii) ότι υπάρχουν οπές παρούσες με διαφορετικές ενεργές μάζες (ενότητες 2.2.1 και 2.3).



Μονωτές - αγωγοί

- Στον μονωτή η τελευταία ενεργειακή ζώνη είναι γεμάτη.
- Τα ηλεκτρόνια του δεν έχουν την παραμικρή δυνατότητα να απορροφήσουν ενέργεια από ένα εξωτερικό ηλεκτρικό πεδίο - και να επιταχυνθούν, αφού οι μόνες διαθέσιμες ενεργειακές καταστάσεις είναι εκείνες της επόμενης ζώνης οι οποίες όμως βρίσκονται μακριά
- Η ζώνη αγωγιμότητας στους αγωγούς είναι ημικατειλημμένη άρα επιτρέπεται να κινούνται, με αντίστοιχες τιμές ενέργειας, ΕΛΕΥΘΕΡΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ
- ένα ηλεκτρικό πεδίο θα μπορούσε άνετα να επιταχύνει τα ηλεκτρόνια της ημικατειλημμένης ζώνης διότι αυτά έχουν τη δυνατότητα να απορροφήσουν ενέργεια μεταβαίνοντας στις επόμενες μη κατειλημμένες καταστάσεις

Η μονωτική συμπεριφορά

Στο κλασικό μοντέλο οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχουν «αδέσμευτα» ελεύθερα ηλεκτρόνια

Στο κβαντομηχανικό μοντέλο, οφείλεται στους περιορισμούς που επιβάλλει στην κίνησή τους η Αρχή του Pauli. Όταν μία ενεργειακή ζώνη είναι γεμάτη, κανένα ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να αλλάξει την κινητική του κατάσταση, αφού όλες οι άλλες ζώνες είναι πιασμένες και η απαγορευτική αρχή δεν επιτρέπει διπλή κάλυψη



Ημιαγωγοί

□ Όταν το ενεργειακό χάσμα δεν είναι αρκετά ευρύ ώστε να μην επιτρέπει σε ένα πεπερασμένο σύνολο ηλεκτρονίων να το περάσει, ένα μικρό αλλά μη αμελητέο πλήθος ηλεκτρονίων της τελευταίας κατειλημμένης ζώνης- ζώνης σθένους - θα διασχίσει την «απαγορευμένη» περιοχή και βρεθεί στη ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ, όπου όλες οι ενεργειακές καταστάσεις είναι διαθέσιμες και η Αρχή του Pauli δεν παραβιάζεται

□ Ο κρύσταλλος θα είναι ένας ΗΜΙΑΓΩΓΟΣ

στους ΑΓΩΓΟΥΣ

Η αύξηση της θερμοκρασίας μειώνει την αγωγιμότητα - αφού αυξάνονται οι συγκρούσεις με τα ζωηρότερα τώρα ιόντα του πλέγματος
Στην αγωγιμότητα συνεισφέρουν μόνο τα ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ

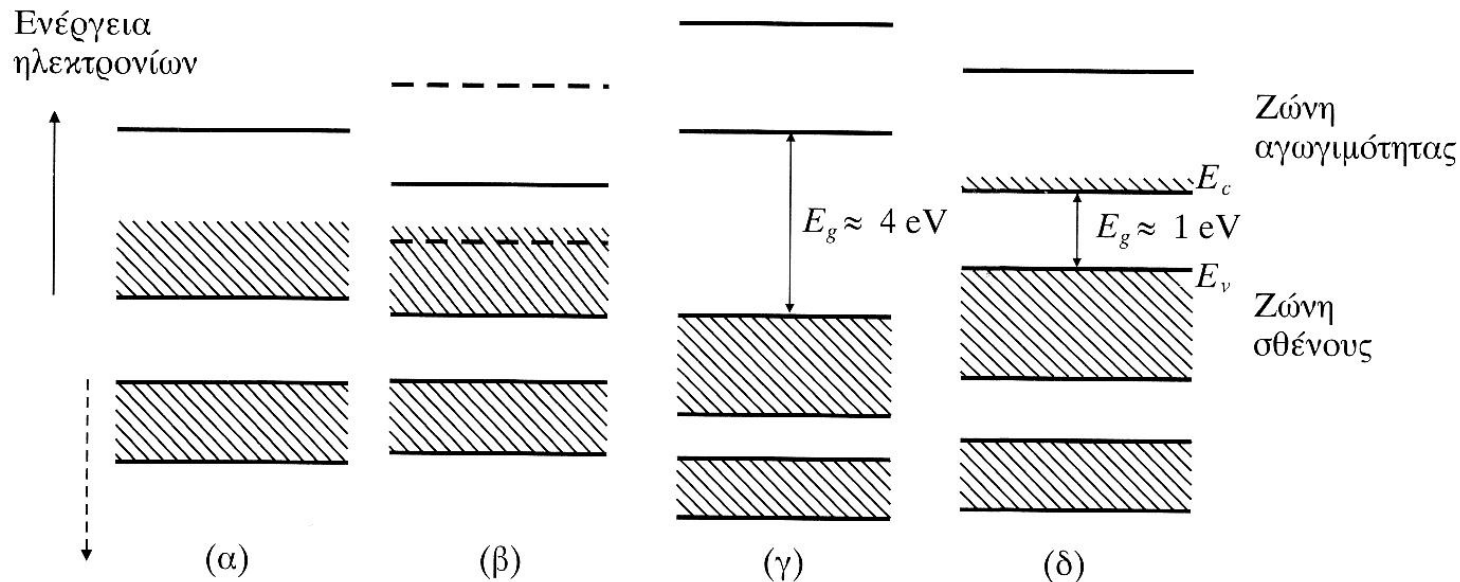
στους ΗΜΙΑΓΩΓΟΥΣ

Η αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την αγωγιμότητα αφού μεγαλώνει το πλήθος των θερμικά διεγερμένων ηλεκτρονίων, δηλαδή των διαθέσιμων φορέων ηλεκτρικού ρεύματος
Στην αγωγιμότητα συνεισφέρουν και τα ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ, αλλά και οι ΟΠΕΣ

□ ΟΠΗ είναι η κενή θέση που άφησε στη ζώνη σθένους ένα ηλεκτρόνιο θερμικά διεγερθέν ηλεκτρόνιο. Οι οπές μπορούν να καλυφθούν από τα υπόλοιπα ηλεκτρόνια αυτής της ζώνης. Καθώς τα ηλεκτρόνια της ζώνης σθένους σπεύδουν να καταλάβουν τις κενές θέσεις αφήνουν πίσω τους κενά τα οποία «μετακινούνται» προς αντίθετη κατεύθυνση



Μονωτές – αγωγοί - ημιαγωγοί



Ακολουθία πλήρως κατειλημμένων χαμηλότερων ενεργειακών ζωνών

ΕΙΚ. 2.7 Σχηματική αναπαράσταση των ενεργειακών ζωνών σε διάφορα υλικά: (α) ένα μέταλλο με μερικώς γεμάτη τη ζώνη σθένους, δηλαδή μονοσθενές μέταλλο, (β) ένα μέταλλο με δύο επικαλυπτόμενες, μερικώς γεμάτες ζώνες, δηλαδή δισθενές μέταλλο (γ) ένας μονωτής και (δ) ένας ενδογενής ημιαγωγός. Σε αυτό και στα επερχόμενα διαγράμματα, η σκίαση χρησιμοποιείται για να δηλώσει τα κατειλημμένα ενεργειακά επίπεδα των ηλεκτρονίων.

- Μέση θερμική ενέργεια e : $kT \sim 0.025 \text{ eV} (@300^\circ\text{K})$



Ηλεκτρική αγωγιμότητα

- Σε ένα στερεό απουσία εξ. Ηλ. Πεδίου οι φορείς των φορτίων είναι σε τυχαία σταθερή θερμική κίνηση \Rightarrow όχι καθαρή μετατόπιση $q \Rightarrow J=0$
- Με εφαρμογή εξ. Ηλ. Πεδίου E_x
- $J = -neu_D$ ή επειδή $u_D = \frac{-e\tau E_x}{m_e^*} \Rightarrow J = \frac{ne^2\tau E_x}{m_e^*} \Rightarrow J = \sigma E_x$
- με την αγωγιμότητα $\sigma = ne\mu_e$, όπου:
- n : πυκνότητα ηλεκτρονίων
- τ : χρόνος χαλάρωσης (χρόνος μεταξύ δυο συγκρούσεων)
- μ_e : ευκινησία ηλεκτρονίων (επηρεάζεται από σκέδαση πλέγματος και σκέδαση προσμείξεων)



Ενεργός μάζα m_e^*

- *Ενεργός μάζα ηλεκτρονίου m_e^**
- *Επειδή τα e επηρεάζονται όχι μόνο από το εξ. Ηλ. Πεδίο αλλά και από το εσωτερικό που δημιουργείται από τα άλλα ηλεκτρόνια και το περιοδικό δυναμικό του κρυστάλλου η μάζα τους θα είναι διαφορετική από αυτή των ελεύθερων e*
- *Ορίζεται ομοίως για τις οπές*

Ενεργός μάζα ηλεκτρονίου στο στερεό

- κοντά στην άκρη ζωνών (band edge) (E_0, k_0)

Τυπικά

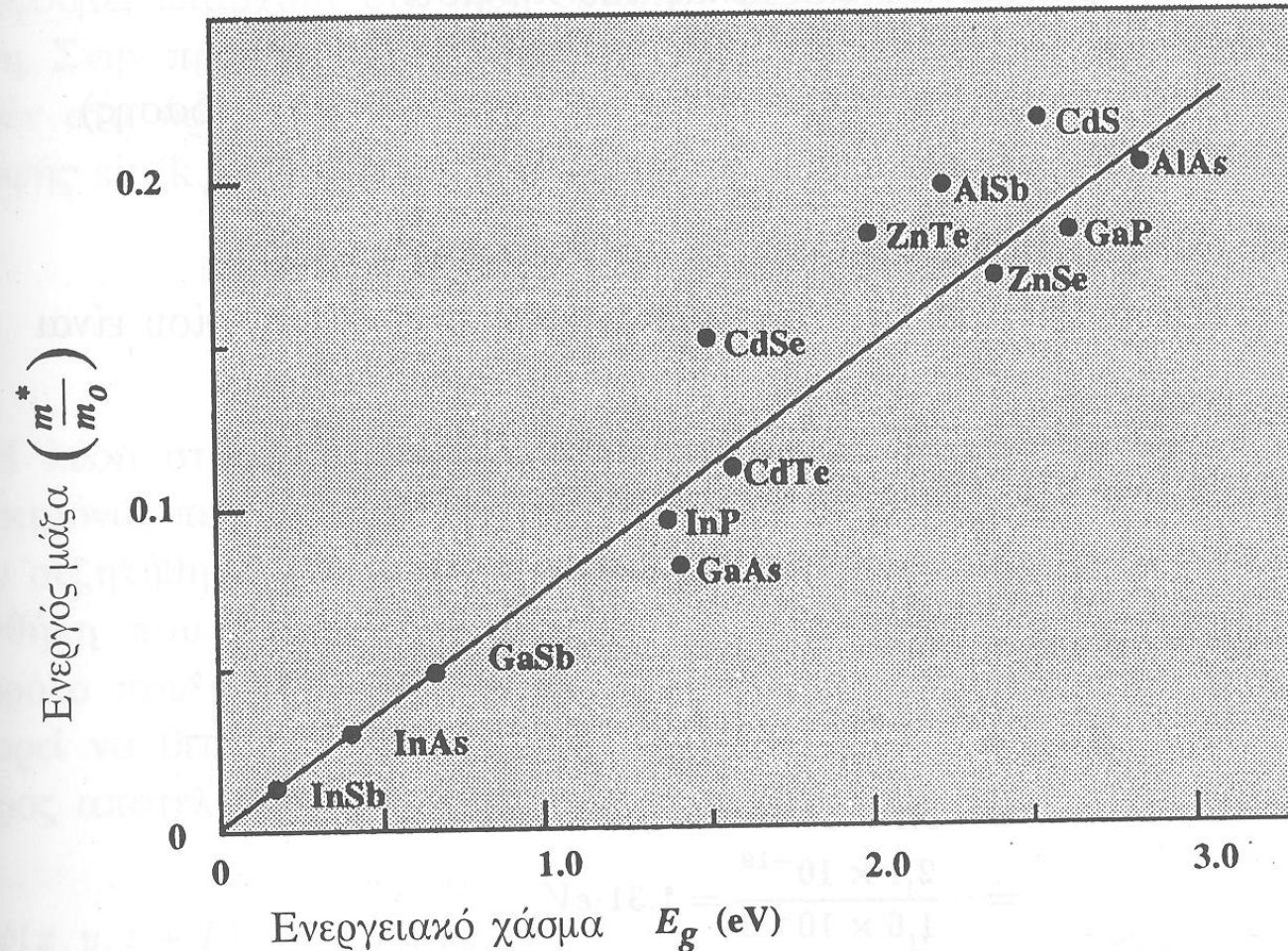
$$E - E_0 = \frac{\hbar^2 \cdot (k - k_0)^2}{2m^*} \quad \frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2} \cdot \frac{\partial^2 E(k)}{\partial k^2} \quad \frac{m^*}{m_0} \sim 0.03-0.5$$

↖ ενεργός μάζα

- *ΣΥΝΕΠΩΣ:*



Ενεργός μάζα στους ημιαγωγούς



Σχήμα 2.6: Η ενεργός μάζα ηλεκτρονίου, m^* ως συνάρτηση του χαμηλότερου-άμεσου χάσματος E_g για διάφορους σύνθετους ημιαγωγούς. Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι η ενεργός μάζα μειώνεται όσο μειώνεται το ενεργειακό χάσμα.

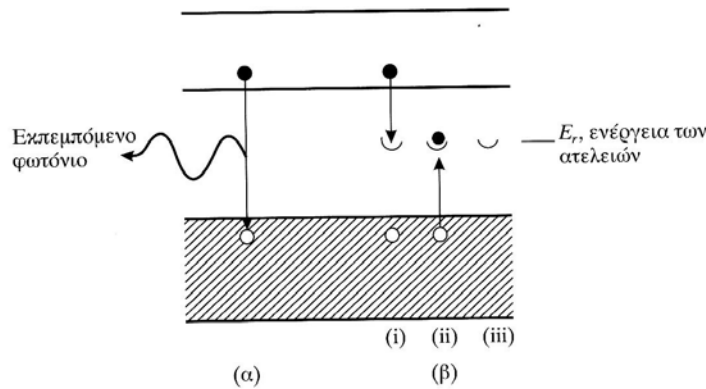


Ηλεκτρική αγωγιμότητα στους ημιαγωγούς

- $J = (ne\mu_e + pe\mu_h) E_x$ ή $J = \sigma E_x$
- **Ενδογενείς ημιαγωγοί:** είναι τέλειοι κρύσταλλοι χωρίς προσμείξεις ή ατέλειες και $n = p = n_i$ και δεν υπάρχουν στην πραγματικότητα
- Στο Si $n_i = 1.61 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}$
- Σε δεδομένη T αποκαθίσταται ισορροπία οπότε υπάρχει επανασύνδεση $h-e$
- Αν ο ρυθμός θερμικής διέγερσης είναι g_i και r_i ο ρυθμός επανασυνδέσεων σε κάθε θερμοκρασία η πιθανότητα επανασύνδεσης e είναι ανάλογη του αριθμού των h :

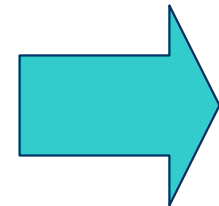
$$r_i = B n p g_i$$

Σταθερά αναλογίας εξαρτώμενη από το μηχανισμό επανασύνδεσης



ΕΙΚ. 2.9 Απεικόνιση (α) της επανασύνδεσης από ζώνη σε ζώνη και (β) επανασύνδεση σε κέντρο ατελειών. Το πρώτο βήμα στο (β) είναι (i) η παγίδευση ενός ηλεκτρονίου, η οποία ακολουθείται από (ii) τη σύλληψη της οπής. Αυτό οδηγεί στην εκμηδένιση ενός ζευγαριού ηλεκτρονίου - οπής αφήνοντας το κέντρο έτοιμο να συμμετάσχει σε άλλη μια επανασύνδεση (iii).

• **Εξωγενείς ημιαγωγοί:** είναι κρύσταλλοι με προσμείξεις....





Ημιαγωγοί τύπου n

- ❑ Το πυρίτιο έχει τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους τα οποία συμπληρώνουν τις πιο πολλές από τις θέσεις της ζώνης σθένους που βρίσκονται κάτω από τη σχεδόν κενή ζώνη αγωγιμότητας. Το ίδιο ισχύει και για το γερμάνιο.
- ❑ Αν εισάγουμε ένα στοιχείο πρόσμιξης, λόγω χάρη ΦΩΣΦΟΡΟ, ο οποίος έχει πέντε ηλεκτρόνια σθένους, εφόσον χρειάζονται τέσσερα μόνο ηλεκτρόνια για τον ομοιοπολικό δεσμό του πλέγματος, υπάρχει ένα ηλεκτρόνιο που περισσεύει, και μπορεί εύκολα να αποσπαστεί και να συμβάλλει στην αγωγιμότητα. Τα άτομα του ΦΩΣΦΟΡΟΥ δημιουργούν καταστάσεις ΔΟΤΗ, ακριβώς ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗ ΖΩΝΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑΣ και τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται εκεί χρειάζεται να πάρουν ένα μικρό ποσό ενέργειας για να μεταβούν στη ζώνη αγωγιμότητας.

❑ Έχουμε έναν ΗΜΙΑΓΩΓΟ n.



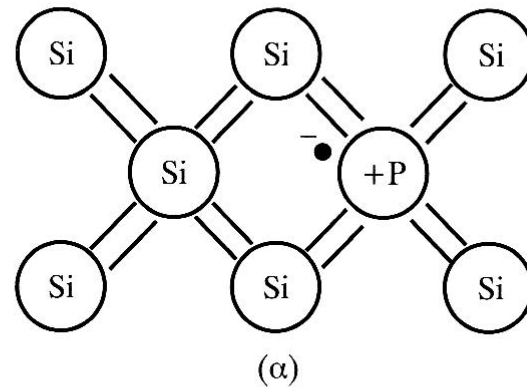
_____ E_F



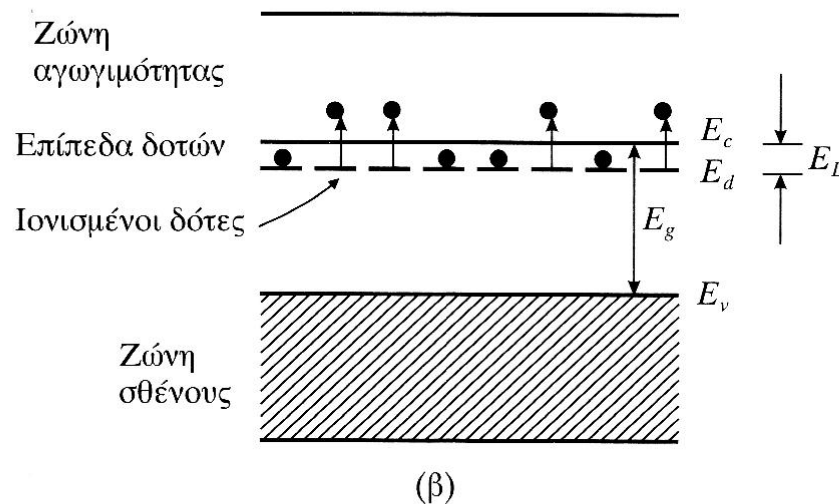
Ημιαγωγός τύπου n



Ημιαγωγοί τύπου n



$$E_D = 13.6 \frac{m_e^*}{m} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 [eV]$$



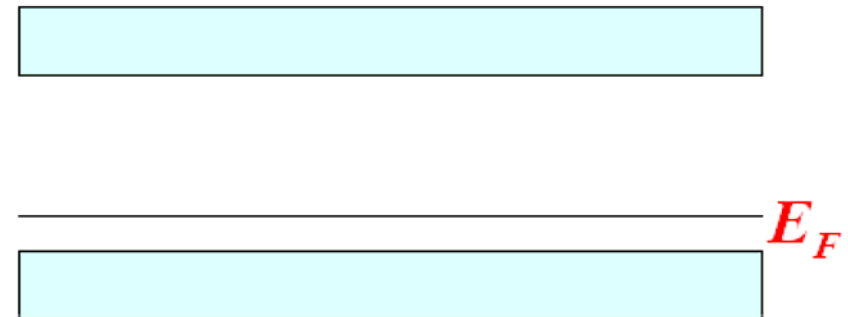
**Φορείς Πλειονότητας:
ηλεκτρόνια**

ΕΙΚ. 2.10 Σχηματική αναπαράσταση ενός ημιαγωγού n-τύπου: (α) το κρυσταλλικό πλέγμα στο οποίο ένα άτομο πυριτίου έχει αντικατασταθεί από ένα άτομο πρόσμειξης φωσφόρου και (β) τα ενεργειακά επίπεδα των προσμειξιών δοτών (το διάγραμμα δείχνει ότι μερικές από τις προσμειξίες «έχουν δώσει» ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας).



Ημιαγωγοί τύπου p

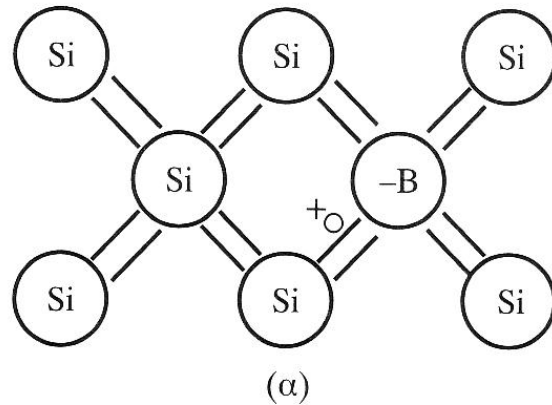
- Αν εισάγουμε ως στοιχείο πρόσμιξης ΒΟΡΙΟ, με τρία ηλεκτρόνια σθένους, θα δημιουργηθεί ένα κενό στον ομοιοπολικό δεσμό του πλέγματος κι αυτό τείνει να αποσπάσει ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους αφήνοντας εκεί μια θέση που θα προκαλέσει αγωγιμότητα. Τα άτομα του ΒΟΡΙΟΥ δημιουργούν καταστάσεις ΔΕΚΤΗ, ΠΑΝΩ ΑΠΟ ΤΗ ΣΧΕΔΟΝ ΠΛΗΡΗ ΖΩΝΗ ΣΘΕΝΟΥΣ.
- Έχουμε έναν ΗΜΙΑΓΩΓΟ p.



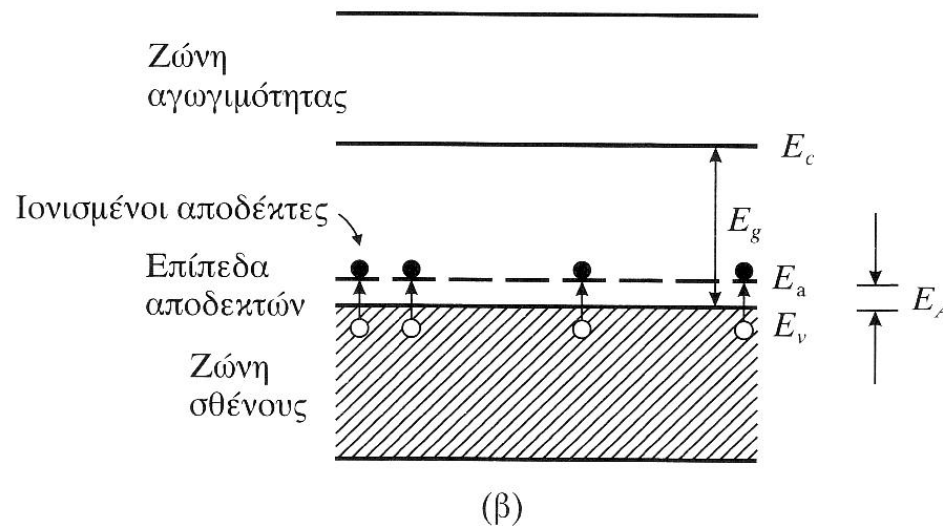
Ημιαγωγός τύπου p



Ημιαγωγοί τύπου p



$$E_A = 13.6 \frac{m_h^*}{m} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \quad [eV]$$



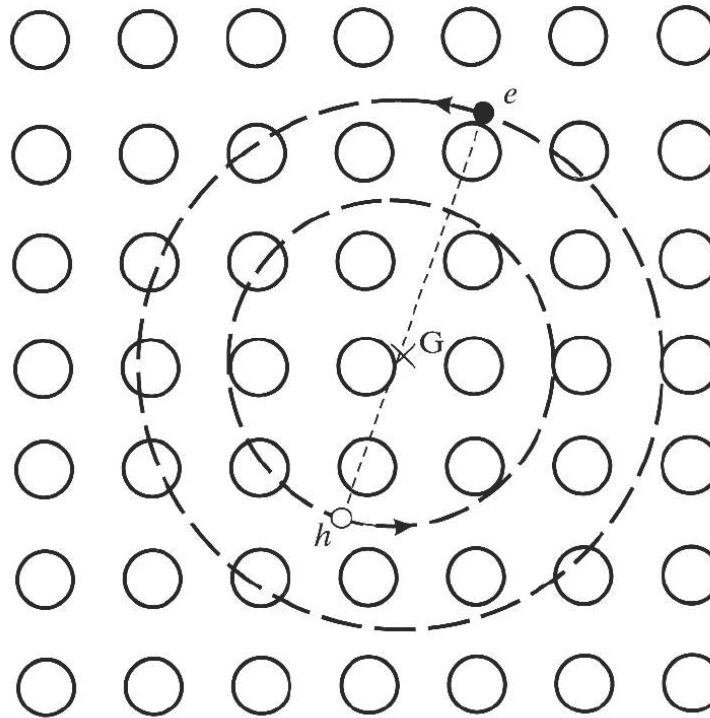
Φορείς Πλειονότητας:

ΟΠΕΣ

ΕΙΚ. 2.11 Σχηματική αναπαράσταση ενός ημιαγωγού p-τύπου: (α) το κρυσταλλικό πλέγμα με τη σθενή πρόσμειξη (π.χ. βόριο) και (β) τα ενεργειακά επίπεδα των προσμειξέων αποδεκτών (μερικές προσμειξίσεις έχουν «αποδεχθεί» ηλεκτρόνια από τη ζώνη σθένους).



Εχιτόνια -Exitons



$$E_e = 13.6 \frac{m_r^*}{m} \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \quad [eV]$$
$$\frac{1}{m_r^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}$$

$7.2 < \epsilon/\epsilon_0 < 17.7$

ΕΙΚ 2.12 Το πρότυπο του εχιτονίου. Το ηλεκτρόνιο e και η οπή h μπορούν να θεωρηθούν ότι είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και περιστρέφονται γύρω από το κοινό τους κέντρο βάρους G με ακτίνες που είναι αντιστρόφως ανάλογες των ενεργών μαζών τους (υποθέτουμε ότι $m_h^* > m_e^*$).

- Ενεργειακά επίπεδα κάτω από το κατώτατο σημείο της ζώνης αγωγιμότητας εμφανίζονται και στα ενδογενή υλικά. Προκύπτουν από την έλξη Coulomb $e-h$ που μπορεί να οδηγήσει στην ένωση τους.
- Ζεύγος $e - h$: εχιτόνιο. Ισοδυναμεί με δυο σωμάτια αντίθετου φορτίου με μαζες m_e^* και m_h^* που αλληλεπιδρούν σε δυναμικό Coulomb (αναγωγή στο άτομο H_2 – πρόβλημα 2 σωμάτων)



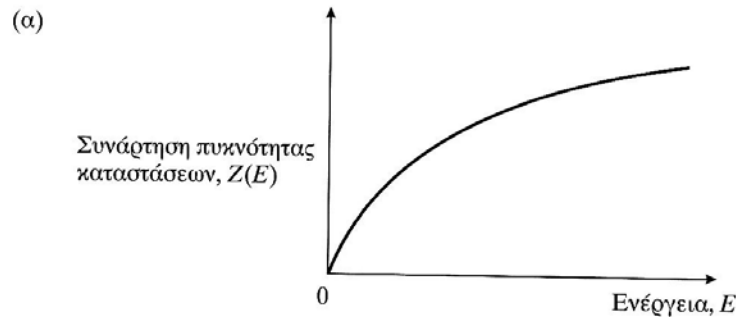
Συγκεντρώσεις των φορέων I

- Οι ιδιότητες των υλικών – ημιαγωγών και των αντίστοιχων διατάξεων είναι συνάρτηση των συγκεντρώσεων των φορέων
- Μέταλλα: συγκέντρωση ηλεκτρονίων n :
 $n \sim$ πυκνότητα ατόμων \times σθένος
- Ημιαγωγοί n ή p τύπου: συγκέντρωση φορέων πλειονότητας: $n(p) \sim$ συγκέντρωσης προσμείξεων
- Τί γίνεται στους ενδογενείς ημιαγωγούς και όταν η θερμοκρασία T μεταβάλλεται;



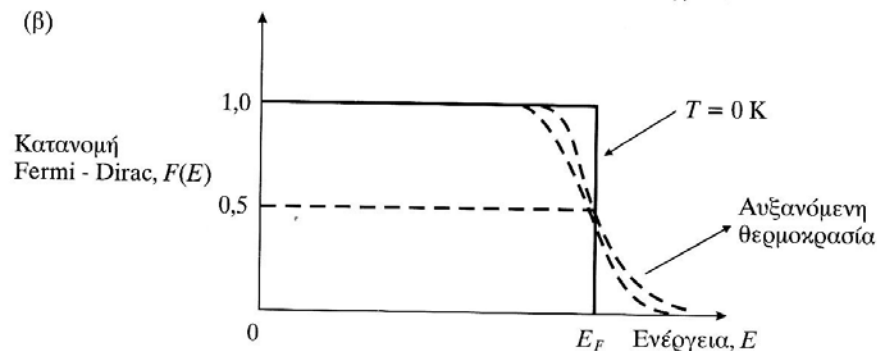
Συγκεντρώσεις των φορέων II

- Για να υπολογιστεί η συγκέντρωση των φορέων σε κάθε ενεργειακή ζώνη πρέπει να γνωρίζουμε:
 - Κατανομή ενεργειακών καταστάσεων $Z(E)$ [ή $N(E)$]
 - Πιθανότητα κατάληψης κάθε μιας τέτοιας ενεργειακής κατάστασης από ένα ηλεκτρόνιο $F(E)$



$$N_{3D}(E)dE = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2} dE \quad 3D$$

Σημείωση: εμπεριέχεται ο συντελεστής 2 που αντιστοιχεί στις δυο καταστάσεις για το spin του e



$$F(E) = \frac{1}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1}$$

ΕΙΚ. 2.13 Πυκνότητα ενεργειακών καταστάσεων (α) και η συνάρτηση των Fermi - Dirac στους $T = 0 \text{ K}$ και στους $T > 0 \text{ K}$ (β).



Ενέργεια Fermi I

- Δεδομένου ότι τα ηλεκτρόνια είναι φερμιόνια η τοποθέτησή τους στις ενεργειακές στάθμες ενός κρυσταλλικού πλέγματος θα γίνει σύμφωνα με την Αρχή του Pauli, με αποτέλεσμα να ανεβαίνουμε σε όλο και ψηλότερες ενέργειες μέχρι να εξαντληθούν όλα τα διαθέσιμα ηλεκτρόνια. Η τελευταία στάθμη που καταλαμβάνεται με αυτόν τον τρόπο λέγεται ενέργεια Fermi E_F
- Ενέργεια Fermi είναι η ενέργεια της τελευταίας κατειλημμένης στάθμης ενός συστήματος φερμιονίων στο απόλυτο μηδέν

$$E_F = \hbar^2/2m_e (3\pi^2n)^{2/3}$$

n = ο αριθμός των ηλεκτρονίων ανά μονάδα όγκου

- Η πιθανότητα να ανιχνεύσουμε ένα ηλεκτρόνιο σε μια κατάσταση με ενέργεια E δίνεται από τη σχέση:

$$F(E) = 1/(e^{(E-E_F)/kT} + 1)$$

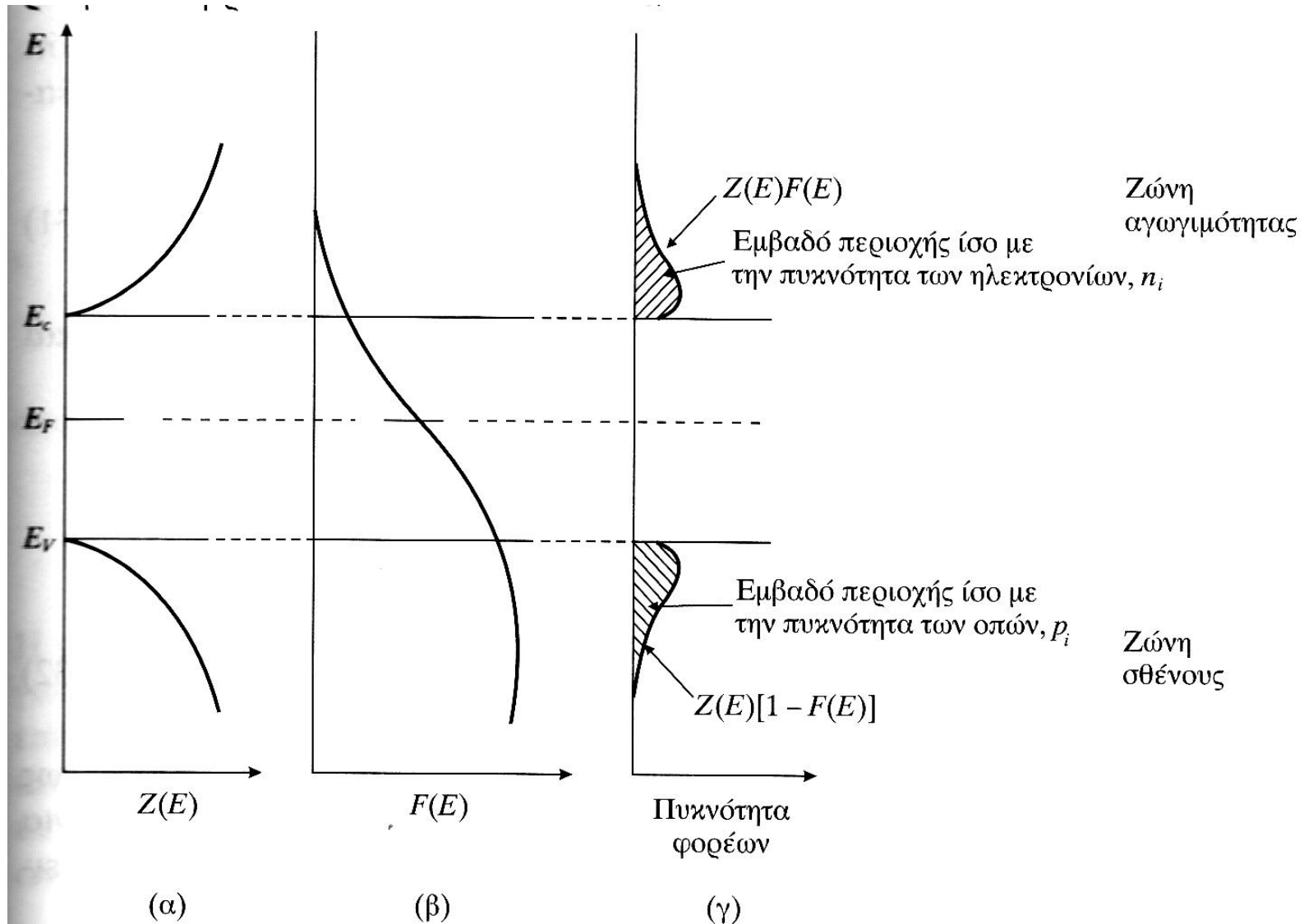
Με βάση τη συνάρτηση αυτή η ενέργεια Fermi ορίζεται και ως «ενέργεια που αντιστοιχεί σε στάθμη με πιθανότητα κατάληψης ίση με $1/2$ »

- Για $T=0$ εάν $E < E_F$ θα είναι $f(E) = 1$, όλες δηλαδή οι ενεργειακές στάθμες με ενέργεια μικρότερη της E_F έχουν πιθανότητα κατάληψης ίση με 1

- ❖ Για θερμοκρασίες μεγαλύτερες του μηδενός
 - α. οι ενεργειακές στάθμες με $E < E_F$ είναι οι περισσότερες κατειλημμένες
 - β. κάθε ενεργειακή στάθμη με $E = E_F$ έχει πιθανότητα 50% να είναι κατειλημμένη
 - γ. οι ενεργειακές στάθμες με $E > E_F$ είναι οι περισσότερες άδειες
 - δ. $F(E + E_F) = 1 - F(E - E_F)$



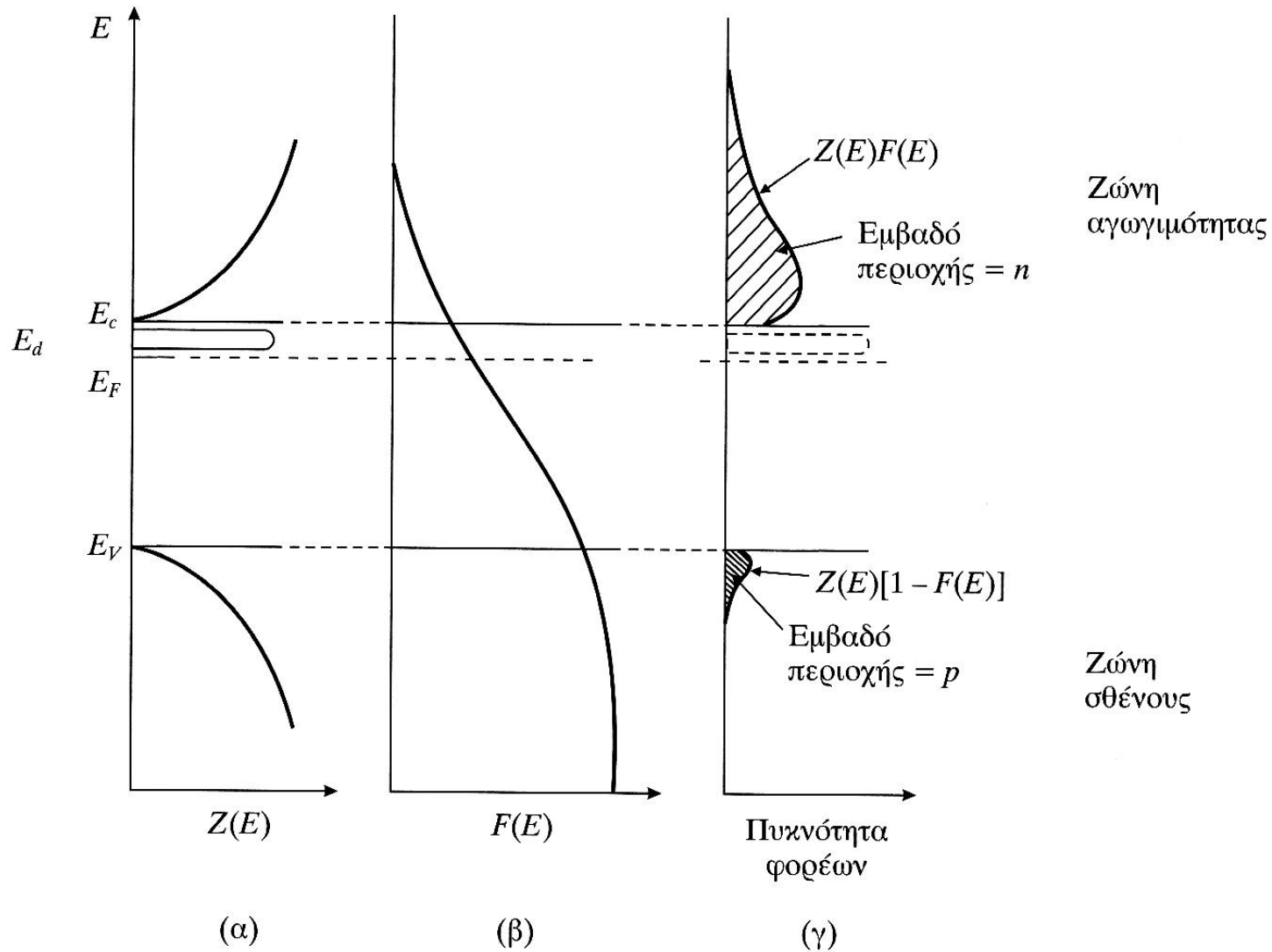
Ενδογενής ημιαγωγός



ΕΙΚ. 2.14 Γραφική αναπαράσταση (α) της πυκνότητας καταστάσεων, (β) της κατανομής Fermi - Dirac και (γ) των πυκνοτήτων των φορέων για έναν ενδογενή ημιαγωγό.



Εξωγενής ημιαγωγός τύπου n



ΕΙΚ. 2.15 Γραφική αναπαράσταση (α) της πυκνότητας καταστάσεων, (β) της κατανομής Fermi Dirac και (γ) των πυκνοτήτων των φορέων για ένα n-τύπου ημιαγωγό.

- Πυκνότητα φορέων : $n = \int_{\text{energy band}} F(E)Z(E)dE$
- Για ένα ημιαγωγό τύπου n :

– Πυκνότητα φορέων n

$$n = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e^*)^{3/2} \int_{E_c}^{\infty} \frac{(E - E_c)^{1/2}}{\exp[(E - E_F)/kT] + 1} dE$$

➔ $n = N_c \exp\left[-\frac{E_c - E_F}{kT}\right] \quad \mu\epsilon \quad N_c = 2 \left(\frac{2\pi m_e^* kT}{h^2} \right)$

– Πυκνότητα φορέων p: $p = \int_{\text{energy band}} [1 - F(E)]Z(E)dE$

➔ $p = N_v \exp\left[-\frac{E_F - E_v}{kT}\right] \quad \mu\epsilon \quad N_v = 2 \left(\frac{2\pi m_h^* kT}{h^2} \right)$

- Σε ενδογενή ημιαγωγό:

$$E_{Fi} = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \ln(m_h^* / m_e^*)$$

- Ενώ για σταθερή θερμοκρασία σε ένα ημιαγωγό:

$$np = n_i p_i = n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\frac{E_g}{kT}\right]$$



Φορείς πλειονότητας

- Οι οπτικοηλεκτρονικές διατάξεις λειτουργούν με τη δημιουργία συγκεντρώσεων φορέων μεγαλύτερων από τις τιμές θερμικής ισορροπίας που δίνονται από τις προηγούμενες σχέσεις
- Αν δημιουργηθεί πλεόνασμα φορέων με διέγερση, όταν αυτή διακοπεί οι φορείς επιστρέφουν στις θέσεις θερμικής ισορροπίας (επανασύνδεση)
- Ο ρυθμός επανασύνδεσης είναι μεγαλύτερος από το ρυθμό θερμικής παραγωγής (T σταθ.)
- $\Delta n(t) = \Delta n(0) \exp(-t/\tau_e)$ με $\tau_e = 1/B\rho$



Διάχυση και ολίσθηση φορέων

- Αν σε ημιαγωγό τύπου n έχουμε εγχυση οπών λόγω θερμικής κίνησης θα γίνει διάχυση των οπών
- Ροή οπών = $-D_h \frac{dp(x)}{dx}$
- Η διαχυση προκαλεί ροή ρεύματος με πυκνότητα:

$$J_e(\text{διαχ}) = eD_e \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_h(\text{διαχ}) = -eD_h \frac{dp(x)}{dx}$$

- Αν υπάρχει και εξ. Ηλεκτρικό πεδίο:

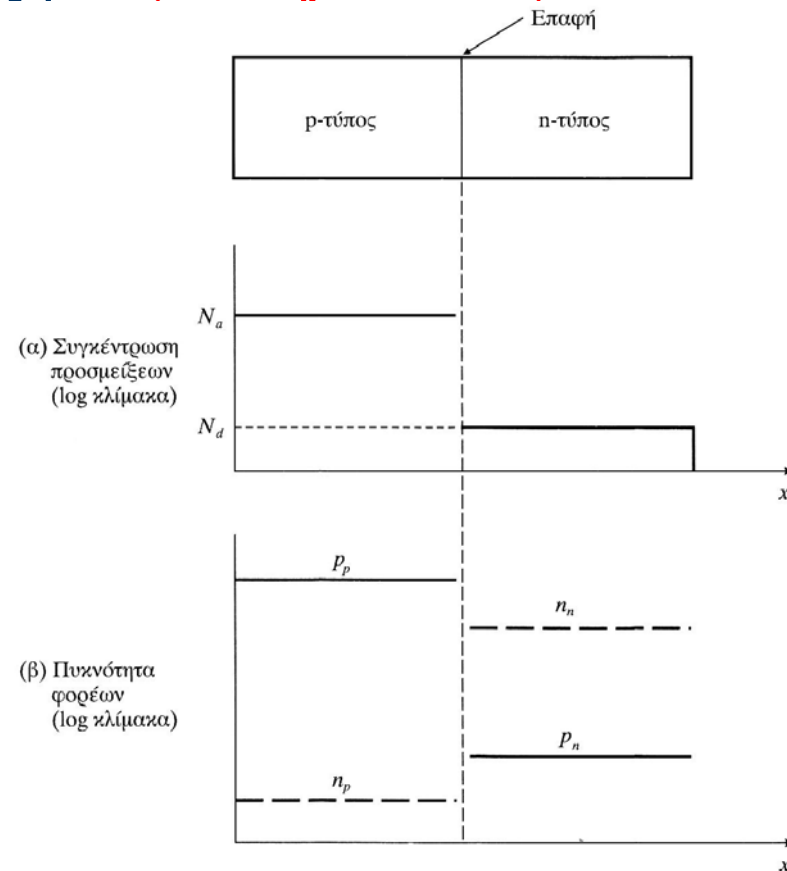
$$J_e = e\mu_e nE + eD_e \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_h = e\mu_h pE - eD_h \frac{dp(x)}{dx}$$



Επαφές

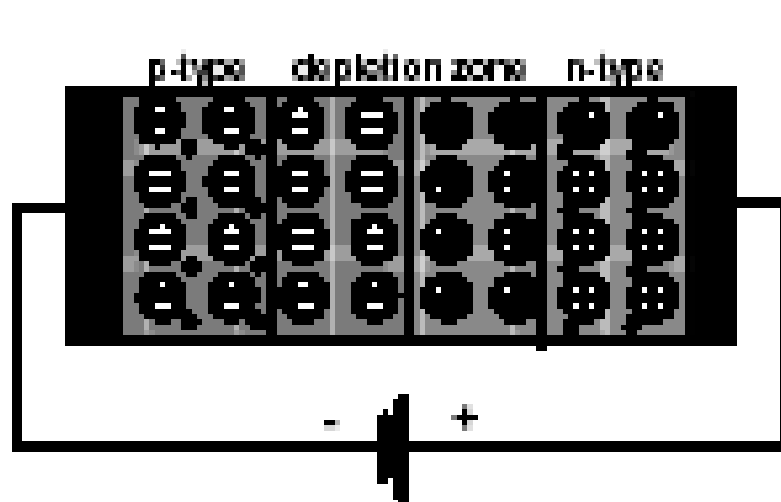
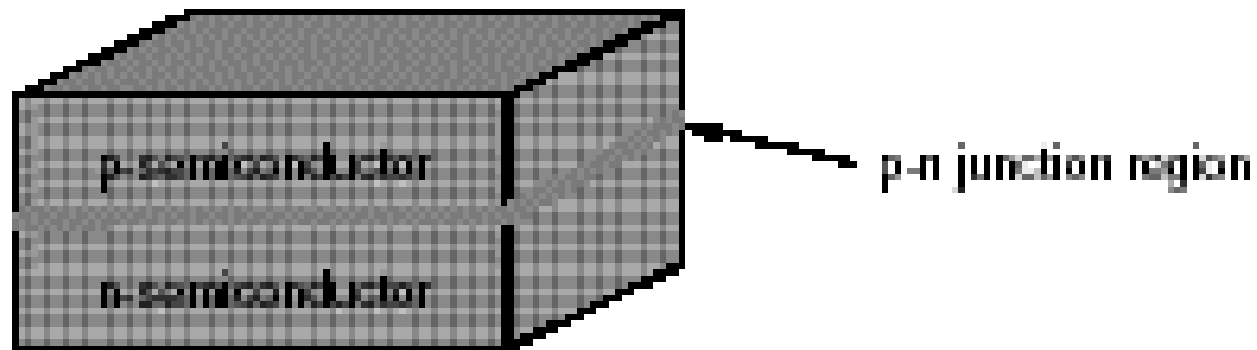
- Οι οπτικοηλεκτρονικές διατάξεις περιλαμβάνουν επαφές μεταξύ ανόμοιων υλικών
- Φέρνοντας έναν ημιαγωγό τύπου P σε επαφή με έναν ημιαγωγό τύπου N έχουμε μια επαφή P-N ή δίοδο
- Ομοιοεπαφές p-n (**homojunctions**)



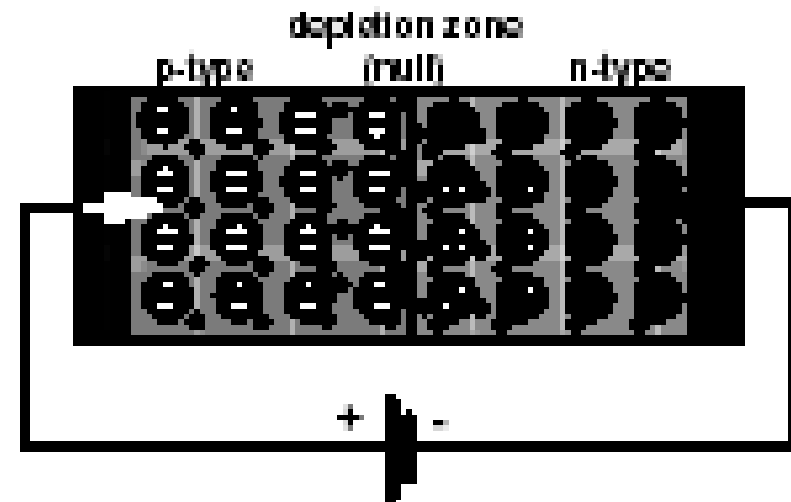
ΕΙΚ. 2.19 Απτόμη επαφή p-n που δείχνει (α) τη συγκέντρωση των προσμειξευσιών και (β) τη συγκέντρωση φορέων και στις δύο πλευρές της επαφής.



Δομές ομοιοεπαφής



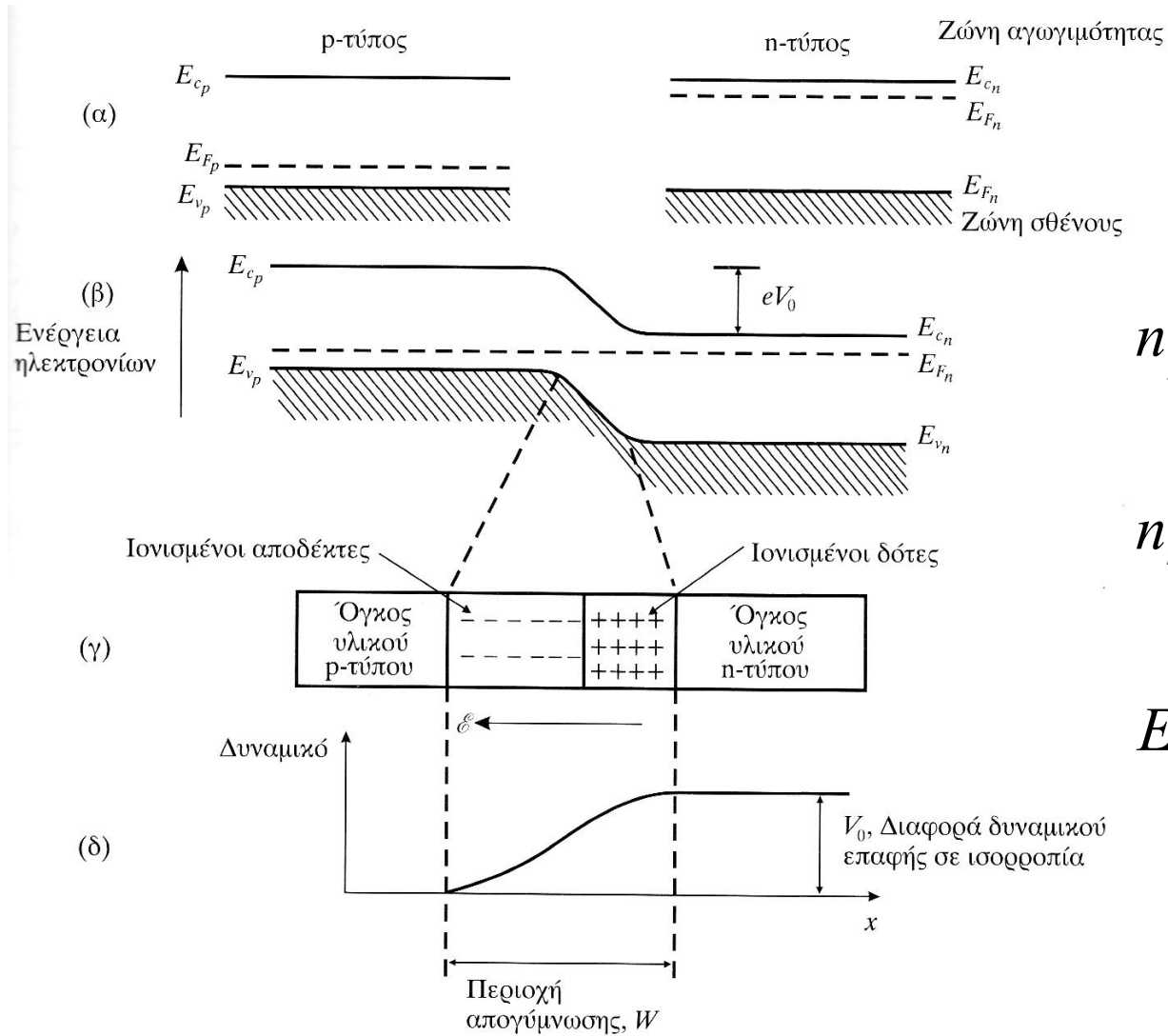
Reverse Bias
(device insulates)



Forward Bias
(device conducts)



Επαφή p-n σε ισορροπία



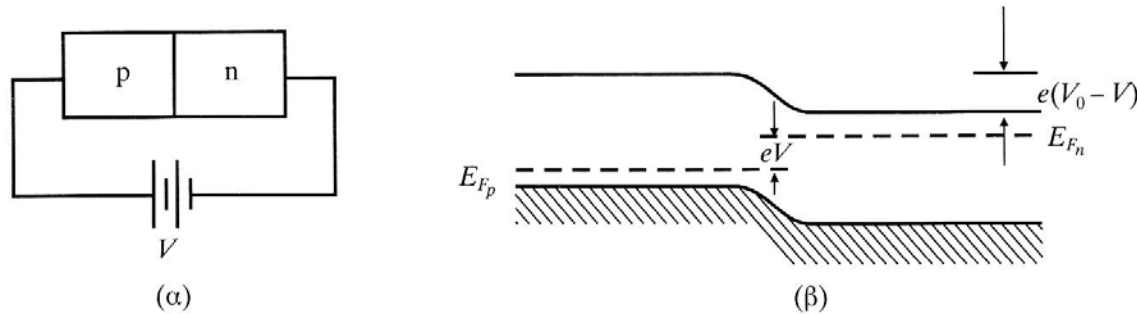
$$n_p = N_c \exp \left[-\frac{E_{c_p} - E_{F_p}}{kT} \right]$$

$$n_n = N_c \exp \left[-\frac{E_{c_n} - E_{F_n}}{kT} \right]$$

$$E_{c_p} - E_{c_n} = kT \ln \left(\frac{n_n}{n_p} \right) = eV_0$$

ΕΙΚ. 2.20 Σχηματική αναπαράσταση της επαφής p-n: (α) αρχικά διαχωρισμένα υλικά p και n τύπου, (β) ενεργειακή κατανομή ζωνών μετά την επαφή, (γ) περιοχές φορτίου των ιονισμένων ατόμων πρόσμειξης μέσα στην περιοχή απογύμνωσης W και (δ) κατανομή δυναμικού στην επαφή.

Ορθά πολωμένη Έπαφή p-n



ΕΙΚ. 2.21 (α) Ορθή πόλωση τάσης V που εφαρμόζεται σε επαφή p-n, (β) προκύπτουσα δομή ενεργειακών ζωνών.

- Εφαρμόζοντας ορθή πολωση V στην επαφή το φράγμα δυναμικού V_0 μειώνεται σε $V_0 - V$
- Τα επίπεδα Fermi δεν ευθυγραμμίζονται πλέον
- Οι φορείς πλειονότητας εγχέονται πέρα από την επαφή, αλλάζουν οι φορείς μειονότητας n_p' p_n' και έχουμε επανασυνδέσεις οπών στην n περιοχή και ηλεκτρονίων στη p περιοχή

$$n_p' = n_n \exp\left[-\frac{V_0 - V}{kT}\right] \text{ και } p_n' = p_p \exp\left[-\frac{V_0 - V}{kT}\right]$$

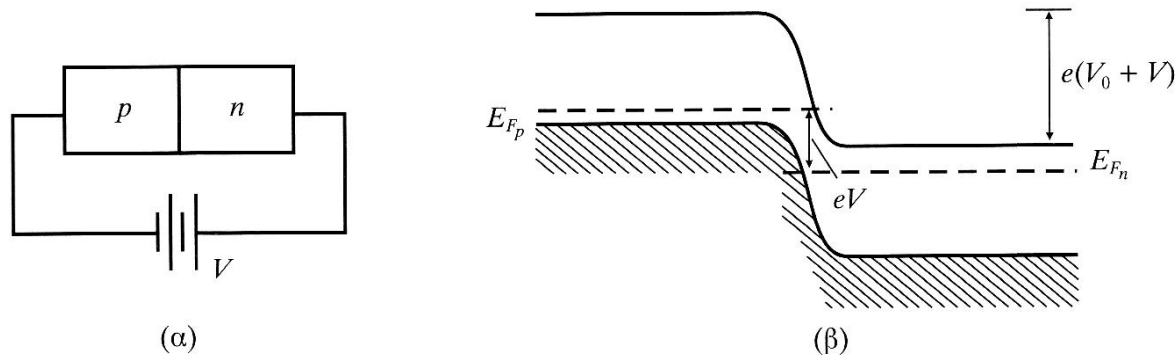
- Τα ηλεκτρόνια που χάνονται αντικαθίστανται από την πηγή
- Η ολική πυκνότητα ρεύματος είναι:

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \text{ και } J_0 \text{ πυκνότητα ρευματος}$$

κορεσμού

Ανάστροφα πολωμένη Επαφή p-n

- Εφαρμόζοντας ανάστροφη πόλωση V στην επαφή το φράγμα δυναμικού V_0 αυξάνεται σε $V_0 + V$
- Μείωση του ρεύματος διάχυσης
- Η ροή ρεύματος οφείλεται στο ρεύμα ολίσθησης ($n \rightarrow p$)
- Απόσπαση και όχι έγχυση φορέων



ΕΙΚ. 2.23 (α) Εφαρμογή αντίστροφης πόλωσης τάσης V σε μια επαφή p-n και (β) η προκύπτουσα δομή ενεργειακών ζωνών.



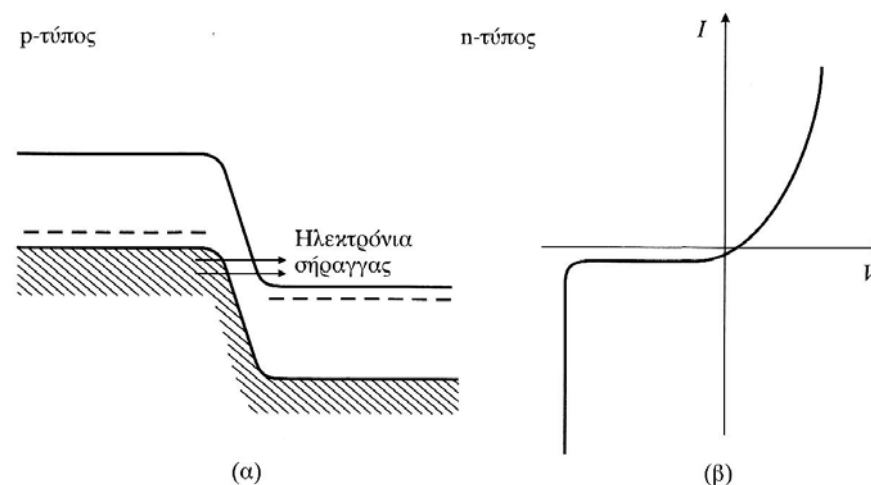
Χωρητικότητα επαφής

- Η περιοχή απογύμνωσης σε μια επαφή ισοδυναμεί με χωρητικότητα C_j
- Είναι παράγων περιορισμού της λειτουργίας της επαφής στις ψηλές συχνότητες

$$C_J = \frac{A}{2} \left[\frac{2e\epsilon_0\epsilon_r}{V_0 - V} \frac{N_d N_a}{N_d + N_a} \right]^{1/2}$$

Αποκλίσεις

- Για μεγάλες τιμές της αντίστροφης πόλωσης εμφανίζεται **κατάρρευση**
- Οφείλεται σε δυο μηχανισμούς
 - **Φαινόμενο Zener:**
 - Λεπτό στρώμα απογύμνωσης
 - κβαντικό φαινόμενο σήραγγας. e «διαπηδούν» (p→n)
 - **Κατάρρευση χιονοστιβάδας:**
 - Πλατύ στρώμα απογύμνωσης
 - κρουστικός ιονισμός τόμων προσμείξεων από τους φορείς

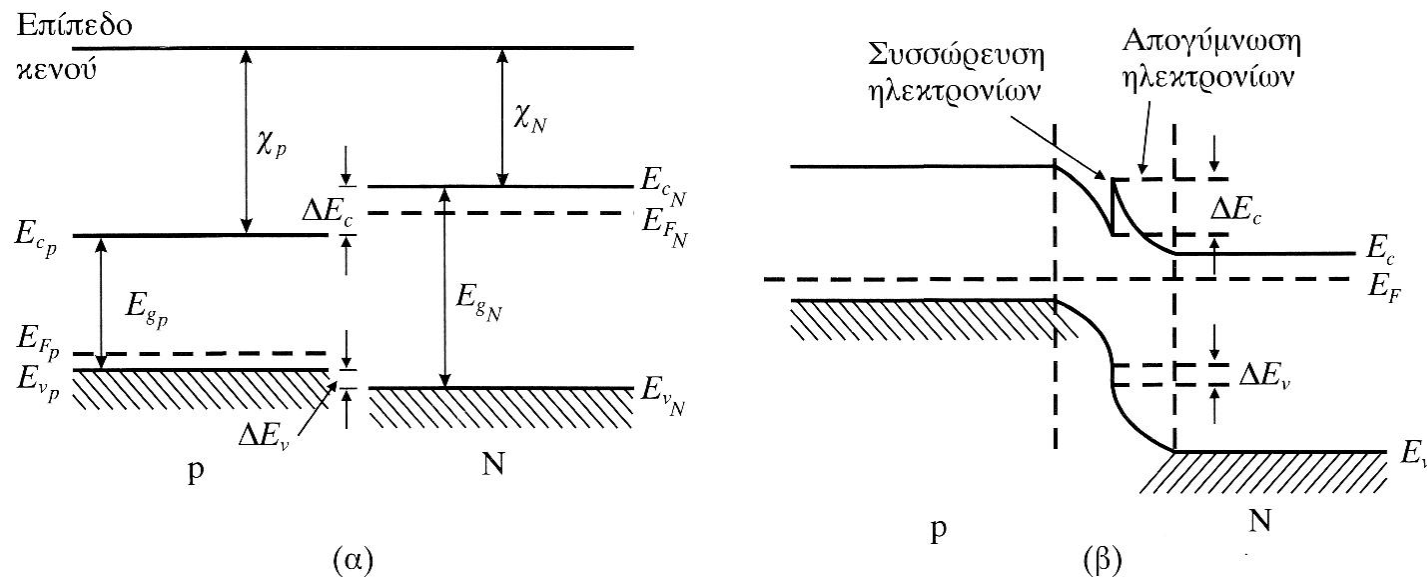


ΕΙΚ. 2.27 (α) Σχηματική αναπαράσταση των ηλεκτρονίων σήραγγας στην κατάρρευση Zener επαφής p-n βαριάς εμφύτευσης υπό αντίστροφη πόλωση και (β) η προκύπτουσα επίδραση στη χαρακτηριστική καμπύλη I-V.



Ετεροεπαφές ημιαγωγού

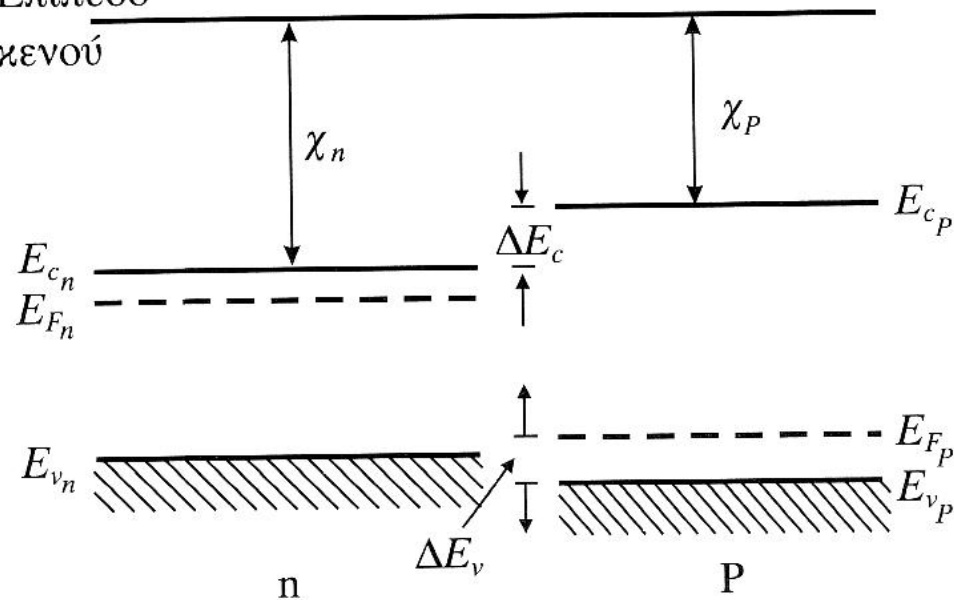
- Ανάπτυξη κρυστάλλου πάνω σε διαφορετικό κρύσταλλο ημιαγωγού
- Καθ'ότι από τους ημιαγωγούς έχει υποστεί εμφύτευση n ή p τύπου
- Επαφές: n-N, p - P και n - P , p – N (το κεφαλαίο γράμμα αντιπροσωπεύει το υλικό με το μεγαλύτερο E_g)



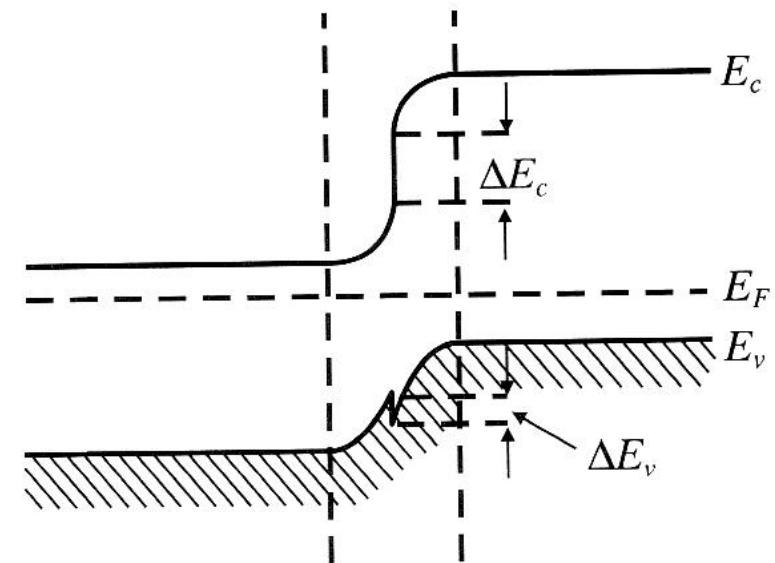
ΕΙΚ. 2.28 Μια ετεροεπαφή p-N: (α) τα ενεργειακά επίπεδα των ημιαγωγών ξεχωριστά, (β) τα ενεργειακά επίπεδα μετά το σχηματισμό της επαφής. (Για την ετεροεπαφή GaAs/Ga_{0,3}Al_{0,7}As $E_{g_p} = 1,43\text{eV}$, $E_{g_N} = 1,8\text{eV}$, $\Delta E_c = 0,32\text{eV}$ και $\Delta E_v = 0,05\text{eV}$.)



Επίπεδο
κενού



(α)



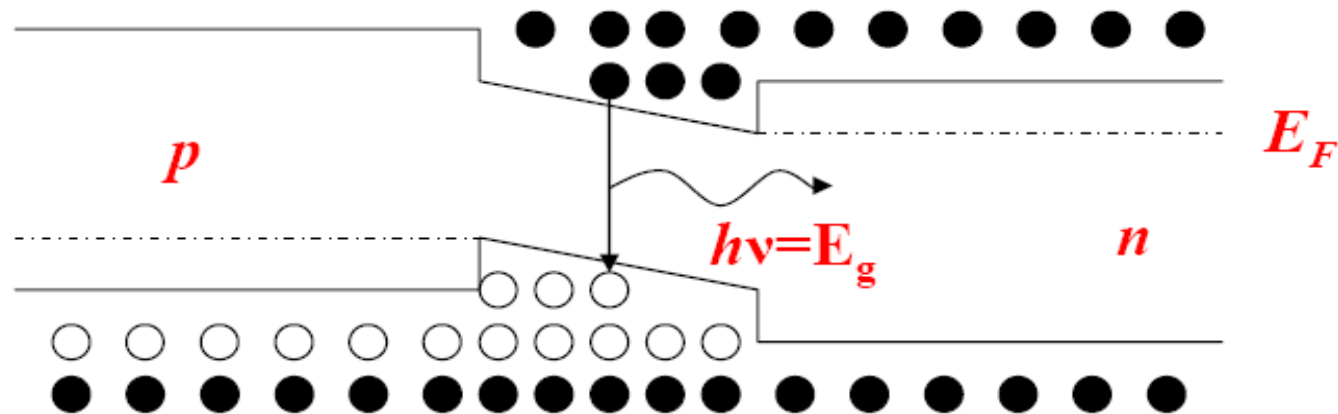
(β)

ΕΙΚ. 2.29 Μια ετεροεπαφή n-P (α) πριν από και (β) μετά το σχηματισμό της επαφής.

Οι Επαφές: n-N, p – P έχουν ωμικά χαρακτηριστικά

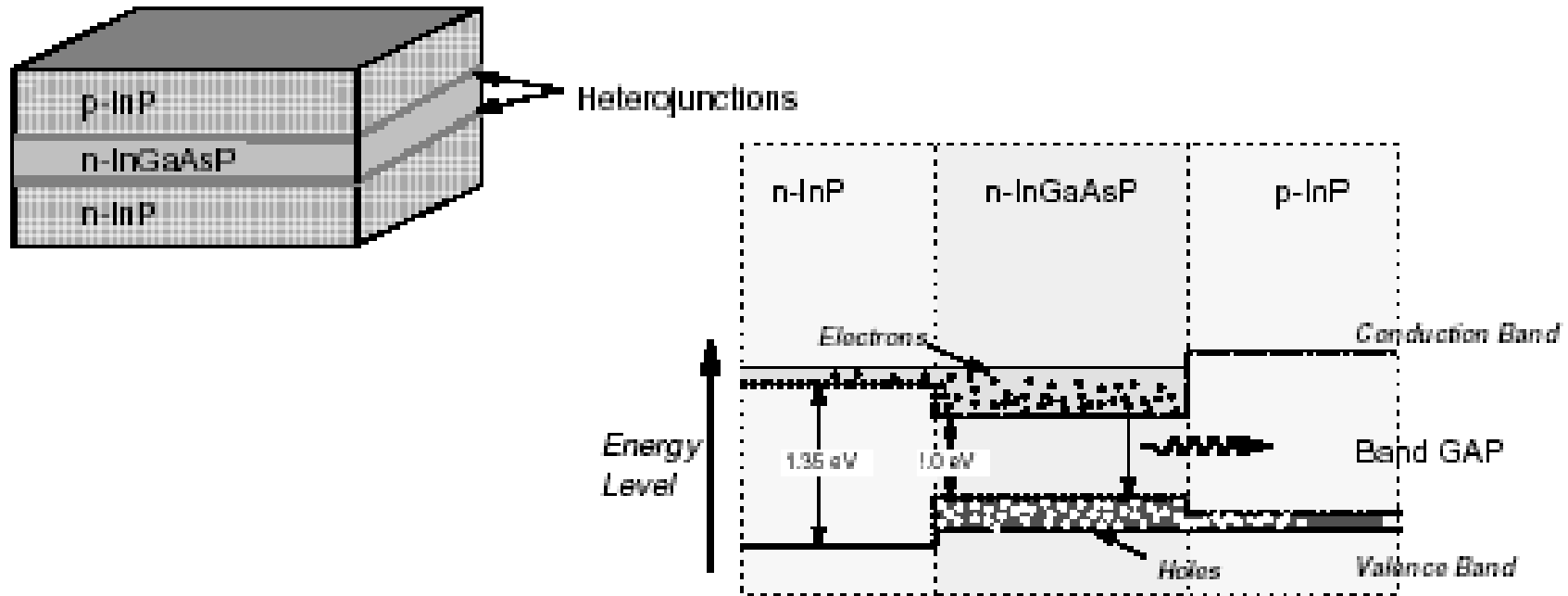
Δομές ετεροεπαφής

- Για εκπομπή φωτός με υψηλή ένταση προτιμούνται οι δίοδοι ετεροεπαφής και όχι οι απλές ομοεπαφές. Οι δίοδοι ετεροεπαφής αποτελούνται από δύο ημιαγωγούς με διαφορετικό ενεργειακό χάσμα. Δηλαδή ο ημιαγωγός μικρότερου ενεργειακού χάσματος βρίσκεται ανάμεσα σε δύο στρώματα του ημιαγωγού μεγαλύτερου ενεργειακού χάσματος. Όπως φαίνεται και στο σχήμα οι φορείς εγχέονται και περιορίζονται πολύ εύκολα στο χώρο του ημιαγωγού μικρότερου ενεργειακού χάσματος και έτσι η επανανδωση τους είναι πιο αποτελεσματική από ότι στην περίπτωση της ομοεπαφής.





Δομές ετεροεπαφής



➤ Το ενεργό στρώμα περιλαμβάνεται μεταξύ δύο στρωμάτων έχοντας χαμηλότερο E_g και υψηλότερο δ.δ. n

- Κυματοδήγηση της παραγόμενης ακτινοβολίας
- Φράγμα δυναμικού πολύ μεγαλύτερο από ότι στις ομοιοεπαφές

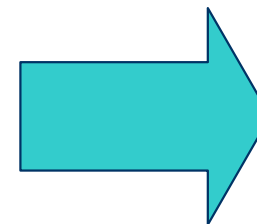


Κβαντικά φρέατα

- Δομές ημιαγωγών με στρωματοποιημένη μορφή
- πάχος στρώματος πολύ μικρό $\sim 10\text{nm}$
- Πχ στρώμα GaAs ανάμεσα σε δύο στρώματα GaAlAs
- Σε μια τέτοια δομή τα ενεργειακά επίπεδα των e αν το κρίσιμο στρώμα έχει πάχος $L_z \sim 10\text{nm}$ και τα άλλα L_x, L_y

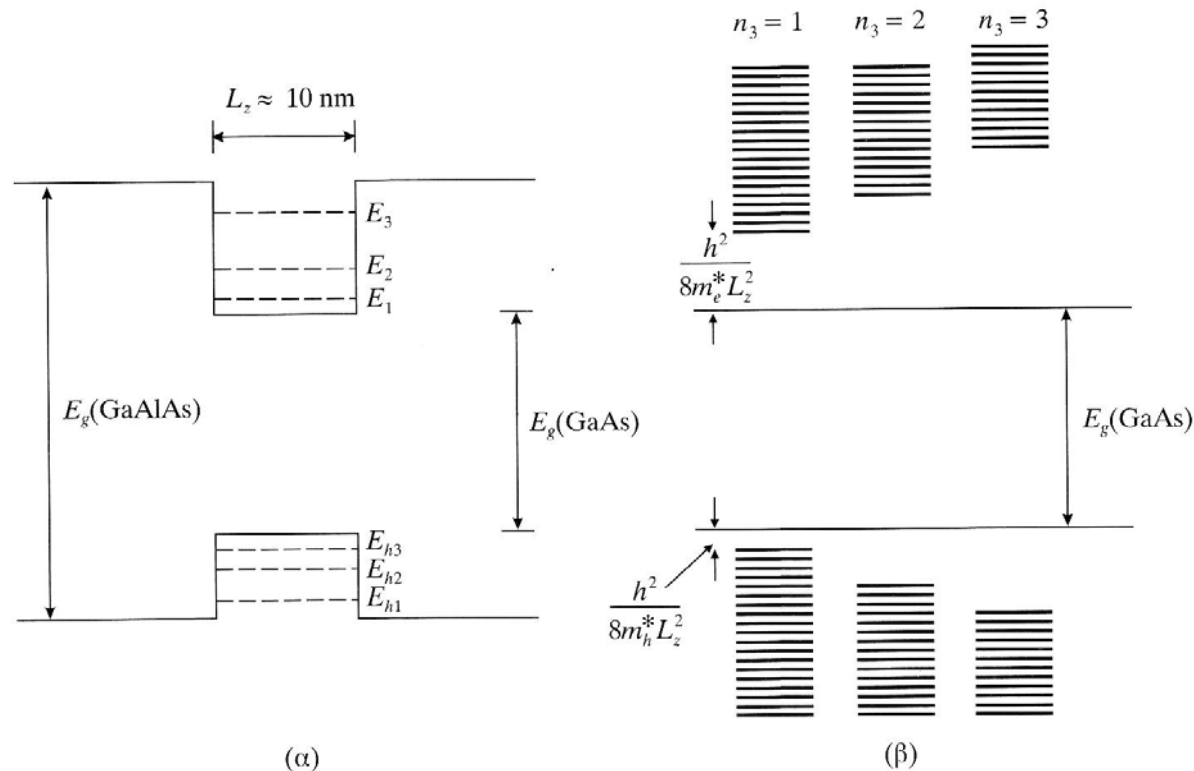
$$E(n_1, n_2, n_3) = \frac{h^2}{8m_e^*} \left(\frac{n_1^2}{L_x^2} + \frac{n_2^2}{L_y^2} + \frac{n_3^2}{L_z^2} \right)$$

- Επειδή $L_z \ll L_x, L_y$





Ενεργειακά επίπεδα στα QW



ΕΙΚ. 2.32 Ενεργειακά επίπεδα μέσα σε μια δομή κβαντικού πηγαδιού του GaAs που βρίσκεται ανάμεσα σε δύο στρώματα του GaAlAs: το (α) παρουσιάζει διακριτά ενεργειακά επίπεδα ηλεκτρονίων και οπών για το $n_3 = 1, 2, 3$, ενώ το (β) παρουσιάζει τις υποζώνες που αντιστοιχούν σε αυτές τις τιμές του n_3 (είναι χωρισμένα για σαφήνεια, αλλά στην πραγματικότητα επικαλύπτονται το ένα από το άλλο).

- Αύξηση ενεργειακού χάσματος
- Περισσότερες διαθέσιμες καταστάσεις στο κατώτατο σημείο της ζώνης αγωγιμότητας
- Αύξηση ενέργειας δεσμού εξιτονίων (2,3 φορές) με ψηλότερες πιθανότητες μετάβασης