

# Επιπλέον στοιχεία ημιαγωγών και εισαγωγή στις ημιαγώγιμες νανοδομές

- Εμμανουήλ Πασπαλάκης, Καθηγητής Πανεπιστημίου Πατρών

---

# Η διάλεξη περιέχει

- Βασικά στοιχεία φυσικής ημιαγωγών
- Εισαγωγικά στοιχεία ημιαγώγιμων νανοδομών

## Τυπικοί ημιαγωγοί – Σημαντικές παράμετροι

- Οι τυπικοί ημιαγωγοί μπορεί να είναι στοιχειώδεις (Si, Ge) ή συνδυασμός στοιχείων των ομάδων III και V (π.χ. GaAs, GaP) ή II και VI (π.χ. ZnS, CdTe).
- Σε κάθε περίπτωση, η παράμετρος που καθορίζει τις περισσότερες από οι βασικές ιδιότητές τους (ηλεκτρικές, οπτοηλεκτρονικές, κ.α.) είναι το ενεργειακό χάσμα.
- Το ενεργειακό χάσμα κυμαίνεται συνήθως από μερικά δέκατα του eV έως περίπου 3 eV. Εάν το ενεργειακό χάσμα είναι μεταξύ 2 και 3 eV, οι ημιαγωγοί λέγονται ημιαγωγοί ευρέως χάσματος.
- Εκτός από το ενεργειακό χάσμα, για τις ιδιότητες και τις πιθανές εφαρμογές τους είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την καμπυλότητα της σχέσης διασποράς  $E(k)$ , δεδομένου ότι αυτή η παράμετρος καθορίζει την ενεργό μάζα των φορέων φορτίου (ηλεκτρονίων ή οπών), όπως και αν οι ημιαγωγοί είναι άμεσου ή έμμεσου χάσματος.

## Πυκνότητα ηλεκτρονίων σε ημιαγωγούς

- Κοντά στο ελάχιστο της ζώνης αγωγιμότητας

$$E = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} \quad E_c \quad \text{Το ελάχιστο της ενέργειας στη ζώνη αγωγιμότητας}$$

Πυκνότητα καταστάσεων

$$g_c(E) = \frac{4\pi(2m_e^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c}$$

Η ενεργειακή κατανομή των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας

$$n(E) = g_c(E) f_{FD}(E) = \frac{4\pi(2m_e^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \frac{1}{1 + e^{(E - E_F)/k_B T}}$$

Εάν  $(E - E_F)/k_B T \gg 1$

$$n(E) \approx \frac{4\pi(2m_e^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} e^{-(E - E_F)/k_B T}$$

Αν η παραπάνω σχέση ισχύει ο ημιαγωγός ονομάζεται μη-εκφυλισμένος

Η παραπάνω είναι καλή προσέγγιση εφόσον  $(E_c - E_F)/k_B T \geq 3$

## Πυκνότητα ηλεκτρονίων σε ημιαγωγούς

Η πυκνότητα των ηλεκτρονίων στη ζώνη αγωγιμότητας είναι

$$n = \int_{E_c}^{\infty} n(E) dE = \frac{4\pi(2m_e^*)^{3/2}}{h^3} \int_{E_c}^{\infty} \sqrt{E - E_c} e^{-(E - E_F)/k_B T} dE$$

Αλλαγή μεταβλητής  $y = (E - E_c) / k_B T$

$$n = \frac{4\pi(2m_e^* k_B T)^{3/2}}{h^3} e^{-(E_c - E_F)/k_B T} \int_0^{\infty} \sqrt{y} e^{-y} dy \quad \int_0^{\infty} \sqrt{y} e^{-y} dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

$$n = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2} e^{-(E_c - E_F)/k_B T} = N_c e^{-(E_c - E_F)/k_B T}$$

$$N_c = 2 \left( \frac{2\pi m_e^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

$N_c$  Ενεργός πυκνότητα καταστάσεων στη ζώνη αγωγιμότητας

# Πυκνότητα οπών σε ημιαγωγούς

Πυκνότητα καταστάσεων

$$g_v(E) = \frac{4\pi(2m_h^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E_v - E}$$

$E_v$  Το μέγιστο της ενέργειας στη ζώνη σθένους

Η κατανομή για τις οπές είναι

$$f_h(E) = 1 - f_{FD}(E)$$

Η πυκνότητα των οπών στη ζώνη σθένους είναι

$$p = \int_{-\infty}^{E_v} g_v(E) f_h(E) dE \quad p = N_v e^{-(E_F - E_v)/k_B T} \quad N_v = 2 \left( \frac{2\pi m_h^* k_B T}{h^2} \right)^{3/2}$$

$N_v$  Ενεργός πυκνότητα καταστάσεων στη ζώνη σθένους

TABLE 1-4 • Values of  $N_c$  and  $N_v$  for Ge, Si, and GaAs at 300 K.

	Ge	Si	GaAs
$N_c$ (cm <sup>-3</sup> )	$1.04 \times 10^{19}$	$2.8 \times 10^{19}$	$4.7 \times 10^{17}$
$N_v$ (cm <sup>-3</sup> )	$6.0 \times 10^{18}$	$1.04 \times 10^{19}$	$7.0 \times 10^{18}$

# Νόμος δράσης των μαζών

- Το γινόμενο  $np$  δίνει  $np = N_c N_v e^{-(E_c - E_v)/k_B T} = N_c N_v e^{-E_g/k_B T}$

Νόμος δράσης των μαζών  $np = n_i^2$   $n_i = \sqrt{N_c N_v} e^{-E_g/2k_B T}$

- Η σχέση ισχύει τόσο για ενδογενείς ημιαγωγούς (ημιαγωγούς χωρίς προσμίξεις) όσο και για εξωγενείς ημιαγωγούς (δηλαδή για ημιαγωγούς που είναι εμπλουτισμένοι με προσμίξεις) σε συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας.
- Η εξίσωση δείχνει ότι σε έναν ημιαγωγό προσμίξεων, η αύξηση της μιας κατηγορίας φορέων οδηγεί στην μείωση της άλλης.
- Σε έναν ενδογενή ημιαγωγό, τα μη μηδενικά  $n$  και  $p$  είναι αποτελέσματα της θερμικής διέγερσης, η οποία μετακινεί ηλεκτρόνια από το ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας. Αφού τέτοιες κινήσεις δημιουργούν ηλεκτρόνια και οπές σε ζεύγη,  $n = p$  σε ενδογενείς ημιαγωγούς. Οπότε για ενδογενείς ημιαγωγούς  $n = p = n_i$
- Σημειώνουμε ότι το  $n_i$  έχει ισχυρή εξάρτηση από το ενεργειακό χάσμα και τη θερμοκρασία. Σε θερμοκρασία δωματίου για το Si

$$n_i \approx 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

## Ενδογενές επίπεδο Fermi

- Σε ένα ενδογενή ημιαγωγό

$$n = p \Rightarrow N_c e^{-(E_c - E_{Fi})/k_B T} = N_v e^{-(E_{Fi} - E_v)/k_B T}$$

$$E_{Fi} = \frac{1}{2}(E_c + E_v) + \frac{1}{2}k_B T \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right) = E_v + \frac{E_g}{2} + \frac{3}{4}k_B T \ln\left(\frac{m_h^*}{m_e^*}\right)$$

$$E_v + \frac{E_g}{2} = E_{midgap} \quad \text{Το μέσο του ενεργειακού χάσματος}$$

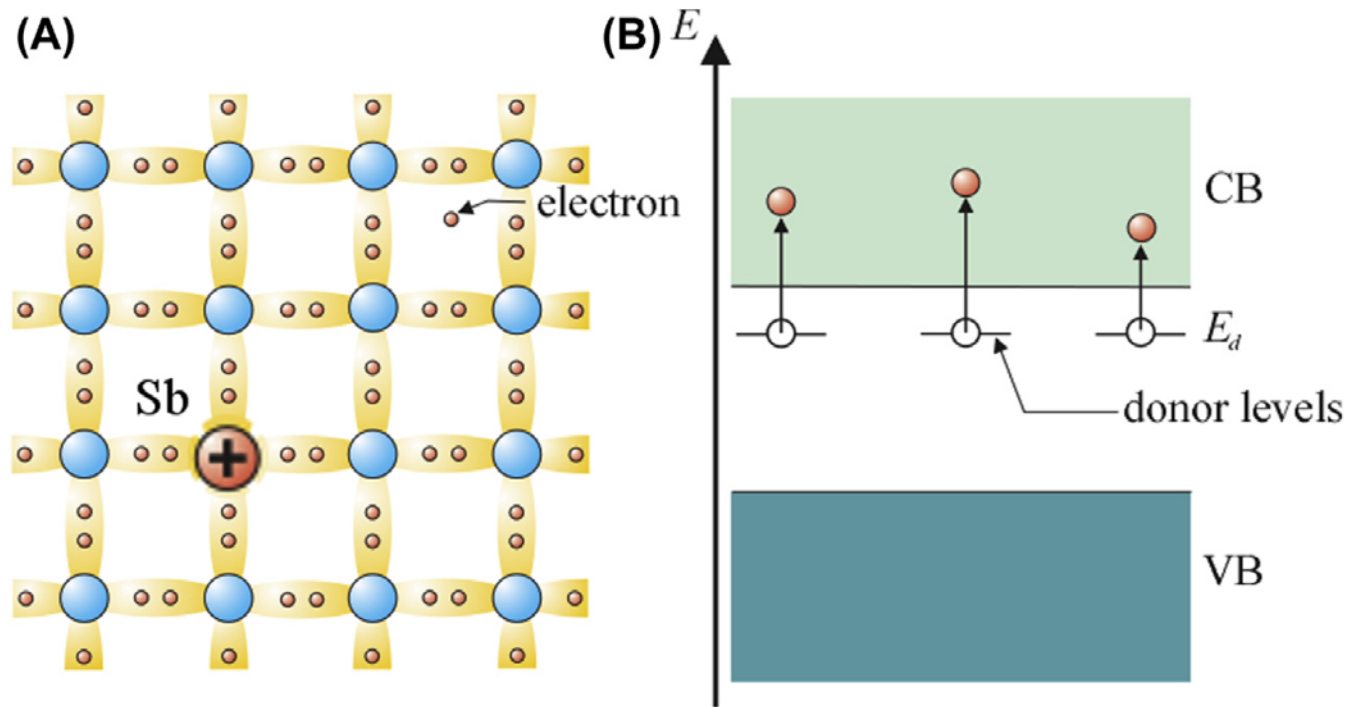
- Σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες ή αν οι ενεργές μάζες ηλεκτρονίων και οπών είναι περίπου ίσες, τότε το ενδογενές επίπεδο Fermi για ένα ενδογενή ημιαγωγό είναι πολύ κοντά στο μέσο του ενεργειακού χάσματος.



## Εξωγενείς ημιαγωγοί – Προσμίξεις

- Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιούνται κυρίως στην δημιουργία διατάξεων όπως διόδους, τρανζίστορ, και ηλιακά κελιά, μεταξύ άλλων, είναι εξωγενείς.
- Οι εξωγενείς ημιαγωγοί λαμβάνονται γενικά από τους ενδογενείς με την προσθήκη προσμίξεων με ελεγχόμενο τρόπο.
- Η συγκέντρωση των προσμίξεων καθορίζει την ηλεκτρική αγωγιμότητα των εξωγενών ημιαγωγών.
- Εάν μικρή πυκνότητα πεντασθενών ατόμων, όπως το As ή το Sb, προστεθούν ως πρόσμιξη στο Si, τότε κάθε άτομο που αντικαθιστά ένα άτομο Si στον κρύσταλλο θα προσφέρει ένα ηλεκτρόνιο στη ζώνη αγωγιμότητας, λόγω ιονισμού του ατόμου πρόσμιξης (που γίνεται θετικό ιόν).
- Αυτού του είδους η πρόσμιξη ονομάζεται δότης και ο αντίστοιχος ημιαγωγός, τύπου n, αφού η συγκέντρωση των αρνητικών φορέων (ηλεκτρονίων) ξεπερνάει σημαντικά τη συγκέντρωση των θετικών φορέων (οπών) .

# Ημιαγωγός τύπου n



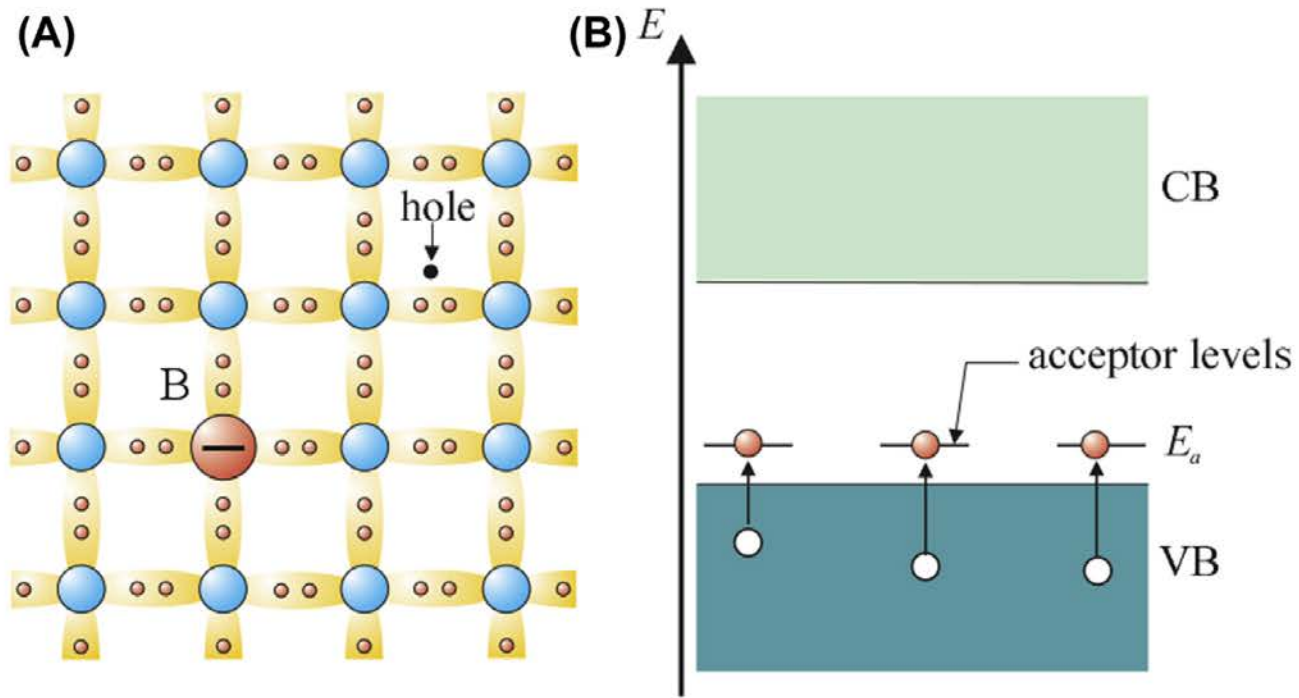
**FIGURE 3.6**

(A) Pentavalent impurity atom in silicon. (B) Band diagram of an n-type semiconductor. The electrons can leave the impurity atoms if energy  $E_d$  (ionization energy) is provided and are free to move through the crystal; the donor impurities become static positive ions.

## Ημιαγωγός τύπου p

- Εάν μικρή πυκνότητα τρισθενών ατόμων, όπως το B, προστεθούν ως πρόσμιξη στο Si, τότε από κάθε άτομο που αντικαθιστά ένα άτομο Si στον κρύσταλλο τα τρία ηλεκτρόνια θα δημιουργήσουν ομοιοπολικούς δεσμούς με τρία ηλεκτρόνια του Si. Όμως δεν θα υπάρχει το τέταρτο ηλεκτρόνιο για να δημιουργηθεί και τέταρτος ομοιοπολικός δεσμός, αφού λείπει ένα ηλεκτρόνιο. Η κατάσταση του ηλεκτρονίου που λείπει είναι μια οπή. Αν ενεργοποιηθούν θερμικά, τότε γειτονικά ηλεκτρόνια καλύπτουν την κατάσταση που λείπει και δημιουργούνται οπές στη ζώνη αγωγιμότητας.
- Αυτού του είδους η πρόσμιξη ονομάζεται αποδέκτης και ο αντίστοιχος ημιαγωγός, τύπου p, αφού η συγκέντρωση των θετικών φορέων (οπών) ξεπερνάει σημαντικά τη συγκέντρωση των αρνητικών φορέων (ηλεκτρονίων).

# Ημιαγωγός τύπου p



**FIGURE 3.7**

(A) Trivalent impurity atom in silicon. (B) Band diagram of a p-type semiconductor.

## Πυκνότητες ηλεκτρονίων και οπών σε ισορροπία

- Σε έναν δεδομένο ημιαγωγό, συνήθως γνωρίζει κανείς τα επίπεδα εμπλουτισμού, δηλαδή τις συγκεντρώσεις των δοτών  $N_D$  και αποδεκτών  $N_A$ , οι οποίοι καθορίζονται κατά την κατασκευή των κρυστάλλων.
- Το πρόβλημα της εύρεσης των συγκεντρώσεων ηλεκτρονίων και οπών είναι εύκολο να λυθεί, εάν η θερμοκρασία είναι αρκετά υψηλή για όλες οι προσμίξεις έχουν ιονιστεί. Αυτό ισχύει πράγματι για τους περισσότερους ημιαγωγούς σε θερμοκρασία δωματίου. Για παράδειγμα, εάν  $T > 100$  K όλες οι προσμίξεις στο πυρίτιο ιονίζονται ως συνέπεια της χαμηλής τιμής της ενέργεια ιονισμού των προσμίξεων.
- Έτσι, αφού η ύλη είναι γενικά ουδέτερη, η πυκνότητα του συνολικού θετικού φορτίου θα είναι ίση με την πυκνότητα του συνολικού αρνητικού φορτίου, δηλαδή 
$$p + N_D = n + N_A$$

## Πυκνότητες ηλεκτρονίων και οπών σε ισορροπία

- Χρησιμοποιώντας τον νόμο δράσης των μαζών, έχουμε

$$p = \frac{n_i^2}{n}$$

$$\text{Τότε} \quad \frac{n_i^2}{n} + N_D = n + N_A \Rightarrow n^2 - (N_D - N_A)n - n_i^2 = 0$$

$$\text{Οπότε} \quad n = \frac{N_D - N_A}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}$$

$$\text{Ομοίως} \quad p = \frac{N_A - N_D}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}$$

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν και αν  $N_D$  ή  $N_A$  είναι μηδέν.

## Πυκνότητες ηλεκτρονίων και οπών σε ισορροπία

- Γενικά, σε θερμοκρασία δωματίου ένα από τα  $N_D$  ή  $N_A$  είναι αρκετά μεγαλύτερο από το  $n_i$ .
- Επίσης, οι εξωγενείς ημιαγωγοί δημιουργούνται έτσι ώστε  $N_D \gg N_A$  ή  $N_A \gg N_D$ .
- Οπότε, για ημιαγωγό τύπου n:  $n \approx N_D$   $p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$
- Ενώ, για ημιαγωγό τύπου p:  $p \approx N_A$   $n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$
- Σημειώνουμε ότι η παραπάνω προσέγγιση δεν ισχύει για μεγάλες θερμοκρασίες, λόγω της αύξησης του  $n_i$  με τη θερμοκρασία.

# Θέσεις των επιπέδων Fermi

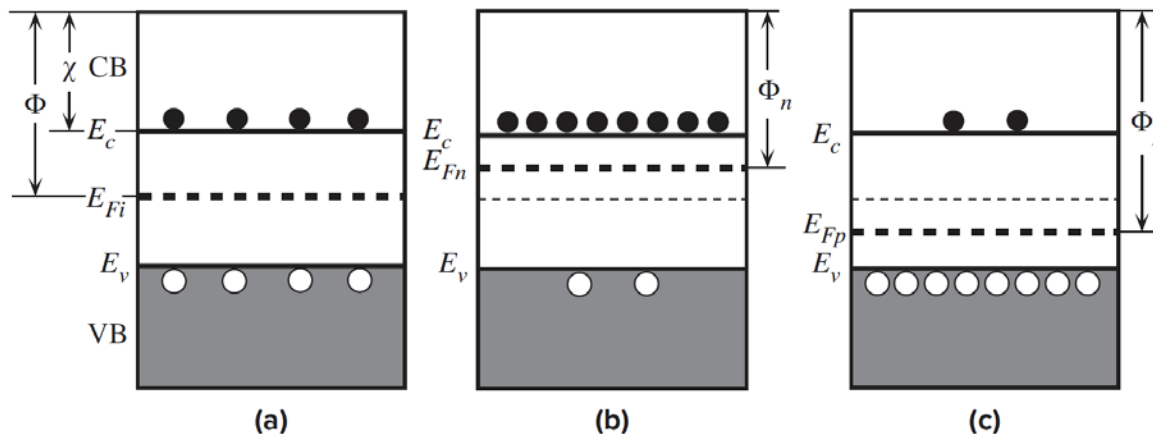
- Από τη σχέση  $n = N_c e^{-(E_c - E_F)/k_B T} \Rightarrow E_c - E_F = k_B T \ln \left( \frac{N_c}{n} \right)$

- Οπότε, για ημιαγωγό τύπου n με  $n \approx N_D \quad N_D \gg n_i$

$$E_{Fn} = E_c - k_B T \ln \left( \frac{N_c}{N_D} \right)$$

- Ενώ, για ημιαγωγό τύπου p με  $p \approx N_A \quad N_A \gg n_i$  έχουμε αντίστοιχα

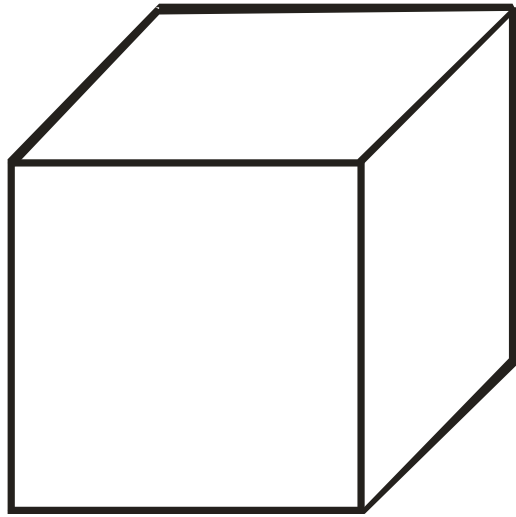
$$E_{Fp} = E_v + k_B T \ln \left( \frac{N_v}{N_A} \right)$$



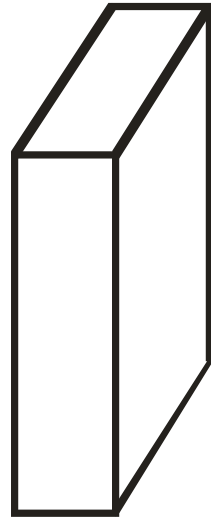
**Figure 5.8** Energy band diagrams for (a) intrinsic, (b) n-type, and (c) p-type semiconductors. In all cases,  $np = n_i^2$ .



# Από ημιαγωγούς σε ημιαγώγιμες νανοδομές



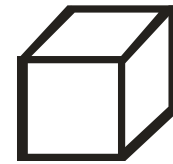
Bulk



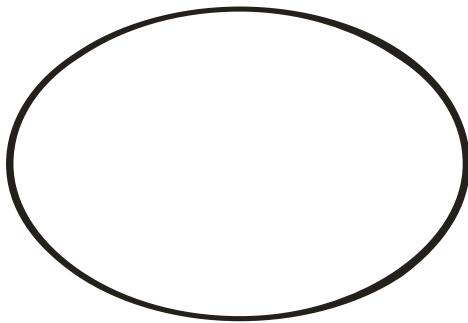
Well



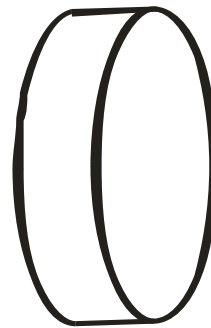
Wire



Dot



Bulk



Well

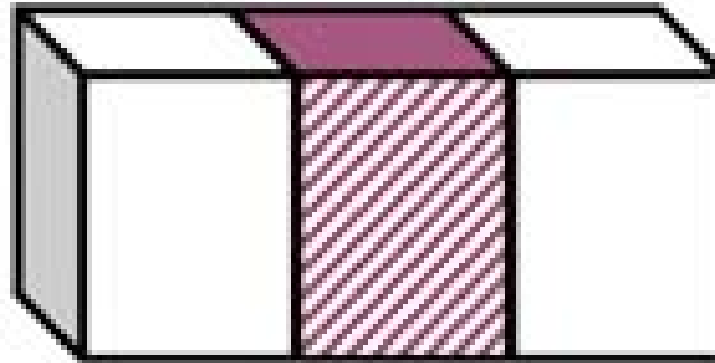


Wire



Dot

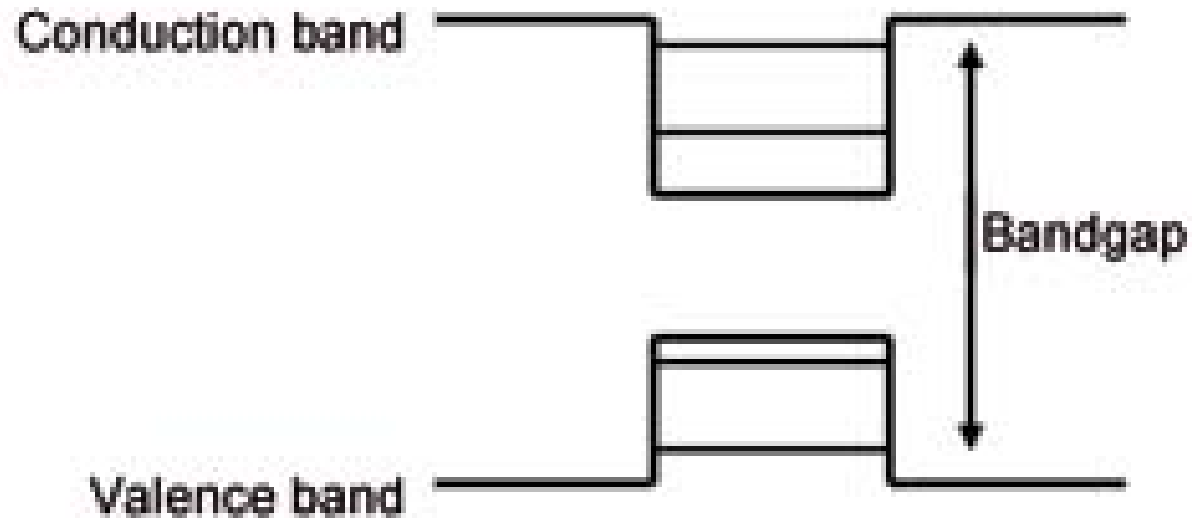
# Ημιαγώγιμο κβαντικό πηγάδι



Material 1

Material 2

Material 2

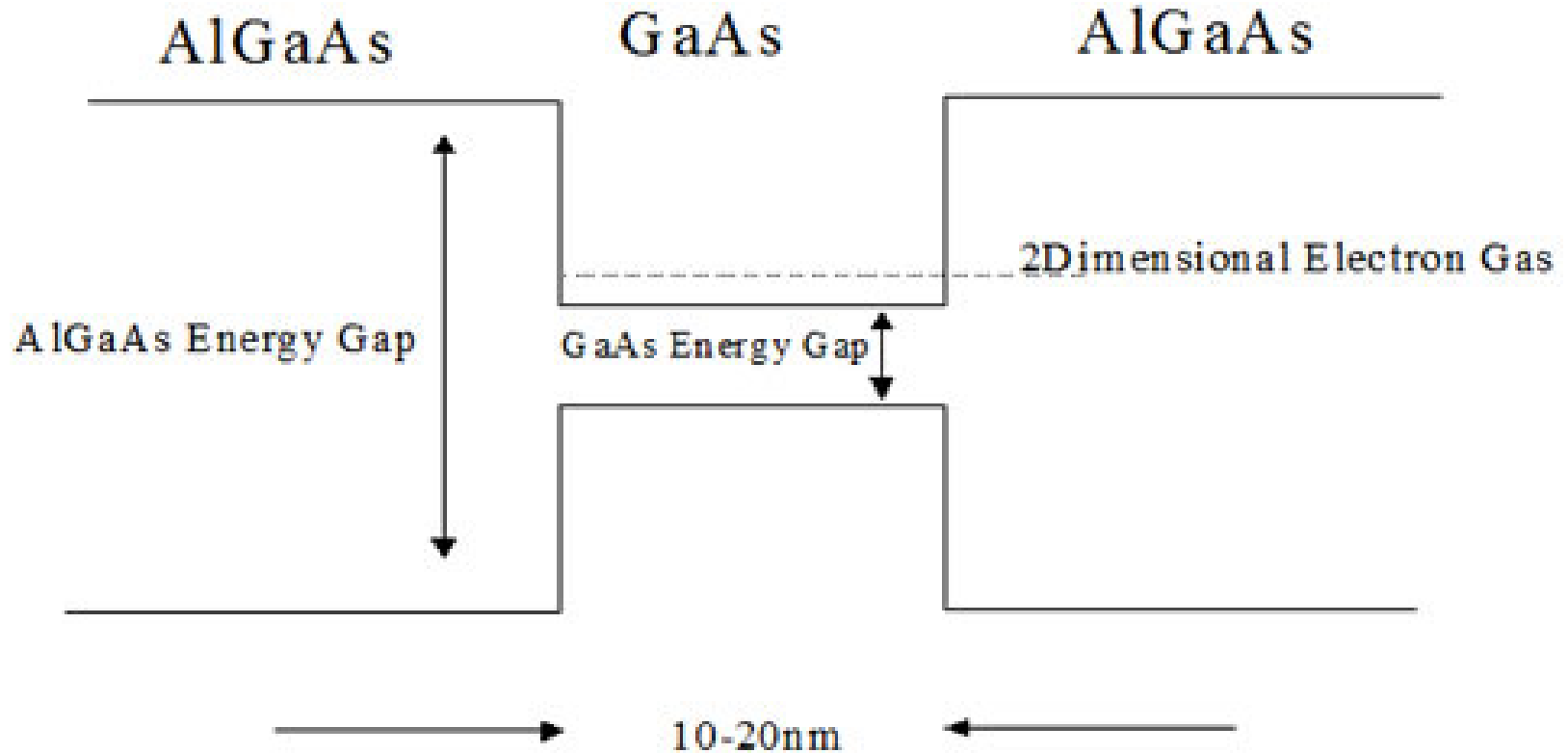


Conduction band

Bandgap

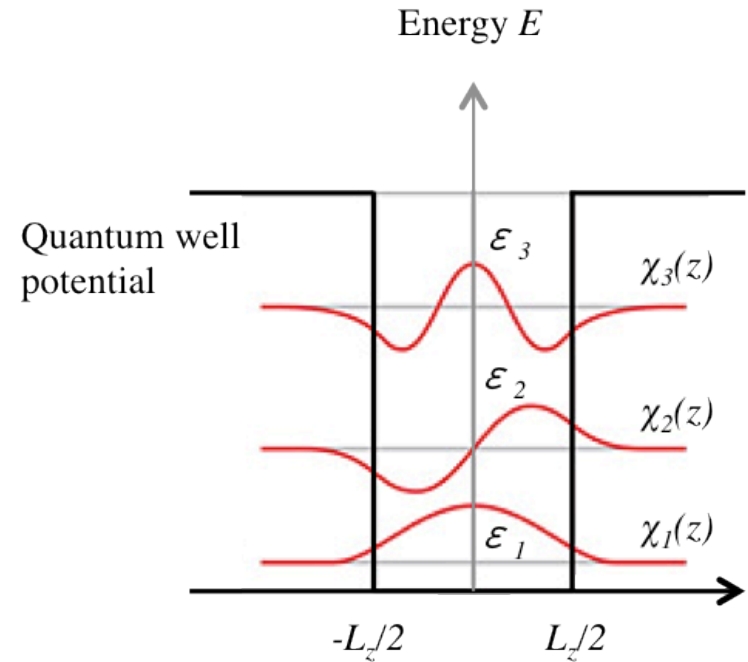
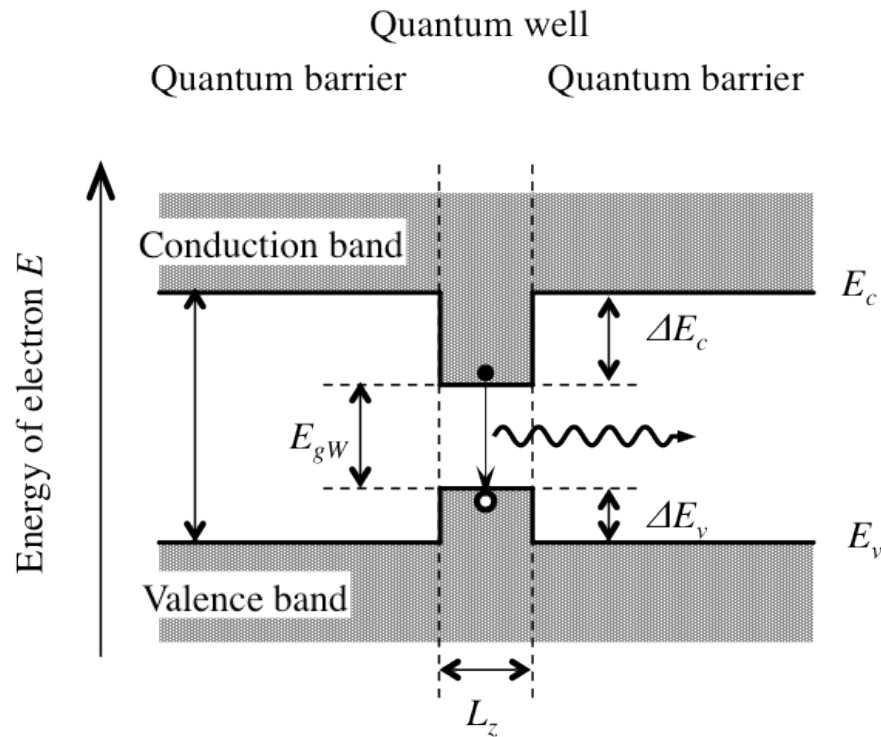
Valence band

# Ημιαγώγιμο κβαντικό πηγάδι



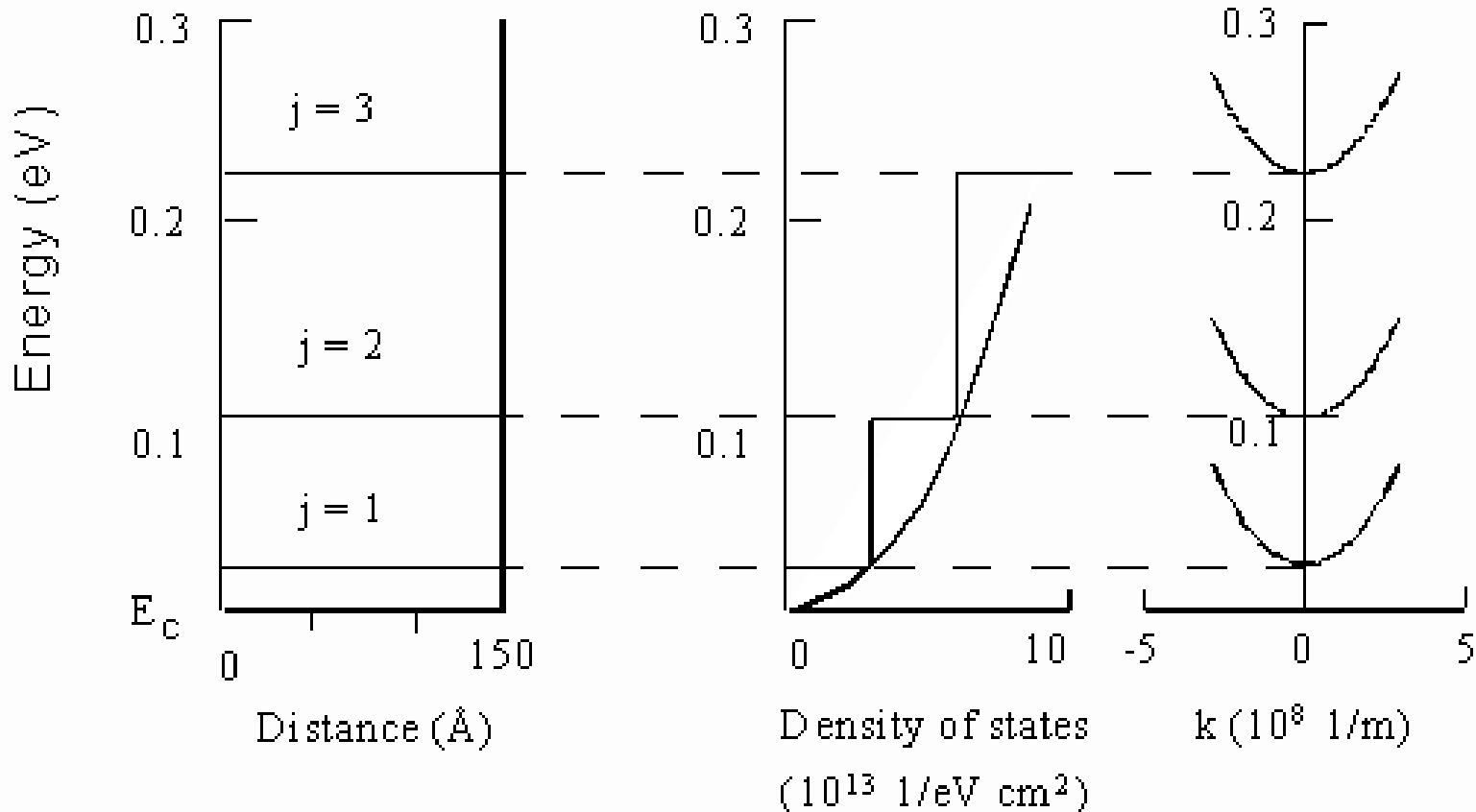
- Κβαντικός περιορισμός σε μία διάσταση.
- Μη-περιορισμένα ηλεκτρόνια σε δύο διαστάσεις (δισδιάστατο ηλεκτρονικό αέριο).

# Ημιαγώγιμο κβαντικό πηγάδι



- Ο κβαντικός περιορισμός οδηγεί σε διάκριτες καταστάσεις.

# Ημιαγώγιμο κβαντικό πηγάδι



- Σε συνδυασμό με τα μη-περιορισμένα ηλεκτρόνια έχουμε δημιουργία υποζωνών.

## Ημιαγωγίμο κβαντικό πηγάδι

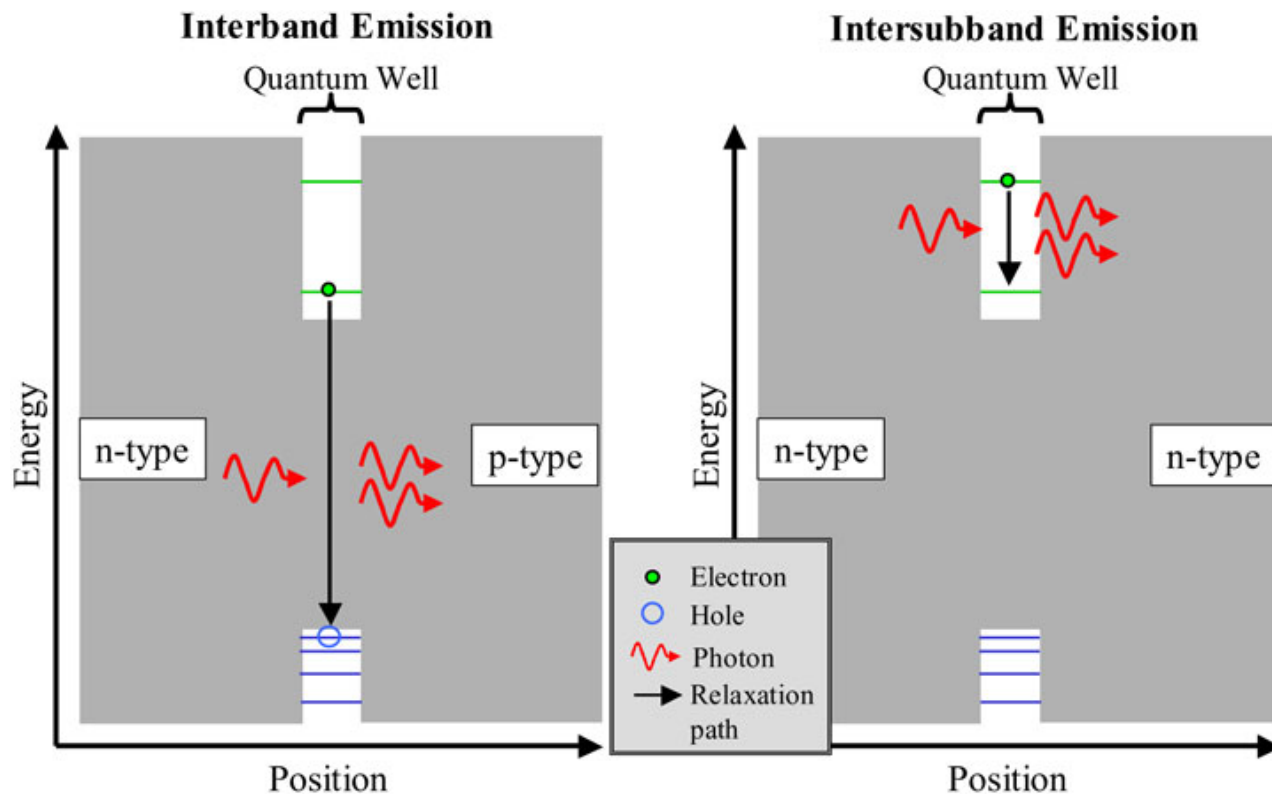
$$\psi_{n_x}(x, y, z) = \sqrt{\frac{2}{L_x}} \sin\left(\frac{\pi n_x x}{L_x}\right) e^{i(k_y y + k_z z)},$$

$$E_{n_x}(k_y, k_z) = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left(\frac{\pi^2 n_x^2}{L_x^2}\right) + \frac{\hbar^2(k_y^2 + k_z^2)}{2m^*}.$$

$$n_x = 1, 2, 3, \dots$$

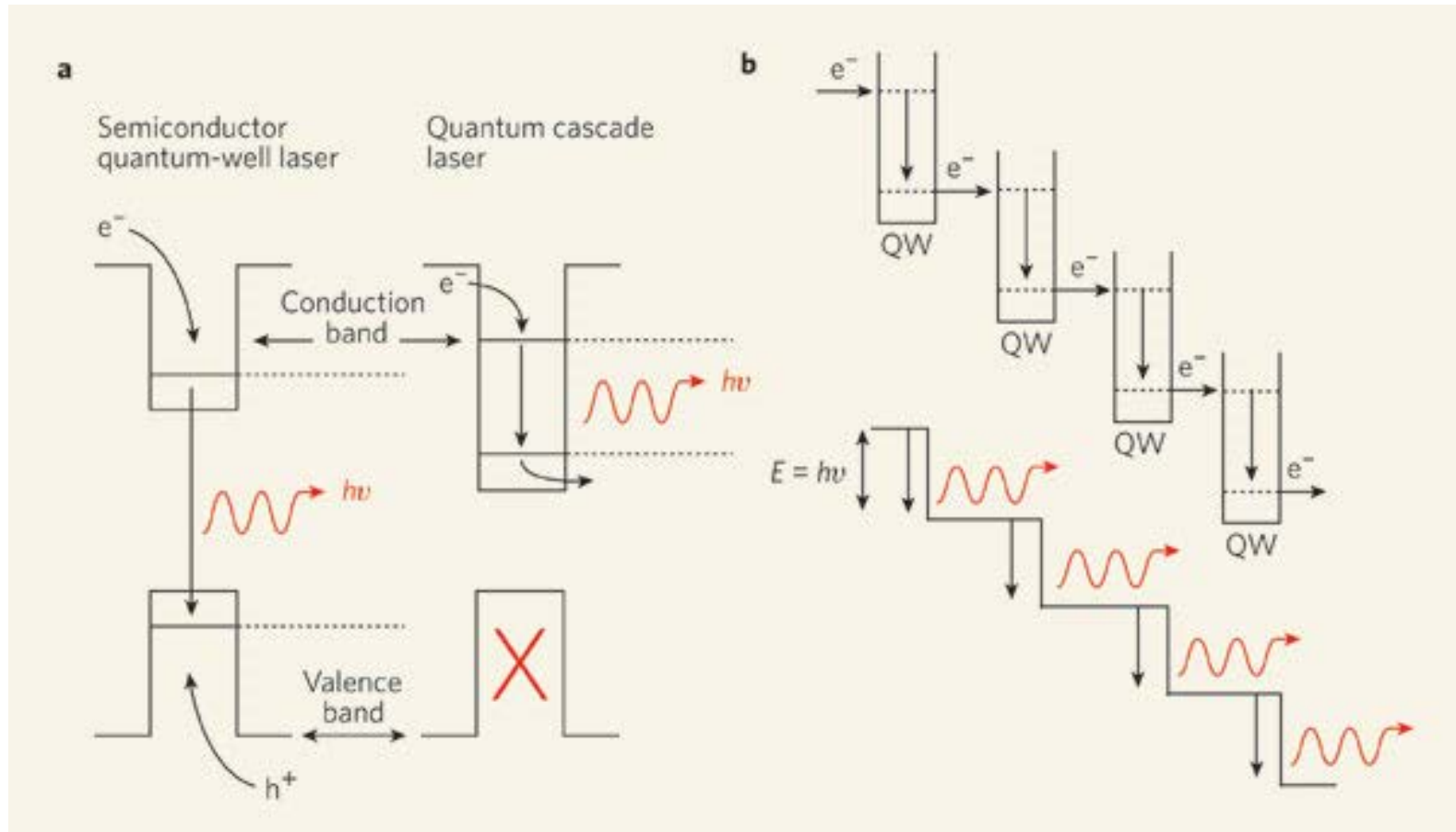
- Ιδεατό ημιαγωγίμο κβαντικό πηγάδι (απειρόβαθο δυναμικό περιορισμού κατά τον άξονα x).

# Μεταβάσεις σε ημιαγώγιμα κβαντικά πηγάδια



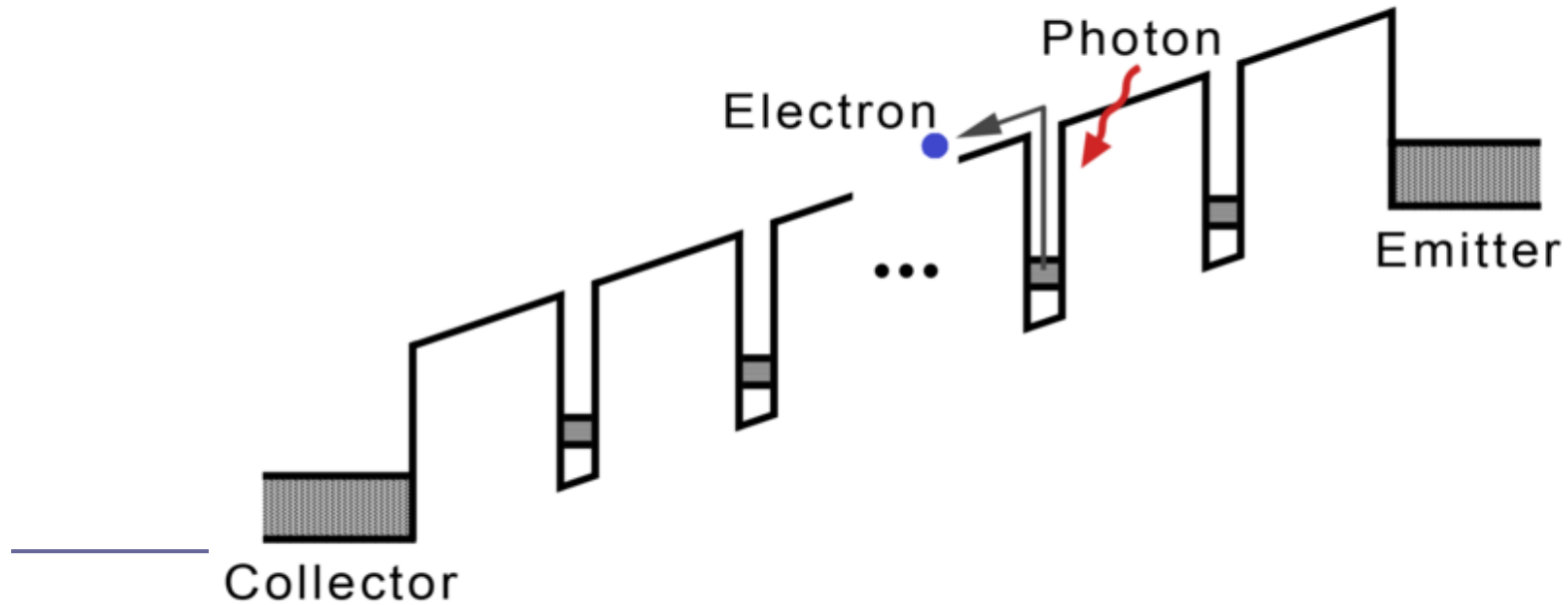
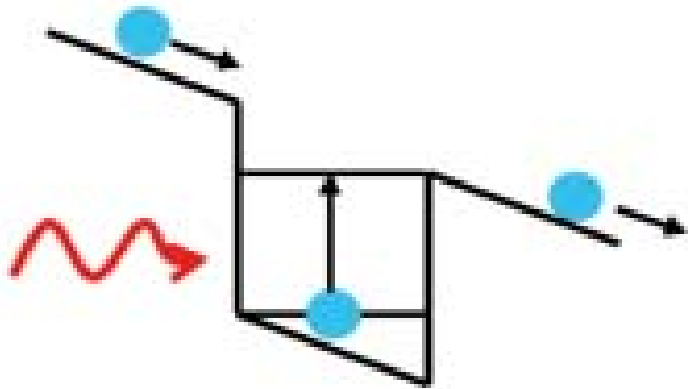
- Μεταβάσεις μπορούν να συμβούν τόσο μεταξύ υποζωνών στη ζώνη αγωγιμότητας όσο και μεταξύ ζώνης σθένους και ζώνης αγωγιμότητας.

# Laser από ημιαγώγιμα κβαντικά πηγάδια



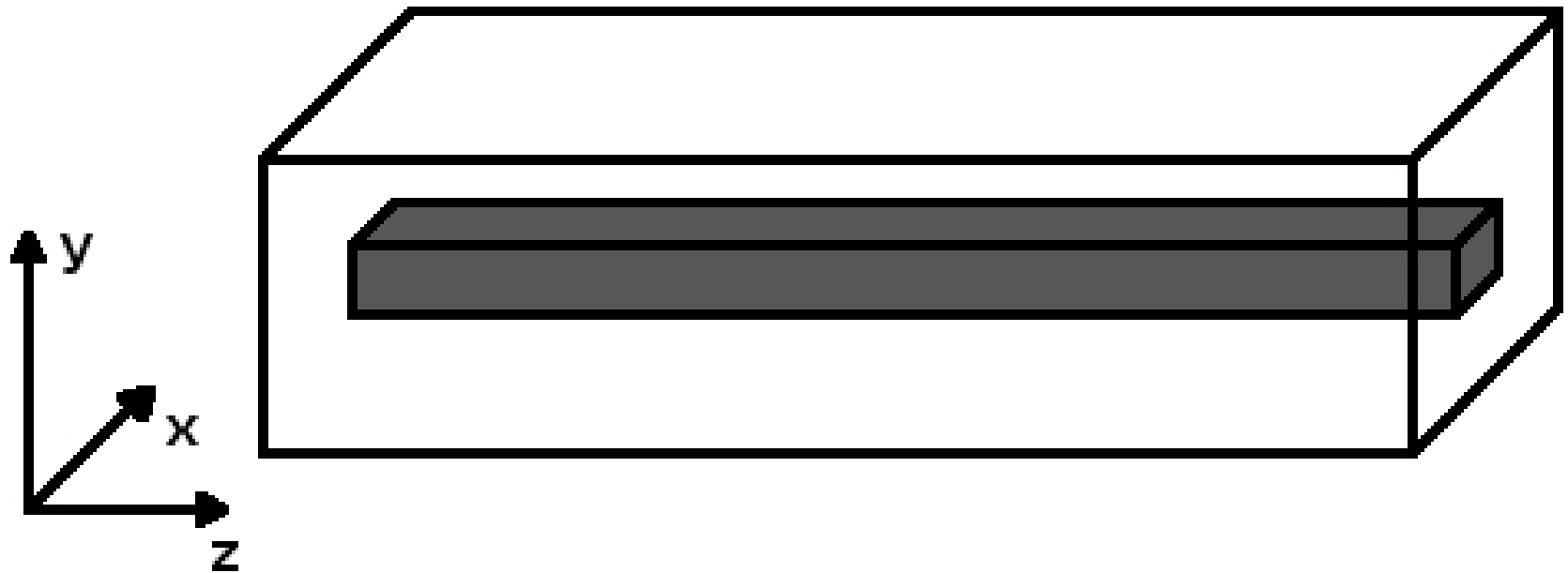


# Φωτο-ανιχνευτές στο υπέρυθρο από ημιαγώγιμα κβαντικά πηγάδια

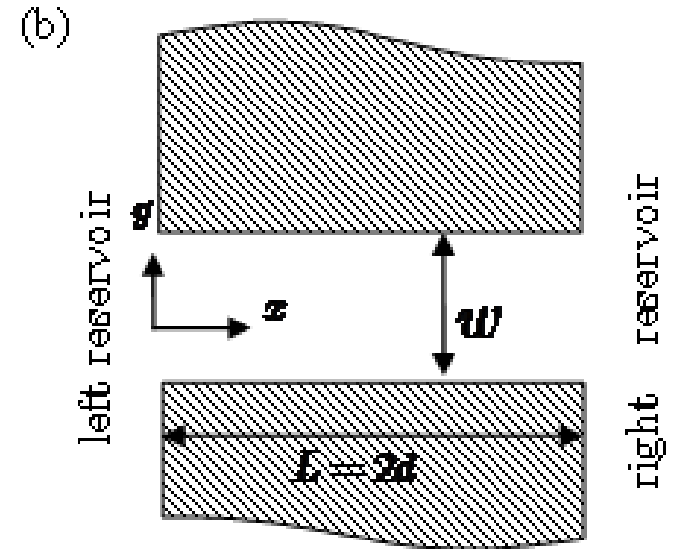
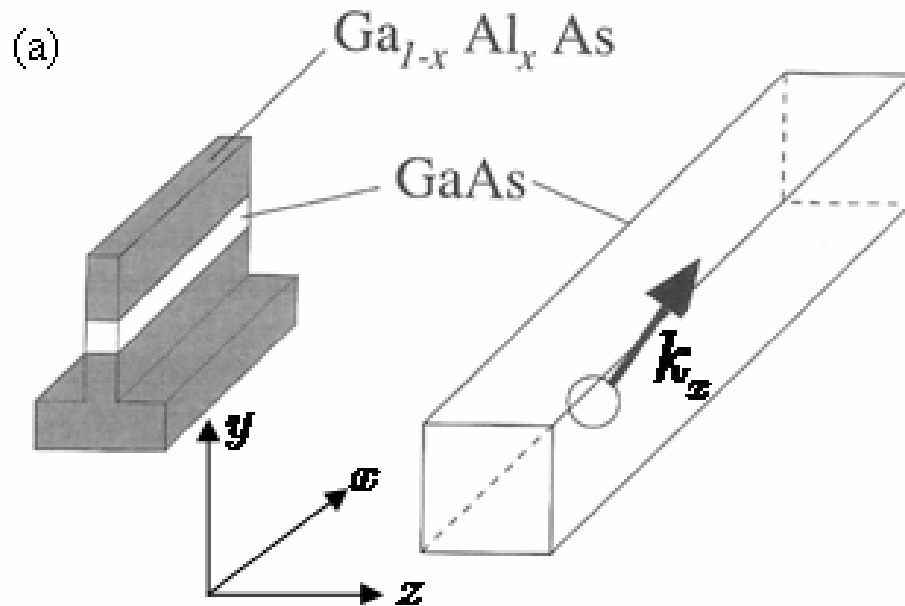


# Ημιαγώγιμο κβαντικό νήμα

## Quantum Wire



# Ημιαγώγιμο κβαντικό νήμα



- Κβαντικός περιορισμός σε δύο διαστάσεις.
- Μη-περιορισμένα ηλεκτρόνια σε μία διάσταση.

## Ημιαγωγίμο κβαντικό νήμα

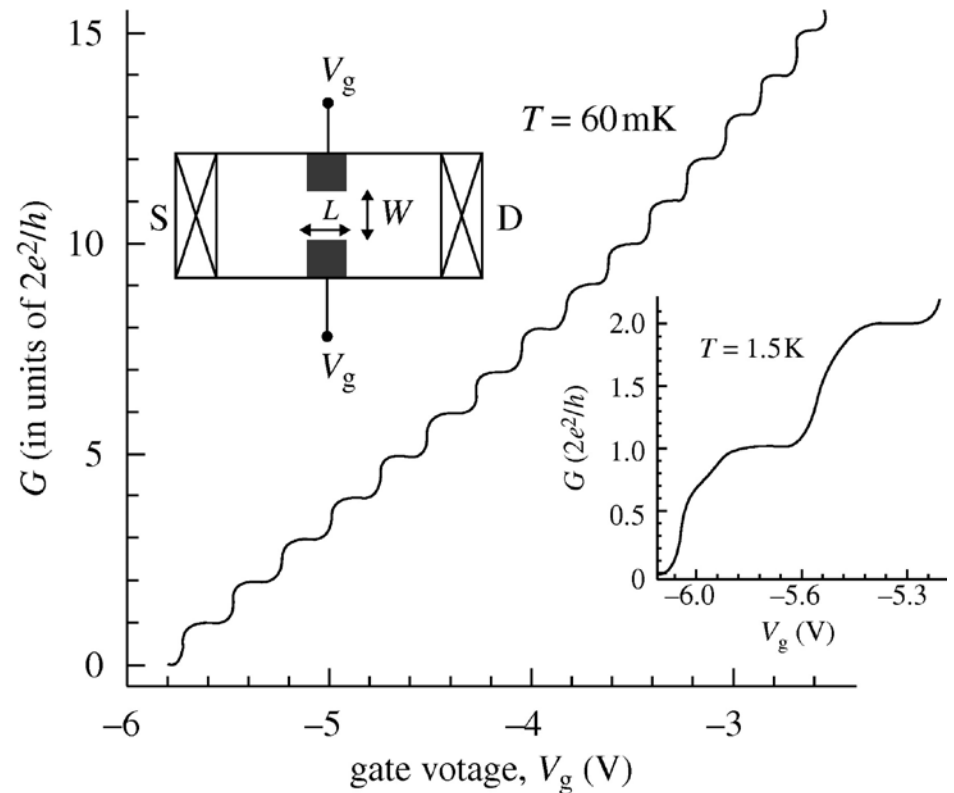
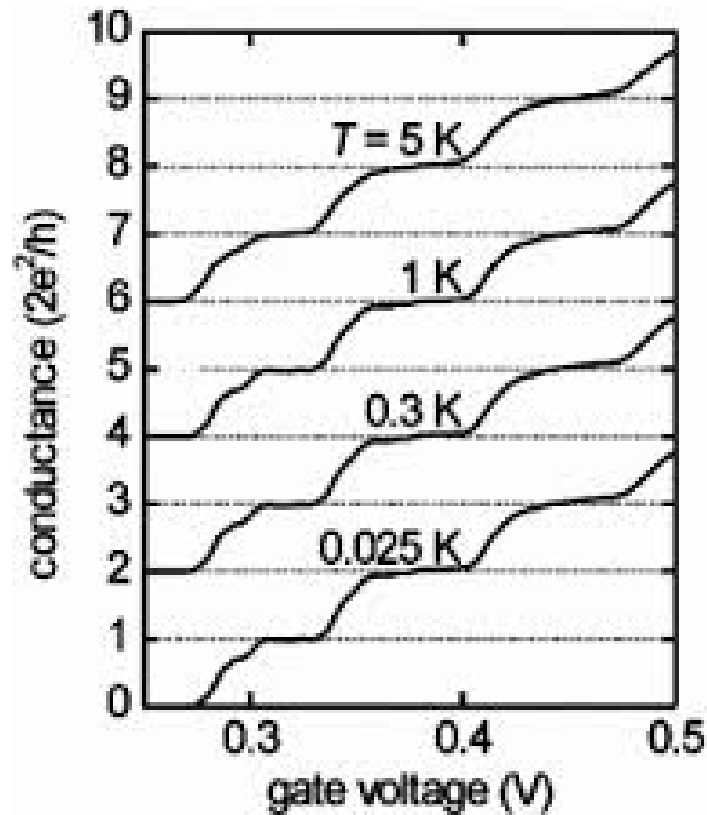
$$\psi_{n_x n_y}(x, y, z) = \sqrt{\frac{4}{L_x L_y}} \sin\left(\frac{\pi n_x x}{L_x}\right) \sin\left(\frac{\pi n_y y}{L_y}\right) e^{ik_z z},$$

$$E_{n_x n_y}(k_z) = \frac{\hbar^2}{2m^*} \left( \frac{\pi^2 n_x^2}{L_x^2} + \frac{\pi^2 n_y^2}{L_y^2} \right) + \frac{\hbar^2 k_z^2}{2m^*},$$

$$n_x, n_y = 1, 2, 3, \dots$$

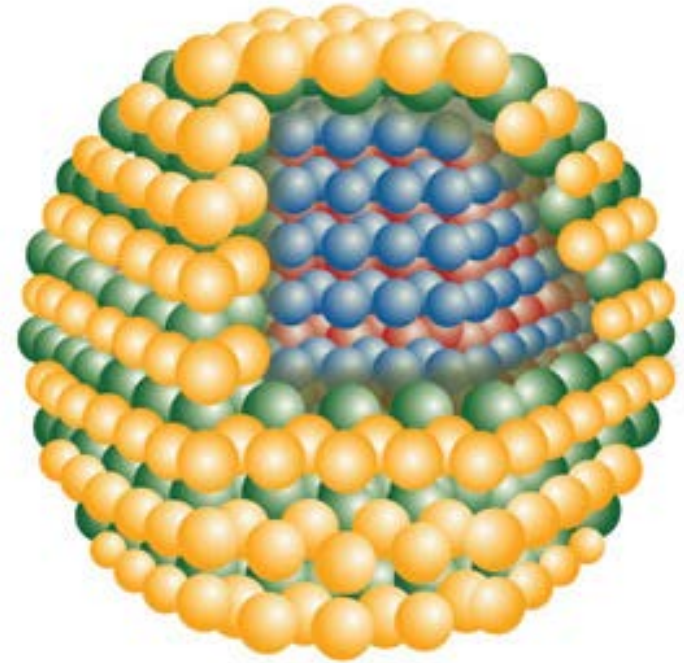
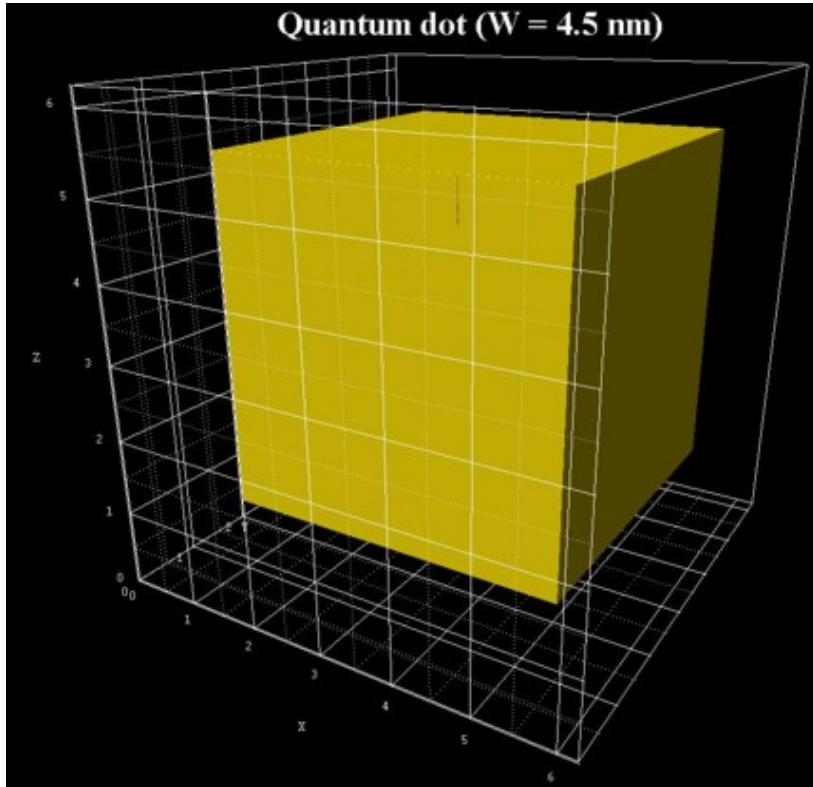
- Ιδεατό ημιαγωγίμο κβαντικό νήμα (απειρόβαθο δυναμικό περιορισμού κατά τους άξονες x και y).

# Ημιαγώγιμο κβαντικό νήμα



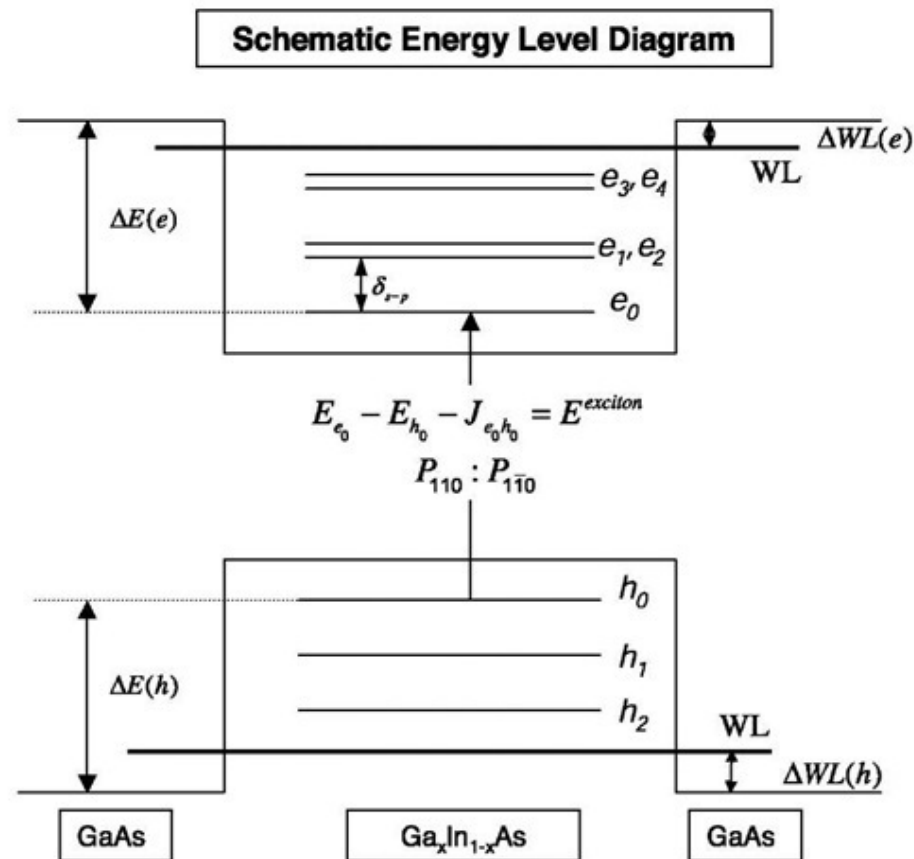
- Μπορεί να υπάρξει κβάντωση στην ηλεκτρική αγωγιμότητα.

# Ημιαγώγιμη κβαντική τελεία



- Κβαντικός περιορισμός σε τρεις διαστάσεις.
- Δεν υπάρχουν μη-περιορισμένα ηλεκτρόνια.

# Ημιαγώγιμη κβαντική τελεία



- Ο κβαντικός περιορισμός σε τρεις διαστάσεις οδηγεί (ιδανικά) σε διάκριτο ενεργειακό φάσμα.
- Ονομάζονται «τεχνητά άτομα».

## Ημιαγωγίμη κβαντική τελεία

$$E_{n_x n_y n_z} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m^* L^2} (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)$$

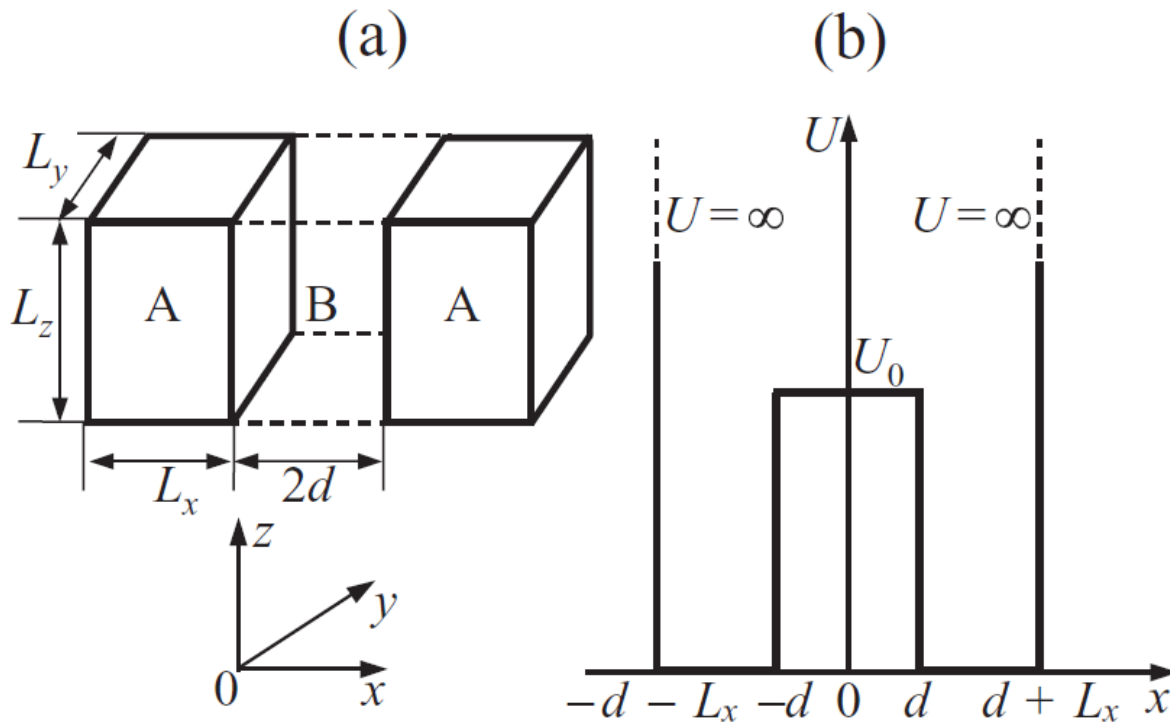
$$\psi_{n_x n_y n_z}(x, y, z) = \sqrt{\frac{8}{L^3}} \sin\left(\frac{\pi n_x x}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi n_y y}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi n_z z}{L}\right)$$

$$n_x, n_y, n_z = 1, 2, 3, \dots$$

- Ιδεατή ημιαγωγίμη κβαντική τελεία (απειρόβαθο κουτί δυναμικού – το έχουμε δει παραπάνω ήδη). Μόνο διεγέρσεις ηλεκτρονίων.

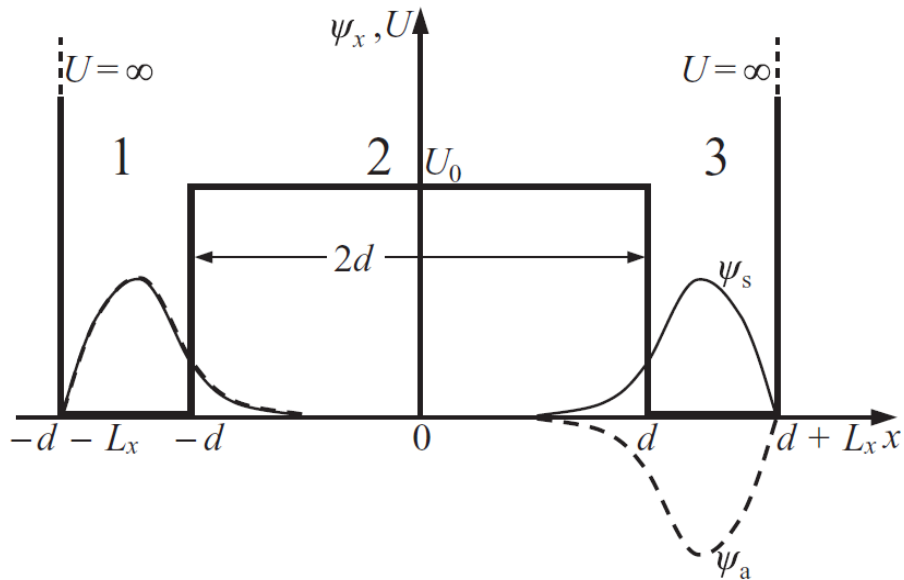


# Διπλές ημιαγώγιμες κβαντικές τελείες

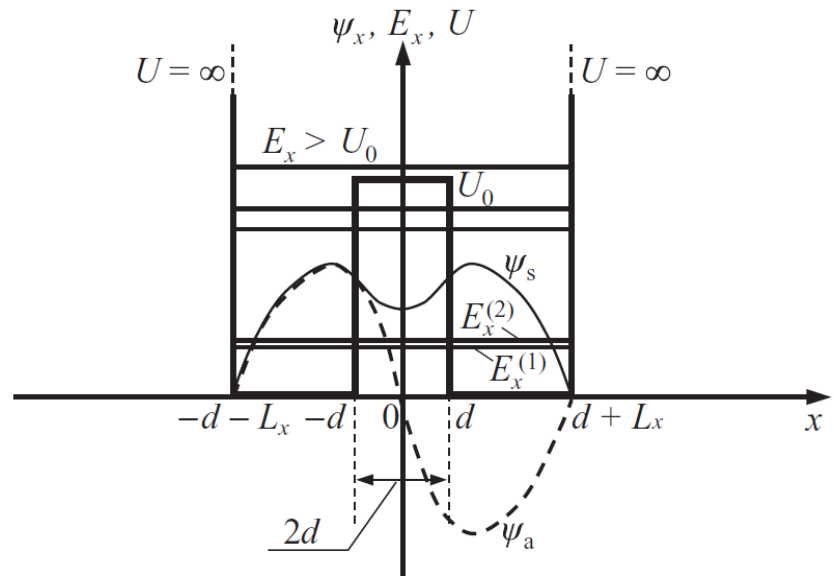


- Δύο κβαντικές τελείες που βρίσκονται κοντά και εμφανίζουν φαινόμενο σήραγγας.
- Δημιουργούν ένα τεχνητό μόριο.

# Διπλές ημιαγώγιμες κβαντικές τελείες



Οι δύο κβαντικές τελείες είναι μακριά.



Οι δύο κβαντικές τελείες είναι κοντά.

# Εξιτόνιο

Αλληλεπιδρόν ζεύγος ηλεκτρονίου και οπής σε ημιαγωγούς.

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m_e^*} \nabla_e^2 - \frac{\hbar^2}{2m_h^*} \nabla_h^2 + \frac{e^2}{\epsilon |\mathbf{r}_e - \mathbf{r}_h|}.$$

Ακτίνα Bohr  
εξιτονίου

$$a_B^* = 4\pi\epsilon_0 \frac{\epsilon \hbar^2}{\mu_{eh} e^2} = \epsilon \frac{\mu_H}{\mu_{eh}} \times 0.053 \text{ nm} \approx \epsilon \frac{m_0}{\mu_{eh}} \times 0.053 \text{ nm}$$

$$\mu_H^{-1} = m_0^{-1} + m_{\text{proton}}^{-1} \approx m_0^{-1}$$

$$\mu_{eh}^{-1} = m_e^{*-1} + m_h^{*-1}.$$

$$m_0 \ll m_{\text{proton}}$$

# ΕΞΙΤΟΝΙΟ

## Σταθερά Rydberg εξιτονίου

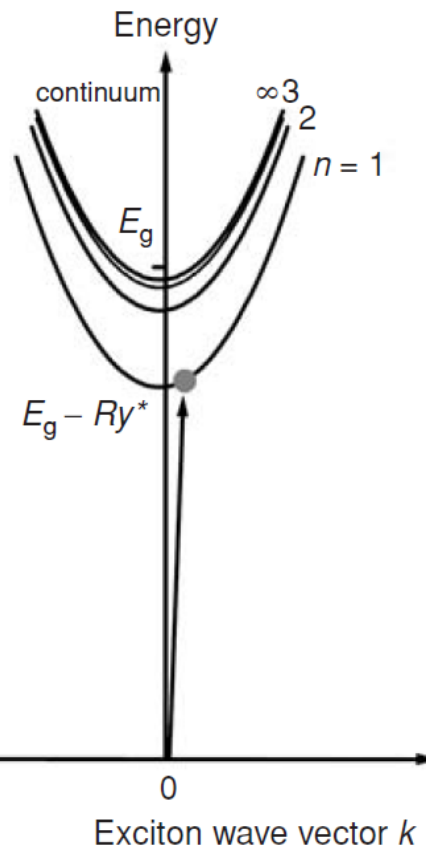
$$Ry^* = \frac{e^2}{2\epsilon a_B^*} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mu_{eh} e^4}{2\epsilon^2 \hbar^2} = \frac{\mu_{eh}}{\mu_H} \frac{1}{\epsilon^2} \times 13.60 \text{ eV} \approx \frac{\mu_{eh}}{m_0} \frac{1}{\epsilon^2} \times 13.60 \text{ eV}.$$

**Table 4.2.** Electron, hole and exciton parameters [17]

	Exciton Rydberg $Ry^*$ (meV)	Electron effective mass $m_e/m_0$	Hole effective mass $m_h/m_0$	Exciton Bohr radius $a_B^*$ (nm)
Ge	4.1	$\perp 0.19$ $\parallel 0.92$	0.54 (hh) 0.15 (lh)	24.3
Si	15	$\perp 0.081$ $\parallel 1.6$	0.3 (hh) 0.043 (lh)	4.3
GaAs	4.6	0.066	0.47 (hh) 0.07 (lh)	12.5
CdTe	10	0.1	0.4	7.5
CdSe	16	0.13	$\perp 0.45$ $\parallel 1.1$	4.9
CdS	29	0.14	$\perp 0.7$ $\parallel 2.5$	2.8
ZnSe	19	0.15	0.8 (hh) 0.145 (lh)	3.8

## Ενέργεια εξιτονίου

$$E_n(\mathbf{K}) = E_g - \frac{Ry^*}{n^2} + \frac{\hbar^2 \mathbf{K}^2}{2M}, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$



$$M = m_e^* + m_h^*.$$

## Εξιτόνιο σε Κβαντική Τελεία

Δυναμικό περιορισμού: σφαιρικό απειρόβαθο με ακτίνα  $a$ .

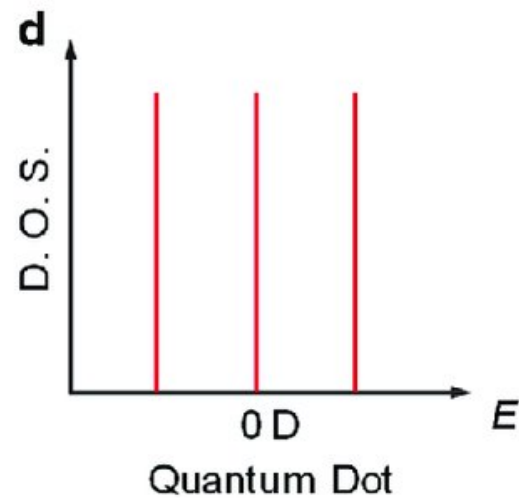
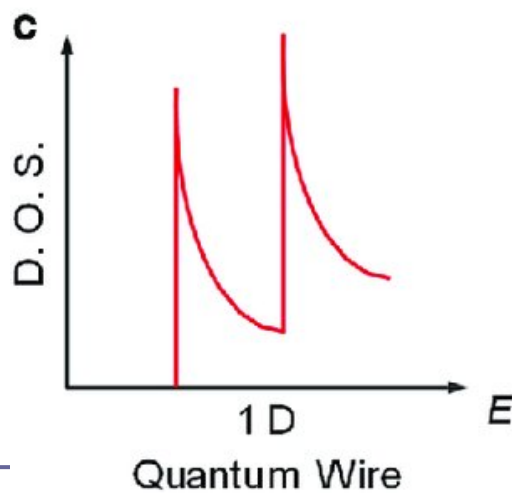
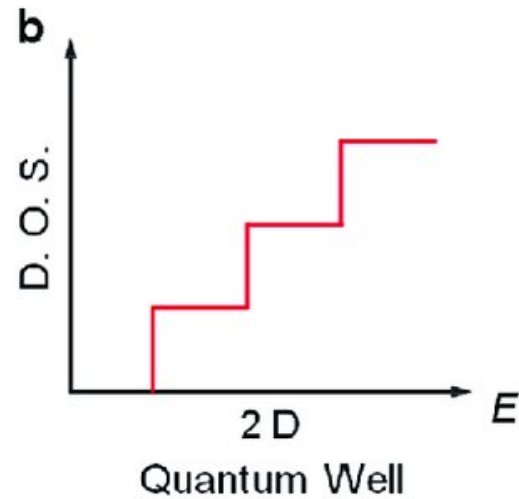
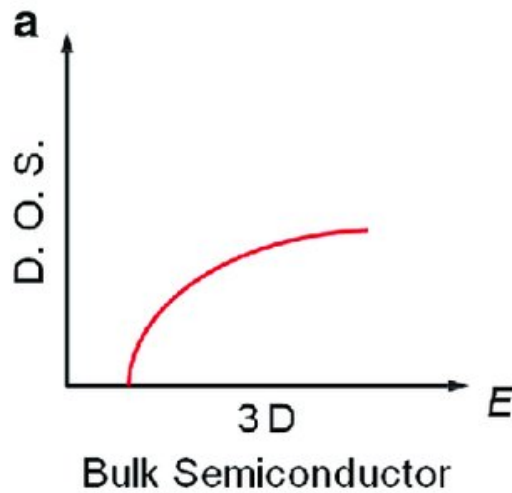
Περιοχή ασθενούς περιορισμού: Η ακτίνα  $a$  είναι αρκετά μεγαλύτερη από την ακτίνα Bohr του εξιτονίου.

$$E_{nml} = E_g - \frac{Ry^*}{n^2} + \frac{\hbar^2 \chi_{ml}^2}{2Ma^2}, \quad n, m, l = 1, 2, 3, \dots$$

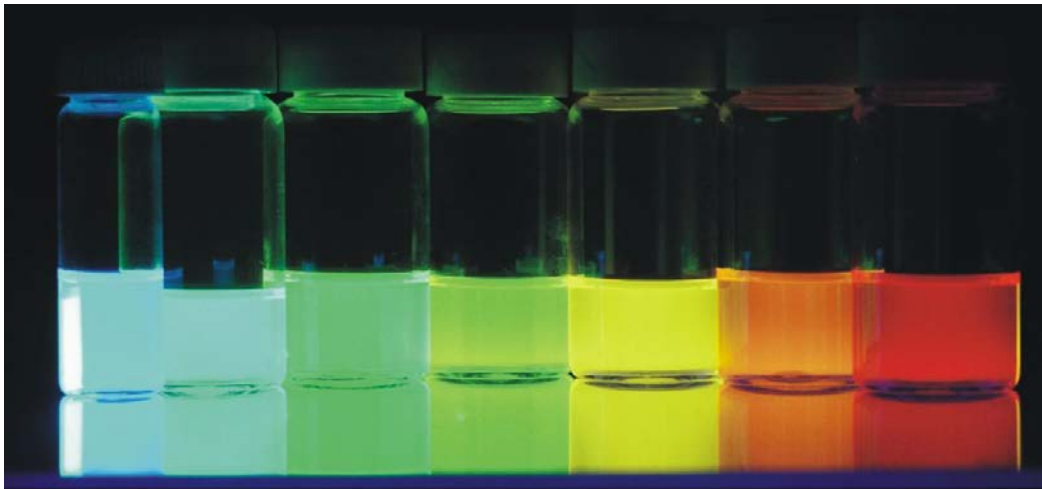
Περιοχή ισχυρού περιορισμού: Η ακτίνα  $a$  είναι αρκετά μικρότερη από την ακτίνα Bohr του εξιτονίου.

$$E_{nl} = E_g + \frac{\hbar^2}{2\mu a^2} \chi_{nl}^2.$$

# Πυκνότητα καταστάσεων ημιαγωγικών νανοδομών

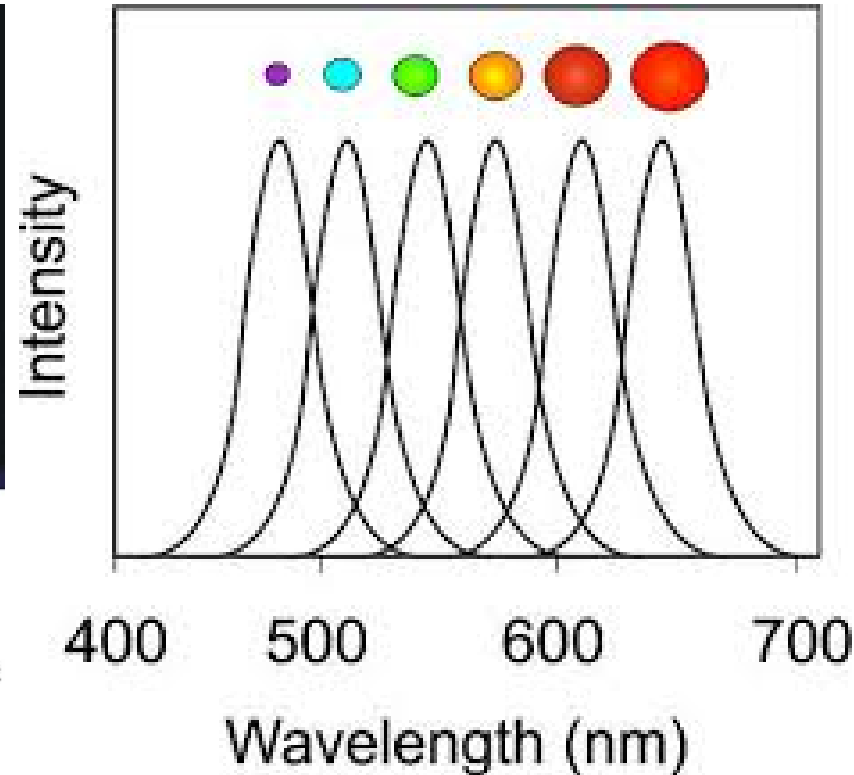


# Οπτική απόκριση ημιαγωγικών κβαντικών τελειών



2.3  5.5  
Size (nanometers)

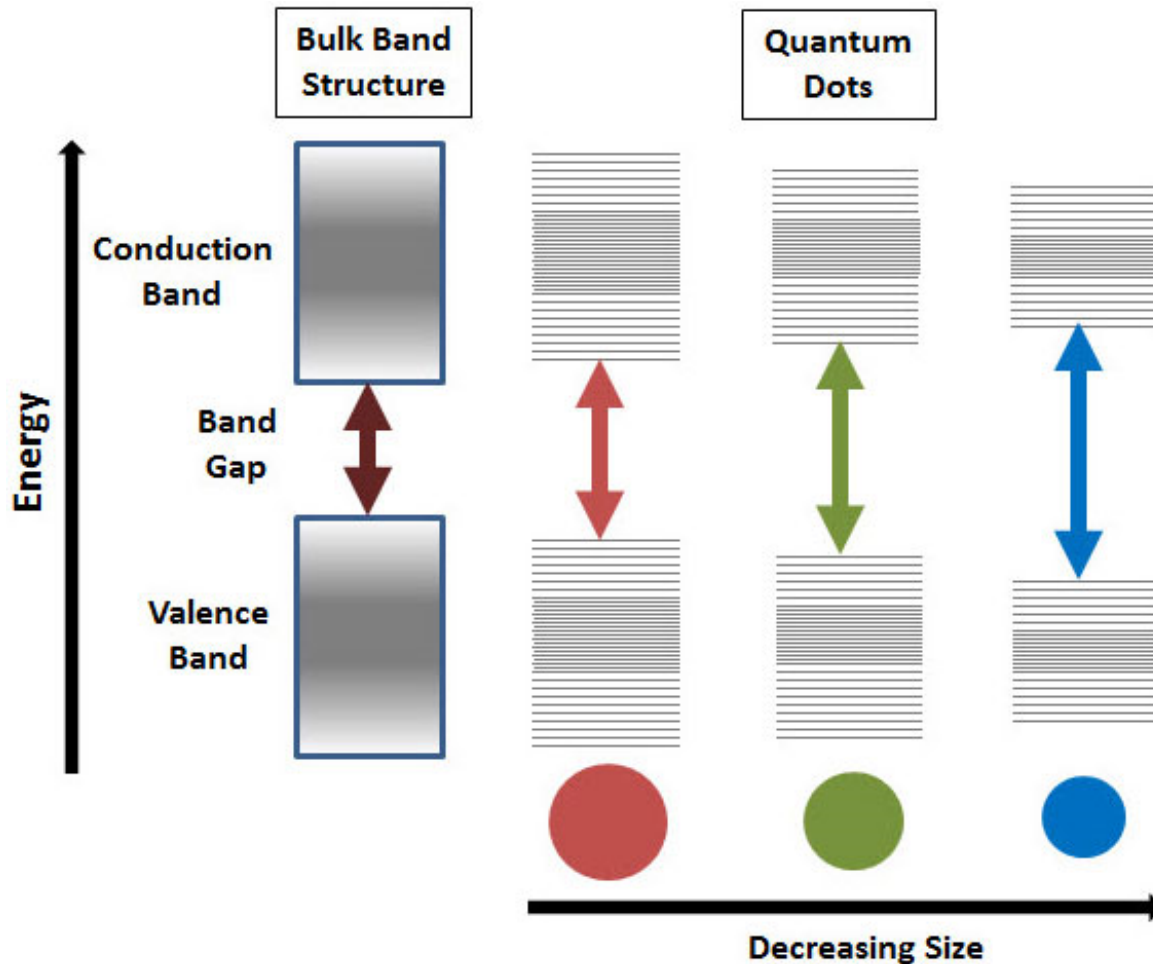
© Copyright 2004, Benoit Dubertret



- Η αύξηση του μεγέθους μίας ημιαγωγικής κβαντικής τελείας δίνει εκπομπή ή απορρόφηση σε μεγαλύτερα μήκη κύματος (μικρότερες ενέργειες).



# Οπτική απόκριση ημιαγωγικών κβαντικών τελειών

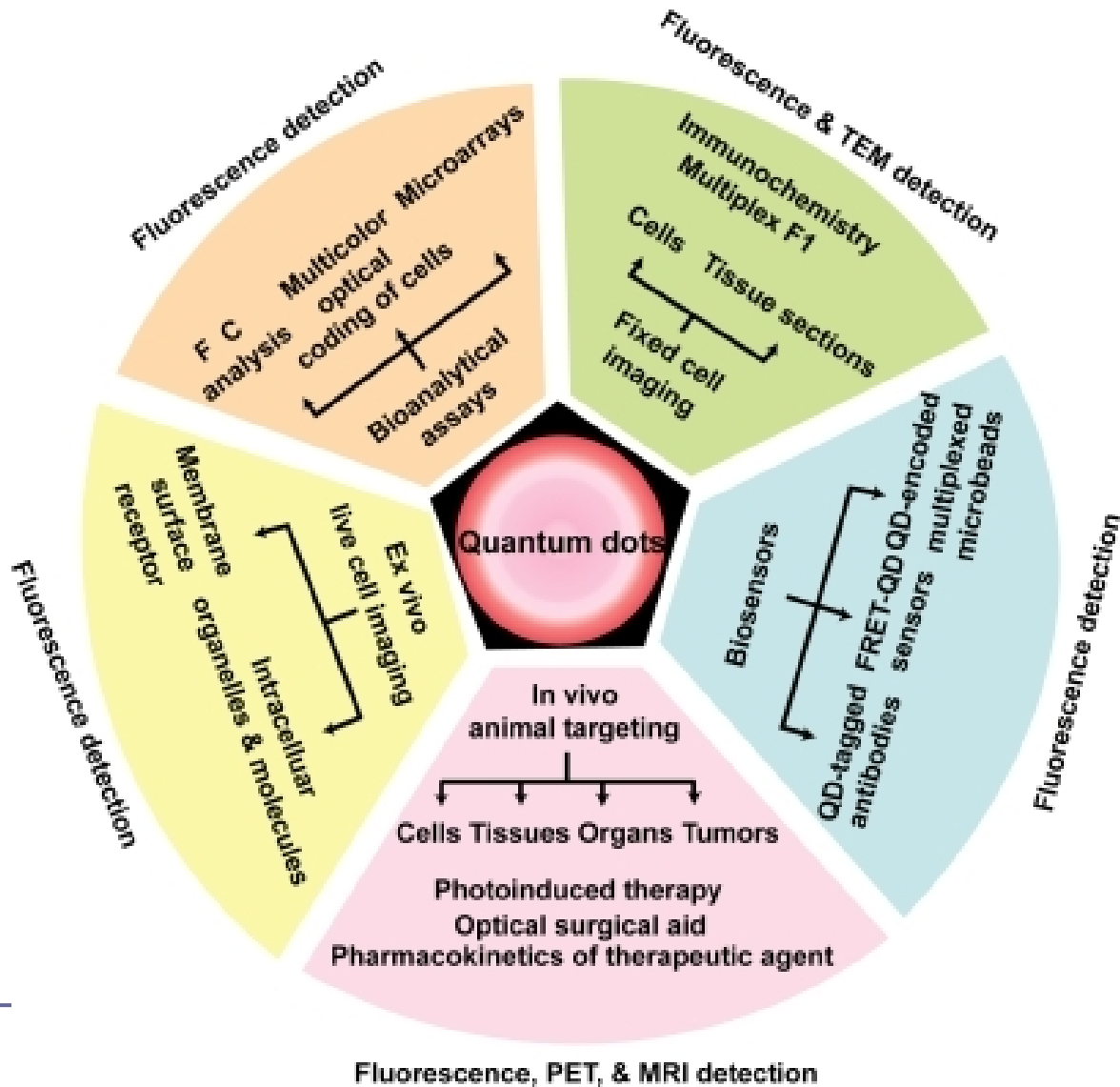


- Αυτό συμβαίνει λόγω αλλαγής των ενεργειακών καταστάσεων με το μέγεθος της κβαντικής τελείας

## Εφαρμογές ημιαγώγιμων κβαντικών τελειών

- Οπτοηλεκτρονική: laser κβαντικών τελειών, αισθητήρες, εξαιρετικά γρήγοροι διακόπτες, φωτοδιακόπτες, LEDs, κλπ
  - Κβαντικοί υπολογιστές: υλοποίηση, πεπλεγμένα φωτόνια
  - Ηλεκτρονική: single-electron transistor
  - **Κρυπτογραφία: single-photon emission**
  - Ενέργεια: quantum dot solar cell
  - Βιολογία - Ιατρική
  - Στρατιωτικές εφαρμογές
-

# Βιοιατρικές εφαρμογές ημιαγωγικών κβαντικών τελειών



---

## Κύρια Βιβλιογραφία

- S. O. Kasap, Principles of Electronic Materials and Devices, Fourth Edition.
- D. A. Neamen, Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles, Fourth Edition.
- B. G. Streetman and S. K. Banerjee, Solid State Electronic Devices, Seventh Edition.
- G. W. Hanson, Fundamentals of Nanoelectronics.
- R.J. Martin-Palma and Jose M. Martinez-Duart, Nanotechnology for Microelectronics and Photonics, Second Edition.
- V. V. Mitin, V. A. Kochelap, M. A. Stroscio, Introduction to Nanoelectronics: Science, Nanotechnology, Engineering, and Applications
- E. F. Schubert, Physical Foundations of Solid-State Devices, available for free online at [http://www.nadirpoint.de/Physik\\_Lit\\_PDF/65.pdf](http://www.nadirpoint.de/Physik_Lit_PDF/65.pdf)
- See also <https://nanohub.org/> for modeling and simulation material and material from several lectures and courses