

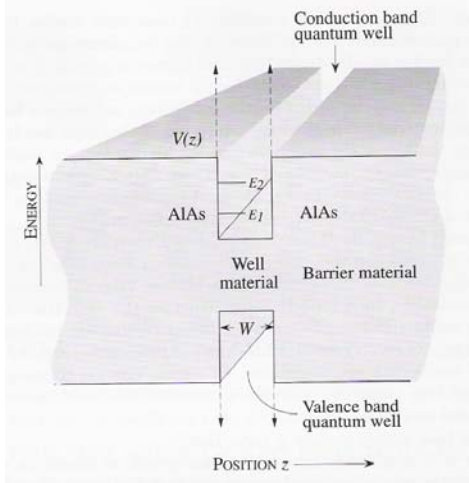
Αλλαγή της δομής των ταινιών λόγω κραματοποίησης

Παράμετροι που τροποποιούν την δομή των ταινιών

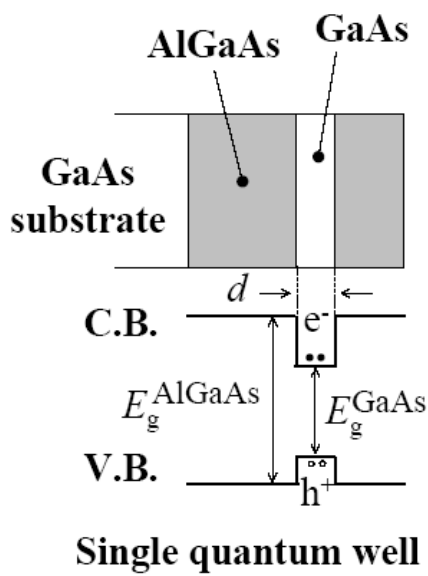
- Σχηματισμός κράματος 2 ή περισσότερων ημιαγωγών
- Ανάπτυξη ετεροδομών ή υπερδομών \Rightarrow κβαντικός περιορισμός (quantum confinement)
- Επιταξιακή ανάπτυξη υπό συνθήκες strained epitaxy.

Κβαντικό πηγάδι σχηματίζεται όταν ανάμεσα σε 2 υμένια υλικού ευρέως χάσματος, παρεμβάλλεται υλικό μικρότερου χάσματος π.χ. GaAs/AlAs/GaAs.

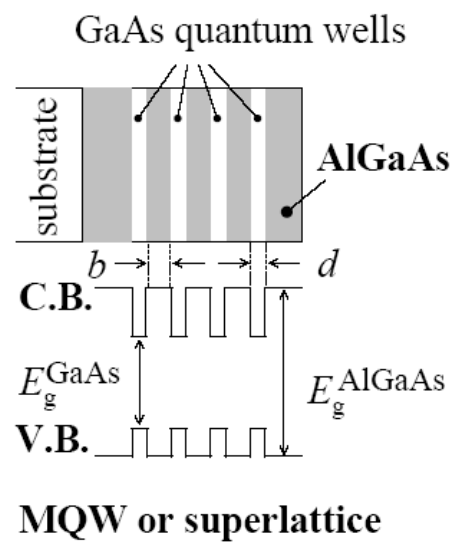
Το κβαντικό πηγάδι σχηματίζεται τόσο στην ταινία αγωγιμότητας όσο και στην ταινία σθένους \Rightarrow τα ηλεκτρόνια και οι οπές δεν κινούνται ελεύθερα στον κρύσταλλο αλλά παραμένουν «εντοπισμένα» (confined). Η κίνηση \parallel επίπεδο ανάπτυξης είναι απαγορευμένη ενώ η μόνη επιτρεπτή κίνηση είναι στο επίπεδο \perp διεύθυνση ανάπτυξης.



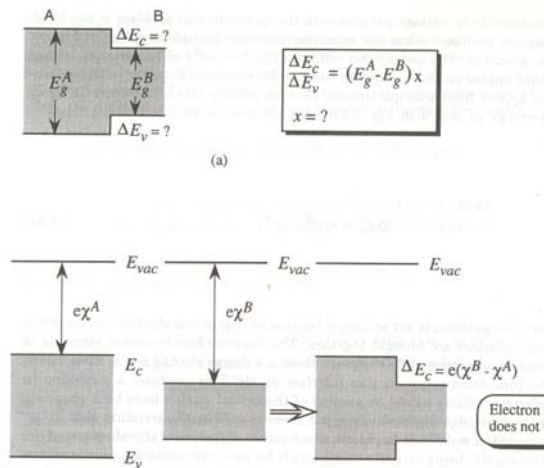
Σχηματικό διάγραμμα κβαντικού πηγαδιού για e και h σε ετεροδομή AlAs/GaAs/AlAs.



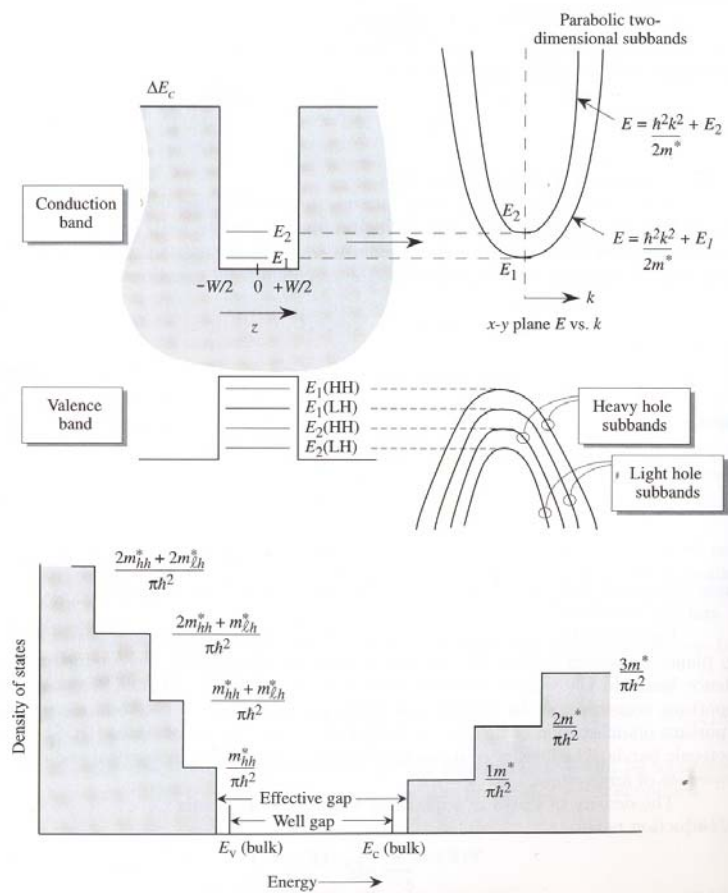
crystal growth direction
→ z



Τι συμβαίνει στο χάσμα?? Πόση είναι η ασυνέχεια στα ακρότατα των ταινιών (band edge discontinuity)?



Επειδή εκατέρωθεν της διεπιφάνειας υπάρχουν ανόμοιοι δεσμοί
 \Rightarrow μεταφορά φορτίου και σχηματισμός διπόλων \Rightarrow απόκλιση
 από το μοντέλο της διαφοράς της ηλεκτρονικής συγγένειας που
 προβλέπει ότι η $\Delta E_c = e(\chi_A - \chi_B)$. Όμως κανόνας αυτός δεν ισχύει
 π.χ: στο σύστημα GaAs/AlAs $\Delta E_c = 60-65\%$ (ΔE_g)



Σχηματικό διάγραμμα κβαντικού πηγαδιού για ηλεκτρόνια & οπές και των επι μέρους ταινιών (subband levels). Στο επίπεδο xy οι ταινίες είναι παραβολικές.

Για το κβαντικό πηγάδι του σχήματος, η Schrödinger για την ισότροπη ταινία αγωγιμότητας (TA) γράφεται:

$$\left[-\frac{\hbar^2 \nabla^2}{2m^*} + V(z) \right] \psi = E \psi$$

Όπου m^* η ενεργός μάζα του e. Η σχέση ισχύει για υλικά ευθέως χάσματος όπου η m^* είναι ισότροπη.

Το ϵ είναι περιορισμένο κατά την διεύθυνση $z \Rightarrow$ η Schrödinger διαχωρίζεται ως εξής:

$$\bar{\Psi} = \psi_x \psi_y \psi_z$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2 \Psi_x}{\partial x^2} = E_x \psi_x$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2 \Psi_y}{\partial y^2} = E_y \psi_y \text{ και}$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \frac{\partial^2 \Psi_z}{\partial z^2} + V(z) \psi_z = E_z \psi_z$$

Και οι αντίστοιχες λύσεις είναι

Στο επίπεδο x,y		Κατά τον άξονα z
$\psi_x = \frac{1}{\sqrt{L_x}} e^{ik_x x}$	$\psi_y = \frac{1}{\sqrt{L_y}} e^{ik_y y}$	$\psi_z = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{W}} \cos \frac{n\pi z}{W}$, n περιττό
		$\psi_z = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{W}} \sin \frac{n\pi z}{W}$, n άρτιο
$E_x = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*}$	$E_y = \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m^*}$	$E_z = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* W^2}$

Η συνολική ενέργεια του ηλεκτρονίου, όπως αυτή μετράται από τον πυθμένα της ΓΑ για το υλικό όγκου είναι:

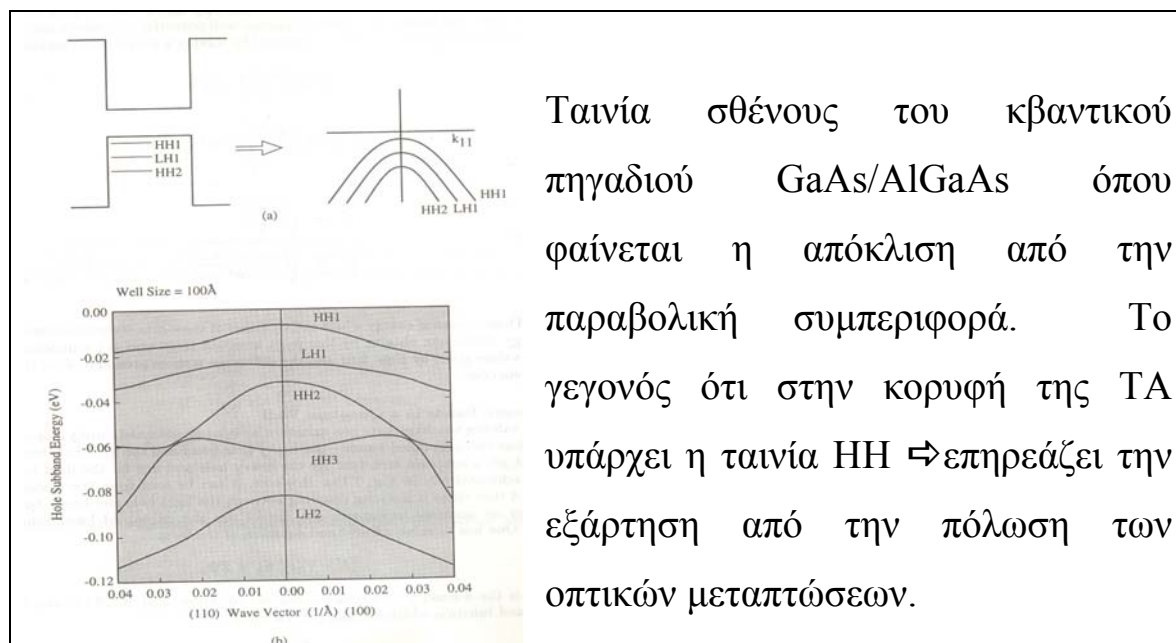
$$E(n, k_x, k_y) = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m^* W^2} + \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m^*} + \frac{\hbar^2 k_y^2}{2m^*}$$

⇒ δημιουργούνται υπο-ταινίες στις οποίες το e συμπεριφέρεται σαν σε χώρο 2-διαστάσεων.

⇒ η πυκνότητα καταστάσεων έχει την χαρακτηριστική βηματική μορφή.

Επίδραση του κβαντικού περιορισμού στην ταινία σθένους.

Θεωρούμε ότι υπάρχουν 2 παραβολικές ταινίες, των ελαφρών και βαρέων οπών μεταξύ των οποίων υπάρχει ισχυρή σύζευξη ⇒ η δομή της ταινίας σθένους αποκλίνει από την παραβολική συμπεριφορά και η μάζα των οπών στο επίπεδο εξαρτάται από τη διάσταση του πηγαδιού.



Επίδραση του strain

Strain εισάγεται στα επιταξιακά υμένια όταν η ανάπτυξη γίνεται επάνω σε υπόστρωμα με διαφορετική πλεγματική σταθερά. Αν το πάχος του υμενίου είναι μικρότερο από το κρίσιμο πάχος, τότε το strain είναι ομοιόμορφο και δεν δημιουργούνται εξαρμώσεις.

Το ομοιόμορφο strain \Leftrightarrow

- η πλεγματική σταθερά στη διεπιφάνεια προσαρμόζεται έτσι ώστε να γίνει ίση προς αυτή του υποστρώματος.
- η πλεγματική σταθερά έξω από αυτό το επίπεδο προσαρμόζεται σε μία νέα τιμή σύμφωνα με τον νόμο του Poisson.

Παράδειγμα

Αν ε είναι το strain ανάμεσα σε επιταξιακό υμένιο Α με πλεγματική σταθερά a_A και υπόστρωμα με πλεγματική σταθερά a_s και η ανάπτυξη γίνεται κατά την (001) ο τανυστής του strain είναι

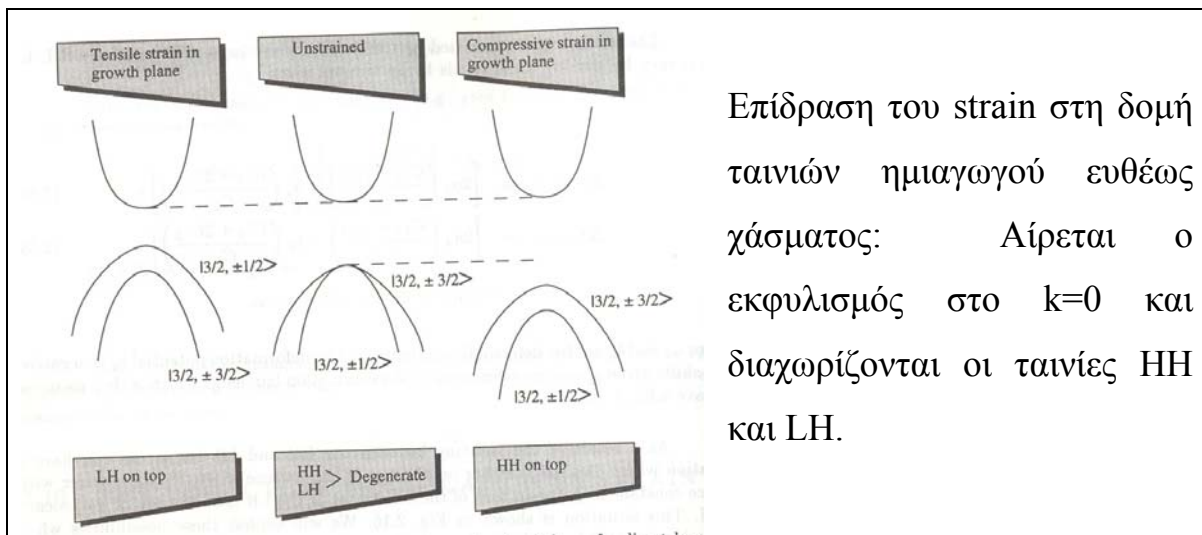
$$\varepsilon = \frac{a_s - a_A}{a_A}$$

$$\varepsilon_{xx}=\varepsilon, \varepsilon_{yy}=\varepsilon, \varepsilon_{zz} = -\frac{2C_{12}}{C_{11}}$$

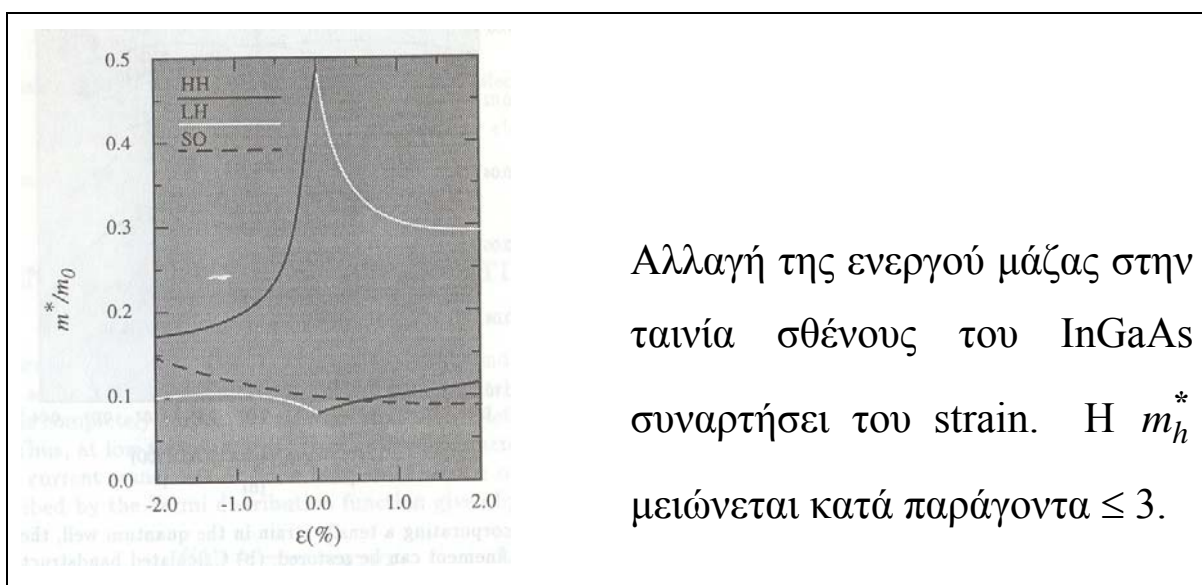
Όπου C_{11} , C_{12} είναι σταθερές του υλικού (force constants).

Σε ένα κυβικό υλικό το strain \Rightarrow αίρεται η κυβική συμμετρία \Rightarrow αίρεται ο εκφυλισμός των ταινιών HH & LH & εμφανίζεται σημαντικό splitting $\cong 100$ meV \Rightarrow

όταν η πλεγματική σταθερά του υποστρώματος $<$ αυτής του επιταξιακού υμενίου η ταινία HH σχηματίζει την κορυφή της σθένους \Rightarrow επηρεάζεται η οπτοηλεκτρονική συμπεριφορά (μέσω της m^* που μπαίνει στην σχέση που δίνει την πυκνότητα καταστάσεων) \Rightarrow παρατηρείται δραματική μείωση της ενεργού μάζας..

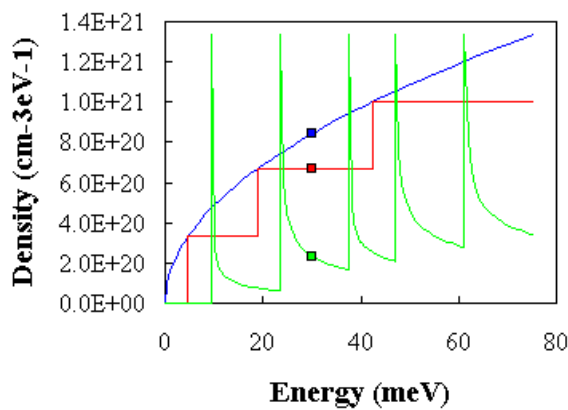


Επίδραση του strain στη δομή ταινιών ημιαγωγού ευθέως χάσματος: Αίρεται ο εκφυλισμός στο $k=0$ και διαχωρίζονται οι ταινίες HH και LH.

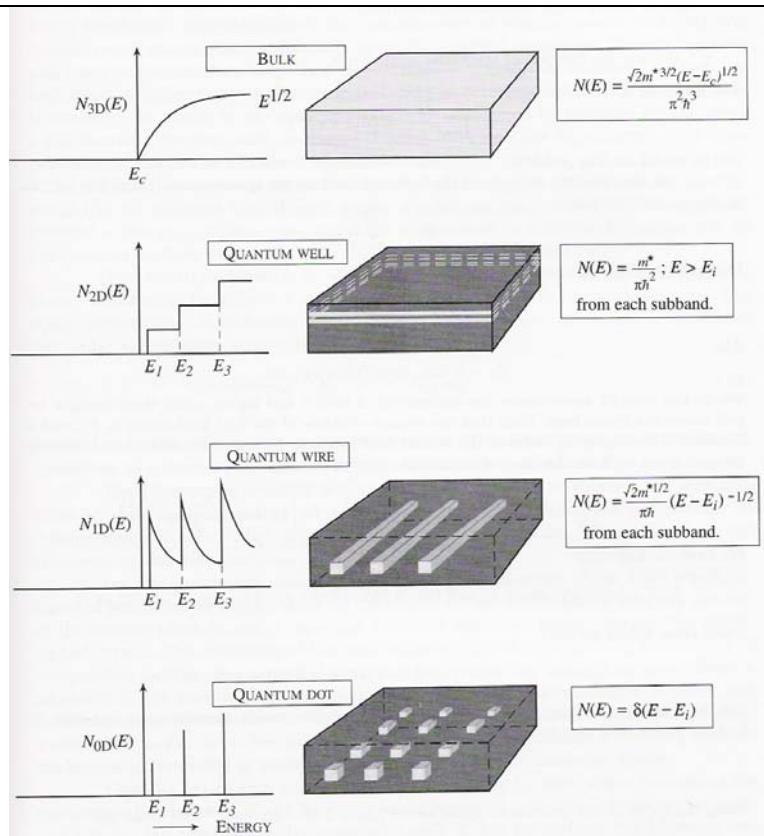


Αλλαγή της ενεργού μάζας στην ταινία σθένους του InGaAs συναρτήσσει του strain. Η m_h^* μειώνεται κατά παράγοντα ≤ 3 .

Μεταβολή της πυκνότητας καταστάσεων συναρτήσει των διαστάσεων (dimensionality)



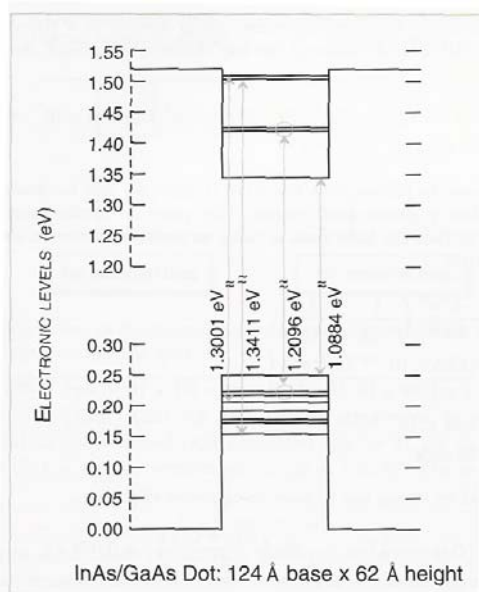
Πυκνότητα καταστάσεων ημιαγωγού στη 1 διάσταση (πράσινη γραμμή-κβαντικό σύρμα 10nm), 2 διαστάσεις(κόκκινη γραμμή-κβαντικό πηγάδι εύρους 10nm) και 3 διαστάσεις (μπλέ γραμμή). $m^*/m_0 = 0.8$.



Επίδραση του strain στο χάσμα κβαντικών τελειών (quantum dots).

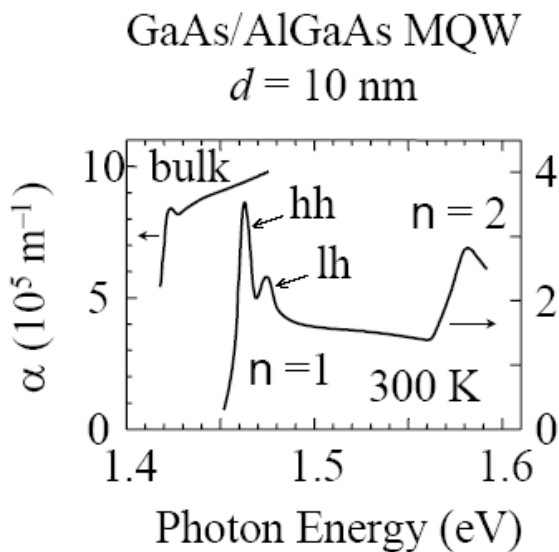
Οι κβαντικές τελείες κατασκευάζονται δύσκολα και οι ιδιότητές τους ελέγχονται από το υψηλό strain.

Διαμόρφωση του χάσματος κβαντικής τελείας InAs σε μήτρα GaAs.

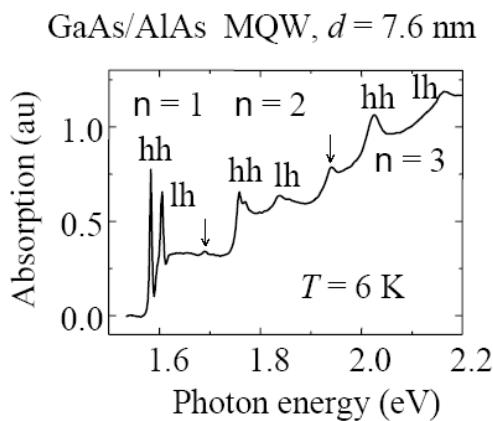


Αν και το χάσμα του InN είναι 0,35eV το E_g της κβαντικής τελείας είναι $\cong 1,1$ ev. Η διαφορά οφείλεται στο μεγάλο συμπιεστικό strain που ασκείται στην κβαντική τελεία.

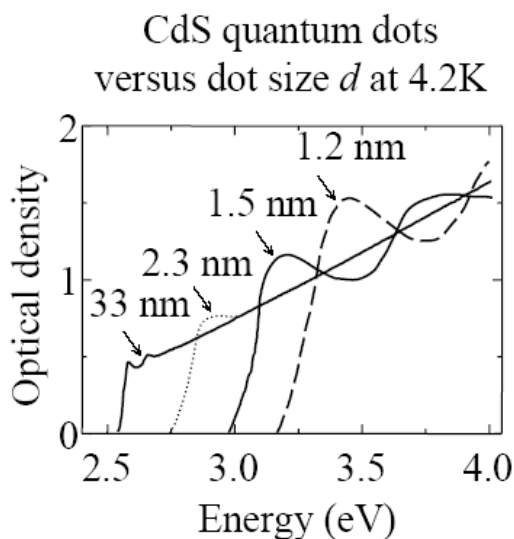
Επίδραση του περιορισμού των διαστάσεων στην απορρόφηση.



Απορρόφηση πολλαπλού κβαντικού πηγαδιού (MQW) GaAs/Al_{0.28}Ga_{0.72}As, στους 300K. Το MQW αποτελείται από 77 QW εύρους 10 nm. Στο σχήμα φαίνεται και η απορρόφηση bulk GaAs.



Συντελεστής απορρόφησης δομής MQW 40 περιόδων στους 6 K. η περίοδος των QW είναι 7.6 nm.



Η επίδραση του μεγέθους της κβαντικής τελείας (QD) στο φάσμα απορρόφησης στους 4.2K. Το QD διαστάσεων 33 nm έχει ιδιότητες bulk κρυστάλλου.

Modulation doping

Οι ιδιότητες μεταφοράς των ημιαγωγών επηρεάζονται αρνητικά από την σκέδαση φορέων.

⇒ Σε ημιαγωγούς με προσμείξεις ο ιονισμός των προσμείξεων δημιουργία ζευγών ελεύθερων φορέων & ιονισμένων ατόμων προσμείξεων

⇒ Τα ιονισμένα άτομα των προσμείξεων συμβάλουν στην σκέδαση.

Μπορούμε να ελέγξουμε την αγωγιμότητα ενός ημιαγωγού και ταυτόχρονα να αποφύγουμε την σκέδαση από τα ιονισμένα άτομα προσμείξεων?? **ΝΑΙ χρησιμοποιώντας modulation doping**

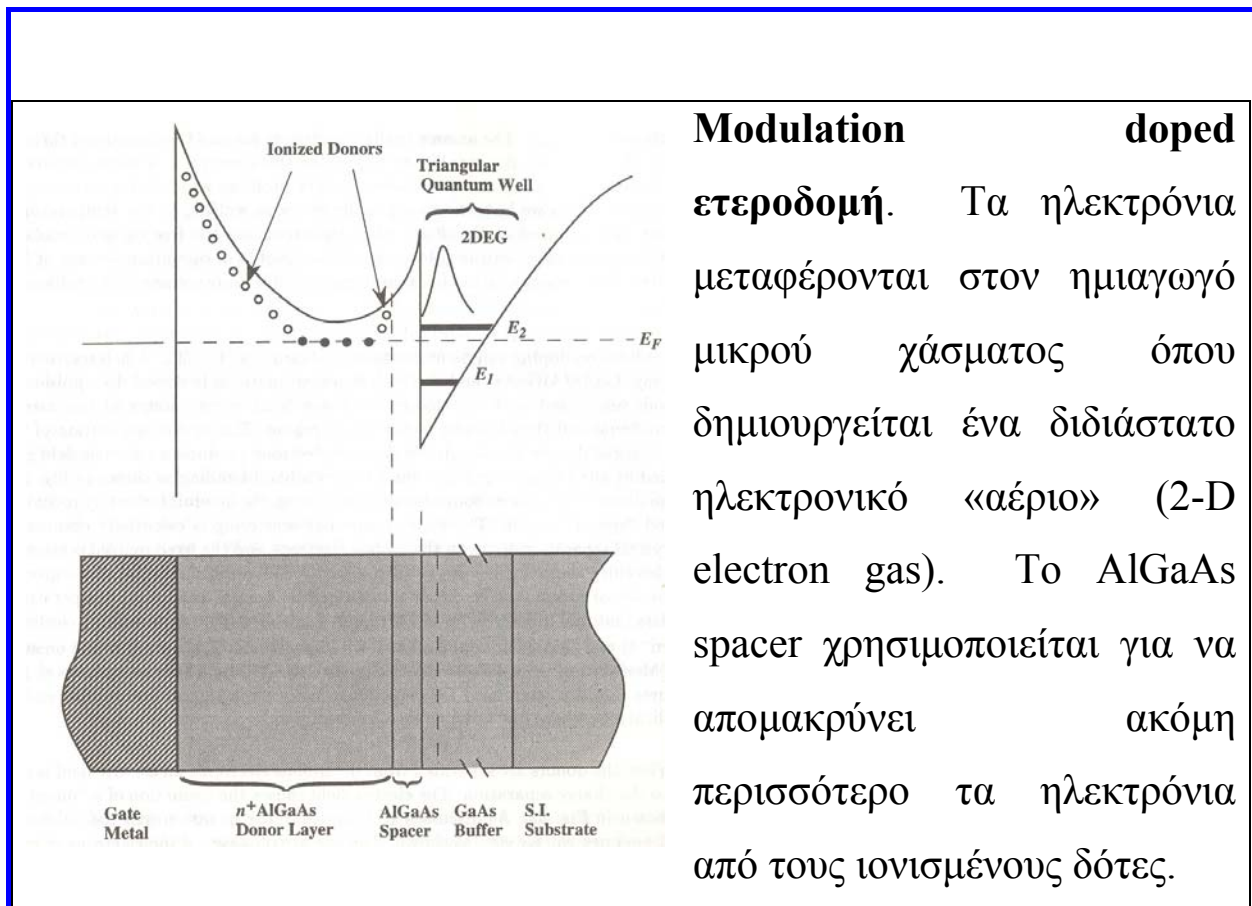
Επιτυγχάνεται με την κατασκευή ετεροεπαφών (δομές MODFET) μεταξύ υλικών ευρέως και στενού χάσματος, π.χ. GaAs/AlGaAs.

Οι προσμείξεις εισάγονται στο υλικό ευρέως χάσματος (AlGaAs) ⇒ τα e των προσμείξεων προτιμούν τις χαμηλότερες ενεργειακά καταστάσεις στο υλικό μικρού χάσματος (GaAs)

⇒ Δημιουργείται φυσικός διαχωρισμός μεταξύ των ιονισμένων προσμείξεων και των φορέων ⇒

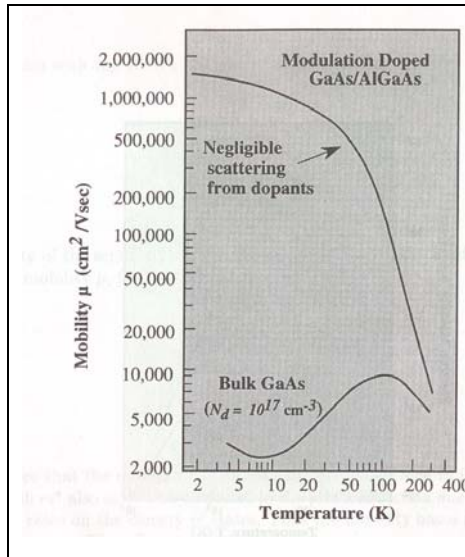
⇒ Δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο ⇒

⇒ Κάμψη των ταινιών



Η φυσική απομάκρυνση των e από τα άτομα των προσμείξεων \Rightarrow

- \Rightarrow Μειώνεται σημαντικά η σκέδαση μεταξύ φορέων & ιονισμένων προσμείξεων
- \Rightarrow αποφεύγεται το φαινόμενο του παγώματος των e στα άτομα των προσμείξεων (carrier freeze-out) σε χαμηλές θερμοκρασίες
- \Rightarrow Δομές κατάλληλες για λειτουργία σε πολύ χαμηλές T , ανίχνευση πολύ ασθενικών σημάτων, π.χ. από το διάστημα, και εφαρμογές όπου απαιτείται πολύ χαμηλός θόρυβος.



Θερμοκρασιακή εξάρτηση της ευκινησίας σε modulation doped GaAs/AlGaAs. Η σημαντική αύξηση του μ στις χαμηλές θερμοκρασίες λόγω καταστολής της σκέδασης από ιονισμένες προσμείξεις είναι προφανής.

Η δομή των ταινιών καθορίζει τις εφαρμογές των υλικών σε διατάξεις

Διατάξεις υψηλής ισχύος	✚	Υλικά μεγάλου E_g
	✚	GaN, SiC, C
Διατάξεις υψηλής συχνότητας	✚	Μικρή ενεργός μάζα
	✚	Μεγάλη απόσταση μεταξύ ταινιών (intervalley distance)
	✚	InAs, InGaAs
Εκπομπή φωτός	✚	Ευθύ χάσμα
Laser για επικοινωνίες μεγάλων αποστάσεων (1.55μm, 1.33μm)	✚	$E_g \approx 0.8eV$
	✚	InGaAsP
Οθόνες απεικόνισης	✚	$E_g = 1.6$ έως $3.6eV$
	✚	AlGaAs, InGaN
Εκπομπή σε μικρό λ για οπτικές μνήμες, εκτυπωτές	✚	Μεγάλο E_g
	✚	GaN, AlN
Νυχτερινή όραση / θερμική απεικόνιση	✚	Μικρό E_g
	✚	InSb, HgCdTe

Τα «πλεονεκτήματα» των διατάξεων ετεροδομών.

Διαμόρφωση ταινιών	Εντοπισμός φορτίου	Πεδία strain
<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Υπερδομές ⇒ Απλά & πολλαπλά κβαντικά πηγάδια 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ MODFETs ⇒ Lasers ⇒ Excitonic devices 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Εμπλουτισμός (enhancement) οπτικών & ηλεκτρικών ιδιοτήτων
<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Ανισότροπες m φορέων ⇒ ρυθμιζόμενα E_g ⇒ ρυθμιζόμενες ιδιότητες μεταφοράς 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Superior ιδιότητες μεταφοράς ⇒ Ενισχυμένα εξιτονικά φαινόμενα 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Superior διατάξεις μ- και οπτο-ηλεκτρονικής
<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Ανιχνευτές ⇒ Διαμορφωτές 	<ul style="list-style-type: none"> ⇒ Διατάξεις οπτοηλεκτρονικής με υψηλή ταχύτητα λειτουργίας 	