

Διάλεξη 1

Υλικά III (242)

- Μικροηλεκτρονικά
 - Οπτοηλεκτρονικά
- } → Ημιαγωγοί!

Ημιαγωγοί :

J. Singh

- Εισαγωγή κ. 1
- Ηλεκτρονικές ιδιότητες ημιαγωγών κ. 2,3
- Δίοδοι κ. 6
- Οπτικές ιδιότητες ημιαγωγών κ. 4
- Οπτοηλεκτρονικές διατάξεις (π.χ. λέιζερ) κ. 10

Βιβλιογραφία

- J. Singh “ Οπτοηλεκτρονική ”
- S.O. Kasap, “Αρχές Ηλεκτρονικών Υλικών & Διατάξεων”
- D. Neamen, “Semiconductor Physics and Devices”

Πρόγραμμα

- 1 Διάλεξη την εβδομάδα

Πέμπτη

11:00 – 2:00 μ.μ

Σημειώσεις

μπορείτε να κατεβάσετε από το Internet

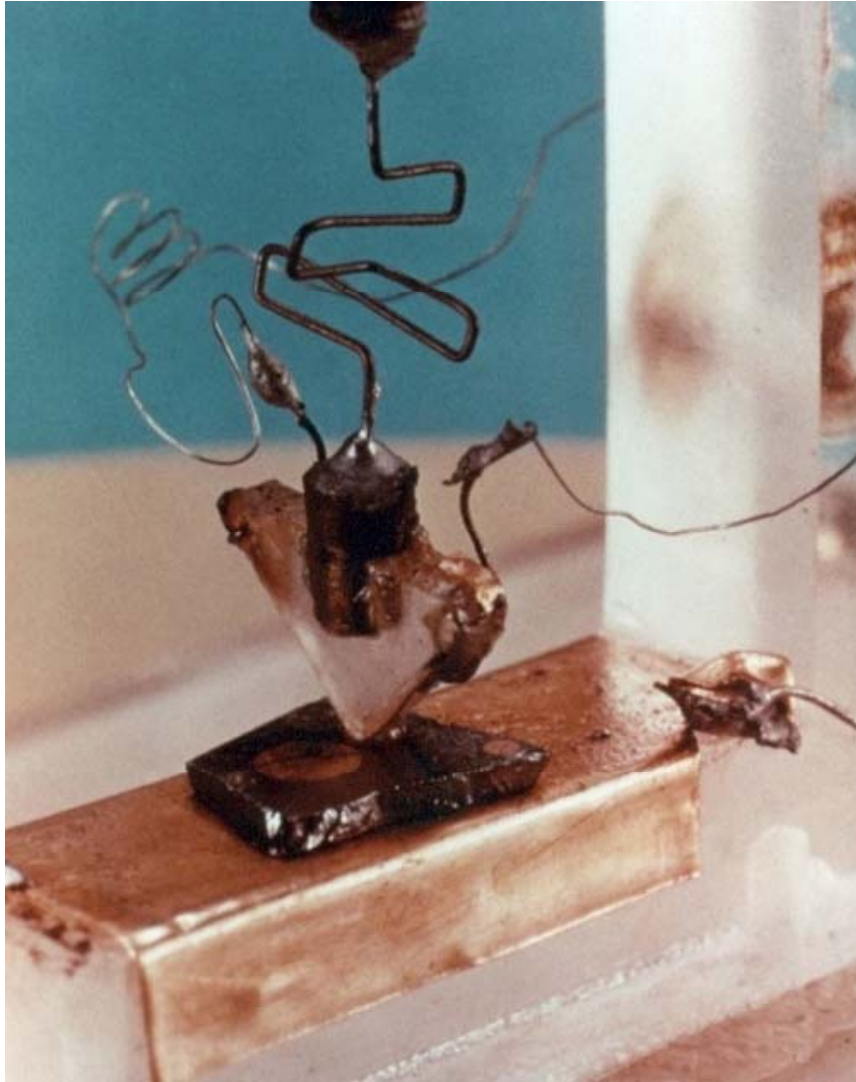
- Ασκήσεις

θα λύνουμε κατά τη διάρκεια του μαθήματος

- Εξετάσεις

- Ερωτήσεις πάνω σε όλο το μάθημα
- Εξειδικευμένες ασκήσεις σε επιλεγμένα θέματα

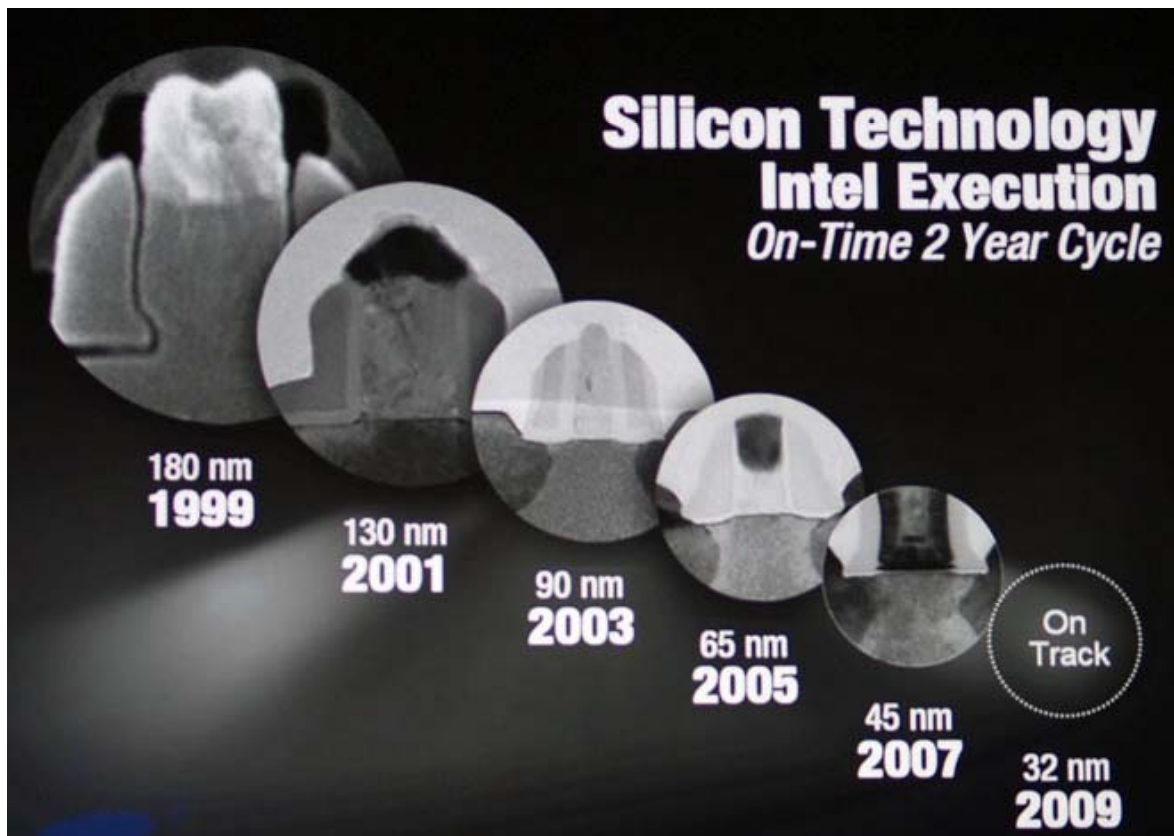
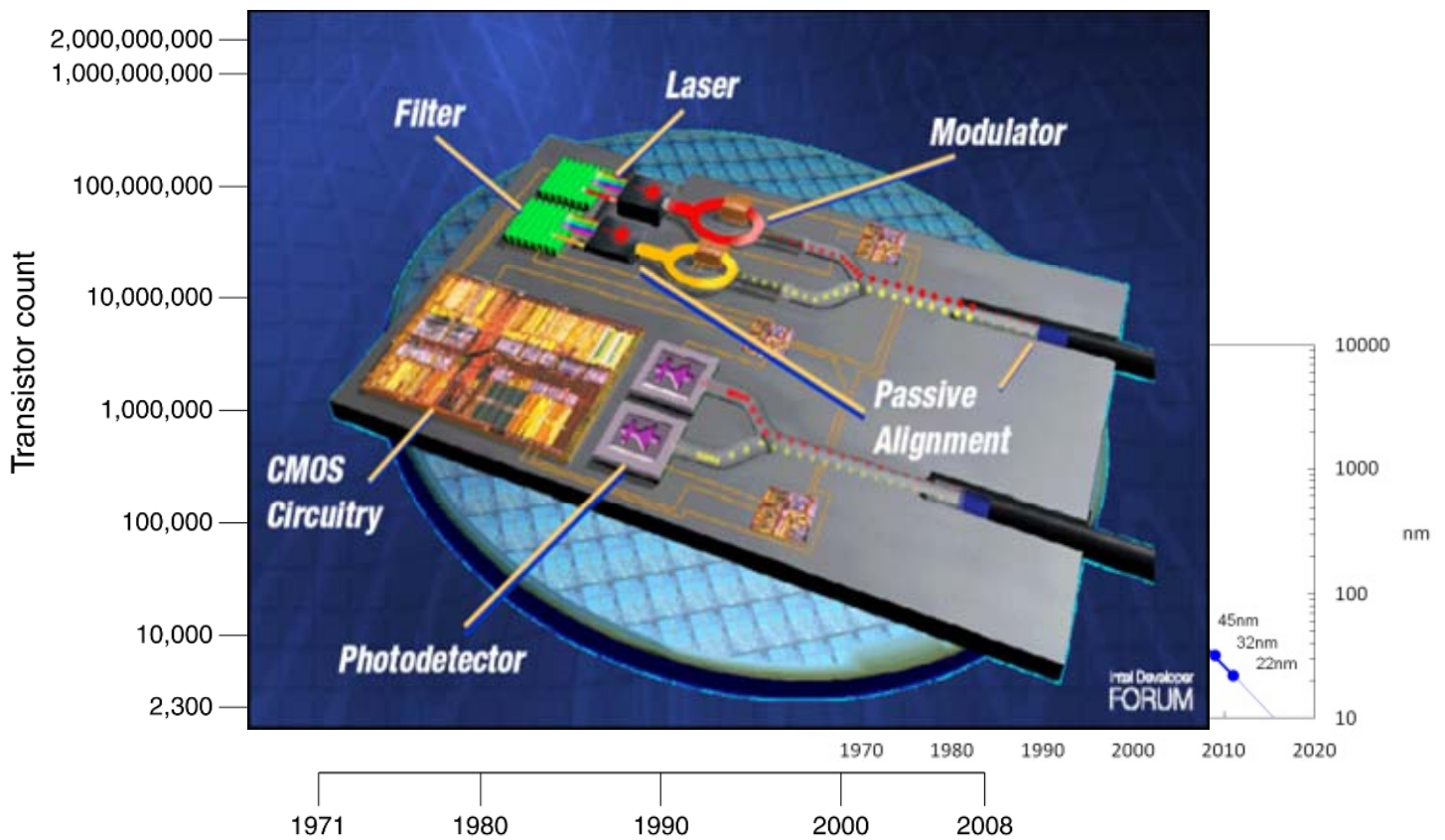




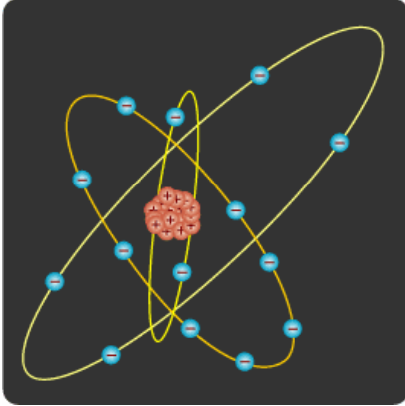
Πρώτο Τρανζίστορ
John Bardeen and Walter Brattain
Bell Laboratories 1947

Γιατί οι Ημιαγωγοί έχουν ενδιαφέρον ?

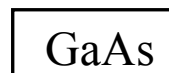
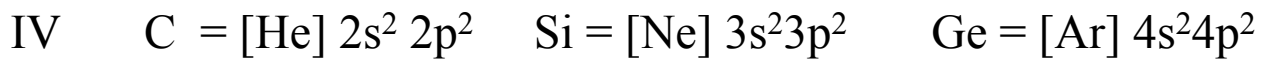
CPU Transistor Counts 1971-2008 & Moore's Law

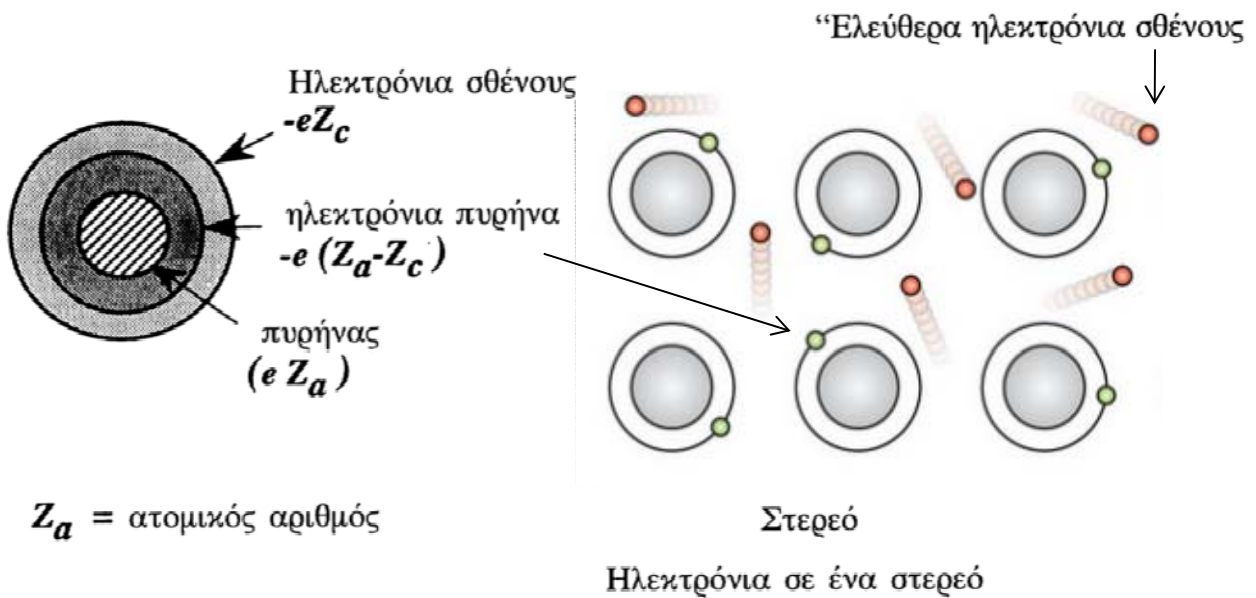
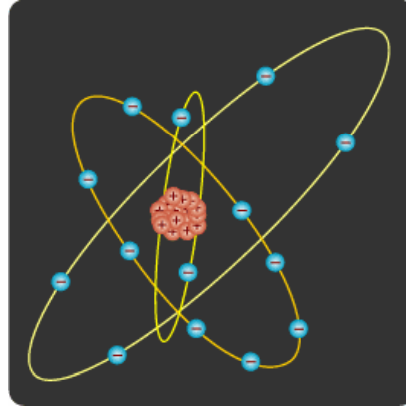


Ημιαγωγοί ομάδας IV , III-V και II-VI



| | III A | IV A | V A | VI A |
|-----|----------|----------|----------|----------|
| | 5 B | 6 C | 7 N | 8 O |
| | 13 Al | 14 Si | 15 P | 16 S |
| IIB | 30 Zn | 31 Ga | 32 Ge | 33 As |
| | 48 Cd | 49 In | 50 Sn | 51 Sb |
| | | | | 52 Te |





Μοριακό βάρος GaAs: 144,64 gr

1 mole = 144,64 gr = $6.022 \cdot 10^{23}$ μόρια

Αν κάθε μόριο GaAs έδινε 8 e^- σθένους

$$\rightarrow 6,022 \cdot 10^{23} \frac{8}{144,64} \sim 3,3 \cdot 10^{22} \frac{e^-}{\text{gr}}$$

Κρυσταλλικό Πλέγμα & Συμμετρία

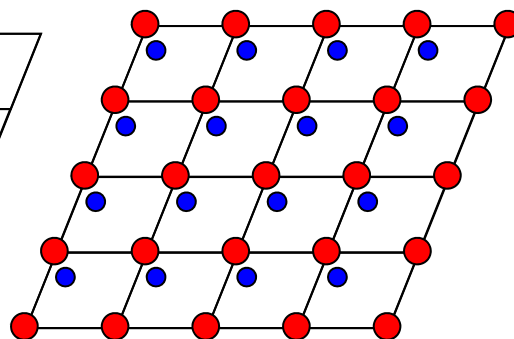
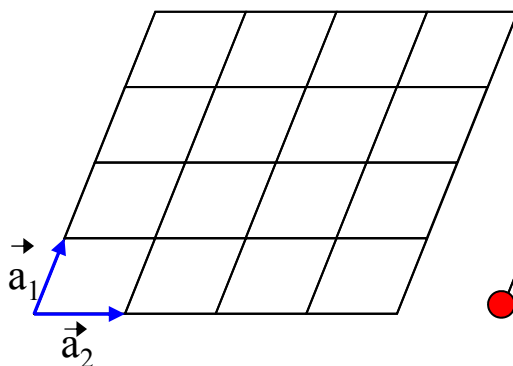
| | | | | |
|--------|---|--------|---|------------------|
| • Βάση | + | Πλέγμα | = | Κρυσταλλική δομή |
|--------|---|--------|---|------------------|

ένα ή συνδυασμός
ατόμων

πλέγμα Bravais

2D

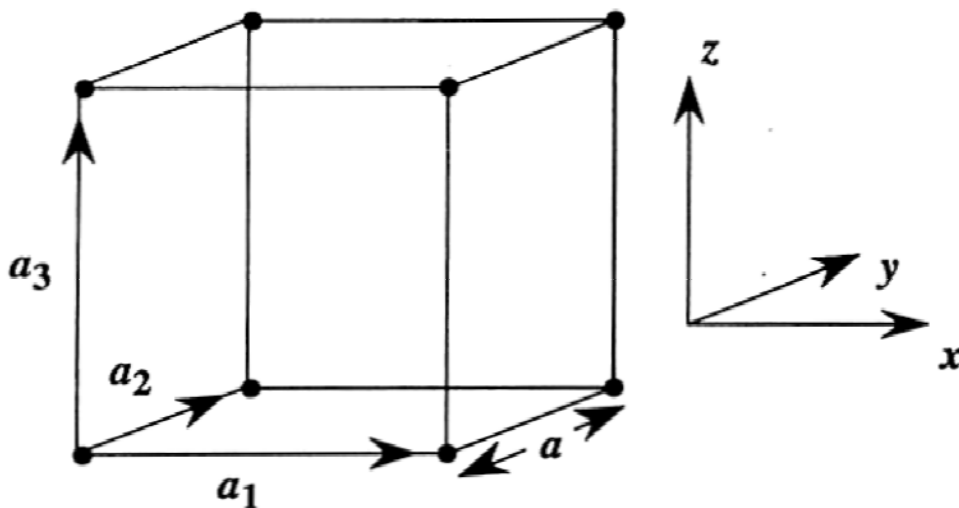
Βάση



Κρυσταλλική δομή

$$\vec{R}' = \vec{R} + m_1 \vec{a}_1 + m_2 \vec{a}_2 + m_3 \vec{a}_3$$

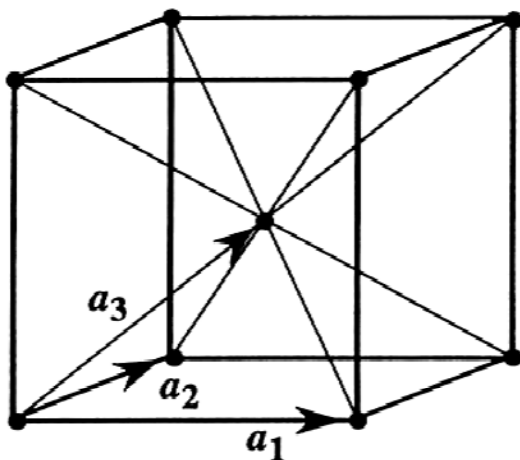
$\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3$ ανύσματα βάσης



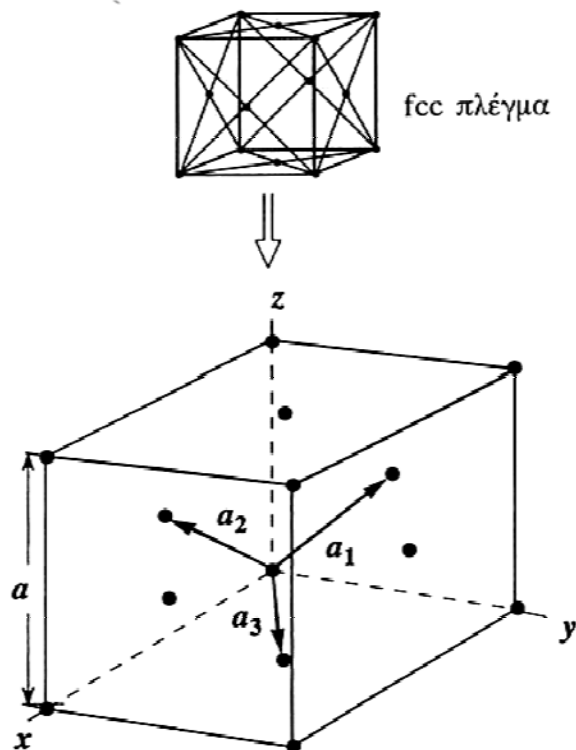
Σχήμα 1.2: Ένα απλό κυβικό πλέγμα στο οποίο φαίνονται και τα πρωτεύοντα διανύσματα. Ο κρύσταλλος παράγεται με επανάληψη της κυβικής κυψελίδας στον χώρο.

| Σύστημα | Αριθμός πλεγμάτων | Περιορισμοί σε συμβατικούς άξονες κυψελίδας και μοναδικούς |
|-------------|-------------------|---|
| Τρικλινές | 1 | $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ |
| Μονοκλινές | 2 | $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$ |
| Ορθορομβικό | 4 | $a_1 \neq a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ |
| Τετραγωνικό | 2 | $a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ |
| Κυβικό | 3 | $a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ |
| Τριγωνικό | 1 | $a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ, \neq 90^\circ$ |
| Εξαγωνικό | 1 | $a_1 = a_2 \neq a_3$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$ |

Πίνακας 1.1: Τα 14 πλέγματα Bravais σε τριδιάστατα συστήματα και οι ιδιότητές τους.

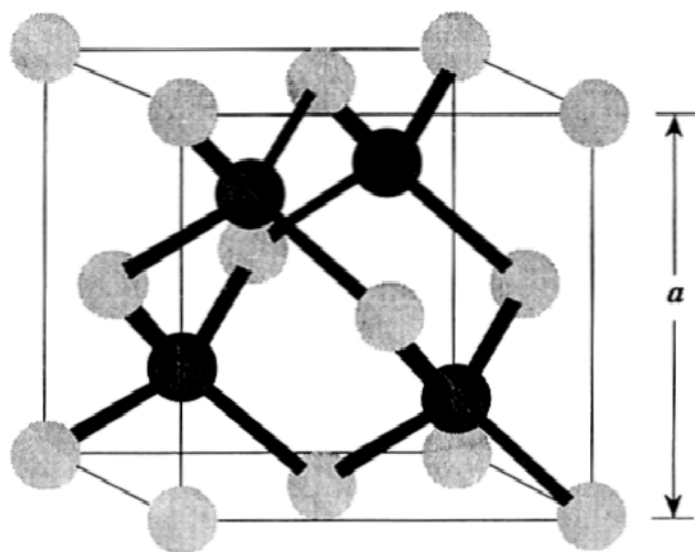


Σχήμα 1.3: Το χωροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα μαζί με μία επιλογή πρωτεύοντων διανυσμάτων.



FCC

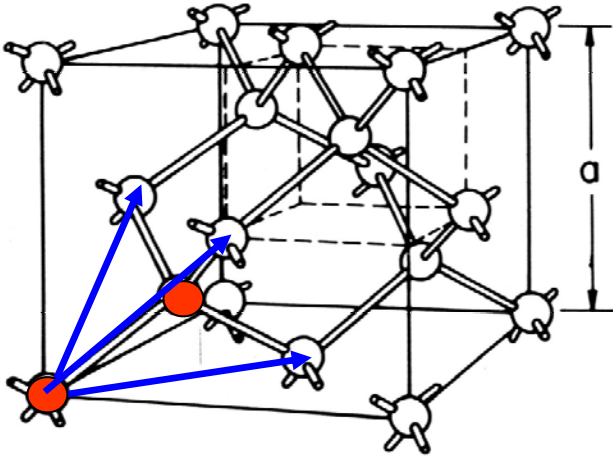
Σχήμα 1.4: Πρωτεύοντα διανύσματα βάσης για το εδροκεντρωμένο κυβικό πλέγμα.



Zinc-Blende

Σχήμα 1.5: Κρυσταλλική δομή zinc blende. Η δομή αποτελείται από τα διαπερνώντας το ένα το άλλο fcc πλέγματα, το ένα μετατοπισμένο από το άλλο κατά μία απόσταση $(\frac{a}{4}, \frac{a}{4}, \frac{a}{4})$ κατά μήκος της κύριας διαγωνίου. Το υποκείμενο πλέγμα Bravais είναι fcc με βάση δύο ατόμων. Οι θέσεις των δύο ατόμων είναι $(0,0,0)$ και $(\frac{a}{4}, \frac{a}{4}, \frac{a}{4})$.

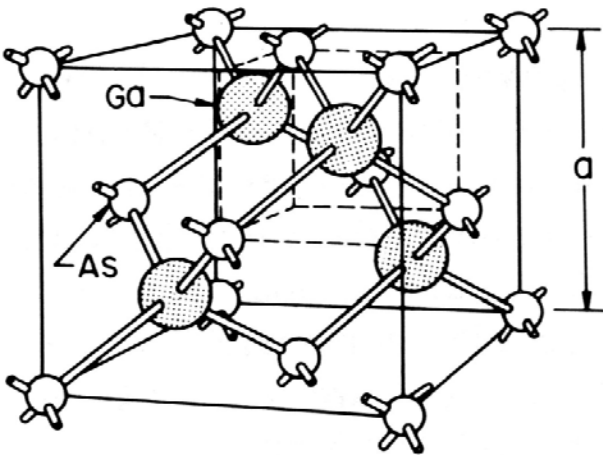
Κρυσταλλική Δομή Ημιαγωγών



Δομή Διαμαντιού C, Si, Ge IV

Βάση - Si - Si

Πλέγμα FCC 5.65 Å

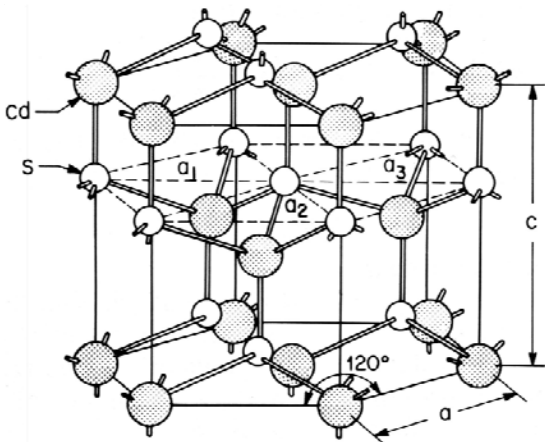


Zincblende

π.χ. GaAs III - V

Βάση - Ga - As

○



II - VI



CdS Wurtzite δομή

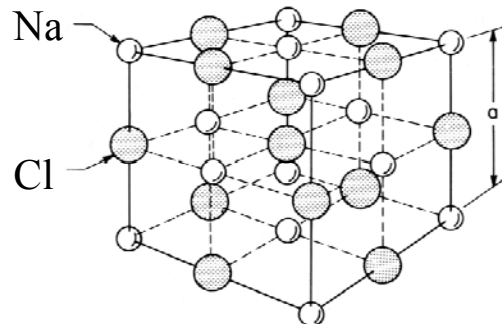
- Επίσης τετραεδρική

I - VII

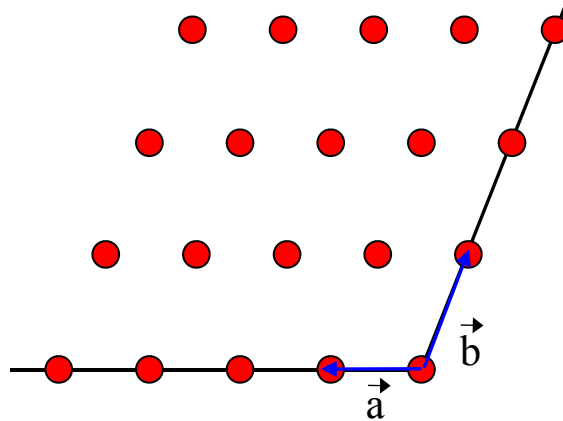


NaCl

Rocksalt



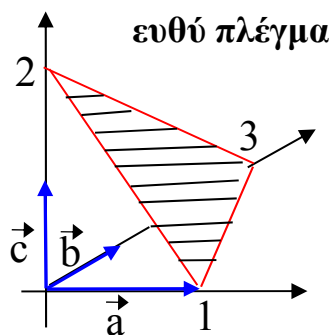
Δείκτες Miller



- Διεύθυνση: περιγράφεται με δείκτες Miller

$$\langle hkl \rangle \quad \text{π.χ.} \quad \left. \begin{array}{l} [100] \\ [200] \\ [500] \end{array} \right\} \text{ισοδύναμες διευθύνσεις} \quad \Rightarrow \quad \langle 100 \rangle$$

- Επίπεδο: ορίζεται από τρία σημεία του πλέγματος

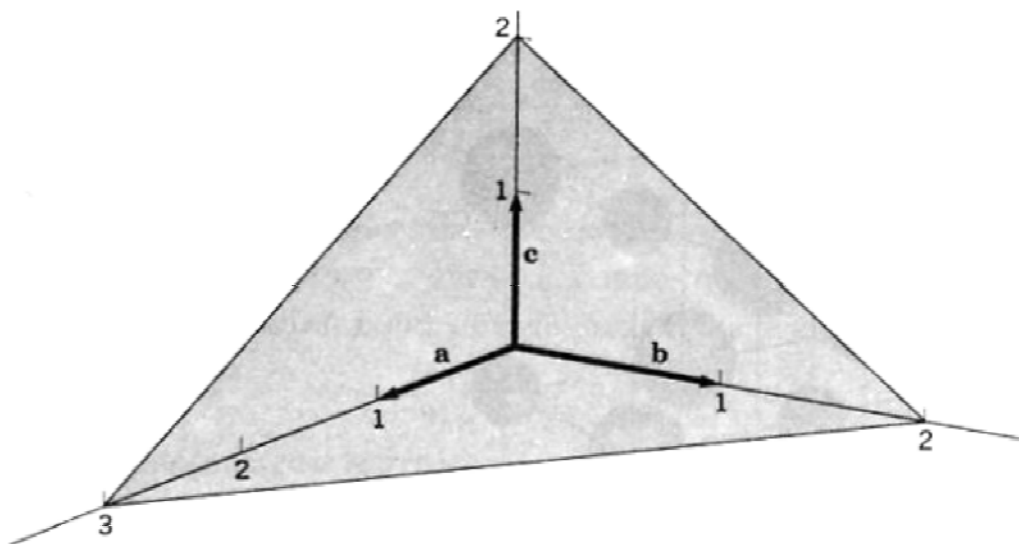


$$\begin{array}{ccc} (1) & (2) & (3) \\ 132 & \Rightarrow \frac{1}{1} \frac{1}{3} \frac{1}{2} & \Rightarrow \{623\} \end{array}$$

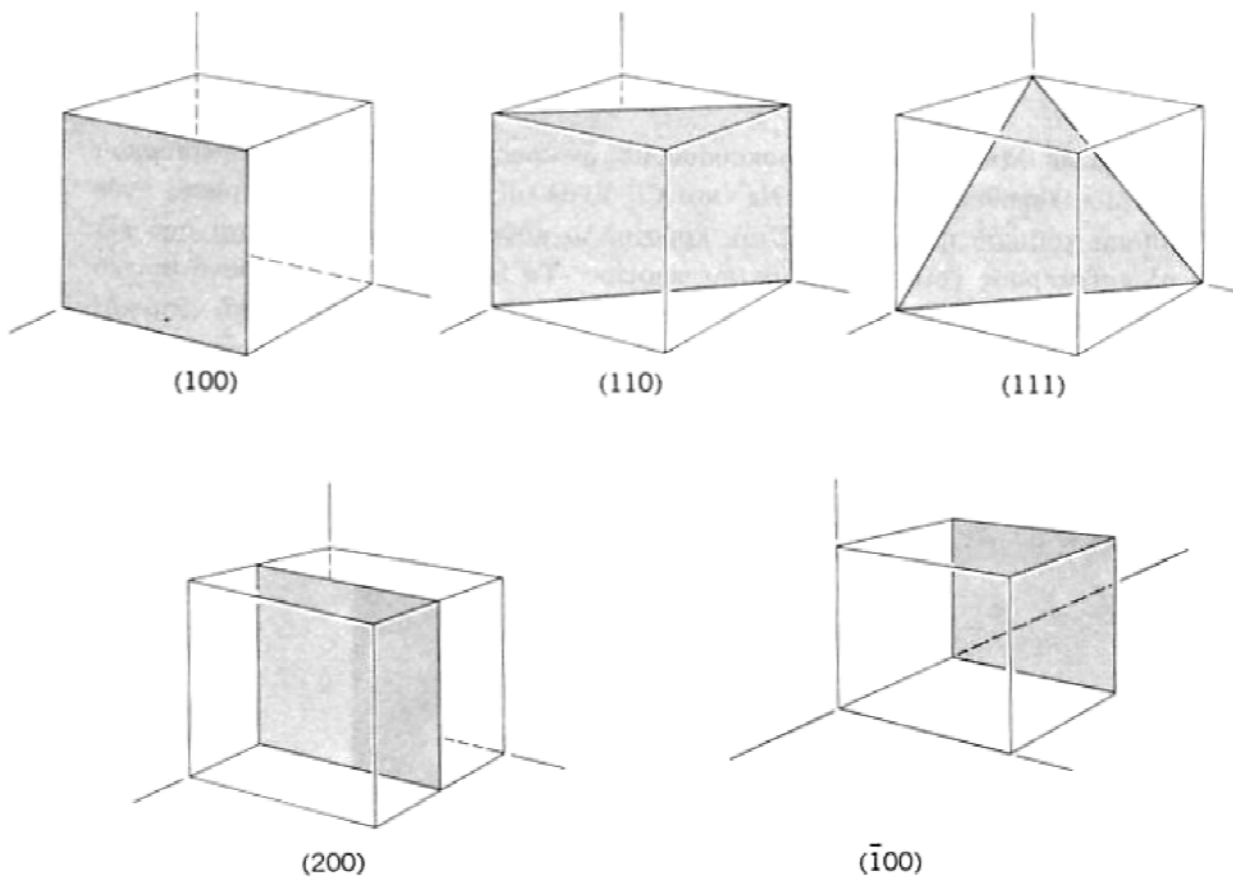
- (1) ορίζουμε το επίπεδο με αριθμούς h, k, l
- (2) παίρνουμε το αντίστροφο πηλίκιο $1/h, 1/k, 1/l$
- (3) βρίσκουμε μικρότερους δυνατούς ακεραίους αριθμούς που να έχουν τις ίδιους λόγους μεταξύ τους με αριθμούς $1/h, 1/k, 1/l$

Για κυβικό πλέγμα διεύθυνση $\langle hkl \rangle \perp$ επίπεδο $\{hkl\}$

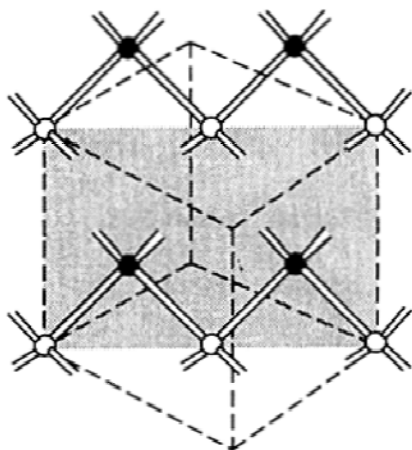
Δείκτες Miller



Σχήμα 17 Αυτό το επίπεδο τέμνει τους άξονες **a, b, c** στα **3a, 2b, 2c**. Οι αντίστροφοι αυτών των αριθμών είναι $\frac{1}{3}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2}$. Οι μικρότεροι τρεις άκεραίοι που έχουν τον ίδιο λόγο είναι 2, 3, 3 και έτσι οι δείκτες του επιπέδου είναι (233).



Σχήμα 18 Οι δείκτες μερικών σπουδαίων επιπέδων σ' ένα κυβικό κρύσταλλο. Το επίπεδο (200) είναι παράλληλο με το (100) και το $(\bar{1}00)$.

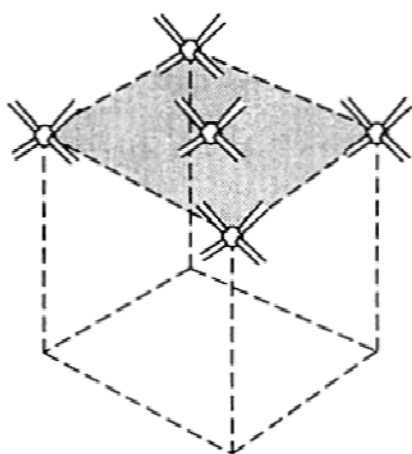


ΑΤΟΜΑ ΣΤΟ (110) ΕΠΙΠΕΔΟ

Κάθε άτομο έχει 4 δεσμούς:

- 2 δεσμούς στο (110) επίπεδο ✓
- 1 δεσμός συνδέει κάθε άτομο στα γειτονικά (110) επίπεδα

ή Η διάσχιση γειτονικών επιπέδων απαιτεί διάσπαση 1 δεσμού ανά άτομο

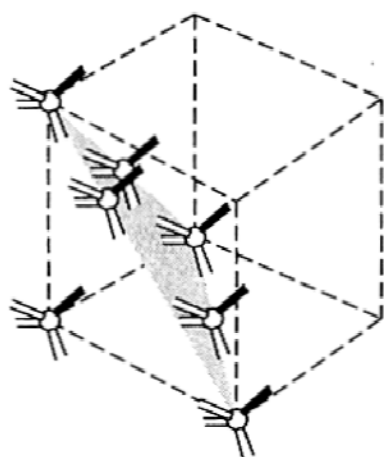


ΑΤΟΜΑ ΣΤΟ (001) ΕΠΙΠΕΔΟ

2 δεσμοί συνδέουν κάθε άτομο στο γειτονικό (001) επίπεδο

Άτομα είναι είτε Ga ή As σε ένα κρύσταλλο GaAs

ή Η διάσχιση γειτονικών επιπέδων απαιτεί διάσπαση 2 δεσμών ανά άτομο



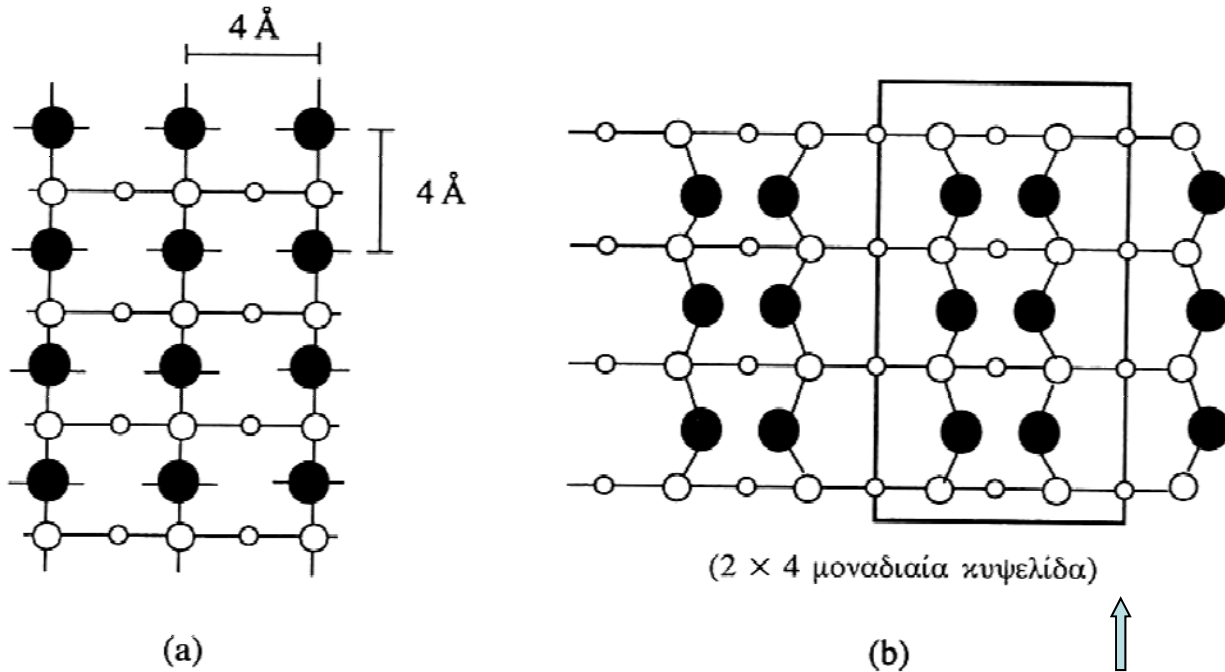
ΑΤΟΜΑ ΣΤΟ (111) ΕΠΙΠΕΔΟ

Θα μπορούσε να είναι είτε Ga ή As

1 δεσμός συνδέει ένα γειτονικό επίπεδο στη μία πλευρά

3 δεσμοί συνδέουν ένα γειτονικό επίπεδο στην άλλη πλευρά

Σχήμα 1.6: Μερικά σημαντικά επίπεδα στο κυβικό πλέγμα μαζί με τους δείκτες τους Miller. Αυτό το σχήμα δείχνει επίσης πόσοι δεσμοί συνδέουν γειτονικά επίπεδα. Αυτός ο αριθμός καθορίζει πόσο εύκολα ή δύσκολα είναι να διασχίσουμε τον κρύσταλλο κατά μήκος αυτών των επιπέδων.

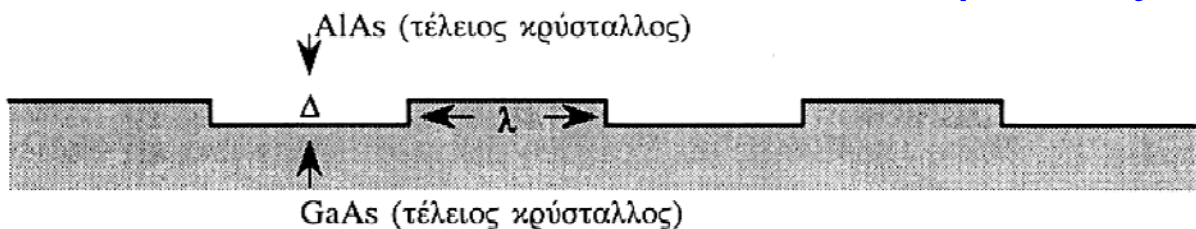


- Άτομα As άνω στρώματος
- Άτομα Ga δεύτερου στρώματος
- Άτομα As τρίτου στρώματος

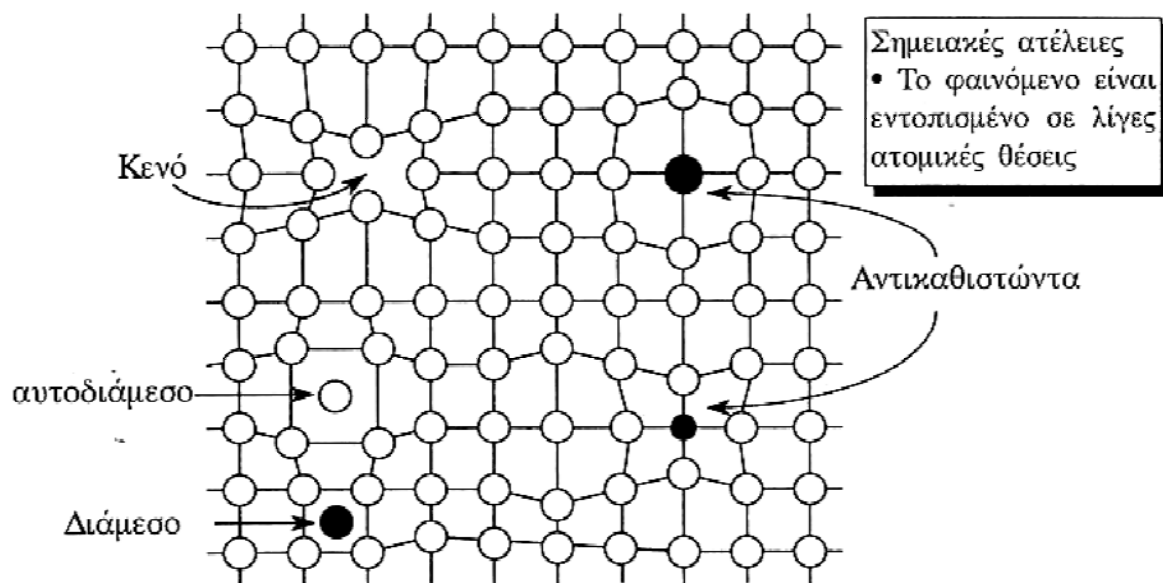


Σχήμα 1.8: Η δομή (a) της πλούσιας σε αρσενικό επιφάνειας GaAs (001) χωρίς ανοικοδόμηση. Το μοντέλο χαμένου διμερούς (b) για την επιφάνεια GaAs (001) (2x4). Τα διμερή As λείπουν για να δημιουργήσουν μία περιοδικότητα 4 μονάδων κατά μήκος μιας διεύθυνσης και μία περιοδικότητα δύο μονάδων κατά μήκος της κάθετης διεύθυνσης.

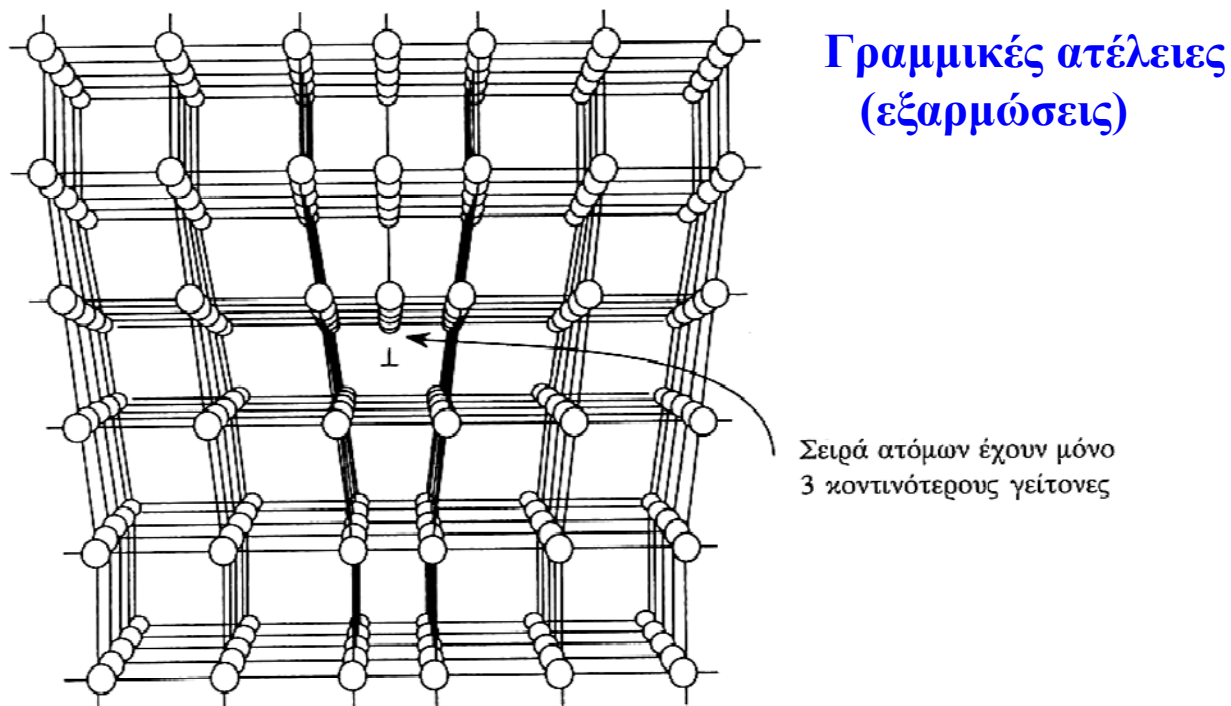
Διεπιφάνειες



Σχήμα 1.9: Μία σχηματική εικόνα των διαχωριστικών επιφανειών μεταξύ υλικών με παρόμοιες πλεγματικές σταθερές όπως GaAs/AlAs. Καμμία απώλεια κρυσταλλικού πλέγματος και τάξης ευρείας κλίμακας δε συμβαίνει σε τέτοιες διαχωριστικές επιφάνειες. Η διαχωριστική επιφάνεια χαρακτηρίζεται από νησιά ύψους Δ και πλεγματικής έκτασης λ.

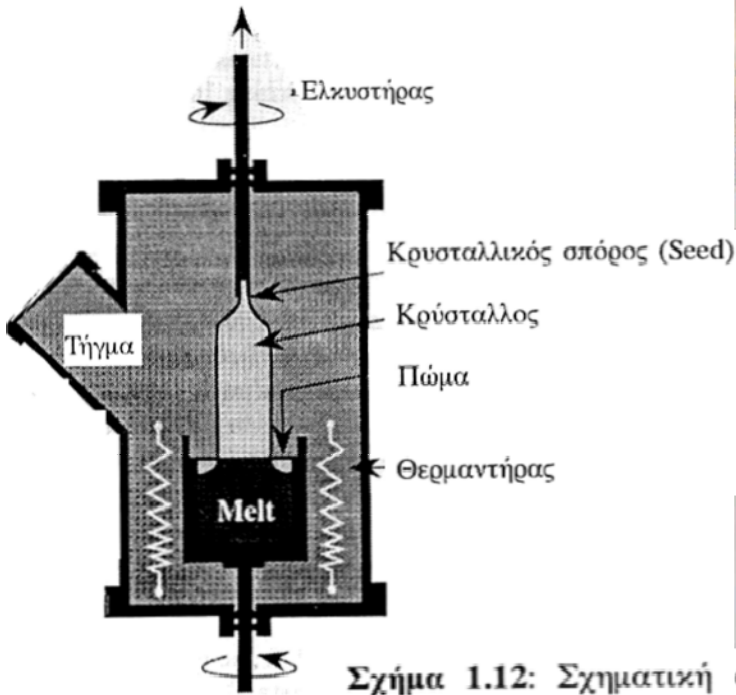


Σχήμα 1.10: Μία σχηματική απεικόνιση που δείχνει μερικές σημαντικές σημειακές ατέλειες σε ένα κρύσταλλο. (Κατόπιν άδειας από τους J.W. Mayer and S.S. Lau, *Electronic Material Science: For Integrated Circuits in Si and GaAs*, MacMillan, New York (1990).)



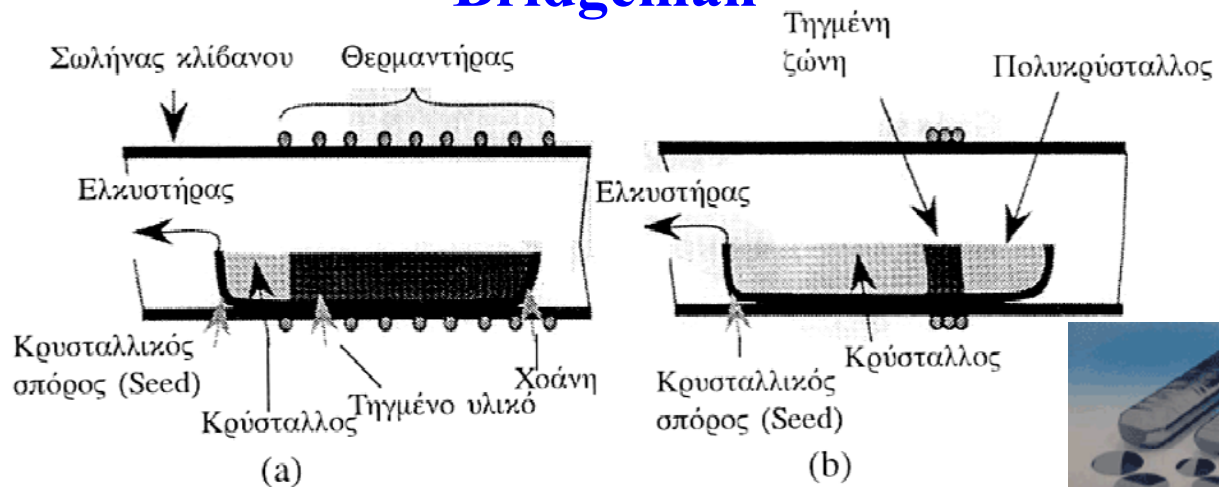
Σχήμα 1.11: Μία σχηματική απεικόνιση που δείχνει την παρουσία μιας εξάρθρωσης. Αυτή η γραμμική ατέλεια παράγεται προσθέτοντας ένα έξτρα μισό επίπεδο ατόμων. Στο άκρο του μισού επιπέδου, τα άτομα έχουν ένα χαμένο δεσμό.

Ανάπτυξη Συμπαγούς Κρυστάλλου (Μέθοδος Czochralsky)



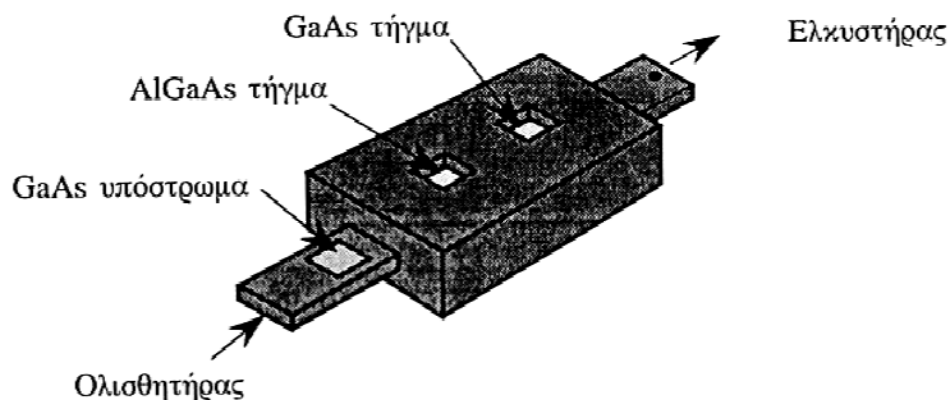
Σχήμα 1.12: Σχηματική αναπαράσταση συσκευής ανάπτυξη κρυστάλλου τύπου Czochralski που χρησιμοποιείται για να παράγει ράβδους υποστρώματος. Η προσέγγιση χρησιμοποιείται ευρέως για Si, GaAs και InP.

Bridgeman

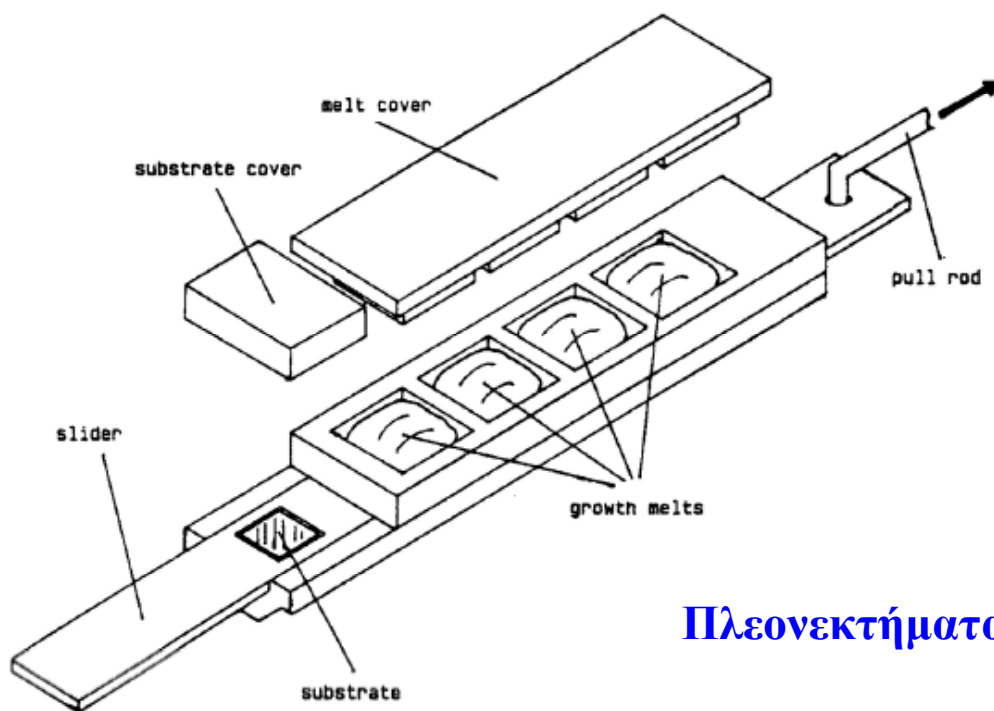


Σχήμα 1.13: Κρύσταλλος που αναπτύσσεται από το τήγμα σε μία χοάνη: (a) στερεοποίηση από ένα άκρο του τήγματος (οριζόντια μέθοδος Bridgeman), (b) τήξη και στερεοποίηση σε μία κινούμενη ζώνη.

LPE (Liquid Phase Epitaxy)



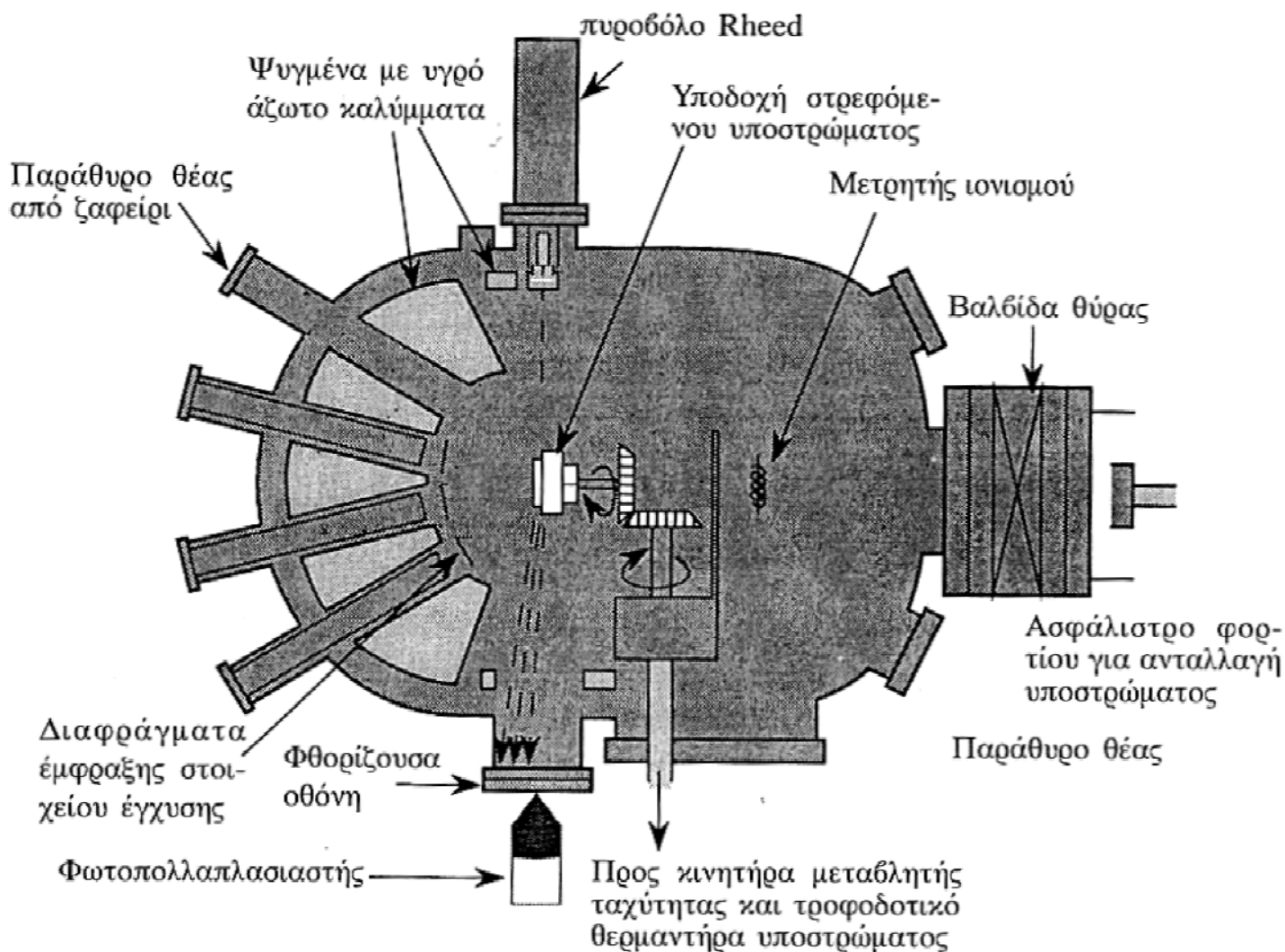
Σχήμα 1.14: Σχηματική αναπαράσταση της LPE ανάπτυξης των AlGaAs και GaAs. Ο ολισθητήρας κινεί το υπόστρωμα, θέτοντάς έτσι τον εαυτό του για να πετύχει επαφή με τα διαφορετικά τήγματα ώστε να αναπτυχθούν ετεροδομές.



Πλεονεκτήματα

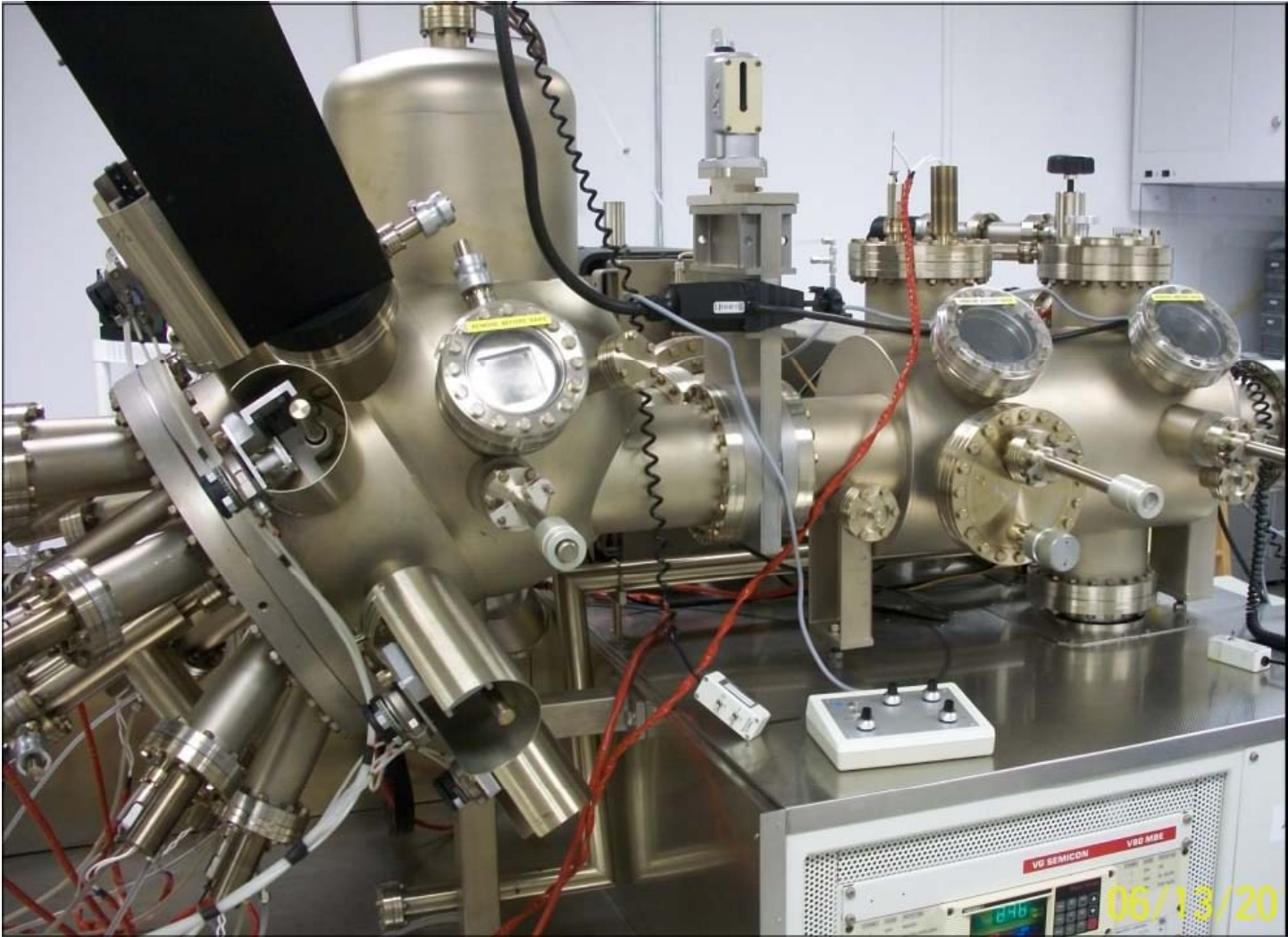
- Ανάπτυξη υμένων ημιαγωγών σχετικά μεγάλου πάχους (3-30 μm)
- Σχετικά φθηνή μέθοδος

MBE (molecular beam epitaxy)



Σχήμα 1.16: Μία σχηματική απεικόνιση του συστήματος ανάπτυξης MBE .

απευθείας επίστρωση από θερμαινόμενα στοιχεία έγχυσης (effusion cells) σε υψηλές θερμοκρασίες

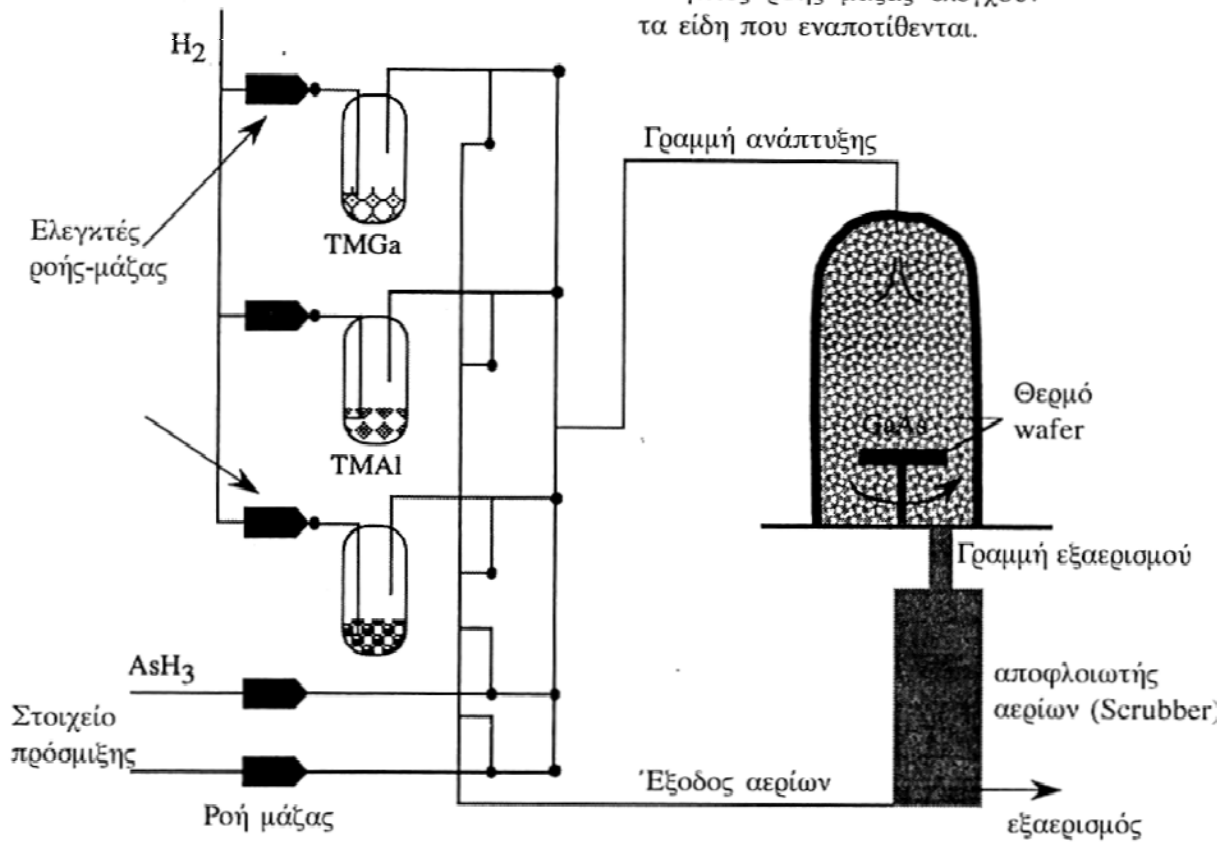


Metal Organic Chemical Vapor Deposition

- Αντιδράσεις μέταλλο-οργανικών αερίων στην επιφάνεια θερμαινόμενου υποστρώματος
- Πυρολυτική αντίδραση



Χημική αντίδραση στο θερμό υπόστρωμα εναποθέτει GaAs ή AlAs. Ελεγκτές ροής μάζας ελέγχουν τα είδη που εναποτίθενται.



TMGa : Γάλλιο το οποίο περιέχει οργανική ένωση
 TMAI : Αργίλιο το οποίο περιέχει οργανική ένωση
 AsH₃ : Αρσενικό το οποίο περιέχει ένωση

Σχήμα 1.17: Σχηματικό διάγραμμα ενός MOCVD συστήματος που χρησιμοποιεί πηγές υλικών με αλκίδια (τριμεθύλιο γαλλίου, TMGa) και τριμεθυλικό αργίλιο (TMAI) και μεταλλικά υδρίδια (αρσίνη), με υδρογόνο σαν αέριο φορέας.