

- *Ημιαγώγιμα Υλικά*
- *Κρυσταλλικά Πλέγματα*
- *Ανάπτυξη Κρυστάλλων πυριτίου*

Λευτέρης Καπετανάκης

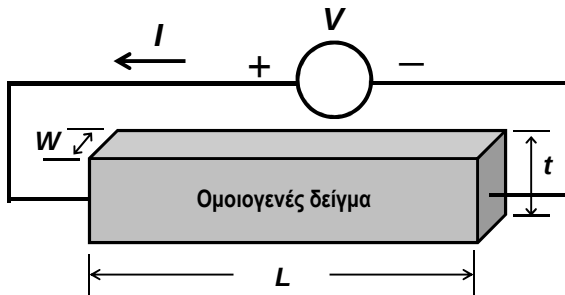


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ
Ηλεκτρονικών Μηχανικών Τ.Ε.

Φθινόπωρο 2018

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Στις διαφάνειες των διαλέξεων χρησιμοποιείται διδακτικό υλικό το οποίο έχει δανειστεί από διάφορα εκπαιδευτικά βιβλία και διαδικτυακές σελίδες. Ο εισηγητής δεν έχει καμιά αξίωση κατοχής του υλικού αυτού και το χρησιμοποιεί μόνο για λόγους διδασκαλίας εντός της τάξης. Οι εικόνες και οι πίνακες είναι κτήμα διαφόρων συγγραφέων και παρέχονται στον αντίστοιχο δικτυότοπό τους.

Ηλεκτρική αντίσταση



Αντίσταση
(Μονάδες: Ω)

$$R \equiv \frac{V}{I} = \rho \frac{L}{Wt}$$

όπου ρ είναι η ειδική αντίσταση
(*resistivity*) $\rightarrow$ (Μονάδες: $\Omega\text{-cm}$)

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

είναι η ειδική αγωγιμότητα
(*conductivity*) $\rightarrow$ (Μονάδες: S/cm)

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 3

Τι είναι ο ημιαγωγός;

☐ Χαμηλή ειδική αντίσταση $\Rightarrow$
“αγωγός”

Χαλκός: $\rho = 1,7 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$

Αλουμίνιο: $\rho = 2,7 \times 10^{-6} \Omega\text{-cm}$

☐ Υψηλή ειδική αντίσταση $\Rightarrow$
“μονωτής”

Διοξείδιο του πυριτίου SiO_2 :
 $\rho = 10^{14} - 10^{16} \Omega\text{-cm}$

☐ Ενδιάμεση ειδική αντίσταση $\Rightarrow$
“ημιαγωγός”

Πολύ Καθαρό (“ενδογενές”) Si :

$\rho = 2.3 \times 10^5 \Omega\text{-cm}$

☐ Η ειδική αντίσταση των ημιαγωγικών υλικών είναι ευμετάβλητη και επηρεάζεται από:

- τη θερμοκρασία
- την πρόσπτωση φωτός
- το βαθμό νόθευσης του ημιαγωγικού υλικού.

* Si με 2×10^{16} προσμίξεις ανά cm^3 :
 $\rho = 0.1 \Omega\text{-cm}$

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 4

Μονωτές-Ημιαγωγοί-Αγωγοί

Κατανομή Υλικών ανάλογα με τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες

Υλικά	Ειδ. Αντίσταση $\rho(\Omega\text{-cm})$	Αγωγιμότητα $\sigma(\text{S/cm})$
Μονωτές	$10^{18} - 10^8$	$10^{-18} - 10^{-8}$
Ημιαγωγοί	$10^8 - 10^{-3}$	$10^{-8} - 10^3$
Αγωγοί	$10^{-3} - 10^{-8}$	$10^3 - 10^8$

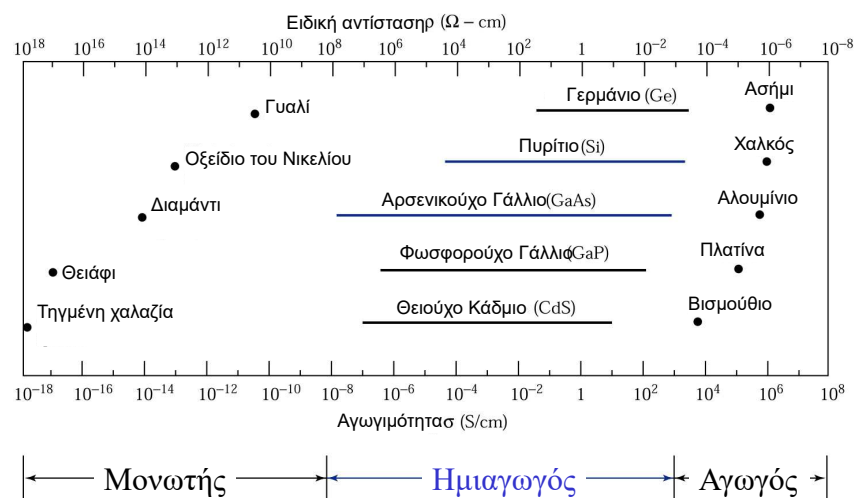
ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 5

Μονωτές-Ημιαγωγοί-Αγωγοί

Τυπικές διακυμάνσεις ειδικής αντίστασης & αγωγιμότητας



ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 6

Ημιαγώγιμα Υλικά

❑ **Απλά στοιχεία:** της ομάδας IV του περιοδικού πίνακα: Si, Ge

❑ **Ένωση 2 στοιχείων** (Διμερής, Binary)

- Ενώσεις IV-IV
- Ενώσεις III-V
- Ενώσεις II-VI
- Ενώσεις IV-VI

❑ **Ένωση 3 στοιχείων** (Τριμερής, Ternary)

❑ **Ένωση 4 στοιχείων** (Τετραμερής, Quaternary)

ΤΑ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 7

Ημιαγώγιμα Υλικά

General Classification	Semiconductor	
	Symbol	Name
Element	Si	Silicon
	Ge	Germanium
Binary compound		
IV-IV -----	SiC	Silicon carbide
III-V -----	AlP	Aluminum phosphide
	AlAs	Aluminum arsenide
	AlSb	Aluminum antimonide
	GaN	Gallium nitride
	GaP	Gallium phosphide
	GaAs	Gallium arsenide
	GaSb	Gallium antimonide
	InP	Indium phosphide
	InAs	Indium arsenide
	InSb	Indium antimonide
II-VI -----	ZnO	Zinc oxide
	ZnS	Zinc sulfide
	ZnSe	Zinc selenide
	ZnTe	Zinc telluride
	CdS	Cadmium sulfide
	CdSe	Cadmium selenide
	CdTe	Cadmium telluride
IV-VI -----	HgS	Mercury sulfide
	PbS	Lead sulfide
	PbSe	Lead selenide
	PbTe	Lead telluride
Ternary compound		
	Al _{0.5} Ga _{0.5} As	Aluminum gallium arsenide
	Al _{0.5} In _{0.5} As	Aluminum indium arsenide
	GaAs _{0.5} P _{0.5}	Gallium arsenic phosphide
	Ga _{0.5} In _{0.5} As	Gallium indium arsenide
	Ga _{0.5} In _{0.5} P	Gallium indium phosphide
Quaternary compound		
	Al _{0.25} Ga _{0.25} As _{0.25} Sb _{0.25}	Aluminum gallium arsenic antimonide
	Ga _{0.25} In _{0.25} As _{0.25} P _{0.25}	Gallium indium arsenic phosphide

Semiconductor Devices, 2/E by S. M. Sze
Copyright © 2002 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

ΤΑ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 8

Ημιαγώγιμα Υλικά

- ❑ **Πυρίτιο (Si)-το κλειδί για την ανάπτυξη των Ο.Κ. :**
χρησιμοποιείται για ηλεκτρονικές διατάξεις (πχ, τρανζίστορ).
 - ❑ **Ενώσεις:** χρησιμοποιούνται για οπτοηλεκτρονικές διατάξεις υψηλής-ταχύτητας
 - Διμερείς: GaN, GaP, GaAs
 - Τριμερείς: GaAsP, AlGaAs
 - Τετραμερή: InGaAsP
- ZnS : φθορίζων υλικό
 - InSb, CdSe : Ανιχνευτές φωτός
 - Si, Ge : Ανιχνευτές υπέρυθρης & πυρηνικής ακτινοβολίας
 - GaAs, InP : Δίοδοι Gunn
 - GaAs, AlGaAs : Λέιζερ ημιαγωγού

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 9

Ημιαγώγιμα Υλικά

- ❑ **Ενεργειακό χάσμα (E_g)** μεταξύ της ζώνης σθένους και της ζώνης αγωγιμότητας:
 - Ένα από τα σπουδαιότερα χαρακτηριστικά του ημιαγωγού, το οποίο τον ξεχωρίζει από τα μέταλλα και τους μονωτές (**λεπτομέρειες μετέπεται**)
 - Καθοριστικό για τα μήκη κύματος του φωτός τα οποία απορροφά ή εκπέμπει ένας ημιαγωγός.
- ❑ **Μέγεθος E_g : λ (μm) = $1,24 / E_g(\text{eV})$** (**λεπτομέρειες μετέπεται**)
 - GaAs : 1,43 eV (~ μήκος κύματος υπεριώδους φωτός)
 - GaP : 2,3 eV (~ πράσινο τμήμα ορατού φάσματος)
 - Si : 1,12 eV
 - Ge: 0,67 eV

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 10

Ημιαγώγιμα Υλικά

❑ Νόθευση Ημιαγωγών :

- Υποδηλώνει μια επακριβώς ελέγξιμη διαδικασία πρόσθεσης ακαθαρσιών στους φυσικούς (ενδογενείς) ημιαγωγούς.
- Μεταβάλλει τις αγωγιμότητες των ημιαγωγών επηρεάζοντας δραστικά τις ηλεκτρικές / οπτικές ιδιότητές τους.

❑ Έλεγχος ppm : μια ποσότητα ακαθαρσιών με συγκέντρωση ίση με ένα μέρος ανά εκατομμύριο (ένα ppm, one part per million) μπορεί να αλλάξει το Si από αδύναμο αγωγό σε καλό αγωγό !!!

⇒ **Ανάγκη να καταλάβουμε τη διάταξη των ατόμων στον ημιαγωγό για να εξερευνήσουμε τις χρήσιμες ιδιότητές του**

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 11

Κρυσταλλικά Πλέγματα

❑ Γενικά, τα ημιαγώγιμα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται στις διατάξεις ολοκληρωμένων κυκλωμάτων είναι κρυσταλλικά.

❑ Περιοδικές δομές:

- **Κρυσταλλικά στερεά:** τα άτομα στο στερεό είναι διατεταγμένα στο χώρο με περιοδικό τρόπο.

❑ Άλλα στερεά:

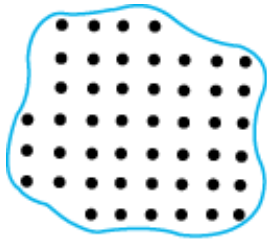
- **Πολυκρυσταλλικά στερεά:** πολλές μικρές μονοκρυσταλλικές περιοχές.
- **Άμορφα στερεά:** καθόλου περιοδική δομή.
 - Τα τελευταία χρόνια, μη-κρυσταλλικοί ημιαγωγοί (όπως, το άμορφο πυρίτιο) γίνονται εμπορικά πολύ σημαντικοί.

ΤΛ1001:

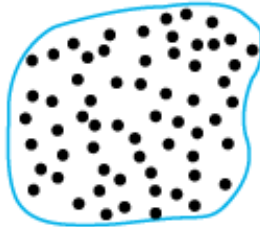
Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 12

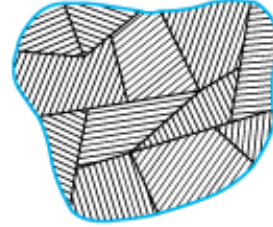
Κρυσταλλικά Πλέγματα



(α) Κρυσταλλικό



(β) Άμορφο



(γ) Πολυκρυσταλλικό

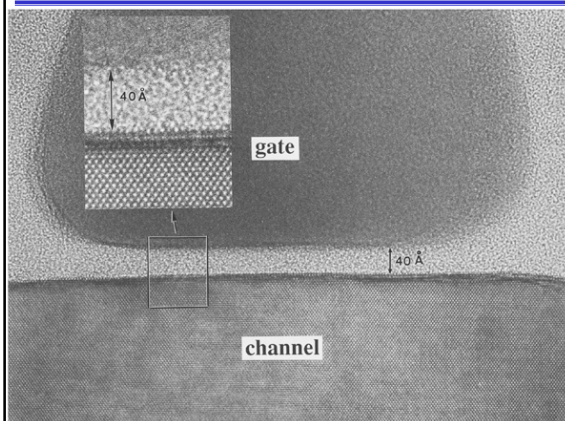
Τρία είδη στερεών, ταξινομημένα σύμφωνα με την ατομική διευθέτηση:
(α) κρυσταλλικά και (β) άμορφα υλικά απεικονίζονται μέσω των
μικροσκοπικών όψεων των ατόμων, ενώ η πολυκρυσταλλική δομή (γ)
παριστάνεται με την πιο μακροσκοπική όψη των γειτονικών
μονοκρυσταλλικών περιοχών, όπως η (α).

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 13

Κρυσταλλικά Πλέγματα



Απεικόνιση της περιοδικής
συστοιχίας των ατόμων στο
μονοκρύσταλλο πυριτίου στο
κανάλι ενός τρανζίστορ σε
σύγκριση με το άμορφο
στρώμα SiO_2 (γυαλί) του
οξειδίου πύλης.

Κάθετη τομή ενός MOSFET. Αυτή η μικροφωτογραφία, η οποία έχει "τραβηχτεί" με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο διέλευσης (TEM) υψηλής διακριτότητας, δείχνει ένα Τρανζίστορ Επίδρασης Πεδίου (FET) Μετάλλου-Οξειδίου-Ημιαγωγού (MOS) όπου το κανάλι πυριτίου διαχωρίζεται από την μεταλλική πύλη από ένα λεπτό ($40\text{\AA}$, 4nm) μονωτικό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου. Το ένθετο δείχνει μια μεγενθυμένη όψη των τριών περιοχών, όπου στην περιοχή του κρυσταλλικού πυριτίου διακρίνονται συστοιχίες από μεμονομένα άτομα. (Photograph courtesy of AT&T Bell Laboratories.)

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 14

Κρυσταλλικά Πλέγματα

- ❑ Πλέγμα Bravais
- ❑ Μοναδιαίες κυψελίδες
- ❑ Κρυσταλλική δομή

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 15

Πλέγμα Bravais - Ορισμός

- ❑ Μια θεμελιώδης έννοια για την περιγραφή της κρυσταλλικής δομής ενός στερεού είναι αυτή του **πλέγματος Bravais**, το οποίο προσδιορίζει την **περιοδική διάταξη** στην οποία βρίσκονται οι **επαναλαμβανόμενες δομικές μονάδες** του κρυστάλλου.
- ❑ Οι **δομικές μονάδες** μπορεί να είναι **άτομα, ομάδες ατόμων, ιόντων ή μορίων**.
- ❑ Ένα **πλέγμα Bravais** είναι ένα άπειρο σύνολο διακριτών σημείων με μια διάταξη και προσανατολισμό, που εμφανίζεται **ακριβώς ίδια** από οποιαδήποτε σημείο και αν παρατηρείται το πλέγμα.
- ❑ Ένα (τρισεπίστροφο) **πλέγμα Bravais** μπορεί να δημιουργηθεί από τρία θεμελιώδη διανύσματα α_1 , α_2 και α_3 και ένα σύνολο τριών ακεραίων n_1 , n_2 και n_3 , έτσι ώστε κάθε πλεγματοειδές σημείο, με διάνυσμα θέσης $\mathbf{r}$, να έχει τη μορφή :

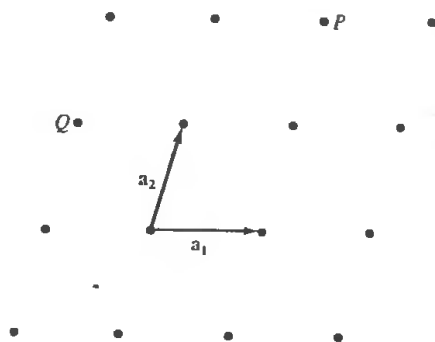
$$\vec{r} = n_1 \vec{\alpha}_1 + n_2 \vec{\alpha}_2 + n_3 \vec{\alpha}_3$$

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 16

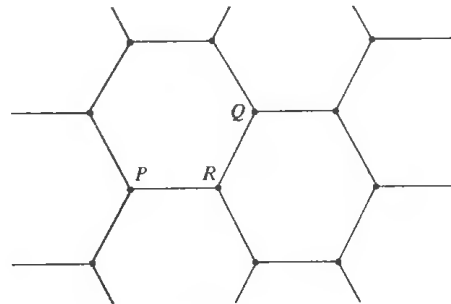
Πλέγμα Bravais 2D - Παραδείγματα



2D Πλέγμα Bravais

$$P = a_1 + 2a_2$$

$$Q = -a_1 + a_2$$



**Η κερήθρα δεν είναι
πλέγμα Bravais**

Η εικόνα που φαίνεται από τα
σημεία P και Q είναι διαφορετική
από αυτή στο R

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 17

The Nobel Prize in Physics 2010 was awarded jointly to

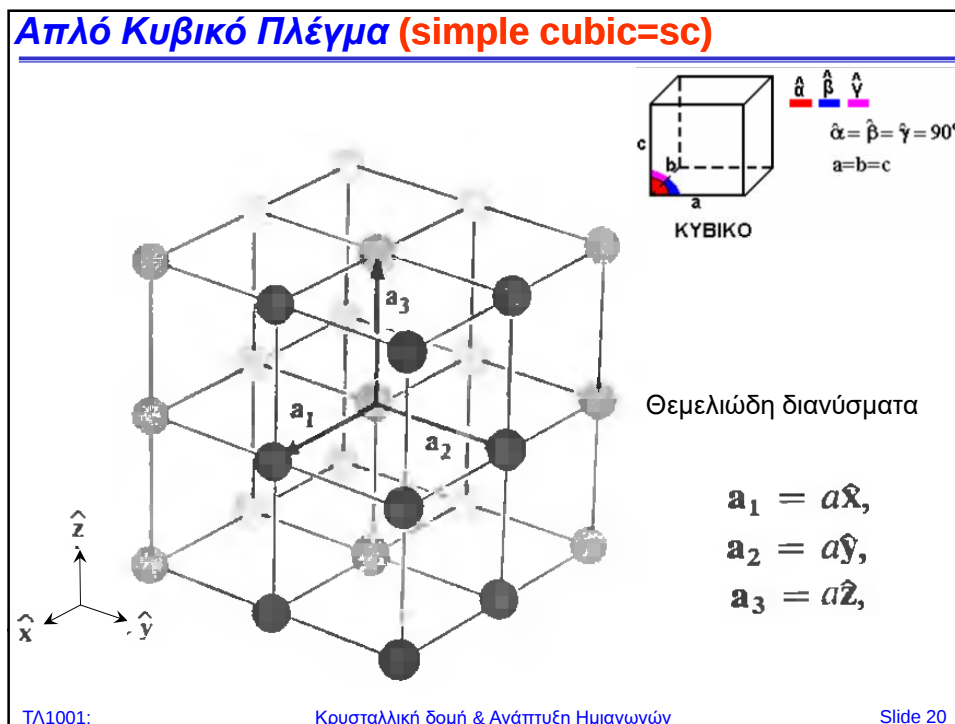
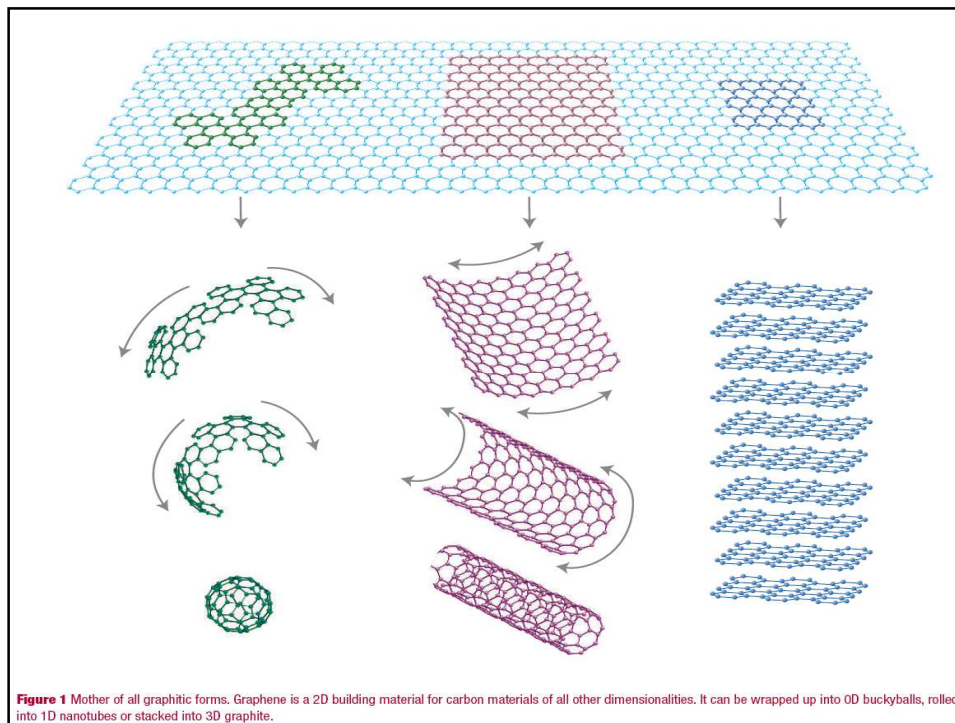
**Andre Geim
and
Konstantin Novoselov**

"for groundbreaking experiments regarding the two-dimensional material graphene"

ΤΛ1001:

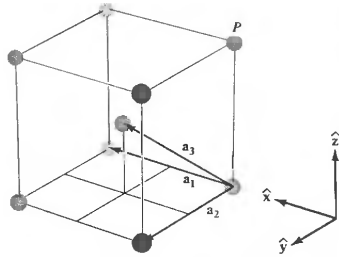
Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 18



Άλλα Σημαντικά Κυβικά πλέγματα

Χωροκεντρομένο
κυβικό πλέγμα
(body-centered-
cubic = bcc)



Ένα επιπλέον
πλεγματοσφαιρίδιο
στο
κέντρο του
κύβου + **sc**.

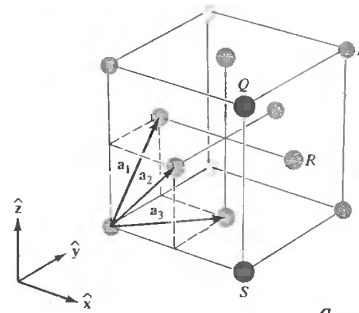
$$\mathbf{a}_1 = a\hat{x},$$

$$\mathbf{a}_2 = a\hat{y},$$

$$\mathbf{a}_3 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{y} + \hat{z}).$$

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Εδροκεντρωμένο
κυβικό πλέγμα
(face-centered-
cubic = fcc)



Πλεγματοσφαιρίδια
στις οκτώ γωνίες
και στο κέντρο
κάθε μιας από τις
έξι έδρες.

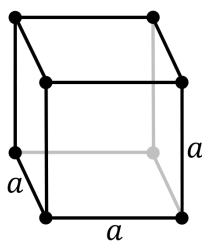
$$\mathbf{a}_1 = \frac{a}{2}(\hat{y} + \hat{z}),$$

$$\mathbf{a}_2 = \frac{a}{2}(\hat{z} + \hat{x}),$$

$$\mathbf{a}_3 = \frac{a}{2}(\hat{x} + \hat{y}).$$

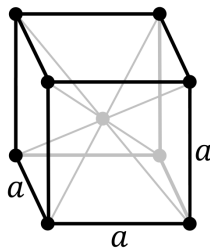
Μοναδιαίες κυψελίδες –Κυβικά πλέγματα

sc



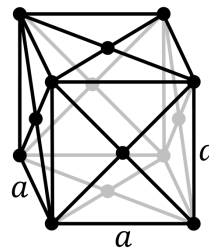
Θεμελιώδης
κυψελίδα

bcc



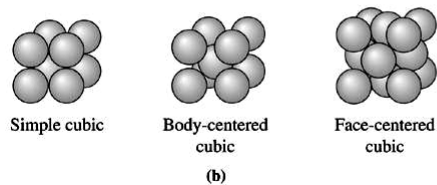
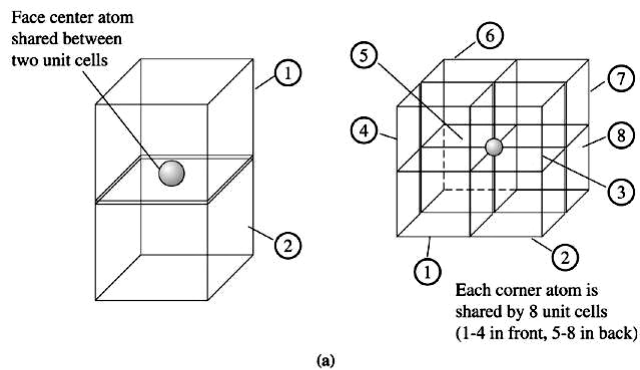
Συμβατική
κυψελίδα

fcc



Συμβατική
κυψελίδα

Κυβικά πλέγματα- Χαρακτηριστικά Μεγέθη



ΤΛ1001:

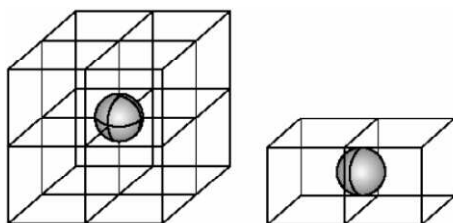
Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 23

Κυβικά πλέγματα- Χαρακτηριστικά Μεγέθη

Αριθμός ατόμων ανά μοναδιαία κυψελίδα - Υπολογισμός

- Στο κυβικό σύστημα, τα άτομα κορυφής θεωρούνται ότι μετέχουν κατά το $1/8$ του όγκου τους, τα άτομα στο κέντρο εδρών συμμετέχουν κατά $1/2$ του όγκου τους και τα εσωτερικά άτομα μετέχουν εξ ολοκλήρου



Πλέγμα	Άτομα / κυψελίδα
SC	1
bcc	2
fcc	4

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 24

Κρυσταλλική Δομή - Ορισμός

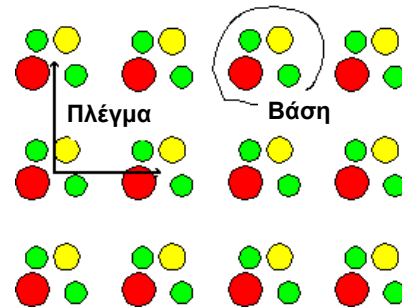
- Το **πλέγμα Bravais** συνοψίζει μόνο τα **γεωμετρικά χαρακτηριστικά** της περιοδικής δομής.
- Ένας φυσικός κρύσταλλος μπορεί να περιγραφεί πλήρως λαμβάνοντας ένα **πλέγμα Bravais** και προσθέτοντας μια **βάση**.

Κρυσταλλική Δομή = (ΠΛΕΓΜΑ BRAVAIS) + (ΒΑΣΗ)

Η βάση μπορεί να είναι:

- Ένα μόνο άτομο (σαν την περίπτωση πολλών κρυστάλλων απλών στοιχείων, π.χ. μέταλλα)
- Δύο ίδια άτομα (π.χ. **Si**, **Ge**, **C** (διαμάντι))
- Δύο διαφορετικά άτομα (**NaCl**, **GaAs**, ...)
- Τρία άτομα, ... έως ένα τεράστιο σύμπλεγμα μορίων όπως την περίπτωση των κρυσταλλικών πολυμερών.

Αυθαίρετη κρυσταλλική δομή



ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 25

Κρυσταλλική Δομή - Ορισμός

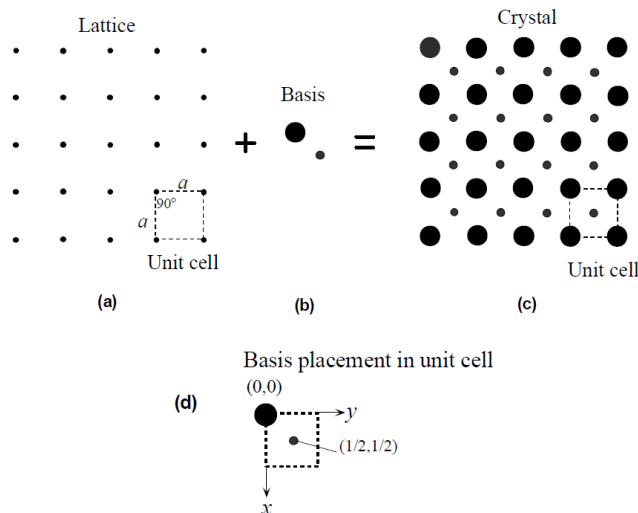


Fig. 1.70: (a) A simple square lattice. The unit cell is a square with a side a . (b) Basis has two atoms. (c) Crystal = Lattice + Basis. The unit cell is a simple square with two atoms. (d) Placement of basis atoms in the crystal unit cell.

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

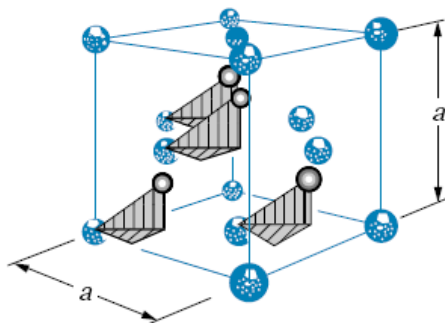
Slide 26

Πλέγμα Διαμαντιού

- Το σύνολο των σημείων στα οποία βρίσκονται τα άτομα άνθρακα (C) σε ένα κρύσταλλο διαμαντιού **δεν** αποτελούν πλέγμα Bravais.
- Η δομή όμως αυτή μπορεί να περιγραφεί ως ένα **εδροκεντρωμένο πλέγμα Bravais με βάση δύο σημεία** στις θέσεις $(0,0,0)$ και $(1/4, 1/4, 1/4)$.

Πλέγμα Διαμαντιού = (fcc) + (βάση δύο-σημείων)

**βάση: $(0, 0, 0)$
 $(1/4, 1/4, 1/4)$**



Μοναδιαία κυψελίδα της δομής διαμαντιού. Οι έγχρωμοι κύκλοι δείχνουν τα σημεία του πλέγματος fcc που αντιστοιχούν στα σημεία $(0,0,0)$ της βάσης. Οι μαύροι κύκλοι παριστάνουν τα σημεία $(1/4, 1/4, 1/4)$ της βάσης, τα οποία είναι τοποθετημένα κατά μήκος της διαγωνίου της κυβικής κυψελίδας και σε απόσταση ίση με το ένα τέταρτο του μήκους της, από κάθε σημείο του πλέγματος fcc. **Τέσσερα τέτοια σημεία** βρίσκονται εντός της μοναδιαίας κυψελίδας.

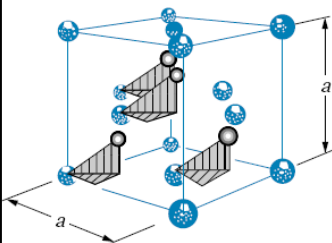
ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

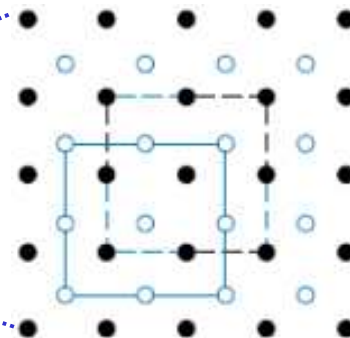
Slide 27

Πλέγμα Διαμαντιού

- Το πλέγμα διαμαντιού μπορεί επίσης να αναπαρασταθεί από δύο πλέγματα Bravais **fcc**, με ίδιες διαστάσεις, όπου το ένα διεισδύει στο χώρο του αλλού.
- Το δεύτερο υπό-πλέγμα **fcc** είναι μετατοπισμένο κατά μήκος της διαγωνίου της κυβικής κυψελίδας του πρώτου και κατά το ένα τέταρτο του μήκους της.



Πάνω όψη πλέγματος διαμαντιού, κατά μήκος οποιασδήποτε διεύθυνσης $\langle 100 \rangle$.



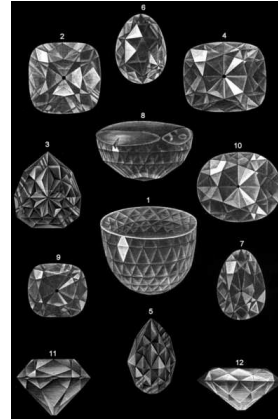
Οι έγχρωμοι κύκλοι δείχνουν τα σημεία ενός fcc πλέγματος και οι μαύροι κύκλοι δείχνουν το δεύτερο πλέγμα fcc, το οποίο διεισδύει στο πρώτο.

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 28

- Το γεγονός ότι τα άτομα σε έναν κρύσταλλο είναι τοποθετημένα σε προκαθορισμένα επίπεδα είναι σημαντικό για πολλές από τις μηχανικές, μεταλλουργικές και χημικές ιδιότητες του υλικού.
- Για παράδειγμα, οι κρύσταλλοι συχνά μπορούν να κοπούν κατά μήκος προκαθορισμένων ατομικών επιπέδων, δίνοντας εξαιρετικά επίπεδες επιφάνειες.
- Αυτό είναι ένα γνώριμο αποτέλεσμα στην κοπή των διαμαντιών για κοσμήματα: οι πλευρές του διαμαντιού εμφανίζουν ξεκάθαρα τις **συμμετρίες (τριγωνική, εξαγωνική και ορθογώνια)** των διασταυρούμενων επιπέδων στις διάφορες κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις.



Διάφορα διάσημα
διαμάντια

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 29

Δομή Διαμαντιού

- Στον κρύσταλλο διαμαντιού **και** στα δύο σημεία της βάσης υπάρχουν άτομα άνθρακα.
- Γενικά, με τον όρο δομή διαμαντιού εννοούμε:

Δομή Διαμαντιού $\Rightarrow$ κάθε πλέγμα διαμαντιού με όμοια άτομα βάσης

Στοιχεία που κρυσταλλώνονται στη δομή διαμαντιού

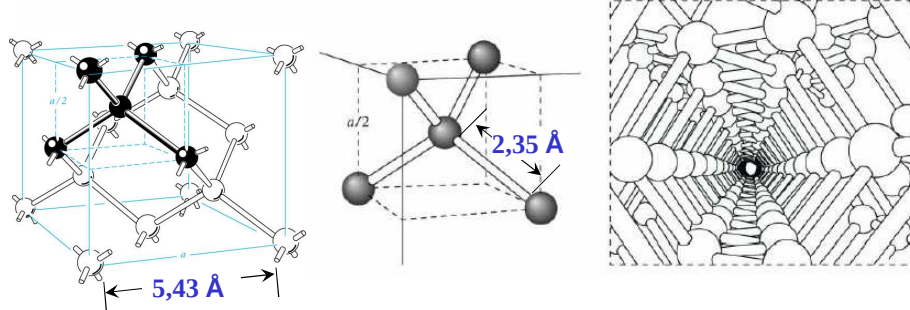
- Άνθρακας (C)
- Πυρίτιο (Si)
- Γερμάνιο (Ge)
- Κασσίτερος ($\alpha - \text{Sn}$)

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 30

Κρυσταλλική Δομή Πυριτίου



Η μοναδιαία κυψελίδα του κρυστάλλου πυριτίου (δομή διαμαντιού)

Άτομα / κυψελίδα : 8

Πυκνότητα ατόμων :

5×10^{22} άτομα Si / cm³

Οι τετραεδρικοί δεσμοί μεταξύ τεσσάρων πλησιέστερων γειτόνων.

(λεπτομέρειες στο επόμενο μάθημα)

Άποψη του κρυσταλλικού πλέγματος κατά μήκος ενός κρυσταλλογραφικού άξονα.

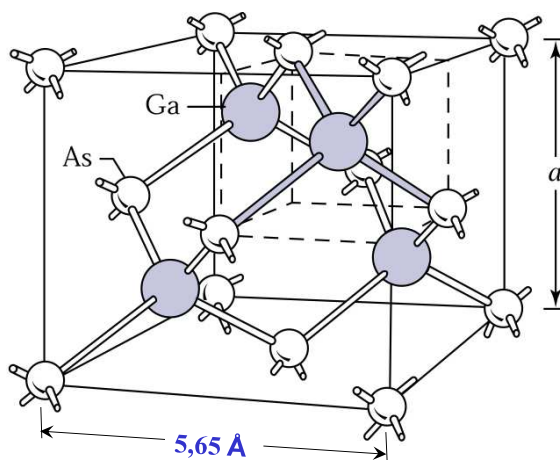
ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 31

Δομή “zinc blende”

πλέγμα διαμαντιού με διαφορετικά άτομα βάσης



- Στο πρώτο σημείο της βάσης, (0,0,0), τοποθετείται το ένα είδος ατόμου και στο δεύτερο σημεία της βάσης, (1/4,1/4,1/4), τοποθετείται το άλλο είδος ατόμου.

- Κάθε είδος ατόμου έχει τέσσερις πλησιέστερους γείτονες του άλλου είδους.

- Τέτοια δομή έχουν οι ενώσεις ημιαγωγών III-V: π.χ. GaAs, GaP, GaN.

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 32

THEORETICAL DENSITY, ρ

$$\rho = \frac{n A}{V_c N_A}$$

n : # atoms/unit cell
 A : Atomic weight (g/mol)
 V_c : Volume/unit cell (cm³/unit cell)
 N_A : Avogadro's number (6.023 x 10²³ atoms/mol)

Example: Copper

- crystal structure = FCC: 4 atoms/unit cell
- atomic weight = 63.55 g/mol (1 amu = 1 g/mol)
- atomic radius $R = 0.128$ nm (1 nm = 10⁻⁷ cm)

$$V_c = a^3; \text{ For FCC, } a = 4R\sqrt{2}; V_c = 4.75 \times 10^{-23} \text{ cm}^3$$

Result: theoretical $\rho_{\text{Cu}} = 8.89 \text{ g/cm}^3$

Compare to actual: $\rho_{\text{Cu}} = 8.94 \text{ g/cm}^3$

So there must be some real structure in addition !

TA1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 33

Determining the Density of BCC Iron

Determine the density of BCC iron, which has a lattice parameter of 0.2866 nm.

SOLUTION

$$\text{Atoms/cell} = 2, a_0 = 0.2866 \text{ nm} = 2.866 \times 10^{-8} \text{ cm}$$

$$\text{Atomic mass} = 55.847 \text{ g/mol}$$

$$\text{Volume of unit cell} = a_0^3 = (2.866 \times 10^{-8} \text{ cm})^3 = 23.54 \times 10^{-24} \text{ cm}^3/\text{cell}$$

$$\text{Avogadro's number } N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ atoms/mol}$$

$$\text{Density } \rho = \frac{(\text{number of atoms/cell})(\text{atomic mass of iron})}{(\text{volume of unit cell})(\text{Avogadro's number})}$$

$$\rho = \frac{(2)(55.847)}{(23.54 \times 10^{-24})(6.02 \times 10^{23})} = 7.882 \text{ g/cm}^3$$

TA1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 34

ΑΣΚΗΣΗ-1

Υπολογίστε την πυκνότητα του πυριτίου από την πλεγματική σταθερά του Si ($a = 5,43 \text{ \AA}$), το ατομικό βάρος του Si ($28,1 \text{ g/mole}$) και τον αριθμό Avogadro ($= 6,02 \times 10^{23} \text{ atoms/mole}$).

ΛΥΣΗ Η μοναδιαία κυψελίδα του πυριτίου περιέχει 8 άτομα οπότε,

$$\frac{8}{a^3} = \frac{8}{(5,43 \times 10^{-8})^3} = 5 \times 10^{22} \text{ atoms / cm}^3$$

$$\text{πυκνότητα} = \frac{5 \times 10^{22} (\text{atoms / cm}^3) \times 28,1 (\text{g / mole})}{6,02 \times 10^{23} (\text{atoms / mole})} = 2,33 \text{ g / cm}^3$$

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 35

ΑΣΚΗΣΗ

Υπολογίστε την πυκνότητα του Αρσενικούχου Γαλλίου από την πλεγματική σταθερά του GaAs ($a = 5,65 \text{ \AA}$), τα ατομικά βάρη των As και Ga ($= 74,9$ και $69,7 \text{ g/mole}$) και τον αριθμό Avogadro ($= 6,02 \times 10^{23} \text{ atoms/mole}$).

ΑΠΑΝΤΗΣΗ Πυκνότητα = 5.33 g/cm^3

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

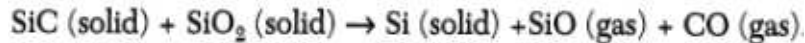
Slide 36

Βασικές τεχνικές ανάπτυξης κρυστάλλων Si

Πρώτη Ύλη: Χαλαζίας (SiO_2) - ένας σχετικά καθαρός τύπος άμμου που είναι γνωστός διεθνώς με το όνομα "Quartz".

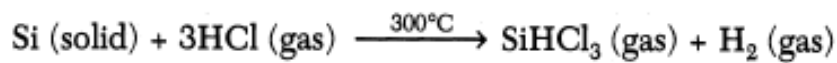
1 Παραγωγή MGS (Metallurgical-grade silicon)

Συνθέρμανση χαλαζία και μεταλλουργικού άνθρακα σε θερμοκρασία περίπου 2000°C επιτρέπει το σχηματισμό σχετικά καθαρού πυριτίου (MGS, ppm ακαθαρσίες)



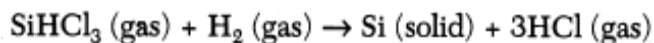
2 Παραγωγή τριχλωροσιλανίου (SiHCl_3)

Το MGS αντιδρά με υδροχλώριο για την παρασκευή καθαρού τριχλωροσιλανίου



3 Παραγωγή EGS (Electronic Grade Silicon)

Το τριχλωροσιλάνιο διοχετεύεται μέσα σε θάλαμο με ελεγχόμενο περιβάλλον υδρογόνου όπου διασπάται σε υψηλής καθαρότητας πολυκρυσταλλικό πυρίτιο (EGS, ppm ακαθαρσίες).

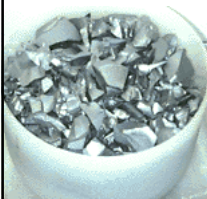


ΤΛ1001:

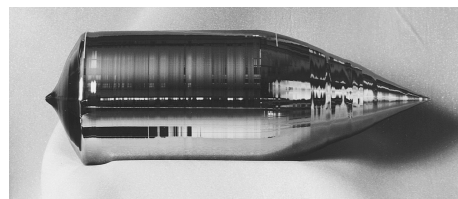
Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 37

Πολυκρυσταλλικό Si EGS → Ράβδοι μονοκρυσταλλικού Si



με τη μέθοδο
Czochralski



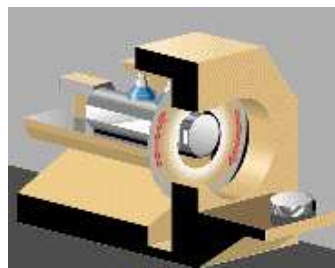
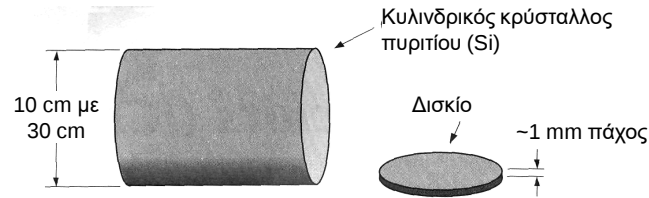
Μήκος = 1,5 m
Βάρος ~ 275 kg
Διάμετρος = 30 cm

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 38

Μετά την ανάπτυξη του κρυστάλλου, η ράβδος κόβεται σε δισκία (wafers) τα οποία έπειτα γυαλίζονται από την μια όψη.



(See animations of crystal polishing etc. at <http://www.memc.com/co-as-process-animation.asp>)

Όλα τα δομικά στοιχεία του κυκλώματος φτιάχνονται πάνω στην επιφάνεια του δισκίου Si.

Αναγνώριση των παραγόμενων δισκίων

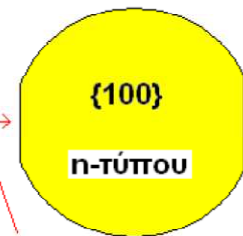


πρωτεύουσα τομή

δευτερεύουσα τομή (45°)

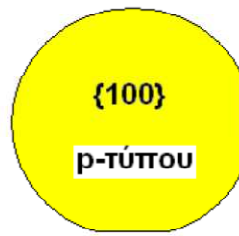


πρωτεύουσα τομή



πρωτεύουσα τομή

δευτερεύουσα τομή (180°)



πρωτεύουσα τομή

δευτερεύουσα τομή (90°)

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 40

Δείκτες Miller

Πρόκειται για ακέραιους αριθμούς που χρησιμεύουν στην περιγραφή του κρυσταλλικού πλέγματος. Αναφέρονται σε:

- κρυσταλλικά επίπεδα και οικογένειες επιπέδων
- κρυσταλλογραφικές διευθύνσεις και οικογένειες διευθύνσεων.

Η έννοια της *οικογένειας* αναφέρεται σε “ισοδύναμες” καταστάσεις, π.χ. παράλληλες έδρες ή διαγώνια επίπεδα κλπ. ανήκουν στην ίδια οικογένεια, αντίστοιχα.

Οι δείκτες Miller γράφονται μέσα σε:

- $()$ αν συμβολίζουν επίπεδα
- $\{ \}$ αν συμβολίζουν οικογένειες επιπέδων
- $[\]$ αν συμβολίζουν διευθύνσεις
- $\langle \rangle$ αν συμβολίζουν οικογένειες διευθύνσεων.

ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 41

Κρυσταλλικά Επίπεδα– Δείκτες MILLER

Πώς βρίσκω το επίπεδο (hkl) (όπου h, k, l οι δείκτες MILLER)

1. **Προσδιορίζω** τα σημεία τομής του επιπέδου με τους κρυσταλλικούς άξονες και εκφράζω τα σημεία τομής σαν ακέραια πολλαπλάσια των θεμελιωδών διανυσμάτων.
2. **Παίρνω** τους αντίστροφους των 3 ακεραίων που βρέθηκαν στο βήμα 1 και μετατρέπω τα κλάσματα που προκύπτουν στην μικρότερη ομάδα ακεραίων h, k, l .
3. **Συμβολίζω** το επίπεδο ως (hkl)

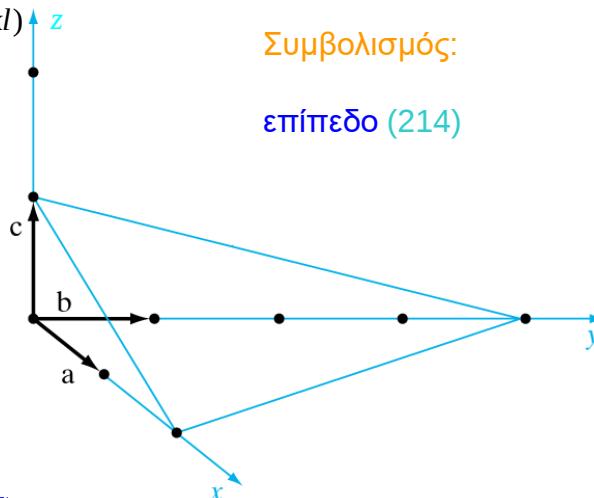
Σημεία τομής: 2, 4, 1

Αντίστροφοι: $\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, 1$

Μικρότερη ομάδα
ακεραίων: 2, 1, 4

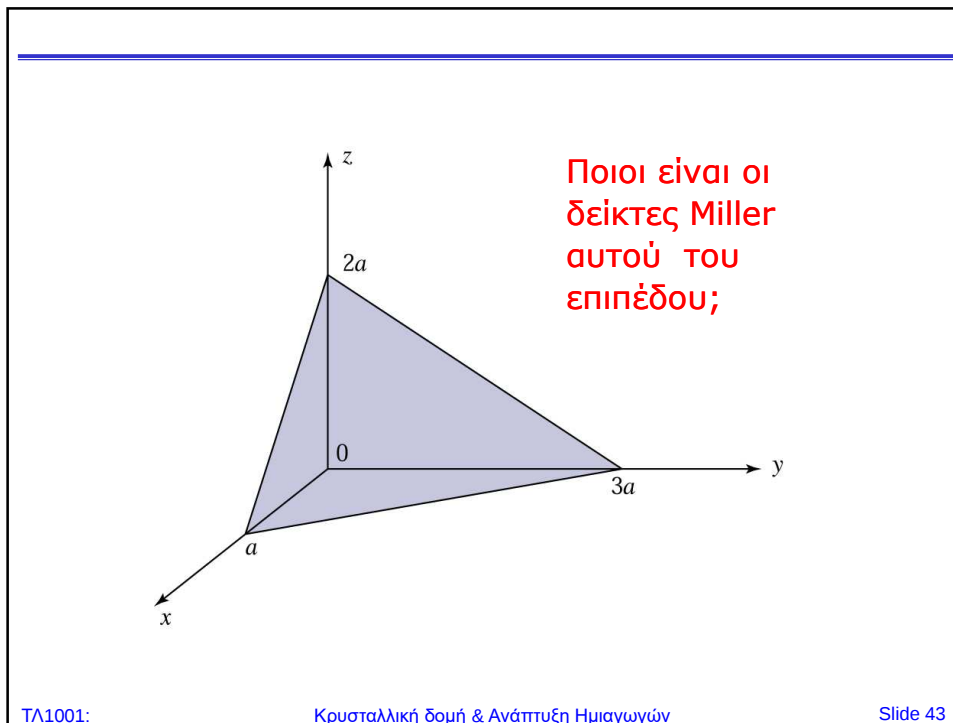
Συμβολισμός:

επίπεδο (214)



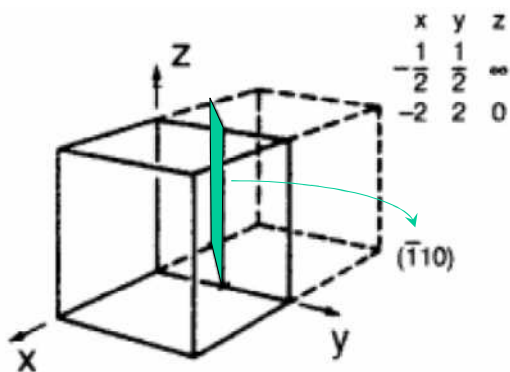
ΤΛ1001:

Κρυστ

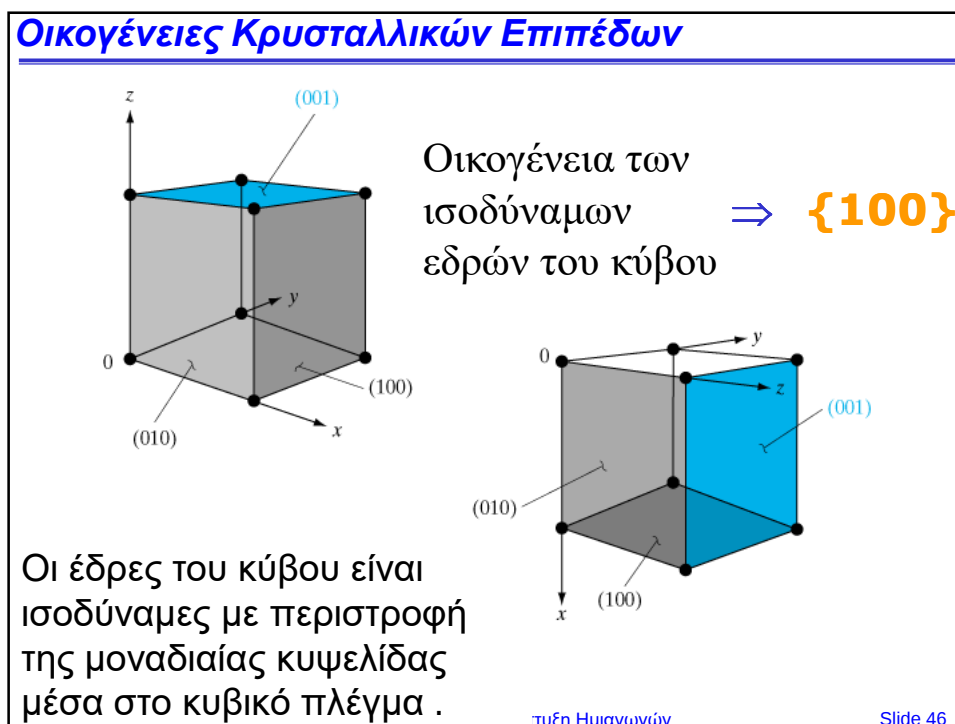
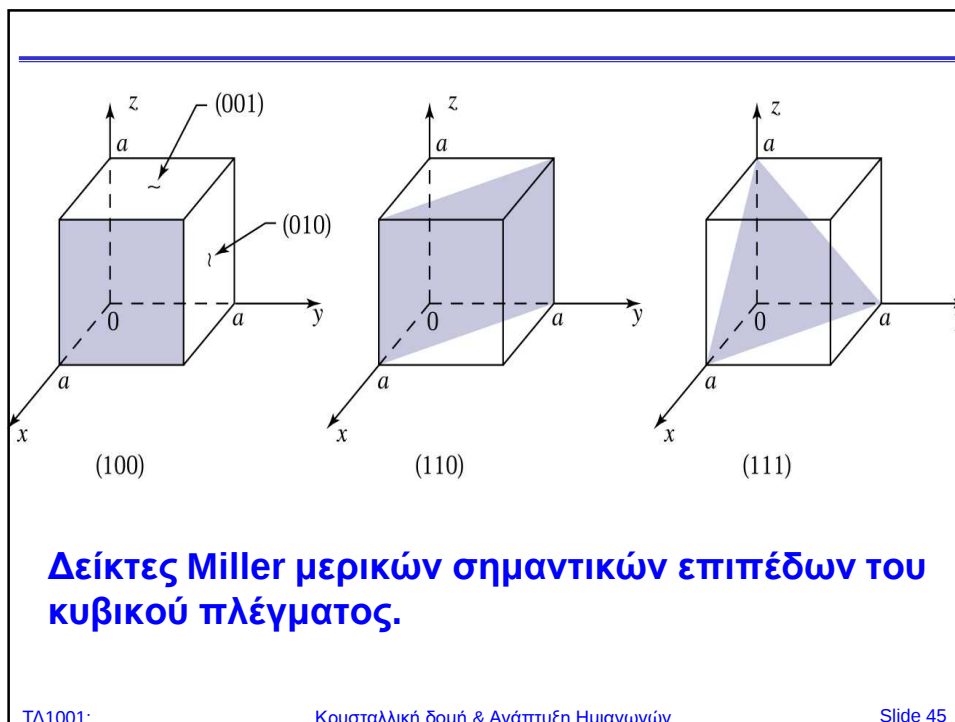


- Ο λόγος που παίρνουμε τους αντίστροφους των σημείων τομής του επιπέδου είναι για να αποφύγουμε τους απειρισμούς στο συμβολισμό.

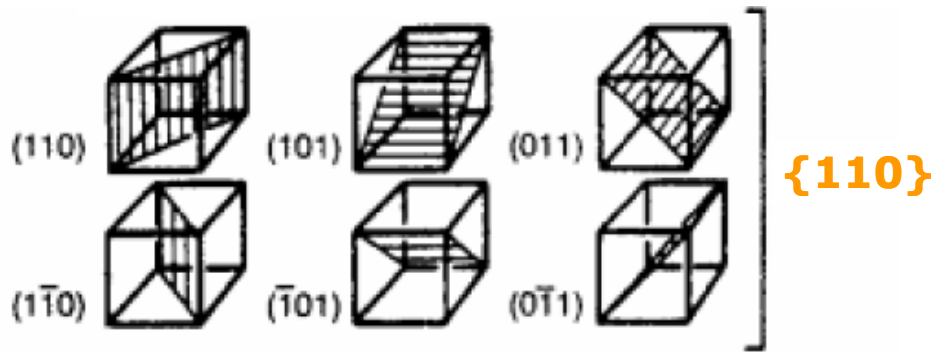
Παράδειγμα: Για ένα επίπεδο παράλληλο σε έναν κρυσταλλικό άξονα ένα σημείο τομής είναι άπειρο, αλλά ο αντίστροφος του σημείου λαμβάνεται ως μηδέν.



- Αν το επίπεδο διέρχεται από την αρχή, μπορεί να μετατοπιστεί σε παράλληλη θέση και να προσδιοριστούν οι δείκτες Miller.
- **Αρνητικό σημείο τομής:** το σύμβολο μείον (-) ενός αρνητικού ακεραίου τοποθετείται πάνω από τον αντίστοιχο δείκτη Miller, π.χ. ($h\bar{k}l$)



Οικογένειες Κρυσταλλικών Επιπέδων



ΤΛ1001:

Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 47

Κρυσταλλική Διεύθυνση – Προσδιορισμός

- Υπολογίζουμε τις συντεταγμένες (προβολές στους 3 άξονες) u , v , w διανύσματος παράλληλου προς τη συγκεκριμένη διεύθυνση, έτσι ώστε η αρχή και το πέρας του να ευρίσκονται πάνω σε έδρες της κυψελίδας.
- (α) Εάν προκύπτουν ακέραιοι αριθμοί, καθίστανται πρώτοι μεταξύ τους και οι προκύπτοντες ακέραιοι h , k , l είναι οι δείκτες Miller της διεύθυνσης.
(β) Εάν προκύπτουν κλάσματα, καθίστανται ομώνυμα και επαναλαμβάνεται η διαδικασία (α) για τους αριθμητές.
- Οι δείκτες Miller της ζητούμενης διεύθυνσης γράφονται $[h \ k \ l]$.

ΤΛ1001:

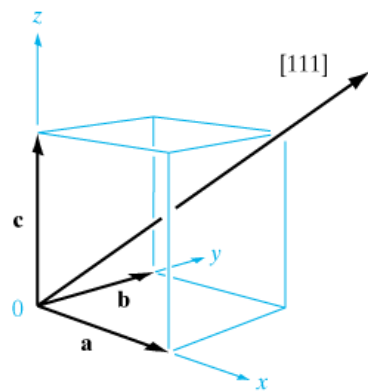
Κρυσταλλική δομή & Ανάπτυξη Ημιαγωγών

Slide 48

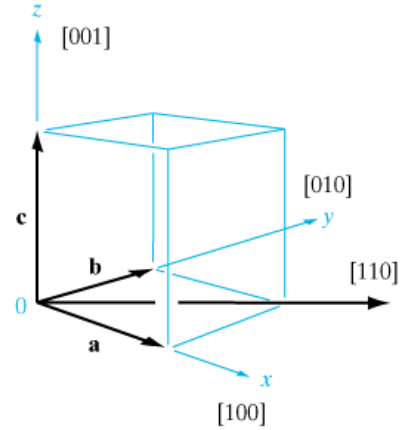
Κρυσταλλικές Διευθύνσεις – κυβικό πλέγμα

$[hkl]$: Δείκτες μέσα σε αγκύλες για διευθύνσεις

$[hkl]$ είναι κάθετη στο επίπεδο (hkl)



(a)



(b)