



Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Προπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών Τμήματος ΗΜΜΥ α  
Ακαδ. Έτος 2019-2020

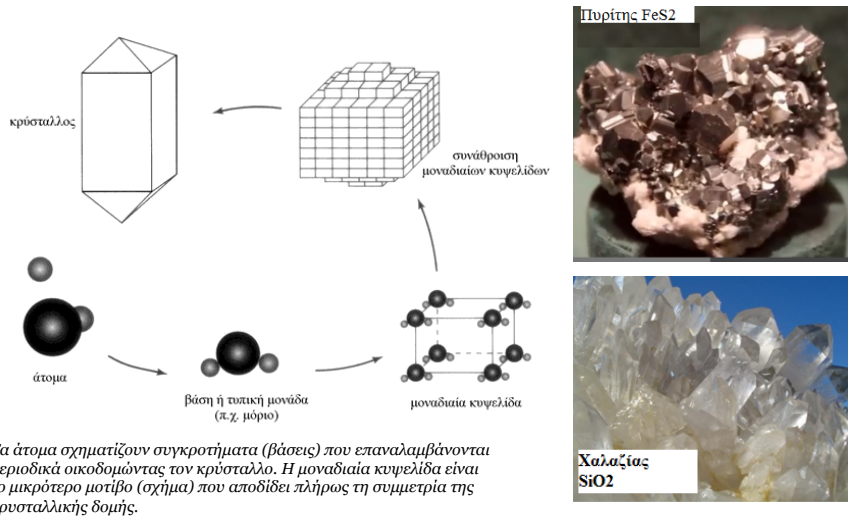
## ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΥΛΙΚΩΝ

Διάλεξη 3-Πρώτο μέρος  
Κρυσταλλική δομή  
Βασικές έννοιες

1

### Κρύσταλλοι

Μεγάλο μέρος της συμπακνωμένης ύλης (στερεά κατάσταση) βρίσκεται σε μορφή κρυστάλλων ή ακριβέστερα μονοκρυστάλλων, δηλ. κανονικών πολυέδρων, Π.χ. πολλά ορυκτά, αλάτι, πάγος κ.α. Πως μπορούμε να περιγράψουμε την εσωτερική δομή των κρυστάλλων;



2

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ ΔΙΑΛΕΞΗΣ

### ΣΤΟΧΟΣ: Ορισμός Βασικών εννοιών

- Περιοδικότητα
- Κρυσταλλική δομή
- Κρυσταλλικό πλέγμα
- Βάση κρυσταλλικής δομής
- Διανύσματα μετατόπισης
- Διανύσματα θέσης
- Μοναδιαία διανύσματα
- Πρωτογενή διανύσματα
- Μοναδιαία κυψελίδα
- Πρωτογενή κυψελίδα
- Πλέγματα Bravais
- Δείκτες Miller επιπέδων-διευθύνσεων

### Εργαλεία:

- Διανύσματα
- Στερεομετρία (αντίληψη του χώρου)

### ΣΚΟΠΟΣ

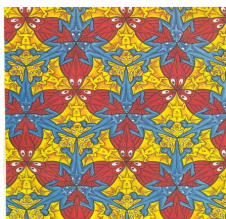
- Χρήση των ορισμών για την περιγραφή δομών και ατελειών στους πραγματικούς κρυστάλλους
- Υπολογισμός πυκνότητας μάζας κρυστάλλου
- Ορισμός επιπέδων και διευθύνσεων στους κρυστάλλους για να συνδεθούν με τα πειράματα χαρακτηρισμού

3

### Περιοδικότητα στο χώρο

#### Παραδείγματα

Πλακάκια πατώματος  
Κυψέλες μελισσών  
Κυψέλες δικτύου κινητών τηλεφώνων  
Υφάσματα  
Κύματα θάλασσας

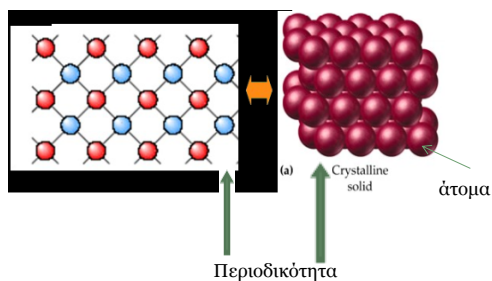


### Κρυστάλλος ή ακριβέστερα Μονοκρυστάλλος:

Αποτελείται από δομικές μονάδες, άτομα ή ιόντα ή μόρια (που συγκρατούνται με δεσμούς) σε τρισδιάστατη περιοδική διάταξη

### Χαρακτηριστικά:

συμμετρία /επανάληψη → περιοδικότητα



4

**Κρύσταλλος :Περιοδικότητα → παραδείγματα**  
 Δυνάμεις μεταξύ ατόμων  
 Δυναμικό πυρήνων → περιοδικό δυναμικό στον κρύσταλλο

Χρειαζόμαστε έναν μαθηματικό τρόπο περιγραφής των περιοδικών-κρυσταλλικών δομών

$$f(x+Tx, y+Ty) = f(x, y)$$

Περιοδικό δυναμικό σε μονοατομικό μεταλλικό κρύσταλλο λόγω της πυκνότητας φορτίου (σε 2 διαστάσεις)

5

**Κρύσταλλοι**  
 Μεγάλο μέρος της συμπυκνωμένης ύλης (στερεά κατάσταση) βρίσκεται σε μορφή κρυστάλλων ή ακριβέστερα μονοκρυστάλλων, δηλ. κανονικών πολυέδρων, Π.χ. πολλά ορυκτά, αλάτι, πάγος κ.α  
 Πως μπορούμε να περιγράψουμε την εσωτερική δομή των κρυστάλλων?

κρύσταλλος

άτομα

βάση ή τυπική μονάδα (π.χ. μόριο)

μοναδιαία κυψελίδα

συνάθροιση μοναδιαίων κυψελίδων

Τα άτομα σχηματίζουν συγκροτήματα (βάσεις) που επαναλαμβάνονται περιοδικά οικοδομώντας τον κρύσταλλο. Η μοναδιαία κυψελίδα είναι το μικρότερο μοτίβο (σχήμα) που αποδίδει πλήρως τη συμμετρία της κρυσταλλικής δομής.

6

**Περιοδικότητα:** Διαχωρισμός των υλικών ανάλογα με τον τρόπο που είναι διαταγμένα τα δομικά στοιχεία (άτομα ή ιόντα ή μόρια) :

- Μονοκρυσταλλική: πλήρης τάξη-περιοδικότητα σε όλο τον όγκο του στερεού
- Πολυκρυσταλλική: περιοδικότητα κατά περιοχές
- Άμορφη: πλήρης αταξία

**Σχηματική παράσταση σε 2 διαστάσεις**

μονοκρυσταλλική, κρυσταλλίτης, πολυκρυσταλλική, γ) άμορφη δομή

Πολυκρυσταλλικά υλικά:  
Μέγεθος κρυσταλλίτη >10 nm

Νανοκρυσταλλικά υλικά:  
Μέγεθος κρυσταλλίτη <10 nm

SiO<sub>2</sub> κρυσταλλικό (χαλαζίας) Callister SiO<sub>2</sub> άμορφο (γυαλί)

7

**Κρυσταλλική δομή**

**Άμορφη δομή (μη-κρυσταλλική)**

**Ενέργεια και διάταξη των δομικών μονάδων (άτομα ή μόρια ή ιόντα)**

- κρυσταλλικά: περιοδικότητα πικνότερα, χαμηλότερη ενέργεια
- μη κρυσταλλικά: τυχαία διάταξη, αραιότερα, υψηλότερη ενέργεια

Παράσταση δομής σε 2 διαστάσεις

ενέργεια, μήκος δεσμού, ενέργεια δεσμού, r

8

**Ορισμοί**

**Ανάγκη για απλούστευση της γεωμετρίας → Υποθέσεις:**

- Άπειρος όγκος
- Τέλεια μονοκρυσταλλική δομή
- Άτομα: Συμπαγείς, ακίνητες σφαίρες με καθορισμένη ακτίνα (στην πραγματικότητα τα άτομα δονούνται)

**Παράσταση δομής σε 2 διαστάσεις**

Περιοδική εμφάνιση δομής ενός ατόμου

Περιοδική εμφάνιση ομάδας ατόμων

9

**Πλέγμα – Βάση - Δομή**

- Πλέγμα: Άπειρη (επαναλαμβανόμενη) διάταξη γεωμετρικά ισοδύναμων σημείων (ονομάζονται δεσμοί), δηλ. κάθε σημείο περιβάλλεται από την ίδια ακριβώς γεωμετρία
- Βάση: Δομική μονάδα (άτομα, ιόντα, ομάδες), επιλέγεται έτσι ώστε να προκύψει το απλούστερο δυνατό πλέγμα
- Κρυσταλλική δομή: Η περιοδική διάταξη δομικών μονάδων

**ΠΛΕΓΜΑ + ΒΑΣΗ = ΚΡΥΣΤΑΛΛΙΚΗ ΔΟΜΗ**

Πλέγμα

Βάση

Κρυσταλλική δομή

Βάση

Η βάση σε κάθε δομή μπορεί να οριστεί με πολλούς τρόπους  
Το σημείο αναφοράς μπορεί να οριστεί με πολλούς τρόπους

Σημείωση: Η βάση μόνο στα μέταλλα αποτελείται από ένα άτομο

10

### Ορισμοί: Διανύσματα μετατόπισης-μοναδιαία/πρωτογενή διανύσματα

Περιγραφή πλέγματος (π.χ. δύο διαστάσεων) μέσω του **Διανύσματος μετατόπισης R**:  
 Γραμμική συνάρτηση μοναδιαίων διανυσμάτων **a, b**  $R = ma + nb$   $m, n$  ακέραιοι αριθμοί

**Πρωτογενή (θεμελιώδη) μοναδιαία διανύσματα:**  
 περιγραφή όλων των πλεγματικών σημείων

Παράδειγμα πρωτογενών διανυσμάτων:  $(a_1, b_1), (a_2, b_1)$

Τα **R, R'** συνδέουν τα σημεία του πλέγματος  
 Μπορούν να περιγραφούν όλες οι θέσεις των ατόμων σε σχέση με οποιοδήποτε σημείο του πλέγματος

$$r_x = R + r_1$$

Διανύσματα θέσης ατόμων βάσης  $r_1, r_2, r_3$  : περιγράφουν τη σχετική θέση των ατόμων της βάσης

**Θέση ατόμου σε 3D πλέγμα:**  $r_j = x_j a_1 + y_j a_2 + z_j a_3$ ,  
 όπου  $0 \leq x_j, y_j, z_j \leq 1$

11

### Περιγραφή με τη Μοναδιαία κυψελίδα- Πρωτογενής κυψελίδα

- Τα μοναδιαία διανύσματα που ξεκινούν και καταλήγουν σε πλεγματικά σημεία ορίζουν τους κρυσταλλικούς άξονες
- Σχηματίζουν μία **μοναδιαία κυψελίδα**
- Τα πρωτογενή μοναδιαία διανύσματα σχηματίζουν μία **πρωτογενή κυψελίδα που περιλαμβάνει: μόνο έναν κόμβο\*** ( $4/4=1$ ),

2D Μοναδιαίες κυψελίδες που προκύπτουν από κάθε ζευγάρι μοναδιαίων διανυσμάτων (Πρωτογενείς:  $(a_1, b_1), (a_2, b_1)$ )  
 Μη πρωτογενείς κυψελίδες:  $(a_1, b_2)$

Επιλογή μοναδιαίων διανυσμάτων : τα μικρότερα δυνατά πρωτογενή διανύσματα ή μη πρωτογενή διανύσματα

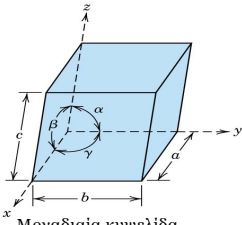
Στοιβαζοντας πολλές φορές τη μοναδιαία κυψελίδα (με μετατόπιση) πρέπει να έχουμε πλήρη κατάληψη της επιφάνειας (ή του χώρου σε 3 διαστάσεις)

12

**Μοναδιαία κυψελίδα -πρωτογενής κυψελίδα στο τρισδιάστατο χώρο**

Περιγραφή τρισδιάστατου πλέγματος μέσω του **Διανύσματος μετατόπισης R**:  

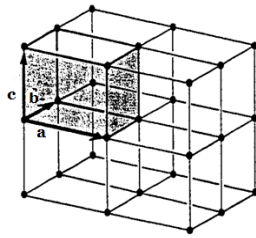
$$\mathbf{R} = m\mathbf{a} + n\mathbf{b} + q\mathbf{c}, \quad m,n,q \text{ ακέραιοι αριθμοί}$$



Μοναδιαία κυψελίδα

**Παράμετροι πλέγματος:**  
 Μοναδιαία διανύσματα **a, b, c**  
 αποτελούν τους κρυσταλλικούς άξονες αναφοράς  
 Μήκη μοναδιαίων διανυσμάτων (ή μήκη αξόνων) : *a, b, c*  
 Γωνίες μεταξύ αξόνων : *a, b, γ*

Όγκος κυψελίδας :  $V_C = |\mathbf{a} \times \mathbf{b} \cdot \mathbf{c}|$  (μικτό γινόμενο)



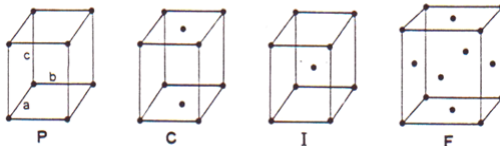
**Πρωτογενής μοναδιαία κυψελίδα:**  
 Σημεία μόνο στις κορυφές  $\Rightarrow$   
 Περιέχει ένα μόνο πλεγματικό σημεία  
 Έχει το μικρότερο όγκο

Στοιβάζοντας πολλές φορές τη μοναδιαία κυψελίδα (με μετατόπιση) πρέπει να έχουμε πλήρη κατάληψη χώρου, χωρίς κενά και επικαλύψεις

13

**Μοναδιαίες κυψελίδες**

• Για την περιγραφή του κρυστάλλου πολλές φορές βολεύει να ορίσουμε μία μη- πρωτογενή μοναδιαία κυψελίδα για να δείξουμε τη μεγαλύτερη συμμετρία (προσοχή στον υπολογισμό των ατόμων στην κυψελίδα)



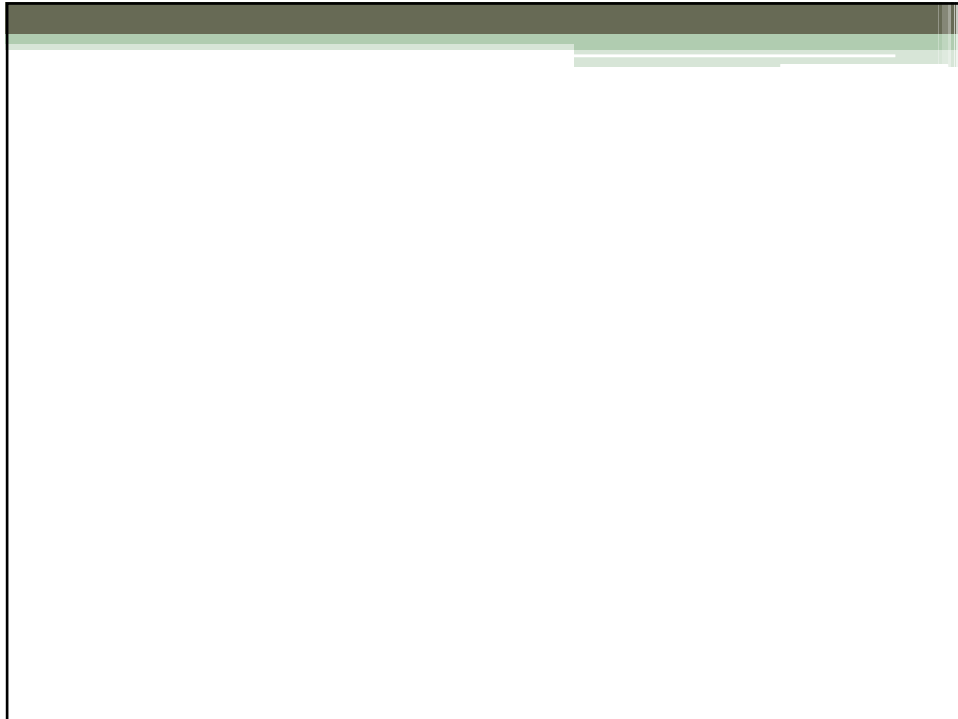
Πρωτογενής κυψελίδα P,  
 μονοεδρικά κεντρομένη κυψελίδα C,  
 Χώροκεντρομένη κυψελίδα I,  
 Εδροκεντρομένη κυψελίδα F  
 (οι κυψελίδες C, I, F είναι μοναδιαίες μη πρωτογενείς)

**Ο αριθμός των σημείων του πλέγματος που ανήκουν στην κυψελίδα είναι σημαντικός**  
**Τρόπος υπολογισμού:**

Για τρισδιάστατο πλέγμα: Σημεία εντός κυψελίδας + σημεία στις πλευρές / 2 + σημεία στις κορυφές / 8 + σημεία στις ακμές/2  
 Για διδιάστατο πλέγμα: Σημεία εντός κυψελίδας + σημεία στις πλευρές / 2 + σημεία στις κορυφές / 4 + σημεία στις ακμές/2

Στοιβάζοντας πολλές φορές τη μοναδιαία κυψελίδα (με μετατόπιση) πρέπει να έχουμε πλήρη κατάληψη χώρου

14



15

### Μοναδιαία κυψελίδα-υπολογισμός πυκνότητας υλικού

- Η μοναδιαία κυψελίδα επαναλαμβάνεται σε όλο το χώρο  $\Rightarrow$  η πυκνότητα κυψελίδας θα είναι η πυκνότητα υλικού
- Γνωρίζοντας τις διαστάσεις της μοναδιαίας κυψελίδας και τον αριθμό των ατόμων που περιέχει η κυψελίδα μπορούμε να υπολογίσουμε την ατομική πυκνότητα και την πυκνότητα μάζας ενός υλικού

$$\text{Ατομική πυκνότητα: } \rho_A = \frac{n}{V_C} \quad \text{Πυκνότητα μάζας: } \rho = \frac{n \cdot M}{V_C \cdot N_A}$$

όπου  $n$  ο αριθμός ατόμων ανά μοναδιαία κυψελίδα,  $V_C$  όγκος μοναδιαίας κυψελίδας

$M$  το ατομικό βάρος του ατόμου (σε gr),  $N_A$  ο αριθμός Avogadro =  $6.022 \cdot 10^{23}$  atoms/mole

$$\text{Όγκος κυψελίδας: } V_C = |(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{c}| \quad (\text{μικτό γινόμενο})$$

Αριθμός ατόμων ανά κυψελίδα=σημεία πλέγματος ανά κυψελίδα  $\times$  άτομα ανά βάση

16



**Πλέγματα Bravais 2D**

- Πλέγματα Bravais είναι μια ακολουθία σημείων που δημιουργούνται από το διάνυσμα μετατόπισης  $R$  σύμφωνα με το μοναδιαίο. Στις δύο διαστάσεις υπάρχουν 5 περιπτώσεις

<p><math> a_1  \neq  a_2 , \varphi \neq 90^\circ</math></p> <p>1</p>	<p><math> a_1  \neq  a_2 , \varphi = 90^\circ</math></p> <p>2</p>	<p><math> a_1  \neq  a_2 , \varphi \neq 90^\circ</math></p> <p>3</p>	<p>1. πλάγιο 2. ορθογώνιο 3. κεντρωμένο ορθογωνικό (ή ρομβικό) 4. εξαγωνικό 5. τετραγωνικό</p>
<p><math> a_1  =  a_2 , \varphi = 120^\circ</math></p> <p>4</p>	<p><math> a_1  =  a_2 , \varphi = 90^\circ</math></p> <p>5</p>	<p>σημεία</p>	

17

**Πλέγματα Bravais 3D**

Στον 3D χώρο έχουμε 14 διαφορετικές δομές ονομαζόμενες Πλέγματα Bravais  
 Προκύπτουν από: Τις 7 δυνατές δομές πλέγματος,  
 Τους 4 δυνατούς τρόπους τοποθέτησης κόμβων (κέντρωση)

Οι επτά δομές πλέγματος

<p><math>a, b, \gamma \neq 90^\circ</math></p> <p>Τρικλινής</p>	<p><math>a \neq 90^\circ, b, \gamma = 90^\circ</math></p> <p>Μονοκλινής</p>	<p><math>a = b \neq c</math></p> <p>Ορθορομβική</p>	<p><math>a = b = c</math></p> <p>Τετραγωνική</p>
<p><math>a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ</math></p> <p>Ρομβοεδρική</p>	<p><math>a = b = c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ</math></p> <p>Εξαγωνική</p>	<p><math>a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ</math></p> <p>Κυβική</p>	

Οι δυνητικοί τρόποι κέντρωσης

<p>Πρωτογενής κέντρωση (Primitive, P): Μόνο στις κορυφές</p>	<p><math>a, b, \gamma \neq 90^\circ</math></p>
<p>Ενδοκέντρωση (Body Centered, I): Κορυφές και κέντρο της κυβελόδας</p>	<p><math>a \neq b \neq c</math></p>
<p>Ολοεδρική κέντρωση (Face Centered, F): Κορυφές και κέντρα εδρών</p>	<p><math>a \neq b \neq c</math></p>
<p>Μονοεδρική κέντρωση (Base centered, C): Κορυφές και κέντρα 2 απέναντι εδρών</p>	<p><math>a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ</math></p>

18

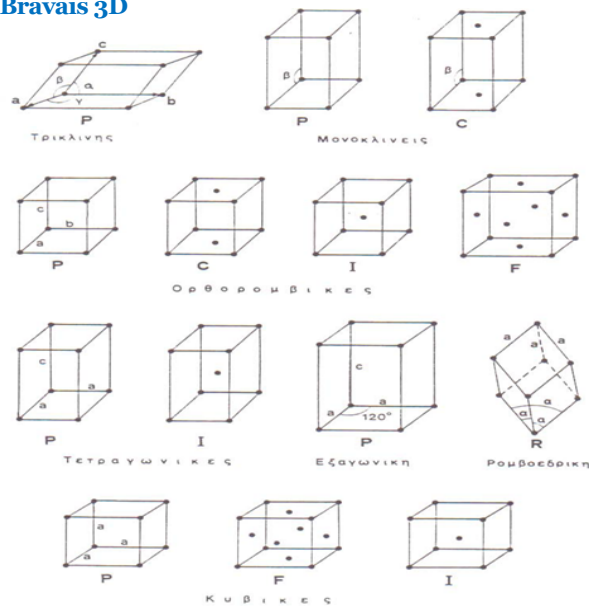
### Τα 7 κρυσταλλικά συστήματα

Σύστημα	Αριθμός Πλεγμάτων Bravais	Συμμετρία	Σταθερές κυψελίδας (άξονες και γωνίες)
Τρικλινές	1	κανένας άξονας	$a \neq b \neq c$ , $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$
Μονοκλινές	2	1 άξονας 2ης τάξης	$a \neq b \neq c$ , $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
Ορθορομβικό (Ρομβικό)	4	3 κάθετοι 2ης τάξης	$a \neq b \neq c$ , $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Τετραγωνικό	2	1 άξονας 4ης τάξης	$a = b \neq c$ , $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Κυβικό	3	4 άξονες 3ης τάξης	$a = b = c$ , $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
Ρομβοεδρικό (Τριγωνικό)	1	1 άξονας 3ης τάξης	$a = b = c$ , $\alpha = \beta = \gamma < 120^\circ, \neq 90^\circ$
Εξαγωνικό	1	1 άξονας 6ης τάξης	$a = b \neq c$ , $\alpha = \beta = 90^\circ$ , $\gamma = 120^\circ$

Το σύμβολο P σημαίνει κυψελίδα απλή (άτομα μόνο στις κορυφές), το C μονοεδρικά κεντρωμένη (άτομα και στο κέντρο δύο μόνο απέναντι πλευρών), το F (ή fcc) ολοεδρικά κεντρωμένη (άτομα και στο κέντρο όλων των πλευρών) και το I (ή bcc) ενδοκεντρωμένη (άτομα στο κέντρο της κυψελίδας).

19

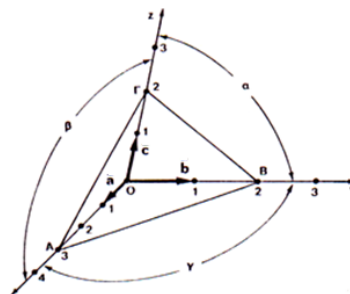
### Πλέγματα Bravais 3D



20

### Δείκτες Miller επιπέδων

Ο προσανατολισμός των κρυσταλλικών επιπέδων ή εδρών στα κρυσταλλικά υλικά δηλώνεται με το σύστημα των δεικτών Miller



Άξονες: x, y, z  
 Μοναδιαία διανύσματα: **a, b, c**  
 Σημεία τομής επιπέδου : x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>

1. Σημεία τομής του επιπέδου με τους άξονες των μοναδιαίων διανυσμάτων: x<sub>1</sub>, y<sub>1</sub>, z<sub>1</sub>
2. Αντίστροφα των σημείων τομής:  $\frac{1}{x_1}, \frac{1}{y_1}, \frac{1}{z_1}$
3. Αναγωγή στους τρεις μικρότερους ακέραιους (ομώνυμα, αριθμητές): h, k, l
4. Συμβολισμός: (hkl)

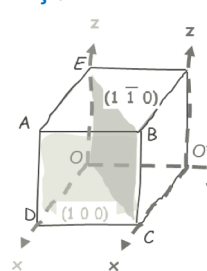
Αρνητική τομή, δηλ. αρνητικό πρόσημο: πάνω από το δείκτη Miller

- Όλα τα παράλληλα και ισαπέχοντα επίπεδα έχουν τους ίδιους δείκτες Miller
- Τα πλεγματικά επίπεδα που είναι ισοδύναμα λόγω συμμετρίας συμβολίζονται με { ... }, π.χ. τα έξι επίπεδα { 100 } : (100), (010), (001), (100), (010), (001)
- Η απόσταση μεταξύ δύο παράλληλων διαδοχικών επιπέδων, που περιγράφονται από τους ίδιους δείκτες (hkl) για ορθογώνιους άξονες:

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2}}}$$

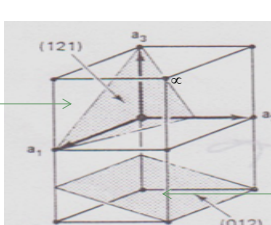
21

### Δείκτες Miller επιπέδων - Παραδείγματα



Εύρεση Δεικτών Miller για το επάνω επίπεδο

Άξονες	x	y	z
Τομές	1	1/2	1
Αντιστροφή	1	2	1
Αναγραφή σε παρενθέσεις	(121)		



Εύρεση Δεικτών Miller για το κάτω επίπεδο

Άξονες	x	y	z
Τομές	∞	1	1/2
Αντιστροφή	0	1	2
Αναγραφή σε παρενθέσεις	(012)		

Προσοχή!! Το επίπεδο δεν πρέπει να περνάει από την αρχή των αξόνων, π.χ. το επίπεδο OCBE  
 Τότε αλλάζουμε το σημείο αναφοράς από το O στο O\*  
 Για το επίπεδο ABCD (100) το σημείο αναφοράς είναι το O

22

### Δείκτες Miller κρυσταλλικής διεύθυνσης

	X	Y	Z
Προβολές	a/2	b	0c
Προβολές σε όρους a, b, c	1/2	1	0
Αναγωγή	1	2	0
Αναγραφή σε αγκύλες	[120]		

Όταν η διεύθυνση δεν περνάει από την αρχή των αξόνων, αλλάζουμε το σημείο αναφοράς π.χ. για τη διεύθυνση PQ, οι άξονες μεταφέρονται στο σημείο P

1. Θεωρείται ένα διάνυσμα στη διεύθυνση, να περνά από την αρχή των αξόνων (πρέπει να τελειώνει σε επιφάνεια).
2. Βρίσκονται οι προβολές του στους 3 άξονες των μοναδιαίων διανυσμάτων του πλέγματος
3. Οι 3 τιμές των προβολών (βάσει των παραμέτρων πλέγματος a, b και c) πολλαπλασιάζονται ή διαφρονούνται με ένα κοινό συντελεστή για να αποκτήσουν τη μικρότερη δυνατή ακέραια τιμή.
4. Συμβολισμός: [hkl]

Κάθε διάνυσμα μπορεί να μεταφερθεί παράλληλα μέσα στο κρυσταλλικό πλέγμα χωρίς τροποποίηση.

23

### Δείκτες Miller κρυσταλλικής διεύθυνσης : Παραδείγματα

Όταν η διεύθυνση δεν περνάει από την αρχή των αξόνων, αλλάζουμε το σημείο αναφοράς π.χ. για τη διεύθυνση PQ, η αρχή αξόνων μεταφέρεται στο σημείο P

$OA = 1/2 a + 1/2 b + 1 c$   
 $1/2, 1/2, 1$   
 $[1 \ 1 \ 2]$

$PQ = -1 a - 1 b + 1 c$   
 $-1, -1, 1$   
 $[\bar{1} \bar{1} 1]$

Στο κυβικό σύστημα η διεύθυνση [hkl] είναι κάθετη στο επίπεδο (hkl)

**Συμβολισμοί**

**[hkl]** διεύθυνση επιπέδου  
**<hkl>** σετ παράλληλων ή ισοδύναμων διευθύνσεων

**{hkl}** επίπεδο  
**{hkl}** σετ παράλληλων ή ισοδύναμων επιπέδων

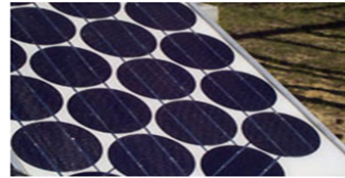
24

## Εφαρμογές στην Ενέργεια

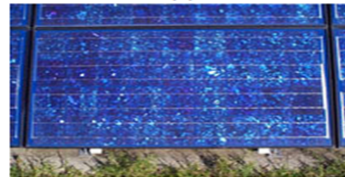
PV PANELS με Φωτοβολταϊκά στοιχεία από α) μονοκρυσταλλικό πυρίτιο και β) πολυκρυσταλλικό πυρίτιο γ) υμένα από άμορφο πυρίτιο

Τρεις γενιές φ/β στοιχείων, η τελευταία ακόμη σε ερευνητικό στάδιο:

1. Πλακίδια μονοκρυσταλλικού πυριτίου, αποτελούνται από επαφή pn (σχήμα α)  
Πολυκρυσταλλικού πυριτίου, αποτελούνται από επαφή pn (σχήμα β)
2. Βασίζεται στην τεχνολογία λεπτού υμενίου π.χ. Μικροκρυσταλλικό, άμορφο πυρίτιο (σχήμα γ)
3. Νέα υλικά: πολυμερή στοιχεία, κβαντικές κουκίδες, νανοδομές



(α)



(β)



(γ)

25



ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΓΙΑ ΤΗΝ  
ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ

26