فصل سوم: ساختار فلزات

فهرست مطالب

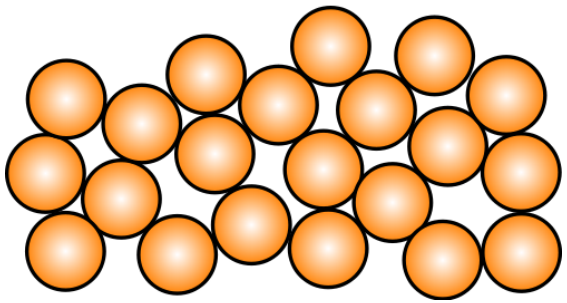
- اختلاف ساختارهای بلوری و غیر بلوری توضیح داده می شود
- شبکه واحد برای ساختارهای بلوری متداول معرفی می شود
- چگالی تئوری فلزات محاسبه می شود
- اندیسهای میلِر برای شناسایی شبکه واحد بیان می گردد
- تفاوت تک بلور و چند بلور در چیست؟
- مواد دارای خواص همسانگردی و ناهمسانگردی چه خصوصیاتی دارند؟

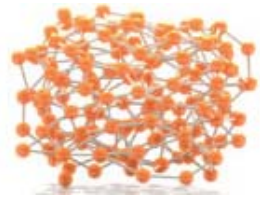
Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

تقسیم بندی مواد جامد بر اساس نظم اتمی

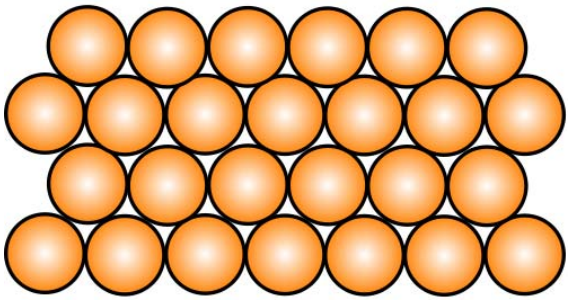
بلوری (کریستالی)
Crystalline

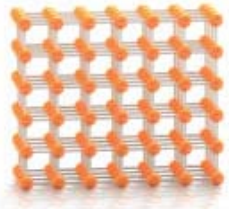
غیر بلوری (آمورف)
Amorphous





• اتمها در یک الگوی نامنظم جای گرفته اند



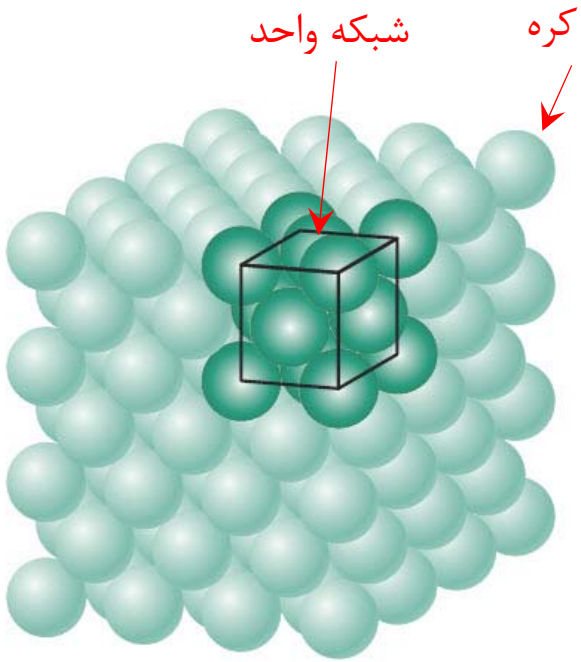


• اتمها در یک الگوی سه بعدی تکراری و منظم جای گرفته اند

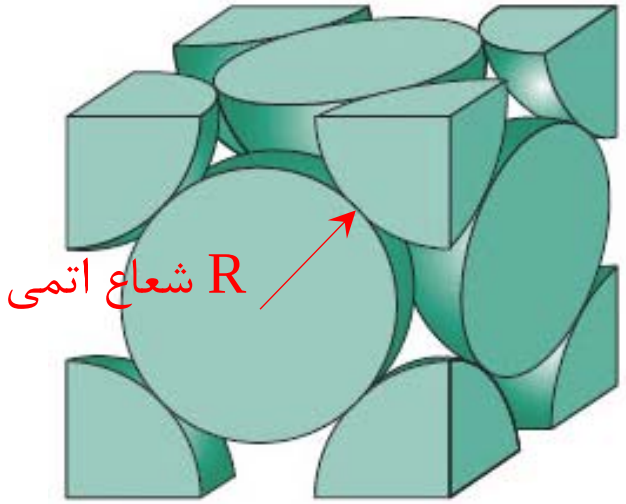
Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

شبکه (سلول) واحد Unit cell

با تجزیه ساختمان ماده یک بلوری به بخشهای کوچک و تکراری، شبکه واحد بوجود می آید که بررسی ساختمان ماده را آسانتر می کند

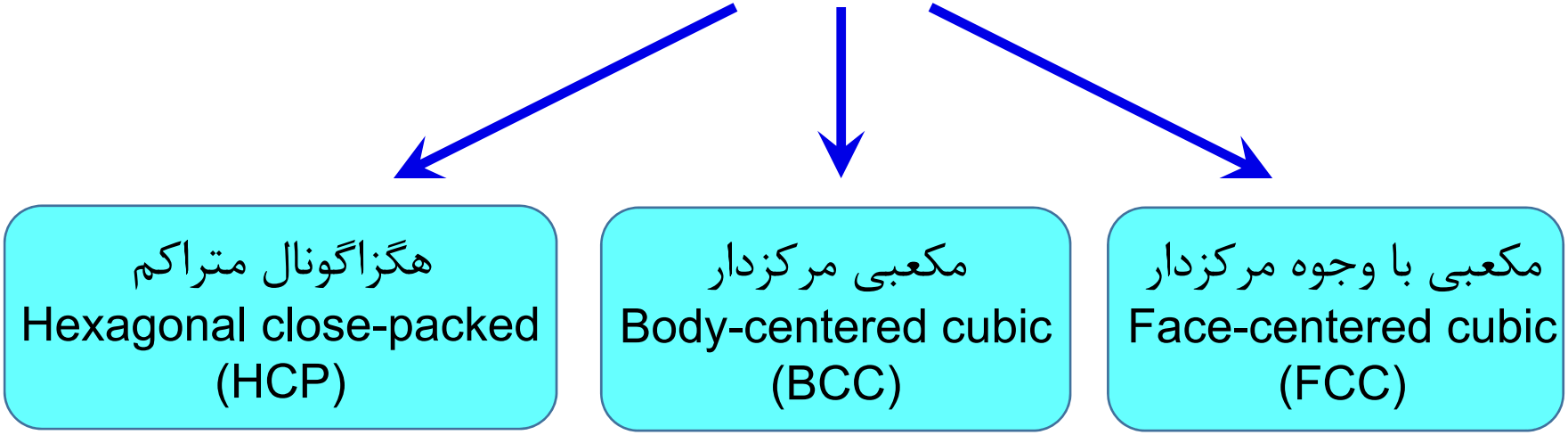


ساختمان سه بعدی
منظم از یک ماده



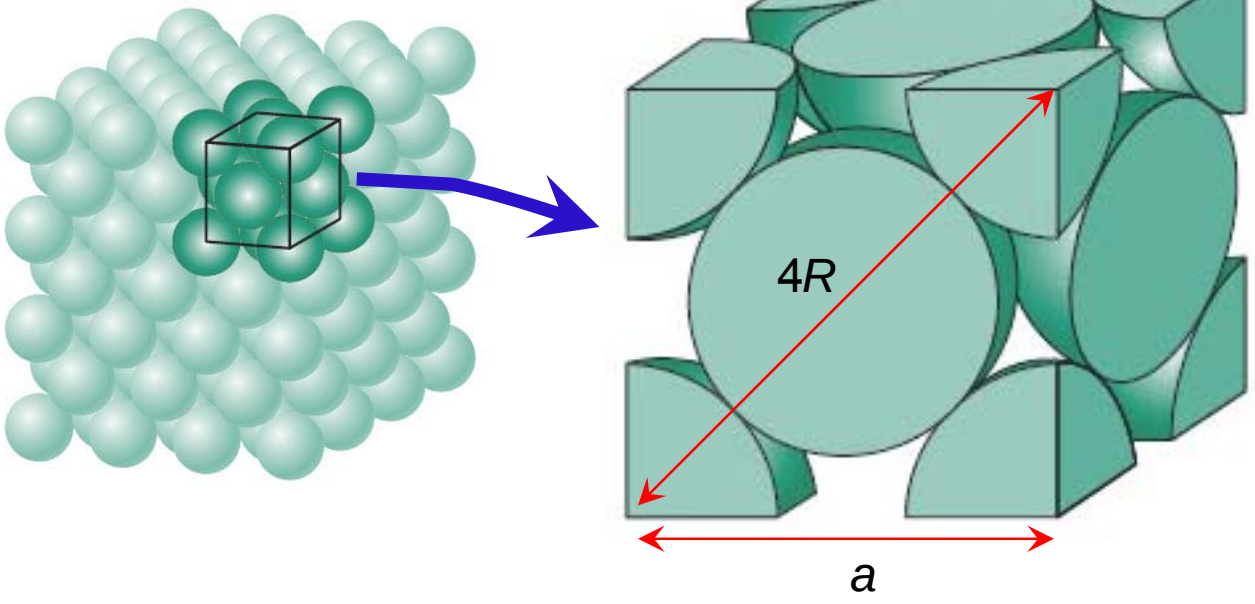
شبکه واحد

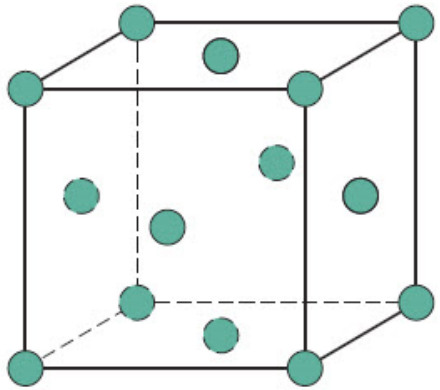
ساختارهای کریستالی متداول فلزات



مکعبی با وجوه مرکز دار (۱)

- شبکه واحد بیشتر فلزات از نوع مکعبی با وجوه مرکز دار است. اتمها در گوشه ها و مرکز سطوح قرار دارد
- فلزاتی مانند مس، آلومینیوم، نقره و طلا و ... ساختار FCC دارند





نمایش ساده شده
شبکه واحد FCC

$$4R = \sqrt{2}a \rightarrow a = 2\sqrt{2}R$$

مکعبی با وجوه مرکز دار (۲)

- تعداد اتمها N در شبکه واحد FCC برابر است با

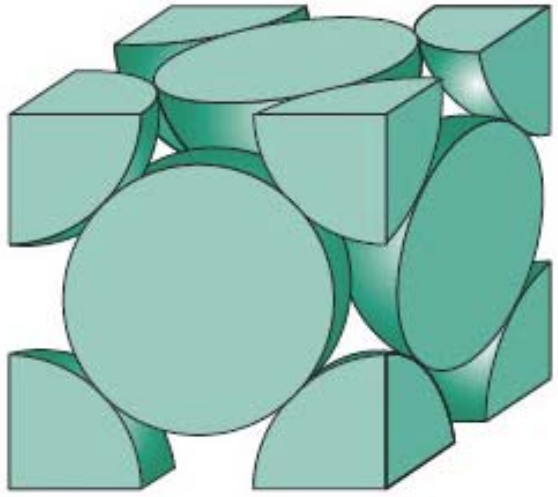
$$N = N_i + \frac{N_f}{2} + \frac{N_c}{8}$$

N : تعداد اتمها در شبکه واحد مکعبی

N_i : تعداد اتمهای داخلی

N_f : تعداد اتمهای سطحی

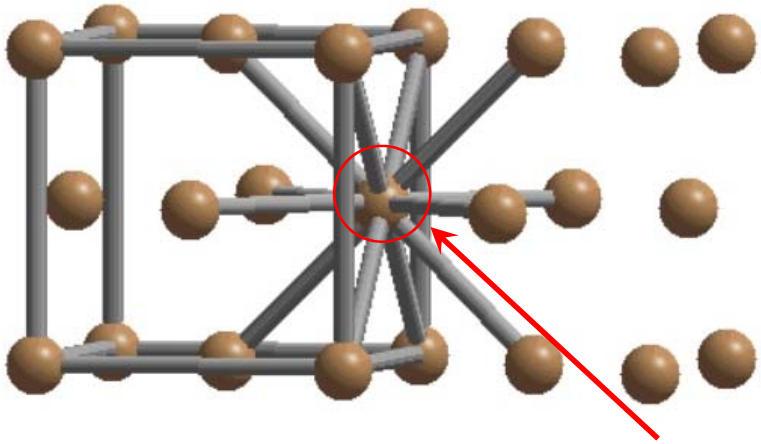
N_c : تعداد اتمهای گوشه



$$N = 0 + \frac{6}{2} + \frac{8}{8} = 4$$

مکعبی با وجوه مرکز دار (۳)

- هر اتم در شبکه با تعدادی اتم دیگر در تماس است. تعداد اتمهای در تماس با هم، عدد همسایگی Coordination number نامیده می شود
- عدد همسایگی برای هر اتم شبکه، یکسان است

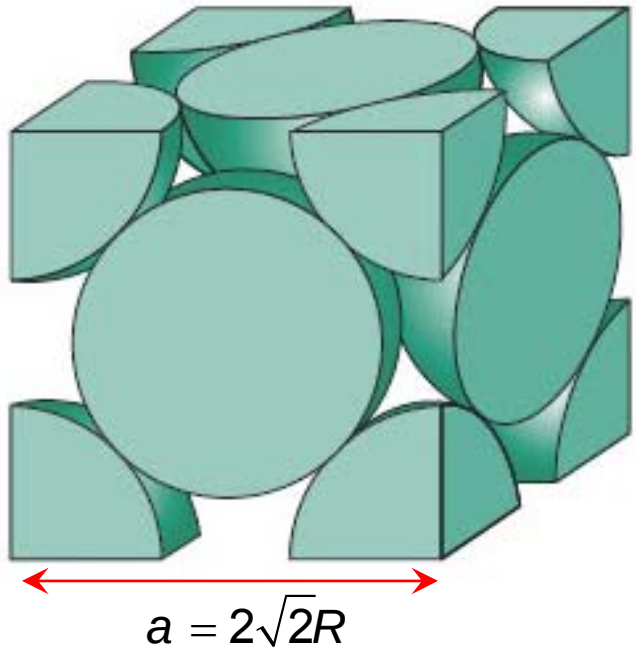


تعداد اتمهای همسایه در سطح ↓ 4 + تعداد اتمهای همسایه در سطح پشتی ↓ 4 + تعداد اتمهای همسایه با شبکه مجاور ↓ 4 = 12 عدد همسایگی در شبکه FCC

مکعبی با وجوه مرکز دار (۴)

- فاکتور تراکم اتمی Atomic packing factor (AFP)

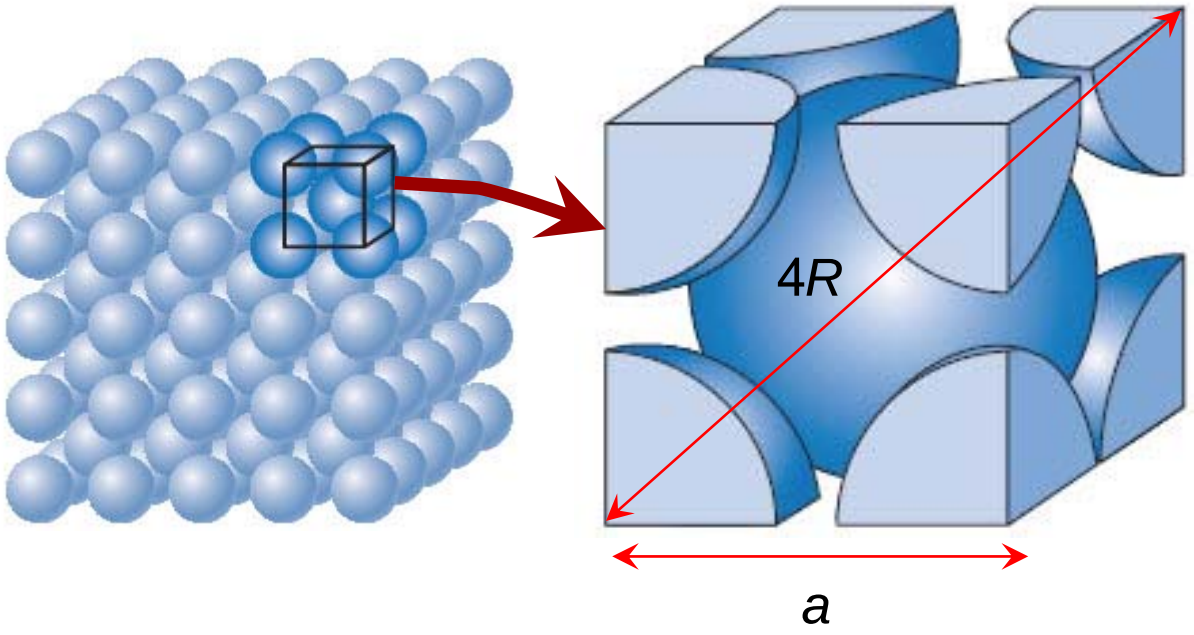
$$\text{فاکتور تراکم اتمی} = \frac{\text{حجم اتمها در شبکه واحد}}{\text{حجم شبکه واحد}}$$

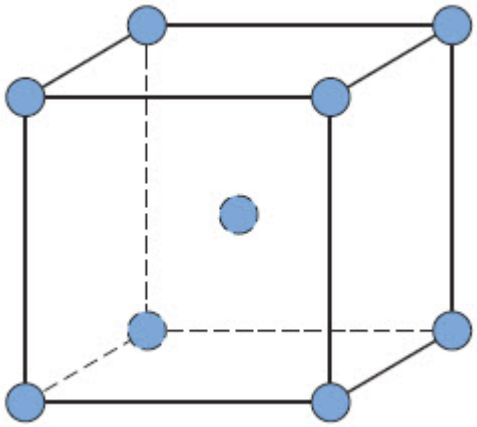


$$AFP = \frac{4 \times \frac{4}{3}\pi R^3}{a^3 = \left(2\sqrt{2}R\right)^3} = 0.74$$

مکعبی مرکز دار (۱)

- هشت اتم در گوشه مکعب و یک اتم در مرکز مکعب وجود دارد
- فلزاتی مانند کروم، مولیبدن، تنگستن و ... ساختار BCC دارند

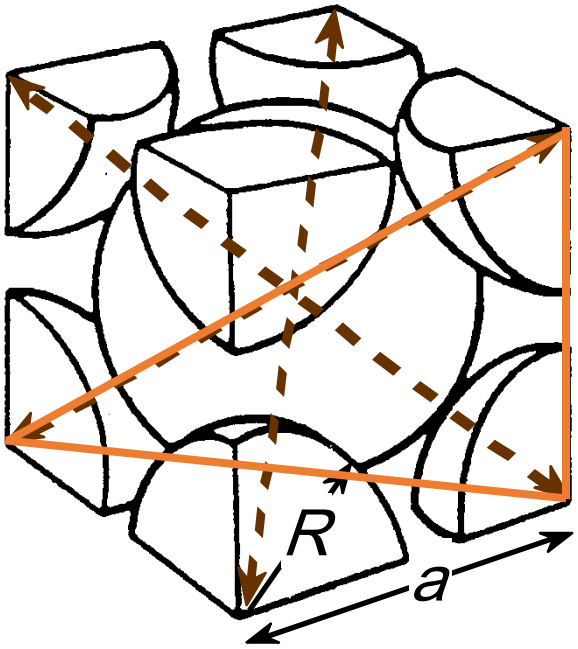


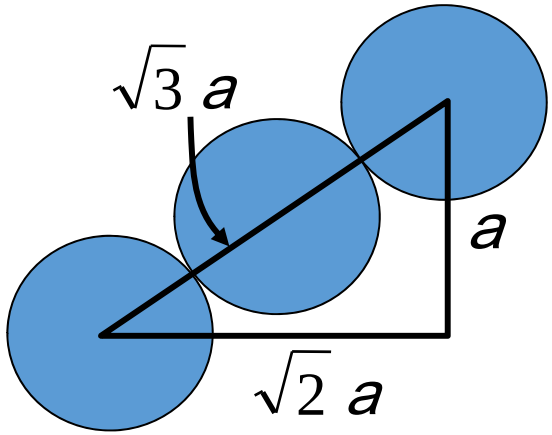


نمایش ساده شده
شبکه واحد BCC

مکعبی مرکز دار (۲)

- رابطه بین ضلع مکعب و شعاع اتمی



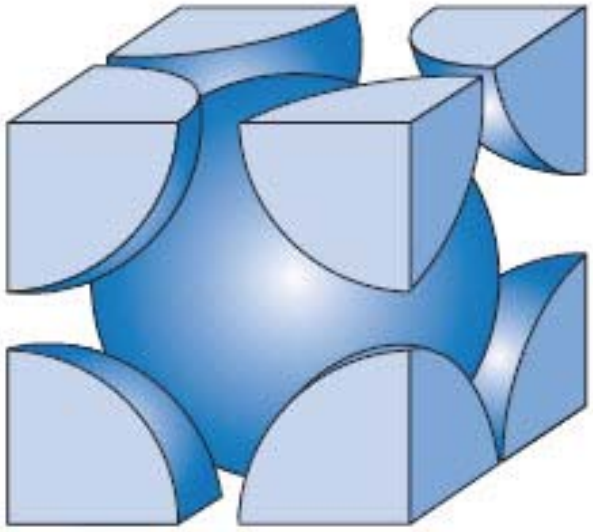


$$4R = \sqrt{a^2 + (\sqrt{2}a)^2} = \sqrt{3}a \rightarrow a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$

مکعبی مرکز دار (۳)

- تعداد اتمها N در شبکه واحد BCC برابر است با

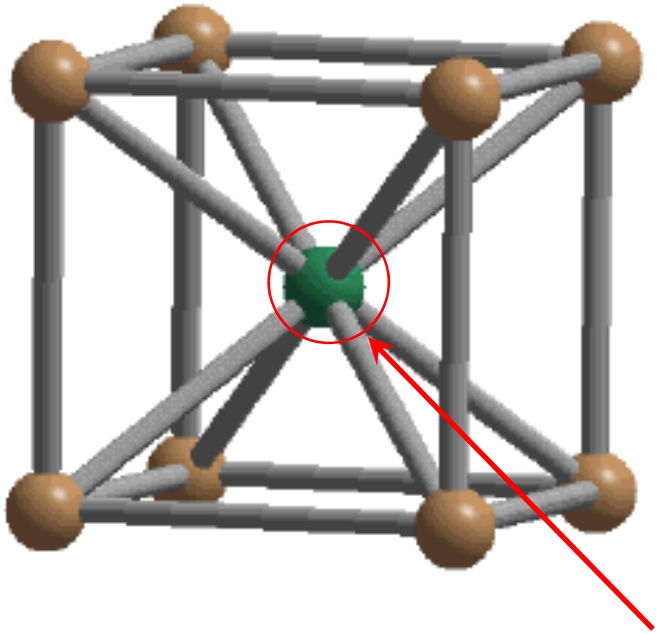
$$N = N_i + \frac{N_f}{2} + \frac{N_c}{8}$$



$$N = 1 + \frac{0}{2} + \frac{8}{8} = 2$$

مکعبی مرکز دار (۴)

- عدد همسایگی برای شبکه BCC



عدد همسایگی در شبکه BCC $= 4 + 4 = 8$

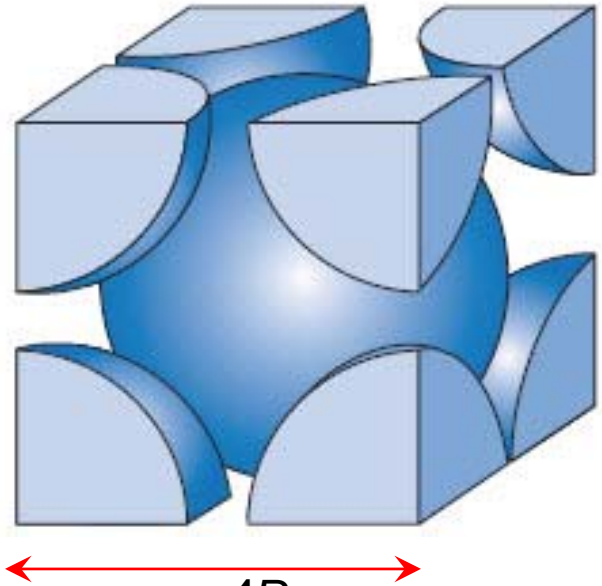
تعداد اتمهای همسایه در سطح پایینی ↓

تعداد اتمهای همسایه در سطح بالایی ↓

Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

مکعبی مرکز دار (۵)

- فاکتور تراکم اتمی

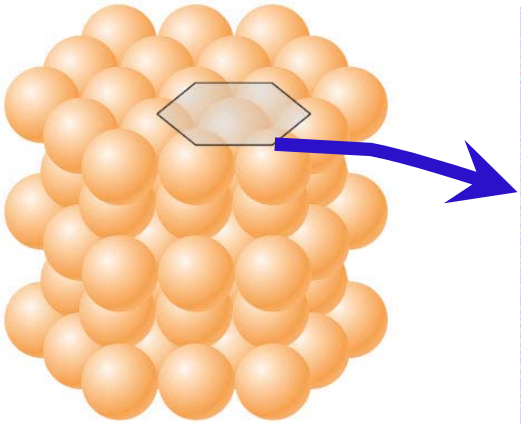


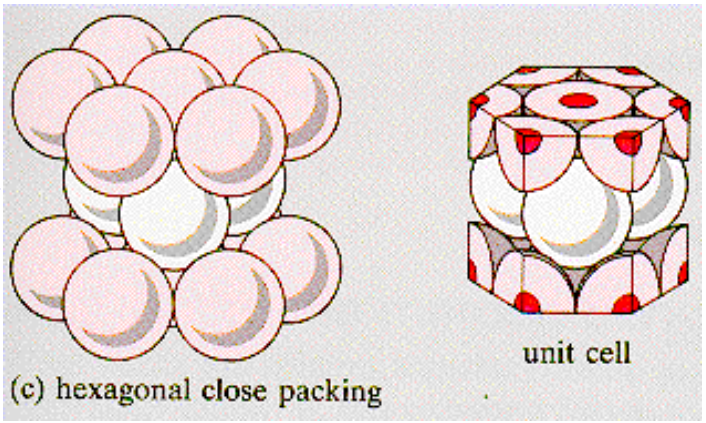
$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$$

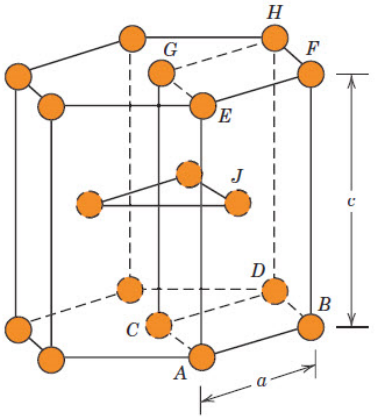
$$AFP = \frac{2 \times \frac{4}{3}\pi R^3}{a^3 = \left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^3} = 0.68$$

هگزاگونال متراکم (۱)

- ساختار برخی مواد شش وجهی (هگزاگونال) است. در صفحات بالا و پایین، شش اتم در گوشه و یک اتم در مرکز قرار دارد. در صفحه میانی سه اتم جای دارد
- فلزاتی مانند کبالت، روی، منیزیم، تیتانیوم و ... ساختار HCP دارند







نمایش ساده شده
شبکه واحد HCP

هگزاگونال متراکم (۲)

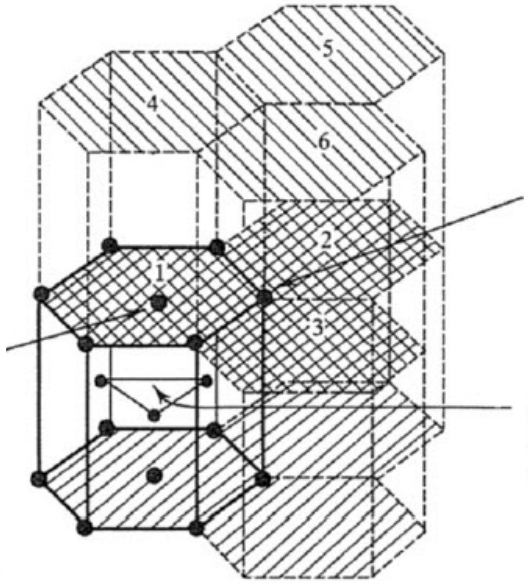
$$N = 3 + \frac{2}{2} + \frac{12}{6} = 6$$

تعداد اتمهای داخل شبکه

تعداد اتمهای سطحی

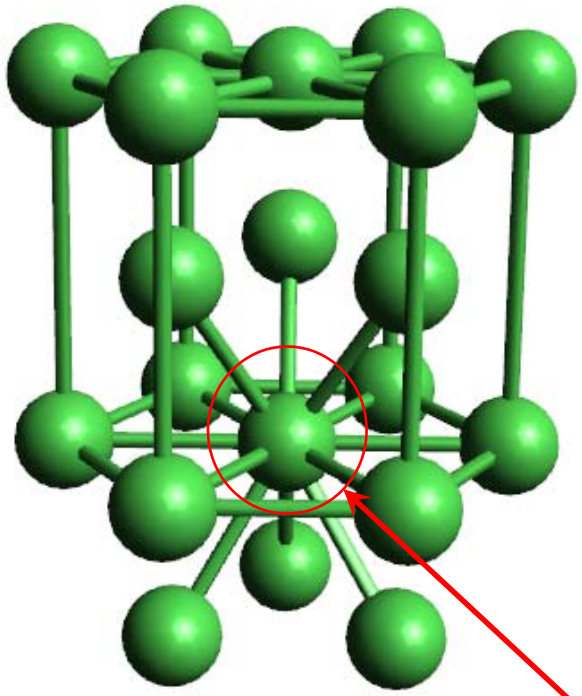
تعداد اتمهای گوشه

- تعداد اتمها N در شبکه واحد HCP
- هر اتم گوشه، مشترک با شش شبکه واحد است
- هر اتم سطحی، مشترک با دو شبکه واحد است



هگزاگونال متراکم (۳)

- عدد همسایگی برای شبکه HCP



عدد همسایگی در شبکه HCP $= 6 + 3 + 3 = 12$

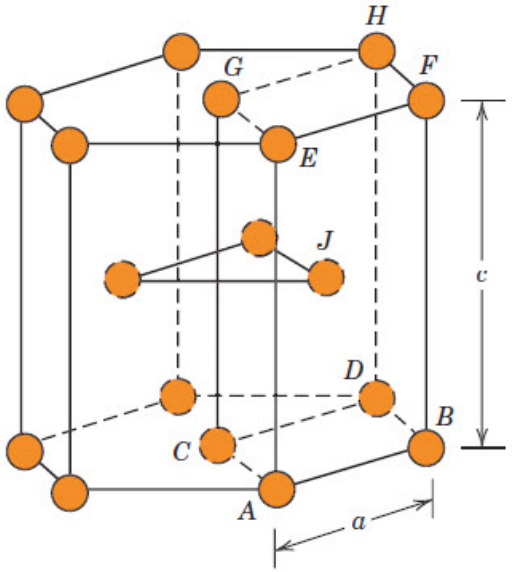
تعداد اتمهای همسایه در صفحه

تعداد اتمهای همسایه در سطح پایینی

تعداد اتمهای همسایه در سطح بالایی

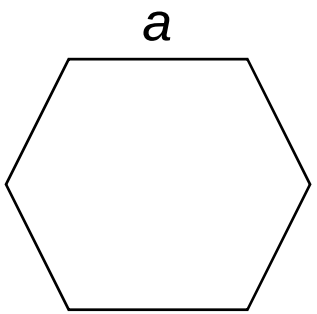
Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

هگزاگونال متراکم (۴)



- فاکتور تراکم اتمی

$$a = 2R, \quad \frac{c}{a} = 1.633$$



$$\text{مساحت قاعده شش ضلعی منتظم} = \frac{6\sqrt{3}a^2}{4}$$

$$\text{حجم شبکه} = \frac{6\sqrt{3}a^2}{4} \times c = \frac{6\sqrt{3}\,(2R)^2}{4} \times 1.633 \times 2R = 33.94R^3$$

$$AFP = \frac{6 \times \frac{4}{3}\pi R^3}{33.94R^3} = 0.74$$

چگالی تئوری فلزات

چگالی تئوری با دانستن شبکه کریستالی محاسبه می شود

$$\rho = \frac{nA}{V_C N_A}$$

ρ : چگالی

n : تعداد اتمها در شبکه

A : جرم اتمی

V_C : حجم شبکه

N_A : عدد آووگادرو 6.023×10^{23} atom/mol

مثال: محاسبه چگالی تئوری

مس دارای شعاع اتمی $R = 0.128nm = 0.128 \times 10^{-9} m = 1.28 \times 10^{-8} cm$ و جرم اتمی $63.5 g / mol$ می باشد. شبکه واحد مس از نوع *FCC* می باشد. چگالی تئوری آن را محاسبه نمایید

حل:

تعداد اتمهای مس: $N=4$

حجم شبکه واحد مس: $V_C = \left(2\sqrt{2}R\right)^3 = 16\sqrt{2}R^3$

$$\rho = \frac{nA}{V_C N_A} = \frac{(4 atoms)(63.5 g / mol)}{\left[16\sqrt{2}\left(1.28 \times 10^{-9} cm\right)^3\right]\left(6.023 \times 10^{23} atoms / mol\right)} = 8.98 g / cm^3$$

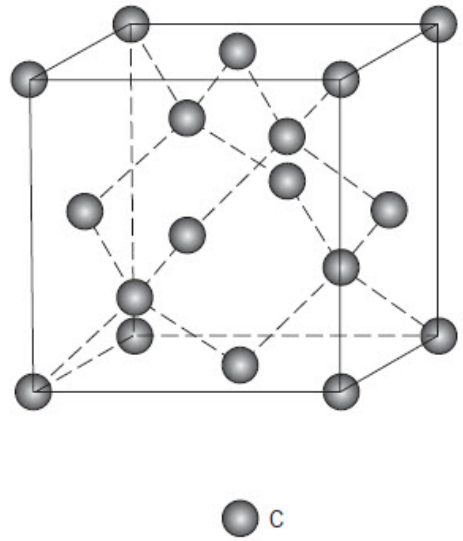
چگالی اندازه گیری شده مس: $8.94\ g/cm^3$

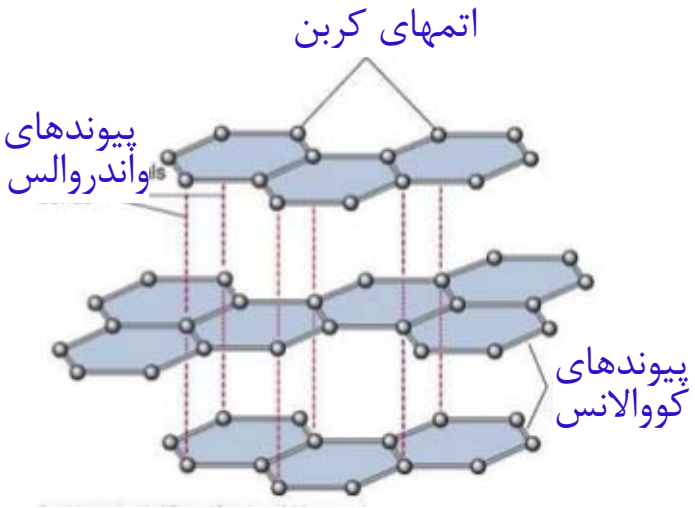
Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

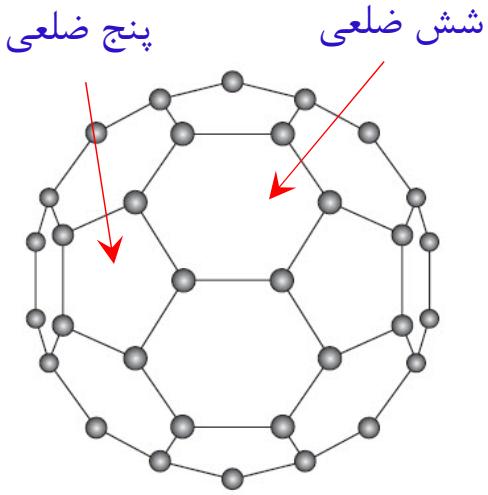
حالتهای کربن

کربن یک ماده پُلی مورفیسم یا چند شکلی (Polymorphism) است و به اشکال زیر وجود دارد

الماس Diamond	گرافیت Graphite	فیولِرِن Fullerene



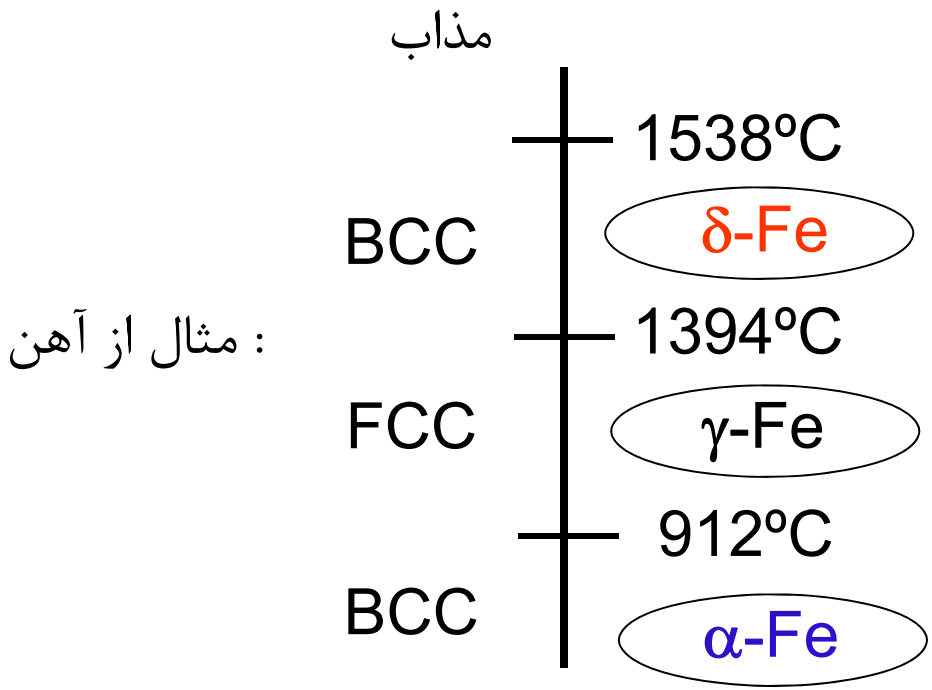




C60

آلوتروپی

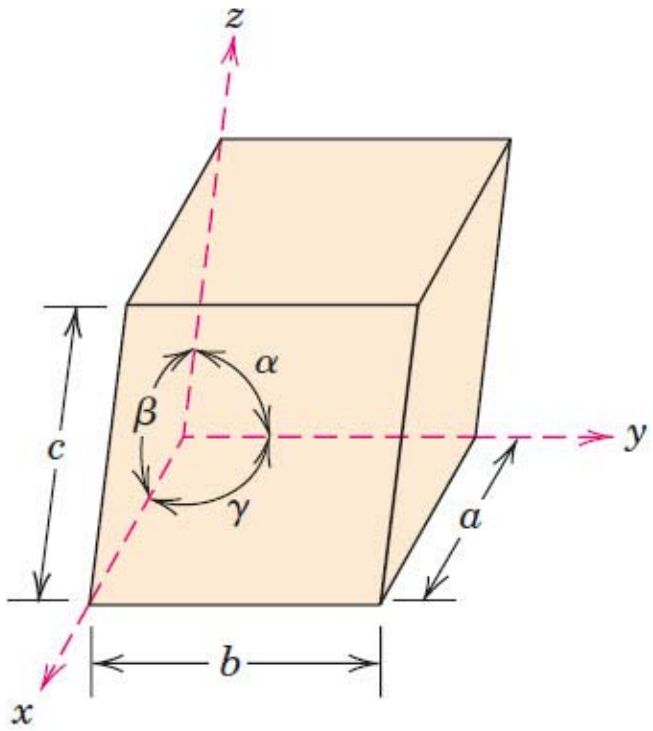
- برخی از جامدات ساختار کریستالی متفاوتی دارند مانند کربن و آهن خالص
- کربن: در فشارهای خیلی بالا به الماس تبدیل می شود. کربن در شرایط محیطی به گرافیت تبدیل می شود
- آهن: تا دمای 912°C ساختار BCC، و بین 912°C الی 1394°C ساختار FCC دارد. بعد از این دما دوباره به BCC تبدیل می شود



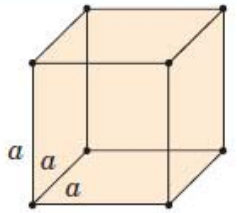
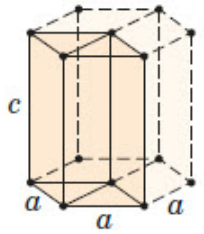
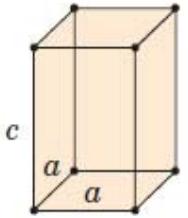
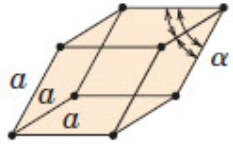
Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

سیستمهای بلوری

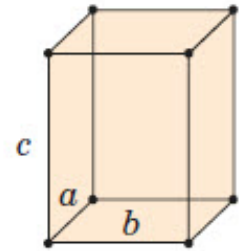
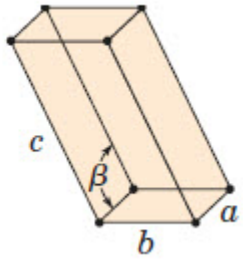
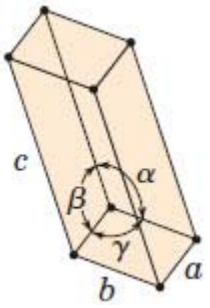
- ساختمان بلوری بر اساس هندسه شبکه واحد (نه موقعیت اتمها) به ۷ سیستم بلوری (Crystal system) متفاوت تقسیم بندی می شوند
- پارامترهای شبکه عبارتند از: $a,b,c,\alpha,\beta,\gamma$
- ۱۴ شبکه کریستالی وجود دارد



ارتباط پارامتر شبکه و شکل هندسی شبکه واحد ۷
سیستم بلوری متفاوت (۱)

	Crystal System	Axial Relationships	Interaxial Angles	Unit Cell Geometry
مکعبی	Cubic	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	
هگزاگونال	Hexagonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = 90°, \gamma = 120°$	
تتراگونال	Tetragonal	$a = b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	
رومبوهِدرال	Rhombohedral (Trigonal)	$a = b = c$	$\alpha = \beta = \gamma \neq 90°$	

ارتباط پارامتر شبکه و شکل هندسی شبکه واحد
۷ سیستم بلوری متفاوت (۲)

Crystal System	Axial Relationships	Interaxial Angles	Unit Cell Geometry
اورتورومبیک Orthorhombic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \beta = \gamma = 90°$	
مونوکلینیک Monoclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha = \gamma = 90° \neq \beta$	
تری کلینیک Triclinic	$a \neq b \neq c$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90°$	

تفاوت بین ساختار بلوری و سیستم بلوری؟

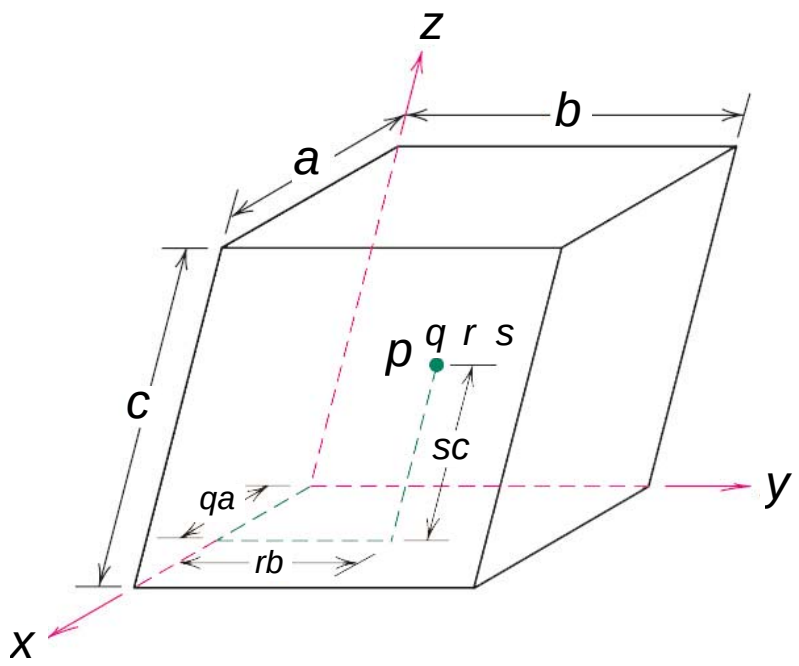
- سیستم بلوری: هندسه شبکه واحد را نشان می دهد
- ساختار بلوری: هندسه شبکه واحد + موقعیت اتمها در داخل آن را بیان می کند
- ساختار بلوری هستند که متعلق به سیستم بلوری مکعبی می FCC یا BCC باشند

مختصات نقطه

مختصات نقطه P در سیستم بلوری زیر بصورت q r s نمایش داده می شود:

- q: کسری از طول a در امتداد محور x
- r: کسری از طول b در امتداد محور y
- s: کسری از طول c در امتداد محور z

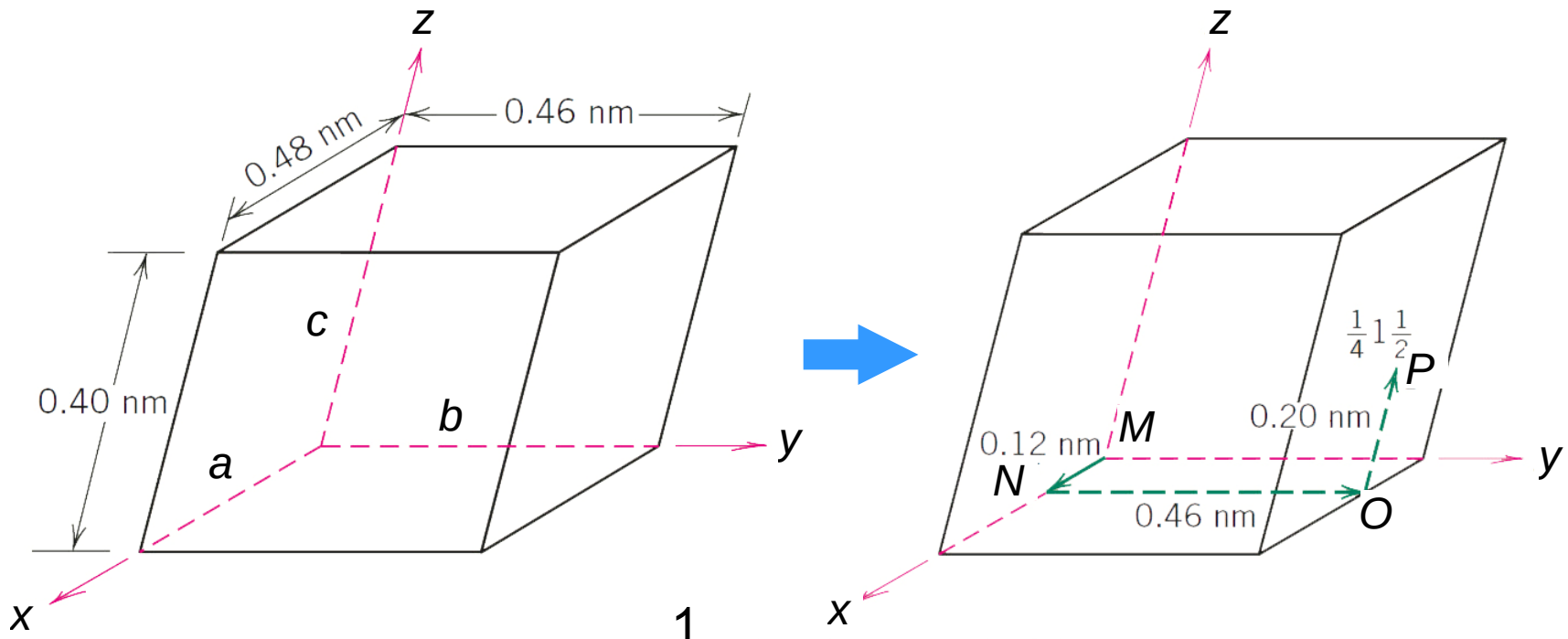
-- از کاما برای جداسازی استفاده نشود!



a, b, c: پارامترهای شبکه

مثال: موقعیت نقطه

برای شبکه واحد زیر موقعیت نقطه $p: \frac{1}{4}\ 1\ \frac{1}{2}$ را بیابید



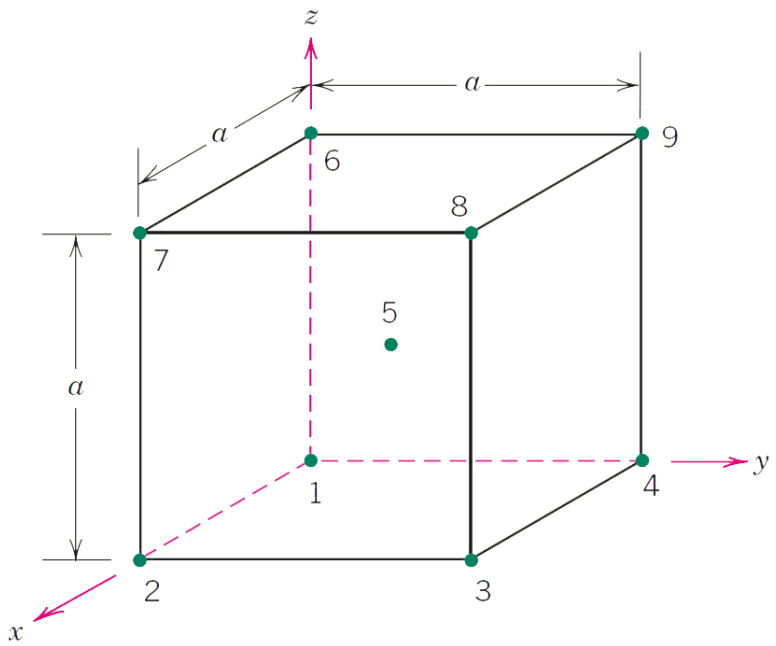
$$x = qa = \frac{1}{4} \times 0.48nm = 0.12nm$$

$$y = rb = 1 \times 0.46nm = 0.46nm$$

$$z = sc = \frac{1}{2} \times 0.40nm = 0.20nm$$

مثال: مختصات نقطه

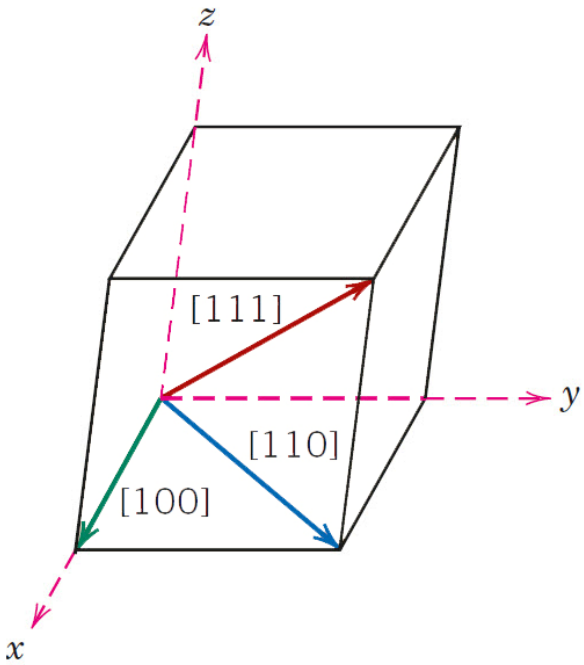
مختصات موقعیتهای اتمی شبکه واحد BCC را تعیین کنید



شماره نقطه	کسر طولی محور x	کسر طولی محور y	کسر طولی محور z	مختصات نقطه
1	0	0	0	000
2	1	0	0	100
3	1	1	0	110
4	0	1	0	010
5	½	½	½	½ ½ ½
6	0	0	1	001
7	1	0	1	101
8	1	1	1	111
9	0	1	1	011

جهات بلوری

- خط بین دو نقطه و یا بردار، جهت بلوری نامیده می شود
- برای تعیین اندیسهای جهات بلوری:



۱- اگر بردار از مبدا نمی گذرد، با حفظ توازی به مبدا انتقال داده شود

۲- طول تصویر بردار بر روی هر یک از محورها محاسبه و بر حسب ابعاد شبکه a,b,c اندازه گیری شود

۳- اعداد فوق در کوچکترین مضرب مشترک ضرب یا تقسیم شود تا به کوچکترین عدد صحیح تبدیل شوند

۴- سه اندیس بدون جدا سازی در یک براکت مانند [uvw] جایگذاری شود

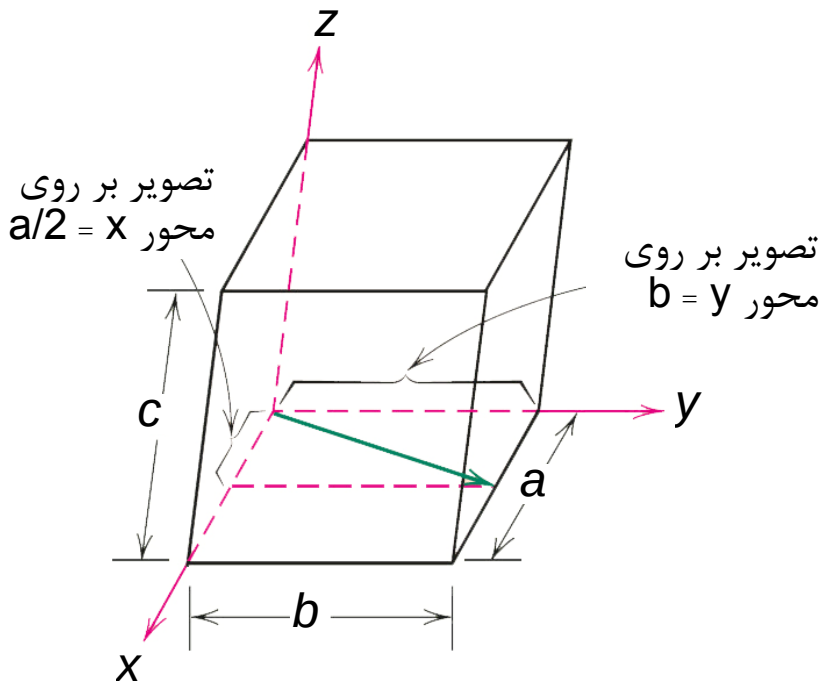
-- اندیسهای منفی بصورت یک خط بار بالای اندیس قرار می گیرد. مانند اگر مولفه y در جهت منفی باشد $[1\bar{1}1]$

-- تغییر دادن علامت همه اندیسها، برداری موازی و خلاف جهت می دهد. مانند $[\bar{1}1\bar{1}]$

Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

مثال: اندیسهای جهت

اندیسهای جهت داده شده را تعیین نمایید

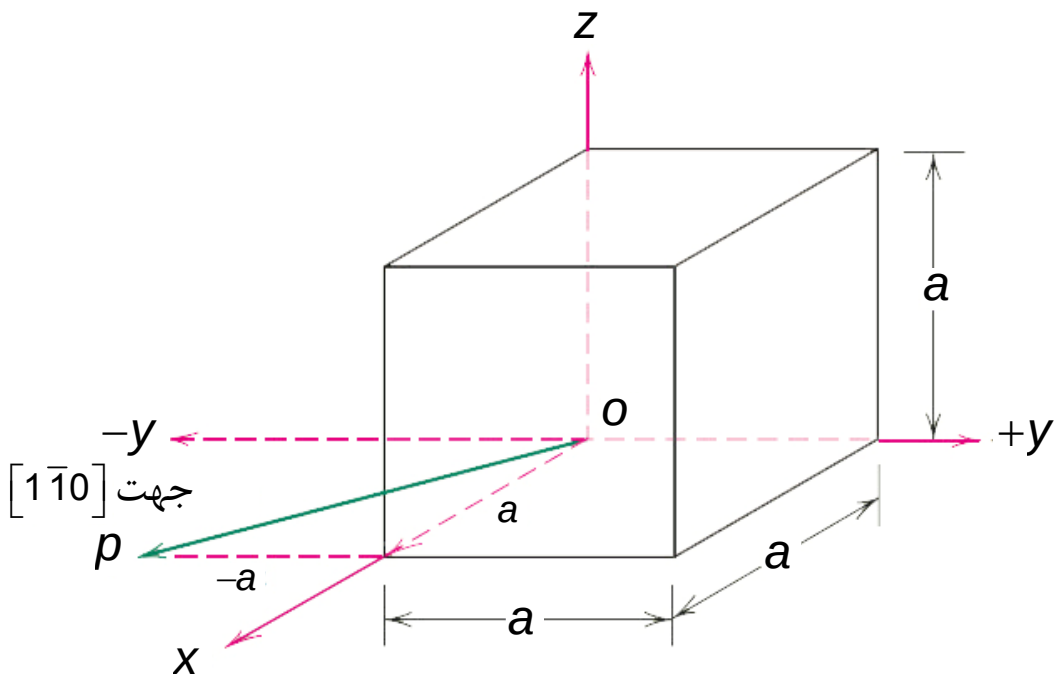


z	y	x	
0c	*1b*	$\frac{1}{2}a$	تصاویر بردار روی محورها
0	1	$\frac{1}{2}$	تصاویر روی محورها بر حسب پارامترهای شبکه a, b, c
0	2	1	ساده کردن-ضرب یا تقسیم بر کوچکترین مضرب مشترک (در اینجا ضربدر ۲)
[120]			قرار دادن در براکت

مثال: ترسیم جهت

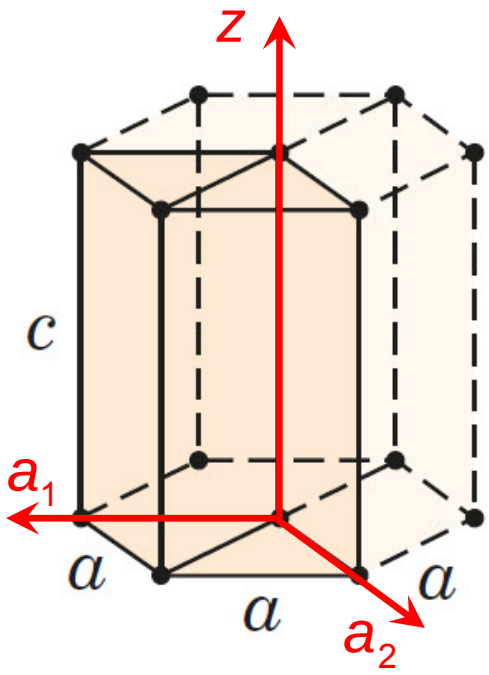
جهت $[1\bar{1}0]$ را در شبکه واحد مکعبی رسم نمایید

z	y	x	
0a	-1a	1a	تصاویر بردار روی محورها



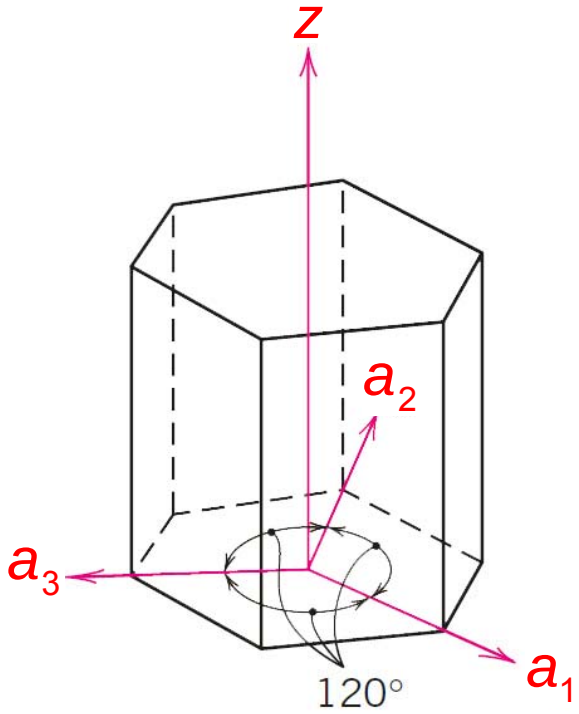
جهات در بلورهای هگزاگونال (۱)

در هگزاگونال بجای سه اندیس از چهار اندیس که به اندیسهای میلِر-براویس (Miller-Bravais) معروف است، استفاده می شود



سه اندیس $[u'v'w']$

دو اندیس ابتدایی، تصویر بردار بر روی محورهای a_1, a_2 در صفحه قاعده شبکه است



چهار اندیس $[uvtw]$

$$u = \frac{1}{3}(2u' - v')$$

$$v = \frac{1}{3}(2v' - u')$$

$$t = -(u + v)$$

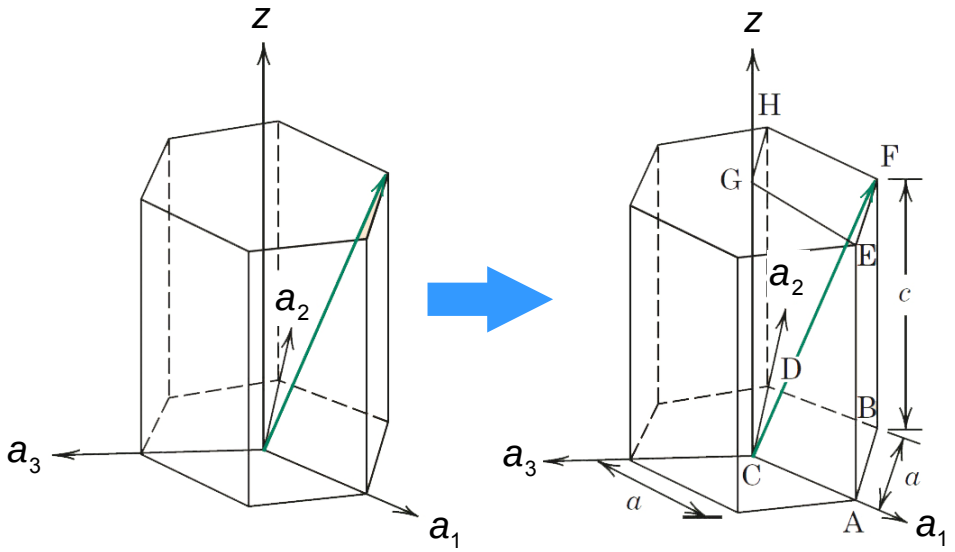
$$w = w'$$

سه اندیس ابتدایی، تصویر بردار بر روی محورهای a_1, a_2, a_3 در صفحه قاعده شبکه است

Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

مثال: اندیسهای جهت در هگزاگونال

جهت نشان داده شده در هگزاگونال زیر را الف) بر حسب اندیسهای $[u'v'w']$ و ب) $[uvtw]$ به دست آورید



حل الف:

	a_1	a_2	z
تصاویر بردار روی محورها	*1a*	*1a*	*1c*
تصاویر روی محورها بر حسب پارامترهای شبکه	*1*	*1*	*1*
ساده کردن-ضرب یا تقسیم بر کوچکترین مضرب مشترک	نیازی نیست		
قرار دادن در براکت	$[111]$		

- یکی از سه منشور متوازی السطوح تشکیل دهنده هگزاگونال را در نظر بگیرید. گوشه های این شبکه از A تا H نامگذاری شده است
- تصاویر بردار روی محورهای a_1, a_2, z تعیین شود

ادامه مثال

حل ب:

برای تبدیل $[u'v'w']$ به $[uvtw]$ می توان از روابط زیر استفاده نمود:

$$u = \frac{1}{3}(2u' - v') = \frac{1}{3}(2\times 1 - 1) = \frac{1}{3}$$

$$v = \frac{1}{3}(2v' - u') = \frac{1}{3}(2\times 1 - 1) = \frac{1}{3}$$

$$t = -(u + v) = -\left(\frac{1}{3} + \frac{1}{3}\right) = -\frac{2}{3}$$

$$w = w' = 1$$

$$\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, -\frac{2}{3}, 1 \xrightarrow[\text{یعنی ۳ ضرب شود}]{\text{در کوچکترین مضرب مشترک}} 1,1,-2,3 \rightarrow [11\bar{2}3]$$

Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

صفحات بلوری

به غیر از هگزاگونال، صفحات بلوری با سه اندیس میلِر (hkl) مشخص می شوند

الگوریتم برای تعیین صفحات بلوری:

۱- اگر صفحه از مبدا عبور کند، می بایست بصورت موازی جابجا شده و یا مبدأ دیگری در گوشه ای جایگزین شود

۲- طول نقطه برخورد صفحه با محورها بر حسب پارامترهای شبکه a، b و c تعیین شود

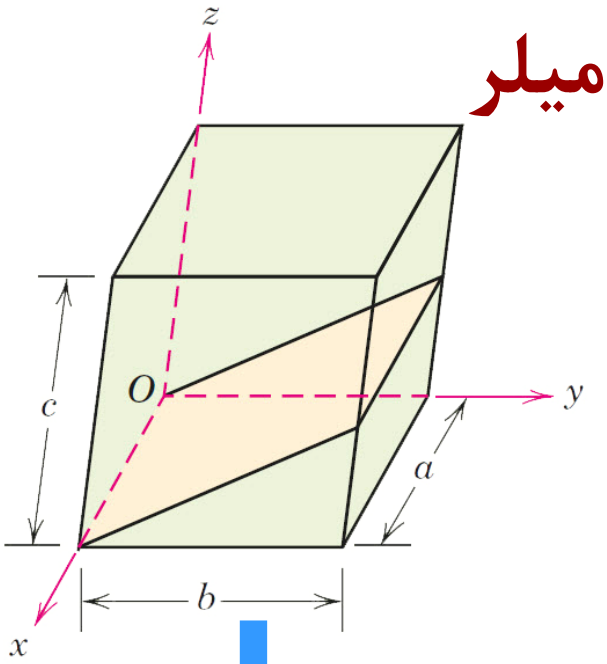
۳- اعداد فوق معکوس شود

-- صفحه موازی با محور اندیس صفر دارد زیرا $1/\infty = 0$

۴- با ضرب یا تقسیم به کوچکترین عدد صحیح تبدیل شود

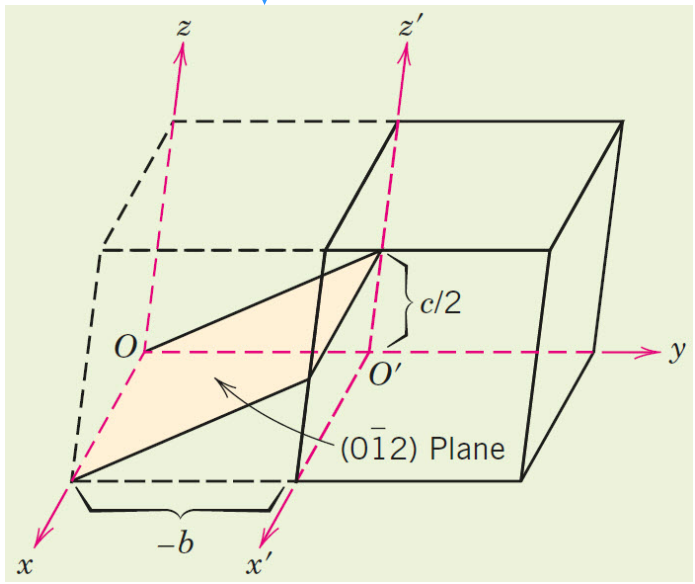
۵- اعداد صحیح درون پرانتز (hkl) قرار گیرد

مثال ۱-تعیین اندیس میلر



اندیسهای میلر صفحه زیر را تعیین نمایید

حل: از آنجایی که صفحه مورد نظر از مبدأ عبور می کند می بایست مبدأ دیگری (O′) در گوشه دیگری جایگزین شود

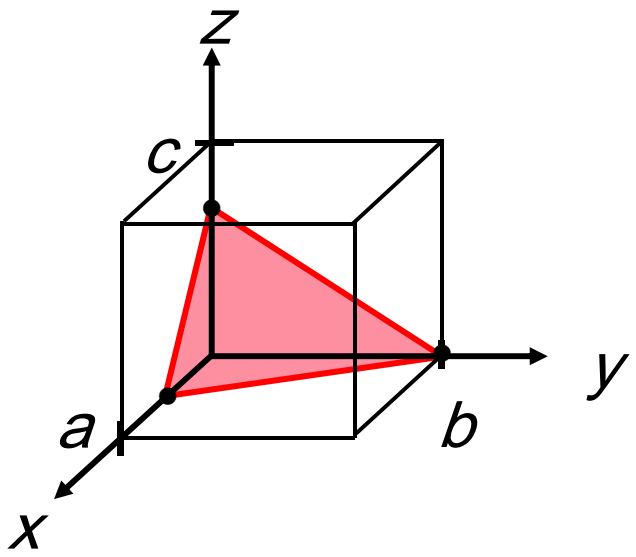


z	y	x	
c/2	*-b*	*∞a*	تقاطع صفحه با محورها
1/2	*-1*	*∞*	تقاطع ها بر حسب پارامترهای شبکه a, b, c
2	*-1*	*0*	معکوس
نیازی نیست			ساده کردن
$(0\bar{1}2)$			قرار دادن در پرانتز

Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

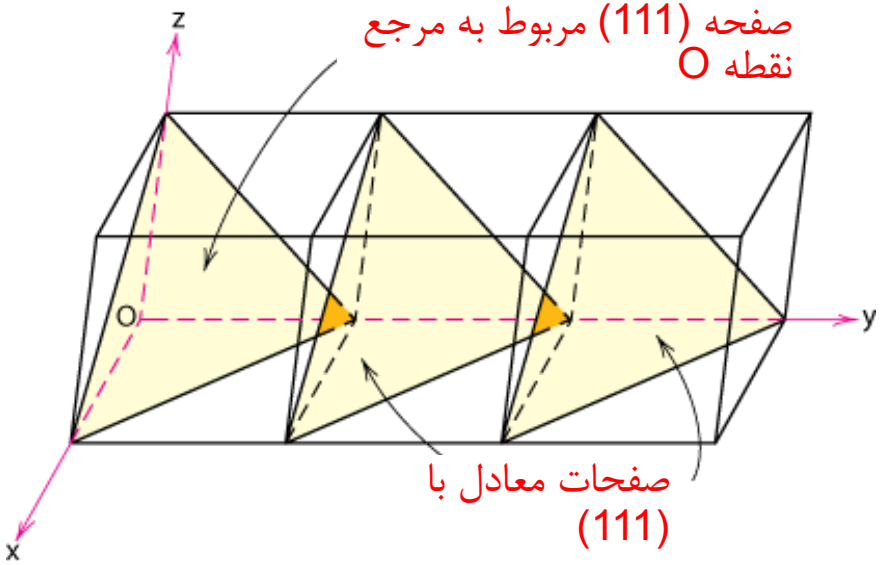
مثال ۲-تعیین اندیس میلر

اندیسهای میلر صفحه زیر را بدست آورید



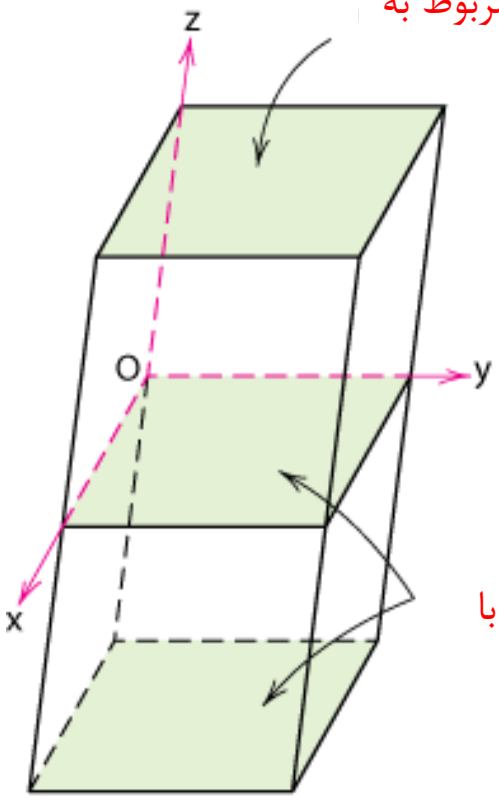
z	y	x	
3c/4	*1b*	*a/2*	تقاطع صفحه با محورها
3/4	*1*	*1/2*	تقاطع ها بر حسب پارامترهای شبکه a, b, c
4/3	*1*	*2*	معکوس
4	*3*	*6*	ساده کردن
(634)			قرار دادن در پرانتز

مثالهایی از اندیسهای صفحات بلوری



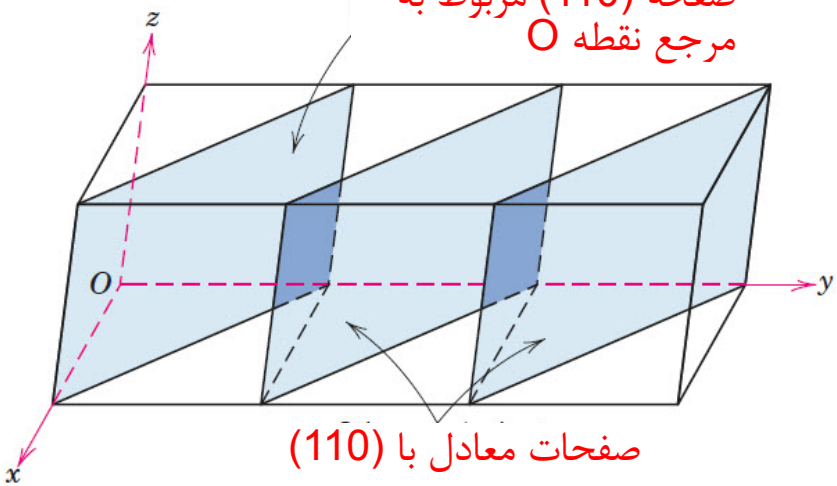
صفحه (111) مربوط به مرجع نقطه O

صفحات معادل با (111)



صفحه (001) مربوط به مرجع نقطه O

صفحات معادل با (001)



صفحه (110) مربوط به مرجع نقطه O

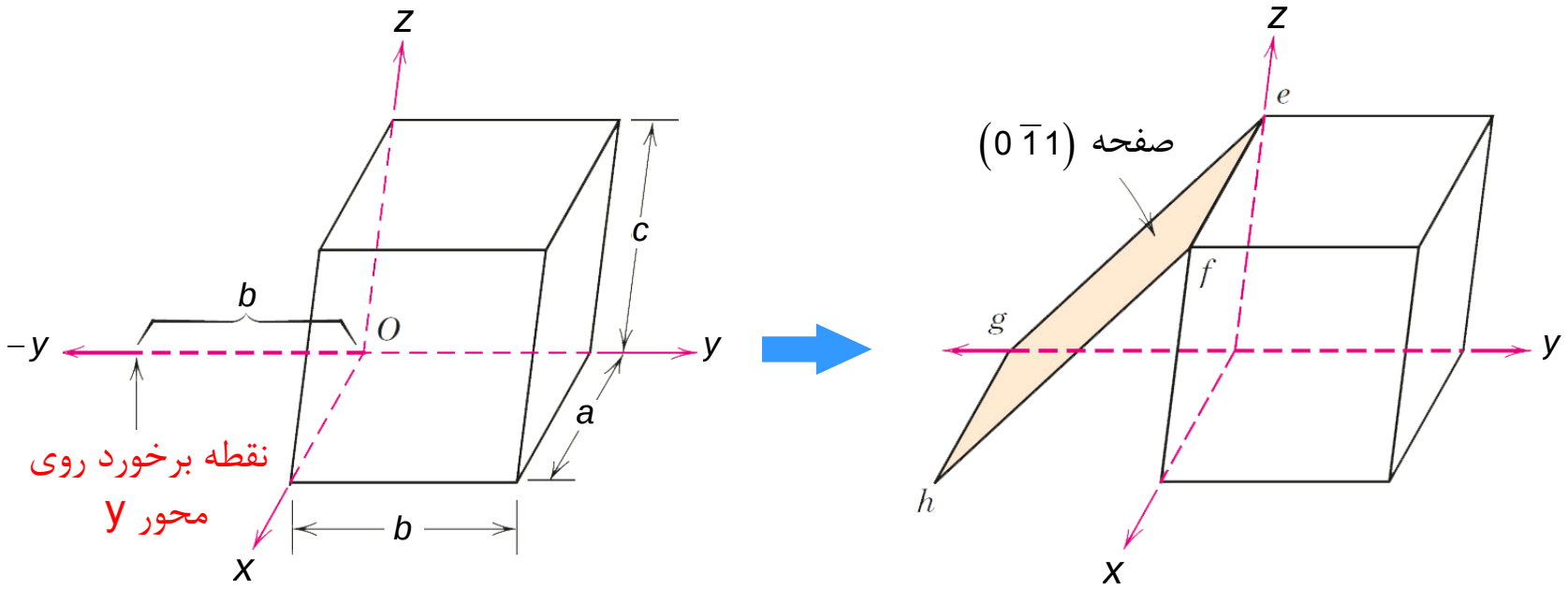
صفحات معادل با (110)

مثال-ترسیم صفحه کریستالی

صفحه $(0\bar{1}1)$ را در شبکه واحد مکعبی رسم نمایید

حل:

	x	y	z
تقاطع صفحه با محورها با معکوس کردن اندیسها	1/0 = ∞	1/(−1) = −1	1/1 = 1



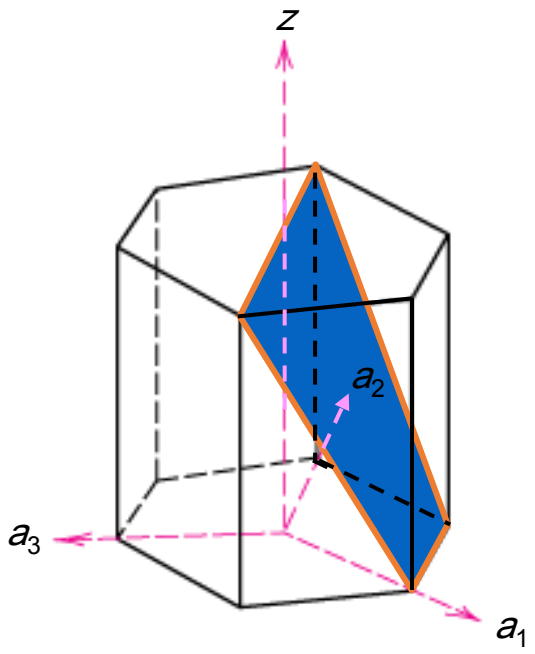
Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

مثال-تعیین اندیس صفحه در هگزاگونال

اندیس میلر-براویس صفحه زیر را در سیستم هگزاگونال تعیین نمایید

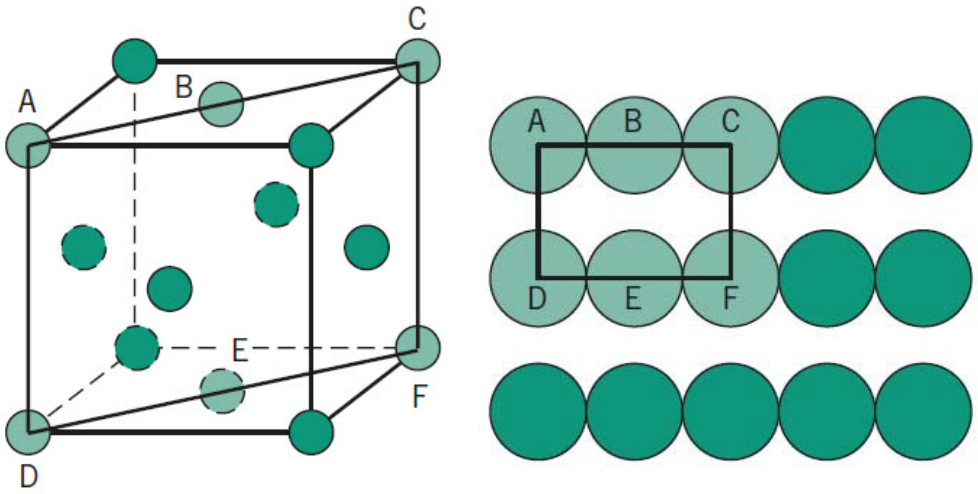
حل:

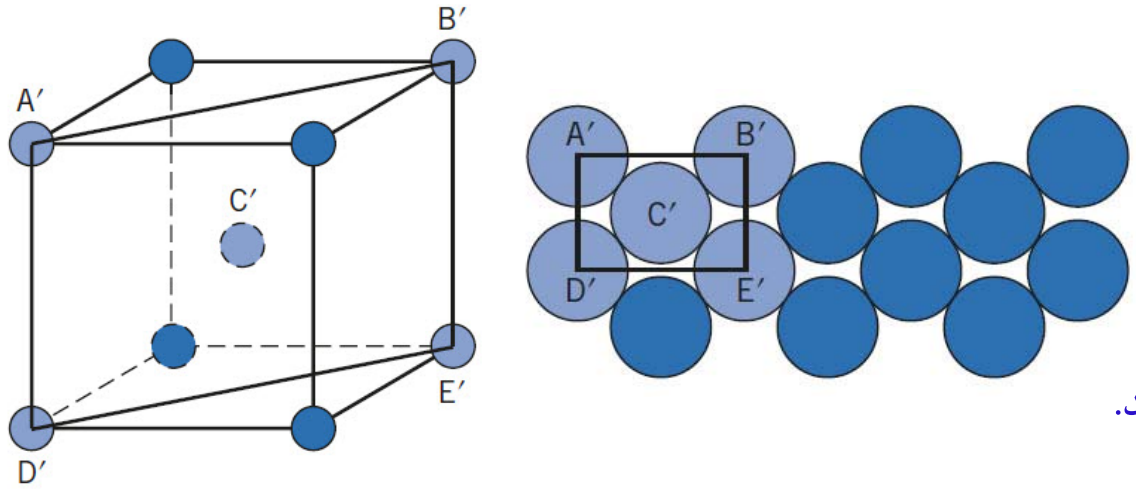
اندیس میلر-برویس برای صفحات بلوری هگزاگونال بصورت $(khil)$ نمایش داده می شود که در آن $i = -(h+k)$



z	a_3	a_2	a_1	
c	$-a$	∞a	a	تقاطع صفحه با محورها
1	-1	∞	1	تقاطع ها بر حسب پارامترهای شبکه a, c
1	-1	0	1	معکوس
نیازی نیست				ساده کردن
$(10\bar{1}1)$				قرار دادن در پرانتز

آرایش اتمی





- آرایش اتمی برای صفحه (110) در ساختار FCC

- آرایش اتمی برای صفحه (110) در ساختار BCC

دو صفحه بالا تراکم اتمی متفاوتی دارند.
کدامیک متراکم تر است؟

Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

چگالی خطی Linear Density (LD)
چگالی صفحه ای Planar Density (PD)

$$\text{چگالی خطی} = \frac{\text{تعداد اتمهایی که مرکزشان روی بردار است}}{\text{طول بردار}}$$

واحد چگالی خطی: معکوس طول؛ m^{-1} ،nm^{-1}

$$\text{چگالی صفحه ای} = \frac{\text{تعداد اتمهایی که مرکزشان روی صفحه است}}{\text{مساحت صفحه}}$$

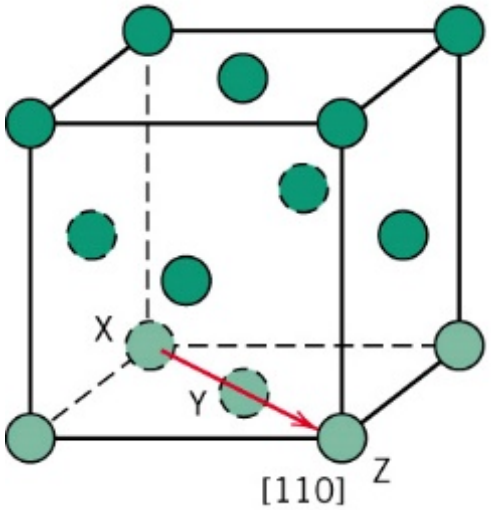
واحد چگالی صفحه ای: معکوس طول به توان ۲؛ m^{-2} ،nm^{-2}

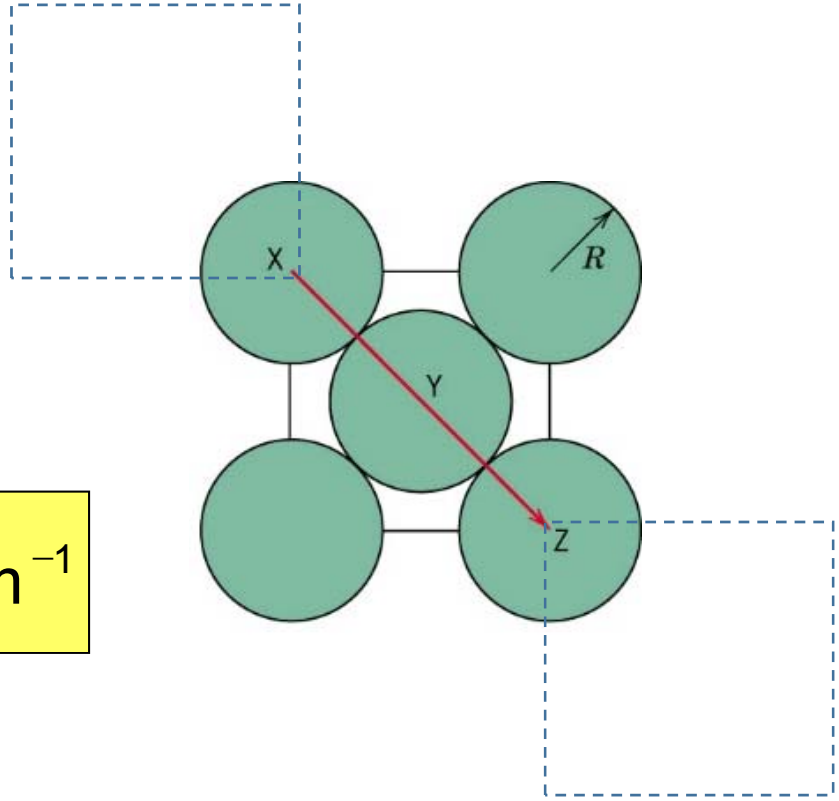
مثال-تعیین چگالی خطی

چگالی خطی جهت [110] برای آلومینیوم (Al) را بدست آورید

حل:

- ساختار بلوری Al: FCC
- طول ضلع شبکه: a=0.405nm





تعداد اتم

$$LD_{110} = \frac{2}{\sqrt{2}a} = 3.5\ nm^{-1}$$

طول

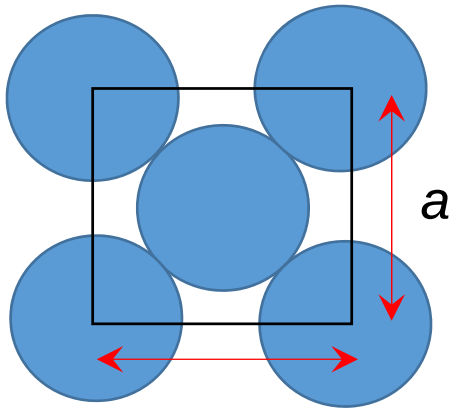
Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

مثال- تعیین چگالی صفحه ای

چگالی صفحه ای مربوط به صفحه (110) آهن (Fe) در دمای اتاق را بدست آورید

حل:

- ساختار بلوری Fe در دمای اتاق: BCC
- شعاع اتمی Fe: R=0.1241nm



$$a = \frac{4R}{\sqrt{3}} = \frac{4 \times 0.1241}{\sqrt{3}} = 0.2866\ nm$$

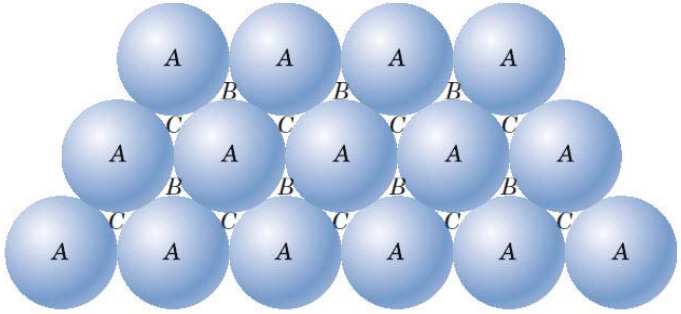
تعداد اتمها

$$PD_{110} = \frac{2}{\sqrt{2}a^2} = \frac{2}{\sqrt{2} \times 0.2866^2} = 17.22\ \frac{atoms}{nm^2} = 1.72x\ 10^{19}\ \frac{atoms}{m^2}$$

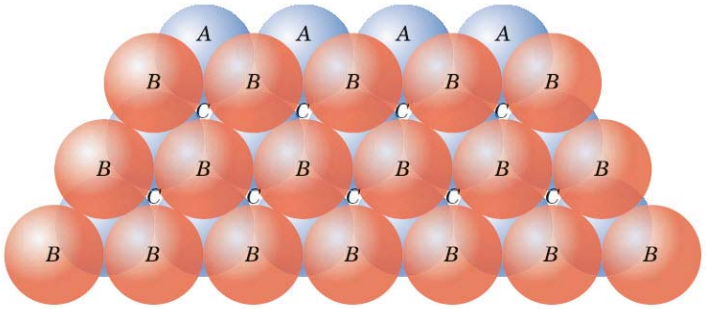
مساحت

ساختارهای بلوری فشرده

دو ساختار بلوری FCC و HCP که بالاترین تراکم اتمی (AFP=0.74) دارند را می توان از قرار دادن متوالی صفحات فشرده با کره های در تماس با هم نشان داد



لایه اول: A



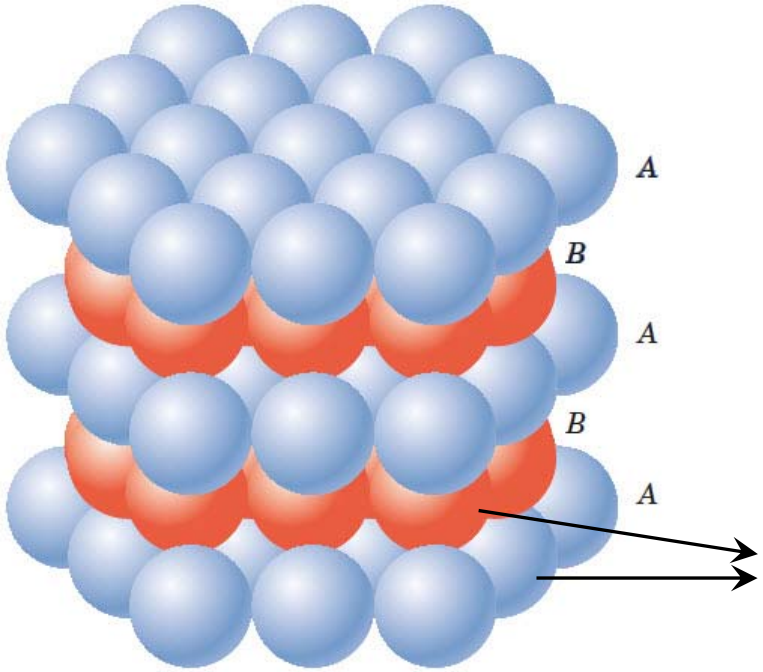
لایه دوم: B
بین گزینه های B و C
فرقی نمی کند

؟؟

لایه سوم: می تواند دوباره
روی A و یا C باشد

ساختار بلوری فشرده HCP

در این نوع ساختاری بلوری فشرده، مرکز اتمهای لایه سوم (C) دقیقاً روی مرکز اتمهای لایه اول (A) قرار می گیرد. C=A



ترتیب چینش لایه ها:

ABABABA...

یا

ACACACA…

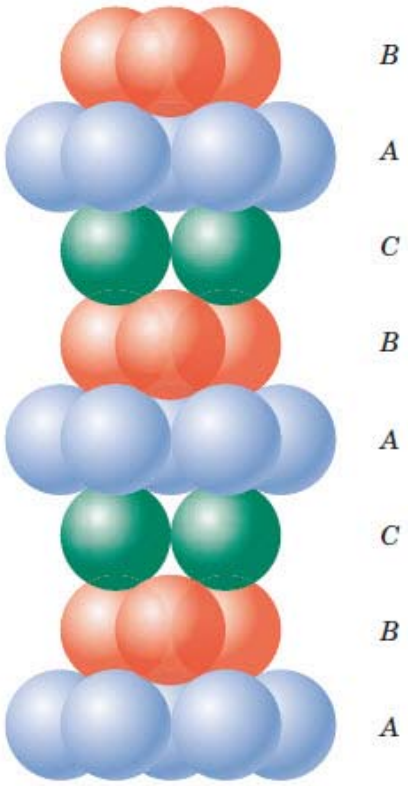
صفحات از نوع (0001)

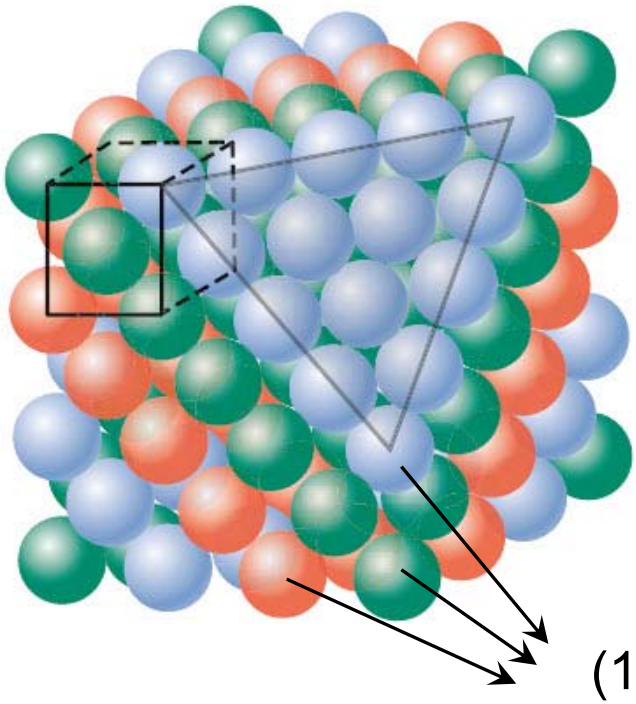
ساختار بلوری فشرده FCC

مرکز اتمهای لایه سوم (C) روی نقاط C قرار می گیرد

ترتیب چینش لایه ها:

ABCABCA...

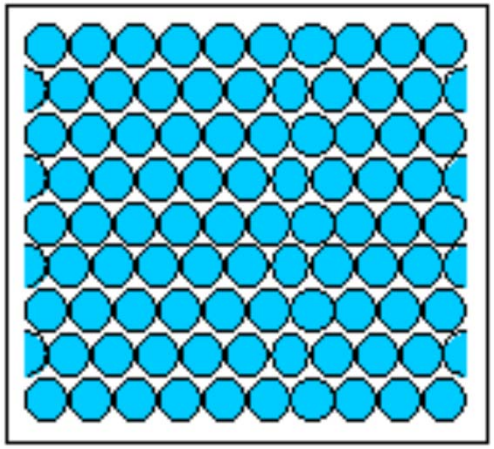


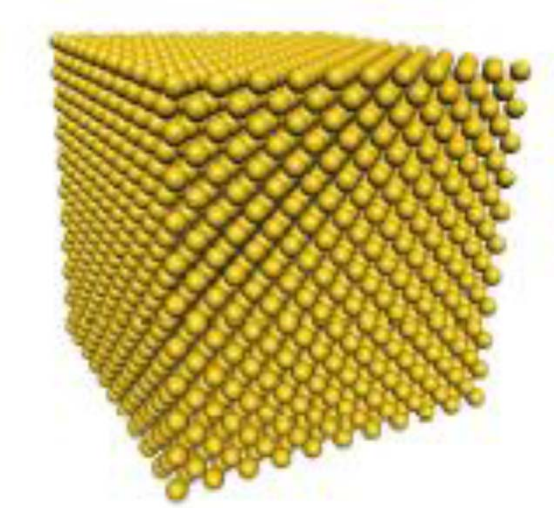


صفحات از نوع (111)

Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

Single crystal تک بلور





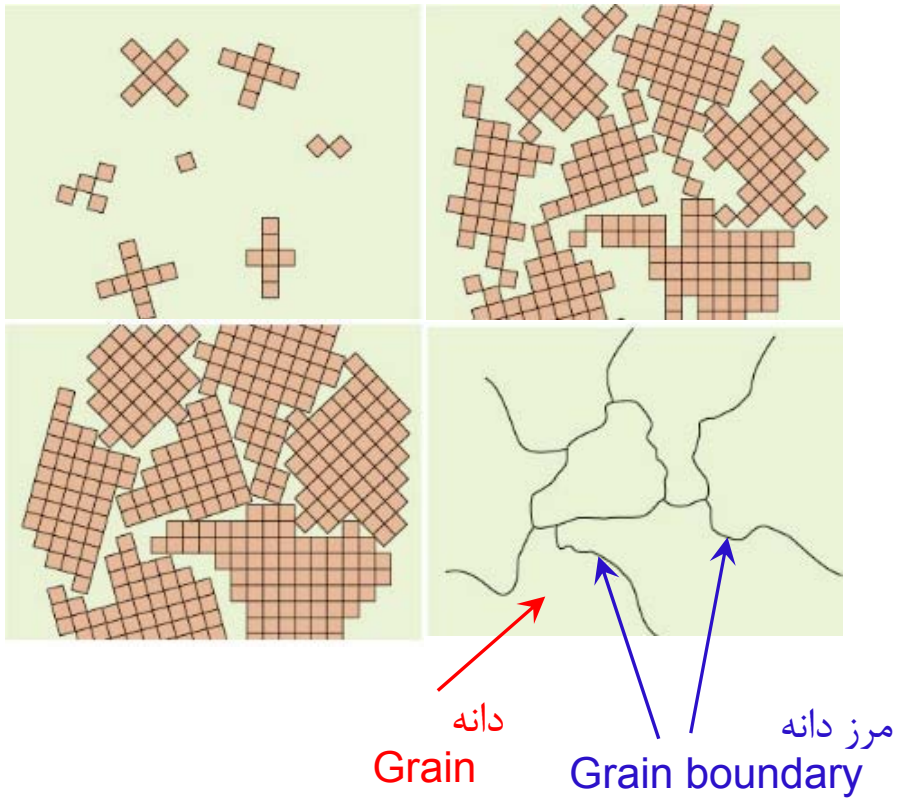
چینش اتمها در تک کریستال

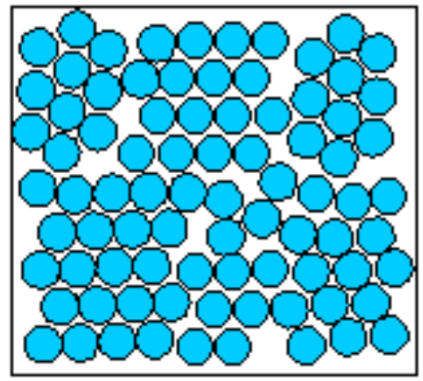
اتمها در کل نمونه بدون گسستگی و بطور منظم تکرار می شوند

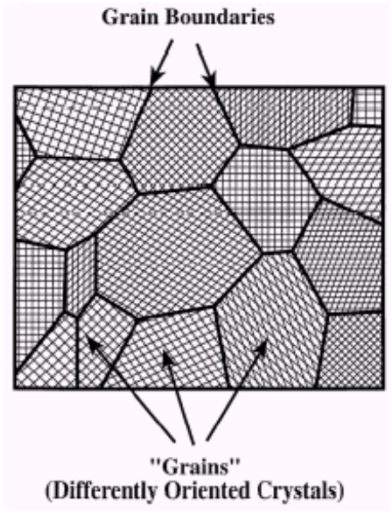
تک بلور لعل

Polycrystalline materials مواد چند بلور

اغلب جامدات از تعدادی بلورهای کوچک یا دانه (Grain) بصورت تصادفی تشکیل شده است

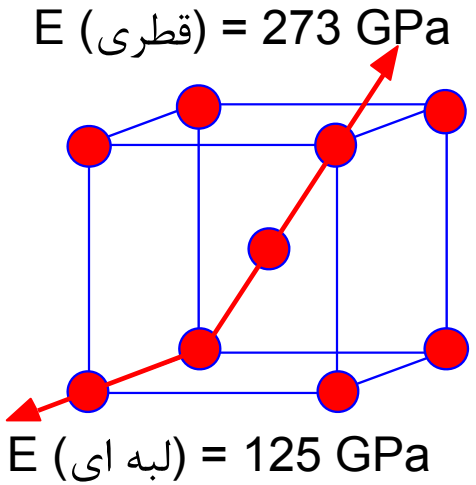






ناهمسانگردی Anisotropy
همسانگردی Isotropy

• ناهمسانگردی: خواص مواد در جهات مختلف با هم متفاوت هستند. مانند مدول الاستیک (سفتی) E یک تک بلور در جهات [100] و [111] به دلیل تغییر فاصله اتمی متفاوت است



آهن تک بلور با ساختار BCC

• همسانگردی: خواص مواد مستقل از جهت اندازه گیری است. اکثر چند بلورها همسانگرد هستند

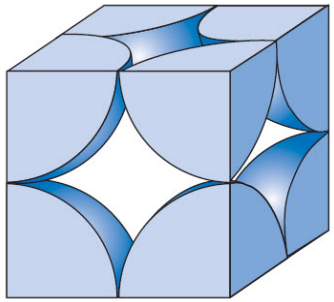
تمرین های فصل سوم

تمرینهای ستاره دار زیر را حل کنید و حداکثر تا ۱۰ روز بعد از اتمام این فصل تحویل دهید.

۱- اگر شعاع اتمی طلا 0.144nm باشد، حجم واحد شبکه آن را بر حسب m^3 محاسبه کنید.

✱۲- مولیبدن با ساختمان کریستالی BCC، دارای شعاع اتمی 0.1363nm و وزن اتمی 95.94 g/mol است. چگالی تئوری را محاسبه کنید و با مقدار اندازه گیری شده در کتاب مقایسه نمایید.

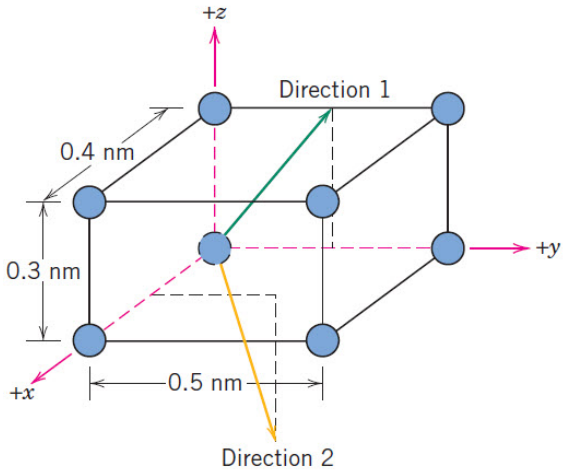
۳- در جدول زیر وزن اتمی، چگالی و شعاع اتمی سه آلیاژ فرضی ارائه شده است. برای هر یک مشخص کنید که ساختمان کریستالی آن FCC، BCC یا مکعبی ساده است. ساختمان مکعبی ساده در شکل زیر آمده است.



ساختمان مکعبی ساده

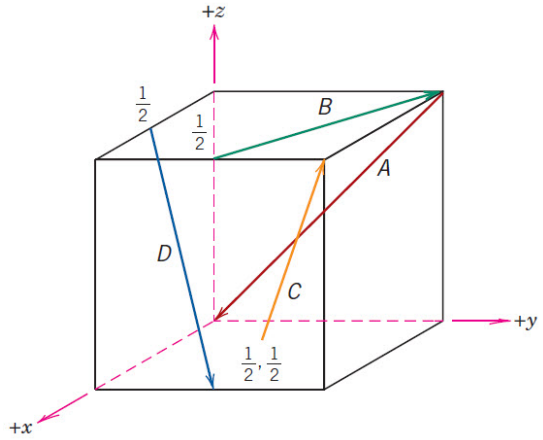
آلیاژ	وزن اتمی (g/mol)	چگالی (g/cm^3)	شعاع اتمی (nm)
A	43.1	6.4	0.122
B	184.4	12.3	0.146
C	91.6	9.6	0.137

Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir



✱۴- اندیس جهات ۱ و ۲ نشان داده شده در شکل زیر را به دست آورید

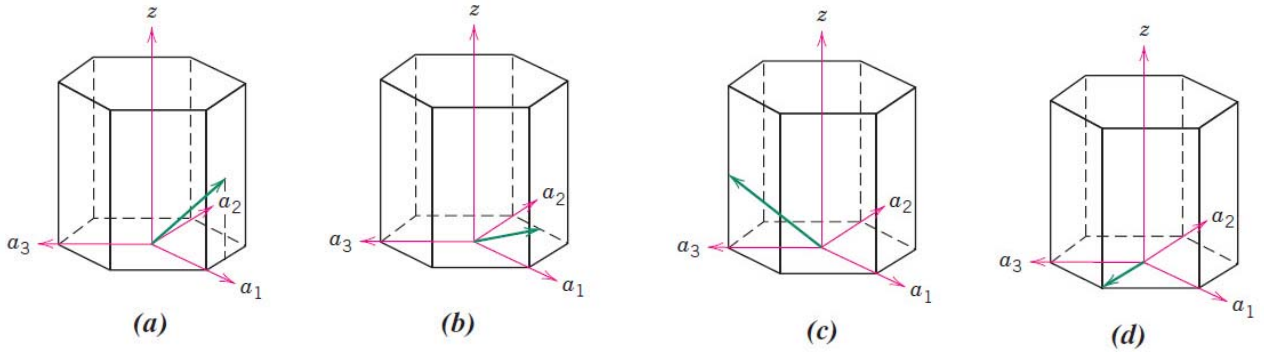
۵- در یک شبکه واحد مکعبی، جهات زیر را رسم نمایید: الف) $[\bar{2}12]$ ب) $[301]$



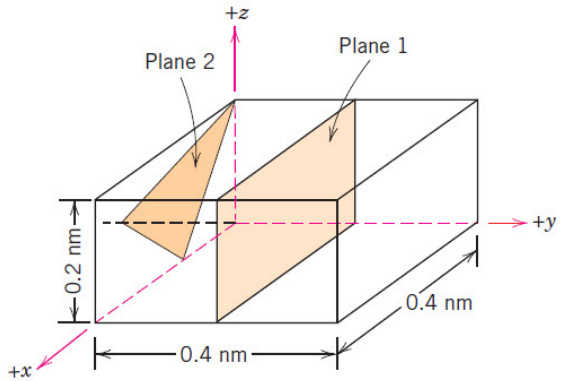
۶- اندیس جهات A، B، C و D نشان داده شده در شکل زیر را به دست آورید

۷- جهت $[00\bar{1}]$ را به اندیس چهارتایی میلر-براویس در شبکه واحد هگزاگونال تبدیل کنید.

✱۸- اندیس جهات نشان داده شده در شبکه واحد هگزاگونال زیر را به دست آورید

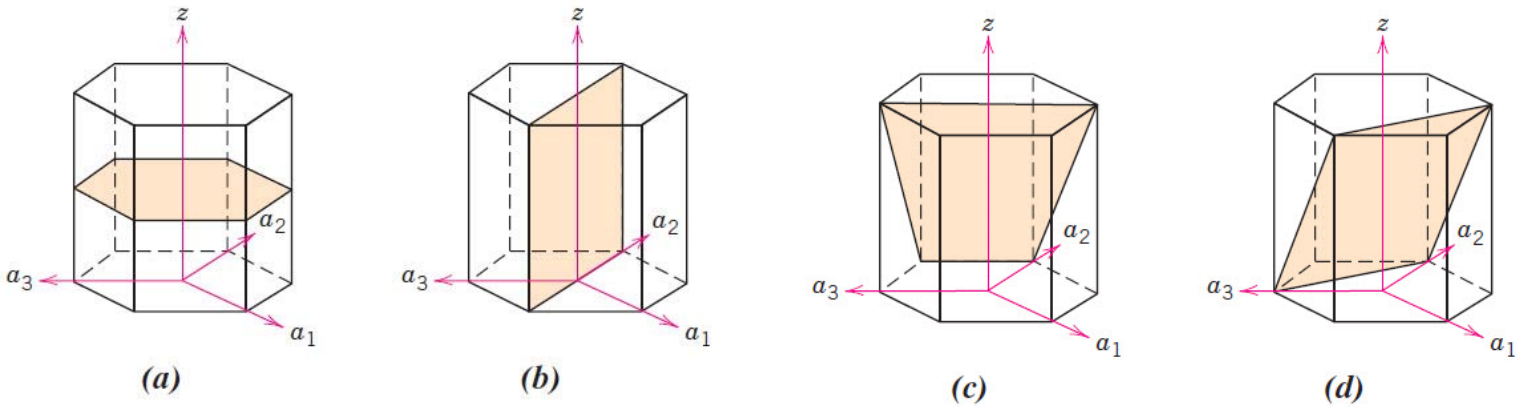


✱۹- اندیس میلر صفحات ۱ و ۲ زیر را به دست آورید.



Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

✱۱۰- اندیس میلر صفحات نشان داده شده در شبکه هگزاگونال زیر را به دست آورید.



✱۱۱- صفحه $(2\bar{1}\bar{1})$ را در یک شبکه هگزاگونال رسم کنید.

✱۱۲- چگالی خطی برای جهت [100] در شبکه FCC را بر حسب شعاع اتمی R به دست آورید.

✱۱۳- چگالی صفحه ای برای صفحه (110) در شبکه واحد BCC را محاسبه نمایید.

Dr. Zolfaghari, zolfaghari@nit.ac.ir

Thanks for Your Attention and Any Question?