

غزین اللہ شریف (غزین حالت جامد)

۱۔ انسائی باساختار مواد بلوری

۲۔ مثل ہا مواد رسانا

۳۔ رضا حامل ہا بار

۴۔ معادلہ نفوذ حامل ایل

۵۔ پیوند pn (حالت استاتی)

۶۔ پیوند سائل

۷۔ ترانزیستور BJT

۸۔ ترانزیستور FET

* منابع: ۱) صباغ ادوات نیم رسانا (ترجمہ دکتر صدوج فرسی) جلد ۱، ۲، ۳، انتشارات صنعتی شریف

۲) غزین اللہ شریف ترجمہ دکتر روین تن «انشارات علم و صنعت»

* مواد جامد

- در کل ماده را می توان به ۳ نوع تقسیم بندی کرد :

* از نظر ساختمان اتمی

۱- بی شکل یا نامنظم : Amorphous (مثل چوب، خاب، پلاستیک، شیشه معمولی)

۲- چندبلوری یا منظم ناحیه ای : multi crystal (مثل سنگ های معدنی و ساختمانی)

۳- بلوری crystal : همه ی اتم ها ماده از یک نظم پیروی می کنند و می توان گفت دارای

ساختار اتمی منظم هستند «در این درس با این قسمت کار داریم»

* از نظر رسانایی الکتریکی

۱- ناهای (عایق) : مثل لاستیک، چوب خش، شیشه ← دارای هدایت نزدیک به صفر هستند.

۲- رسانا (هادی) : مثل فلزات ← دارای هدایت الکتریکی بسیار زیاد هستند.

۳- نیمه رسانا (نیمه هادی) : Semiconductor ← هدایت این مواد بین دو دسته ی فوق هستند.

نکته مهم نیمه رسانا : هدایت این مواد قابل کنترل است ← مثل سیلیسیم (Si) و ژرمانیوم (Ge)

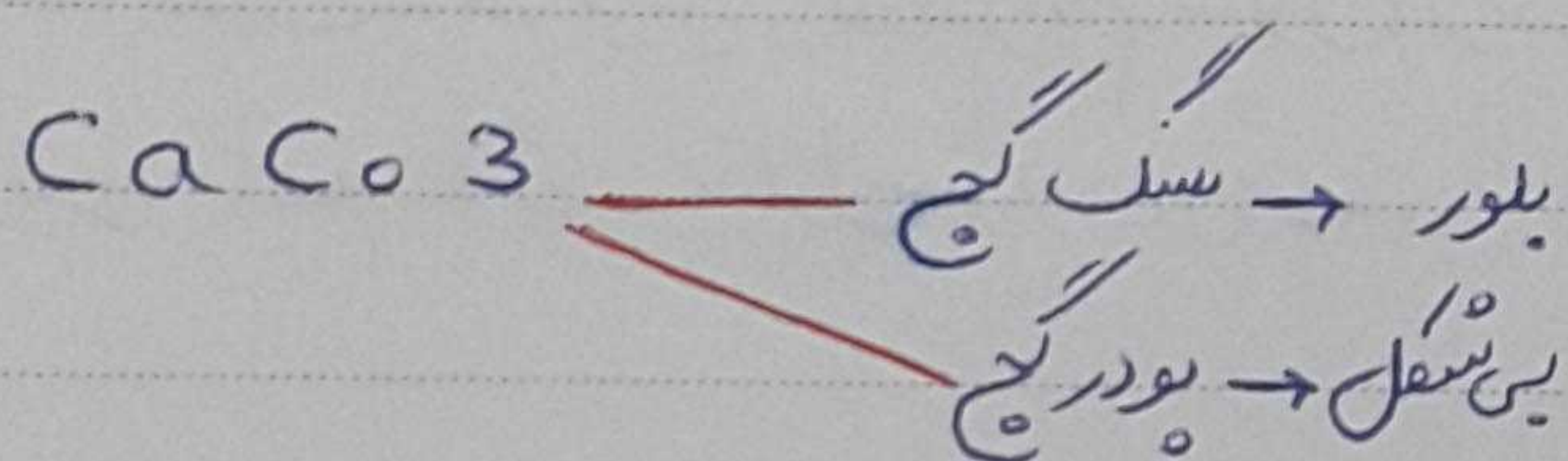
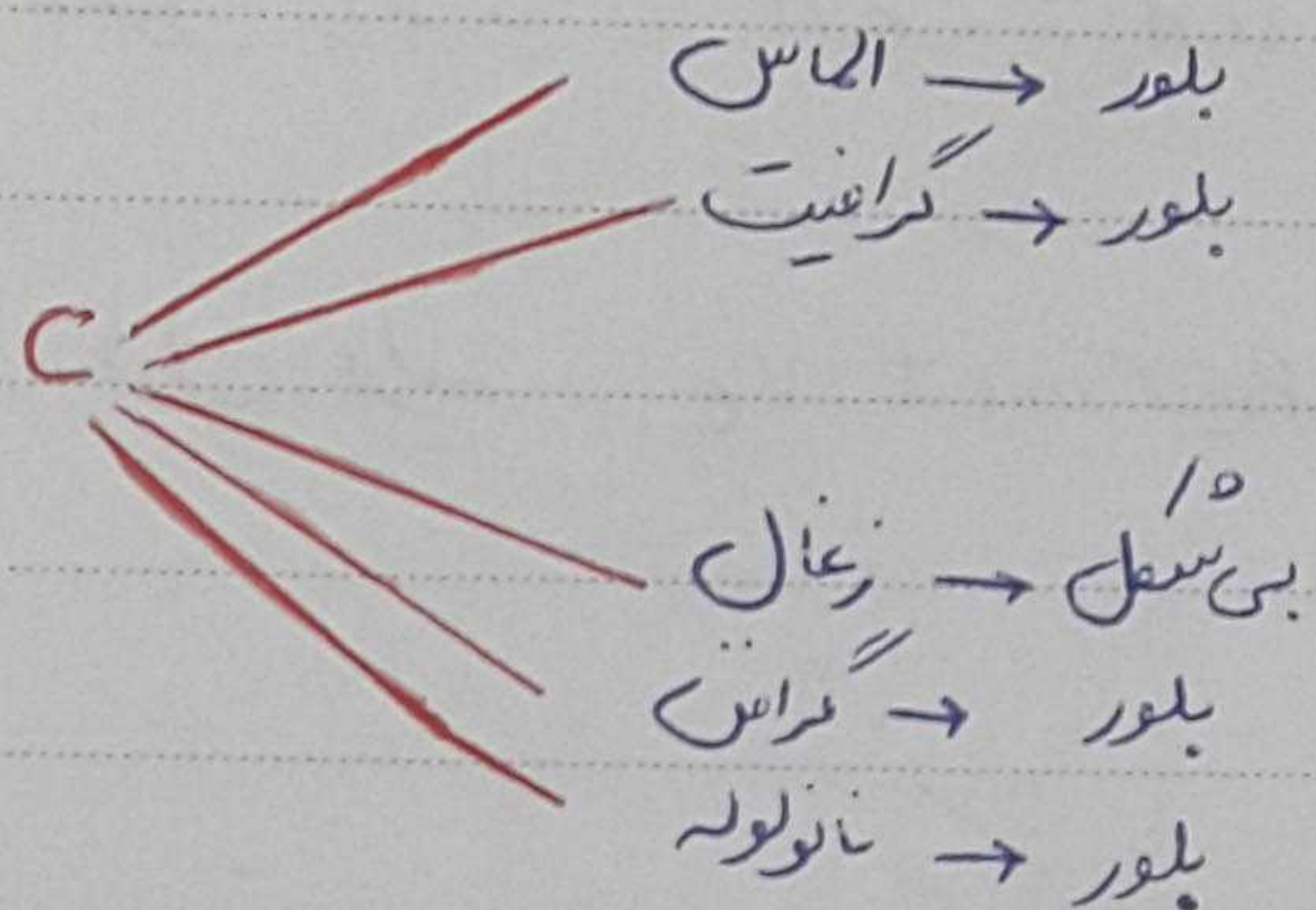
که هر دو جزو گروه چهارم هستند و در جدول تناوبی بین فلزات و عایق ها هستند.

* بلورها: در طبیعت ۳-۶ نوع بلور وجود دارد، که در این درس با ۴ نوع آن آشنا می شویم.

تعریف بلور: راسی منظم اتم های یک ماده ی جامد را که در همی ماده وجود داشته باشد بلور می گویند.

راسی بلوری اتم ها یک حالت پایدار انرژی از ساختمان ماده است که تحت شرایط خاصی ایجاد می شود.

کربن (C) شکل ها کربن به این گونه می باشد:

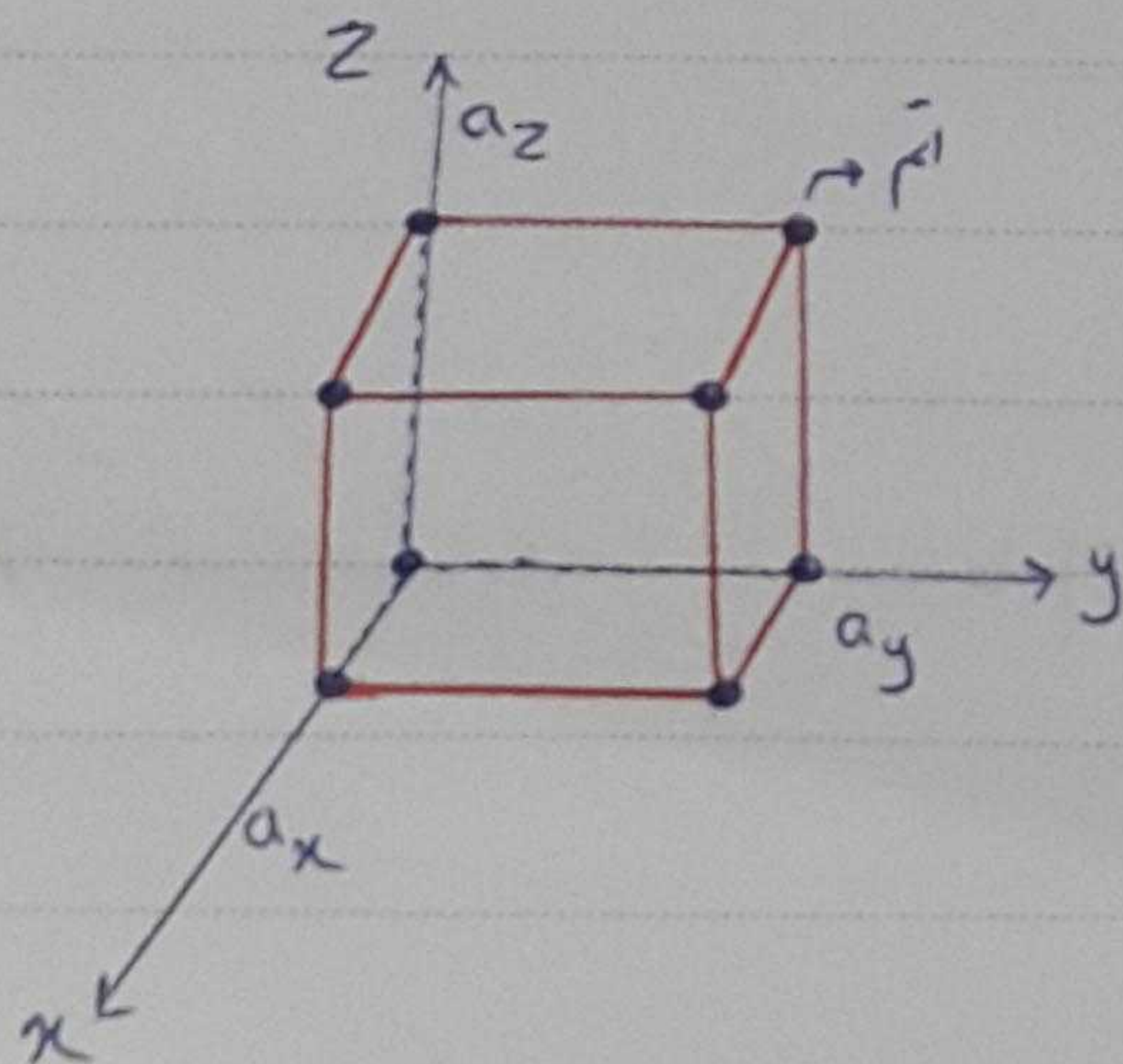


* انواع بلورها:

simple cubic ← SC

۱- بلور مکعب ساده

در این ساختمان هر رأس مکعب یک اتم قرار دارد، مبدأ یا دستگاه مختصات اختیاری است.



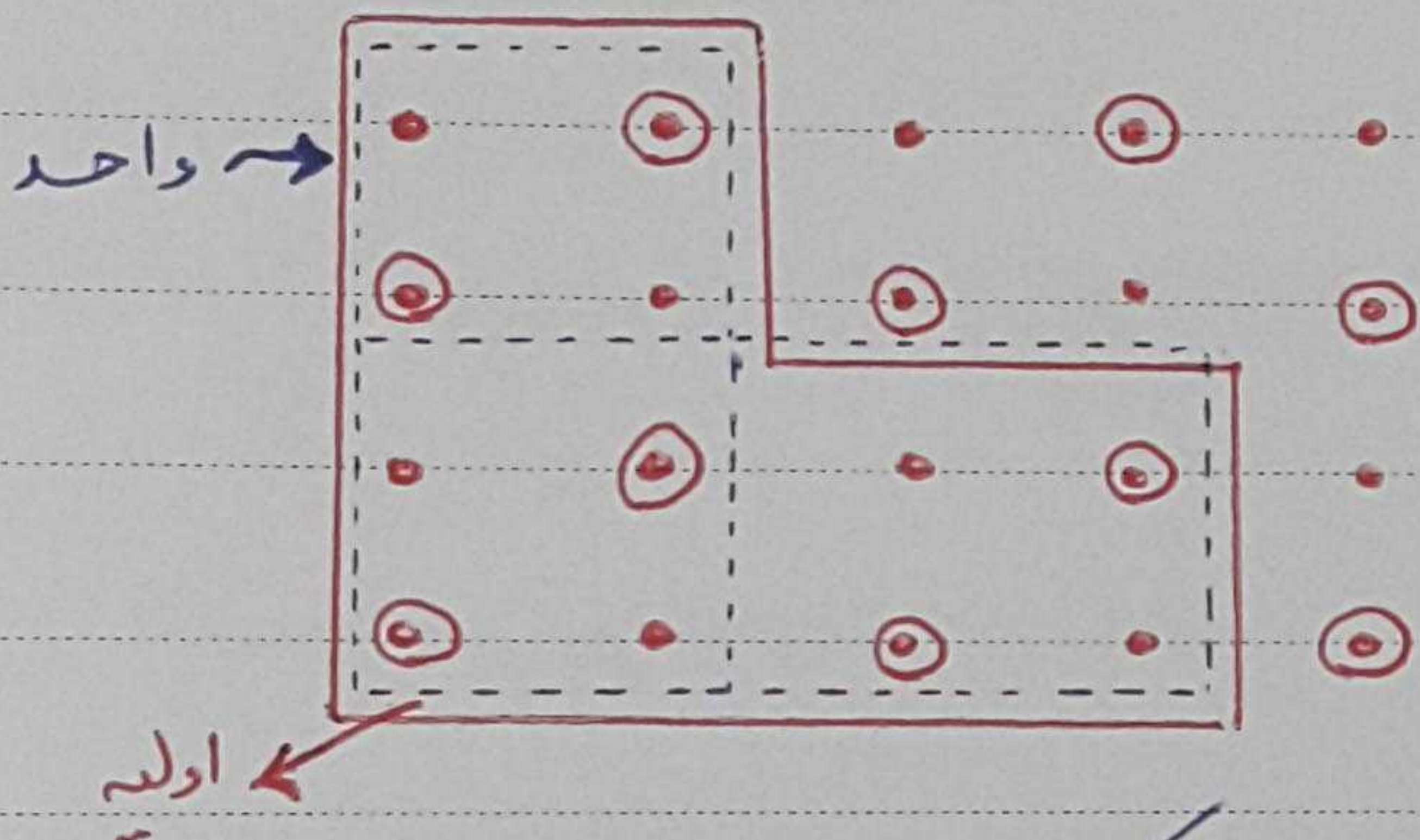
* شبکه (Lattice): ساختار بلوری است که در آن اتم‌ها یک نقطه‌ای ریاضی هستند.

ثابت شبکه: فاصله‌ی دو اتم مجاور در شبکه‌ی بلوری را گویند، این فاصله ممکن است در هر جهت

(x, y, z) متفاوت باشد و با حرف a نشان داده می‌شود. a_x, a_y, a_z

- سلول واحد unit cell

- سلول اولیه primitive



در این سه سمت به نحایی می‌توانند هر کدام سلول اولیه باشند و اگر هر سه با هم باشند سلول واحد می‌شوند.

- اگر در ساختار اتمی بلور بخش را بتوان در نظر گرفت که کل ساختار از تکرار آن ایجاد شود، به آن بخش

سلول واحد گویند، این بخش همگی خواص بلور را خواهد داشت.

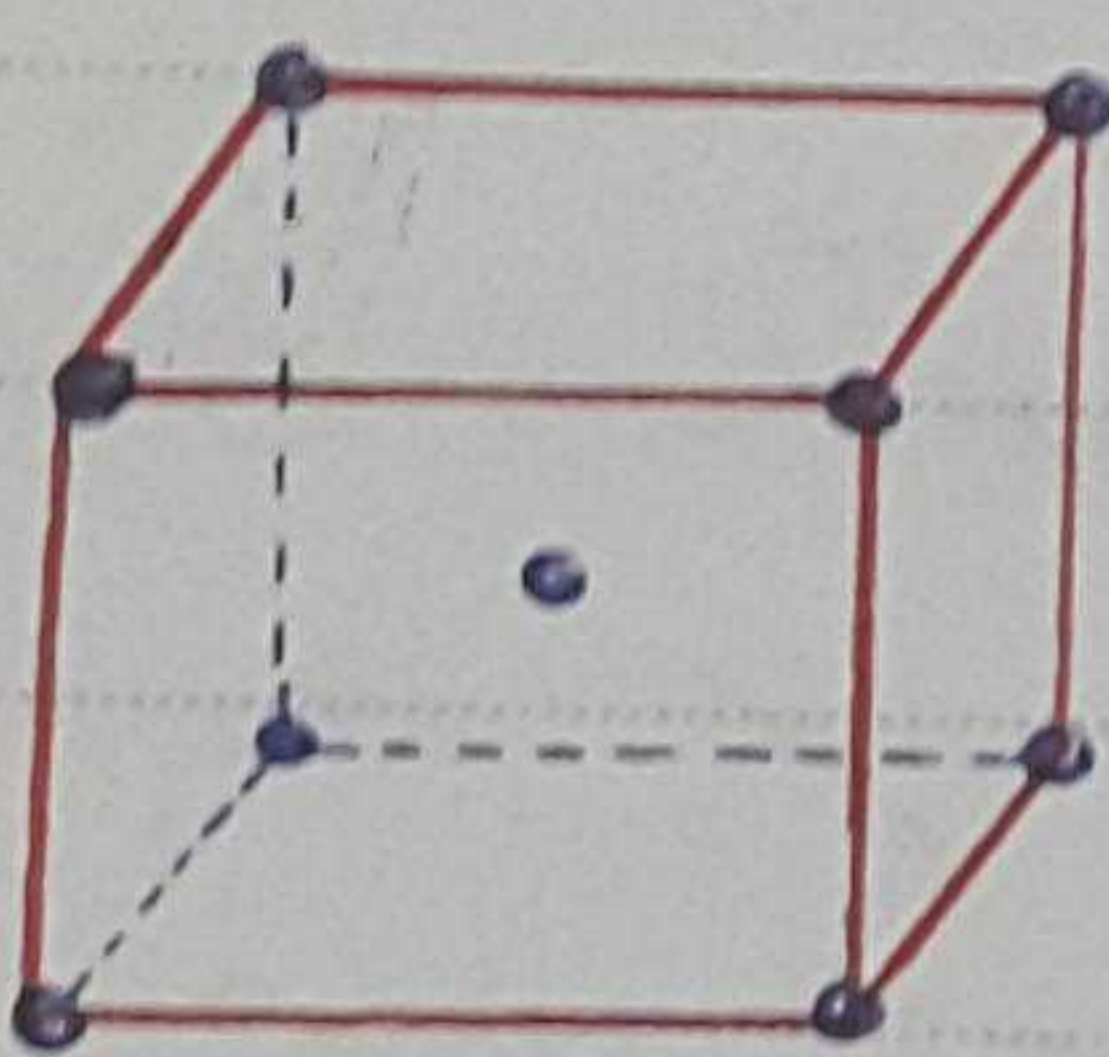
بویچترین سلول واحد را سلول اولیه می‌گویند.

- حجم حجمی: $\text{حجم اتمی} \times \text{تعداد اتم‌ها در حجم} = \text{حجم حجمی}$
حجم سلول واحد

اگر بخواهیم در داخل مکعب بنذاریم، تنها $\frac{1}{8}$ کره داخل مکعب قرار می‌گیرد.
 $1 = \frac{1}{8} \times 8$ = تعداد اتم‌های SC
وجه مکعب

$$\text{حجم سلول} = a_x \times a_y \times a_z$$

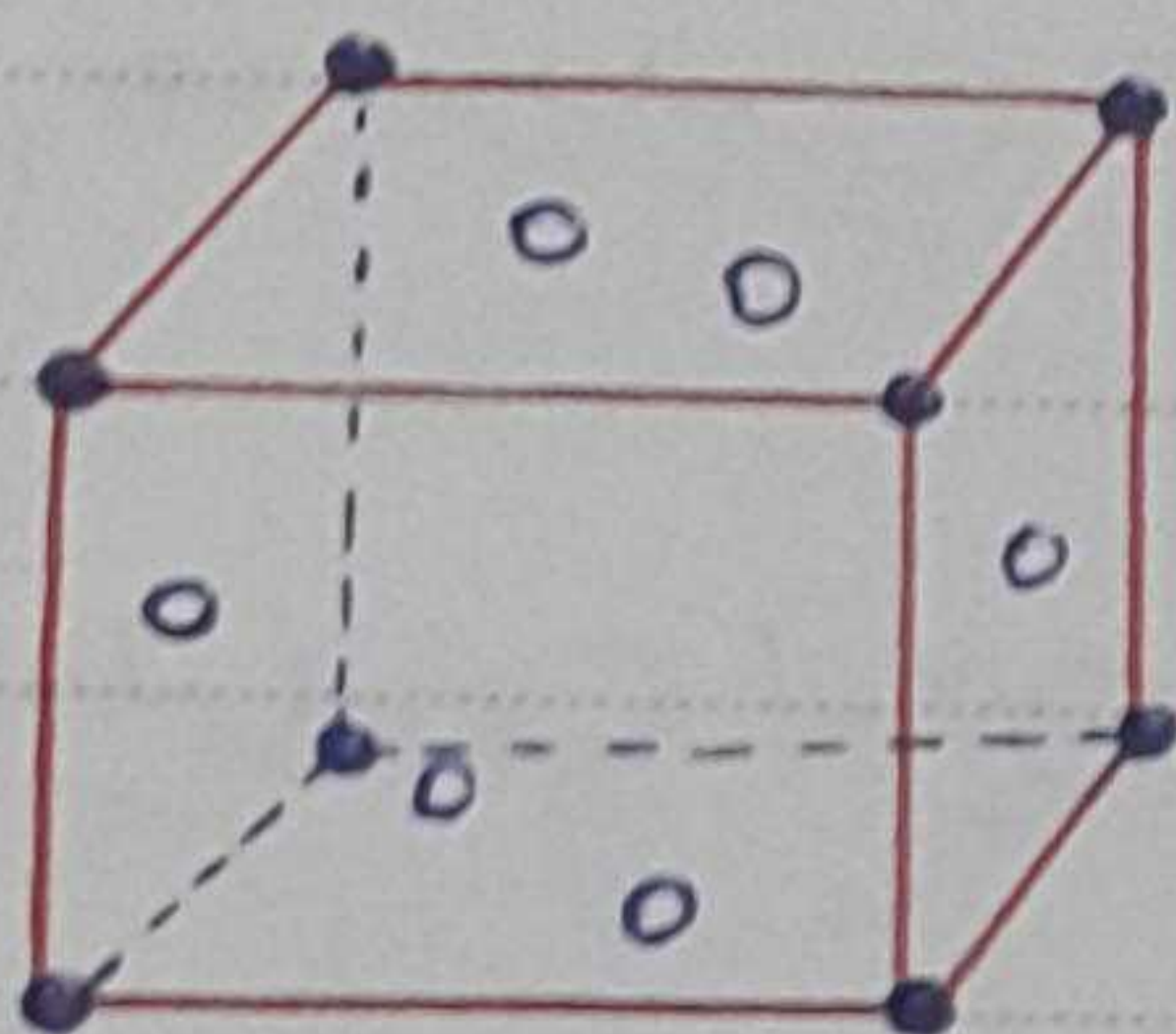
۲- مکعب مرکز بدنه (BCC) Body center cubic



همان SC است نه در مرکز هم یک مکعب قرار دارد.

$$\text{تعداد اتم ها} = \frac{1}{8} \times 8 = 1$$

۳- مکعب مرکز وجهه (FCC) Face center cubic



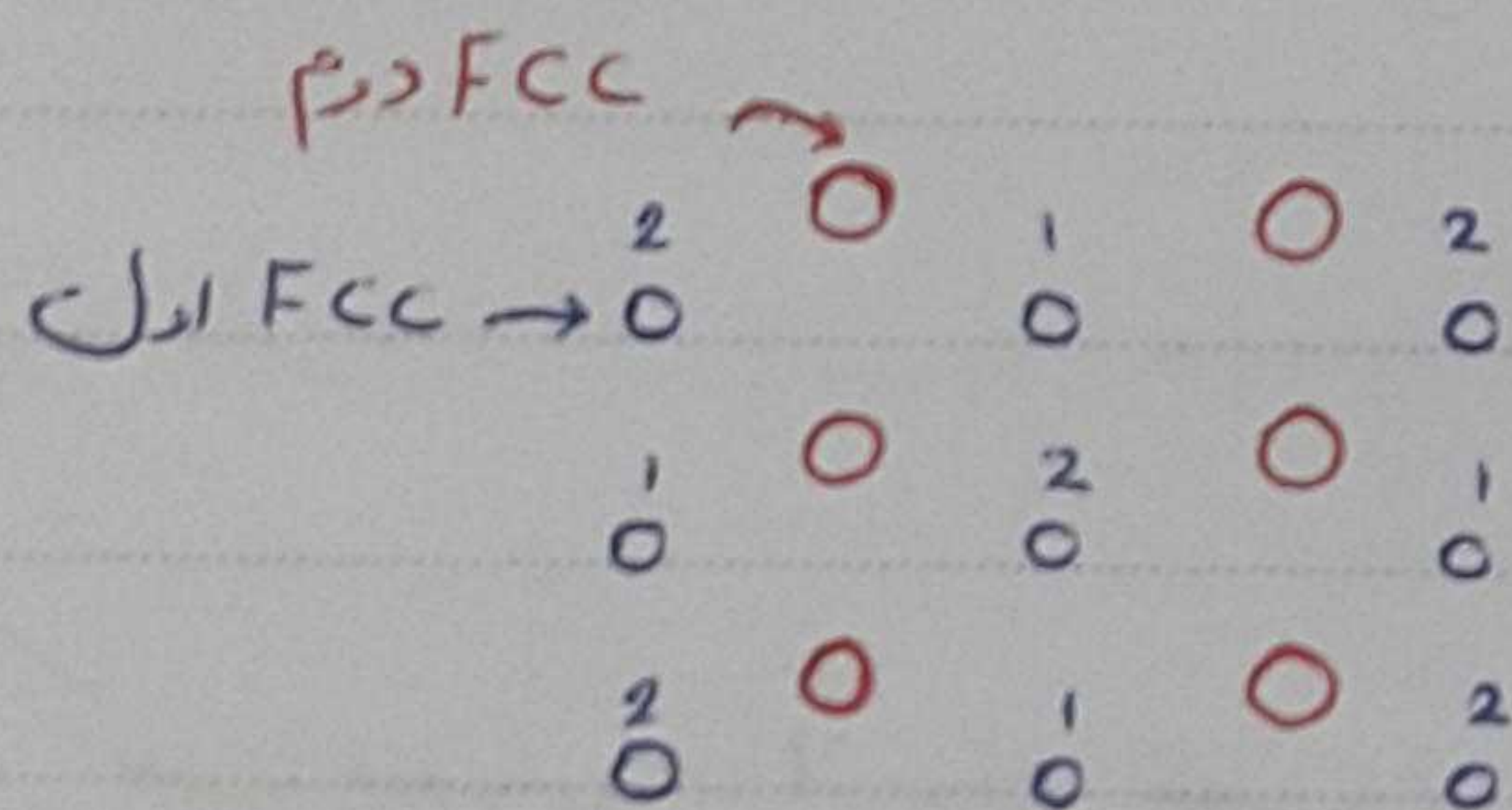
در پنج ها مکعب در مرکز هر وجه یک اتم قرار دارد.

$$\text{تعداد اتم ها} = \frac{1}{8} \times 8 + 6 \times \frac{1}{2} = 4$$

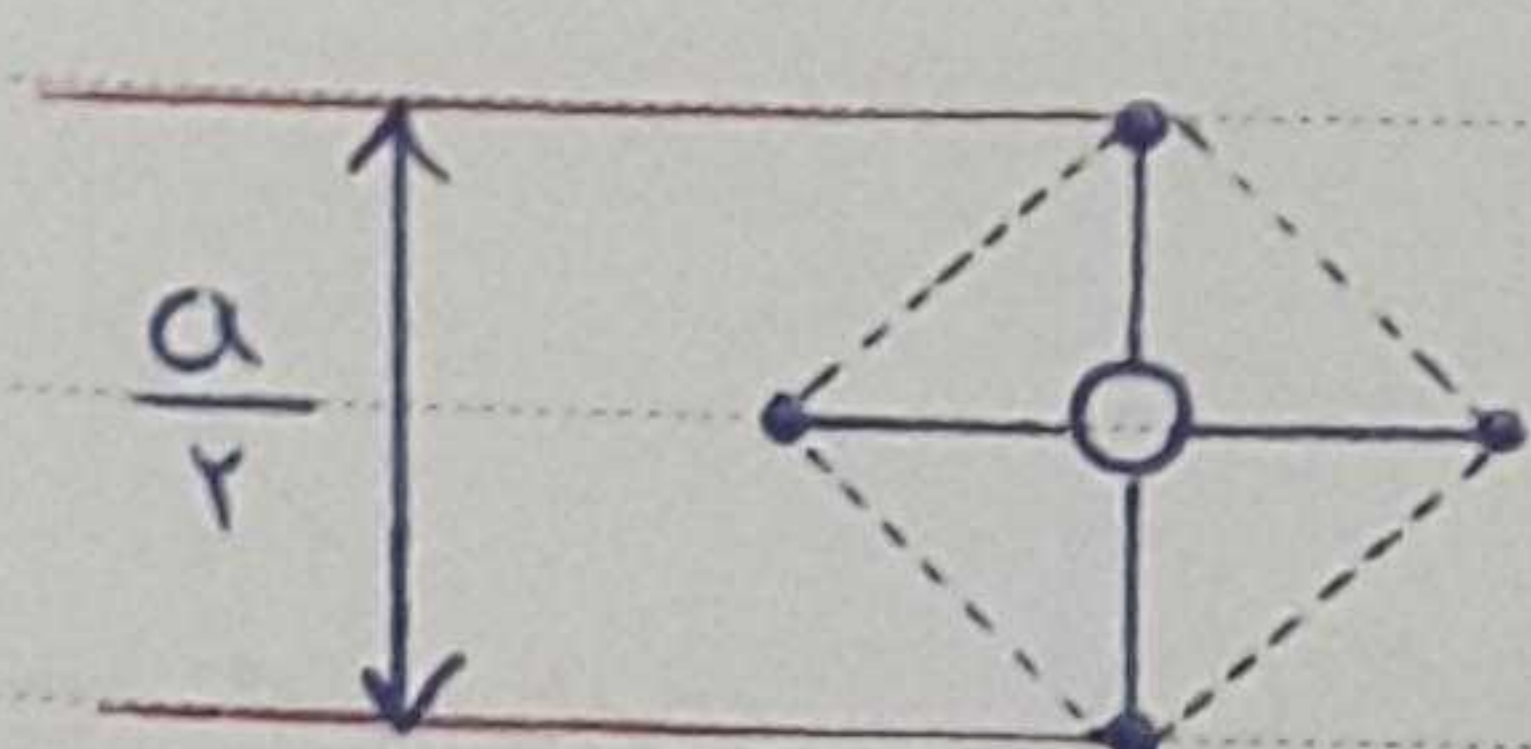
۴- شبکه بلیتال (zinc blend)

الترنیه رساناها دارای آرایش الکترونی فوق هستند، این شبکه یا بلور از دو FCC درست

شده است نه در فاصله $\frac{1}{4}$ در جهت هم قرار دارند.



«تصویر از مقابل شبکه الماس»



لوحه‌ترین بخش یک شبکه‌ی الماس است.

هرم = چهاروجهی

در این قسمت برای بدست آوردن حجم سلول می‌توان از یک مله‌ب استفاده کرد.

اتم‌ها نزدیک همسایه‌ی دوشبه الماس: هر اتم چهار همسایه‌ی نزدیک دارد.

فاصله‌ی اتم‌ها نزدیکترین همسایه $a \sqrt{\frac{3}{4}}$ است.

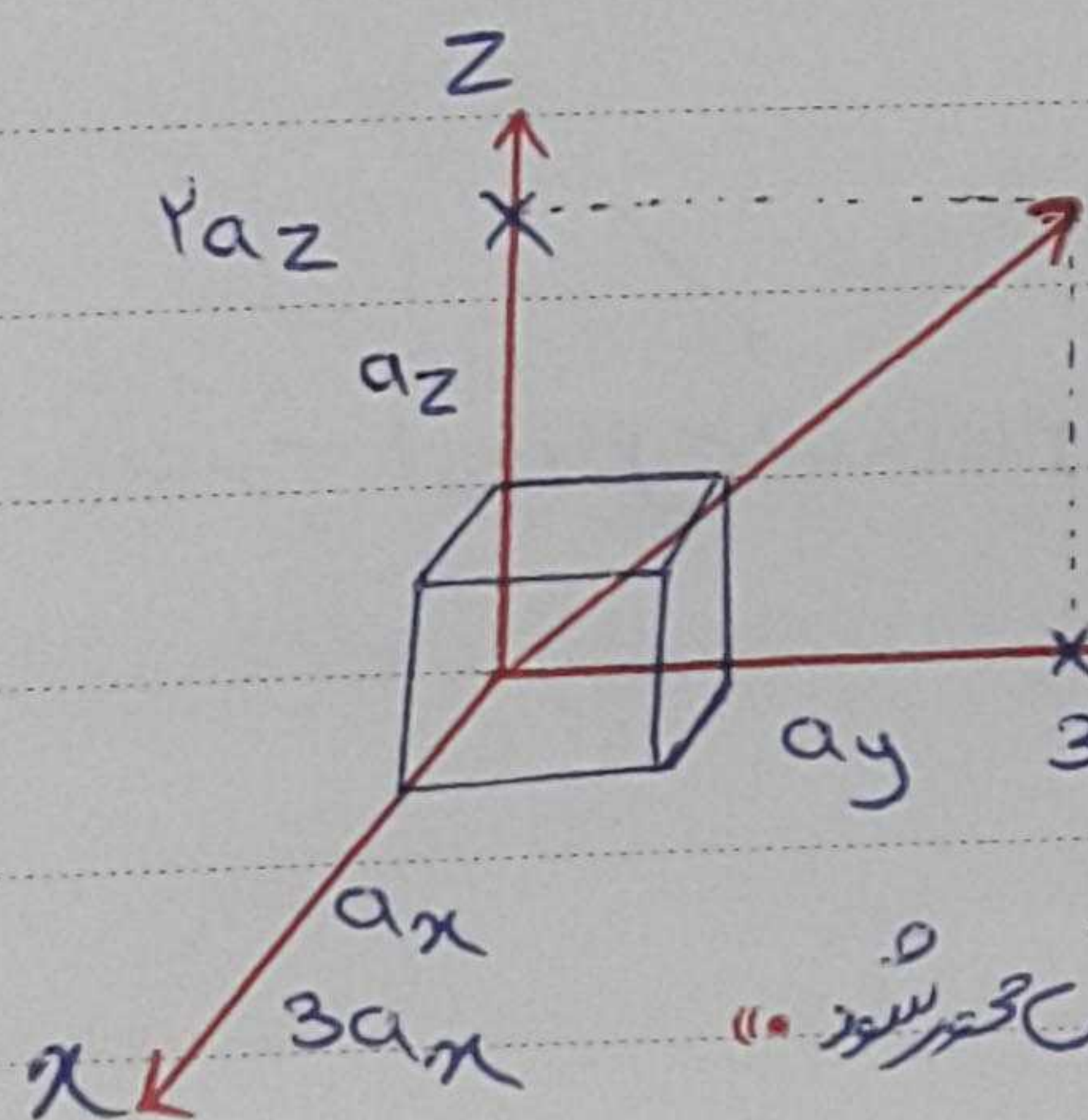
* اندیس‌ها میلر: این اندیس‌ها به یک دسته‌ی عددی سه‌تایی هستند خاصیت جهت‌ها مختلف

بلور نشان می‌دهند.

دو نوع اندیس میلر وجود دارد:

۱. جهت میلر: خواص انیتریتی در این جا اهمیت دارد.

۲. صفحه میلر: خواص مکانیکی در این جا اهمیت دارد.



* جهت میلر:

تصویر یک نقطه از بردار جهت را روی محورها بدست می‌آوریم و آنقدر نقطه‌ی یاد شده را به مبدأ دور و نزدیک می‌کنیم تا تصویر روی محورها هم‌ب (درستی از ثابت شبکه‌ی روان محورها شود).

$\hat{x} \quad \hat{y} \quad \hat{z}$
 $3 \quad 3 \quad 2$
 $\frac{1}{3} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{2}$
 $2 \quad 2 \quad 3$
 $\rightarrow [2 \quad 2 \quad 3]$

جهت میلر

مثال: قطر اصلی ملکب:

 $1 \quad 1 \quad 1$

تغییر این جهت در هر سه محور مساوی است.

 $1 \quad 1 \quad 1$
 $1 \quad 1 \quad 1$
 $1 \quad 1 \quad 1$
 $\rightarrow [1 \quad 1 \quad 1]$
مثال: قطر اصلی به از a_x در محور x می نهد، پس از انتقال به مبدأ اختیاریحل تقاطع با محل محورها با اندیشه تفاوت می نهد در این حالت x منفی می شود.
 $1 \quad 1 \quad 1$
 $\rightarrow [\bar{1} \quad 1 \quad 1]$
 $\downarrow$
در جهت منفی x لا قطع کرده است.

- برخی جهت ها از نظر فیزیکی بیسار هستند و خاصیت مساوی دارند ولی جهت میلر آنها

با هم متفاوت است و به دسته تفاوت اختیاری وابسته است، به این جهت ها،

جهت‌ها معادل شوند و با علامت $\langle \rangle$ نشان می‌دهند.

$$\langle \overset{\text{معادل}}{1} \ 1 \ 1 \rangle \equiv [1 \ 1 \ 1], [1 \ 1 \ \bar{1}], [\bar{1} \ 1 \ 1], [\bar{1} \ \bar{1} \ 1]$$

مثال: درجهت محور x

$\hat{x}$	$\hat{y}$	$\hat{z}$
1	∞	∞
1	0	0

$$\rightarrow [1 \ 0 \ 0]$$

مثال: درجهت محور y : $[0 \ 1 \ 0]$

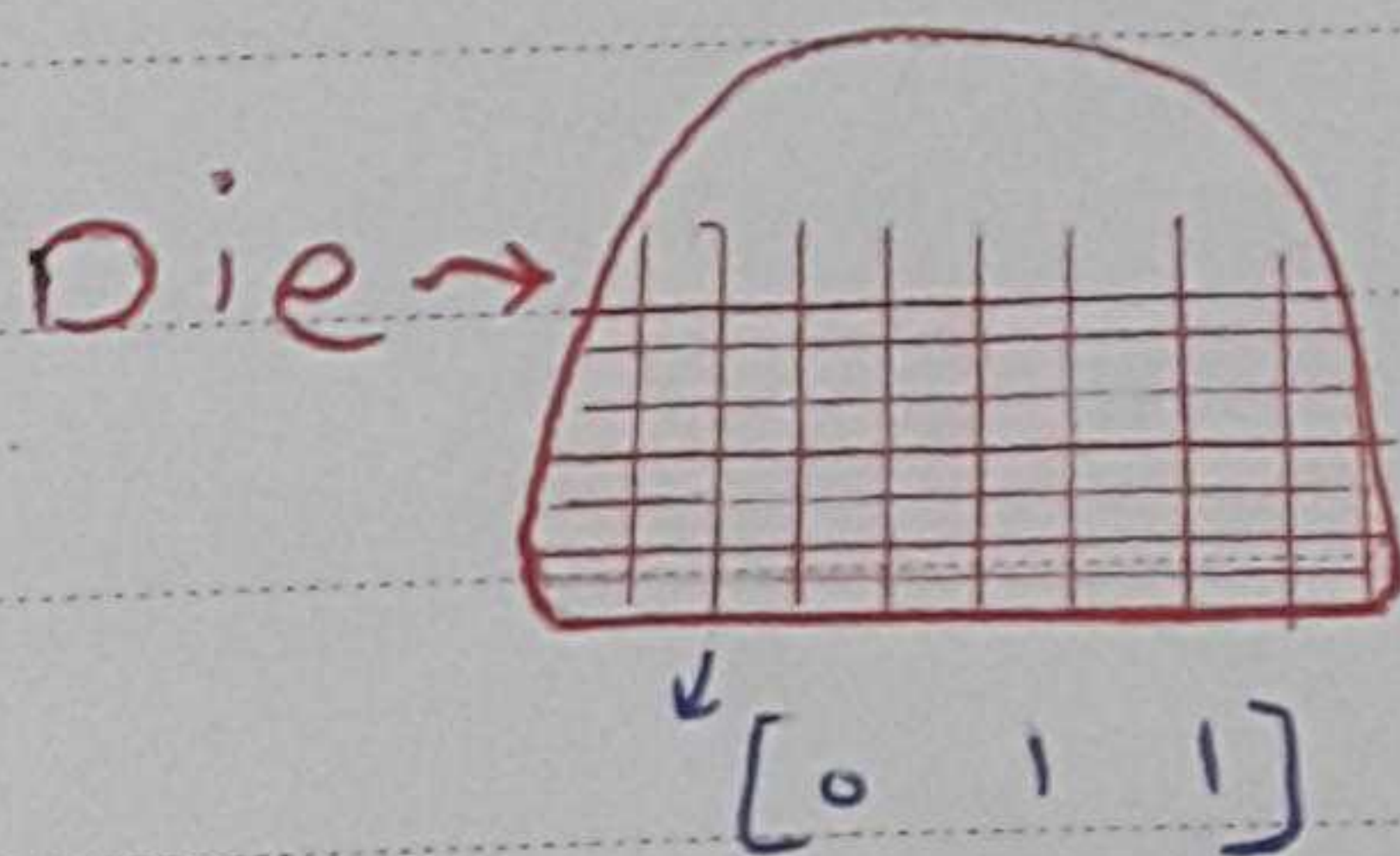
مثال: درجهت محور z : $[0 \ 0 \ 1]$

مثال: درجهت محور $-x$: $[\bar{1} \ 0 \ 0]$

مثال: درجهت محور $-y$: $[0 \ \bar{1} \ 0]$

مثال: درجهت محور $-z$: $[0 \ 0 \ \bar{1}]$

به همین این‌ها با $\langle 1 \ 0 \ 0 \rangle$ برابر هستند.



رایسوزنی وجود دارد وقتی به Die ها برخورد می‌کنیم

نشانه نشان آن‌ها می‌شود، صفحه را با علامت $\langle \rangle$ نشان می‌دهند.

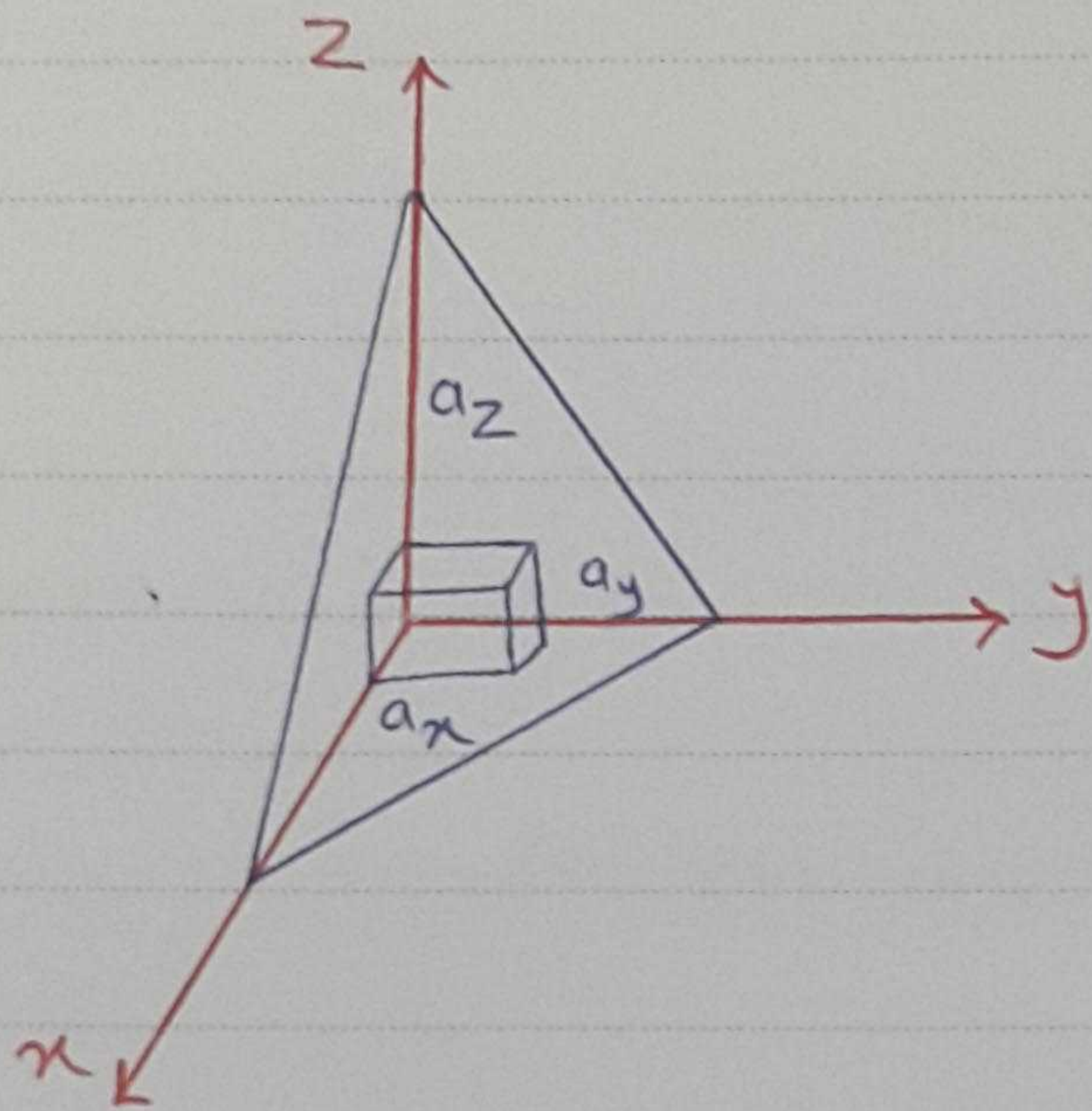
در صفحه جریان نمی‌خورد.

صفحه سبیلر (۱۰۰)

عل تقاطع صفحه لا با دور و نزدیک کردن

از مبدأ طوری تنظیم می کنیم که مقرب درستی

از ثابت شده در هر محور باشد.



$\hat{x}$	$\hat{y}$	$\hat{z}$
۴	۵	۱۰
$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{10}$

(۲ ۴ ۵) صفحه سبیلر

مثال (صفحه xy) (۰ ۰ ۱) و (۰ ۰ $\bar{1}$)

مثال (صفحه xz) (۰ ۱ ۰) و (۰ $\bar{1}$ ۰)

مثال (صفحه yz) (۱ ۰ ۰) و ($\bar{1}$ ۰ ۰)

نیم سازناهی اول (۰ $\bar{1}$ ۰) یا (۰ ۱ $\bar{1}$) که با هم برابرند.

صفحه عمود بر نیم سازناهی اول (۱ ۱ ۰) که با نیم سازناهی اول صفحات معادل هستند.

$\{110\} \equiv (110), (\bar{1}\bar{1}0), (1\bar{1}0), (\bar{1}10), \dots$

* مواد نیمه رسانا *

- انواع مواد نیمه رسانا :

* ۱- یک عنصری : از یک نوع نیمه رسانا ساخته می شود، مثل: Si و Ge Si سیلیسیم (Silicon) کمترین نیمه رسانای موجود می باشد که دارای خواص زیر است :

۱- فراوان است و ارزان (۷۰٪ پوسته زمین)

۲- مقاومت مکانیکی خوبی دارد .

۳- انتقال حرارت بسیار بالایی دارد .

۴- اکسید بسیار مطلوبی دارد (SiO_2)۵- می توان آن را آزاد بسیار خالص کرد و در آن خلوص پایدار است ، درجه خلوص 10^{-9} قابل

استفاده برای صنعت نیمه رسانا است .

۶- ادواتی که با Si ساخته می شوند دارای ویژگی ها الکترونیکی کمتری نسبت به Ge هستند .

* ۲- مواد رومیزی (بازی)

از گروه های ۳، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ / ساختن می شوند.

۳	۵	۶	۷
Ge	As	Zn	O
Al	As	Cd	S
In	P	Cd	Se
Al	Sb	Zn	S
		Cd	Te

* گروه های ۲-۶: فلزات یافت می شوند. * گروه های ۳-۵: بیشتر استعاره می شوند.

* نکته: در مواد رومیزی معمولاً روش ساخت فلزات قیمتی دارند و در موارد ادوات نوری و

فرآیند با آلیاژها استفاده می شوند.

* ۳- مواد رومیزی (آلیاژها)

از گروه ۲-۶ و ۳-۵ هستند.

Ga	As
↓	↓
Al	As

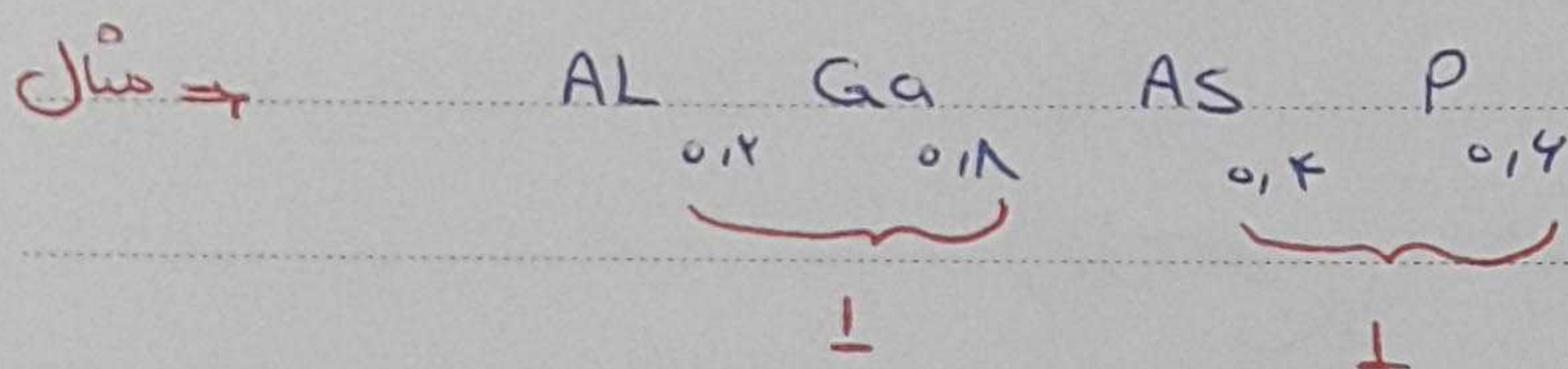
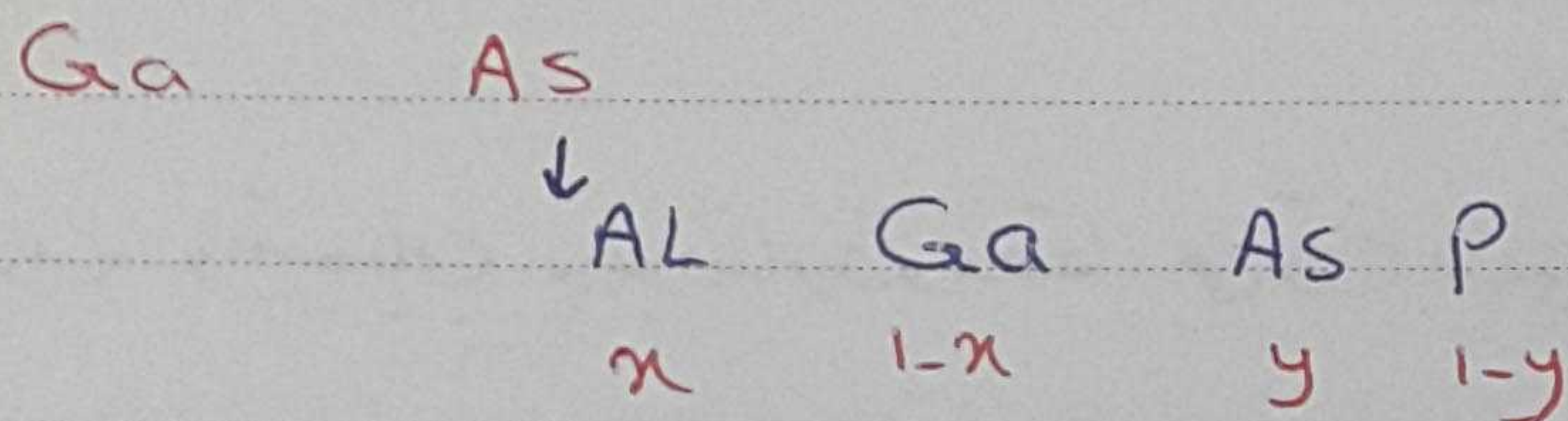
می توان Ga و As را به صورت
جایگزینی انجام داد.

x 1-x

جمع $0.3 + 0.7 = 1$ می شود. اگر 0.3 تا 0.7 داشته باشیم
می توان گفت 0.3 تا 0.7 Ga و 0.7 تا 0.3 Al است.

⇒ مثال

Al_{0.3} Ga_{0.7} As



۱. y, x به این کسر مولی، mol fraction گویند و نشان می‌دهد که سری از

FCC عنصر دیگر در یک FCC دیگر قرار می گیرد.

* ۴ - مواردی

از ترکیبات پلیمری ساخته می‌شوند و از آن هستند ولی کیفیت خوبی ندارند، مقاومت قابل توجهی

دارند و تنها دیودهای نورسبز یا همان LED ها با این مواد ساخته شده اند.

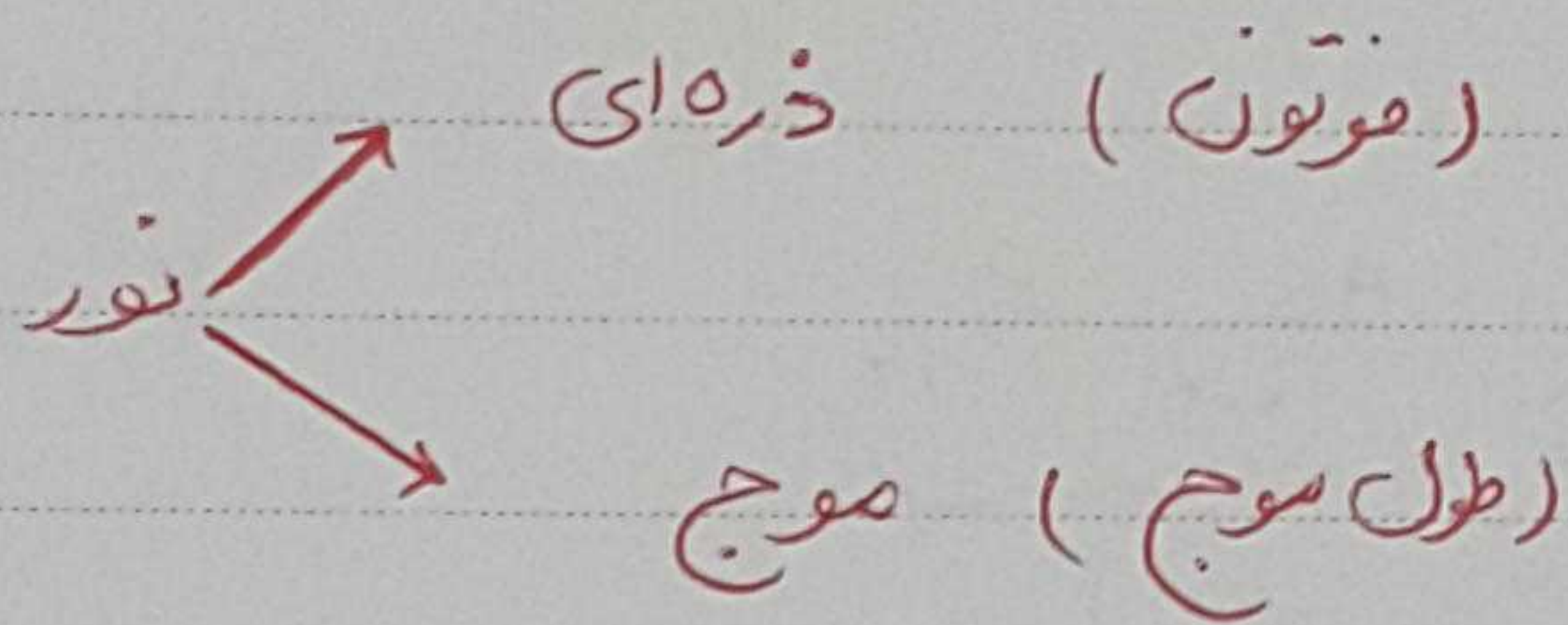
محمد بن یحیی که در این جا اسفا ده می شود

تکنولوژی این مواد در حال توسعه است و کمتر کاربردهای علمی دارند.

* مدل‌های نیمه رسانا:

مدل: عملکرد ریاضی ساده شده‌ی یک پدیده‌ی فیزیکی است، در یک مدل همگی خصوصیات

فیزیکی و شیمیایی وجود ندارد و فقط می‌توان بعضی از خواص را با آن توضیح یا توسعه داد.

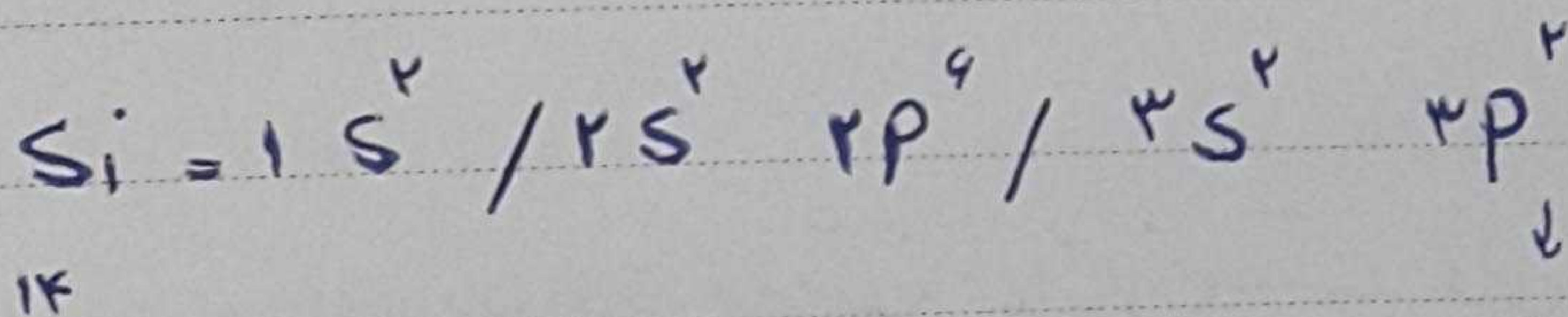


* برای توجیه پدیده‌های موجود در نیم رساناها مدل تعریف می‌کنیم:

۱. مدل باندینگ (پیوندی)

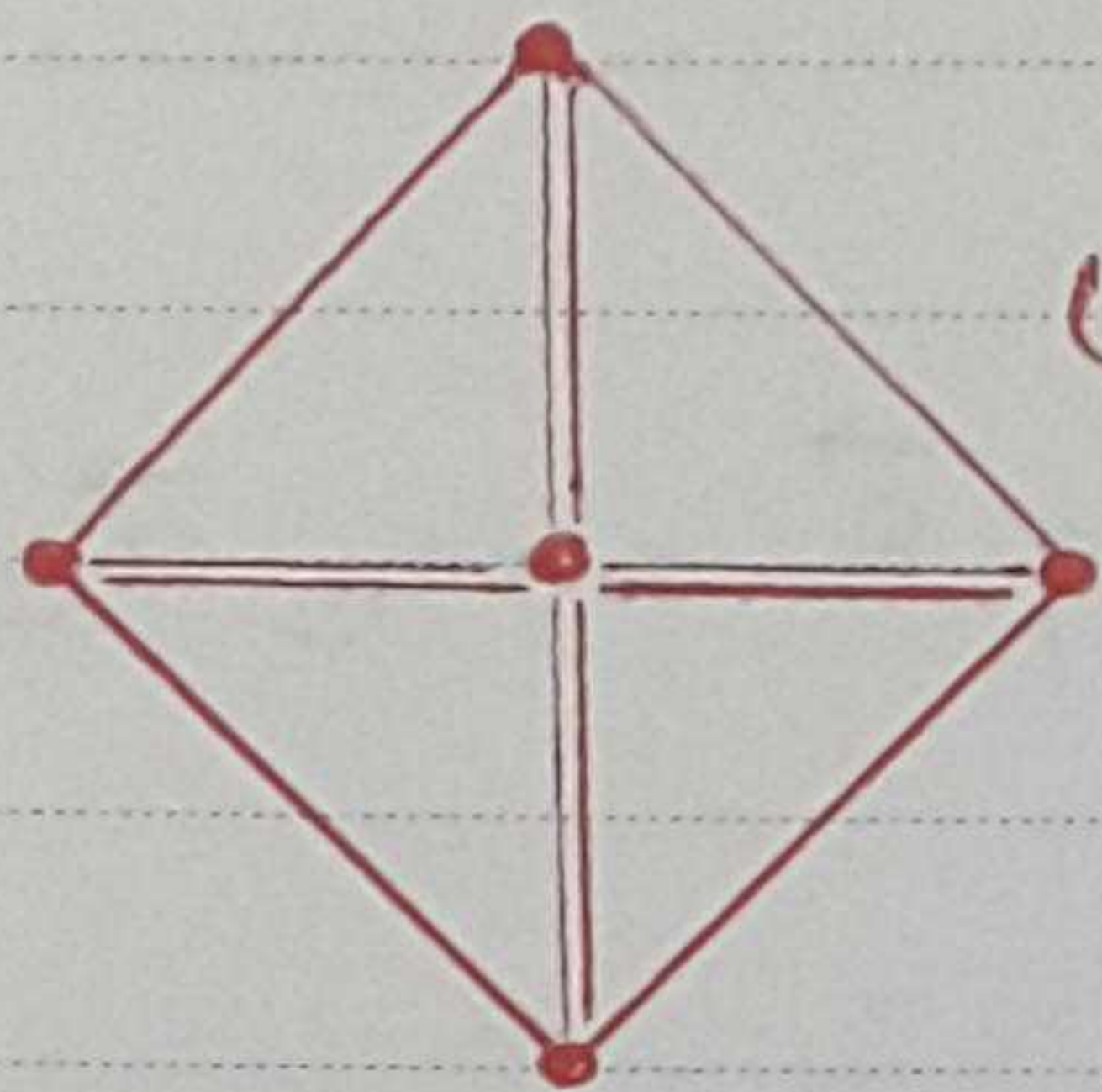
۲. مدل فوار انرژی

* مدل باندینگ *



« چهار مکان خالی دارد »

چهار ظرفیتی است و هر اتم Si می‌تواند با چهار اتم دیگر پیوند کووالانسی تشکیل دهد.

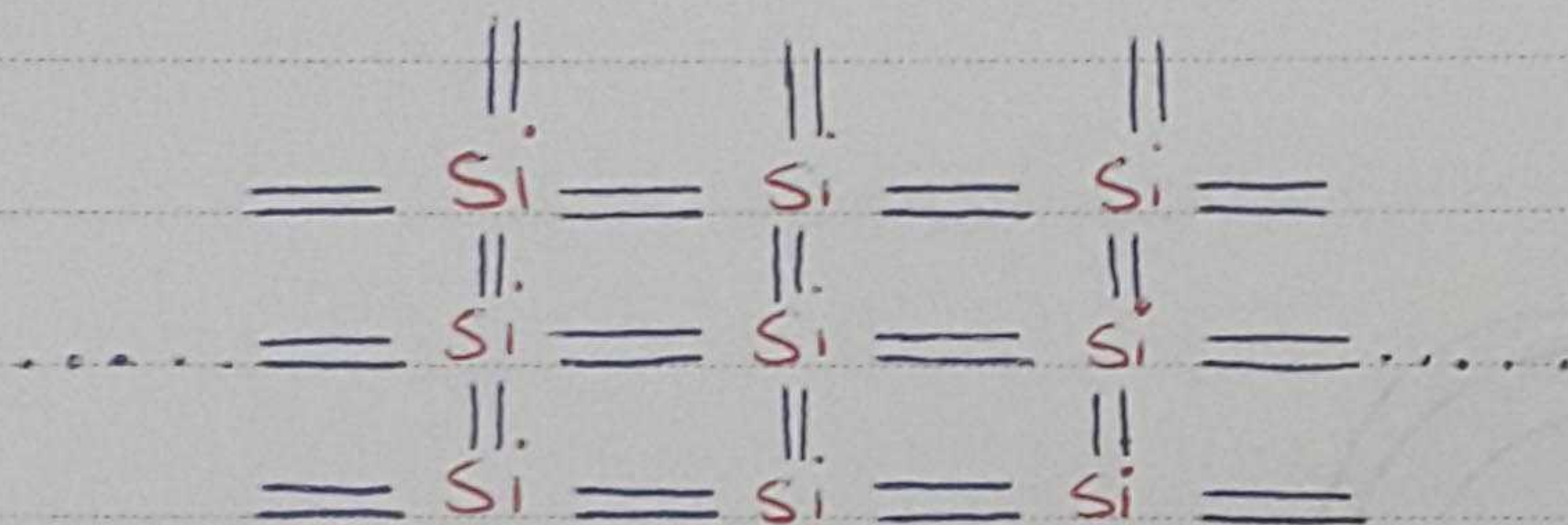


* نوجودترین قسمت یک شبلی الماسی سیلیسیم (سلول اولیه)

- این خط ها بین اتم ها، الکترون هستند، در واقع هر دو اتمی که خواهند به

تغییر مرتب میشوند باید بینشان الکترون قرار گیرد.

اگر سطح سه بعدی بلور سیلیسیم را در یک صفحه به صورت دوبعدی رسم کنیم به آن مدل باندینگ می گویند.



حامل بار charge carrier

- ذره ای که دارای یک بار الکتریکی مثبت یا منفی باشد را حامل بار میگویند، حامل بار منفی، الکترون است.

حامل بار مثبت را حفره گویند.

* حفره * یک مفهوم ذهنی است و به جای خالی الکترون حفره گویند و از نظر خواص دیگر

کاملاً مساوی الکترون فرض می شود، مثل (جرم - تندی - سرعت - ...) ولی با آن خلاف

الکترون است.

میدان الکتریکی

$\vec{E}$



$$F = -q \vec{E}$$

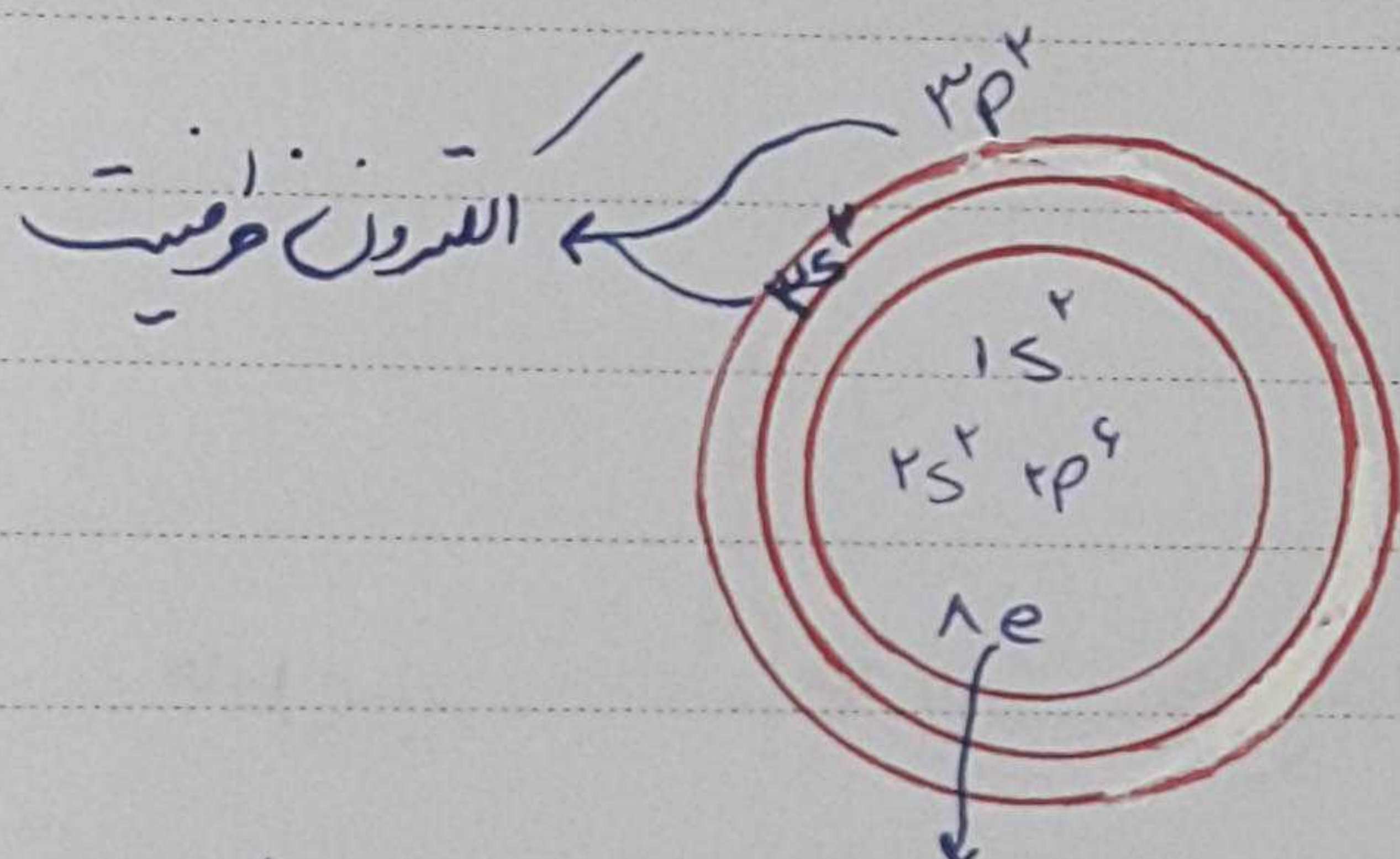
e^-

$$F_e = -q \vec{E} = m_e \vec{a}_e$$

$$F = q \vec{E}$$

h^+

$$F_h = q \vec{E} = m_h \vec{a}_h$$



ارتباطی ها پر: متصور اعداد ۱, ۲, ۲ هست به ترتیب
s, p می باشد.

الکترون ها موجود در ارتباطی های پر را الکترون ها مقصد لویند، هیچ نفسی در ترتیب

شیمیایی و یونیدها با عناصر دیگر ندارند و همچنین هیچ نفسی هم در هدایت الکتریکی ندارند.

به الکترون ها ارتباطی آخر، الکترون ظرفیت می لویند، این الکترون ها می تواند مقید باشد

یا آزاد، اگر الکترونی نبندی به هسته ندانسته باشد به آن الکترون آزاد می لویند.

تعداد الکترون ها آزاد در واحد حجم نشان دهنده هدایت الکتریکی ماده است.

- در مواد عایق الکترون ها آزاد نداریم.

- در مواد رسانا همی الکترون ها ظرفیت آزاد هستند؛ مثل فلزات.

- مواردی رسانا بین این دو است و تعداد الکترون های آزاد بیش از کل الکترون ها ظرفیت است.

در دمای صفر مطلق هیچ انرژی گرمایی در محیط بلور نداریم.

(KT)

KT : انرژی گرمایی

K : ثابت بولتزمن

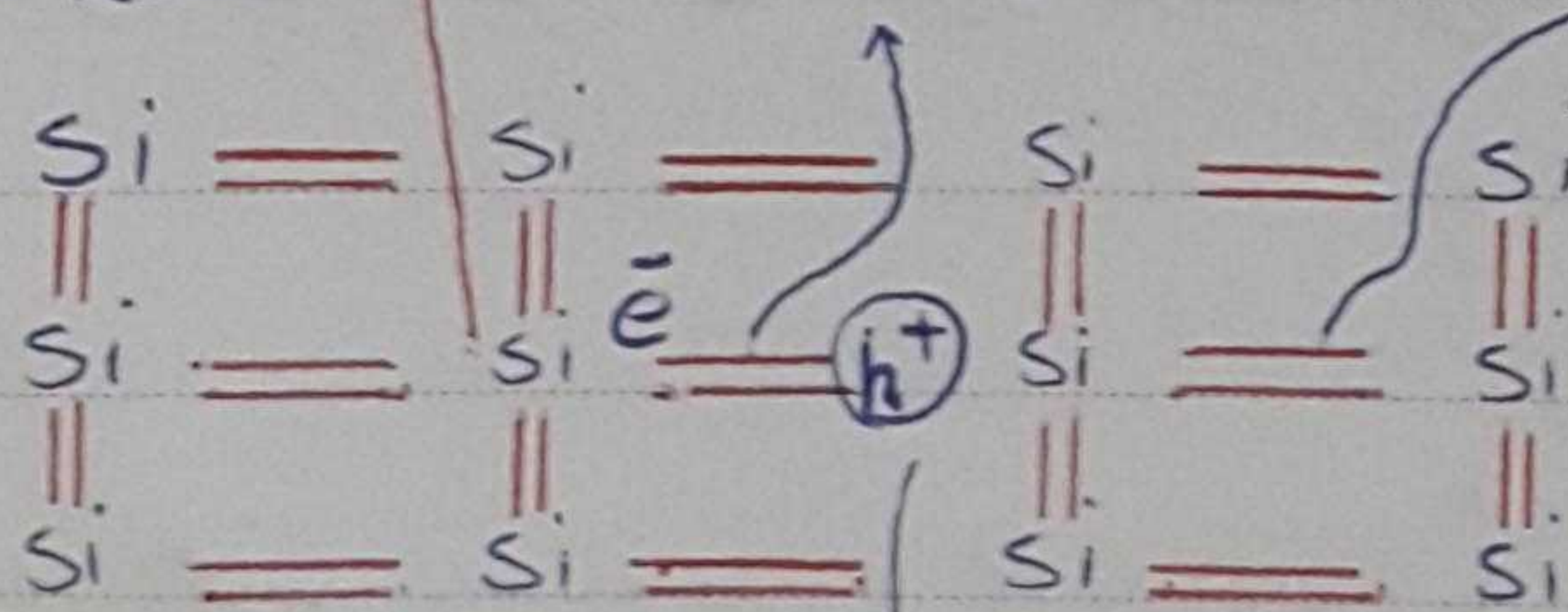
T : دمای کلوین

- بنابراین همی الکترون ها مفید به هسته هستند و الکترون آزاد وجود ندارد و همی مواد

عایق هستند، (برخی ابر رسانا ها خالص هستند)

فرض کنید پیوندها این سمت
سلسله شود.

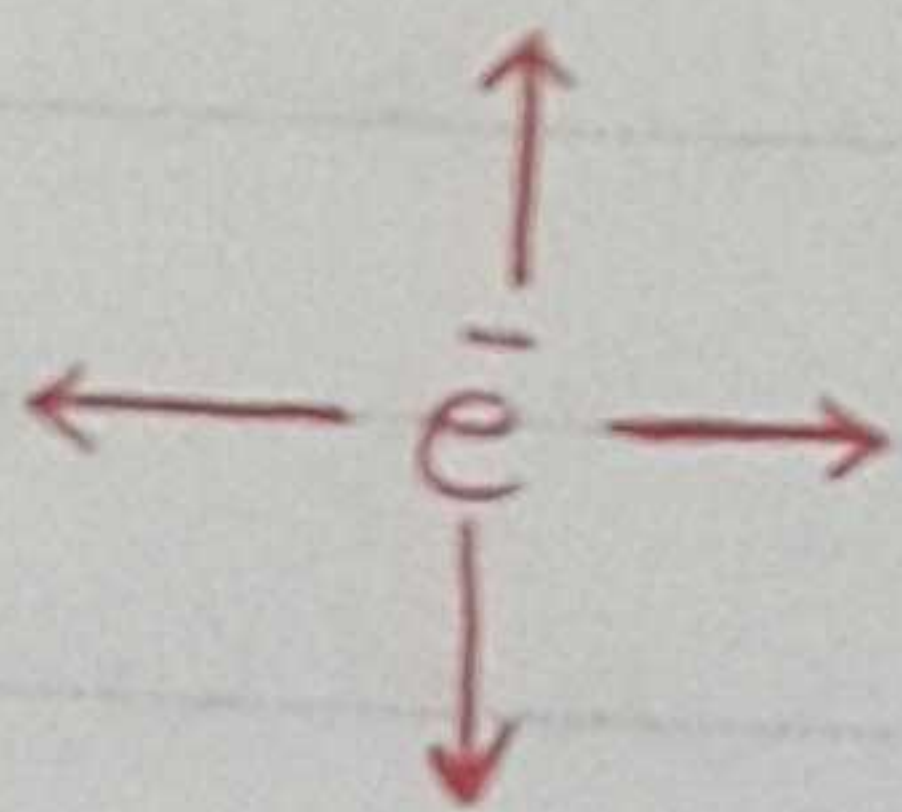
این الکترون عوف می شود.



در می تواند الکترون این سمت به سمت قبل
برود و در این جا تنها حفره باقی می ماند.
که در واقع الکترون در این سمت،
جای الکترون سمت قبل را پر می کند.

KT

ناقص (محبوب)



در داخل شغل بیل، e^- اینگونه می شود: $\Leftarrow$

- یوها KT به این پیوندها انرژی دادند، در اثر گرمای محیط، انرژی به پیوندها داده می شود و

به اندازه ی انرژی داده شده پیوندهایی می شکنند، شل شدن پیوند به صورت تصادفی است و

نمی توان گفت که کدام ممکن است شکسته شود.

- در اثر شل شدن یک پیوند یک الکترون اضافی در یک اتم کمبود یک الکترون داریم دیگر خواهیم داشت

- بنابراین در اثر شل شدن یک پیوند یک الکترون و یک حفره آزاد درست می شود، می توان با

جابجایی الکترون از پیوند دیگر جابجاسد، بنابراین آزاد محسوب می شود و می توان هدایت الکتریکی

ایجاد کند.

- در دمای اتاق مقدار الکترون ها و حفره ها آزاد در یک بلور خاص با هم برابرند. در دمای اتاق،

تعداد الکترون ها و حفره ها آزاد در یک بلور خاص با هم برابرند.

$n =$ چگالی الکترون در واحد حجم (cm^{-3}) (نسبتی شمرده)

$p =$ چگالی حفره در واحد حجم (cm^{-3})

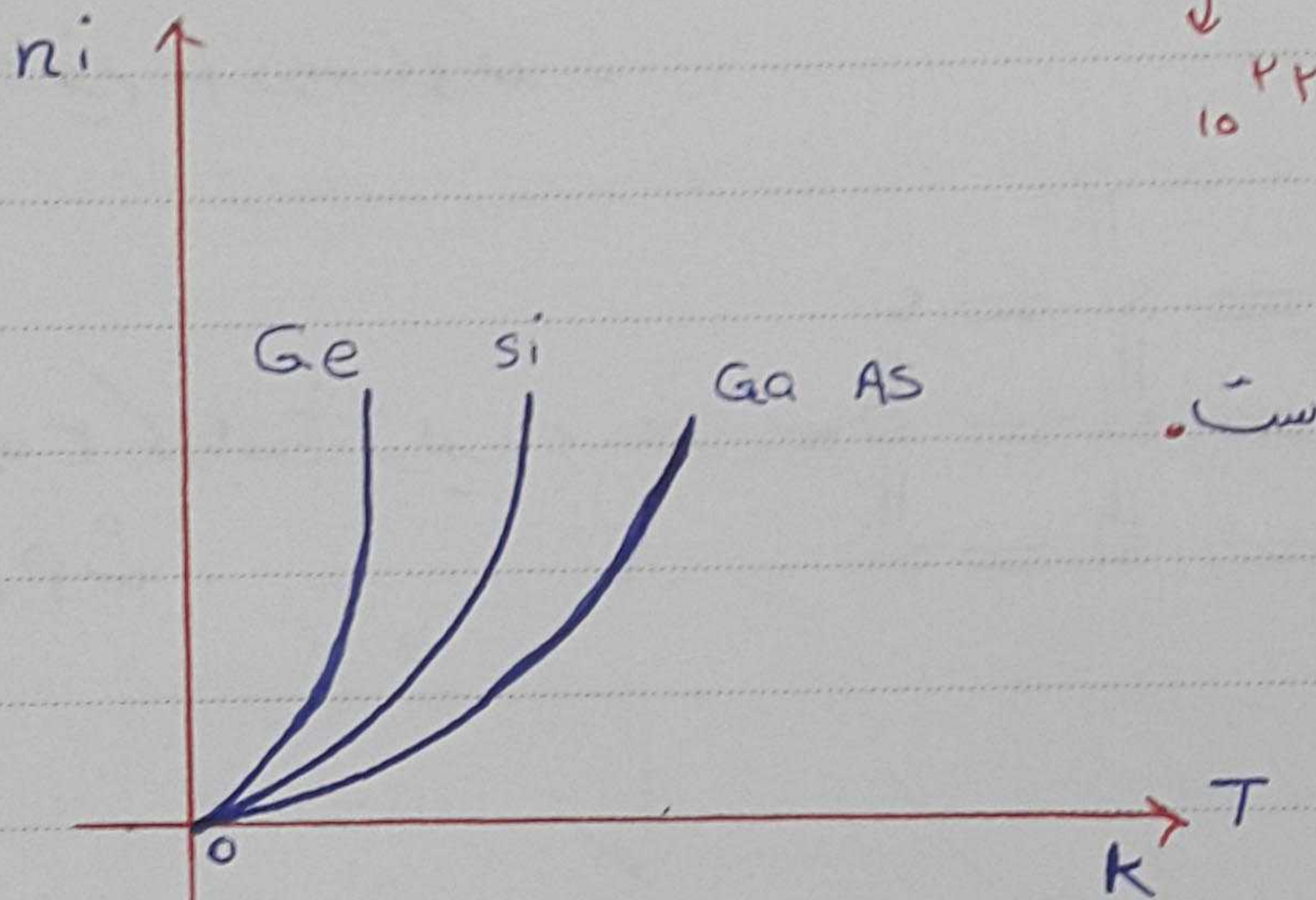
نسبت به نوع ماده ای نیم رسانا مقدار $n = p \Rightarrow$ مشخص دارند که با n_i نشان داده می شود.

به نیم رسانای خالص بدون هیچ ناخالصی ذاتی (intrinsic) تولید می‌شود.

ni: چگالی حامل های آزاد در بلور ذاتی.

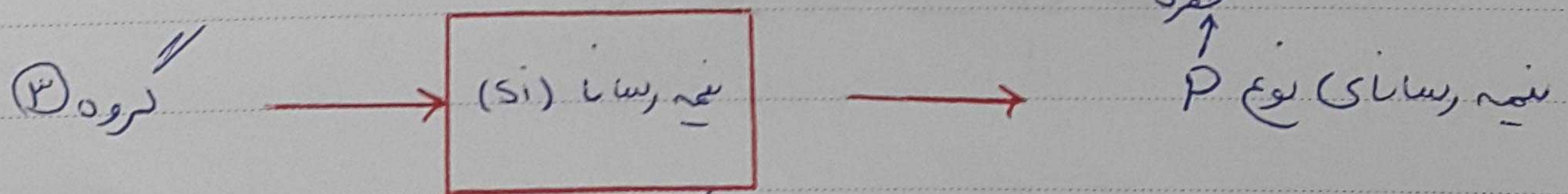
cm^{-3}	Si	Ge	Ga	As	$T = 300\text{K}$
ni	10^{10}	10^{14}	10^6	10^6	

* در فلزات ni همان عدد آووگادرو است.

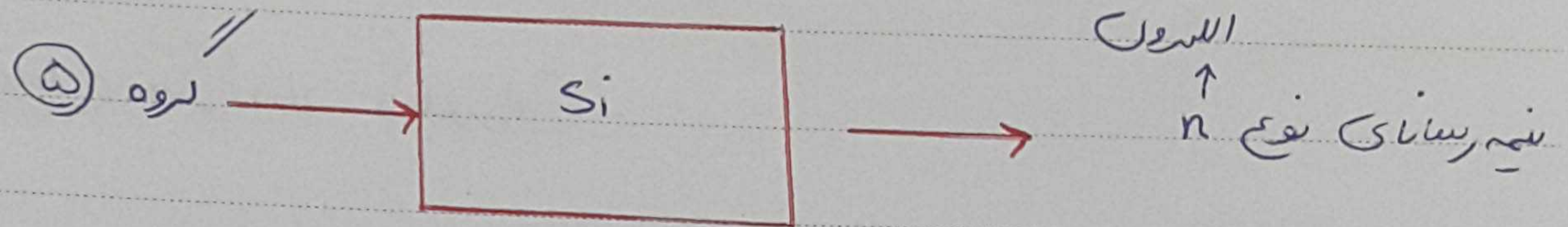


سرعت تغییراتشان متفاوت است.

نیم رساناها می‌توانند با دریافت ناخالصی‌ها خصوصیات الکتریکی مختلفی داشته باشند و خواص آنها تغییر کند.



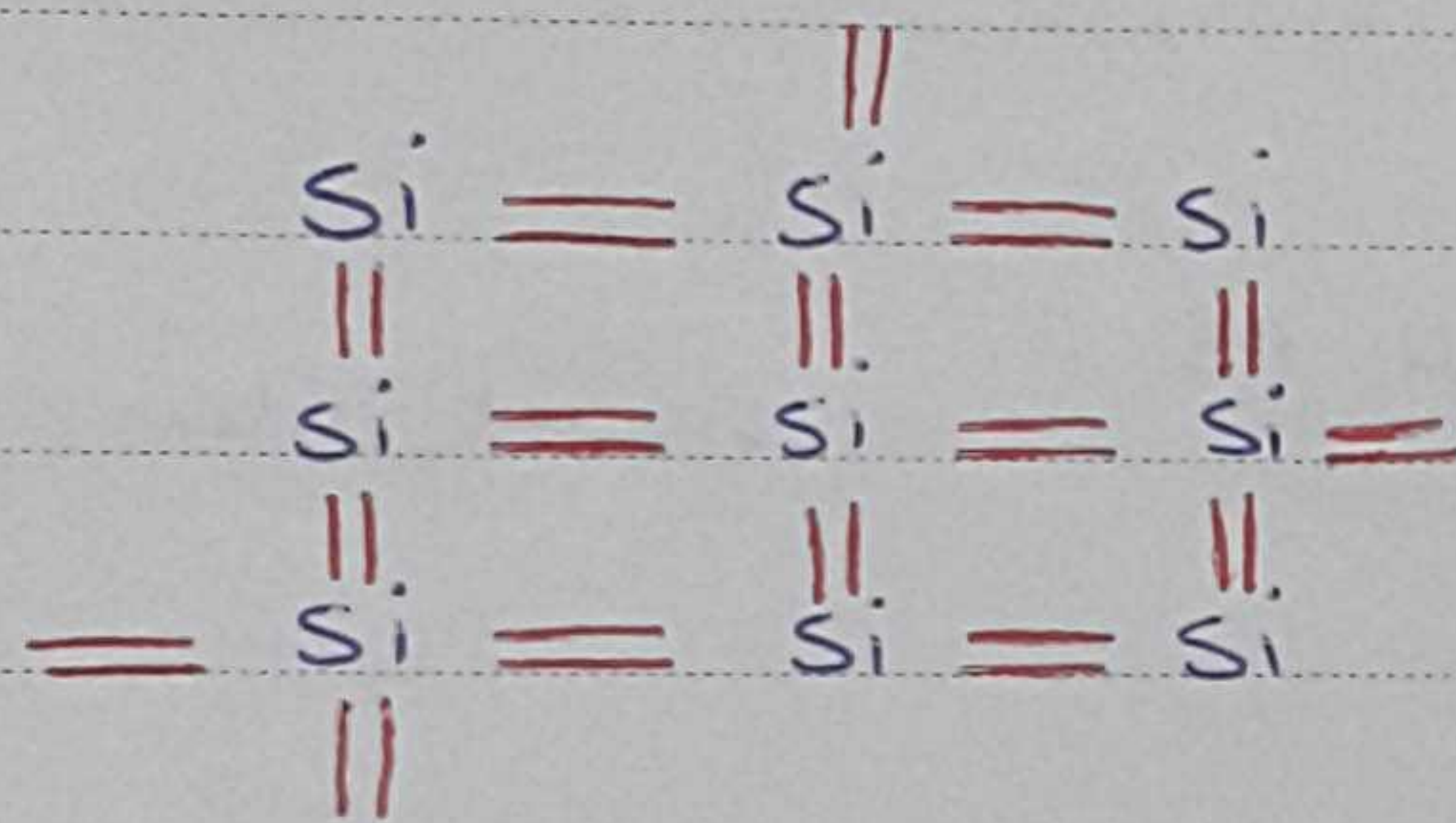
* اگر گروه 3 را به نیم رسانای Si اضافه کنیم، نیم رسانای نوع P حاصل می‌شود.



* اگر نروه ۵ را به نیم رسانای Si اضافه کنیم نیم رسانای نوع n بوجود می آید.

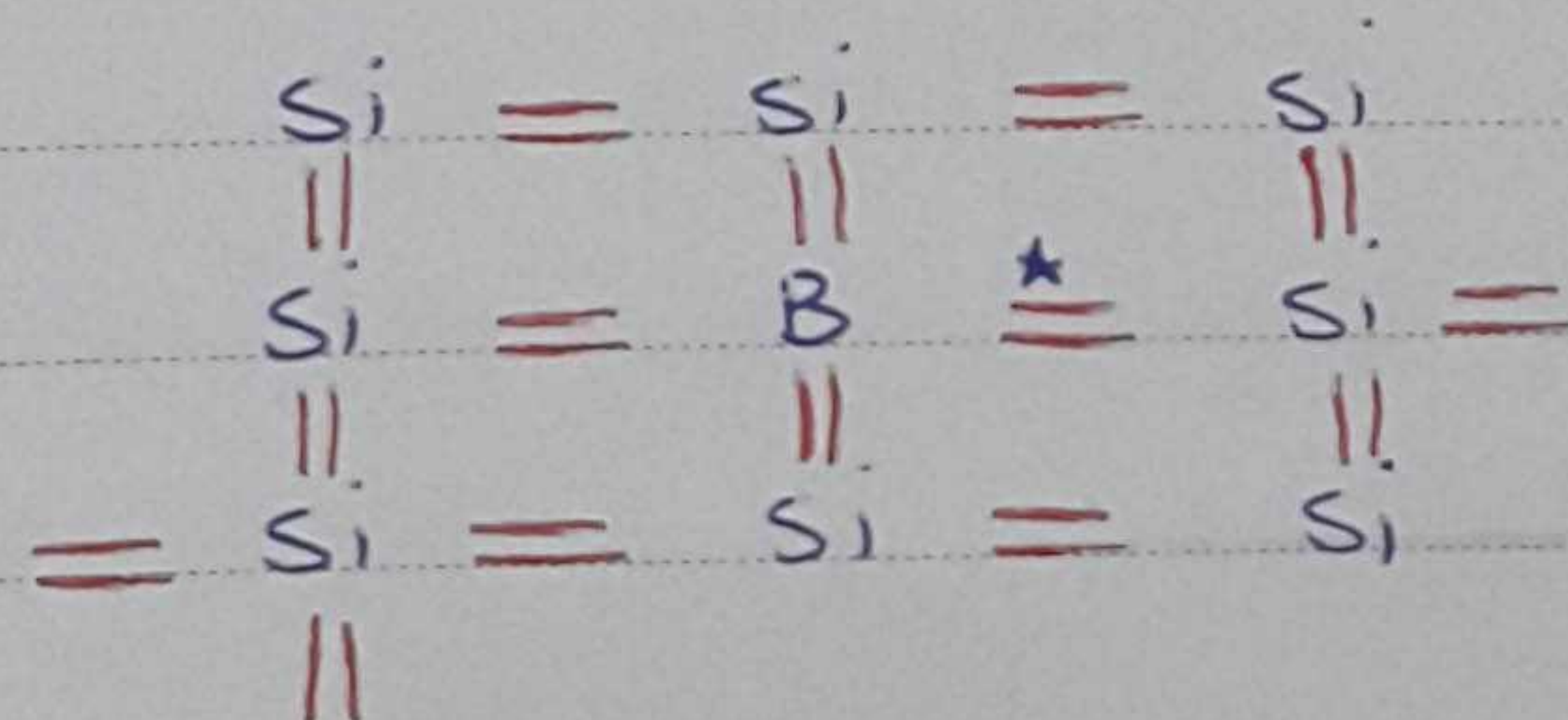
- اگر نیم رسانای با نیری داشته باشیم باید از نروه (۴) به آن اضافه کنیم که بعضی از این ها نیز

نوع n و بعضی نوع p درست می لند.



مثال ۱ برای نروه ۳ که باعث تولید نیم رسانای نوع p شد.

B (بور) چون سه ظرفیتی است، جایگزین Si در مرکز می شود.



* B چون ۳ ظرفیتی است، در اثر شکستن الکترون آن می شکند و می توان از پیوند با این الکترون

راگرفت و به سمت * اضافه کرد ، در پیوند با این فقط حفره باقی می ماند ، در حالت * چون

الکترون اضافه کردیم پس یون منفی خواهد داشت .

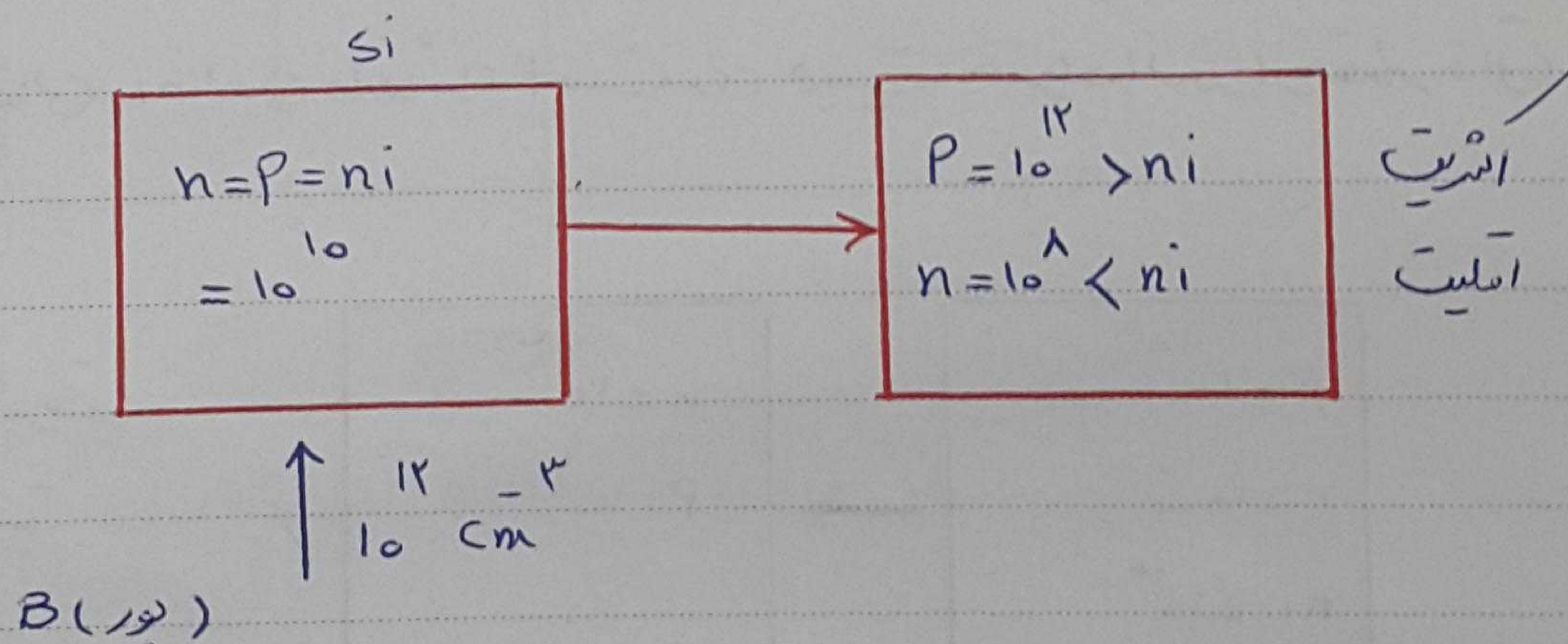
- در اثر افزودن اتم ناخالصی گروه ۳ به ازای هر اتم ناخالصی یک حفره ی آزاد در دمای

اتاق تولید می شود . و این علاوه بر حفره های ماده ذاتی است . در این حالت چون مقدار حفره ها

زیادتر از الکترون ها است ، به آن ها حامل های مثبت گویند و به الکترون ها اقلیت گویند و به

نیم رسانای حامل نوع P گویند . در اثر این کار مقدار الکترون ها چون با حفره های بیشتری مواجه

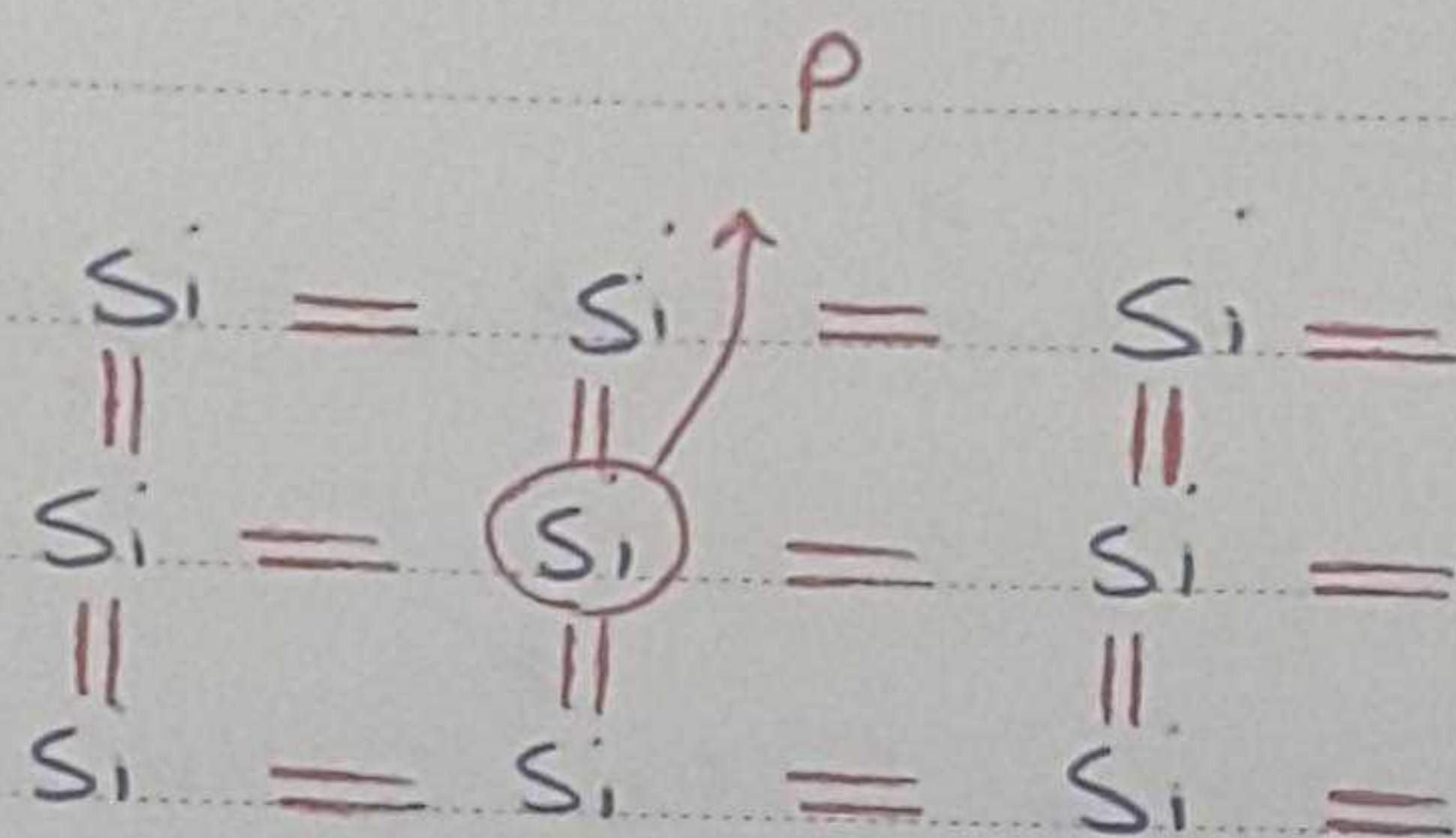
هستند کاهش می یابد . یعنی از مقدار ذاتی کمتری شود .



$$np = n_i^2$$

→ برای حالت تعادل

مثال) برای ورود $\frac{1}{2}$ که باعث بوجود آمدن نیم رسانای نوع n خواهد شد.



می توان در این قسمت به جای Si در مرکز، P را اضافه کرد. اضافه

 «افزودن حفره»

- الکترون اضافه در دمای منفی مطلق مفید است ولی در دمای اتاق آزاد می شود.

P یونیزه می شود (P^+) و یک الکترون به ازای Si است، در این کار جمعیت الکترون ها

حدود برابر چگالی ناخالصی وارد شده است ولی جمعیت حفره ها کمتر از مقدار ذاتی می شود.

$ \begin{aligned} &10 \\ P &= 10 \\ n &= 10^{10} \\ n_i &= 10^{10} \end{aligned} $	$\rightarrow$	$ \begin{aligned} &14 \\ n &= 10 \\ P &= 10^6 \end{aligned} $
---	---------------	---

الکترون اثری
 حفره اقلیت
 ماده نوع n

Si

P 14 10 cm^{-3}

$$P \times n = n_i^2$$

* ۲- مدل انرژی: انرژی الکترون در مواد مختلف از نظر ابعاد:

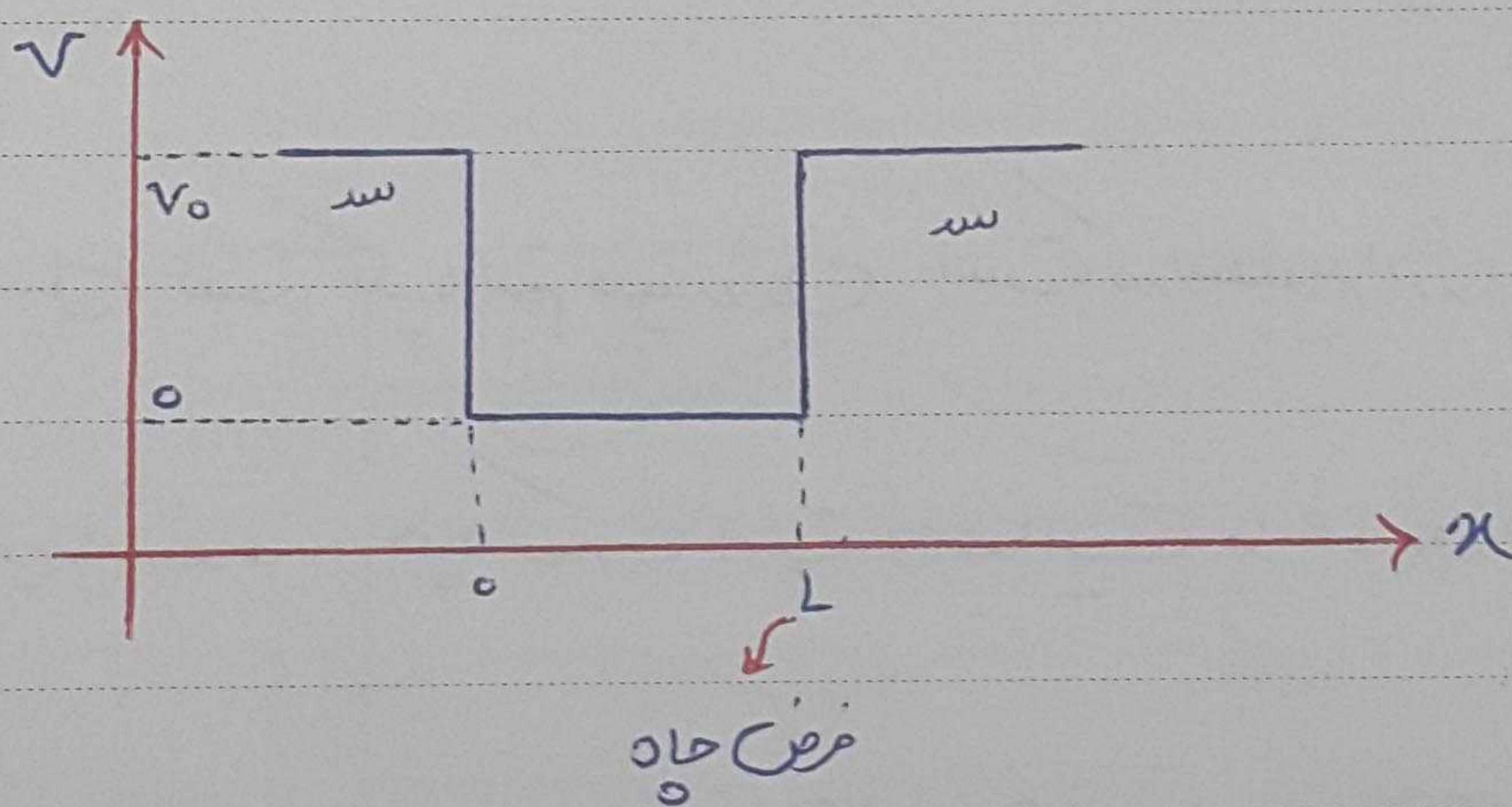
مواد را بر این گونه تقسیم بندی می کنند:

۱- سه بعدی (Bulk): در ماده سه بعدی الکترون می تواند انرژی پیوسته داشته باشد.

۲- دو بعدی: یک بعد از ماده بسیار کوچک است (مثل چاه پتانسیل کوانتمی).

۳- یک بعدی (سیم کوانتمی)

۴- صفر بعدی (نقطه کوانتمی یا سبب اتم)



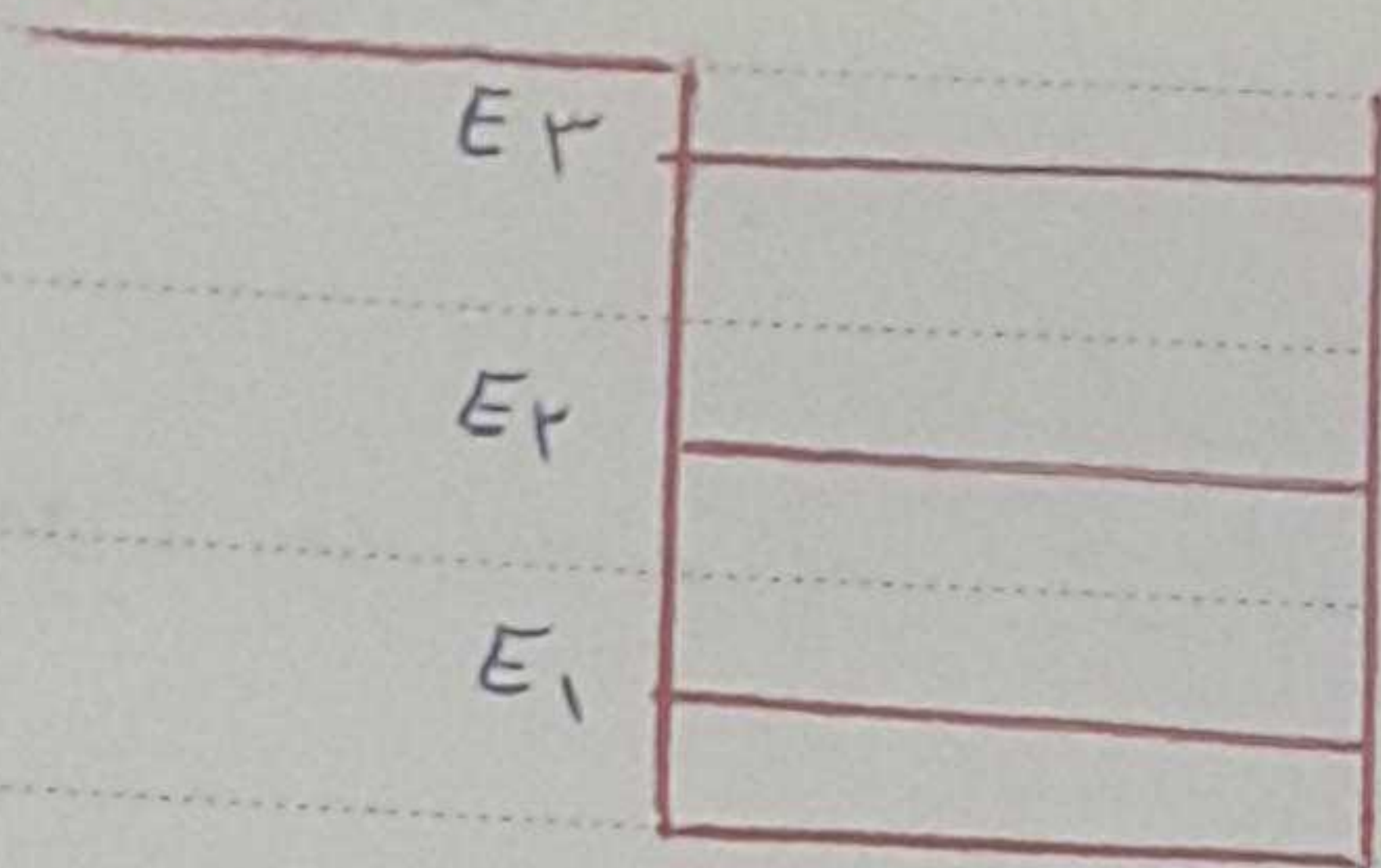
«چاه پتانسیل»

اگر ابعاد بسیار بزرگ باشد، چاه معمولی و مثل ماده ی Bulk است، ولی اگر کوچک باشد

(کمتر از 10^{-8} م) به آن چاه کوانتمی می گویند، یعنی قوانین فیزیک کوانتمی برقرار است، در حالت چاه

کوانتم اگر الکترون داخل چاه باشد انرژی ها خاصی می تواند بگیرد و انرژی پیوسته ندارد، این

انرژی ها مقادیر ویژه ی معادله ای به نام شرودینگر هستند.



- معادله‌ی فوق تابع یا بردارهای ویژه مهم دارد که

به رابطه‌ی موج الکترون معروف است، موج الکترون

رواقت به احتمال حضور الکترون اشاره دارد. رابطه‌ی موج الکترون را با $\psi(x)$ نشان می‌دهند.

سای $\psi \rightarrow$

$$\psi(x) \psi(x)^* = |\psi(x)|^2$$

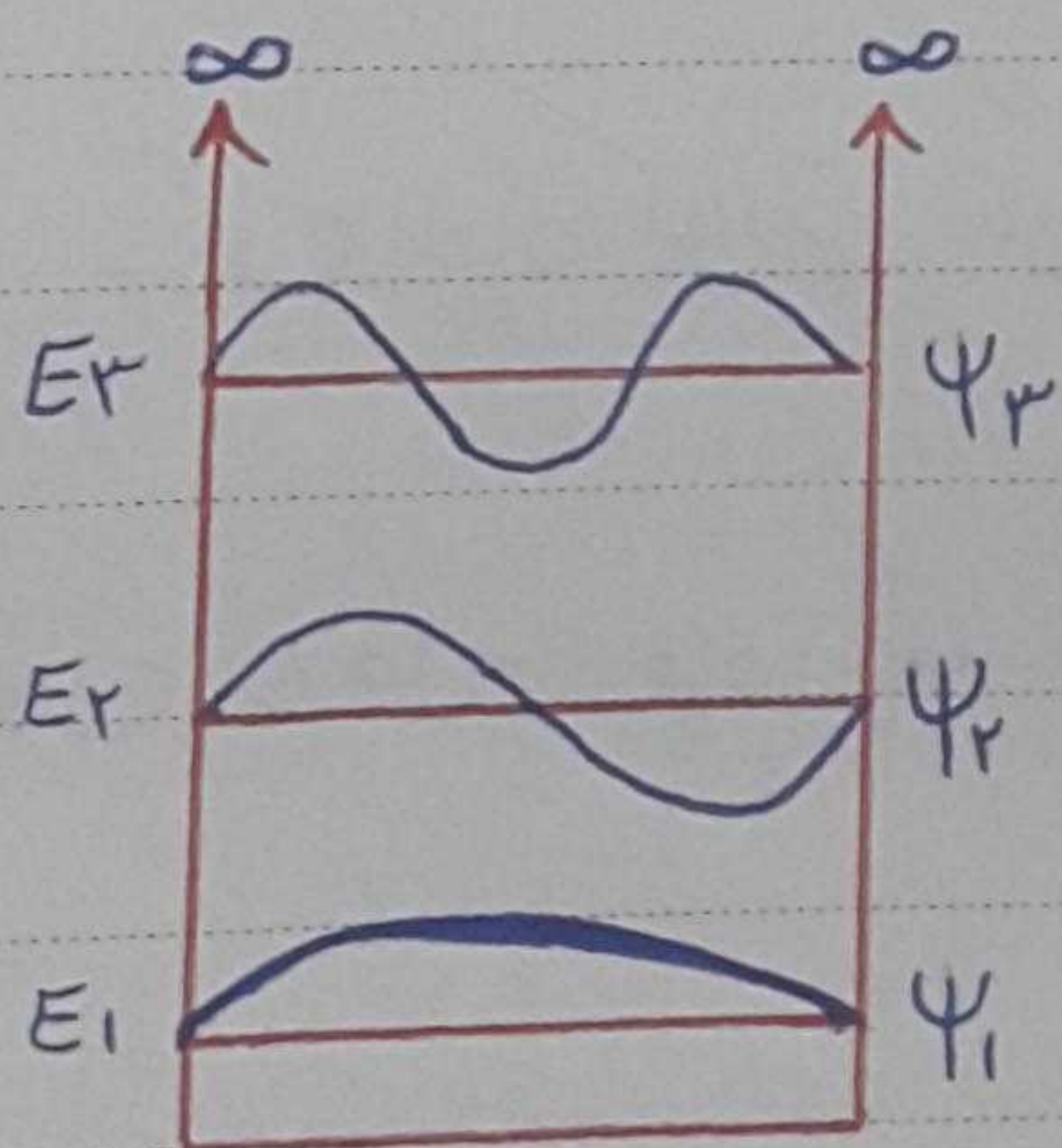
احتمال حضور الکترون در x

- چاه پتانسیل شبیه یک اتم هیدروژن است که سطوح انرژی آن همان اربیتال‌ها هستند.

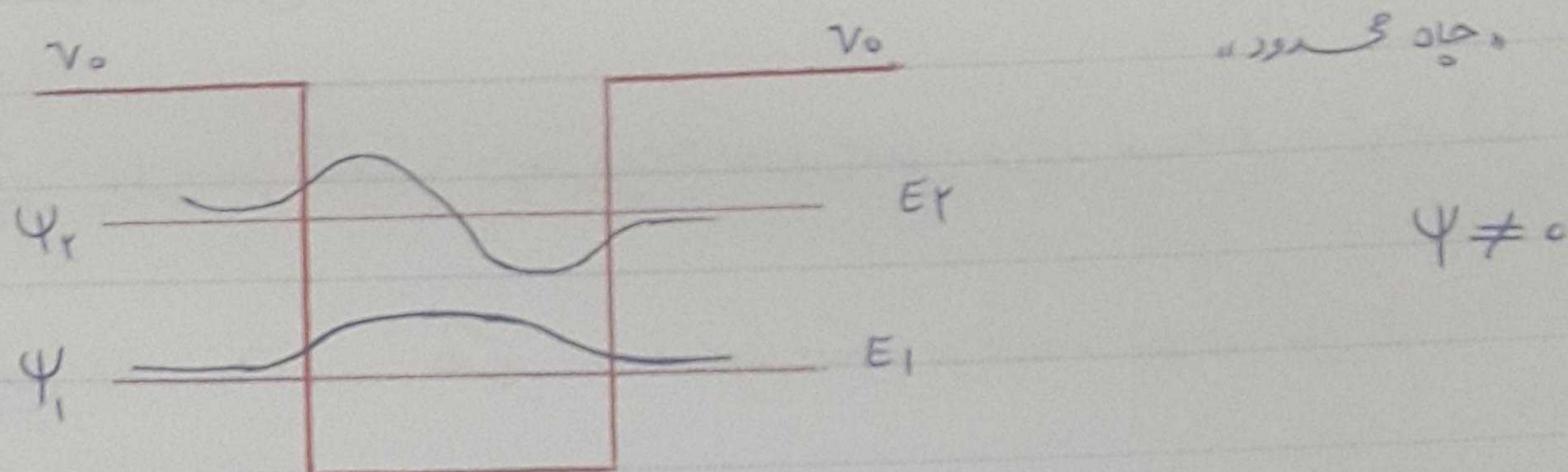
که گسسته می‌باشند، چاه عمیق است بی‌نهایت یا محدود باشد.

$V_0 \rightarrow \infty \Rightarrow$ چاه بی‌نهایت

$V_0 < \infty \Rightarrow$ چاه محدود



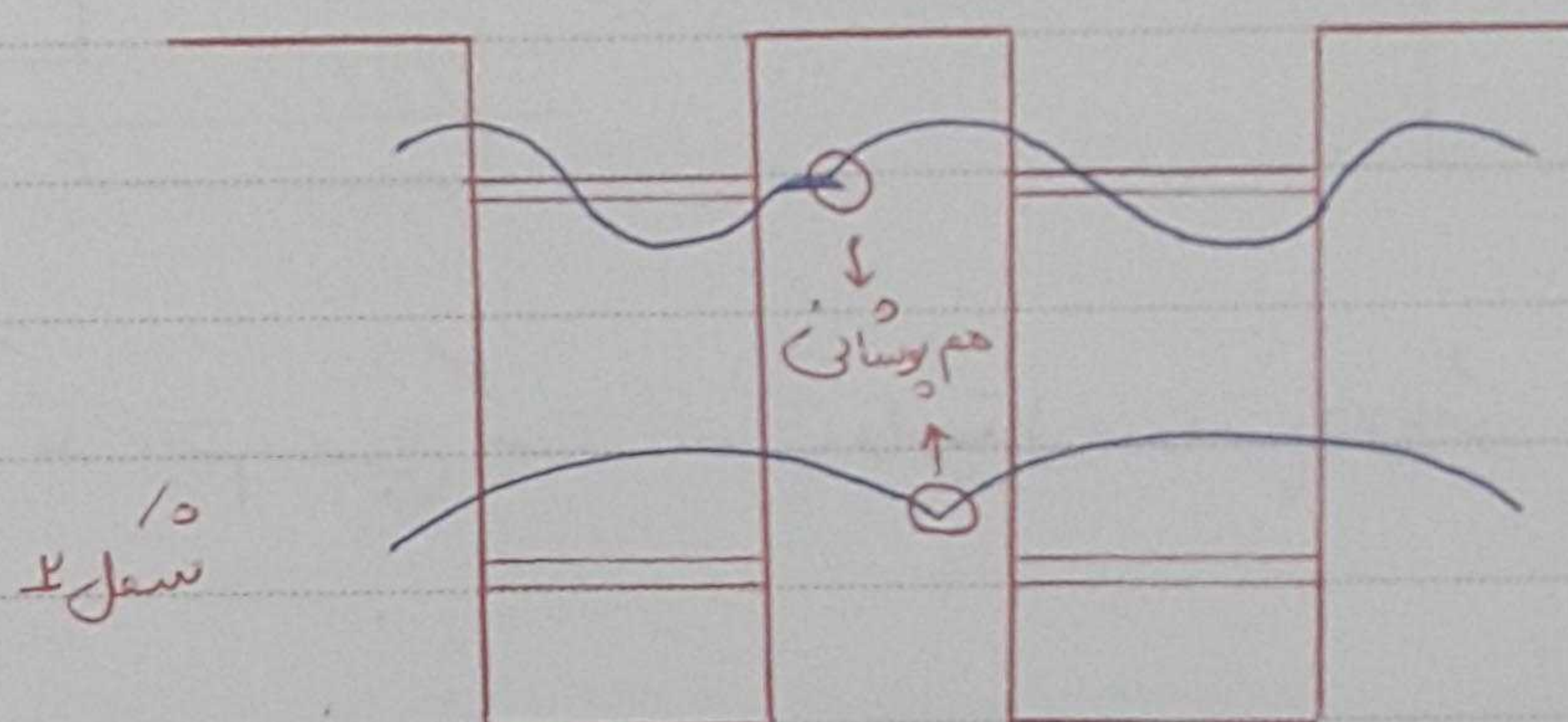
«چاه بی‌نهایت»



در چاه عمیق الکترون به دیواره نفوذ می کند.

* اگر دو چاه عمیق مجاور در فاصله کمی از هم باشند (کمتر از $\lambda/2$)، طوریکه موج الکترون

یک چاه و در چاه مجاور هم دیده می شود.



- در دیواره های مشترک موج الکترون ها هم پوشانی دارند، یعنی احتمال حضور الکترون یک

چاه در چاه دیگر وجود دارد، به این پدیده تونل زدن می گویند که اساس کار برابری از ادوات است.

* نکته * در حالتی که چاه بی نهایت باشد این اتفاق می افتد.

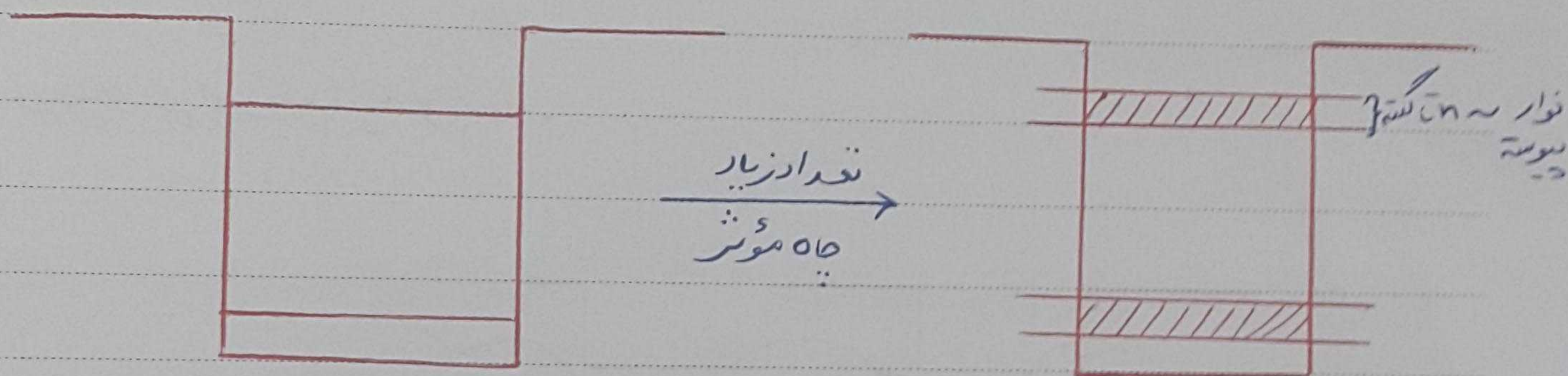
- وقتی الکترون تونل بزند درجه مقصد هم برای خود یک سطح انرژی مجزا ایاری کند.

چون طبق اصل عدم قطعیت در هر جا E_1 الکترون نمی تواند یک سطح انرژی داشته باشد.

پس سطوح E_1 و E_2 هر یک به دو سطح تبدیل می شوند. (مانند شکل ۱)

- حرکت از سطوح انرژی فوق وقتی مقدار چاهها زیاد شود به مقدار آن ها اضافه می شوند.

چون به هم نزدیک هستند اگر مقدار زیاد باشد شبیه نوار می شوند.



* در یک تک اتم سطوح گسسته است و ارتباطی ندارد ولی در یک بلور اینطور نیست.