

فیزیک الکترونیک

دکتر حسینی

منابع :

- ۱- مبانی ادوات نیم رسانا - ترجمه دکتر هروی هوشی جلد ۱ و ۲ و ۳
- ۲- فیزیک الکترونیک ترجمه دکتر روئین تن

سرفصل درس :

- ۱- آشنایی با ساختار مواد بلوری
- ۲- مدل های معادله نیم رسانا
- ۳- رفتارهای حامل بار
- ۴- معادله نفوذ حامل اقلیتی
- ۵- پیوند P_n (حالت استاتی)
- ۶- پیوند N_p
- ۷- ترانزیستور BJT
- ۸- " FET

مواد جامد از نظر ساختمان اتمی و

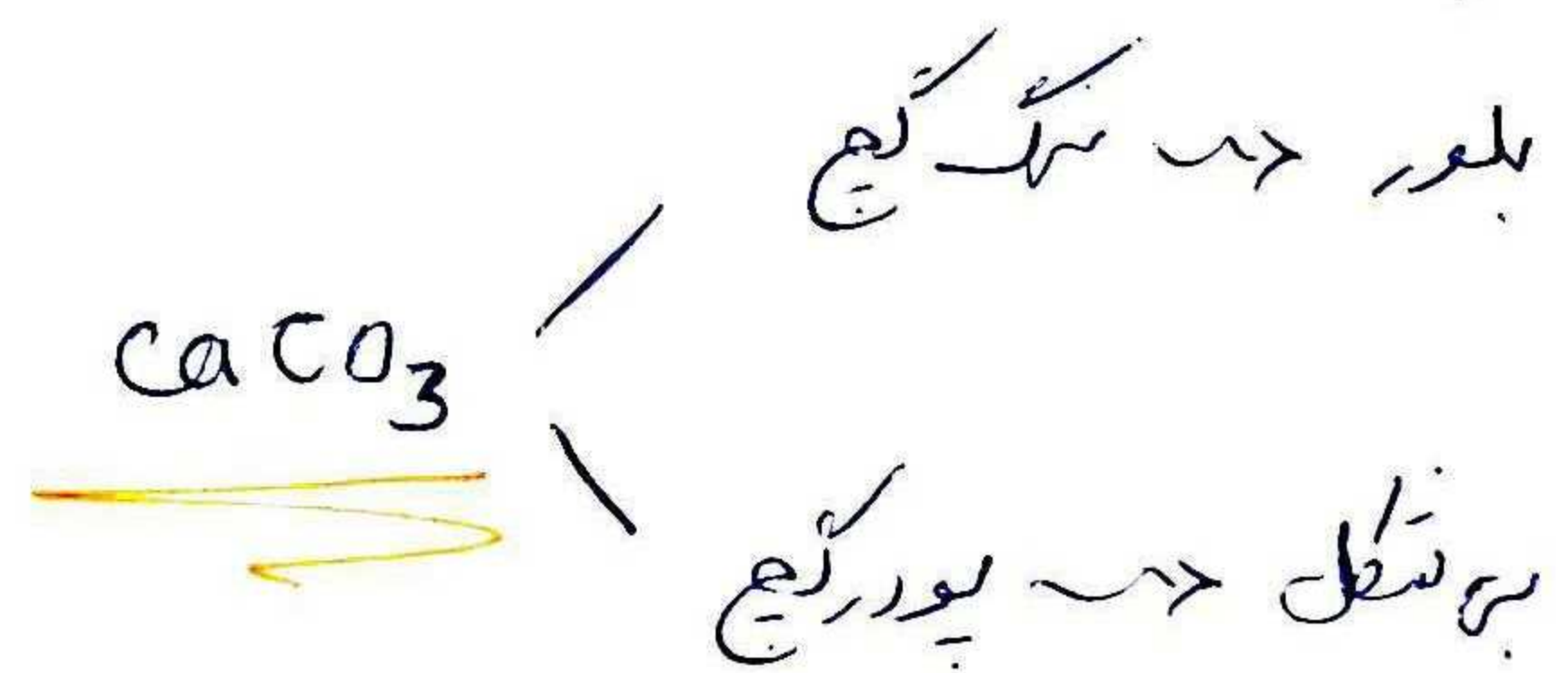
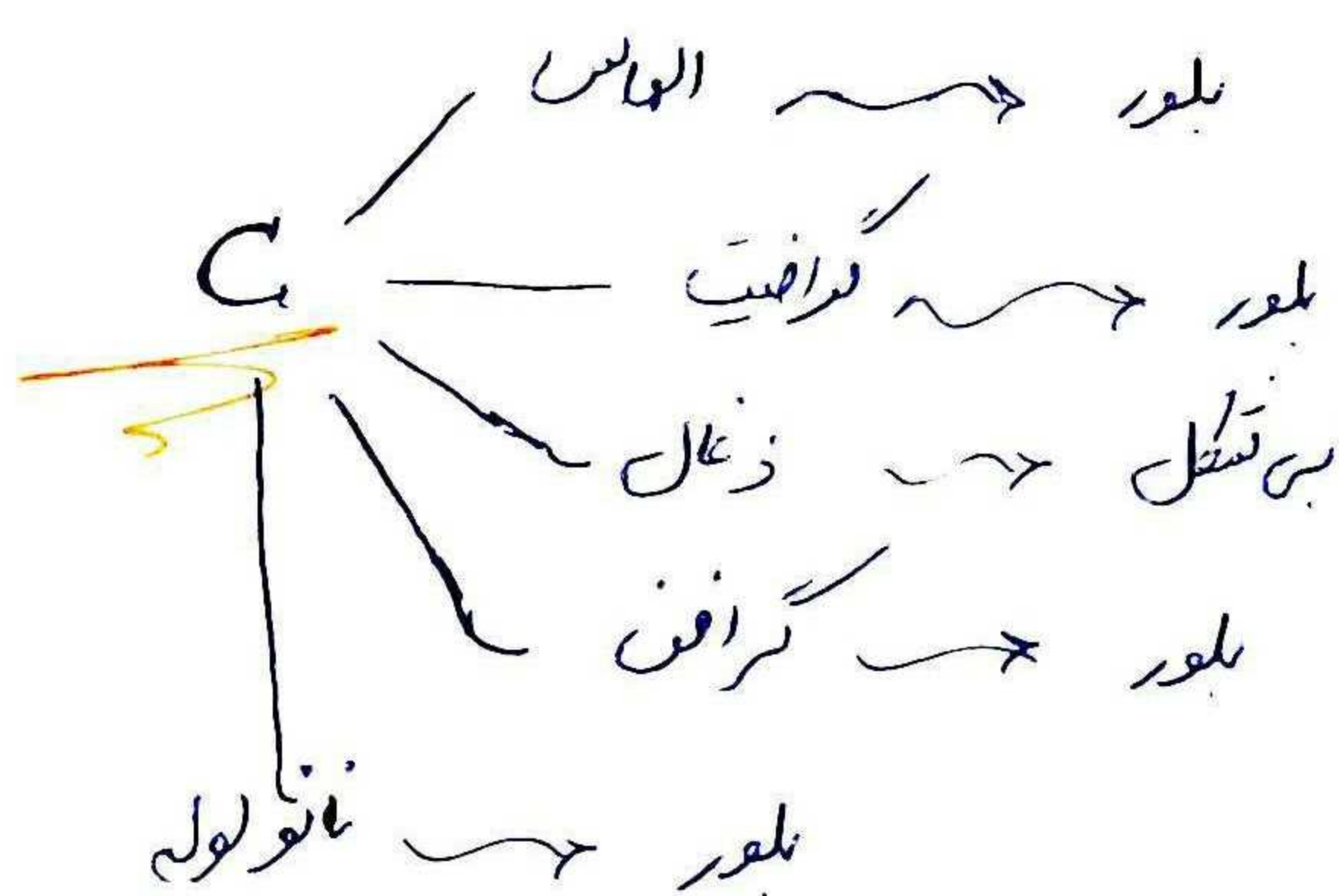
- ۱- حالت بی شکل یا نامنظم Amorphous (مثل چوب - خاک - پلاستیک - شیشه معمولی)
- ۲- چند بلوری (یا نامنظم نامیه) multy crystal (مثل تکه های معدن و ساختمانی)
- ۳- حالت بلوری crystal : همه اتم های ماده از یک نظم بلوری می گذرد و می توان گفت دارای ساختار اتمی متناوب هستند

از نظر رسانایی الکتریکی و

- ۱- نارسانا (عایق) مثل لاستیک - چوب خشک - شیشه دارای هدایت نزدیک صفر هستند.
- ۲- رساناها (هادی) مثل اکثر فلزات دارای هدایت الکتریکی بسیار زیادی هستند.
- ۳- نیمه رساناها (نیمه هادی) semi conductor هدایت این مواد بین دو دسته فوق است. هدایت این مواد قابل کنترل است مثل Si, Ge

بلورها و

تعریف : آرایش منظم اتم های یک ماده جامد را که در همه ماده وجود داشته باشد بلور گویند.
 * آرایش بلوری اتم ها یک حالت پایدار انرژی از ساختمان ماده است که تحت شرایط خاص اتم ها می شود.



انواع بلورها

۱- ملک ساده

SC
 Simple cubic

- در این ساختار در هر رأس ملک یک اتم قرار دارد
 دستگاه مختصات اختیاری است.

* شبکه Lattice: ساختار بلوری است که رزان اتم ها یک نقطه ریاضی هستند.

نایب سله و فاصله در اتم معاد در شبکه بلوری را گویند. این فاصله ممکن است در هر جهت (x و y و z) متفاوت باشد و با حرف a نشان می دهند.

سلول اولیه و primitive cell

سلول واحد و unit cell

* اگر در ساختار اتم بلوری بخشی را بتوان در نظر گرفت که کل ساختار از تکرار آن اجزا شود و آن بخش سلول واحد گویند این بخش همه خواص ماده را خواهد داشت. کوچکترین سلول واحد را سلول اولیه گویند.

جرم حجمی و مقدار ماده ای که در واحد حجم قرار گرفته است را جرم حجمی گویند.

$$\text{جرم اتمی} \times \text{تعداد اتم های سلول واحد} = \text{جرم حجمی} \times \text{حجم سلول واحد}$$

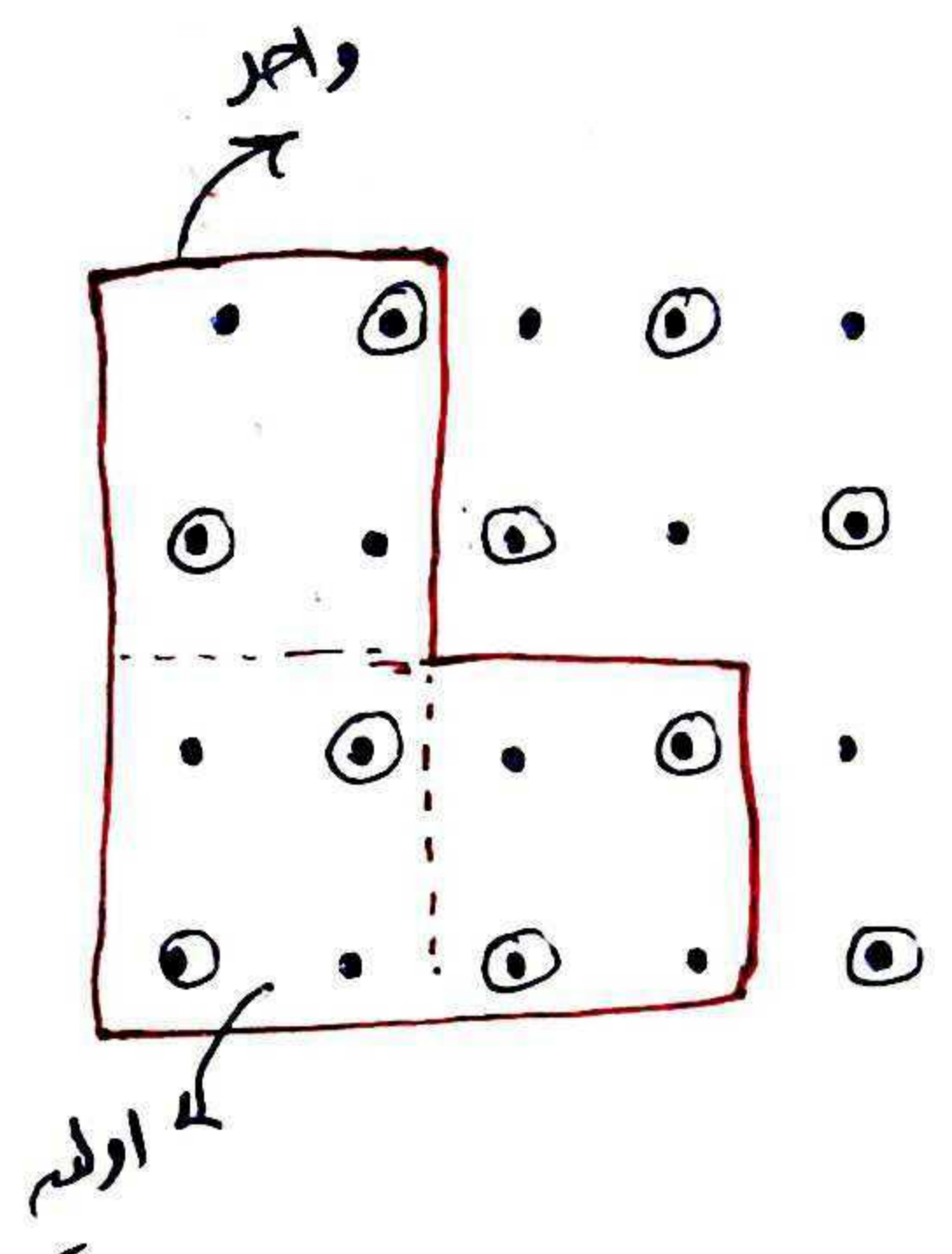
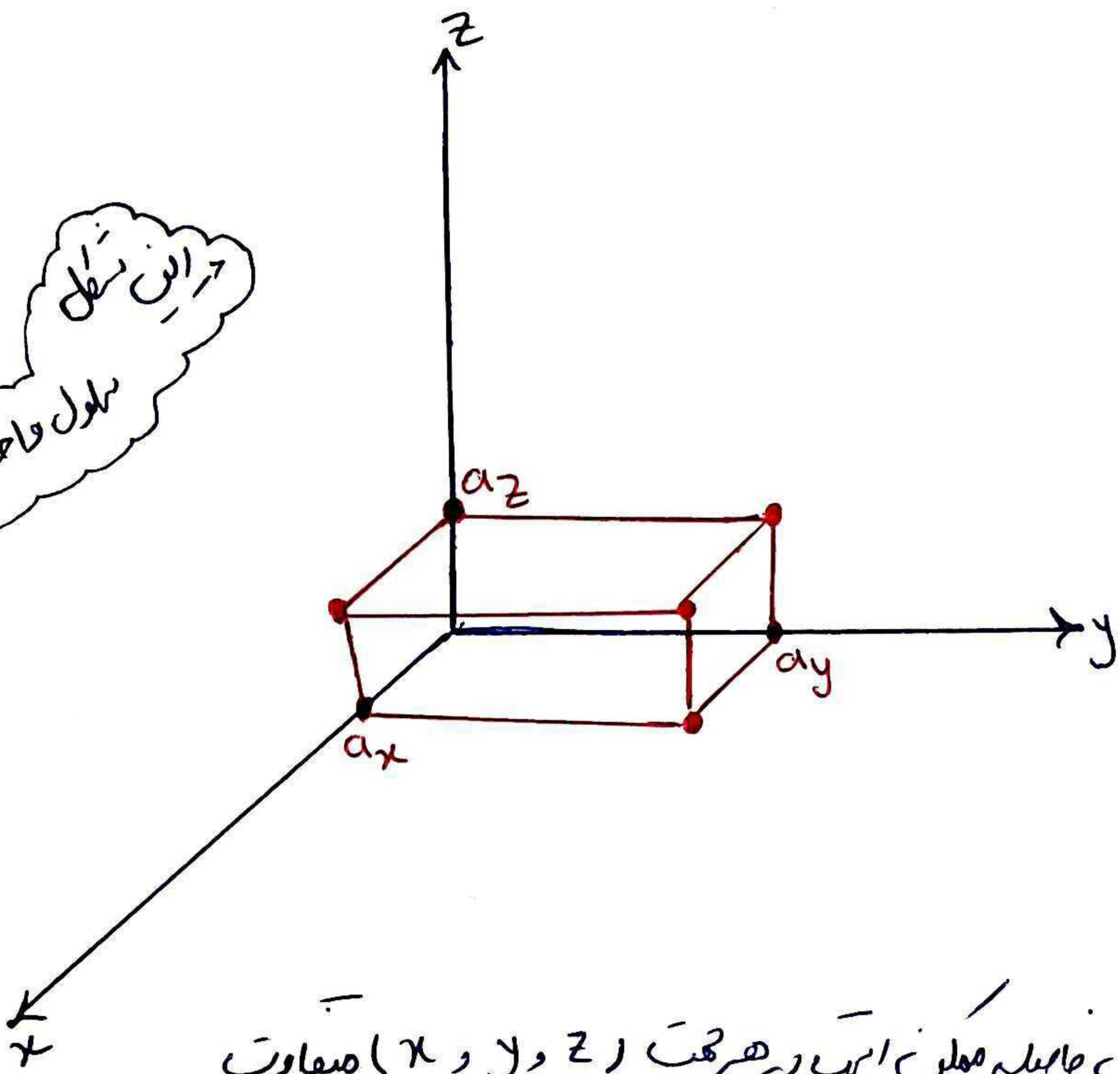
$$\text{حجم سلول} = a_x \times a_y \times a_z = a^3$$

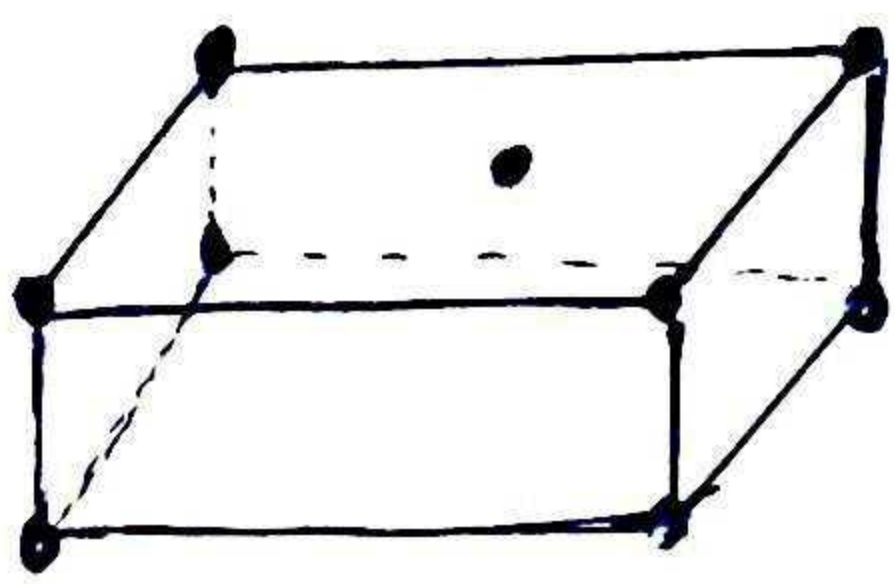
که نایب سله ها در هم ضرب می شوند

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

تعداد اتم های در هر رأس ملک برابر ۱/۸ است
 پس اگر ۸ رأس را در یک ملک قرار دهیم
 آن ۱ اتم در داخل ملک وجود دارد.

این شکل
 سلول واحد بلور اولیه





۲- ملک مرکز بدنه $\rightarrow$ BCC $\rightarrow$ cubic
Body $\leftarrow$ center

همان SC است که از مرکز ملک هم یک اتم قرار دارد.

در پنج هلال ملک و در مرکز هر وجه یک اتم قرار دارد

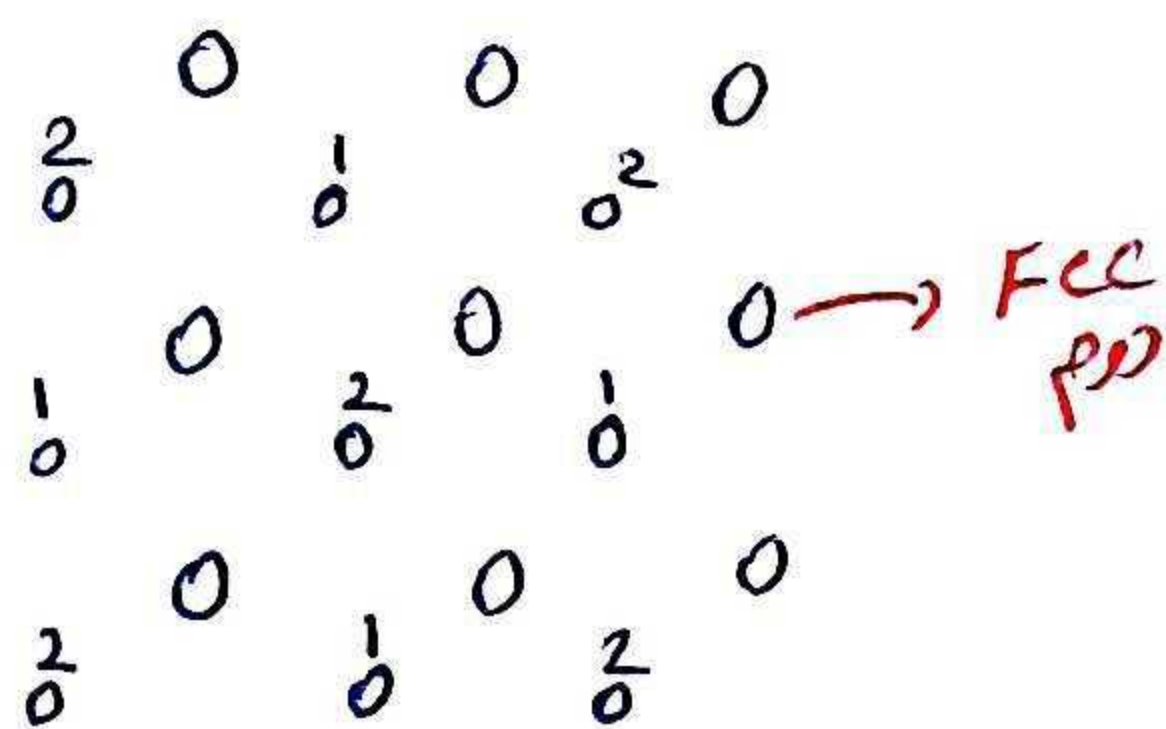
FCC
Face

۳- ملک مرکز وجهه

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

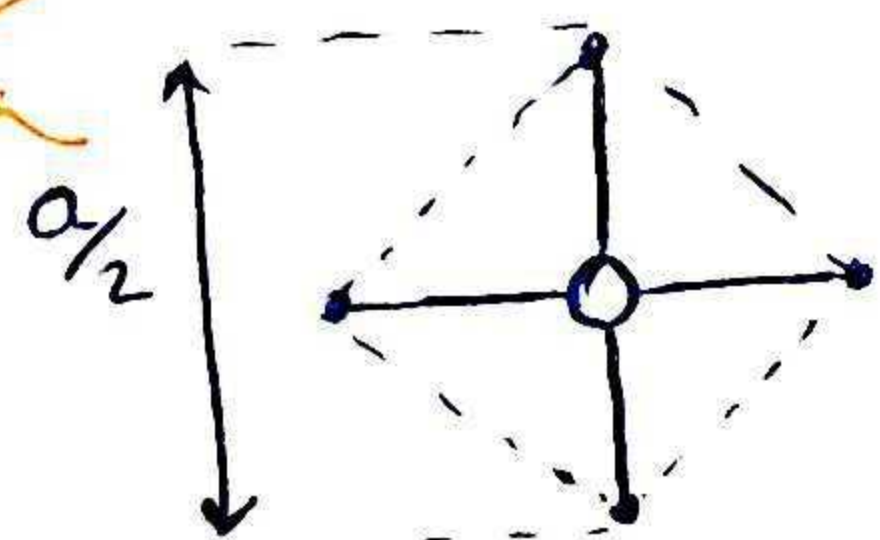
۴- شبکه الماسی (Zinc blend) $\rightarrow$ اکثر نیمه رساناها دارای آرایش الکترونی مشابه

این شبکه با بلور از دو FCC درست شده است که در شبکه $\frac{1}{4}$ در جهت تقارن الکترونی هم قرار دارند.



تقسیم فضای شبکه الماسی

محاوره ای شبکه با شبکه FCC اول



هرم = چهار وجهی

* کوچکترین جوش و شبکه الماسی است. در اینجا سلول واحد را یک ملک در نظر می گیریم
۱ اتم در آن وجود دارد.

* اتم های نزدیکترین همسایه در شبکه الماسی: هر اتم چهار همسایه نزدیک دارد.

اتم های نزدیکترین همسایه $a \frac{\sqrt{3}}{4}$ و یا $\frac{\sqrt{3}}{4}$ فاصله شبکه است ...

اندیس های میلر

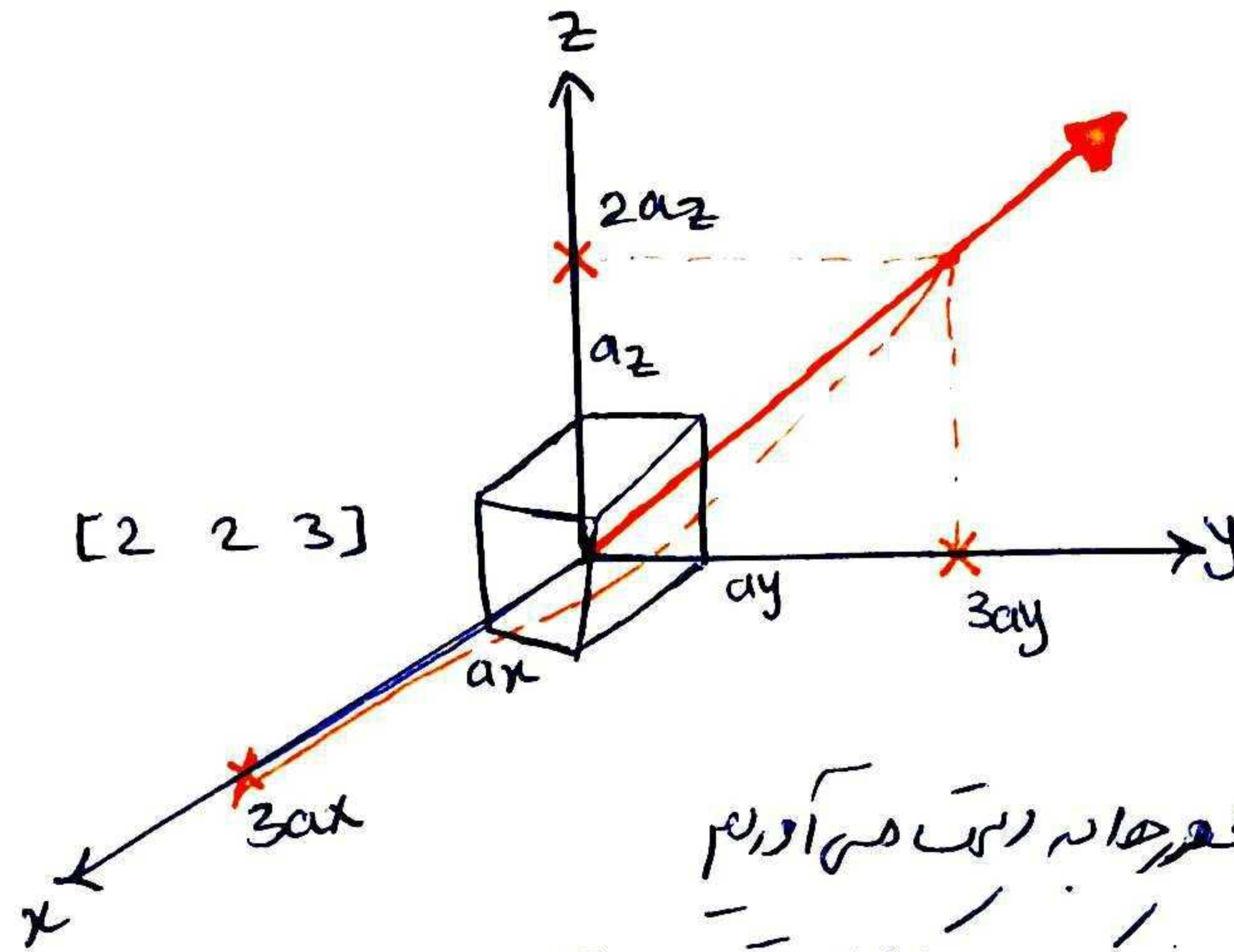
درین اندیس ها یک دایره عددی سه تایی هستند. خاصیت جهت های مختلف محور نشان می دهند.

دو نوع اندیس میلر داریم:

۱- جهت میلر

۲- اندیس میلر

جهت میلر



* تصویر یک نقطه از بردار جهت را روی محورها به دست می آوریم و آن عدد نقطه یا بردار را در مبدأ دور و نزدیک می کنیم تا تصویر روی محورها منتهی درستی از ثابت کنیم روی آن محور شود

تصویر این جهت در هر سه محور مساوی است ...

EXP: قطر اصلی ملکی

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

EXP: قطر اصلی که از مبدأ در محور x می گذرد: پس از انتقال به مبدأ اصابتی را x را منفی می کنند ...

برخی از جهت ها از نظر ضریبی یکسان هستند و خاصیت مساوی دارند ولی جهت میلر آنها با هم تفاوت دارند و به دستگاه مصفاات اصابتی را سیم است در این جهت ها، جهت هکسا معادل گویند

$$\langle 111 \rangle$$

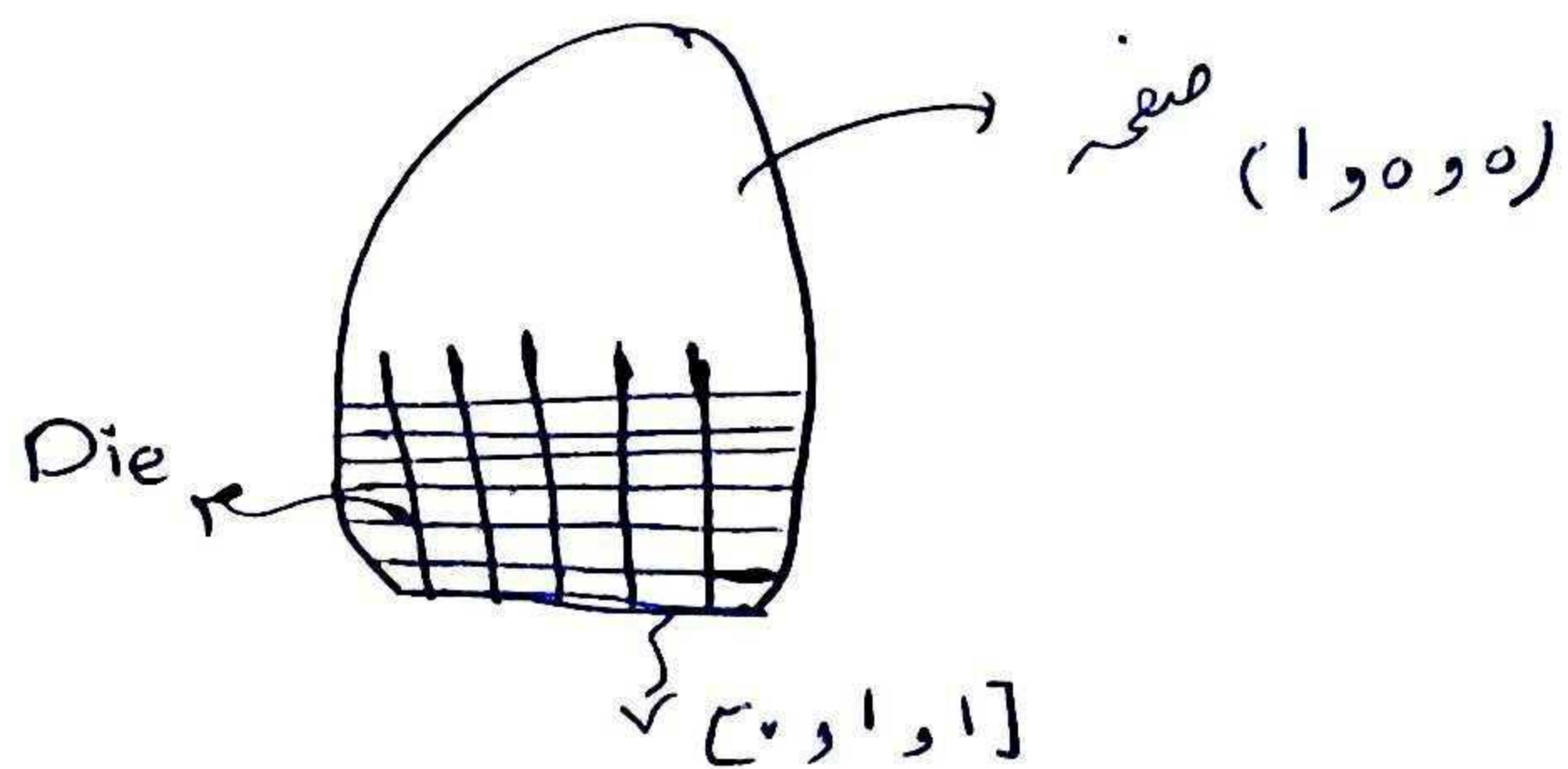
$$[111], [1\bar{1}\bar{1}], [\bar{1}11], [\bar{1}\bar{1}1]$$

علی (در لایه ترین) منتهی

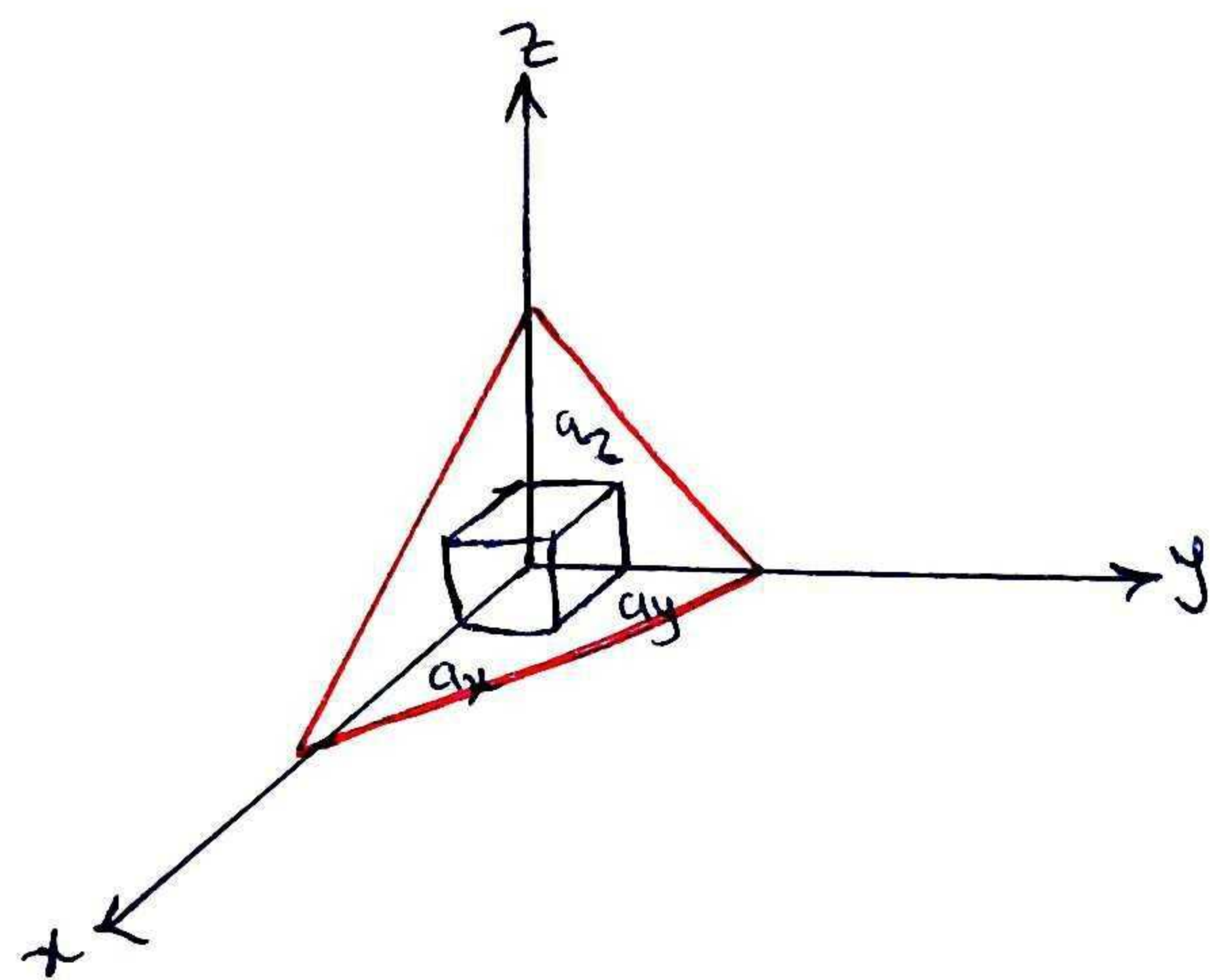
مقدار x به عنوان محورهای x و y را قطع کند ...

x	y	z	جهت محور x
1	∞	∞	$[1 \ 0 \ 0]$ مقدار x
1	0	0	$[0 \ 1 \ 0]$ y
		1	$[0 \ 0 \ 1]$ z

جهت محاسبه $< 1 \ 0 \ 0 >$



صفحه xy و yz و xz را با دور و نزدیک کردن از مبدأ طوری تنظیم می‌کنیم که مضرب درستی از ثابت شبکه در هر محور باشد.



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

صفحه xyz (5 4 2)

صفحات محاسبه Exp : صفحه نمایشگر نامیده اول $(1 \ 0 \ 0)$ $(\bar{1} \ 0 \ 0)$

Exp : $(0 \ 0 \ 1)$ xy
 $(0 \ 1 \ 0)$ xz
 $(1 \ 0 \ 0)$ yz

محور به نمایشگر نامیده اول $(0 \ 1 \ 1)$

صفحات محاسبه

$\{1 \ 1 \ 0\} = (1 \ 1 \ 0), (\bar{1} \ \bar{1} \ 0), (1 \ \bar{1} \ 0), (\bar{1} \ 1 \ 0), \dots$

انواع مواد نیم رسانا

۱- یک عنصری از یک نوع نیم رسانا ساخته شده است :

Ge و Si

Si (سیلیسیم) کمترین نیم رسانا موجود است. به دارای خواص زیر است :

۱- ضرایب و ایزون (۱٪ کلاسیفیکیشن)

۲- مقاومت مکانیکی خوبی دارد

۳- انتقال حرارت بسیار بالایی دارد

۴- اکسید بسیار مطلوبی دارد. (SiO_2)

۵- می توان آن را بسیار خالص کرد و در آن خلوص باید است. درجه خلوص 10^{-9} است. قابل استفاده برای صنعت نیم رسانا است

۶- ادراسه کد با Si ساخته می شوند دارای ویژگی های الکترونیکی خوبی است به Ge شبیه.

۲- مواد دو عنصری (باینری)

از گروه های $V \rightarrow III$ و $VI - II$ استفاده می شوند.

۳ ۵

۲ ۶

Ga As

Zn O

Al As

Cd S

In P

Cd Se

Al Sb

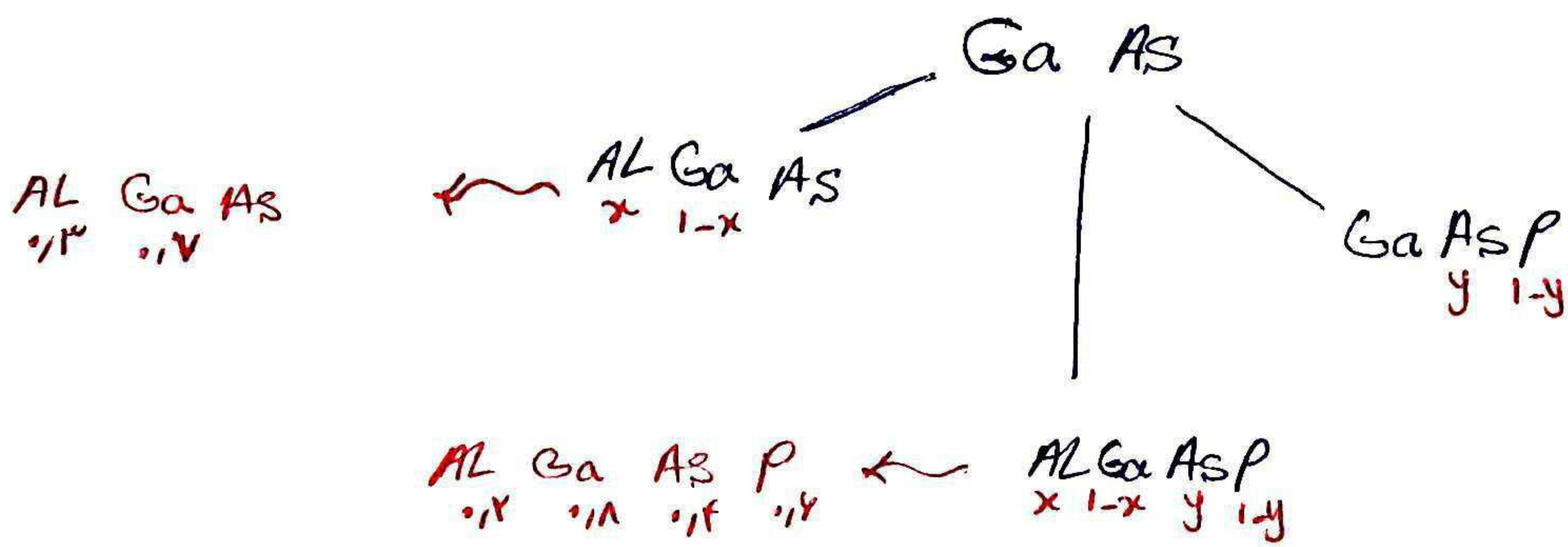
Zn S

Cd Te

معمولاً روش ساخت تیران قیمتی دارند و به مواد ارزان تری

و خالص با استفاده می شوند...

از گروه II-VI یا III-VI هستند



x و y یا $x, y < 0$. در آن کهرموس یا mol fraction گویند و نشان می‌دهند که از عنصر ۳ یا ۵ ظرفیتی از عنصر مربوط است. درست شده است.

 در این آلیاژها عناصر ۳ ظرفیتی در FCC و عنصر دیگر در FCC دیگر قرار می‌گیرد.

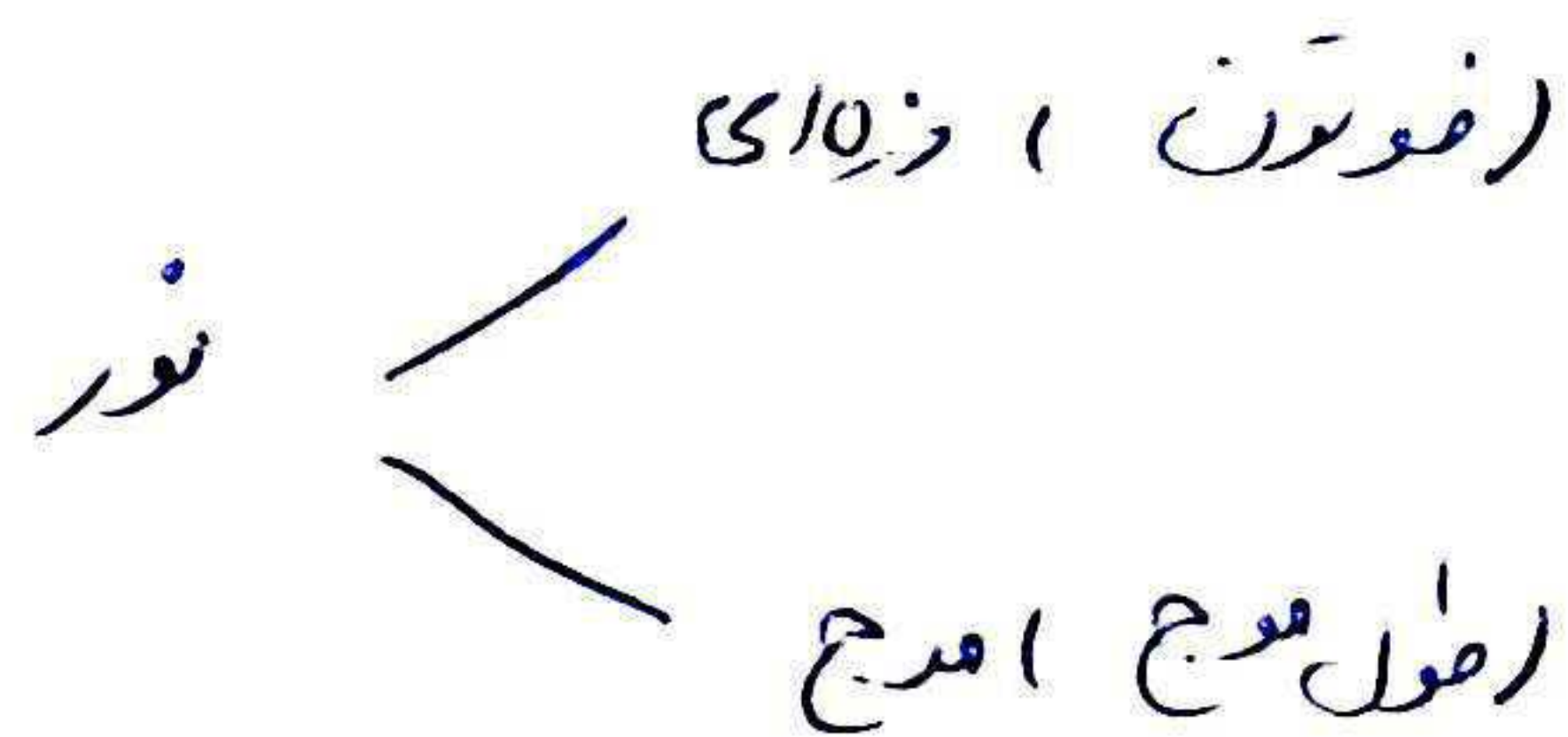
۴- مواد آلی

از ترکیبات پلیمری ساخته می‌شوند و از آن‌ها هستند و کیفیت خوبی ندارند. فقط دیودهای نورانی (LED)

 با این مواد ساخته شده اند. P_3HT

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

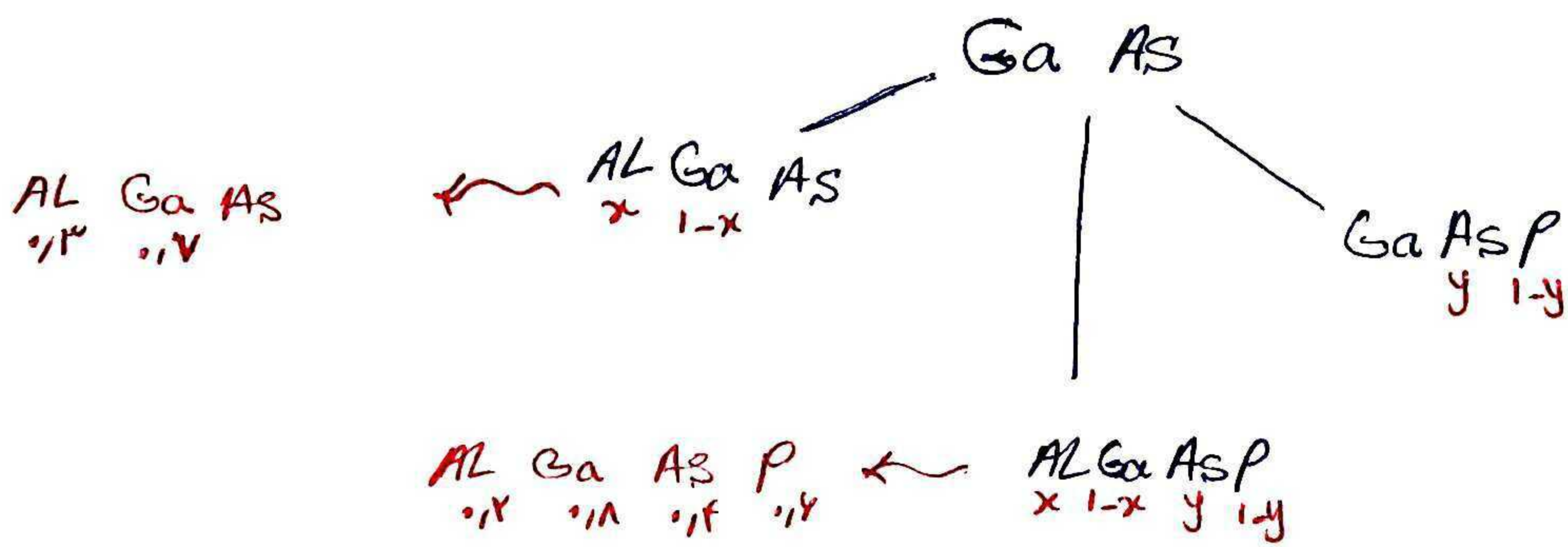
محل ۵ عملکرد ریاضی ساده شده‌ای که پدیده‌ی فیزیکی است در یک مدل همه خصوصیات فیزیکی را شبیه‌سازی وجود ندارد و فقط می‌توان برخی از موارد را با آن توضیح داد یا توسعه داد.



* برای ترجمه پدیده‌های موجود در زمینه رساناها مدل تعریف می‌کنیم:

- ۱- مدل باندینگ (پویندی)
- ۲- مدل نوار انرژی

از گروه II-VI یا III-VI هستند



x و y یا $x, y < 1$ در آن کهرمولی یا mol fraction گویند و نشان می‌دهند که از عنصر ۳ یا ۵ ظرفیتی از عنصر مربوط استفاده درستی شده است.

در این آلیاژها عناصر ۳ ظرفیتی در FCC و عنصر دیگر در FCC دیگر قرار می‌گیرد.

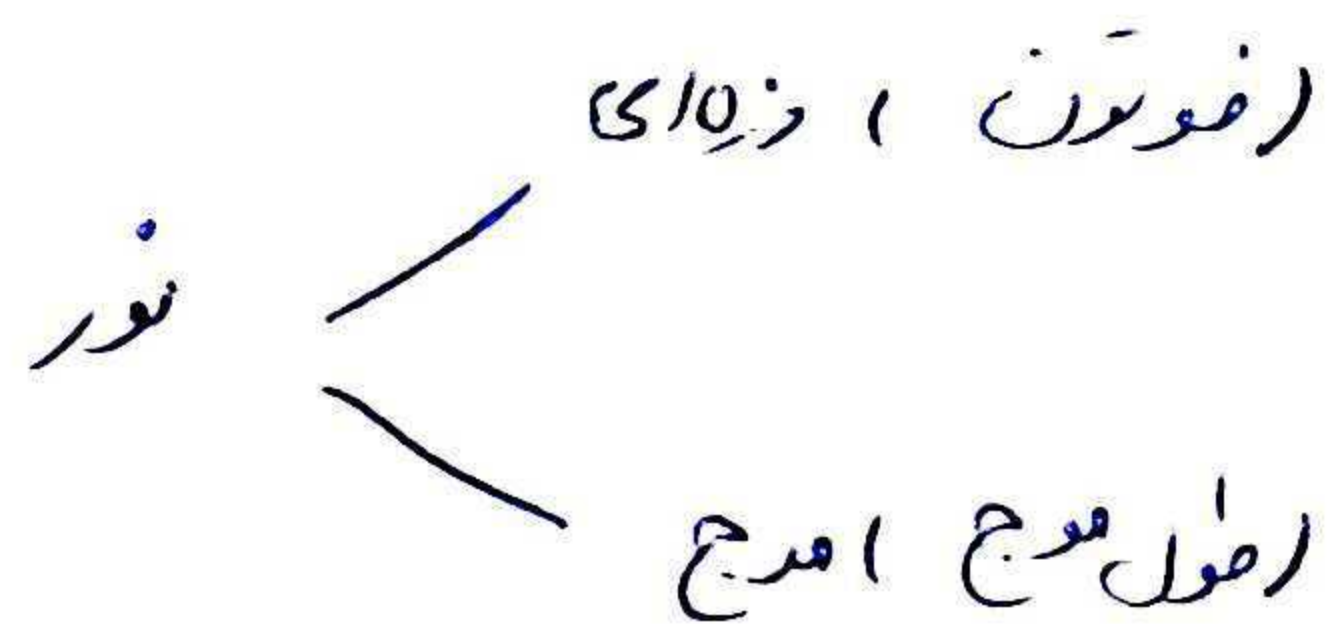
۴- مواد آلی

از ترکیبات پلیمری ساخته می‌شوند و از آن‌ها هستند که کیفیت خوبی ندارند. فقط دیودهای نورانی (LED) با این مواد ساخته شده‌اند.

P_3HT

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

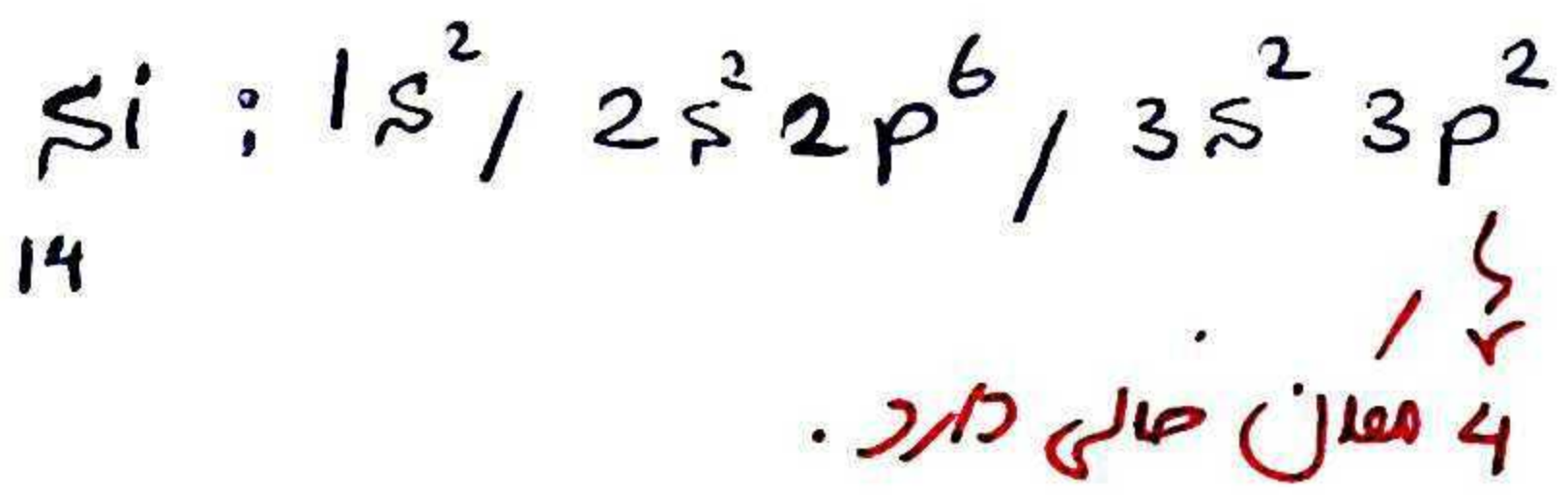
محل عملکرد ریاضی ساده‌تری که دیده می‌شود است در این مدل همه خصوصیات فیزیکی و شیمیایی وجود ندارد و فقط می‌توان برخی از خواص را با آن توضیح داد یا توسعه داد.



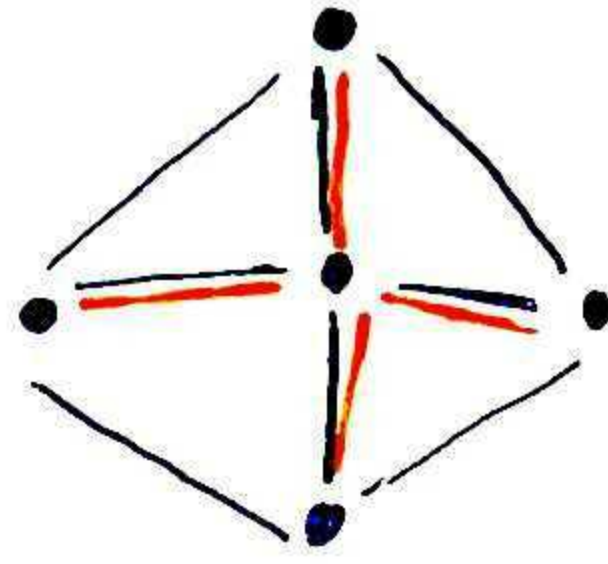
* برای ترجمه دیده‌های موجود در زمینه رساناها مدل تک‌بند می‌کنیم:

۲- مدل نوار انرژی

۱- مدل باندینگ (پیوندی)

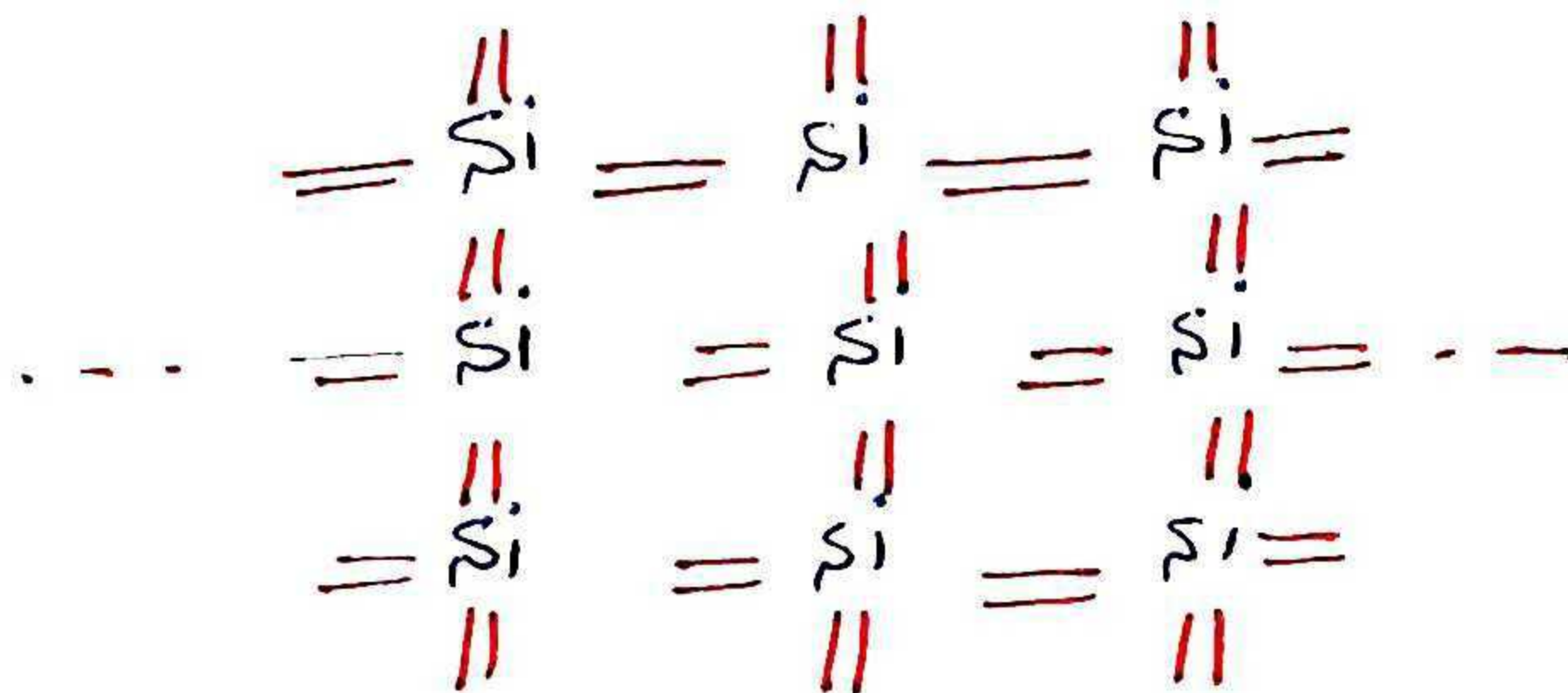


سپ چهار ظرفیتی است و هر اتم که می تواند با چهار اتم که دلتا پیوند
کودالاس تشکیل دهد.



کوچکترین قسمت یک شبکه بلوری
که (سلول اولیه).

اکثر شکل هندسی (سه بعدی) بلور Si را در یک صفحه به صورت دویجی رسم کنیم چنان مدل باندینگ گویند.



حامل بار و charge carrier

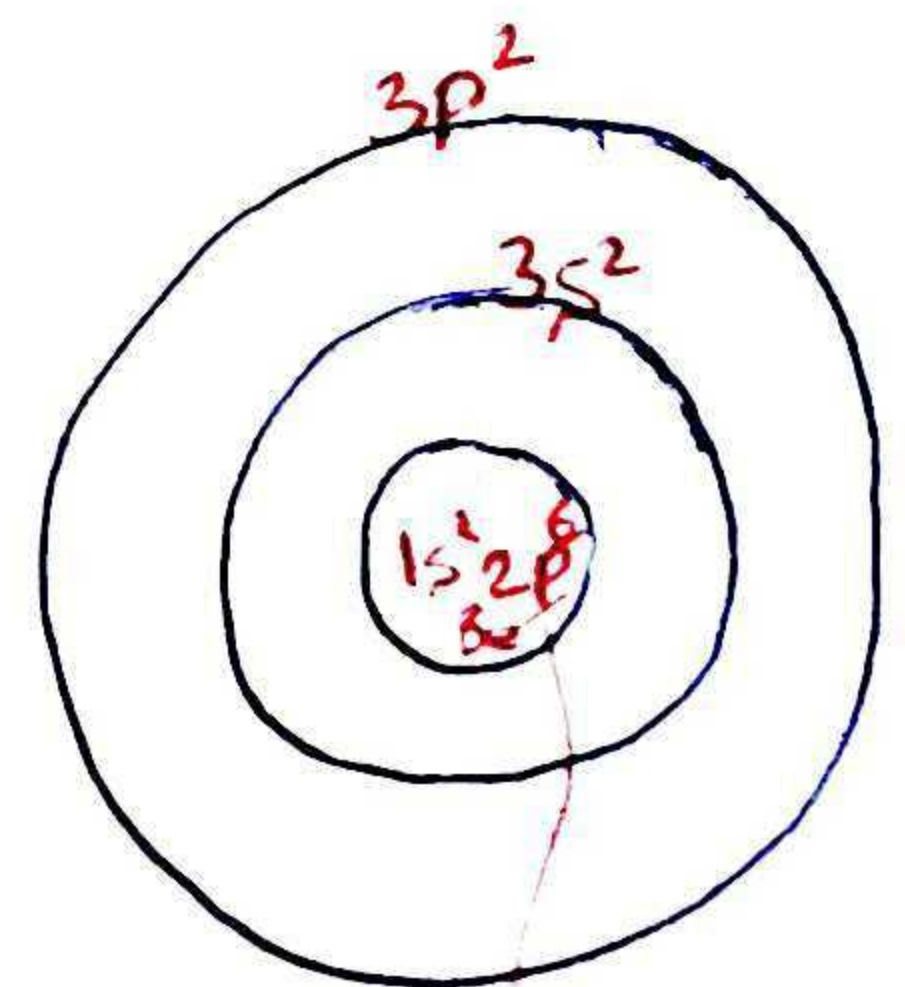
ذره ای که دارای بار الکتریکی مثبت یا منفی باشد را حامل بار گویند.

حامل بار منفی الکترون است.

حامل بار مثبت را حفره گویند.

حفره : یک مفهوم ذهنی است و به جای حامل الکترون حفره نوین در نظر حوالی
دکتر کاملاً مشابه الکترون فزین می شود. (مثل مردم + تری - سرعت و ...)

$$\begin{array}{c} \vec{E} \text{ میدان الکتریکی} \rightarrow \\ \left. \begin{array}{l} F = -q\vec{E} \\ F = q\vec{E} \end{array} \right| \begin{array}{c} \leftarrow \vec{e}^- \\ \rightarrow \vec{h}^+ \end{array} \right| \begin{array}{l} \text{برای} \\ F_e = -q\vec{E} = m_e \vec{a}_e \\ F_h = q\vec{E} = m_h \vec{a}_h \end{array} \end{array}$$



او به این می گویند

* الکترون های موجود در اورتال های مقید گویند. هیچ نقشی در ترکیب شیمیایی و پیوندهای با عناصر دیگر ندارند.
هیچ نقشی در هدایت الکتریکی ندارند

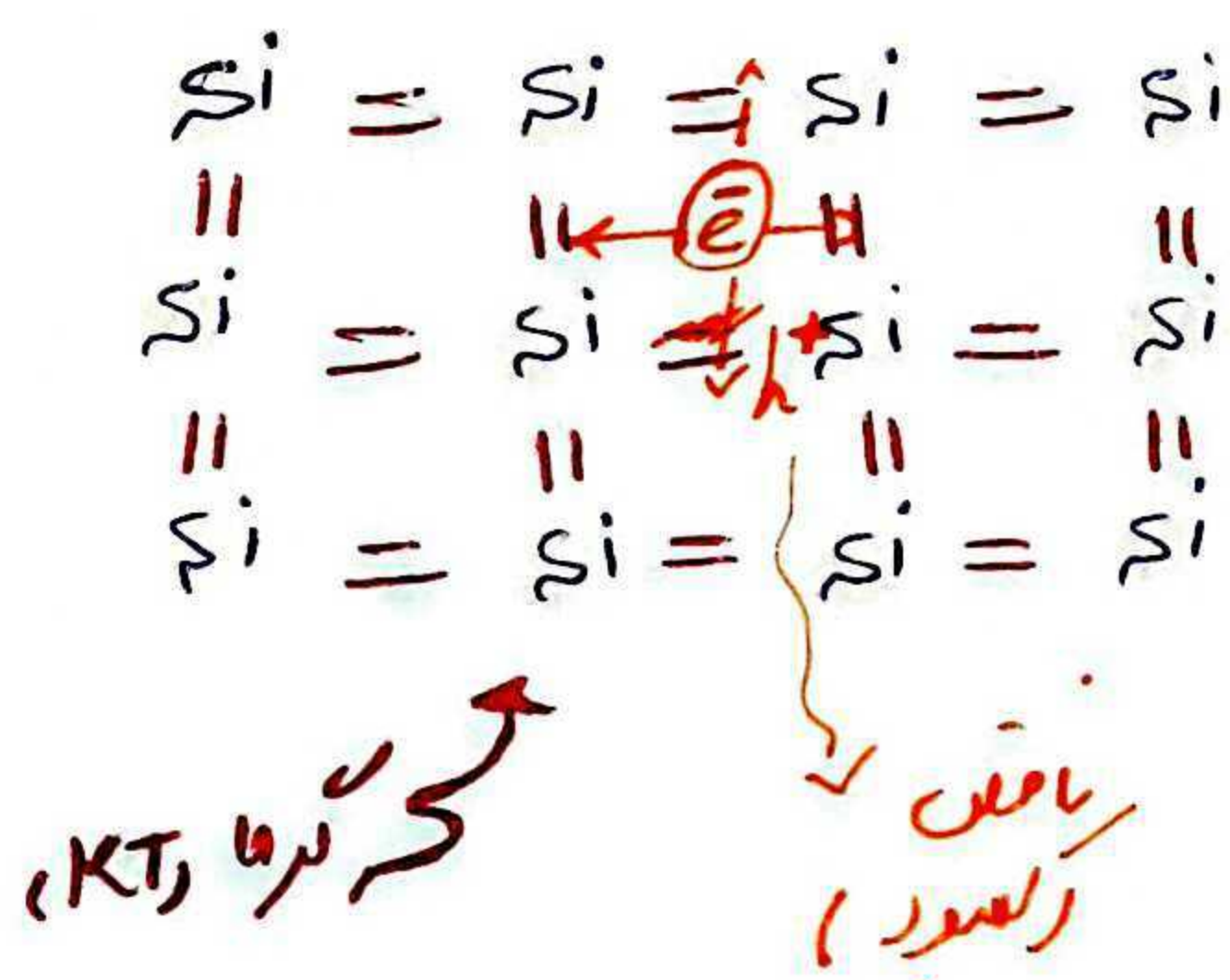
* الکترون های اورتال آفر الکترون های ظرفیت گویند. این الکترون ها سه توان همصد باشند یا آزاد.
اگر الکترونی نباشد؟ هسته نداشته باشد؟ آن الکترون آزاد گویند.
تعداد الکترون های آزاد در واحد حجم نشان دهنده هدایت الکتریکی ماده است.

- در مواد عایق الکترون آزاد نداریم.
- در مواد رسانا همه الکترون های ظرفیت آزاد هستند مثل فلزات.
- مواد نیم رسانا بین این دو است و تعداد الکترون های آزاد بخشی از کل الکترون های ظرفیت است.

* حردهای منفرد مطلق هیچ انرژی گرمایی در محیط بلور (KT) نداریم

KT انرژی گرمایی
K ثابت
T دمای مطلق

✓ بنابراین همه الکترون های مقید هستند و الکترون آزاد وجود ندارد.
و همه مواد عایق هستند [برخی از رساناها هم خاص هستند]



- در اثر گرمای محیط انرژی پیوندها داره می شود و به اندازه انرژی داره شده پیوندها می شکند. در اثر شکست یک پیوند یک الکترون اضافه در یک اتم و کمبود یک الکترون در اتم دیگر خواهیم داشت.
بنابراین در اثر شکست یک پیوند یک الکترون یک حفره آزاد در یک اتم می شود.
حفره می تواند با جابجایی الکترون از پیوند دیگر جابجا شود و بنابراین آزاد می شود و می تواند هدایت الکتریکی ایجاد کند.

n: چگالی حامل های الکترون صادر
واحد حجم (cm³)
p: چگالی حفره ها
n = p
ni

حردهای اتاق تعداد الکترون ها و حفره های آزاد در یک بلور خالص با هم برابر هستند
نسبت به نوع ماده نه به سادگی مقدار معینی دارند

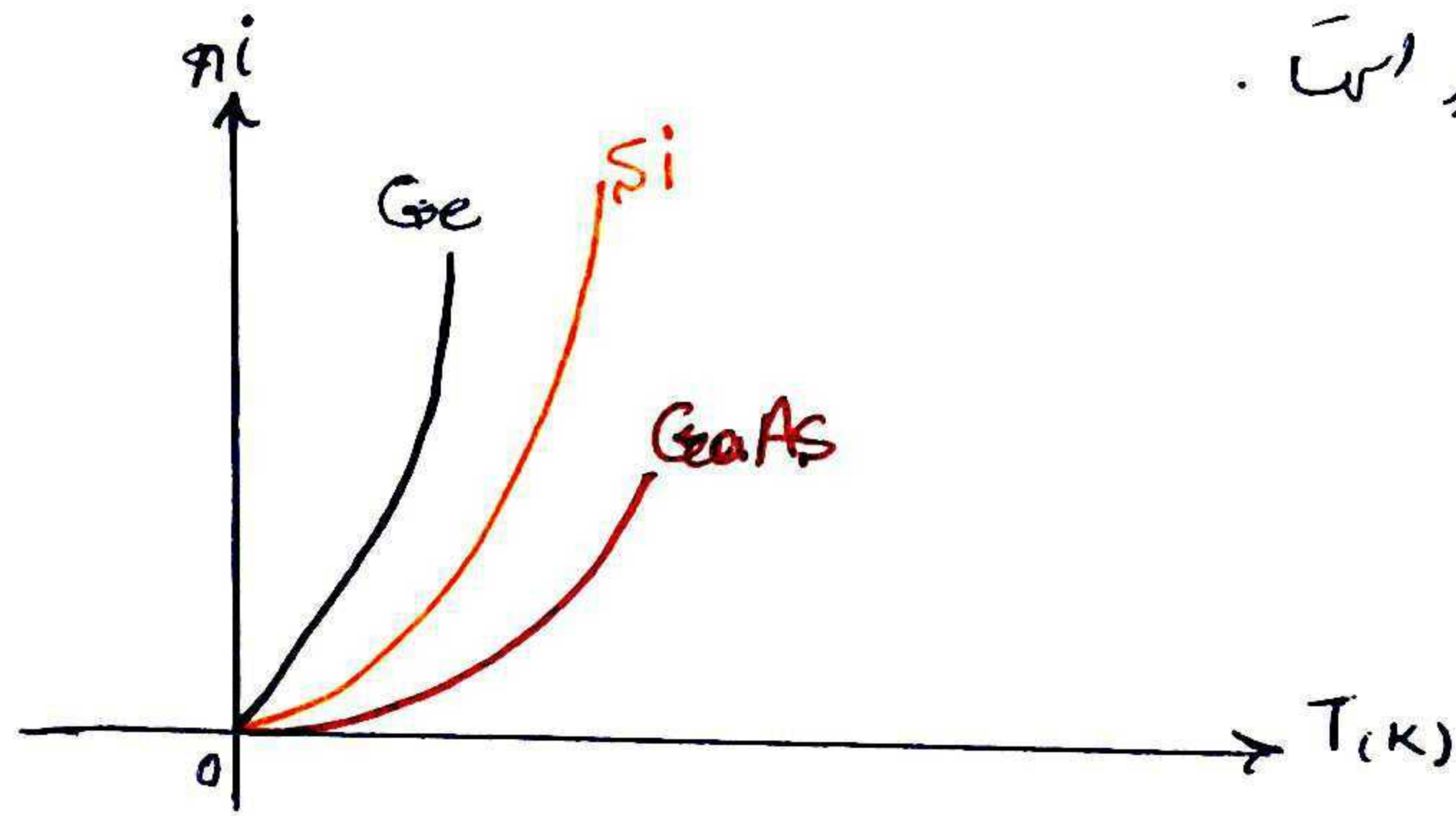
به نیم رسانای خالص بدون هیچ ناخالصی ذاتی (intrinsic) گویند

ni چگالی آزاد حامله ذراتی :
حاصل های

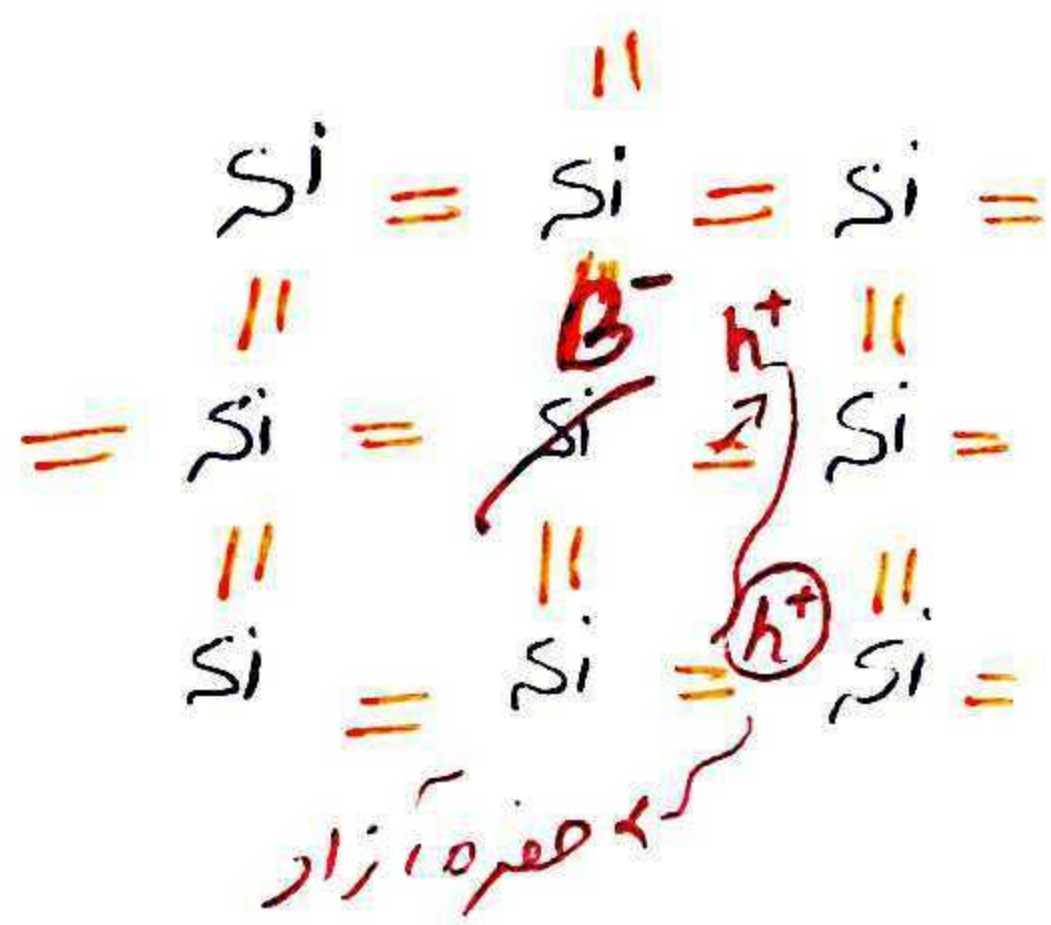
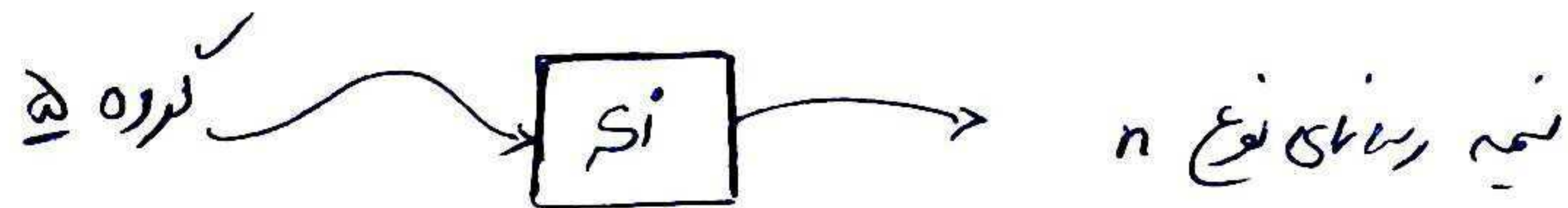
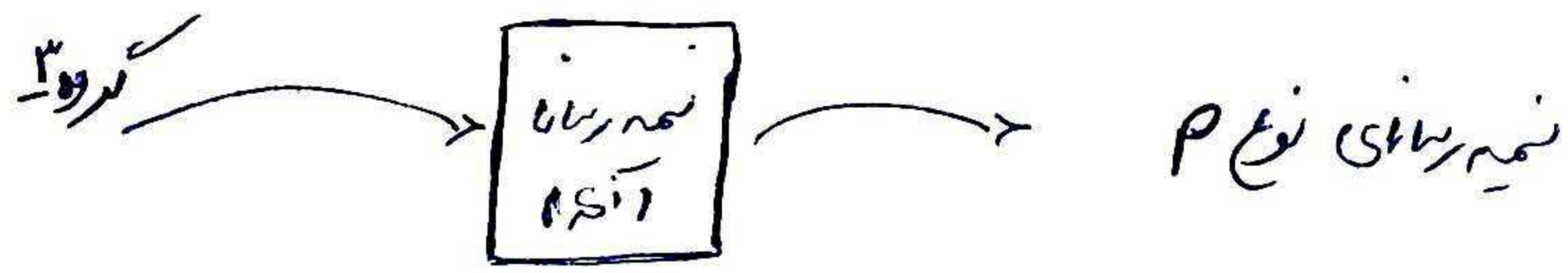
	Si	Ge	GaAs
n_i	10^{10}	10^{14}	10^6

$$T = 273 \text{ K}$$

* در طرقات n_i همان عدد اوردن و است.



نیم رساناهای توانمند با درایت ناخالصی های مشخص هدایت الکتریکی مختلفی داشته باشند و خواص آنها تغییر کند.



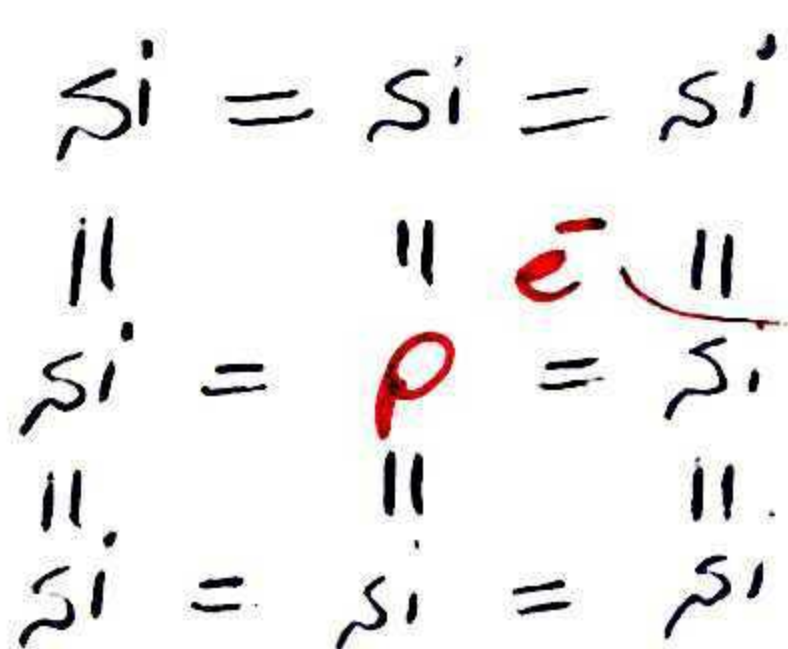
* در اثر افزودن اتم ناخالصی گروه 3 یا 5 برای هر اتم ناخالصی یک حفره آزاد در دایرهای اتمات تولید می شود و این علاوه بر حفره های هارون ذراتی است

در این حالت چون تعداد حفره ها زیاد تر از الکترون است چنانچه حامل های مثبت شوند و الکترون ها اقلیت و به نیم رسانای حامل نوع کم شوند. در اثر این کار تعداد الکترون ها چون با حفره ها تشریف می رسد کاهش می یابد. یعنی از مقدار ذراتی کمتر می شود.

$$\begin{array}{|c|} \hline n = p = n_i \\ \hline = 10^{10} \end{array} \rightarrow \begin{array}{|c|} \hline p = 10^{12} > n_i \\ n = 10^8 < n_i \\ \hline \end{array}$$

$$10^{12} \text{ cm}^{-3}$$
 بر (B)

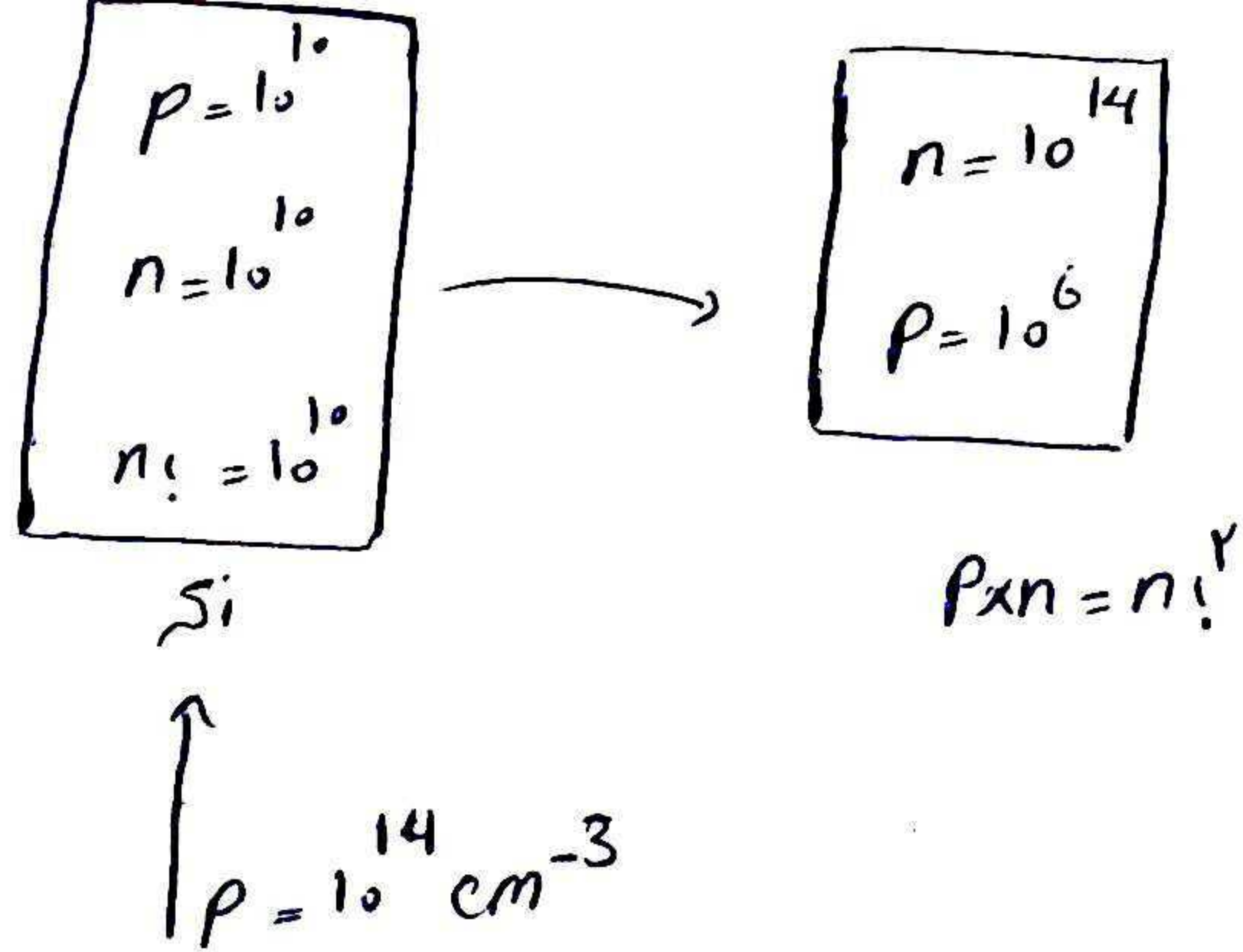
برای حالت تعادل $np = n_i^2$



افزودن حفره

الکترون ها اتمات در دایرهای حفره مطلق می یابند و در دایرهای آزاد می شود و کم تولید می شود (p⁺) و الکترون ها برای هر اتم نیم رسانا آزاد خواهد شد و این علاوه بر الکترون های ذراتی است که در اثر این کار جهت الکترون ها حدود برابر با حامل ناخالصی داده شده است و به جهت حفره ها کمتر از مقدار ذراتی است.

ماده نوع n الکترون
اکثریت در حفره اقلیت



مدل انرژی و

انرژی الکترون در مواد مختلف و

از نظر ابعاد و

الکترون می تواند انرژی پیوسته داشته باشد

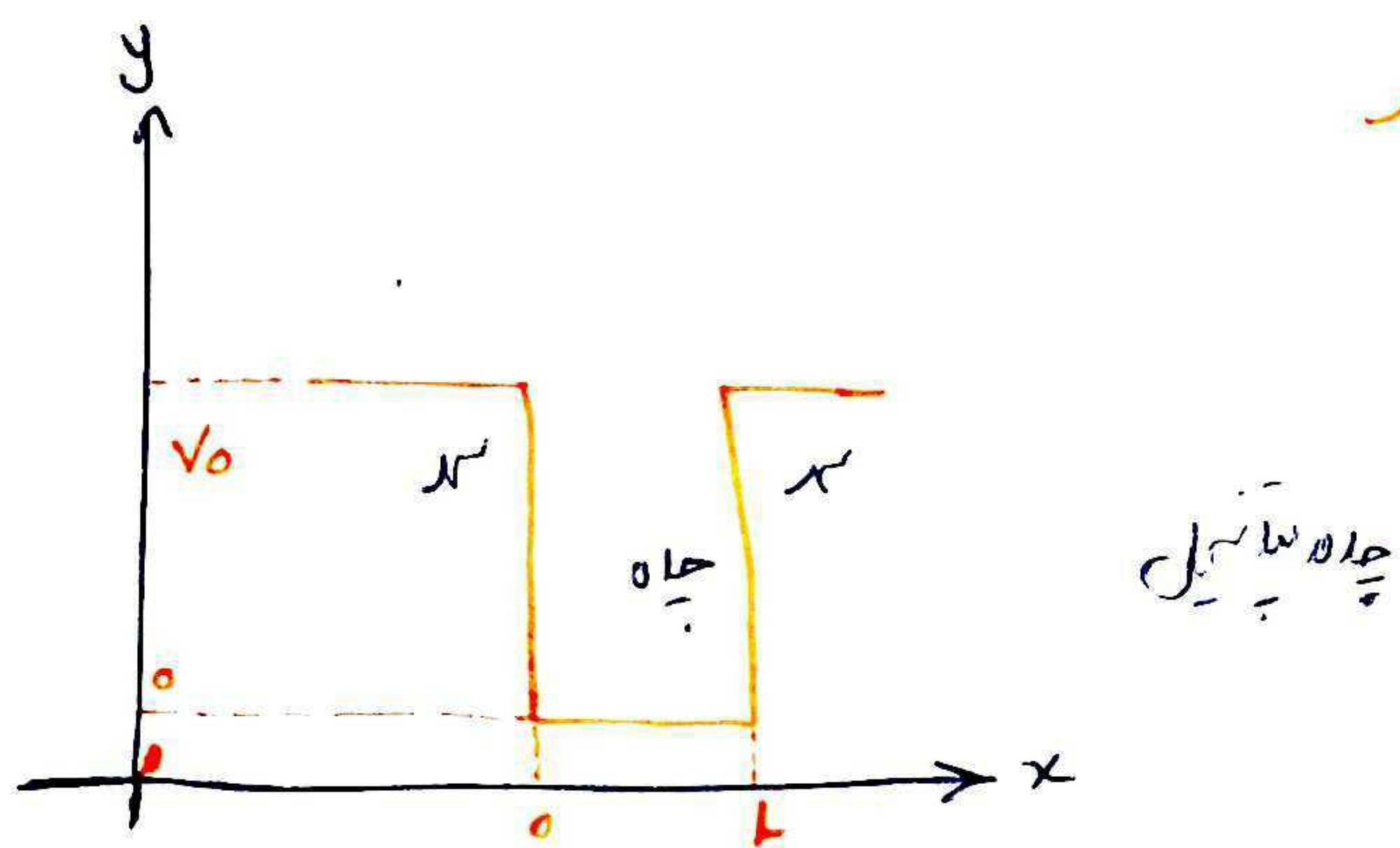
۱- سه بعدی (Bulk)

۲- دوبعدی (یک بعدی ماده بسیار کوچک است)

(مثل جبهه کوآنتوم)

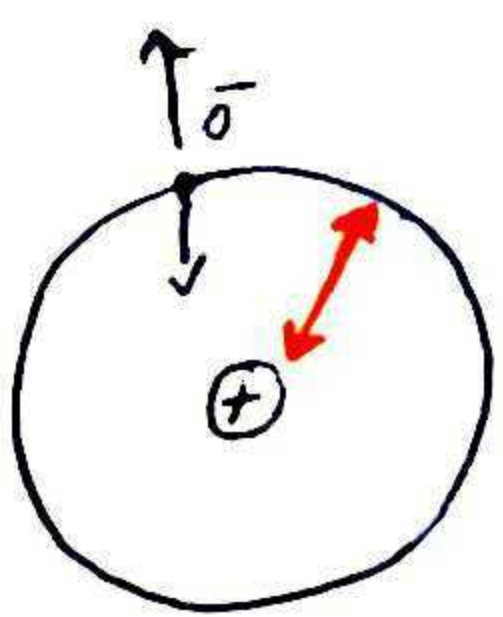
۳- یک بعدی (سیم کوآنتوم)

۴- صفر بعدی (نقطه کوآنتوم) (یا شبح اتم)



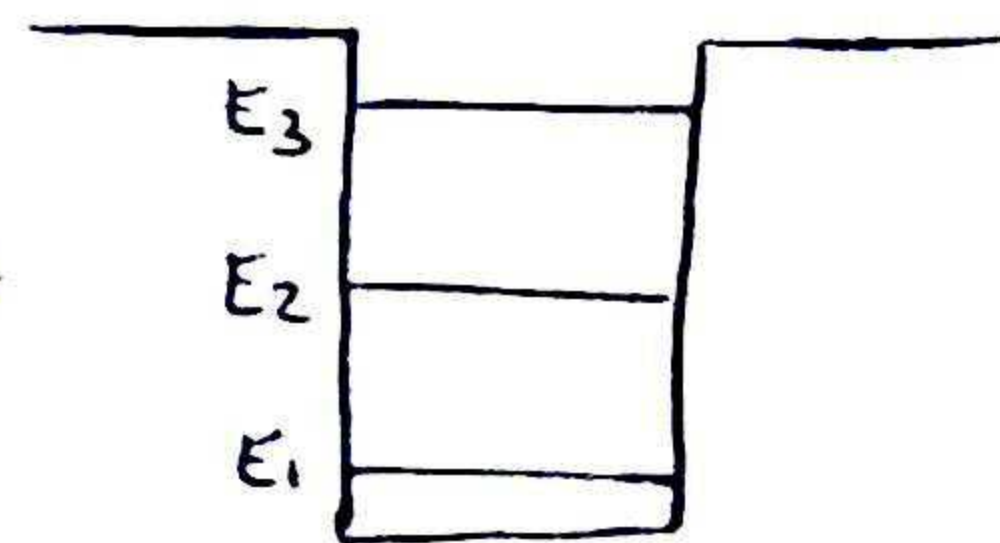
جبهه پتانسیل

* اگر L بزرگ باشد جبهه معمولی و مثل مدار است و الکترون کوچه باشد و کمتر از 100 و آن جبهه کوآنتوم کوئید می شود و الکترون فیزیک کوآنتوم برقرار می شود.



* در حالت جبهه کوآنتوم الکترون داخل جبهه باشد انرژی های جانبی می تواند کم شود و انرژی پیوسته ندارد این انرژی ها به مقدار ویژه و تیره و مقدار کمی با نام شروع می شود.

→ مقدار فوق توابع یا بردارهای ویژه هم دارند به رابطه موج الکترون معروف هستند $\psi(x)$
موج الکترون در واقع احتمال حضور الکترون اشاره دارد.



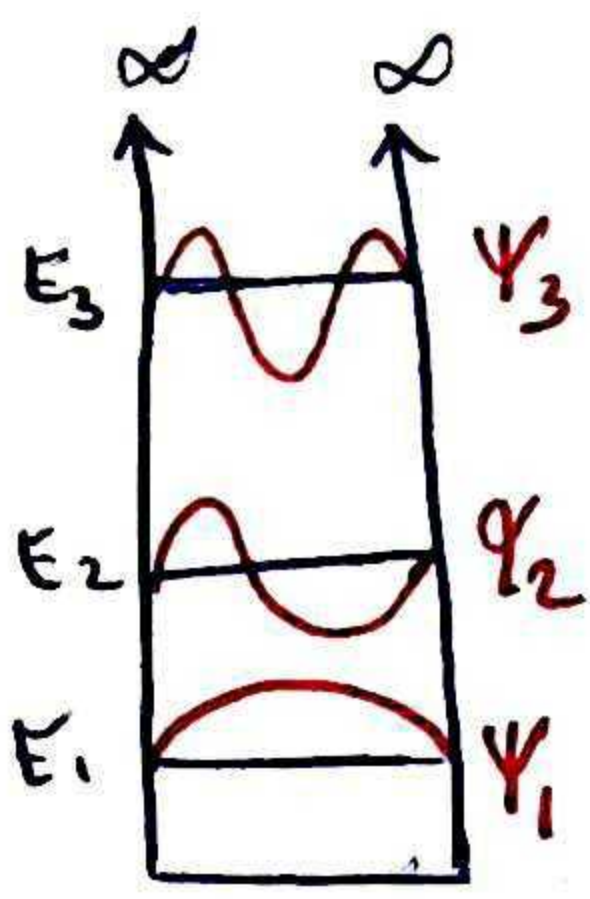
احتمال حضور الکترون در x $\psi(x) \psi^*(x) = |\psi(x)|^2$
 $0 < |\psi|^2 < 1$

* جبهه پتانسیل شبیه به آتم هیدروژن است که به طبع انرژی آن همان موج الکترون است که گفته می باشد...

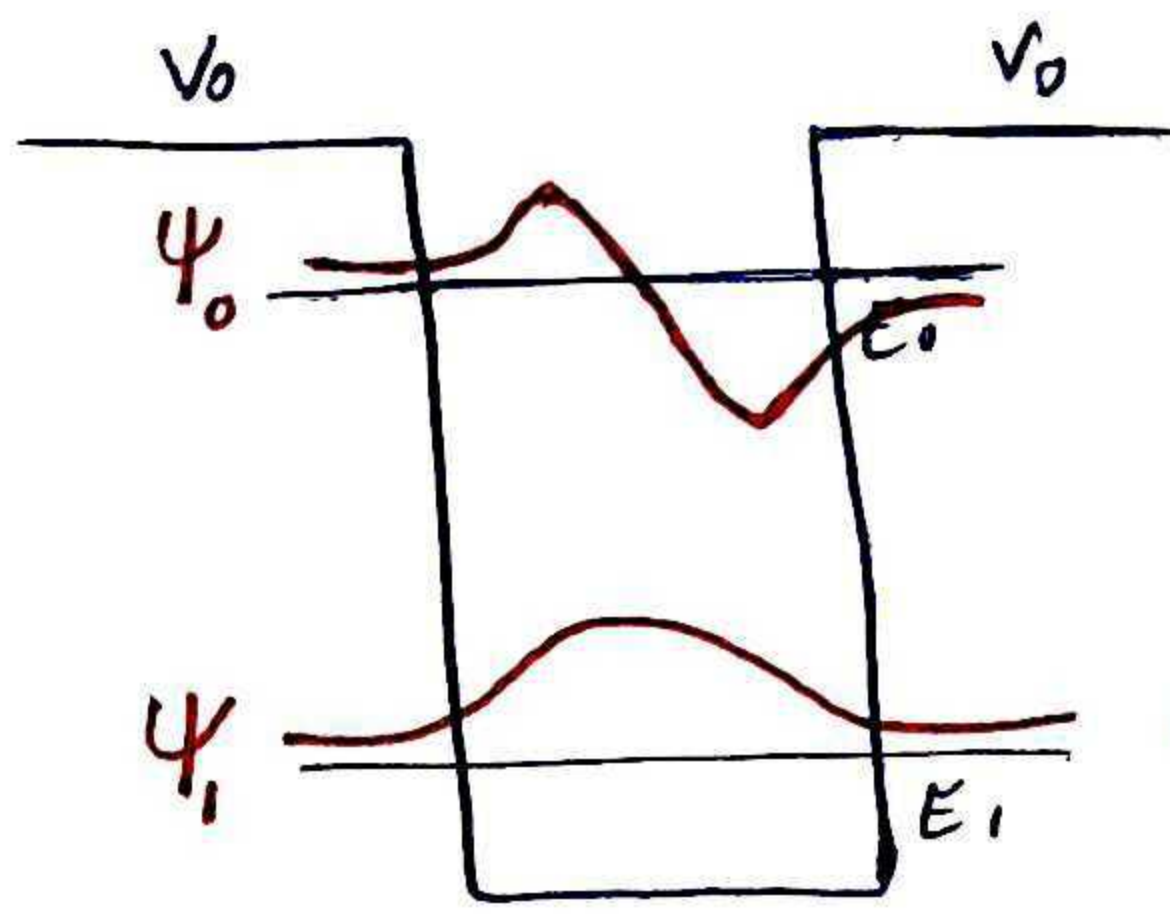
چاه ممکن است به حالت یا محدود باشد :

چاه به حالت $V_0 \rightarrow \infty$

محدود $V_0 < \infty$

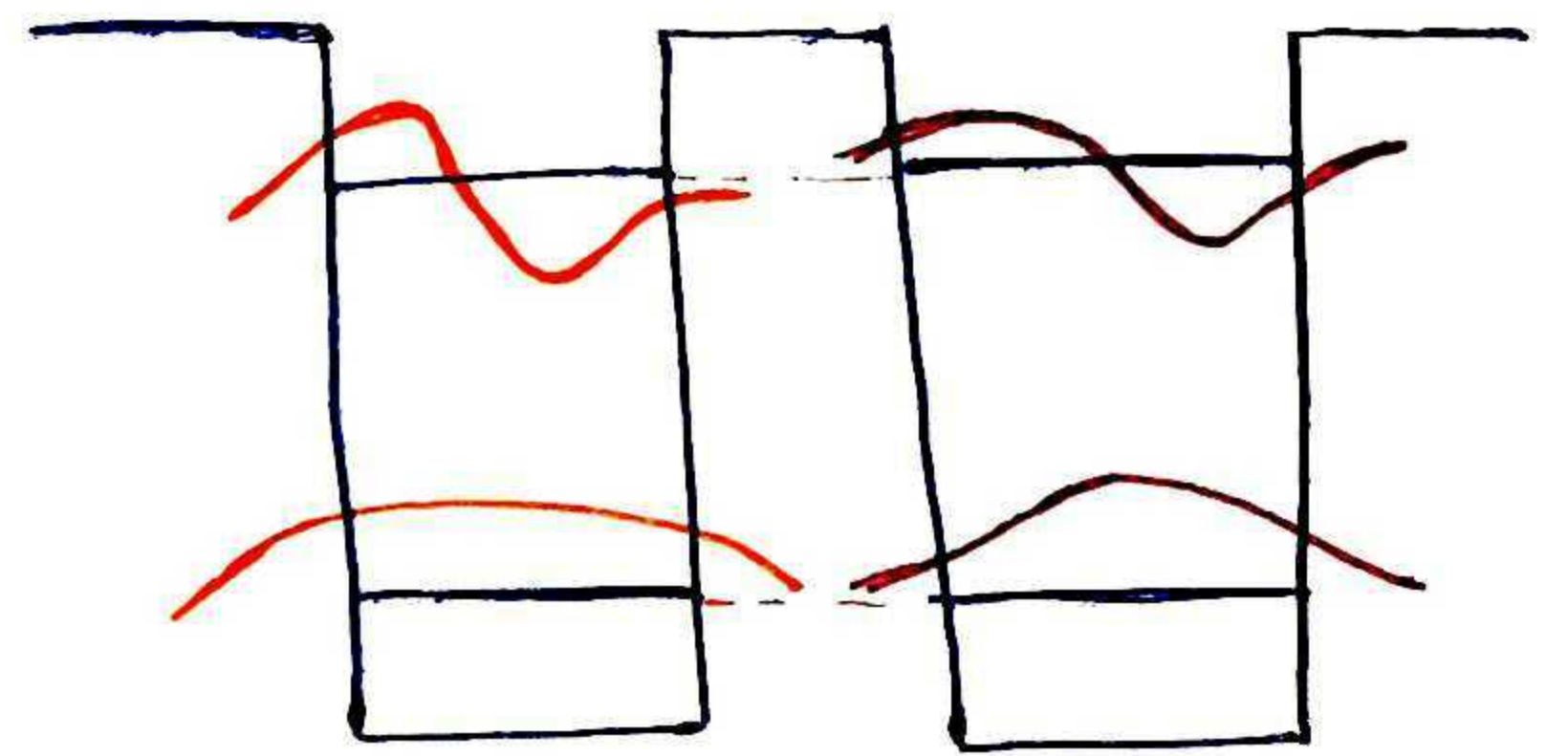


به حالت



محدود

$V > V_0$ چاه محدود الکترون در دیواره نفوذ می کنند.



* * اگر در چاه محدود مجاور در فاصله کمی از هم باشند (کمتر از ۱۰ نانومتر)

موج الکترون یک چاه در چاه مجاور هم دیده می شود

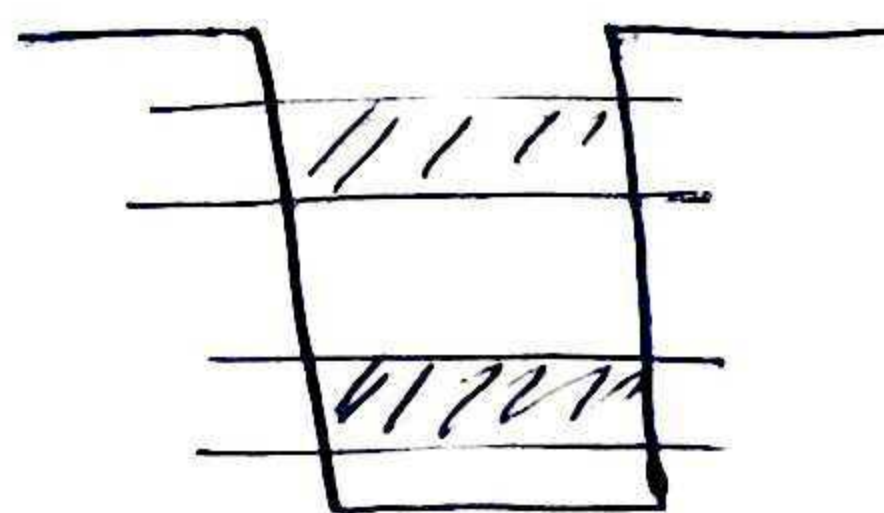
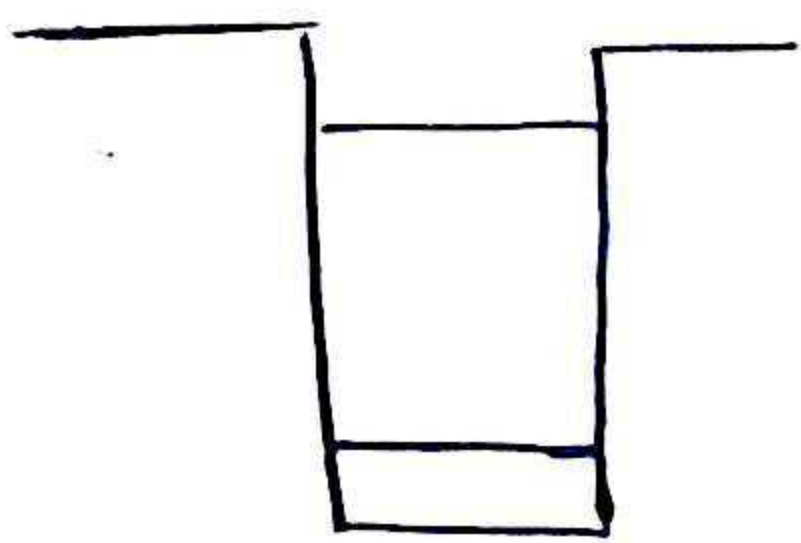
در دیواره مشترک موج الکترون ها هم پوشانی دارد یعنی احتمال حضور الکترون

یک چاه در چاه دیگر وجود دارد. در این پدیده تونل زدن گویند و این

کاربردهای اروا است

وقتی الکترون تونل نهد در چاه مقصد هم برای خود یک سطح انرژی پیدا می کند.

چون طبق اصل عدم قطعیت در هر چاه دو الکترون نمی تواند یک سطح انرژی داشته باشد پس سطح E_1 و E_2 و ... حرکت در سطح تبدیل می شود حرکت از سطح انرژی فوق و پستی تعداد چاه ها زیاد شود چاه ها افتاده می شوند و چون چاه نزدیک هستند الکترون ها زیاد باشند شبیه نوری می شوند.



در یک اسم سطح گسترده است ارتباط نامیده می شود و در یک پدیده تونل است

احتمال و صرح آن در رساله

عاشق بنید است. و منور است

جاءه امير در هر دو هم مصر

است و در این متن

حالت رادار

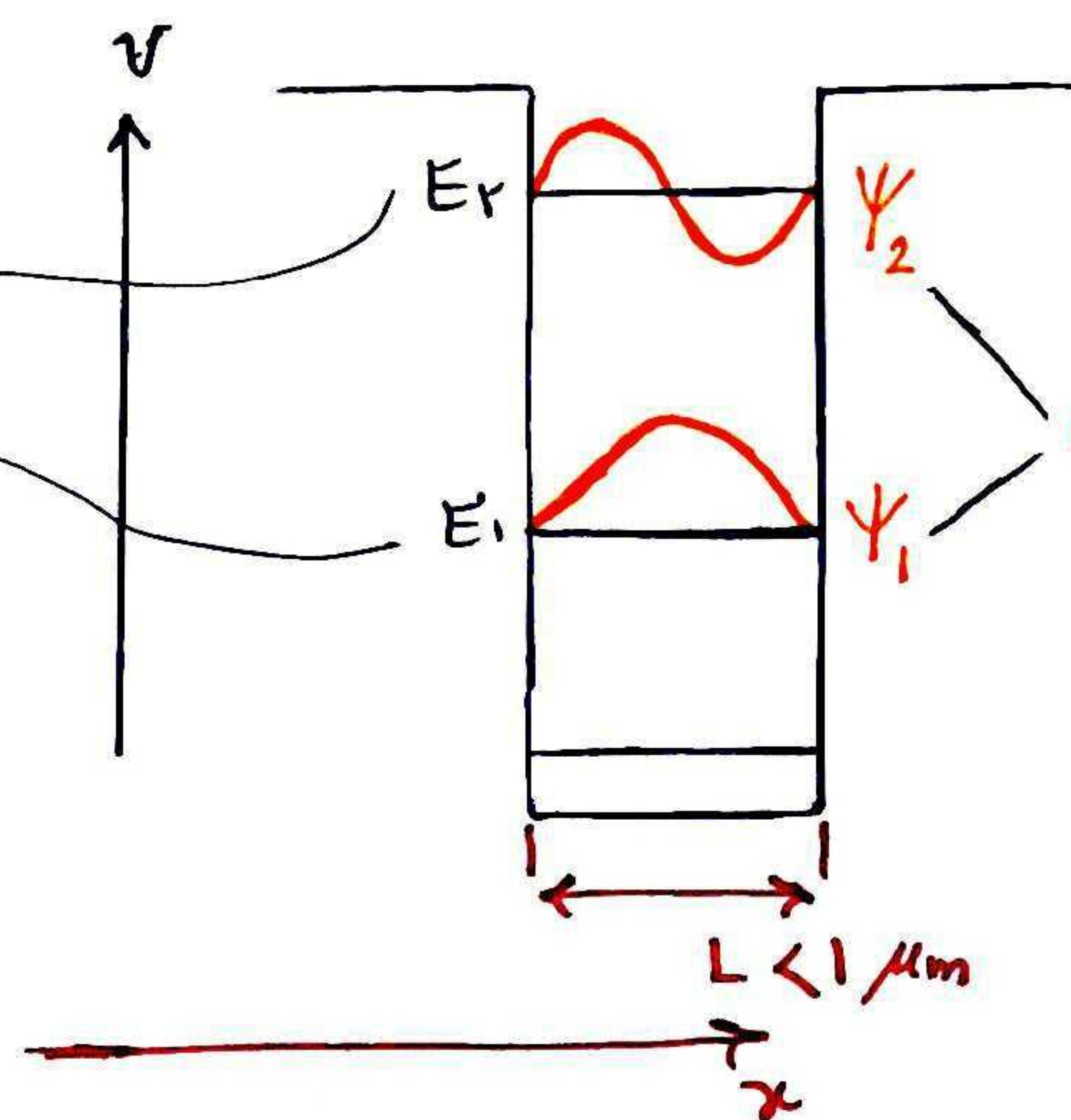
(state)

(حالات های انرژی)

[معارف و نشر معارف موج ۲]

$$E = -qV$$

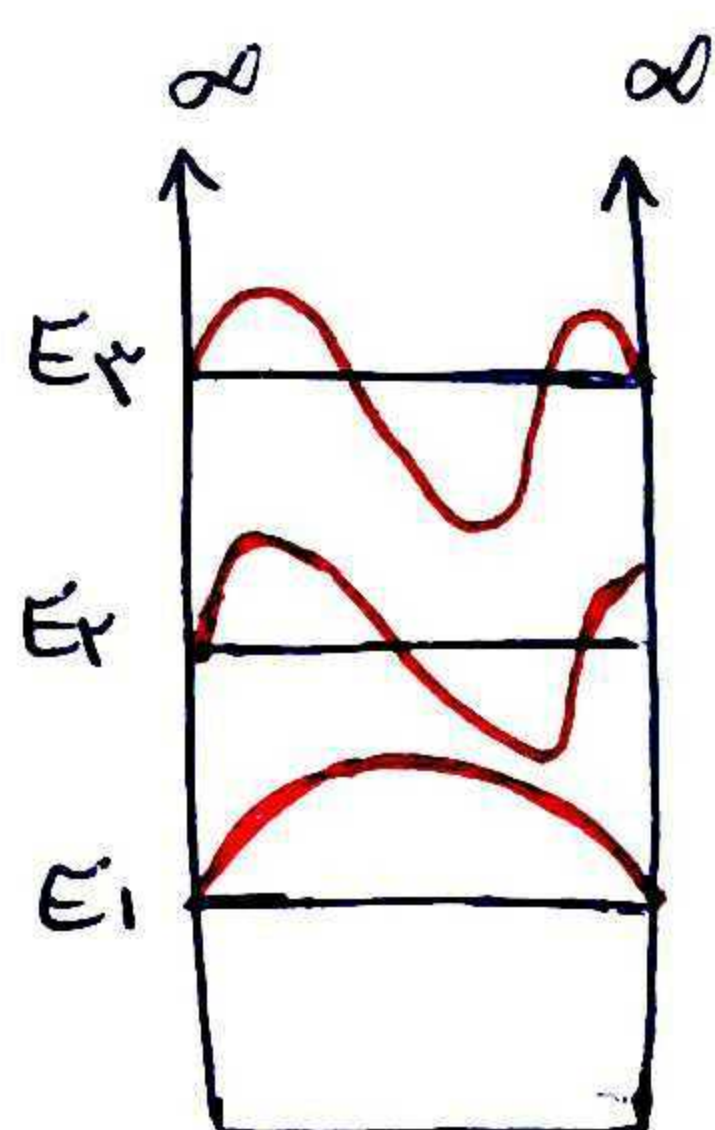
لا اله الا الله



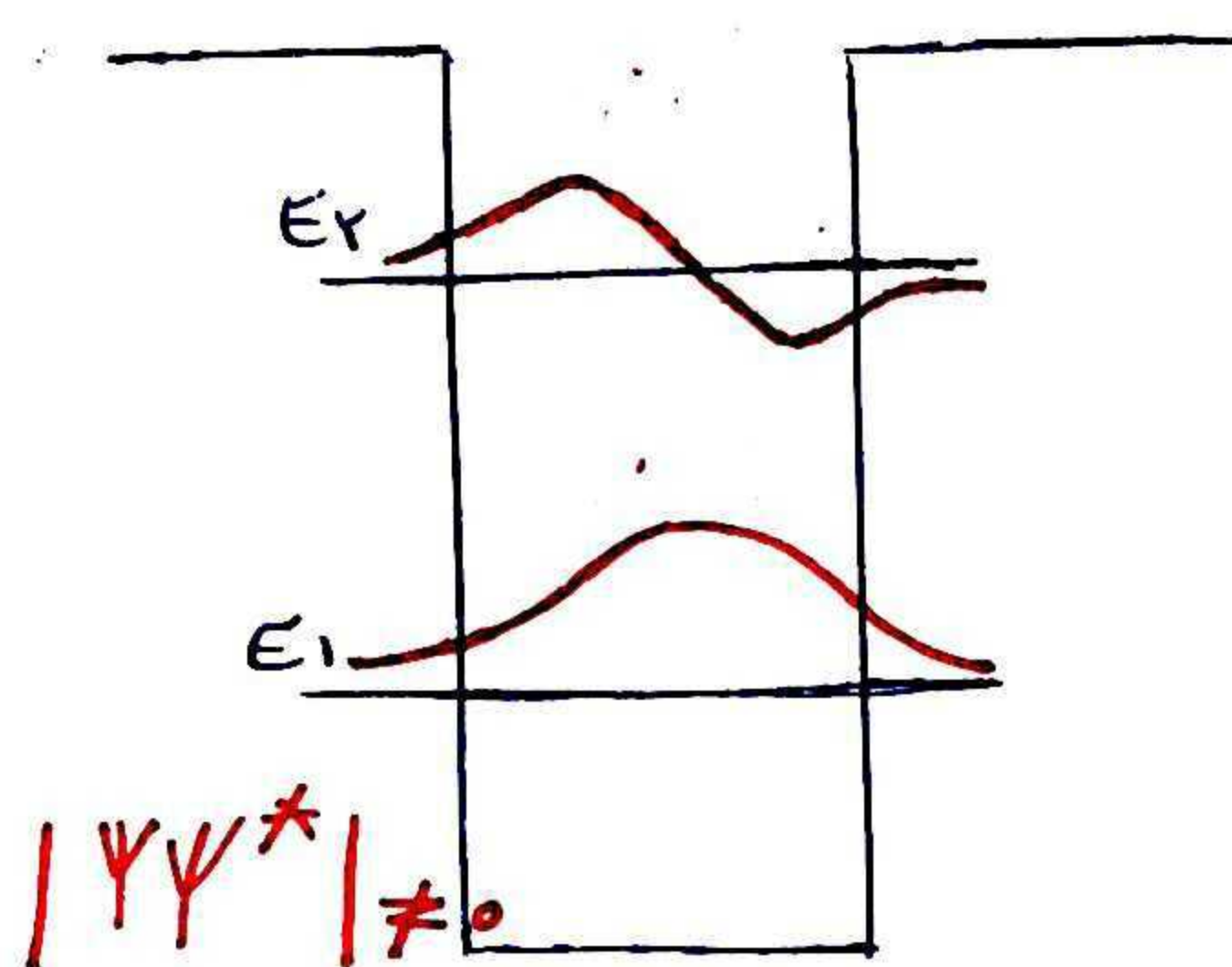
تابع موج اللبرون

1442

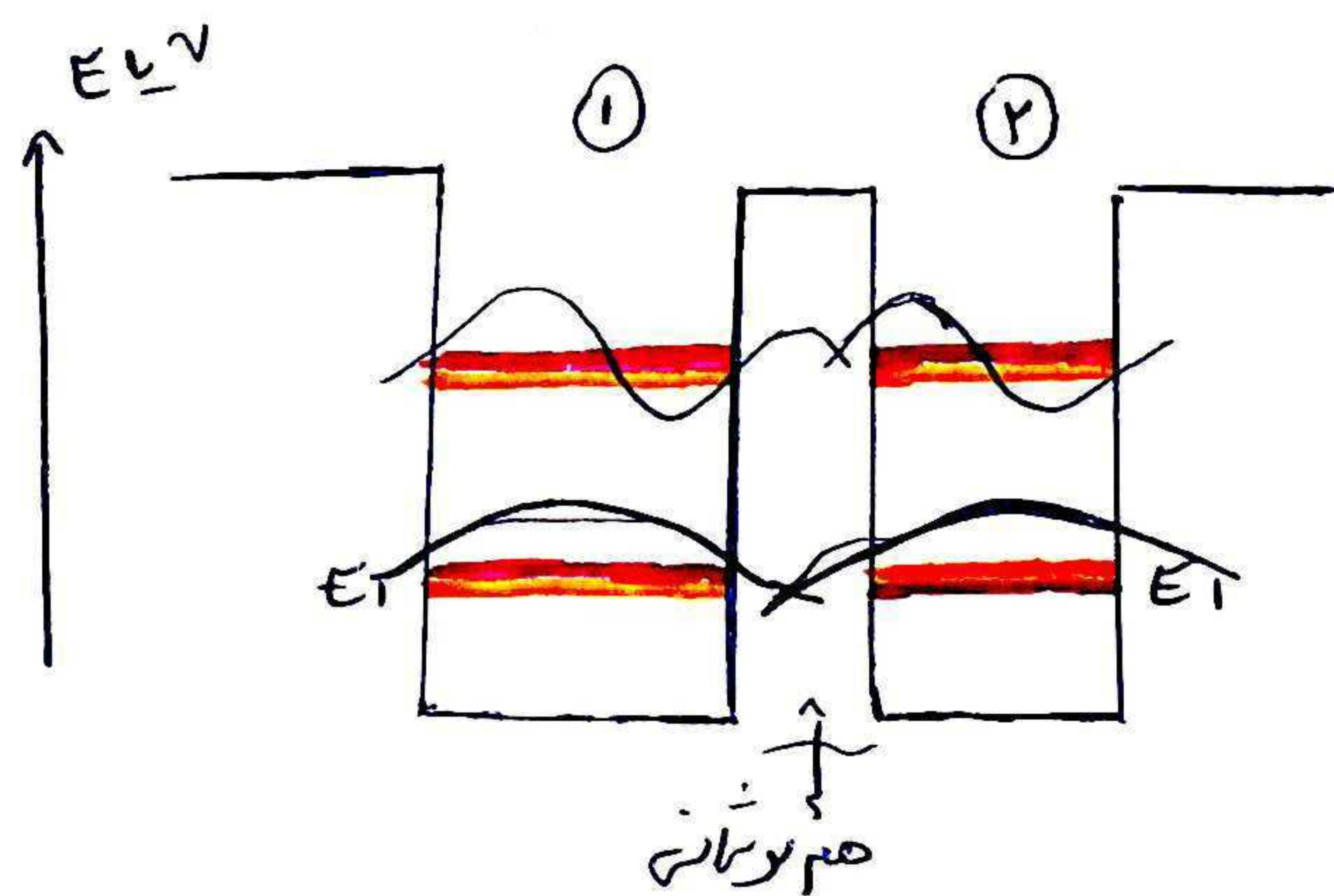
احتمال حنفية المبرور



حاجہ بیگم صاحبہ

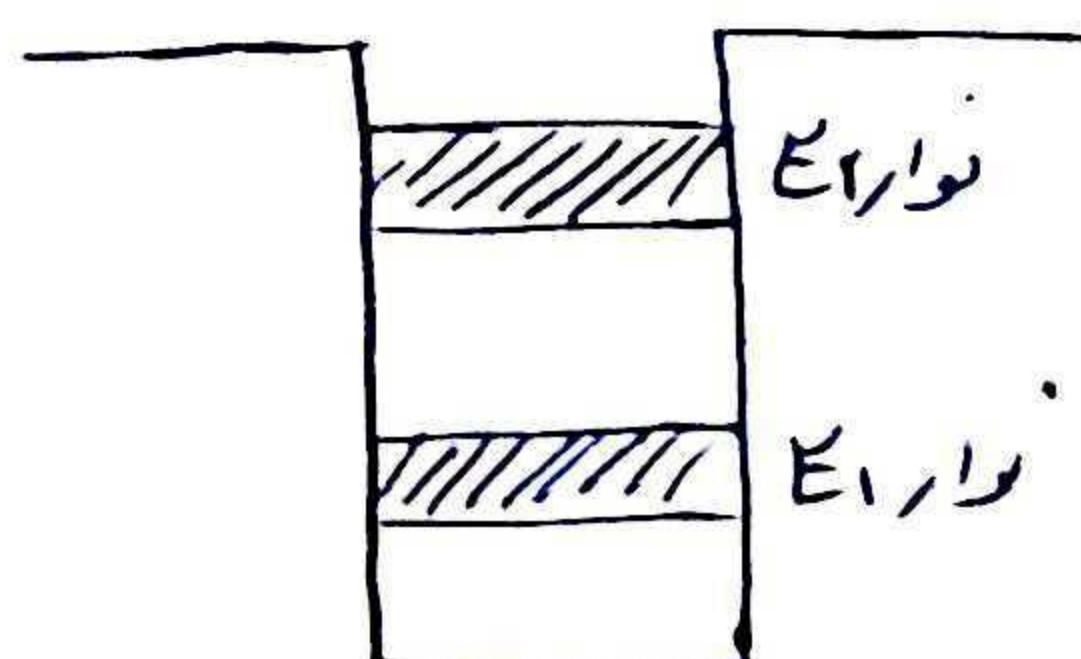


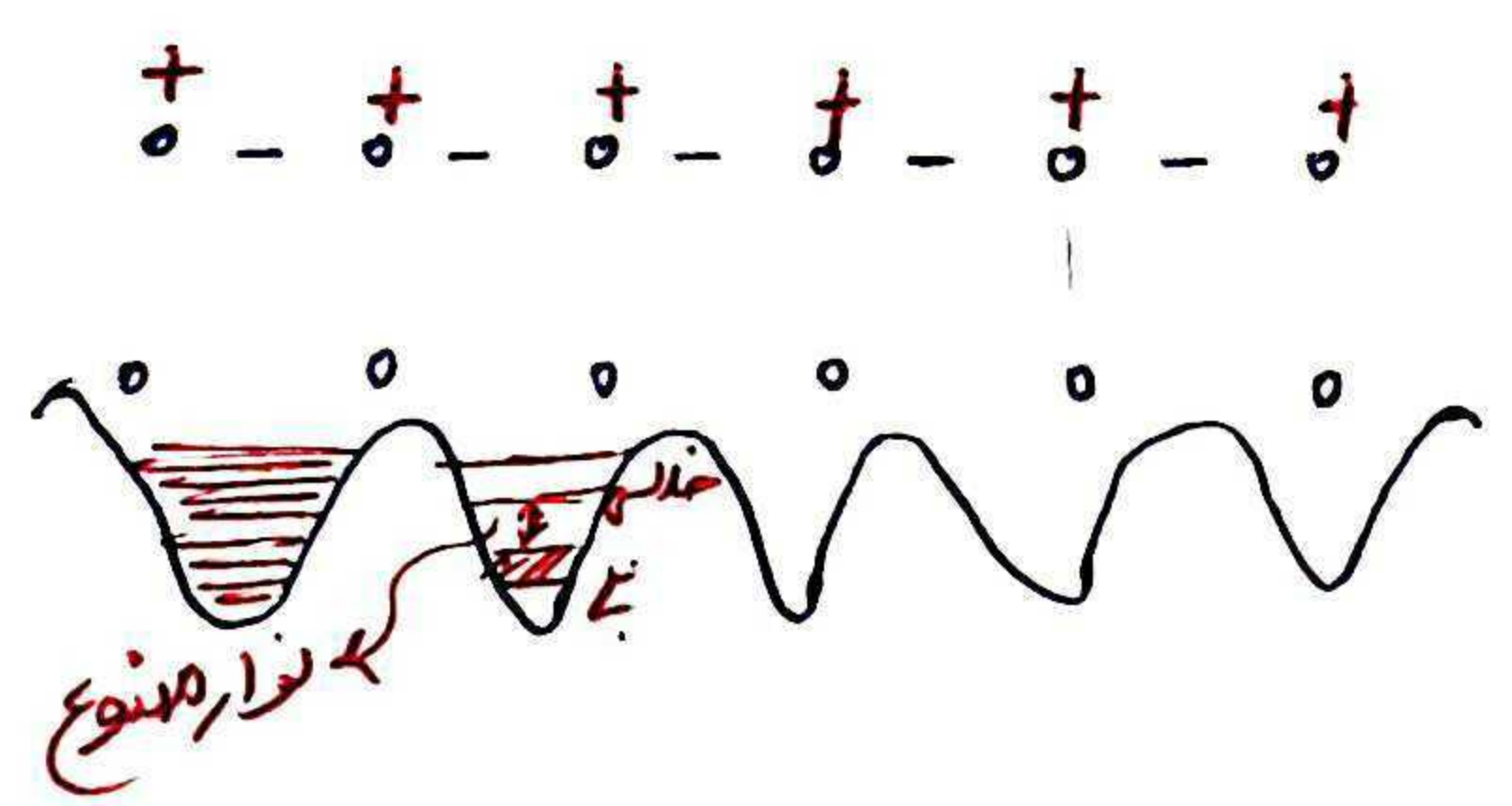
معروف



اگر در حاصله ی روحیه کم باشد و
دانشه باشد

چون که اکثر آن از جمله ① به جمله ② می رود (تغییر می زند) و در جمله ② هم اکثری با حدود آن اکثری وجود دارد طبق اصل عدم قطعیت در اکثر آن در داخل جمله نمی تواند یک اکثری داشته باشد پس سطوح اکثری در هر جمله در دو سطح نزدیک بهم قابل تغییر است
حال اگر جمله های مؤثر در اندازه ی N تا افزایش یابد سطوح یاد شده ی $(E_1, E_2, \dots)$ همین مقدار N تبدیل می شوند و اکثر N عدد بزرگتر باشد محلی E_1 و E_2 یک نوار تبدیل می شود.

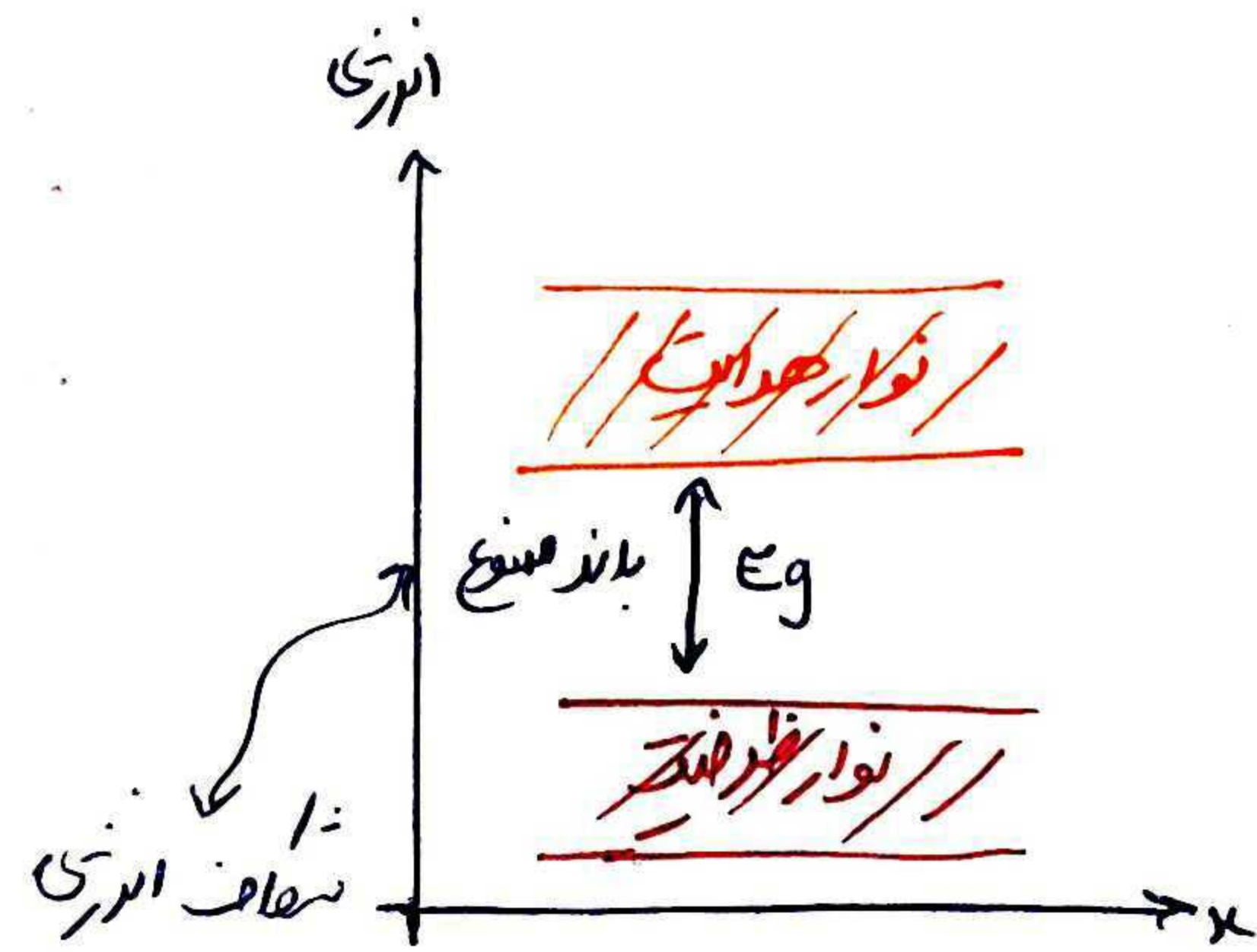
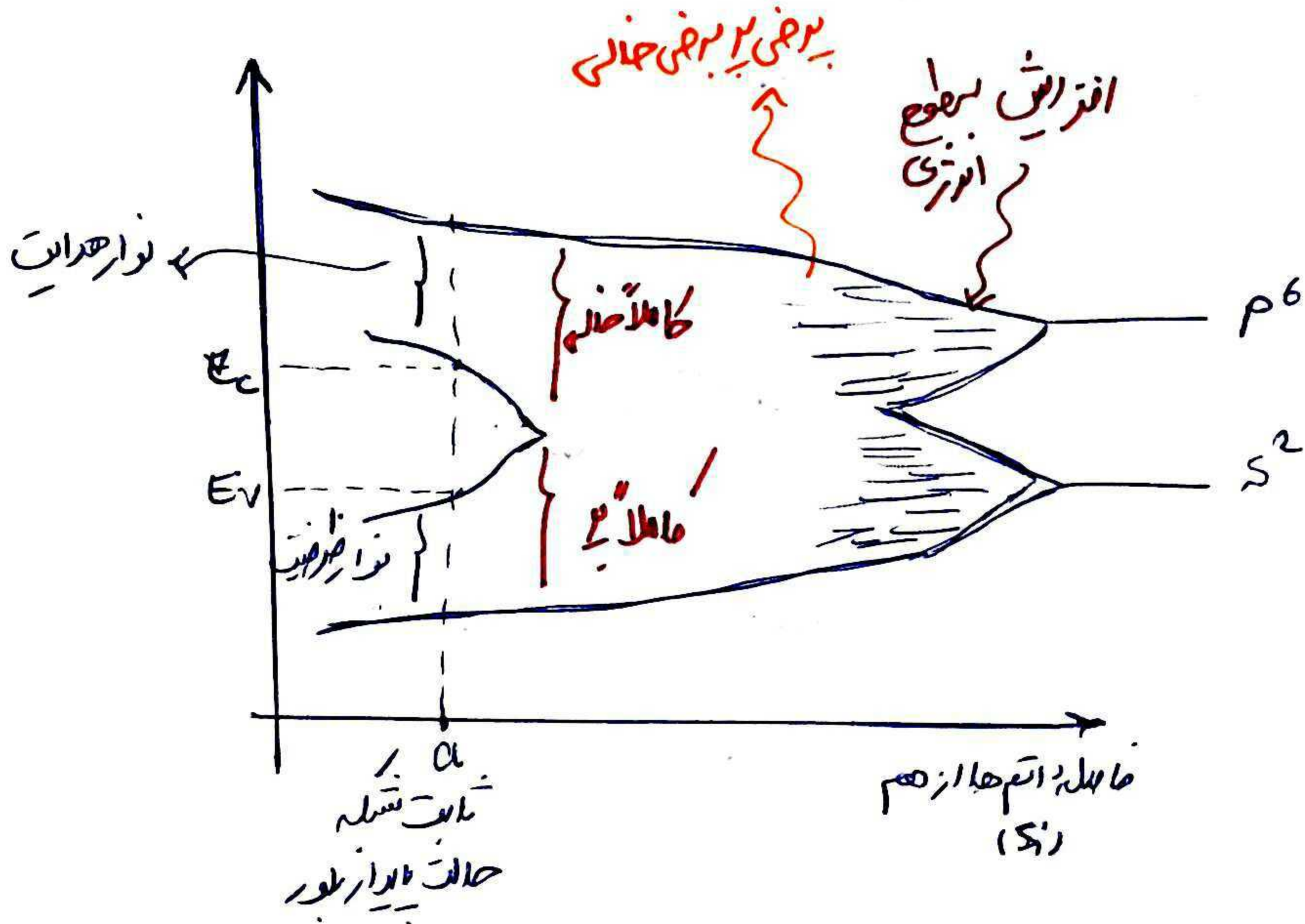
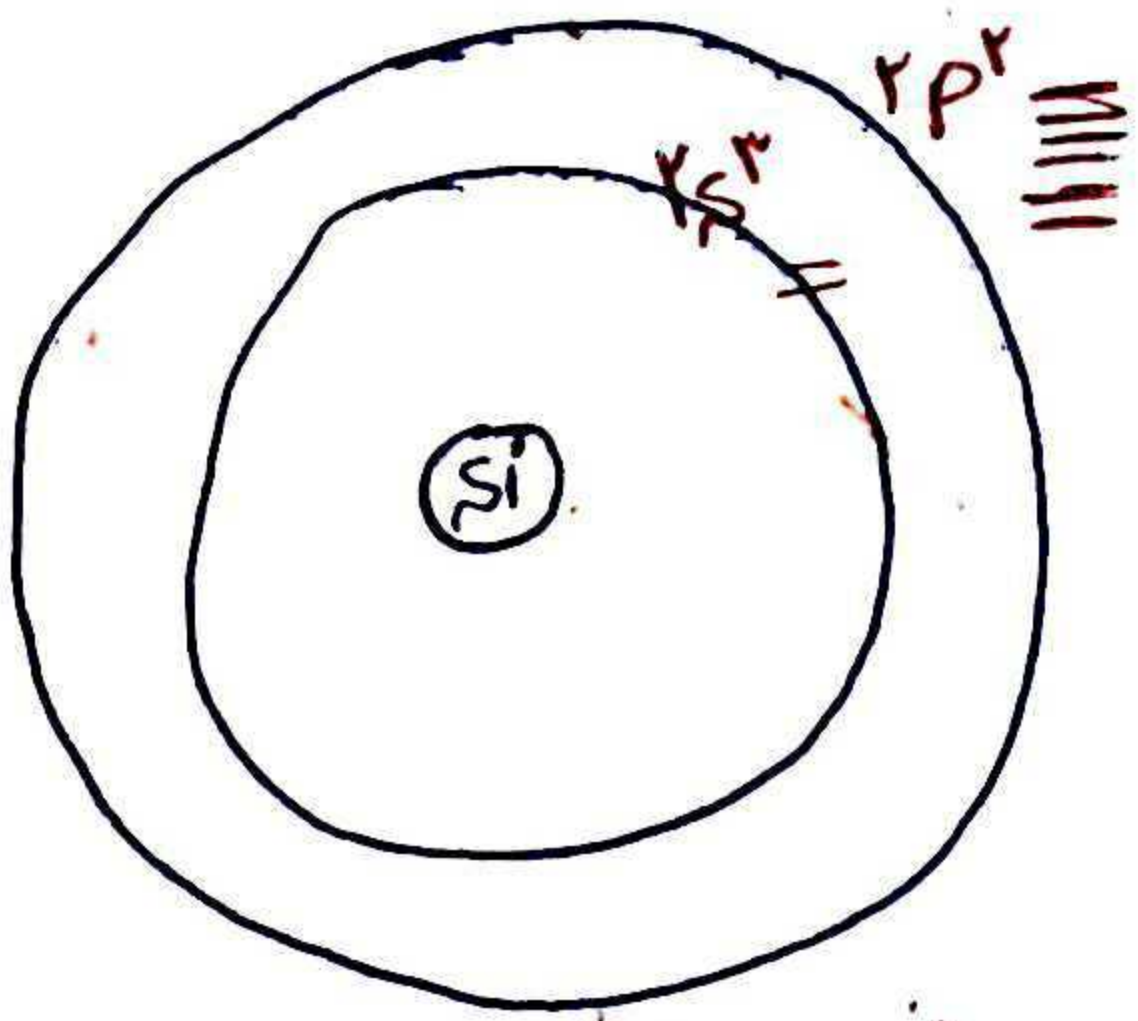




بنای بلور یا تابع بلوخ (Bloch)

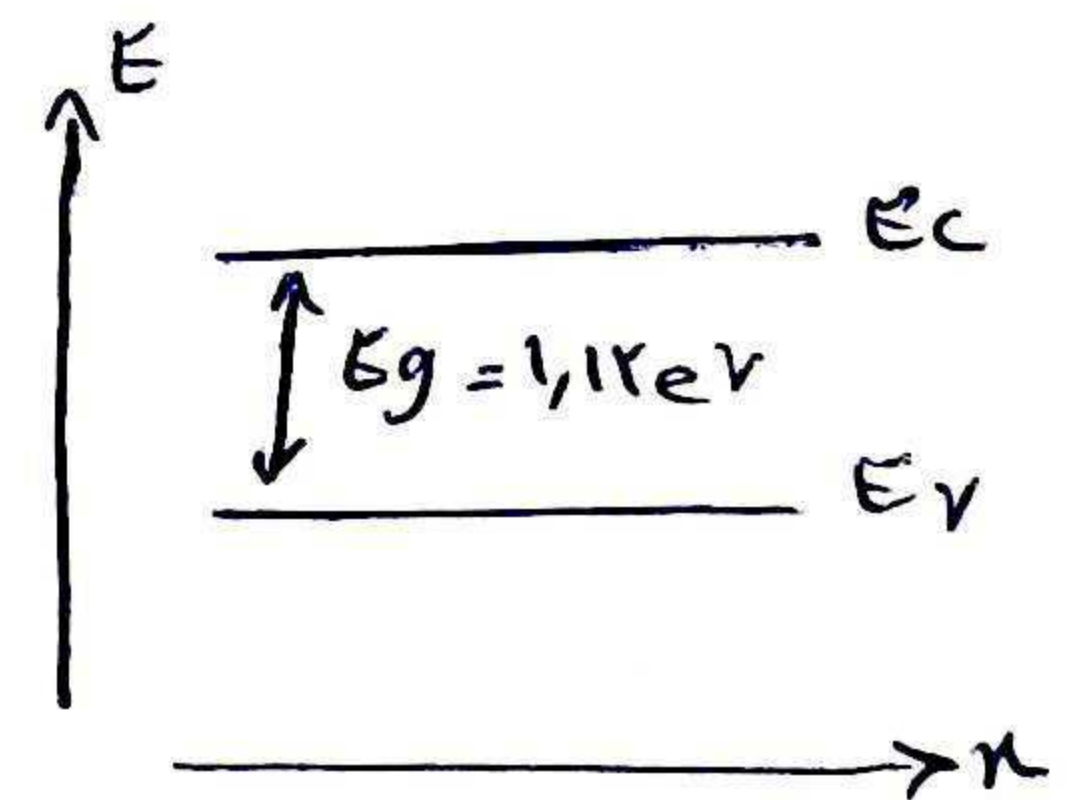
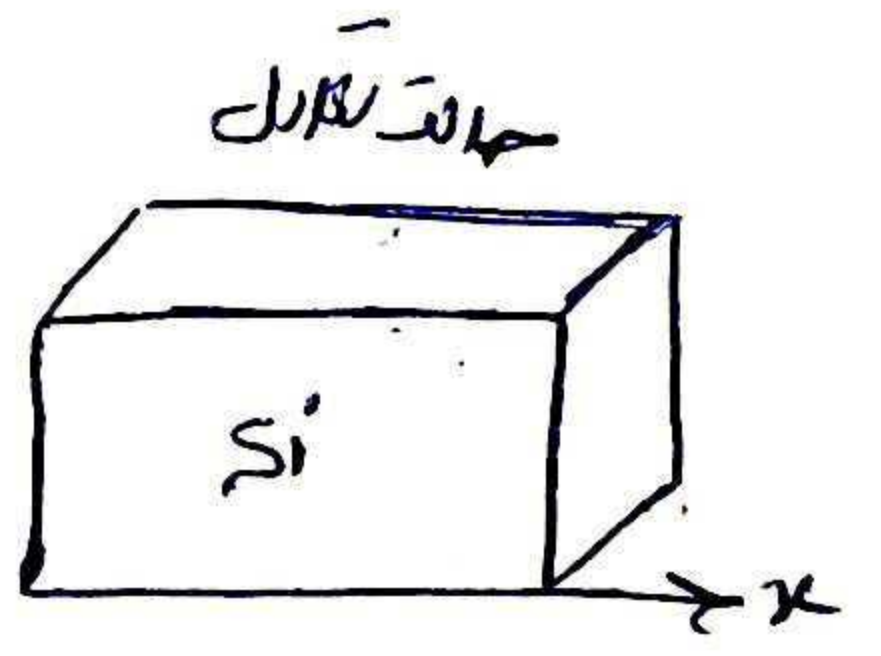
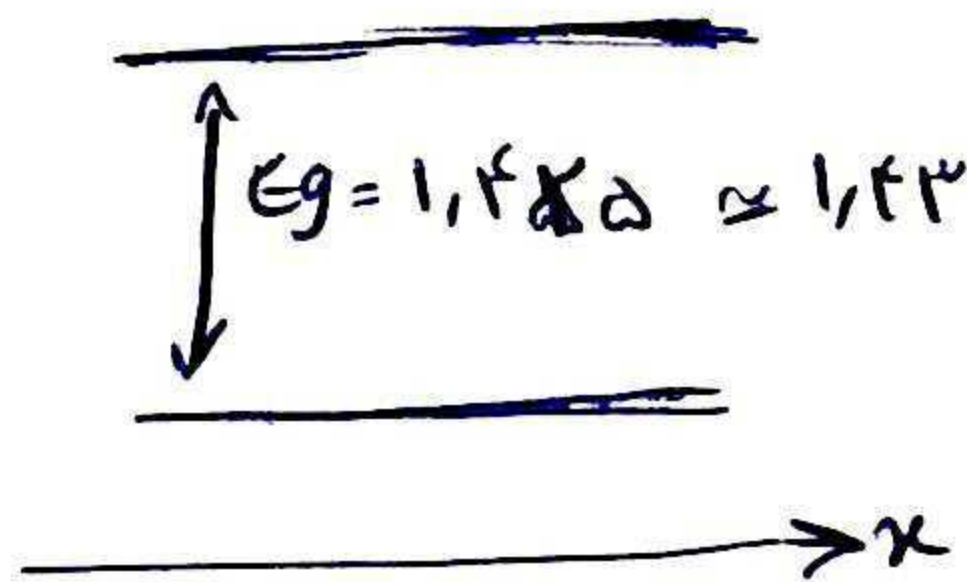
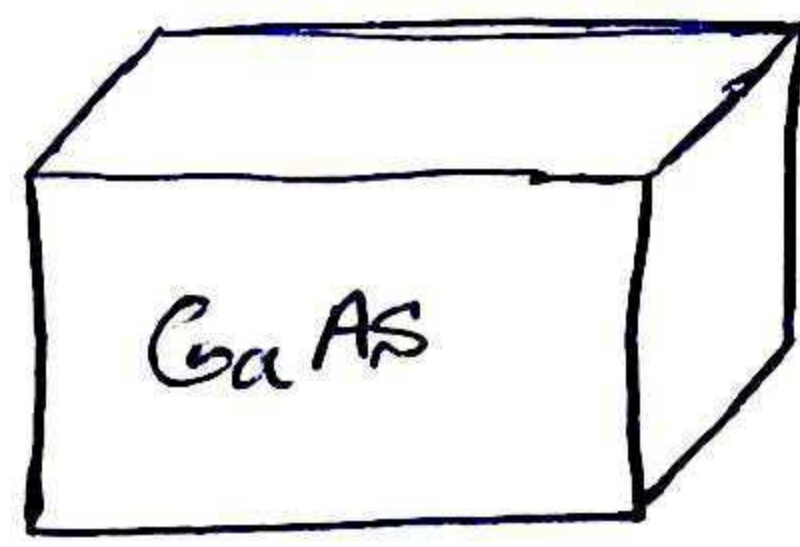
۵۰۰ nm

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$



(band gap)

E_g برای هر ماده مقدار مشخصی دارد (the E_g for each material is specific)
 Si: $E_g = 1.12 \text{ eV}$ (الکترولون و ن) (electrons and holes)
 Ge: $E_g = 0.67 \text{ eV}$

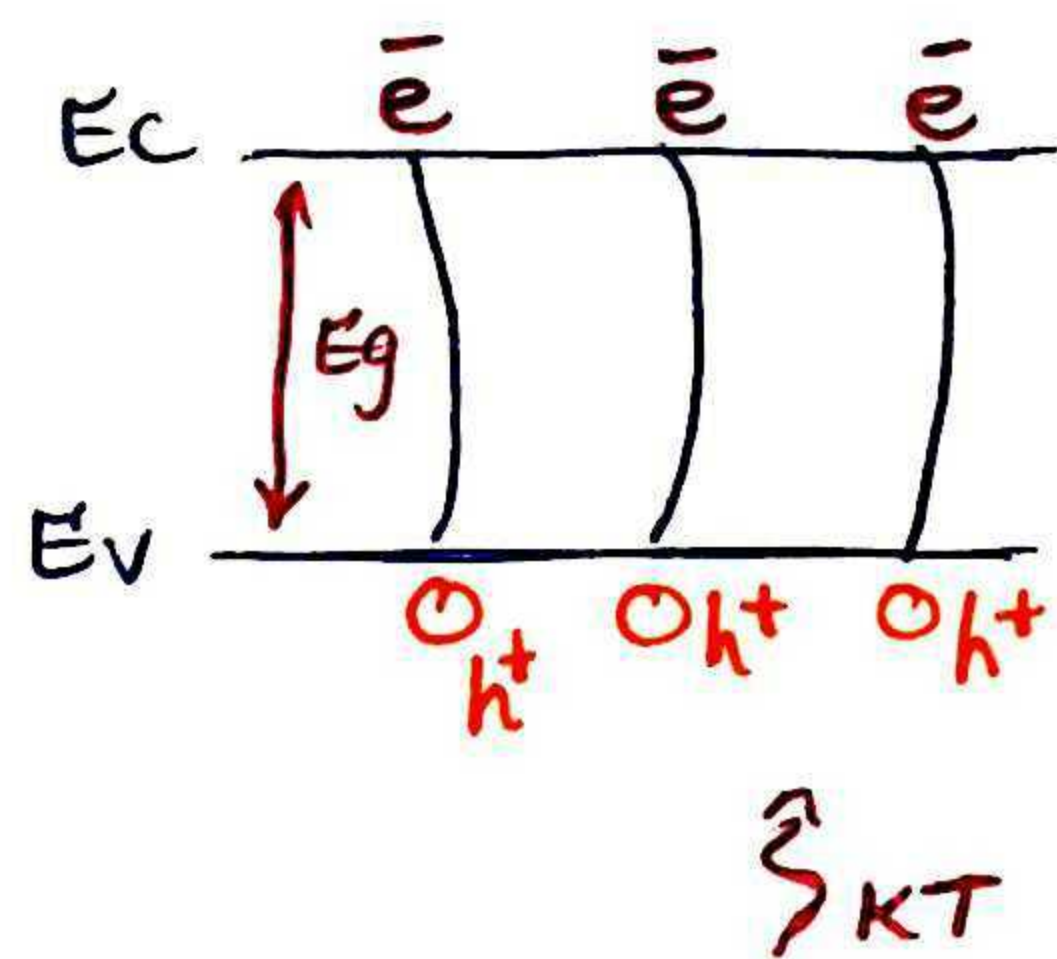


ماده ذراتی؟ نیمه رسانایی کم یا خیلی ندارد. نوار هدایت مثل حفره الکترولون آزاد است. نوار ظرفیت مثل حفره هدایت آزاد است.

در حفره مطلق حد نوار ظرفیت به (از الکترولون) و (از هدایت) خالی است بنابراین هیچ حامل آزادی وجود ندارد. الکترولون ها در نوار ظرفیت کم مقدار آزادی دارند در هدایت نقش دارند زیرا آزاد نیستند و مقید به هسته اند.

* نین در دمای صفر مطلق هدایت صفر است

* با اعمال دما و حرارت محلی که انرژی آن از E_g بزرگتر است برخی از الکترونهای نوار ظرفیت میتوانند به نوار هدایت بروند بنابراین تعداد مساوی الکترون و حفره آزاد تولید می شود که در دمای اتاق این مقدار $(n=p=n_i)$



	n_i	$E_g (eV)$
Si	10^{10}	1.12
GaAs	10^7	1.43
Ge	10^{14}	0.72

E_c ————— E_T

نیم رسانای نوع n :

E_v —————

حسب ناخالصی (مثلاً) که به نیم رسانا اضافه شود یک تراز وسطی (انرژی در ناخالصی ایجاد می کند) دارد. این ناخالصی که باعث تولید نوع n می شود (گروه 5) یک تراز در نزدیکی E_c ایجاد می کند. این ناخالصی الکترون اضافه در اوبیتال آفزدادند. وقتی دمای محیط اعمال شود حین ناخالصی انرژی این تراز تا E_c از E_v تا E_c حین کمتر است. در نتیجه همه این اتم های ناخالصی یونیزه می شود و الکترونهای آنها به E_c می رود و آزاد می شوند. به این ترتیب تعداد الکترون های آزاد تقریباً برابر اتم های ناخالصی است و الکترون ها بیشتر از حفره ها هستند و به اینها حامل های سرعت گفته می شود.

حالت تعادل $p_n = n_i^2$ و $n \gg p$

به ماده ناخالصی اضافه شده که الکترون می دهد، Donor یا چشمه گفته می شود. حقایق حقیقی آن را با N_D نشان می دهند.

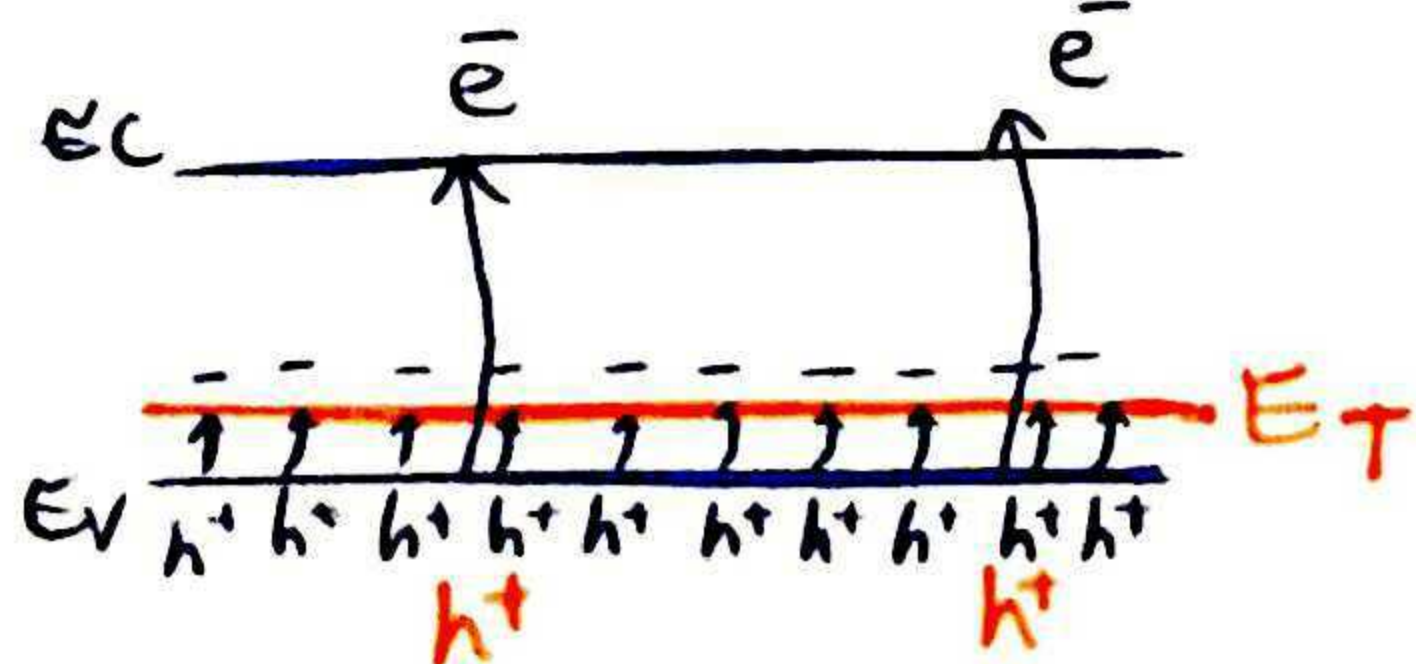
$$N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3} \rightarrow n = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

Exp :

Si

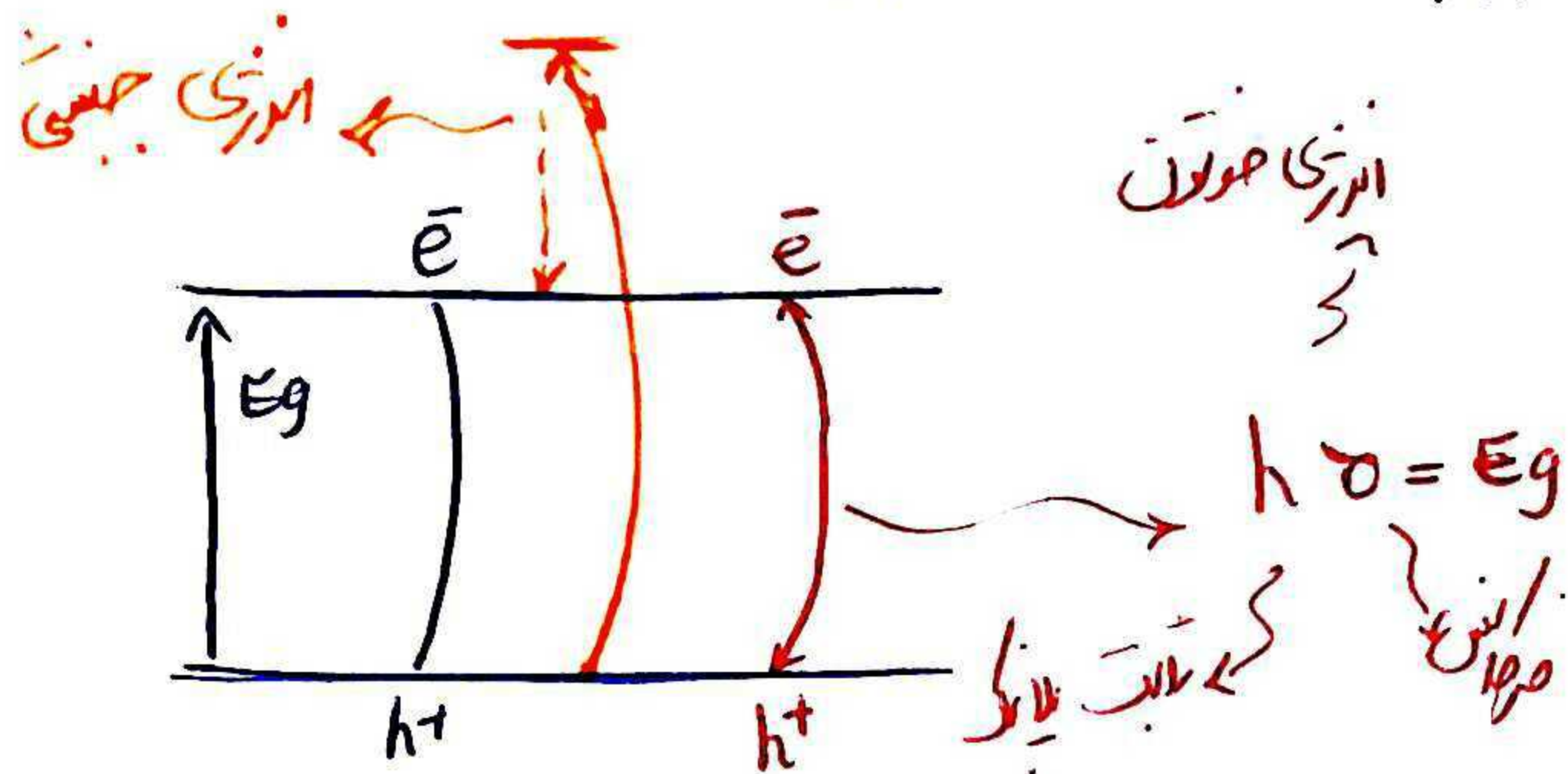
$$p = \frac{n_i^2}{10^{16}} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$$

نیم رسانای نوع p : الکترونهای از گروه 3 به نیم رسانای حامل اضافه شود. آن ناخالصی نوع پذیرنده یا (Acceptor) گوشت و سبزی در نزدیکی E_v ایجاد می کند.

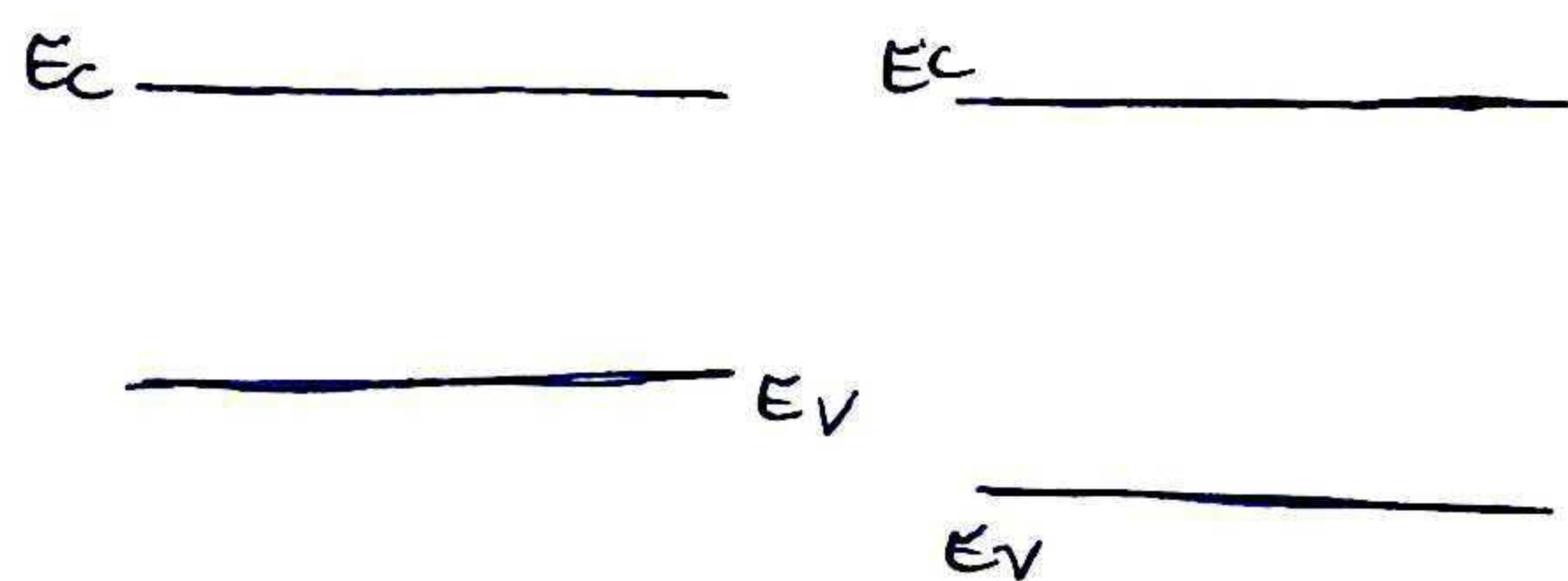
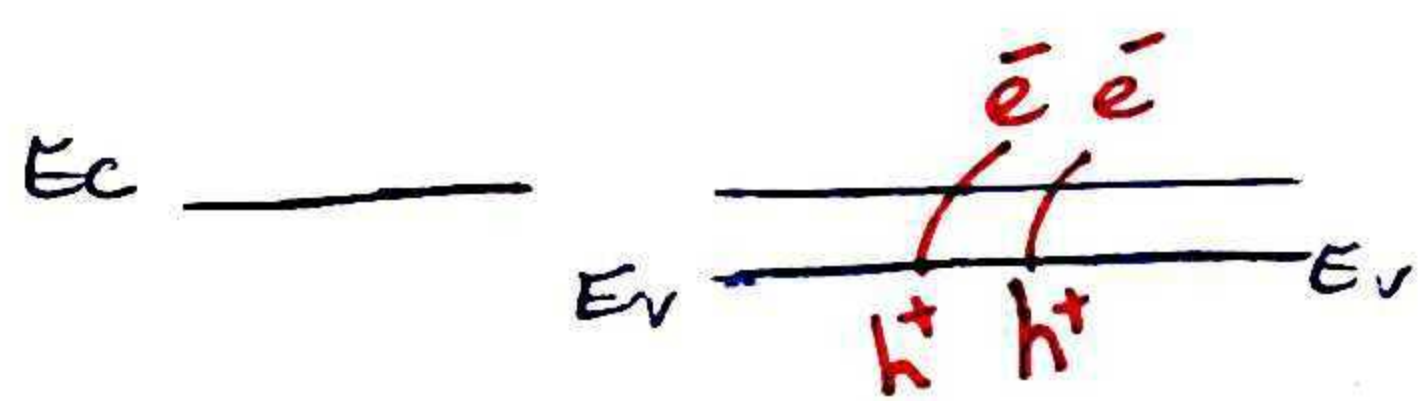
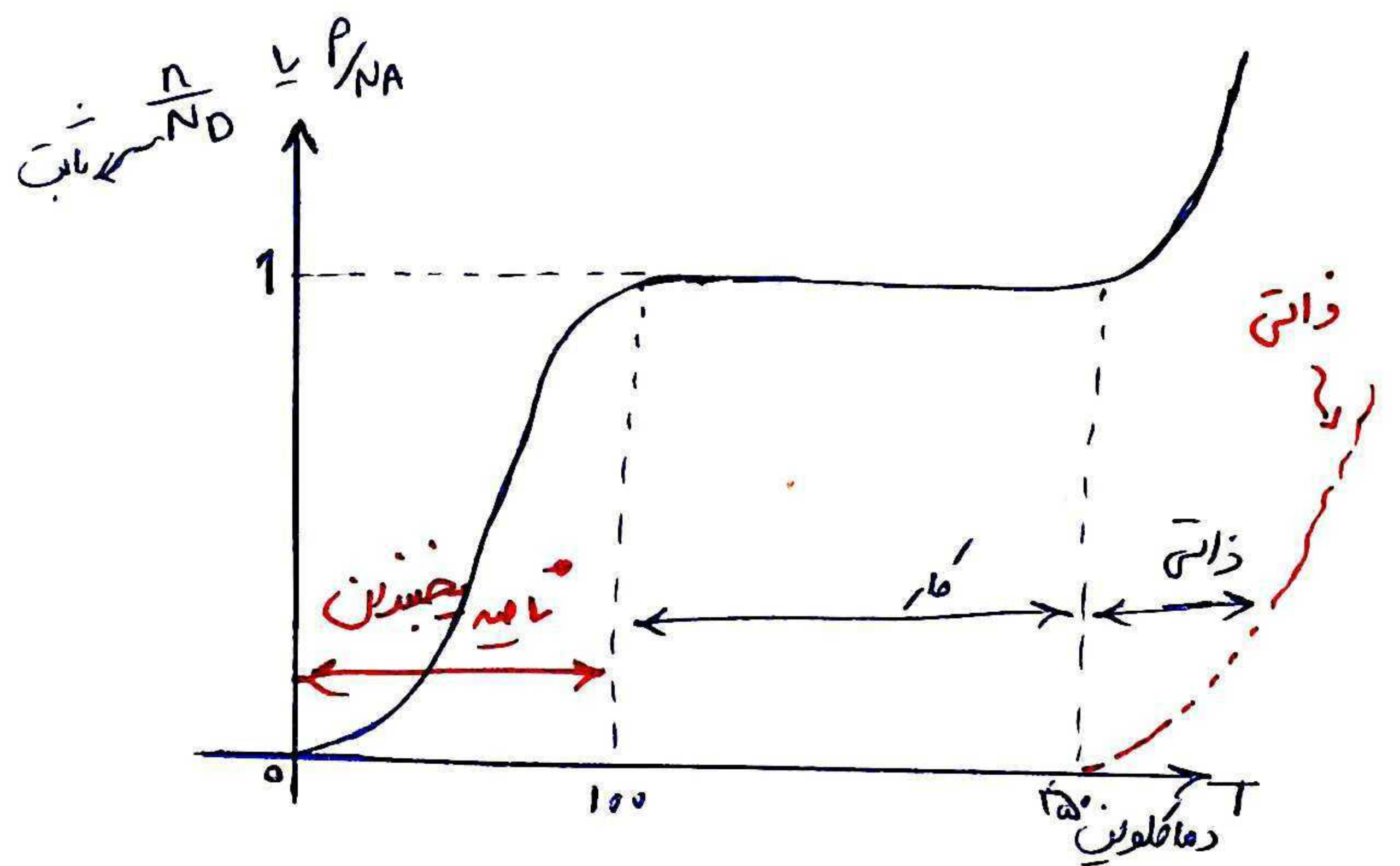
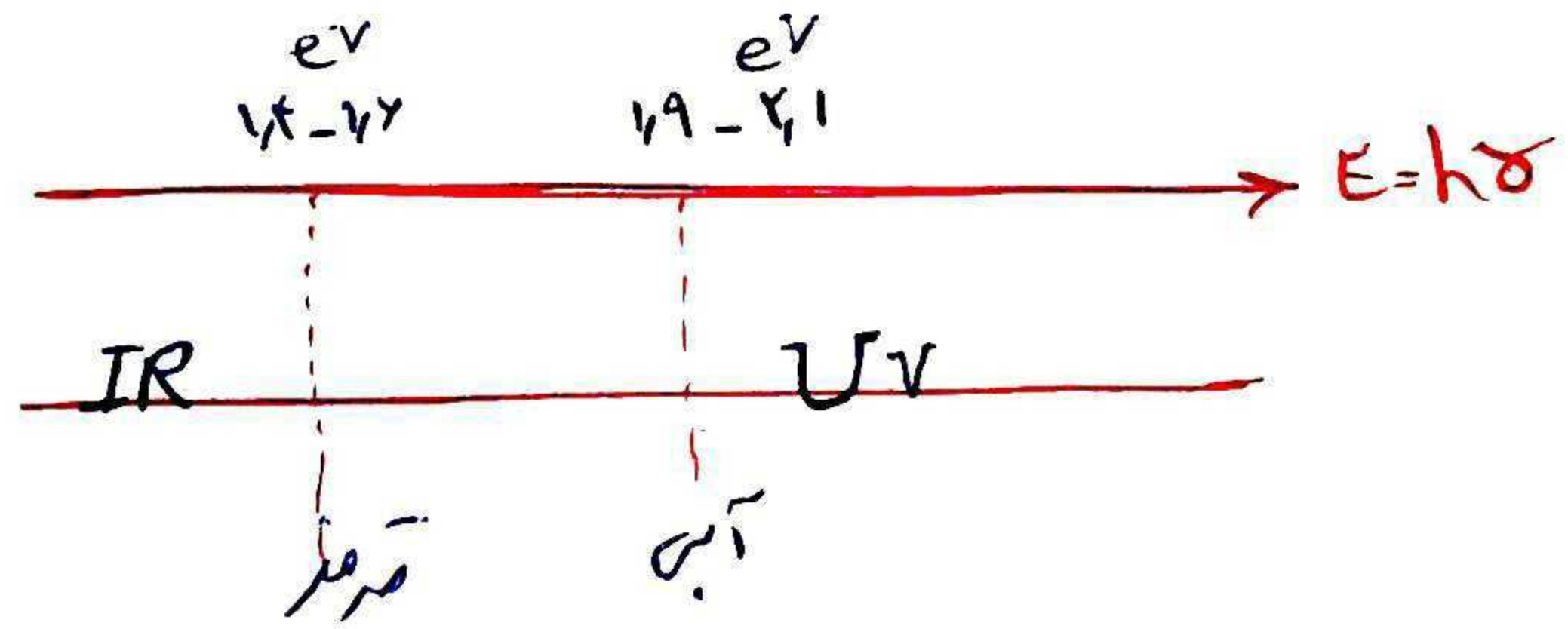


* هر اتم ناخالصی یک الکترون از نوار ظرفیت میگیرد / چون طیف اتمی تا E_v کم است (و اتم ناخالصی یونیزه می شود و یک ضربه آزاد تولید می شود بنابراین) تعداد اتم های ناخالصی یونیزه شده کمتر از ابعاد می شود و تعداد کمی از الکترون ها هم نوار هدایت می روند و الکترون های آزاد اقلیت را می سازند.

(حالت تعادل) $p \gg n$ و $p_n = n i^2$



* چگالی اتم های ناخالصی یونیزه را با N_A نشان می دهند.

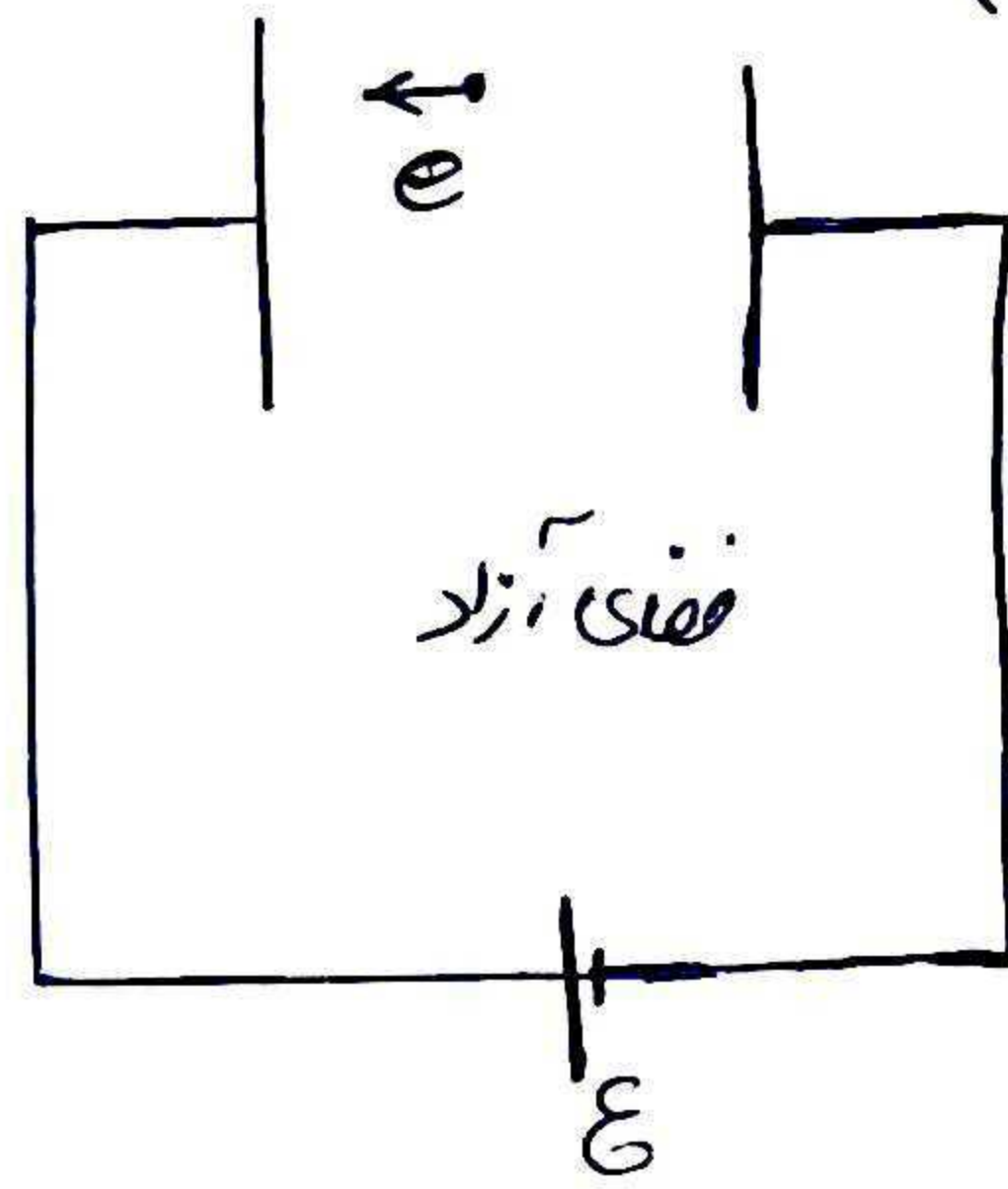
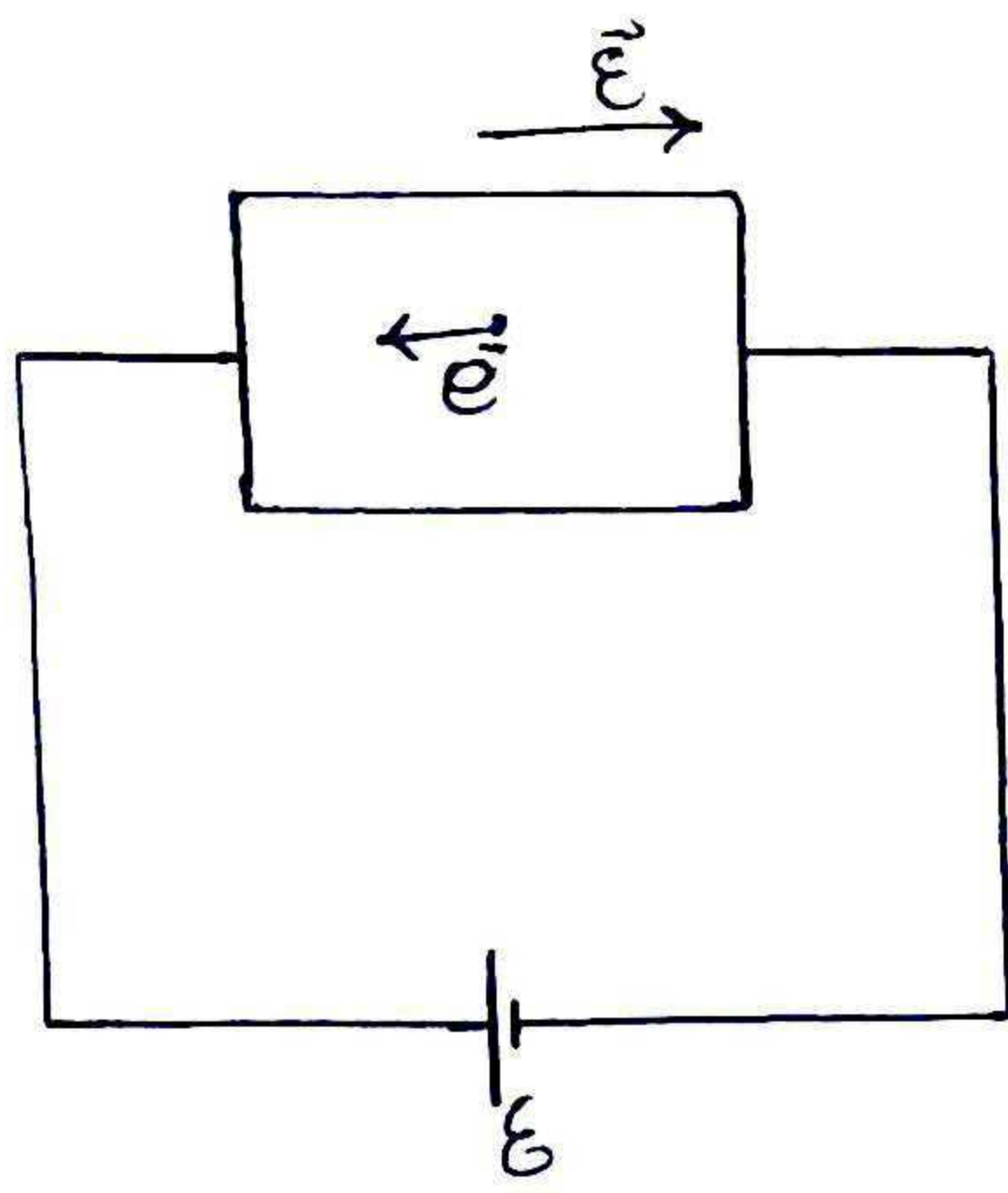


رسانایی مواد :

فلزات در رانندگی تولید E_g و $E_g < 1.0$

طیف (فوتون) E_g بزرگ $E_g = 9 \text{ eV}$ SiO_2 (نسب) $1.4 \text{ eV} < E_g < 2.1 \text{ eV}$

جرم مؤثره (حامل)



$$F = -q\epsilon = m_0 \frac{dv}{dt}$$

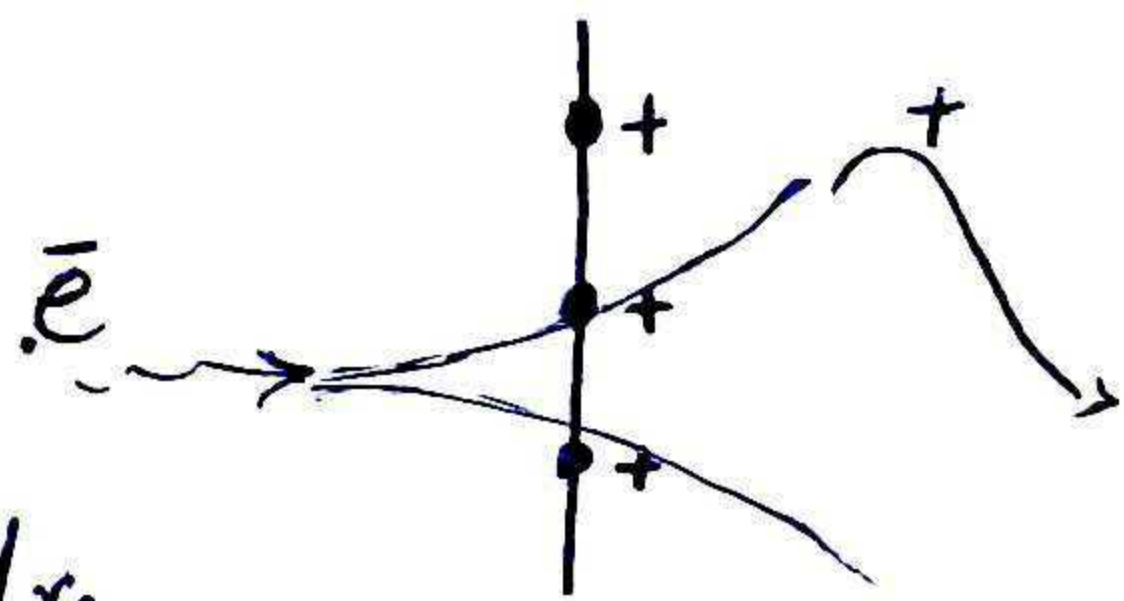
که جرم الکترون

* اکثر الکترون آزاد داخل بلور را در اثر میدان الکتریکی حرکت دهیم شباهت آن با شرایط مسای در خلا متفاوت است زیرا در داخل بلور غیر از میدان اعمال شده نیروهای دیگری هم به آن وارد می شوند که عبارتند از:

۱- پتانسیل پیروی یک بلور (ناشی از بارهای مثبت و الکترون ها)

۲- برخوردها (scattering) و انحرافات

۳- لرزش های شبکه بلوری ناشی از حرارت.



$$\frac{dv}{dt} = \sum \frac{dv_1}{dt} + \frac{dv_2}{dt} + \dots$$

* اگر همه عوامل بازدارنده و مانع حرکت در داخل بلور را به صورت اثری جرم جدید برای الکترون در نظر بگیریم که در شرایط فضای آزاد حرکت می کند و از نظر دقیق اعمال نیروی خارجی تفاوتی نداشته باشد به آن جرم جرم مؤثر گویند.

$$F = -q\epsilon \begin{cases} m_0 \frac{dv}{dt} & \text{فضای آزاد} \\ m_n^* \frac{dv}{dt} & \text{بلور} \end{cases}$$

* باید توجه داشت که بلورها مختلف هستند و اثرات متفاوت دارند بنابراین جرم مؤثر برای هر ماده ای به این ماده متفاوت است.

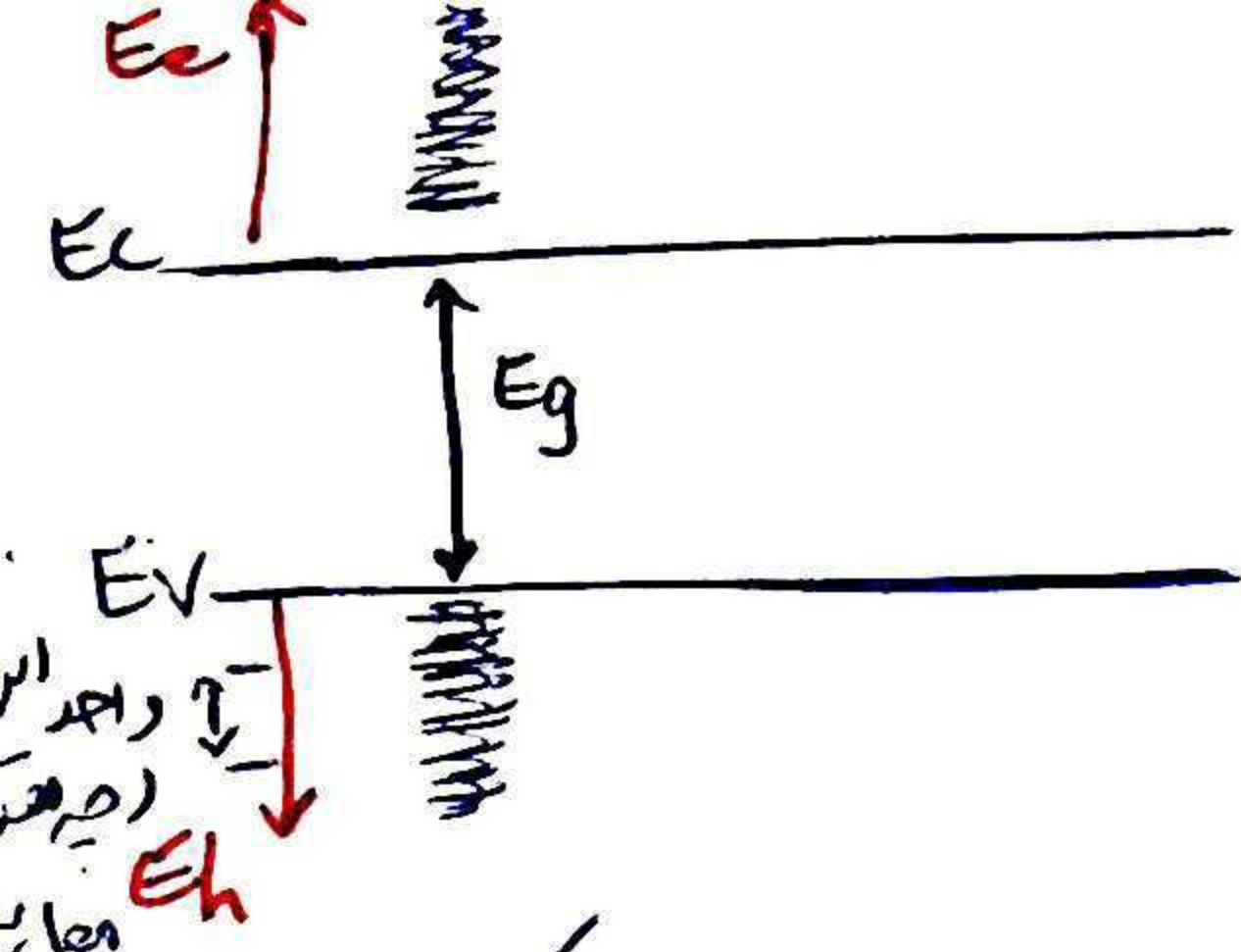
* جرم مؤثر برای الکترون و حفره جداگانه تعریف می شود و با هم متفاوت هستند.

	m_n^*/m_0	m_p^*/m_0
Si	۰.۲۱	۰.۵۹
Ge	۰.۲۵	۰.۳۷
GaAs	۰.۰۶۸	۰.۵۴

m_p^* جرم مؤثر حفره
 m_n^* جرم مؤثر الکترون

Density of state و چگالی حالت های انرژی

تغییر الکترون ها و حفره ها در نوار هدایت و ظرفیت با هم آرایش و توزیع قرار می گیرند

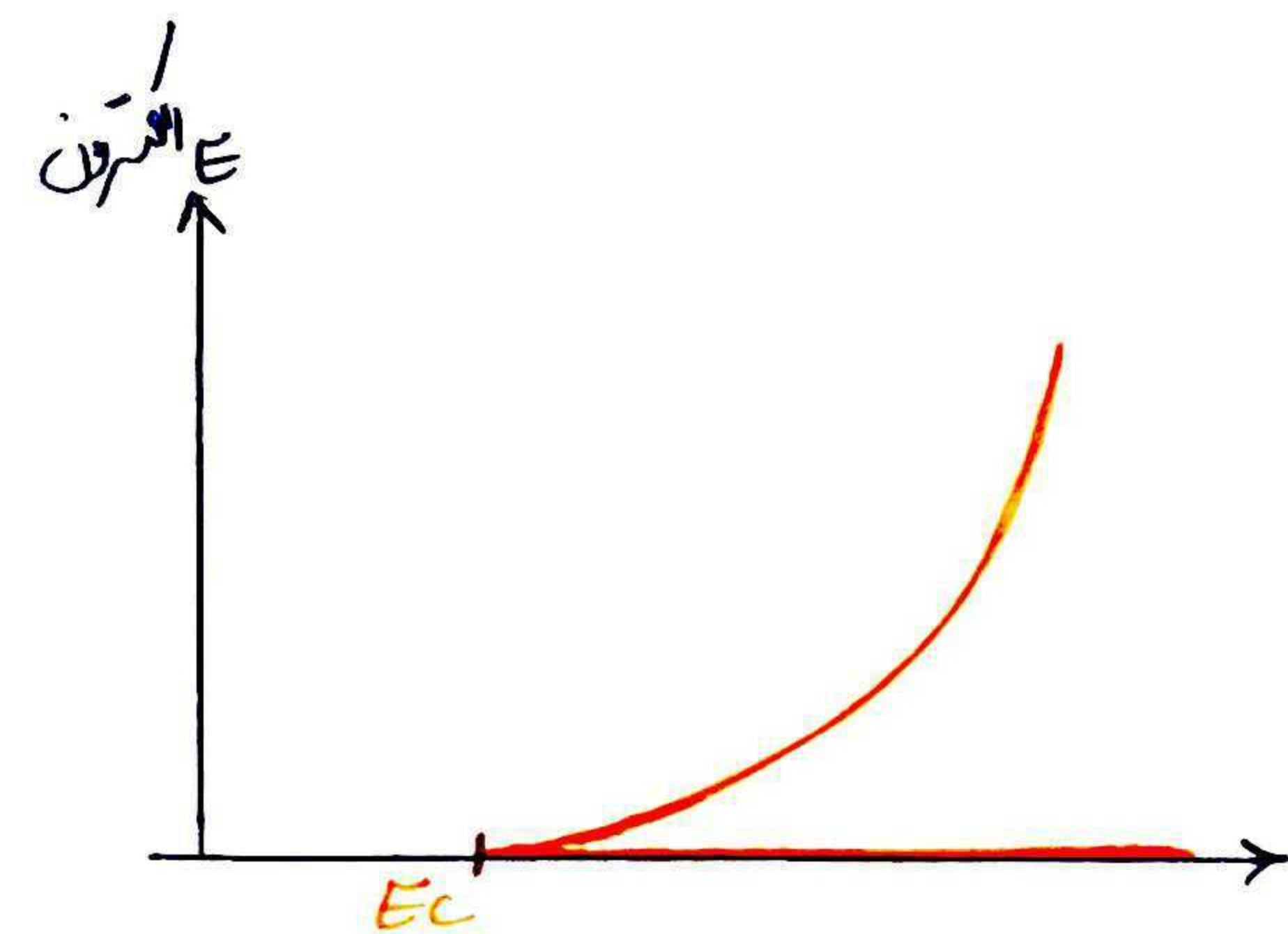
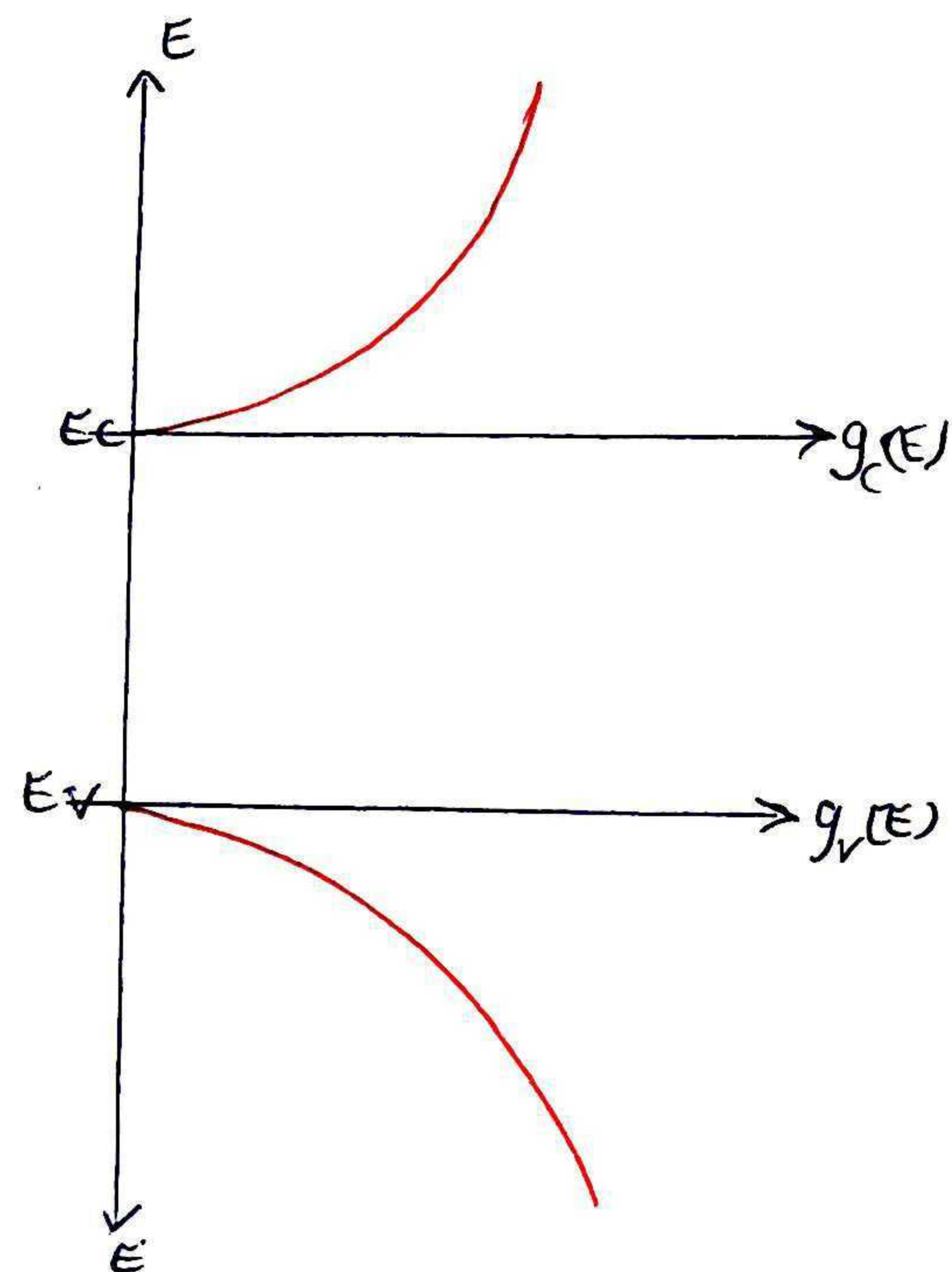


* تعداد حالت های (محل استقرار) از انرژی کم الکترون ها یا حفره ها می تواند در واحد انرژی داشته باشند را چگالی حالت های انرژی گویند. یا به عبارت دیگر در واحد انرژی چه تعداد الکترون می تواند در نوار هدایت قرار گیرند.

چگالی حالت های الکترون $g_c(E) = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^* (E - E_c)}}{\pi^2 \hbar^3}$

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ ، h ثابت پلانک

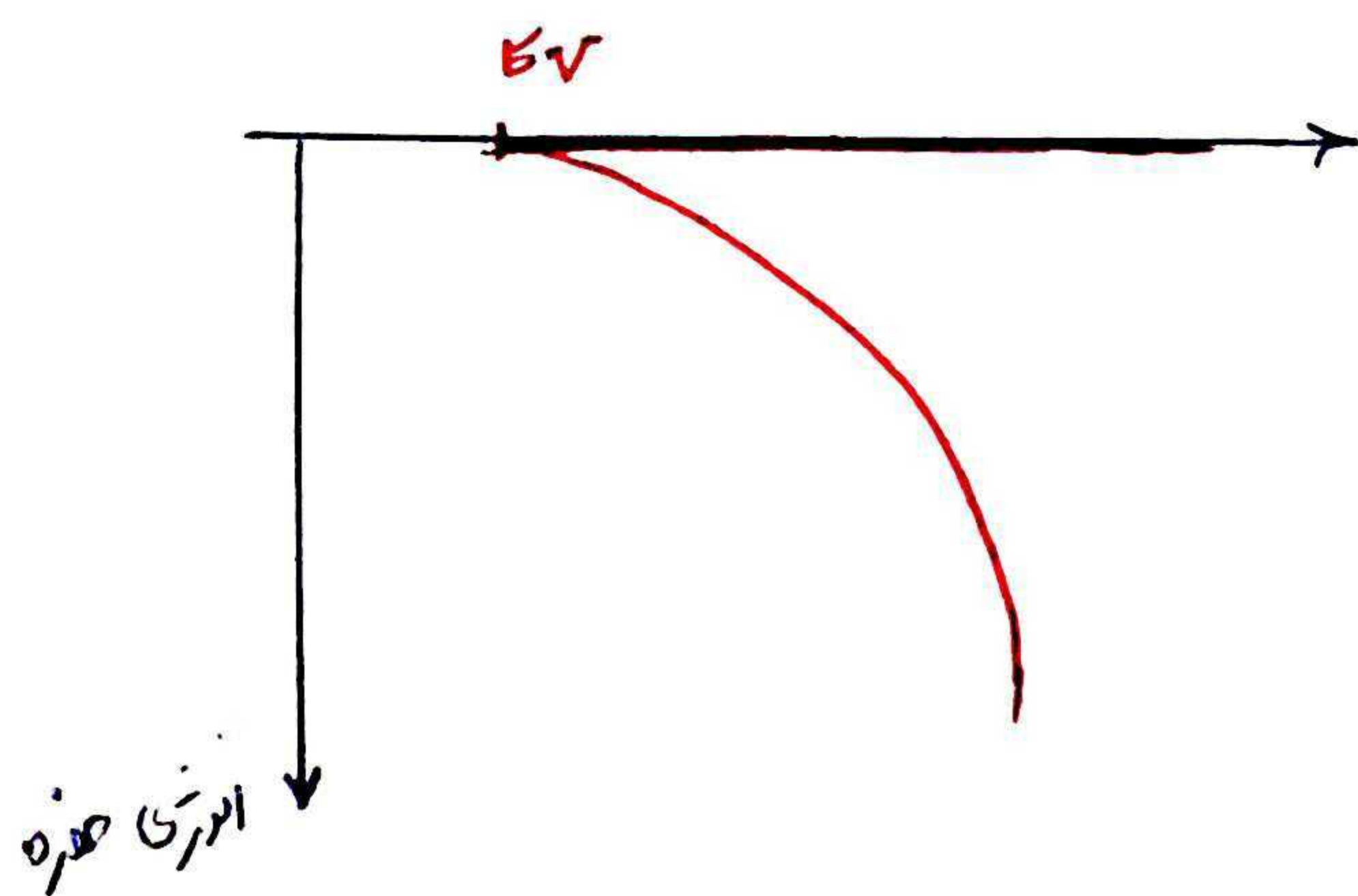
چگالی حالت های حفره $g_v(E) = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^* (E_v - E)}}{\pi^2 \hbar^3}$



$g_c(E) = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^* (E - E_c)}}{\pi^2 \hbar^3}$

$g_v(E) = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^* (E_v - E)}}{\pi^2 \hbar^3}$

$\hbar, \nu, \omega$



تابع احتمال فری $f(E)$

تعدادهای خالی برای الکترون $g_c(E)dE$

تعدادهای حفره $g_v(E)dE$

در انرژی E احتمال پر بودن آن را نشان میدهد.

$$\text{تعداد الکترون های مسقر در بین } E \text{ و } E+dE = f(E) g_c(E) dE$$

$E+dE$

احتمال پر بودن تراز E با حفره = احتمال خالی بودن آن تراز از الکترون

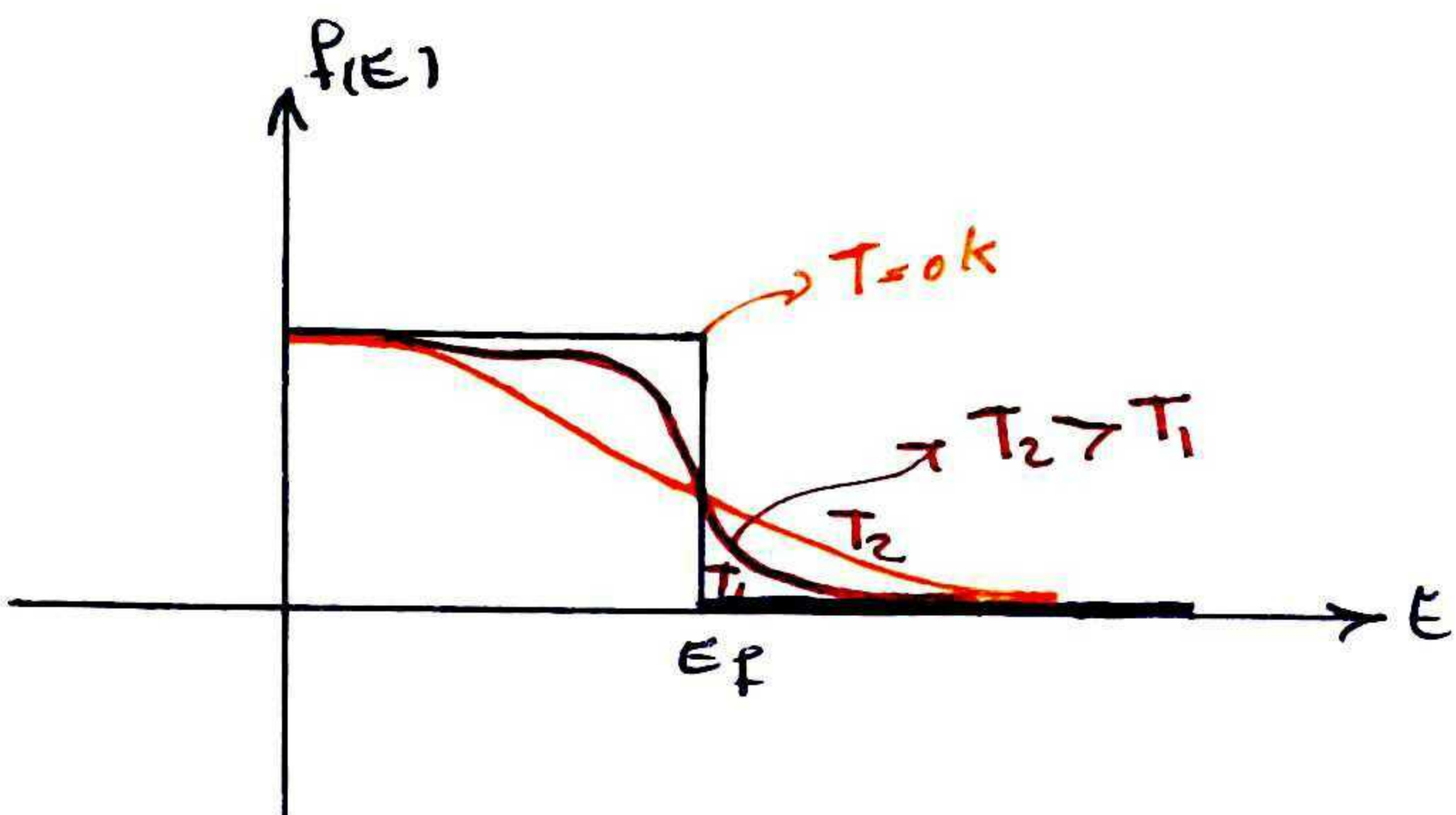
احتمال پر بودن تراز E با حفره $1 - f(E)$

$$dp = \text{تعداد حفره های بین } E \text{ و } E+dE = [1 - f(E)] g_v(E) dE$$

و $E+dE$

$$n = \int_{E_c}^{E_{top}} f(E) g_c(E) dE \quad \text{تعداد الکترون های آزاد در } cm^3$$

$$p = \int_{E_{bottom}}^{E_v} [1 - f(E)] g_v(E) dE = \text{تعداد حفره های آزاد در } cm^3$$



$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_f}{kT}}}$$

E_f : تراز انرژی فری

E_f : یک تراز انرژی تفرقی است که در دمای صفر مطلق همه ترازهای بالای آن خالی و همه ترازهای زیر آن پر هستند.

$$\frac{E - E_c}{kT} \rightarrow \eta, \quad dE \rightarrow kT d\eta$$

$$E - E_f \rightarrow \eta - \eta_f, \quad \eta_f = \frac{E_f - E_c}{kT}$$

$$n = \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^*} (kT)^{3/2}}{\pi^2 \hbar^3} \int_0^\infty \frac{\eta^{1/2}}{1 + e^{\eta - \eta_f}} d\eta$$

که انتگرال فری از مرتبه $\frac{1}{2}$

$$n = \int_{E_c}^{E_{top}} \frac{m_n^* \sqrt{2m_n^*}}{\pi^2 \hbar^3} \cdot \frac{\sqrt{E - E_c}}{1 + e^{\frac{E - E_f}{kT}}} dE$$

$$p = \frac{m_p^* \sqrt{2m_p^*}}{\pi^2 \hbar^3} (kT)^{3/2} \int_{-\infty}^0 \frac{\eta^{1/2}}{1 + e^{\eta - \eta_f}} d\eta$$

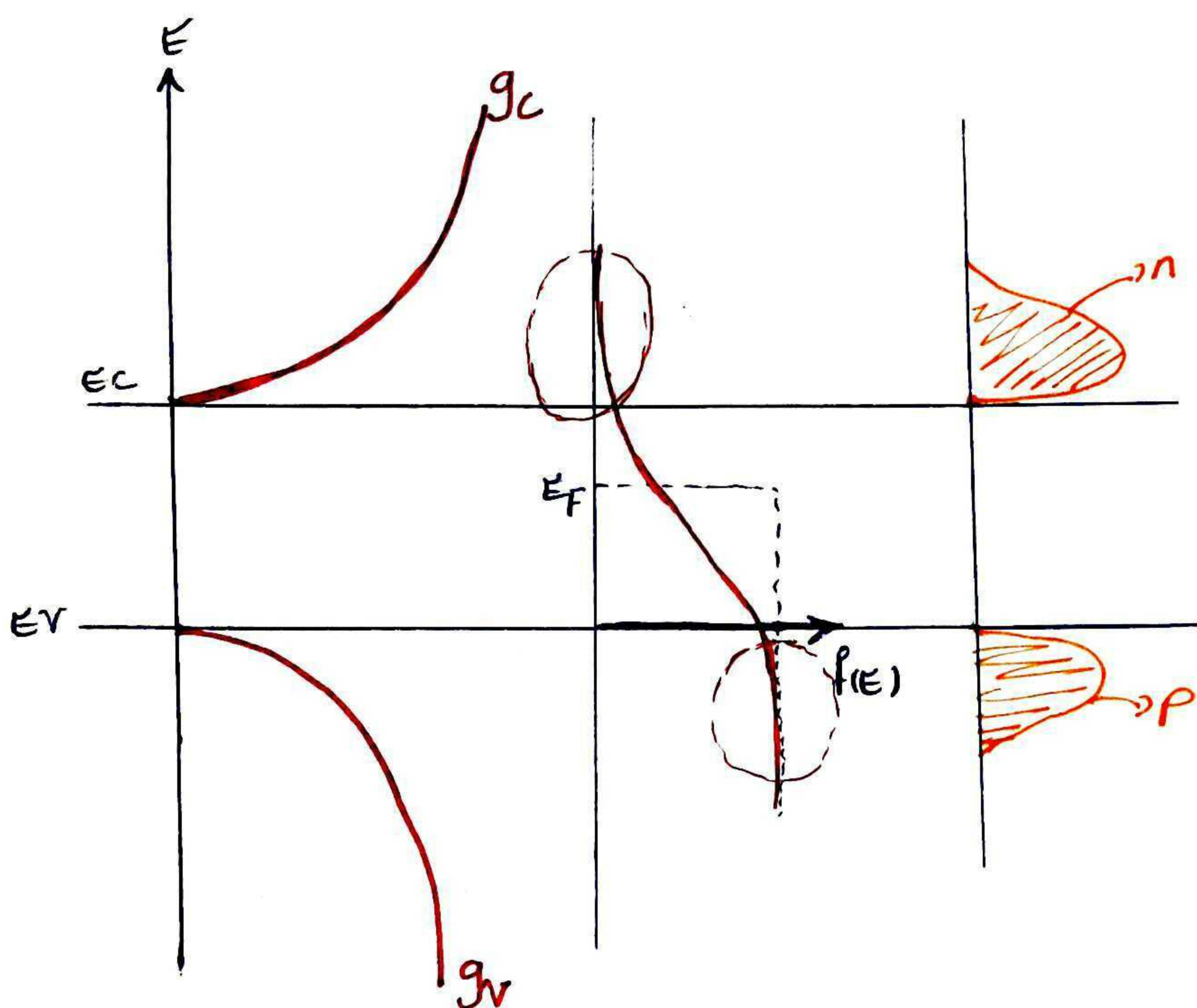
$$F_{1/2}(\eta_f) = \int_0^\infty \frac{\eta^{1/2}}{1 + e^{\eta - \eta_f}} d\eta \quad \text{انتگرال فری}$$

بحث دربارهٔ مدل تراز فری %

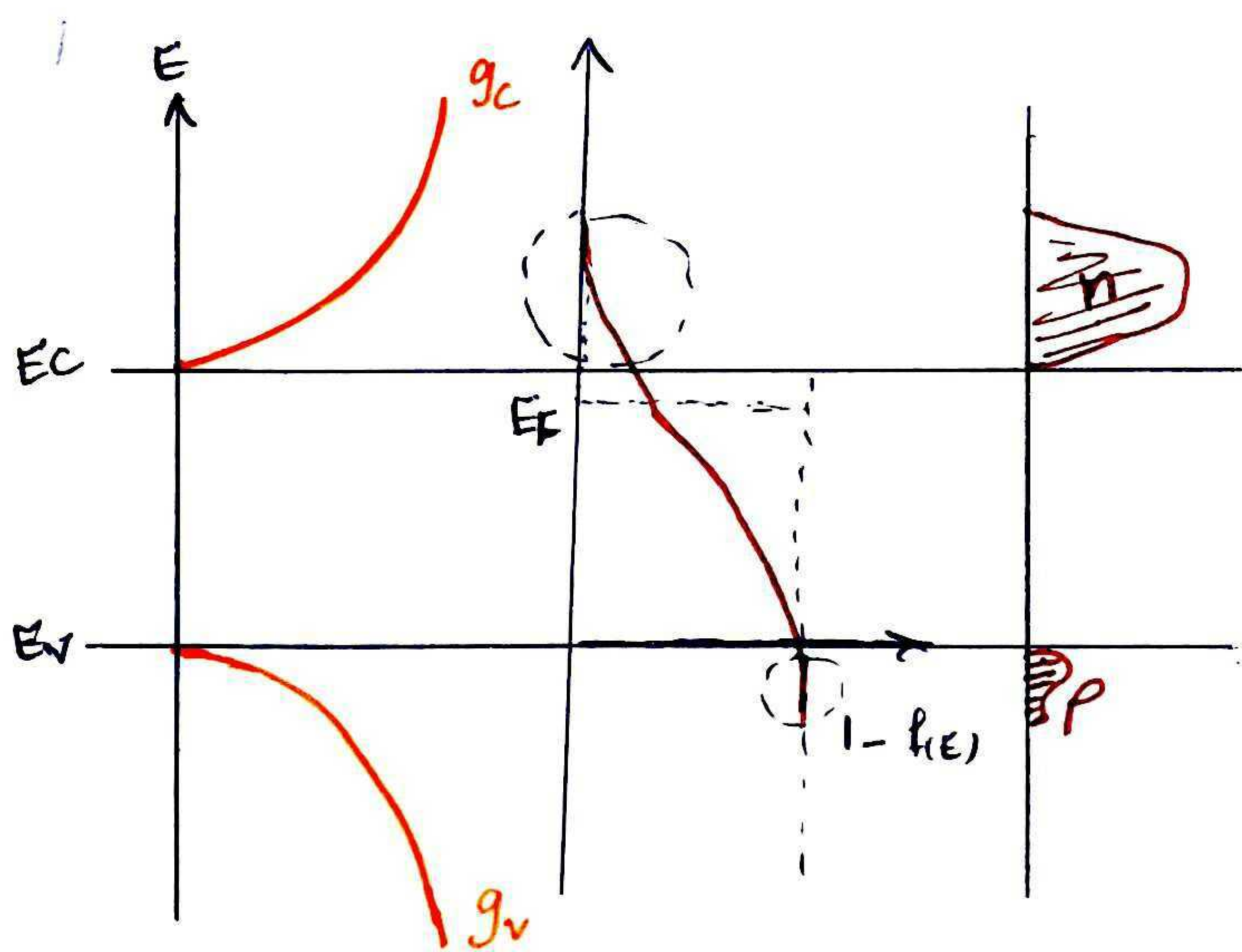
در ماده ذاتی مسدود $n = p$ پس در استیلا n و p هم باید مساوی باشند

$$dn = f(\epsilon) g_c(\epsilon) d\epsilon$$

$$dp = [1 - f(\epsilon)] g_v(\epsilon) d\epsilon$$



* در ذاتی $n = p$ پس E_F
باید حدوداً در وسط باشد یعنی باشد



ماده نوع n $n \gg p$ پس در ماده نوع n باید
 E_F بالاتر از وسط باشد و به E_F نزدیک باشد
که تعداد نزدیک بودن به مقدار n بسته دارد

شکل معکوس برعکس مالاتی
توی نمودار رسم کن خودت

حالت‌های مؤثر بازنهادی $N_C = \left(\frac{2m_n^* \pi kT}{h^2} \right)^{3/2}$

حالت‌های مؤثر بازنهادی $N_V = \left(\frac{2m_p^* \pi kT}{h^2} \right)^{3/2}$

$$n = N_C \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\eta_F)$$

$$p = N_V \frac{2}{\sqrt{\pi}} F_{1/2}(\eta_F')$$

$$\eta_F' = \frac{E_V - E_F}{kT}$$

$$\eta = \frac{E - E_C}{kT}$$

اگر $E_C - E_F \gg 3kT$ باشد می‌توان در انتگرال‌های تقریب زد

$$\eta_F = \frac{E_F - E_C}{kT}$$

$$\frac{1}{1 + e^{\eta - \eta_F}} \approx e^{-(\eta - \eta_F)}$$

$$\eta - \eta_F \gg 1$$

$$E_C - E_F \gg 3kT$$

$\Downarrow$

$$\int_0^\infty \frac{\eta^{1/2}}{1 + e^{\eta - \eta_F}} d\eta \approx \int_0^\infty \eta^{1/2} e^{-(\eta - \eta_F)} d\eta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} e^{\frac{E_F - E_C}{kT}}$$

$n = N_C e^{\frac{E_F - E_C}{kT}}$
$p = N_V e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}$

$E_C - E_F \gg 3kT$

$E_F - E_V \gg 3kT$

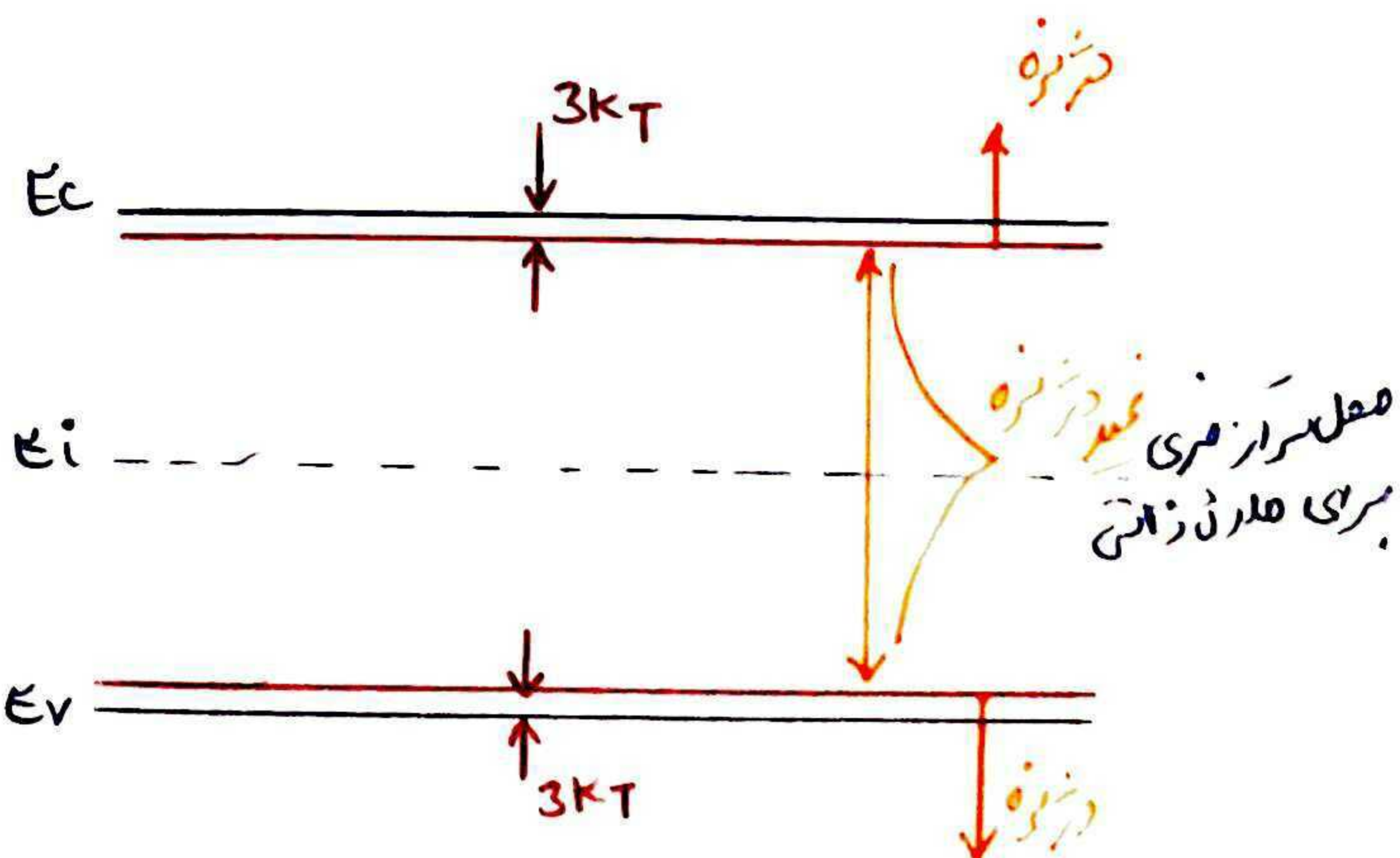
تجانسی (Degeneracy) اگر ناخالصی وارد شده به ماده آنقدر زیاد باشد که خواص آن را زیاد تغییر دهد در اصطلاح ماده را تجانسی گویند. در اینجا اگر ناخالصی آن قدر باشد که موجب شود برای نوع n ، $E_C - E_F < 3kT$ شود و برای نوع p ، $E_F - E_V < 3kT$ ماده را دژنره یا تجانسی گویند. $E_F - E_V < 3kT$ ماده را دژنره می‌نامند و این در این درس ذکر می‌شود بقیه نمی‌کنند

$$n = N_C e^{\frac{E_F - E_C}{kT}} \quad (1)$$

$$p = N_V e^{\frac{E_V - E_F}{kT}} \quad (2)$$

$$np = n_i^2 \rightarrow n_i^2 = N_C N_V e^{\frac{E_V - E_C}{kT}}$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

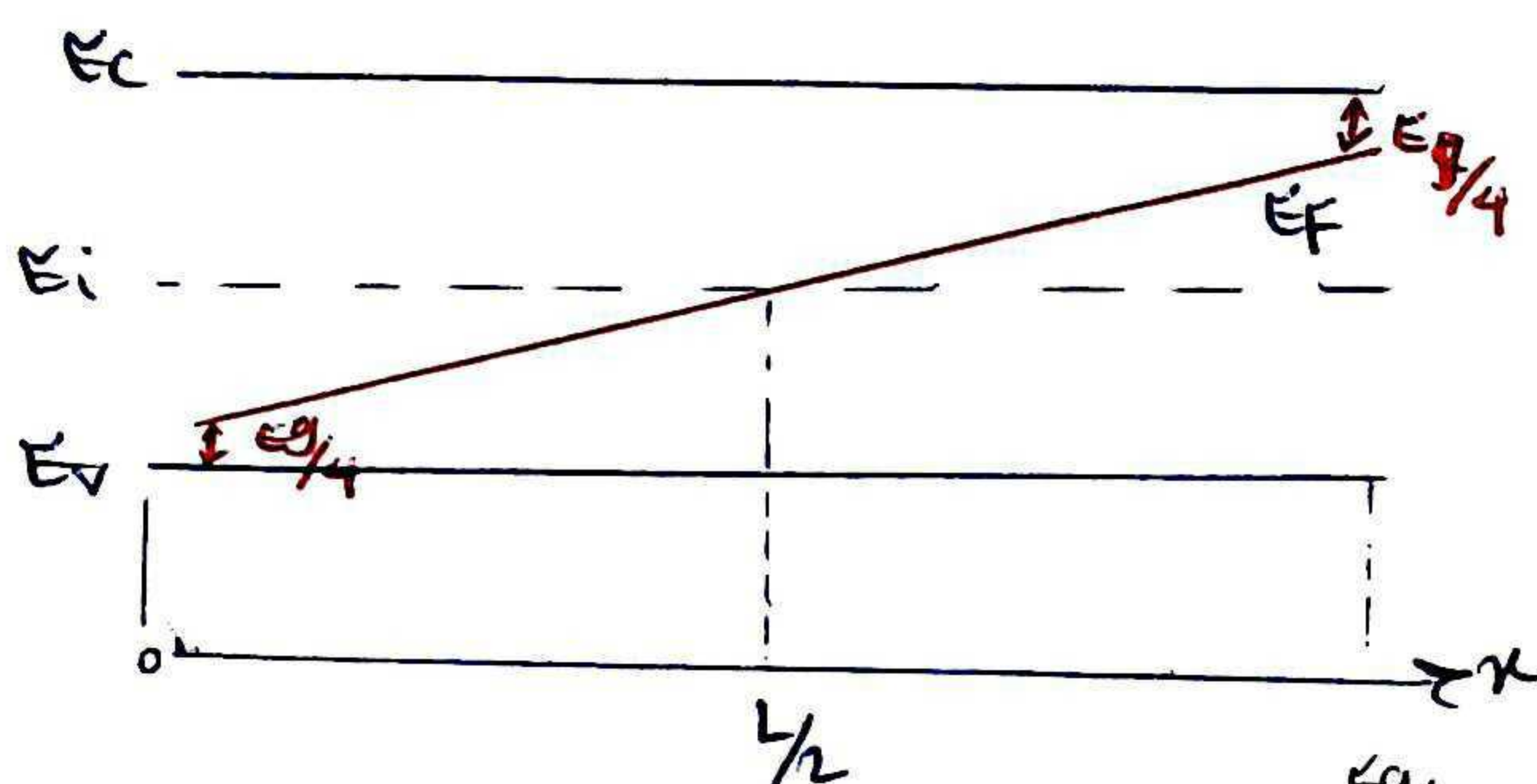


$$n_i = N_c e^{\frac{E_i - E_c}{kT}} \Rightarrow N_c = n_i e^{\frac{E_c - E_i}{kT}} \quad (*)$$

$$(*), (1) \Rightarrow n = n_i e^{\frac{E_c - E_i}{kT}} \cdot e^{\frac{E_f - E_c}{kT}}$$

$$n = n_i e^{\frac{E_f - E_i}{kT}}$$

$$p = n_i e^{\frac{E_i - E_f}{kT}}$$

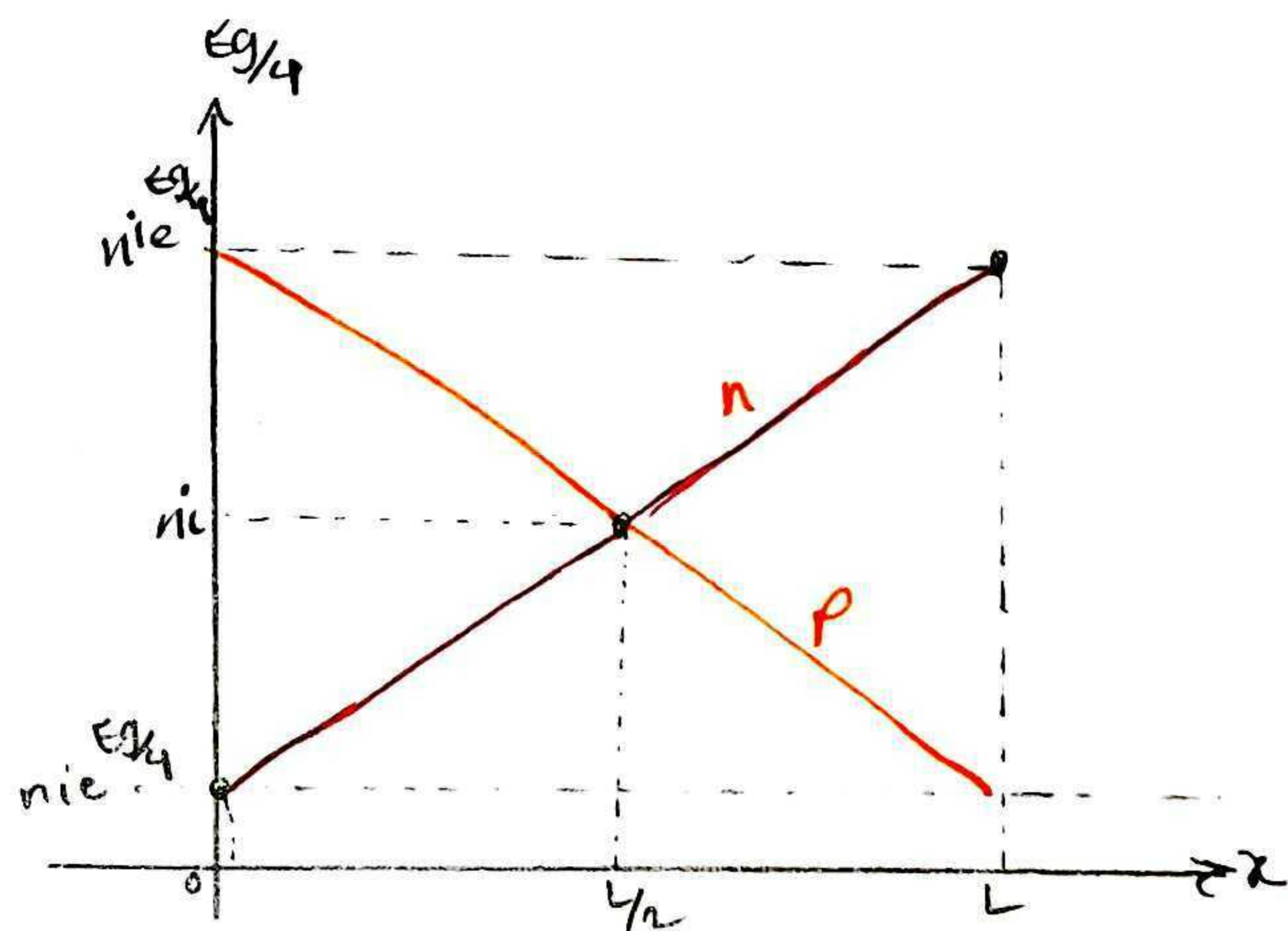


Exp: n و p را رسم کنید. (نکته)

$$x=0 \rightarrow n = n_i e^{E_g/4}$$

$$E_f - E_i = -E_g/4$$

$$x=L \rightarrow E_f - E_i = E_g/4$$



$$n, p, N_A^-, N_D^+$$

محاسبه بار 8 در حالت تعادل مقدار بار داخل p نیم رسانا صفر است

$$q(-n + p - N_A^- + N_D^+) = 0$$

در دمای اتاق p ناخالصی ها

یونیزه می شوند $N_D^+ = N_D$

$$\begin{cases} p - n + N_D - N_A = 0 \\ p_n = n_i^2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{n_i^2}{n} - n + N_D - N_A = 0$$

$$n^2 - (N_D - N_A)n - n_i^2 = 0$$

n و $N_D > N_A$

$$n = \frac{N_D - N_A + \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n}$$

$N_A > N_D$ و p

$$p = \frac{N_A - N_D + \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

$$n = \frac{n_i^2}{p}$$

$$N_A - N_D \gg n_i$$

$$N_A \cdot N_D \gg n_i^2$$
 معمولاً

$$N_D - N_A \gg n_i$$

$$n \text{ نوع } : \begin{cases} n = N_D - N_A \\ p = \frac{n_i^2}{n} \end{cases}$$

$$p \text{ نوع } : \begin{cases} p = N_A - N_D \\ n = \frac{n_i^2}{p} \end{cases}$$

$$n \text{ نوع } : \begin{cases} n = N_D \\ p = \frac{n_i^2}{N_D} \end{cases}$$

معمولاً اکثر در نوع n فقط N_D باشد در نوع p فقط N_A

$$\perp N_D \gg N_A$$

$$p \text{ نوع } : \begin{cases} p = N_A \\ n = \frac{n_i^2}{N_A} \end{cases}$$

$$\perp N_A \gg N_D$$

محل دقیق تر از فری :
نوع ذاتی :

$$p = n \rightarrow \frac{N_V e^{\frac{E_V - E_F}{K_T}}}{N_C e^{\frac{E_F - E_C}{K_T}}} = N_C e^{\frac{E_F - E_C}{K_T}}$$

$$\frac{E_V - E_F}{K_T} = \frac{E_F - E_C}{K_T} + \log \frac{N_C}{N_V}$$

$$E_F = \frac{E_V + E_C}{2} - K_T \log \left(\frac{N_C}{N_V} \right) = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{K_T}{2} \log \left(\frac{N_V}{N_C} \right)$$

$$\frac{N_V}{N_C} = \frac{(m_p^*)^{\frac{3}{2}}}{(m_n^*)^{\frac{3}{2}}} = \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)^{\frac{3}{2}}$$

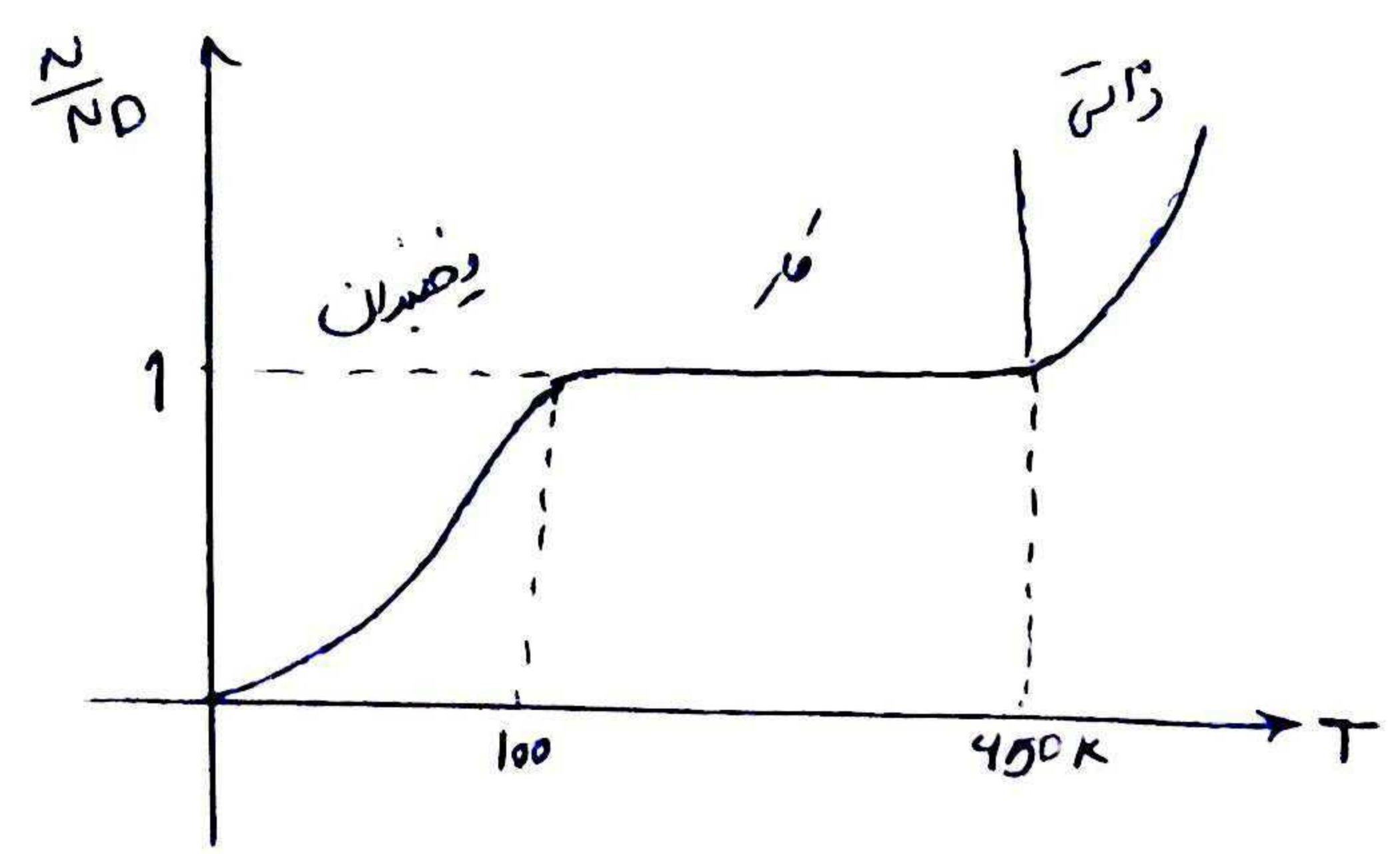
$$E_i = E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3}{4} K_T \log \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right)$$

$$n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{K_T}} = N_D \leftarrow n \text{ نوع}$$

$$\frac{E_F - E_i}{K_T} = \log \frac{n}{n_i} = \log \frac{N_D}{n_i}$$

$$E_F = E_i + K_T \log \frac{N_D}{n_i}$$

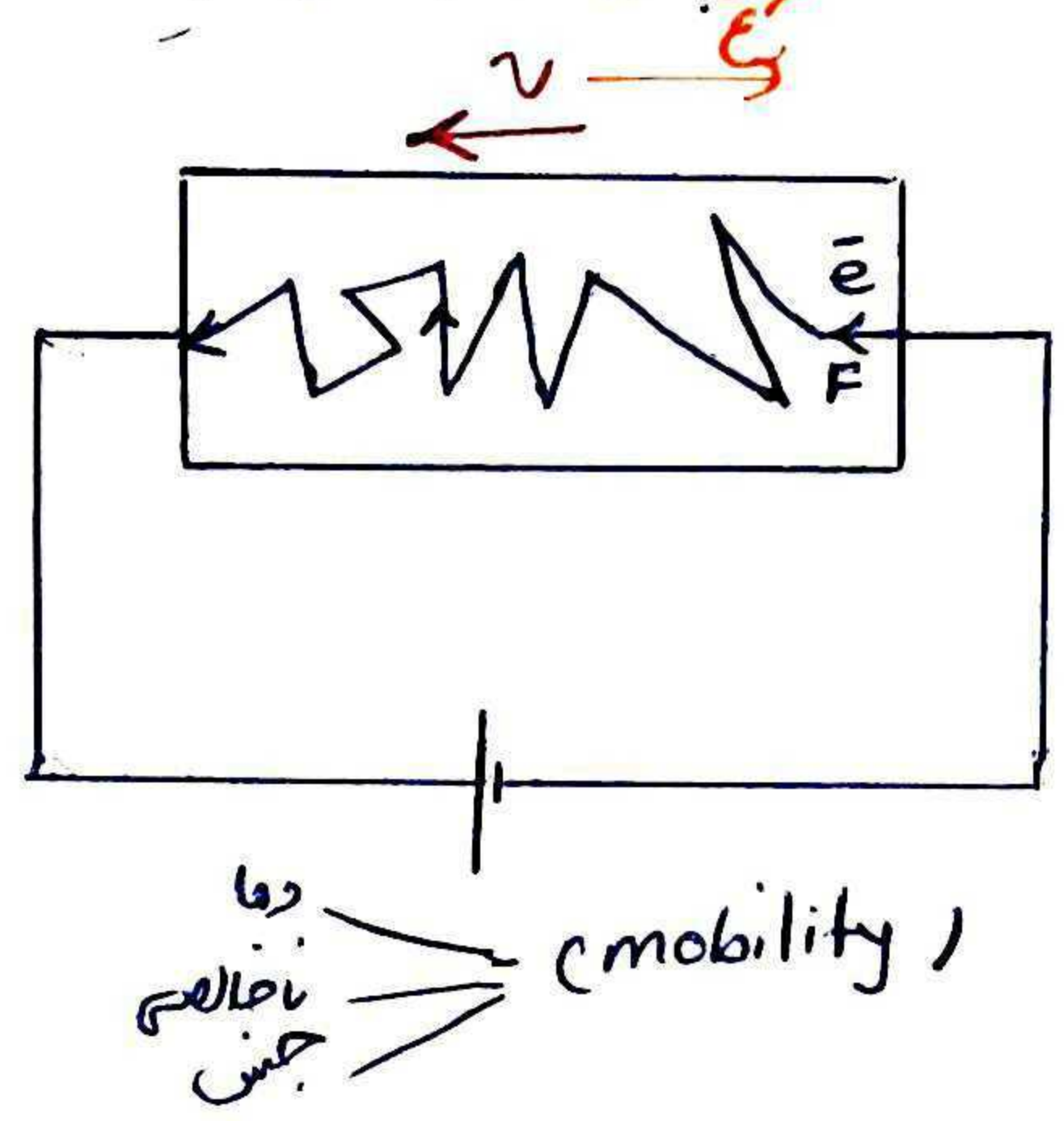
$$E_F = E_i - K_T \log \frac{N_A}{n_i} \leftarrow p \text{ نوع}$$



- در مدار حامل ها 8
- ۱- راش
 - ۲- نفوذ
 - ۳- تولید و بازترکیب

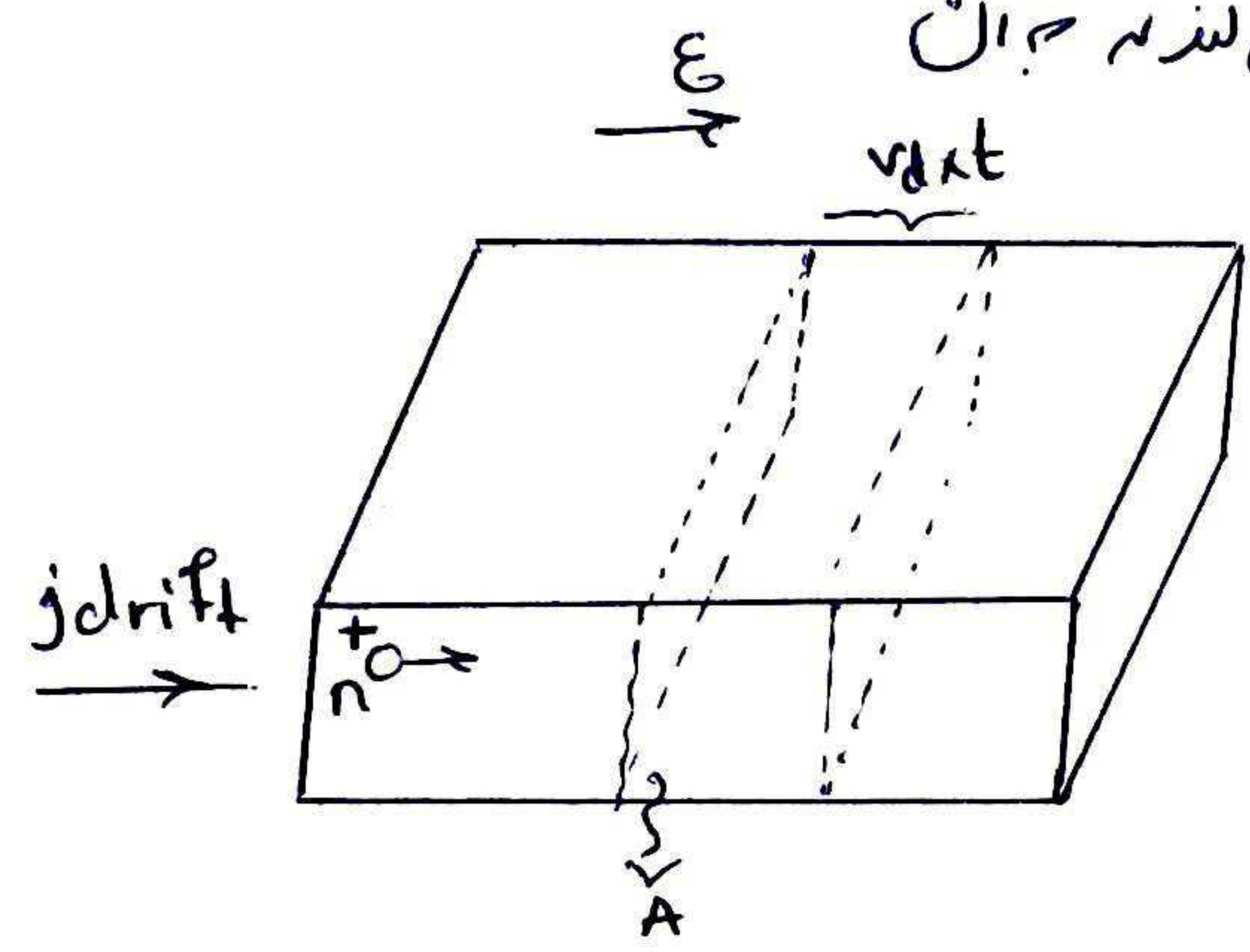
راش Drift :

اگر باری در میدان الکتریکی قرار گیرد چنان شود که در صورت آزاد بودن نتایج می شود.



میدان الکتریکی $v = E$ که ضرب تعدیل پذیری

پس با اعمال میدان جریان الکتریکی از نیم رسانا عبور می کند که چنان جریان ، جریان راش می گویند.



مقدار باری که در واحد زمان از یک مقطع می گذرد $I =$ جریان الکتریکی

در زمان t مسافتی که توسط حفره می شود : $v_d t$
 حجمی که در زمان t نقل مکان می کند : $v_d t \times A$
 از بارها

تعداد حامل های ~~حفره~~ حفره که در زمان t از مقطع A عبور می کنند = $\frac{v_d t A \times p}{\text{حجم}}$ حجم حالی

مقدار باری که در زمان t از مقطع A عبور $q v_d t A p =$ می کند.

مقدار باری که در واحد زمان از مقطع A عبور می کنند $q p \mu_p E A =$

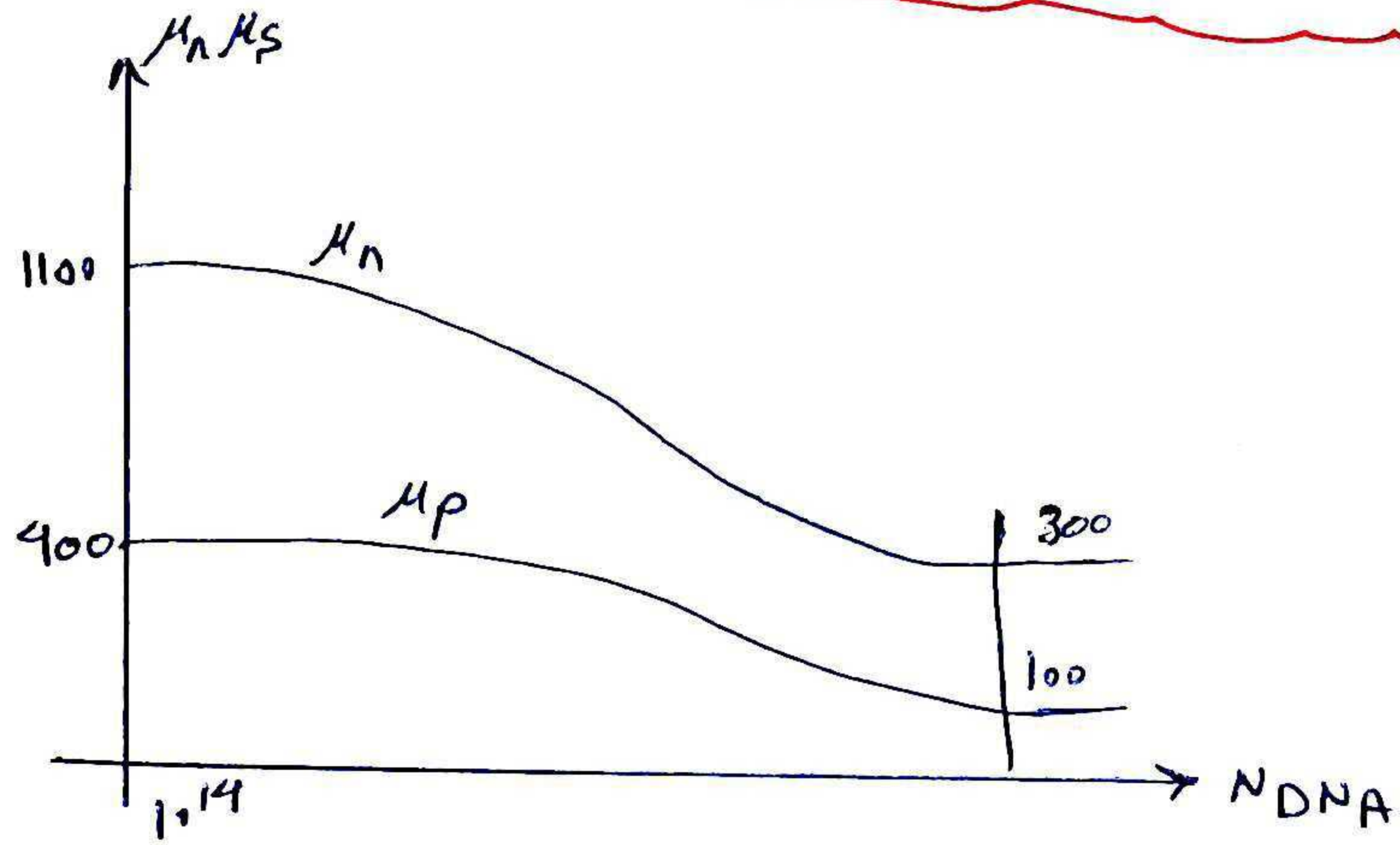
حالی جریان راش حفره $J_{p drift} = q p \mu_p E$

برای الکترون ها $J_{n drift} = q n \mu_n E$

$$J_{drift} = J_{drift} + J_{ndrift}$$

$$J_{drift} = q \mu_p p E + q \mu_n n E$$

$$J_{drift} = q (\mu_n n + \mu_p p) \vec{E}$$



μ_p سرعة تحريك الثقوب
 μ_n سرعة تحريك الإلكترونات