

آیا می‌دانستید با عضویت در سایت جزوه بان می‌توانید به صورت رایگان جزوات و نمونه

سوالات دانشگاهی را دانلود کنید؟؟

فقط کافیست روی لینک زیر ضربه بزنید



[ورود به سایت جزوه بان](#)

Jozveban.ir

telegram.me/jozveban

sapp.ir/sopnuu

جزوات و نمونه سوالات پیام نور



@sopnuu
jozveban.ir

بسم الله الرحمن الرحيم

فیزیک الکترونیکی

دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب

استاد حسینی جوبه

تهیه کننده: حامد مظاهری

Hamed.mazaheri@gmail.com

شما نیز می توانید مطالب و مقالات خود را برای ما ارسال کنید تا با نام خودتان در سایت قرار داده شود تا دیگر دوستان نیز از آن بهره ببرند.

عنوان درس فیزیک الکترونیک

تئوری باند‌ها و نیمه‌هادیها (فصل ۱۳)	{	میان‌ترم ۲
بیوند pn (فصل ۵)		
ترانزیستور BJT (فصل ۷)		
ترانزیستور FET (فصل ۸)		
بیوند فلز-نیمه‌هادی (فصل ۱۱)		

مترجم: دکتر حسین بن

کتاب فیزیک الکترونیک

منابع:

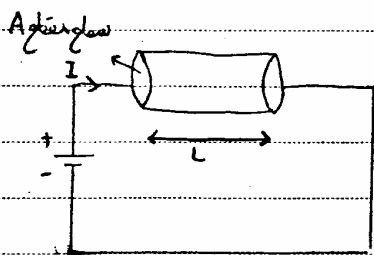
solidstate Electronic

Devices Electronic and Technology

نویسنده: B. Streetman

یادآوری:

مقاومت مخصوص (resistivity) ρ



$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{V}{I}$$

$$\rho = R \frac{A}{L}$$

دست بندی اجسام از نظر مقدار مقاومتی که در برابر جریان الکتریکی از خود نشان می دهند

(1) رسانا (Conductor) $\rho < 10^{-2} \Omega \text{cm}$

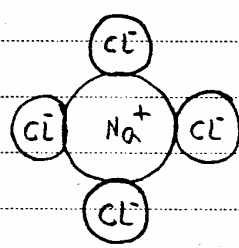
(2) عایق (Insulator) $\rho > 10^8 \Omega \text{cm}$: هدایت بسیار ناچیزی دارد

(3) نیمه هادی (Semiconductor) : هدایت الکتریکی که با افزایش دما قابل تنظیم می باشد از نظر عایق تا هادی تنظیم می شود

(Bonding)

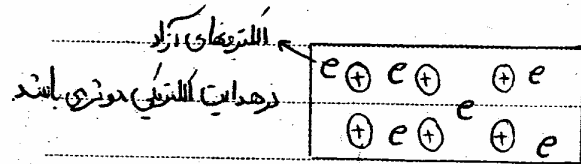
از نظر نوع پیوند در اجزای:

(1) پیوند یونی: ناشی از جاذبه شدید بین یونهای مثبت و منفی می باشد و هیچ الکترون کراری ندارد. پس عایق است. (Ionic)

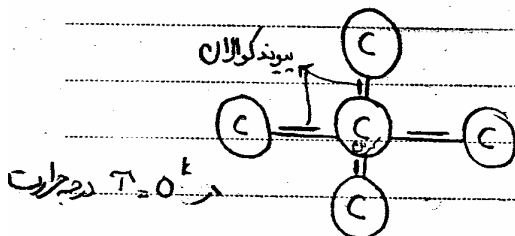


(آرایش الکترونی)
NaCl

(۲) پیوند فلزی: در فلزات کلاسه آخر جدول تناوبی ۳ الکترون آزاد که بر روی انرژی کم قرار دارند (Metallic Banding)



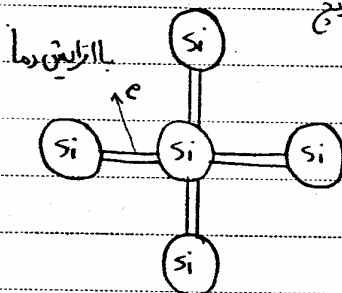
لوحهای مثبت فلز که هیچ نقشی در هدایت الکترونی ندارند چون در جای خود ثابت هستند.



لباس:

(Covalent Bonding)

بسیار دگر هستند و اگر در دست دو تمام الکترونهای کووالان هستند و هیچ



با ارایش دما یا تابش نور می توان پیوند را شکست و الکترون آزاد کرد.

تک عنصری (Element): فقط از یک نوع اتم تشکیل شده مثل: Ge, Si

تک اتمی ها

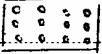
مکرب (Compound): ترکیبی از اتمهای مختلف مثل: GaAs, GaP, GaSb, AlAs, AlP, InSb

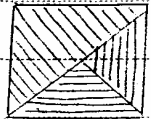
ترکیبی از اتمهای مختلف مثل: ZnSe, ZnS, CdS, CdSe

درخشش نور (صفت لایه تصویر)

از نظر آرایش اتمی درون جامدات :

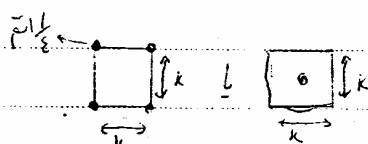
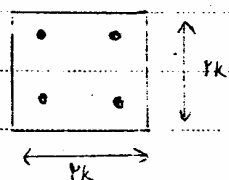
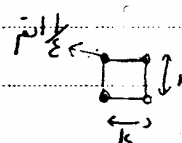
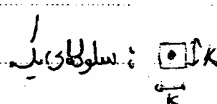
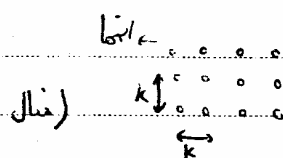
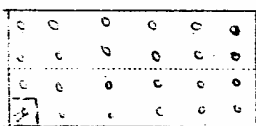
۱) جامدات بی شکل (Amorph) : اینها فاقد ساختار تکراری می باشند و هیچگونه نظم مداری در موقعیت اتمها وجود ندارد 

۲) جامدات بلوری (periodic structure) : آرایش خاصی از اتمها در تمام جامد بلوری وجود دارد 

۳) جامد چند بلوری (polycrystal) : از نظر مقدار، از تعداد زیادی ناحیه کوچک تک بلوری تشکیل شده 

شبکه : به آرایش متناوب اتمی در بلور گفته می شود (lattice)

سلول یک (واحد) : مشخص کننده شکل کلی شبکه است که الی بطور منظم در کنار هم قرار می گیرند شبکه واحد می شود (unit cell)



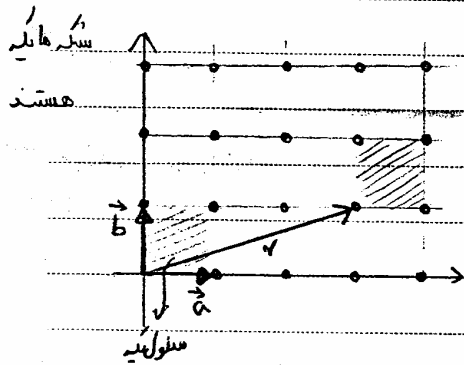
براهای پایه: (Basis Vector):

$\vec{a}$ و $\vec{b}$ و $\vec{c}$

از سلول یک توسط مضارب صحیح این بردارها منتقل شوند سلول یک جدیدی نسبت به سلول اصلی بدست می آید.

$$\vec{r} = p\vec{a} + q\vec{b} + s\vec{c}$$

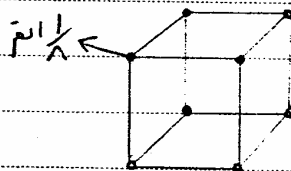
مثال: حاصل جمع انتقال سلول یک تحت بردار $\vec{r} = 3\vec{a} + 2\vec{b}$



نسبت های اتمی: ساده ترین نسبت به تعداد سلول یک یک حجم اتمی است.

انواع نسبت اتمی:

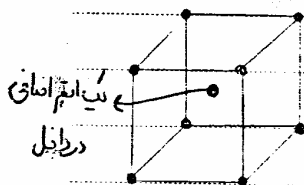
۱) اتمی ساده SC (Simple cubic):



$$a \times a \times a = 1 \text{ اتم}$$

در سلول یک SC

۲) اتمی بدنه مرکزی BCC (Body centered cubic):



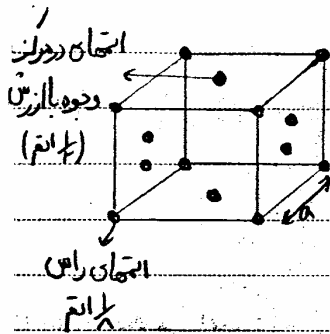
$$1 + 8 \times \frac{1}{8} = 2 \text{ اتم}$$

در سلول یک BCC

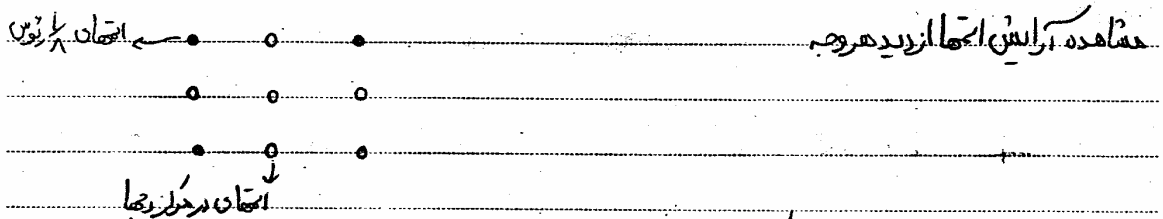
P4PCO

۵

۳) ملعی وجه مرکزدار PCC (Face centered cubic):

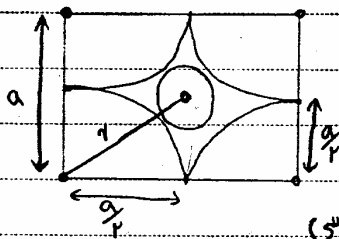


$$۶ \times \frac{1}{۲} + ۸ \times \frac{1}{۸} = ۴ \quad \text{اتم در سلول PCC}$$



نایب سبک (۵): اندازه بعد سلول به ملعی

مثال: اگر فرض کنید تمام اتمها با هم میانی باشند (در PCC) حیدر بعد از فضای PCC توسط اتمها اشغال می شود.



$$\sqrt{\left(\frac{a}{۲}\right)^2 + \left(\frac{a}{۲}\right)^2} = \sqrt{\frac{۲}{۲}} a$$

$$r = \frac{\sqrt{۲}}{۴} a$$

$$\text{حجم اتم: } \text{حجم اتم} = \frac{۴}{۳} \pi r^3 = \frac{\pi a^3 \sqrt{۲}}{۲۴}$$

$$\text{درصد اشغال شده توسط اتم در سلول} = \frac{\text{حجم اتم} \times ۴ \text{ اتم در سلول PCC}}{\text{حجم PCC مکعب} a^3} = \frac{\pi \sqrt{۲}}{۶} = ۷۴\%$$

P4PCO

۴

صفحه ها:

صفحه ها در شبدهای بلوری دارای یک و هرحف با شاخص های میلر (Miller) نمایش می شود.
Indices

صفحه را با (hkl) نشان می دهند

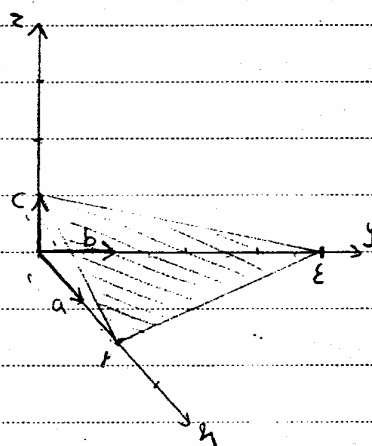
نحوه تعیین شاخص های میلر:

۱. تعیین اعداد نقطه برخورد صفحه با محورهای بلور

۲. معکوس کردن اعداد فوق

۳. ضریب کوچک مشترک آنها

(مثال)



$\vec{a}$	$\vec{b}$	$\vec{c}$
2	4	1

حال معکوس:

$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	1
---------------	---------------	---

ضریب کوچک مشترک

2	1	4
---	---	---

$(hkl) \rightarrow (2 \ 1 \ 4)$

* صفحات مولاری شاخص های بلوری دارند.

$\frac{1}{\infty} = 0$

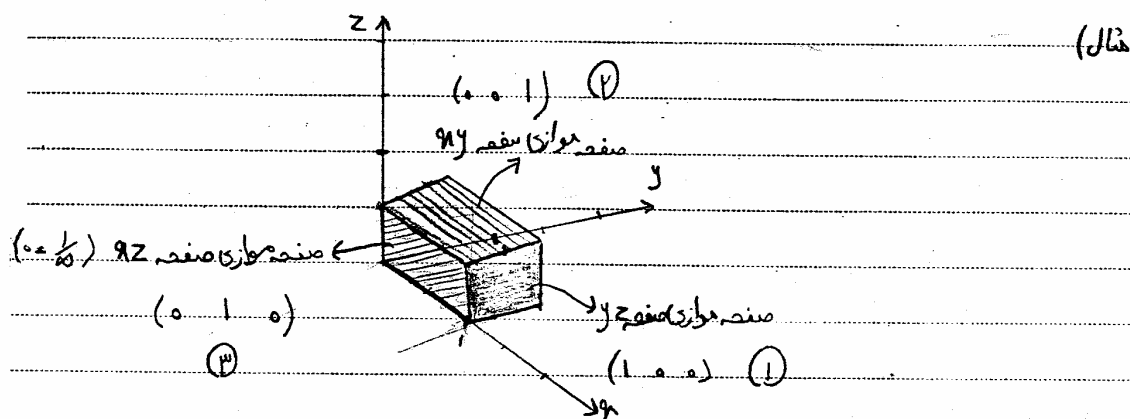
• صفحه‌ای که با نیمی از محورهای موازی باشد شش‌ضلعی مربوط به صفحه‌ای شود.

• اگر صفحه‌ای در آن بریده‌ای از محورهای موازی باشد شش‌ضلعی مربوط به آن صفحه‌ای شود.

• اگر صفحه‌ای از مبدأ عبور کند شش‌ضلعی که به صفحه‌ای متوازی با آن منتقل می‌شود.

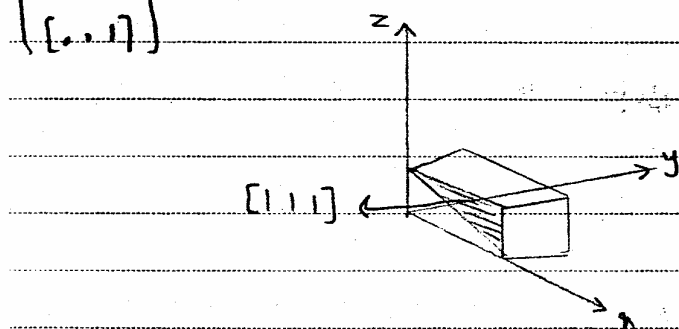
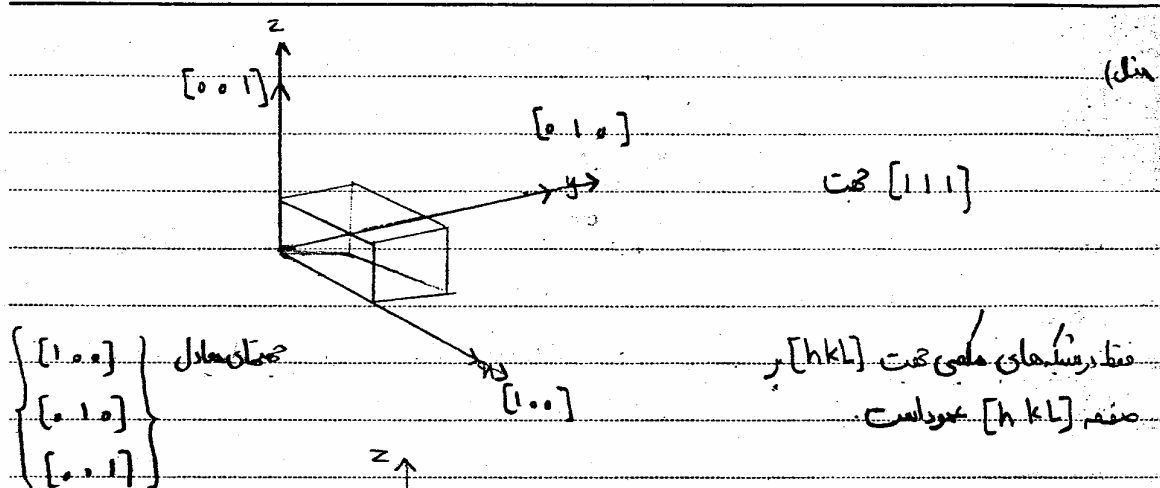
• اگر نیمی از نقاط بر خورد روی مساحت صفحه‌ای محور باشد پس باید علامت صفحه‌ای روی شش‌ضلعی قرار می‌گیرد.

(مثال) $(2 \ 1 \ 2)$



بقیه صفحات موازی این صفحات هستند پس نسبت به این است

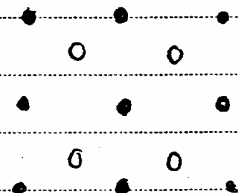
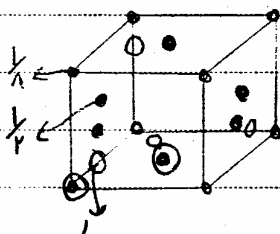
$\left. \begin{matrix} ① \\ ② \\ ③ \end{matrix} \right\} \text{ صفحات عمادی}$
 (چون دو وجه انتخاب کرده‌ایم ضرورتی نیست) $\Rightarrow$ با این تعداد $\{$ نشان می‌دهد



شبکه الماس

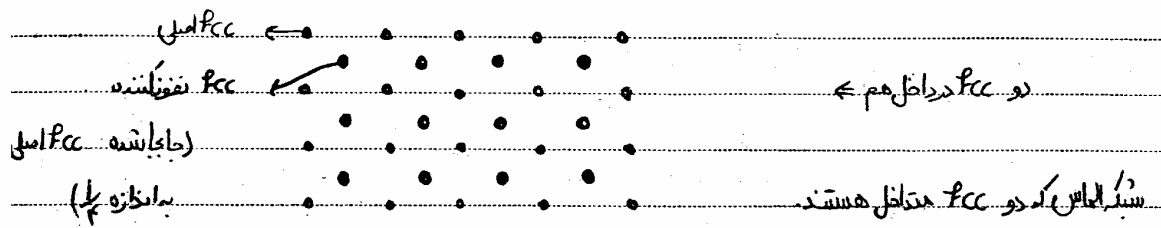
همان شبکه FCC، چهار اتم اضافی در داخل سلول نیز آکن در فواصل $\frac{a}{4} + \frac{b}{4} + \frac{c}{4}$ قرار گرفته است.

۴ اتم درون مکعب قرار دارند



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

در سلول یک شبکه الماسی



Si و Ge ساختارهای دارند که هر اتم با ۴ اتم کناری پیوند کووالان برقرار می‌کند.

نسبت سولفید روی: (Zinc, Biendi): نیمه هادی GaAs دارای شبکه سولفید روی است که همان نسبت دو FCC متداخل الهامی است.

FCC اصلی مربوط به Ga و FCC نفوذی مربوط به As

مثال) مقدار خیالی $(\frac{g}{cm^3})$ نیمه هادی زیر بدست آورید.

فرمولیات: وزن اتمی Si: $28.1 \frac{g}{mol}$

عدد آووگادرو: $6.022 \times 10^{23} \frac{atoms}{mole}$

Si ثابت شبکه در طول یک $a: 0.357 \times 10^{-8} cm$

$$\frac{۸ اتم در هر سلول}{۸ اتم در هر سلول} = \frac{۸}{(0.357 \times 10^{-8})^3} = 5 \times 10^{22} \frac{atom}{cm^3}$$

$$\frac{g}{cm^3} \text{ خیالی} = \frac{5 \times 10^{22} \frac{atoms}{cm^3} \times 28.1 \frac{g}{mol}}{6.022 \times 10^{23} \frac{atoms}{mol}} = 2.33 \frac{g}{cm^3}$$

①

در مورد GaAs: $a = 5.105 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ثابت شبکه در طول یک GaAs

Ga: ۶۹,۷ $\frac{\text{g}}{\text{mole}}$ و به این

As: ۷۴,۹ $\frac{\text{g}}{\text{mole}}$

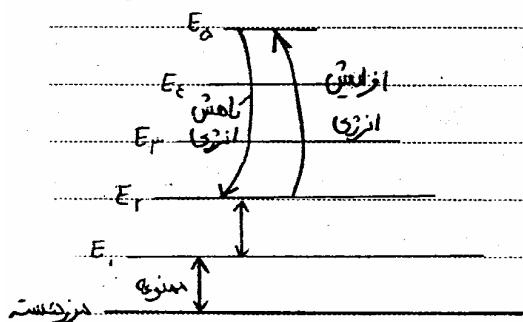
$$\frac{\text{اتم در هر سلول}}{\text{حجم سلول}} = \frac{4}{(5.105 \times 10^{-8})^3} = 2.22 \times 10^{22} \frac{\text{atoms}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{GaAs چگالی} = \frac{2.22 \times 10^{22} \frac{\text{atoms}}{\text{cm}^3} \times (74.9 + 69.7) \frac{\text{g}}{\text{mole}}}{6.02 \times 10^{23} \left(\frac{\text{atoms}}{\text{mole}} \right)}$$

۵.۶۲۲

حله دوم

باند های (نوار) انرژی (Energy Bands):



اگر یک اتم به طور مجزا در نظر گرفته با افزایش انرژی الکترون ها

فقط بعضی از سطوح انرژی را فعال می کند یعنی هر چه دورتر

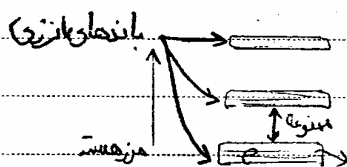
می شود انرژی بیشتری شود.

$$E_d - E_f = \eta V \rightarrow \text{تافت بلات}$$

$$\eta = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}$$

در عمل اتم مجزا وجود ندارد

هنگامی که مقدار زیادی اتم در کنار هم قرار گیرند الکترون ها تحت تأثیر پاهای مشترک و منی مختلفی قرار دارند



در عمل به این صورت می شود

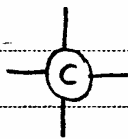
در این حالت می توان گفت

الکترون ها انرژی می گیرند

۵.۶۶۶

(۱۱)

مثال) اتم کربن C دارای ساختار الکترونی مانند $1s^2 2s^2 2p^2$ می باشد.



در $1s$ دو حالت قرار گرفتن الکترون

در $2s$ دو حالت قرار گرفتن الکترون

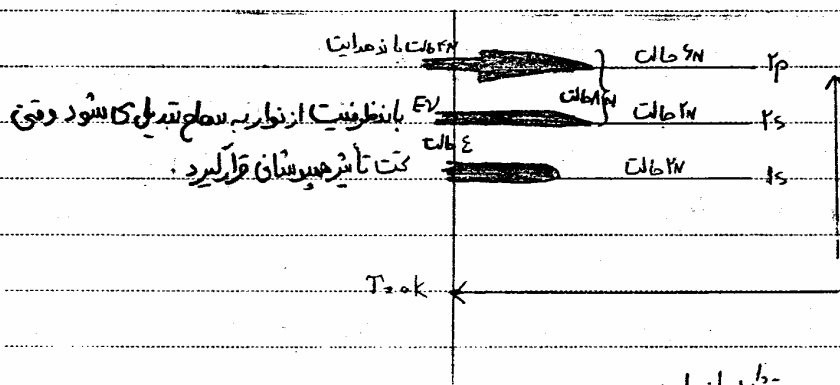
در $2p$ سه حالت قرار گرفتن الکترون

در N اتم کربن حالتها بصورت:

$1s$ به $2N$ حالت

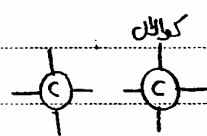
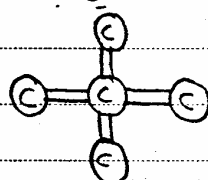
$2s$ به $2N$ حالت

$2p$ به $6N$ حالت



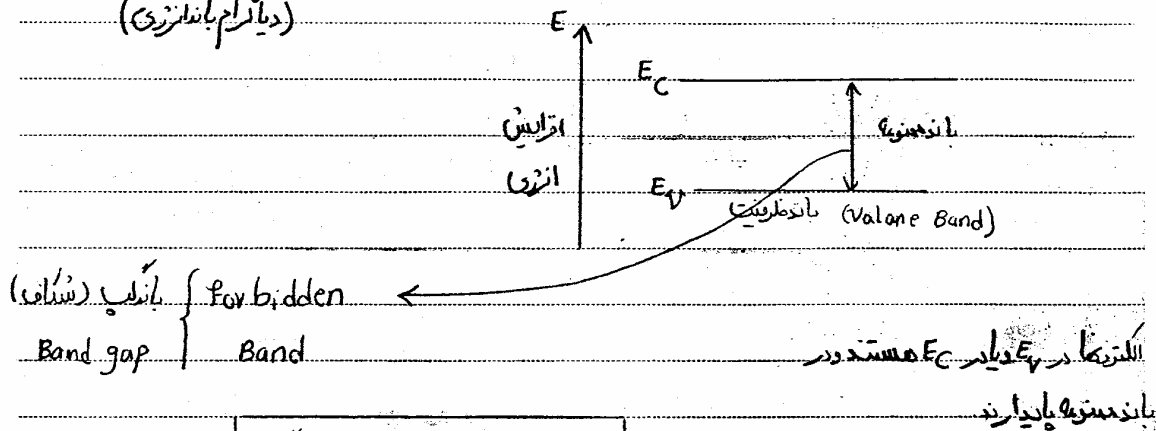
برای N اتم: ترتیب کمترین انرژی جهت تشکیل باندهای

تشکیل شبکه الیاس



Conduction Band (باند هدایت)

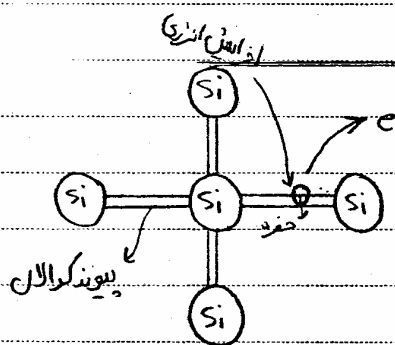
(دیالرام باند انرژی)



$$E_g = E_C - E_V \quad \text{انرژی باندگپ}$$

در الماس $E_g = 5 \text{ eV}$ ← نسبتاً این مقدار انرژی زیاد است یعنی عایق ← عایق

سیلیکون $E_g = 1.1 \text{ eV}$ ← نیمه هادی
 جرم $E_g = 0.7 \text{ eV}$ ← Ge

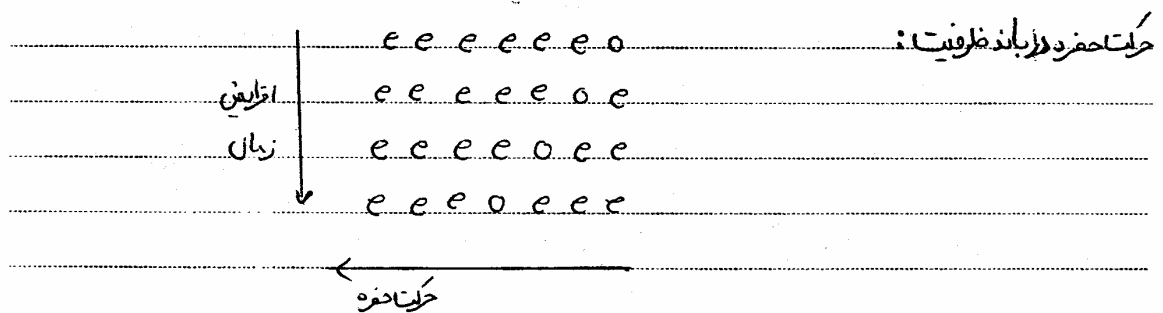
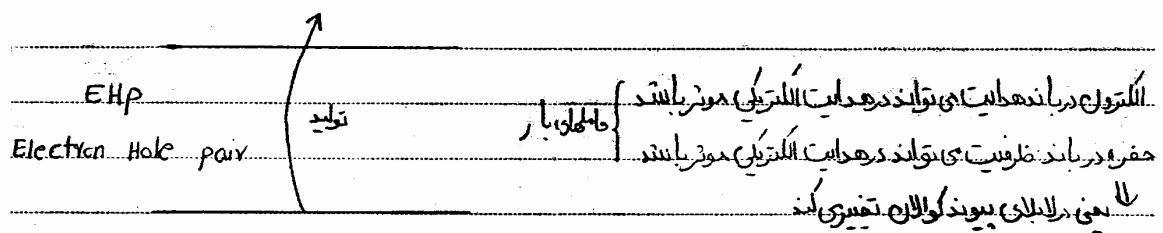
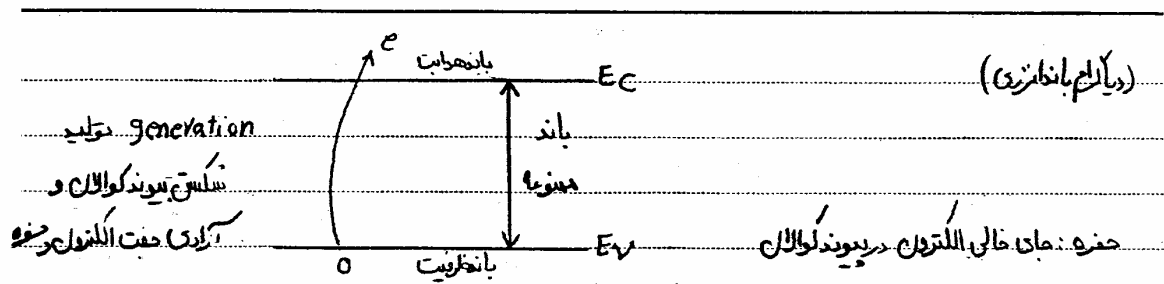


حامل‌های بار در نیمه هادی‌ها: (charge carriers)
 حامل‌های بار

در Si هیچ الکترون آزاد و جرم ندارد و تمام پیوندهای کوالان برقرارند و شکسته نشده اند

اگر نور به سبب تابانیده و یا دما را زیاد کنیم موجب زیاد شدن انرژی جرمی پیوند کوالان شده و شکسته می شوند و الکترون‌ها آزاد می شوند و از باند ظرفیت وارد باند هدایت می شود

وقتی پیوند شکسته می شود و الکترون آزاد می شود شدیدا نیاز به الکترون دارند و جای آن خالی می شود جرمی نامند



— نیمه هادی خالص (زاتی): (Intrinsic semiconductor)

هیچ اتم خالص ندارد فقط اتمهای نیمه هادی است و در $T = k$ هیچ حامل ندارد (الکترون و حفره ندارد)

$$n_i = p_i \Rightarrow \text{باینس جاملا}$$

چگالی حفره هادیات نیمه هادی خالص $n_i = p_i$ چگالی الکترونهای نیمه هادی خالص

با افزایش دما حاملها بصورت حقیقت حرکتی آزاد می‌شوند.

$$\text{Si} : n_i = 1,5 \times 10^{10} \frac{\text{electron}}{\text{cm}^3}$$

$$T = 300 \text{ K}$$

$$\text{Ge} : n_i = 2,5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

در دمای هم‌بند که انتظار تولید داریم ممکن است عکس این عمل هم ایجاد شود یعنی از باند هدایت به باند ظرفیت که باز ترکیب می‌شود.

باز ترکیب: الکترون باند هدایت به باند ظرفیت ترکیب می‌شود و انرژی یک EHP یعنی هم الکترون و هم حفره.

از بین می‌رود.

$$\text{سرعت باز ترکیب} = \text{سرعت تولید} : \text{در دمای } T$$

در نیمه‌های خالص تنها علل افزایش الکترونها افزایش دما انرژی است.

نیمه‌های ناخالص (Extrinsic semiconductor):

به غیر از اتمهای نیمه‌های اتمهای نوع دیگری وجود دارند که با عمل Doping (پاشی) اتمهای ناخالص به آن اضافه می‌شود.

عمل افزودن اتمهای ناخالص به نیمه‌های به منظور افزایش ریز هدایت الکتریکی.

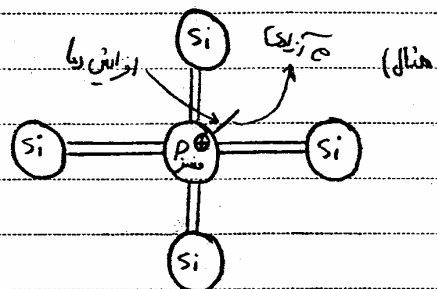
دهنده (Donor): اتمهای مستقر پنجم تناوبی (Sb, As) (پنتاگراف)

گیرنده (Acceptor): اتمهای مستقر سوم تناوبی (Ga, B, In, Al)

دو نوع ناخالص

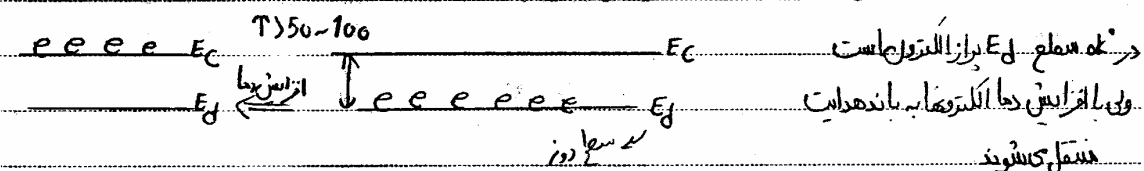
فاخالصی دهنده: باعث افزایش الکترون‌ها و تبدیل شدن به نیمه‌های نوع n.

در $T = 300\text{ K}$ تمام الکترون‌ها در پیوند کوالان هستند (از جمله الکترون اضافی) اما با افزایش دما $50 \sim 100\text{ K}$ الکترون پنجم، کاری می‌شود و احتمال دهنده یونیزه می‌شوند.



پس در $T = 300\text{ K}$ تمام احتمال یونیزه شده اند و می‌توان الکترون‌ها را هم به عنوان حامل جریان در دهنده حساب کرد.

$$\left. \begin{array}{l} T = 300\text{ K} \\ n_0 = N_D \end{array} \right\} \text{حامل الکترون}$$



$$E_C - E_D = \begin{cases} 0.01\text{ eV} \rightarrow \text{Ge} \\ 0.04\text{ eV} \sim 0.06\text{ eV} \rightarrow \text{Si} \end{cases}$$

فاصله خیلی کمی است پس در 300 K همه هم‌ترازی می‌شوند.

* احتمال دهنده باعث افزایش الکترون می‌شوند

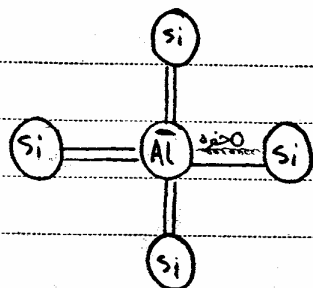
$$N_D = 10^{15}\text{ cm}^{-3} \text{ (مثال)}$$

$$n_i = 1.5 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3} \text{ برای Si}$$

آنها همیشه با خالص مانند مصرف داری N_D مقابل است

اضافه می‌شود. باعث افزایش تقریبی 10^5 برابر الکترون در این

نیمه‌های می‌شود و به شدت هدایت را افزایش می‌دهد



- ناخالصی لایرنده: با افزایش جفوها و تبدیل بنیه‌های نوع P ی شوره

افزایش دما $100 \sim 50^\circ C$ - جفوها و ایجا رسته و توره دایت خواهند بود

$T = 300K$

بنیه‌های لایرنده یونیزه می‌شوند و به یون و حفره تبدیل می‌شوند

خیالی‌های لایرنده $\rightarrow P_0 = N_A$ خیالی جفوه

بنیه‌های	minority	حامل‌های اقلیت	majority carrier	حامل‌های اکثریت
نوع n	$P_0 \ll n_0$ جفوه		$n_0 = N_D$ الکترون	
نوع p	$n_0 \ll p_0$ الکترون		$P_0 = N_A$ جفوه	

مثال: در بنیه‌های Si که $n_0 = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ و $N_D = 1.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ می‌باشد، متوسط احتمال دهنده فسفر ناخالصی لایرنده

بازوی برابری تقریبی جفوها و فسفر، و مطلوب است تعیین نوع بنیه‌های و حامل‌های اکثریت و نسبت وزنی؟

$$Si \text{ خیالی‌های } = 5 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$$

احتمال دهنده بنیه‌های نوع n $\leftarrow n_0 = N_D = 1.5 \times 10^{15}$ حامل‌های اکثریت الکترون

$$\text{نسبت وزنی} = \frac{\text{جرم اتمی Si}}{\text{جرم اتمی P}} \times \frac{\text{خیالی‌های Si}}{\text{خیالی‌های P}} = \frac{5 \times 10^{22}}{1.5 \times 10^{15}} = 5 \times 10^7$$

وزن: 5 kg

$$\frac{1 \text{ kg}}{\Delta x \cdot v} = \mu \cdot \mu g \cdot v$$

۵. امیر المومنین خوارزمشاه

در اسلام کمال سبیلیم، ۲۰۸۹ صنعت باغ، اورینش اللہ رضا، شہر

- تابوعزى دىراك (Fermi Dirac):

تابع احتمالی است و مطرح می‌کنیم که احتمال اینکه T درای انرژی E باشد

$$P(E) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E - E_F}{kT}}}$$

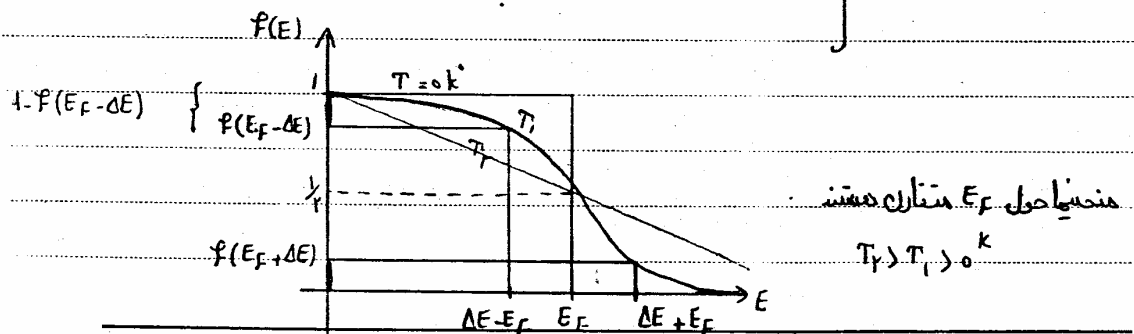
k: لایب دولتمال

أثر $E = E_F$ السد $\varphi(E_F) = \frac{1}{1 + e^0} = \frac{1}{2}$ السد

E_f انرژی سماح فری که احتمال اینکه الکترون، انرژی E_f را داشته باشد، برابر است

$$P(E) = 1 \leftarrow 0 \leftarrow C \leftarrow \frac{E - E_F}{kT} \leftarrow E - E_F \leftarrow \text{المر} \leftarrow (صفر مطلق) T_{20K} \rightarrow$$

$$P(E) = 0 \leftarrow \infty \leftarrow C \leftarrow \frac{E - E_F}{kT} \leftarrow E - E_F \leftarrow \text{المر}$$



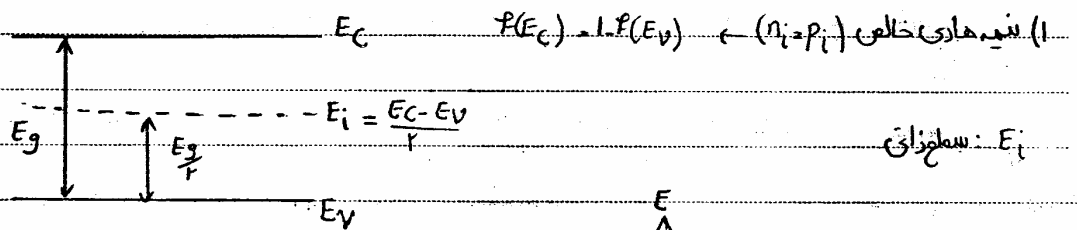
منحنا حول E_r متقارن مستقيم

$$T_1 > T_2 > 0^{\circ} \text{K}$$

اگر به اندازه ΔE به E_F اضافه شود $P(E_F + \Delta E)$

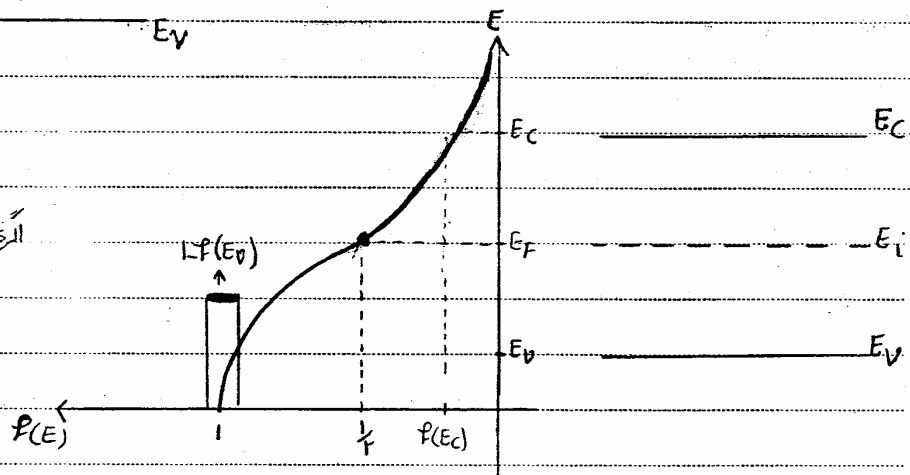
$$\underbrace{P(E_F + \Delta E)}_{\text{احتمال الکترون}} = \underbrace{(1 - P(E_F - \Delta E))}_{\text{احتمال حفره}}$$

تقسیم موقعیت شغلی در نیمه هارها

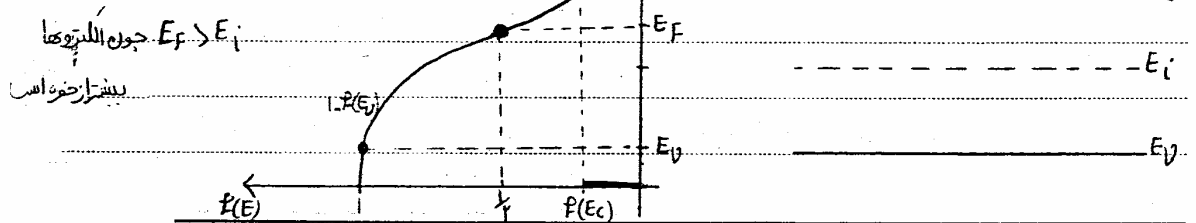


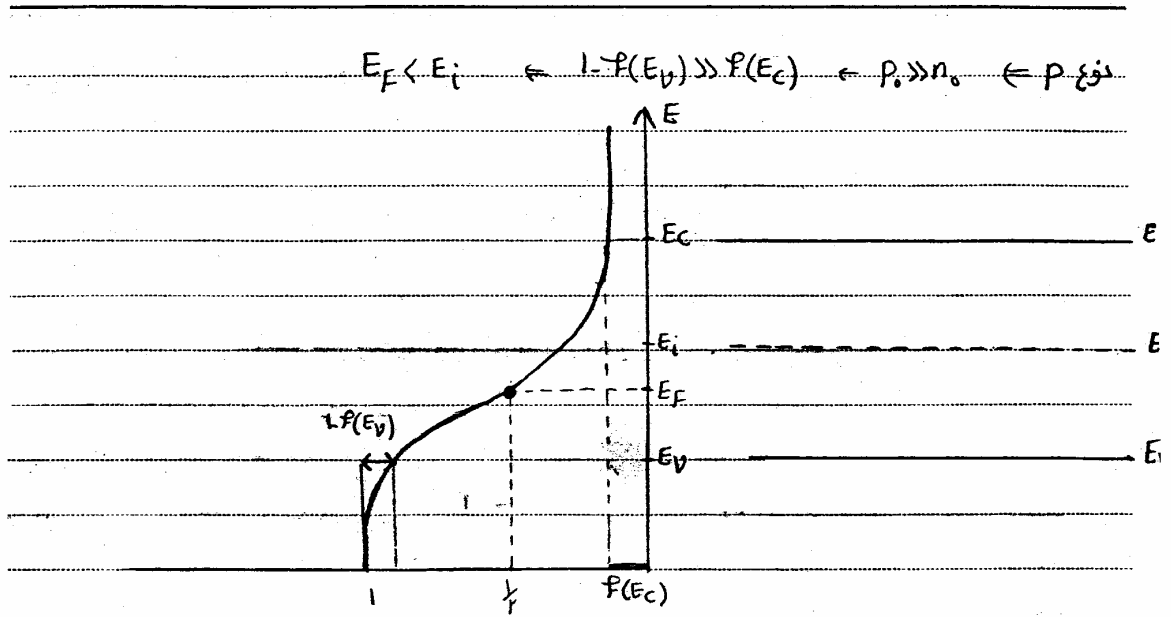
اگر واهیم $P(E_C) = 1 - P(E_V)$

$E_F = E_i$
نیمه هاری خالی

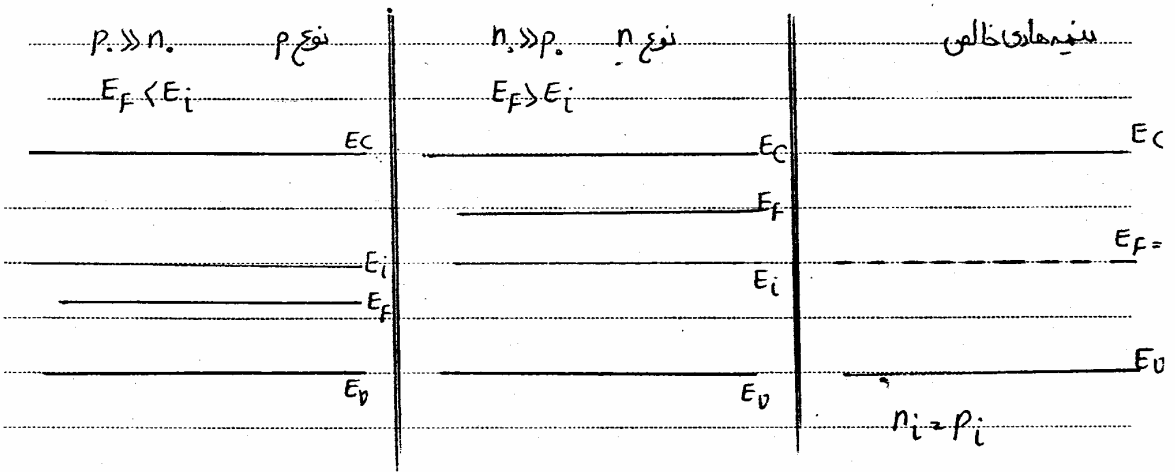


نوع $n \leftarrow p_0 \gg p_i \leftarrow P(E_C) \gg 1 - P(E_V)$ برای اینکه این رابطه برقرار است باید E_F (سطح فزی) از E بالاتر باشد.





نتیجه:



n و p در n و p

تعیین چگالی حاملها در نیمه هادیها:

نوع p

$$p_0 \approx N_A$$

$$n_0 \ll p_0$$

نوع n

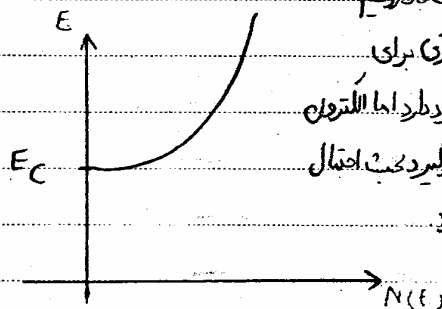
$$n_D = n_0$$

$$p_0 \ll n_0$$

در نیمه هادی نوع خالص ($n_i = p_i$)

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

تابع احتمال $f(E)$



هر چه به طرف بالا برویم

حالتها بیشتری برای

الکترون وجود دارد اما الکترون

در کدام جا قرار گیرد؟ احتمال

مطرح می شود

$$N(E) \propto E^{\frac{1}{2}}$$

دانشیه حالات

(دو انرژی E چگالت برای

اشغال شدن توسط الکترون

وجود دارد)

$$n_0 = \int_{E_C}^{\infty} f(E) N(E) dE$$

چگالی الکترون

در هر حالتی حالتها به ندرت پر می شوند

یا چگالی حالتها کم است و در ندرت

پر می شوند

چون مقدار الکترونها مورد نظر است و جای آنها هم نیست برای همین با الکترونها را روی لب باند هدایت آورده تا سواره بشود

دانشیه انرژی E_C

E_C

دانشیه انرژی

تمام حالات پر می

مرز باند هدایت در

نظریه ای شود

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

$$4.14 \times 10^{-15} \text{ eVs} = 9.42 \times 10^{-24} \text{ J}$$

$$1.42 \times 10^{-5} \text{ eV} = 1.38 \times 10^{-22} \text{ J}$$

T در جهت الکترون

$$m_0 = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

m_n در جهت

حرکت الکترون

الکترونها بر حسب بارهائی اطراف (مدیاها) دایزری خود چرخهای متفاوت از خود نشان می دهد برای راحتی محاسبات حجم موثر را در

نظریه شده:

$$Si \begin{cases} m_n^* = 1.1 m_0 \\ m_p^* = 0.54 m_0 \end{cases} \quad Ge \begin{cases} m_n^* = 0.85 m_0 \\ m_p^* = 0.37 m_0 \end{cases}$$

حجم ثابت نرن

در زیر $n_0 = f(E_C) N_C$ و n_0 را هم می نویسد

$$f(E_C) = \frac{1}{1 + e^{\frac{E_C - E_F}{kT}}}$$

می توان از این صرف نظر کرد پس $e^{\frac{E_C - E_F}{kT}} \gg 1 \Leftrightarrow E_C - E_F \gg kT$

$$f(E_C) = e^{-\frac{(E_C - E_F)}{kT}}$$

$$n_0 = N_C e^{-\frac{(E_C - E_F)}{kT}}$$

دانستیم موثر است خفه: تمام حالات بر روی مرز باند ظرفیت در نظریه می شود

حجم موثر

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

$$p_0 = N_V (1 - f(E_V))$$

$$1 - f(E_V) = 1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}} = \frac{e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}}{1 + e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}} \approx 1$$

از $e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}$ در غنیمت صرف نظر $E_F - E_V \gg kT \Rightarrow \frac{E_F - E_V}{kT} \gg 1 \Rightarrow$

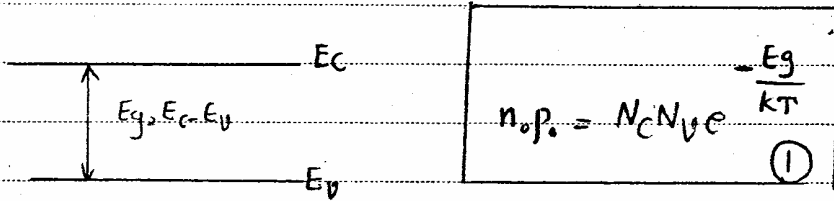
(۲)

$$1 - f(E_V) = e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}$$

$$p_o = N_v e^{\frac{E_v - E_F}{kT}}$$

$$n_o p_o = N_c N_v e^{\frac{-(E_c - E_F)}{kT}} e^{\frac{(E_v - E_F)}{kT}}$$

$$\Rightarrow n_o p_o = N_c N_v e^{\frac{-(E_c - E_v)}{kT}}$$



در نیمه هادی خالص:

$$n_i = p_i = n_o = p_o \Rightarrow E_F = E_i$$

برای $n_i = n_o = N_c e^{\frac{-(E_c - E_i)}{kT}}$ داریم

برای $n_i = p_i = p_o = N_v e^{\frac{(E_v - E_i)}{kT}}$ داریم

$$n_i^2 = N_c N_v e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

در نیمه هادی خالص (2)

(2) و (1) $\Rightarrow n_i^2 = n_o p_o$ در نیمه هادی خالص:

$$p_o = \frac{n_i^2}{n_o}$$

معلوم $n_o = n_p$ donor

آلتر نیمه هادی نوع n باشد $\leftarrow$

$$n_o = \frac{n_i^2}{p_o}$$

معلوم $p_o = N_A$

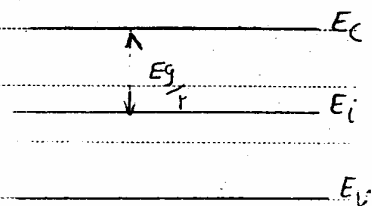
آلتر نیمه هادی نوع p باشد $\leftarrow$

① از رابطه $N_C = N_D$ داریم $\Rightarrow n_i = N_C e^{-\frac{E_g}{2kT}}$

حال در این $n_o = N_C e^{-\frac{(E_C - E_F)}{kT}} \xrightarrow{E_i - E_C} n_o = N_C e^{-\frac{(E_C - E_i)}{kT}} e^{-\frac{(E_i - E_F)}{kT}}$

$n_o = N_C e^{-\frac{E_g}{2kT}} e^{-\frac{(E_i - E_F)}{kT}}$

② $n_i = n_o e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}$



$$\begin{cases} n_i^r = n_o p_o \\ n_o = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}} \\ p_o = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} \end{cases}$$

* مثال: اگر دیتیم‌های نوع $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ و $E_g = 1.1 \text{ eV}$ در 300 K ، $kT = 0.0259 \text{ eV}$

و دیتیم‌های ناخالص دهنده $N_D = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$

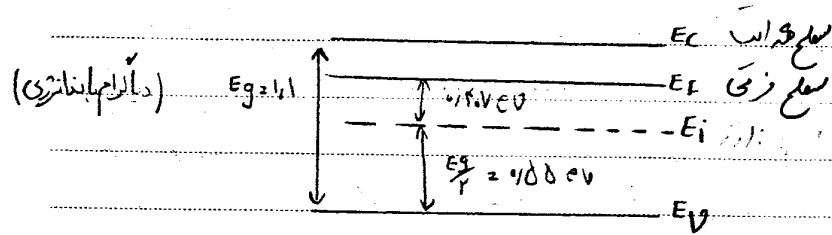
$p \rightarrow E_i$

مطلوبست نوع دیتیم‌های، دیتیم‌های، اقلیت و حامله سطح فری از سطح دان ناخالص دهنده: نوع n

حالتی حامله اقلیت $n_i = N_D$

حالتی حامله اقلیت $p_o = \frac{n_i^r}{n_o} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{17}} = 2.25 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$

③ معادله $E_F - E_i = kT \ln \frac{n_o}{n_i} = 0.0259 \ln \frac{10^{17}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.407 \text{ eV}$



۱۴، ۱، ۱۸

مجلس سوم

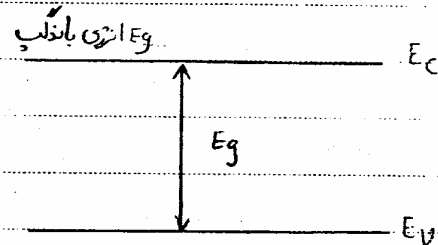
وایسش حرارتی حالتها:

$$n_i = p_i$$

(۱) در نیمه هادی خالص:

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

- * دانسیته موثر حالات الکترون در لبه باند هدایت
- * دانسیته موثر حالات حفره در لبه باند ظرفیت



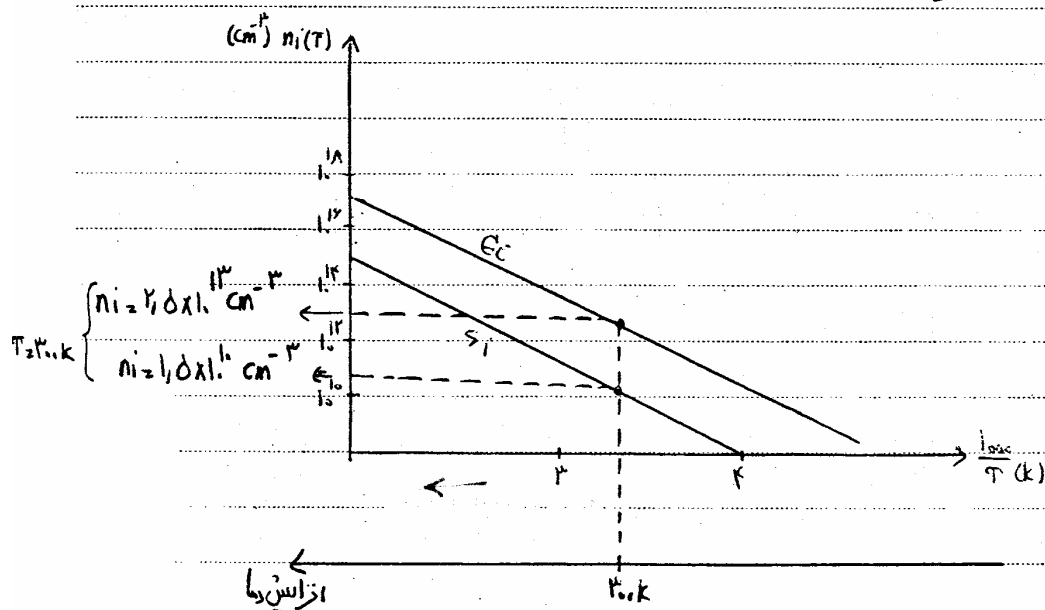
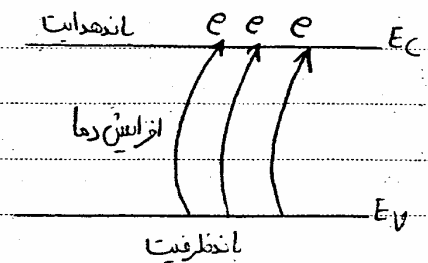
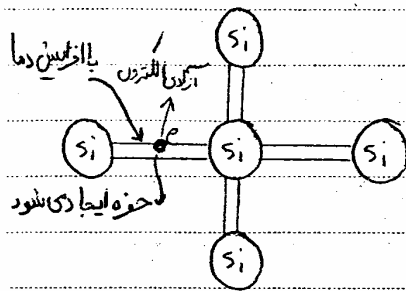
(داینامیکال (پایه))

$$n_i = 2 \left(\frac{\gamma_n m_n^* k T}{\eta_r} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{\gamma_p m_p^* k T}{\eta_r} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

$$n_i = 2 \left(\frac{\gamma_n k T}{\eta_r} \right)^{\frac{3}{2}} (m_n^* m_p^*)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

$$n_i(T) \propto T^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

یعنی با افزایش درجه حرارت T و $T^{\frac{3}{2}}$ و $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ افزایش می یابد اما بیشتر از این روی n_i موثر است.
* نسبت افزایشی n_i روی n_i بزرگ است.

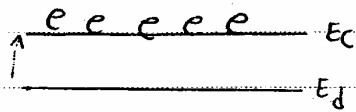


* مثال در T_{20}^{ack} حاصل N_{20}^{ack} را بر طبق لینک که این برای S_1 به عنوان رهد داشت و تبدیل به نوع n می شود (اراحت

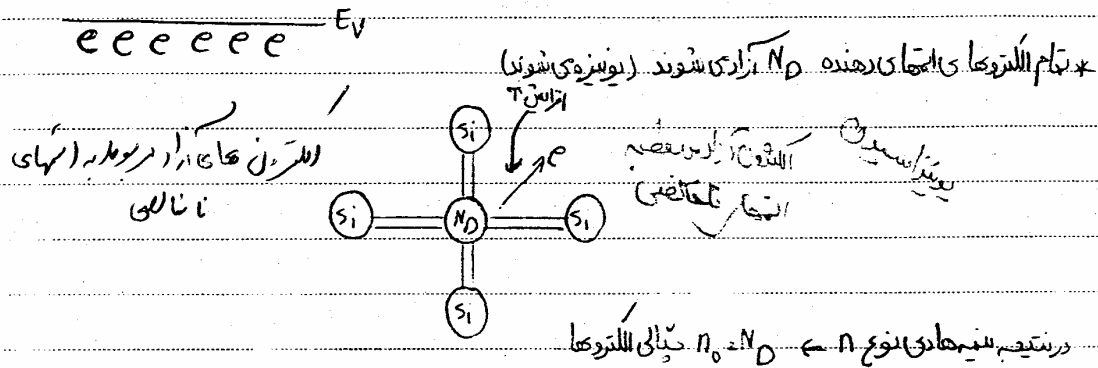
۶۷
 حاضر حاضر می شود چون : امیر ارسلان (۶۷ است) اما برای ۶۷ : ایشری ضروری ۶۷ : ایشری ضروری ۶۷ : ایشری ضروری

$N_D = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ $\Rightarrow$ نوع n $\Rightarrow$ $N_D = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ $\Rightarrow$ $n_i = 1.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$
 $N_D = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ $\Rightarrow$ $N_D = 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ $\Rightarrow$ $n_i = 1.5 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$

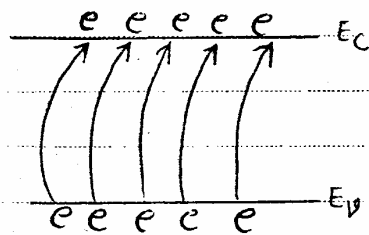
ب) اگر دما افزایش یابد $T_2 = 100\text{ K}$ $(T_1 < T_{max})$ $(T_2 = 100\text{ K})$



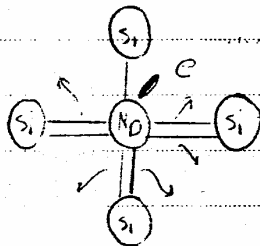
* همه الکترون‌های باند هدایت اکسید شده اما در باند هدایت الکترون‌ها باقی می‌ماند.



ج) اگر دما $T > T_{max}$

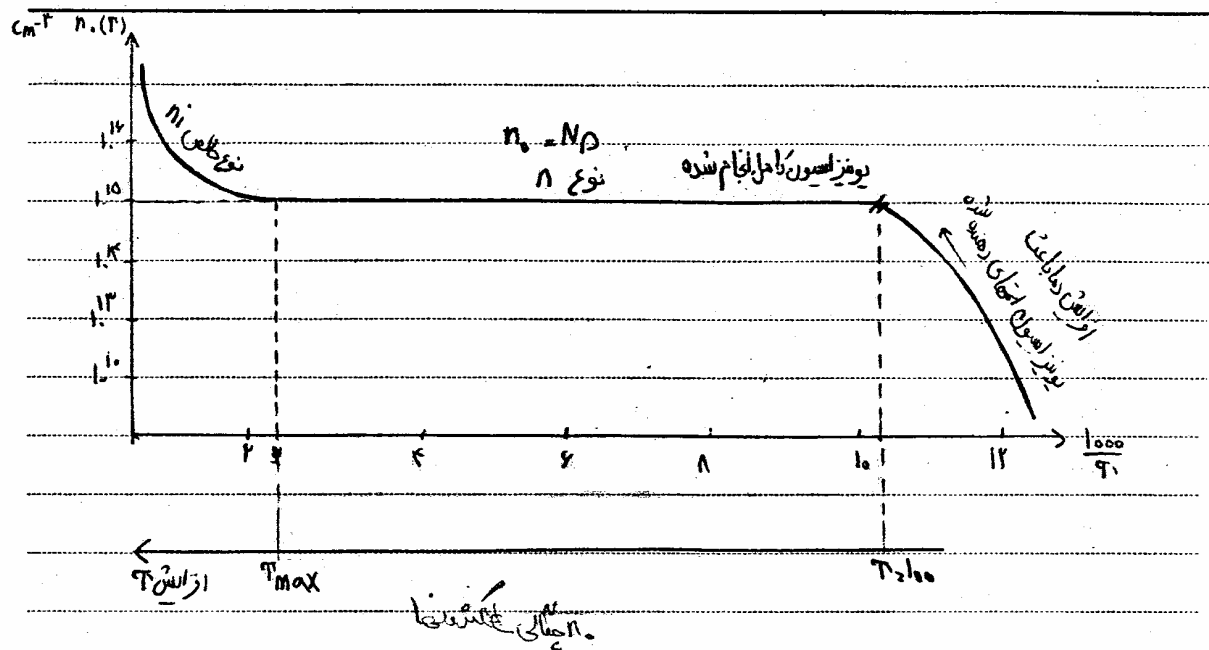


الکترون‌های پیوندهای کووالانسی Si هم بتدریج آزاد می‌شوند.



در نتیجه سیم‌های خالص Si $n_i(T)$

$$T_{max} = \begin{cases} Si : T > 200\text{ C} \\ Ge : T > 100\text{ C} \end{cases}$$



حقی بودن بار فضایی (space charge) و جریان سازی:

$$\underbrace{N_D + P_0}_{\text{موجب}} = \underbrace{N_A + n_0}_{\text{منفی}} \quad (\text{حالت خنثی})$$
 (بارهای مثبت و منفی با هم برابر باشند)
 یک قطعه نیمه هادی خنثی است
 از نظر الکتریکی متعادلی

روند جریان سازی

$$n_i^2 = p_i$$
 ۱) سنجهای خالص

$$E_C, E_i, E_V$$
 سطح فری در وسط دو باند قرار دارد

۲) افزایش اسیونهای ناخالص رها شده به سببهای نوع n

$$n_0 = N_D$$
 حالت های اکثریت

$$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}$$
 حالت های اقلیت
 در $E_C \sim E_F$ توزیع می شود

۳) افزودن اتم‌های خالص لیزنده $N_A \sim$ بندهای بالا بطوریکه $N_A < N_D$ باشد پس بندهای نوع n داریم

در این حالت قسمتی از الکترون‌های اتم‌های رهمده با حفره‌های اتم‌های لیزنده جبران (یا ترکیب) می‌شوند

$$n_o + N_A = p_o + N_D \quad \xrightarrow{x n_o} \quad n_o^2 - (N_D - N_A) n_o - n_i^2 = 0$$

حالتی خاص از تریپل
بطوریکه

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

اگر $(N_D - N_A) \gg 4n_i^2 \Rightarrow \boxed{n_o = N_D - N_A}$

۴) افزودن اتم‌های خالص لیزنده $N_A \sim$ بندهای بالا بطوریکه $N_A > N_D$ شود پس بندهای نوع p داریم:

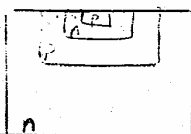
$$p_o + N_D = N_A + n_o \quad \xrightarrow{\frac{n_i^2}{p_o}} \quad p_o^2 - (N_A - N_D) p_o - n_i^2 = 0$$

حالتی خاص از تریپل
(بطوریکه)

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

if $(N_A - N_D) \gg 4n_i^2 \Rightarrow \boxed{p_o = N_A - N_D}$

* با این روش با داشتن مقدار بندهای نوع n و p می‌توانیم اتم‌های خالص لیزنده را پیدا کنیم



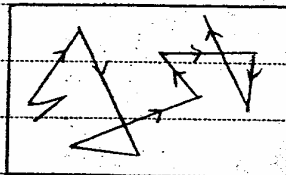
افزودن
اتم‌های

در این حالت قسمتی از الکترون‌های اتم‌های رهمده با حفره‌های اتم‌های لیزنده جبران (یا ترکیب) می‌شوند

۴)

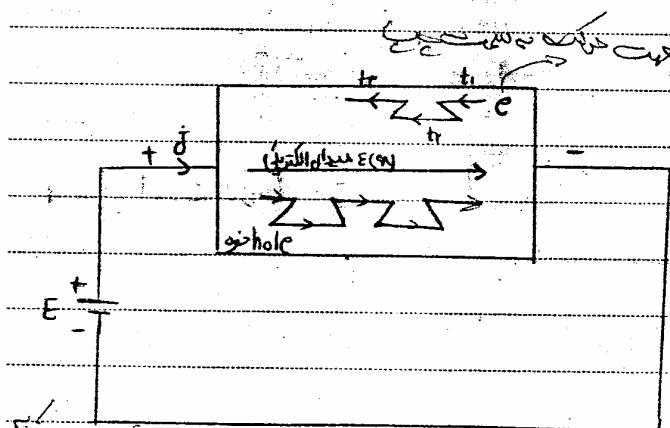
گیرنده در واقع ترانزیستور می‌باشد

رانس (Drift) حامله داران میدان الکتریکی در یک ماده نیمه هادی حامله دارایی حرکت تصادفی دارند
 حرکت تصادفی در همه جهات و این به دلیل برخورد با ذرات و نوسان در دما است
 در حالت تعادل یعنی زمانی که هیچ میدان اعمال نشده حامله داران (الکترون ها و حفره ها) حرکات تصادفی و نامنظم دارند و به طور کلی هیچ جریانی
 خالص تشکیل نمی شود



احتمال اینکه الکترون ها پس از مدتی به میدان اولیه بازگردند و حرکت تصادفی داشته باشند

با اعمال میدان الکتریکی حرکات حامله ها منظم شده و در جهت میدان می شوند و نتیجه حرکت آنها جریان رانس (Drift) نامیده می شود



الکترون ها به طرف قطب مثبت می روند اما در این راه به شبکه کریستال برخورد می کنند و ممکن است جهت آنها عوض شود اما در طول درجهت میدان کاری ندارند

توسط زمان آزادی الکترون (حرکت در جهت میدان) $\bar{t}$ (mean free time)

حرکت تصادفی در جهت میدان Φ_p (drift)

حرکت تصادفی در جهت میدان Φ_n (drift)

mobility $\mu_n = \frac{q\bar{t}}{m_n^*}$ $\mu_p = \frac{q\bar{t}}{m_p^*}$

قابلیت حرکت الکترون μ_n μ_p (drift)

m_p^* جرم مؤثر الکترون (وابسته به ساختار انرژی بلور است)

واحد $\mu = \frac{cm^2}{Vs}$

Si $\begin{cases} \mu_n = 1350 \\ \mu_p = 480 \\ T = 300K \end{cases}$

سرعت متوسط الإلكترونات

$$V_{ne} = -\mu_n E(x)$$

تسمى μ حركية الإلكترونات

$$\mu = \frac{q}{m_n} \tau$$

جهد الإلكترونات في اتجاه التيار

$$I_n(\text{drift}) = J_n(\text{drift}) = q n_e V_{ne}$$

 كثافة التيار
 دالة التيار

$$\mu = \frac{v_{drift}}{E} = \text{mobility}$$

$$J_n(\text{drift}) = q n_e \mu_n E(x)$$

$$\sigma = q n_e \mu_n$$

$$J_n = \sigma E$$

 دالة التيار
 دالة المجال

دالة المجال
 دالة التيار

* موجبات حركية الإلكترونات تسمى $\uparrow$ $\leftarrow$ جريان دريفت $\uparrow$

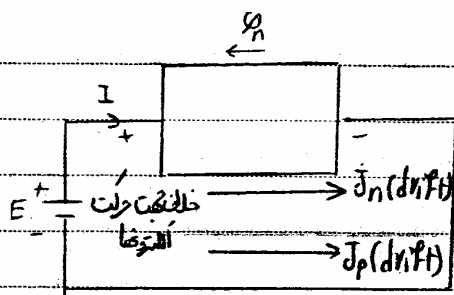
دور حركية الإلكترونات

$$V_p = \mu_p E(x)$$

$$J_p(\text{drift}) = q p_0 V_p$$

$$\begin{cases} J_p = q p_0 \mu_p E(x) \\ J_p = \sigma_p E \end{cases} \Rightarrow \sigma_p = q p_0 \mu_p$$

 دالة المجال
 دالة التيار



$$j(\text{drift}) = j_n(\text{drift}) + j_p(\text{drift})$$

$$j(\text{drift}) = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

شکل: سیم‌های خاص σ - مقاومت مشخص ρ

$$j = \sigma E$$

$$\sigma = \begin{cases} \mu_n = 3900 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \\ \mu_p = 1900 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \end{cases}$$

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

$$n_i = 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$\sigma_i = qn_i(\mu_n + \mu_p) = 1.6 \times 10^{-19} \times 2.5 \times 10^{13} \times (3900 + 1900)$$

$$\sigma_i = 2.32 \times 10^{-2} (\Omega \text{ cm})^{-1} \quad \rho_i = (8i)^{-1} = 43 \Omega \text{ cm}$$

جریان رانشی (دریفت) در نیمه‌رساناها ایجاد می‌شود و وابسته به چگالی حامل‌های بار است.

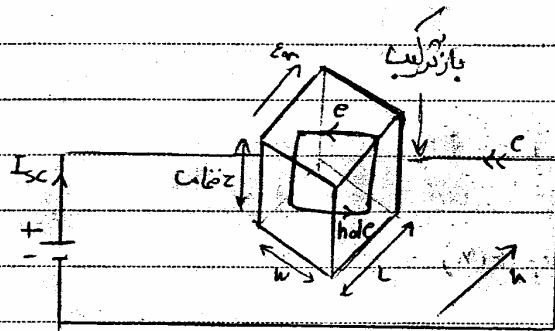
نیمه‌های نوع p	نیمه‌های نوع n	نیمه‌های خالص
$p_0 \gg n_0$	$n_0 \gg p_0$	$n_i \approx p_i$
$\sigma \approx \sigma_p = q p_0 \mu_p$	$\sigma \approx \sigma_n = q n_0 \mu_n$	$\sigma \approx \sigma_i = q n_i (\mu_n + \mu_p)$

چرا $\mu_n \gg \mu_p$ است؟ زیرا جرمه در الکترون کمتر از جرمه در یون‌هاست و در نتیجه چگالی حامل‌های بار در نوع n بیشتر از نوع p است.

است و الکترون اگر آزاد است. بعد از حرکت خود را در باند ظرفیت (پیوندهای کووالان) با قابلیت تحرک خود کسری از الکترونی

بازدهای می باشد.

در اینجا با نیمه هادی تحت پتانسیل ولتاژ ولتاژ است:



مساحت $A = ZW$

$$R = \frac{E_{\text{مقاومت}}}{I_{\text{مقاومت}}} \Rightarrow R = \rho \frac{L}{A} \quad \begin{matrix} \text{cm} \\ \text{cm}^2 \end{matrix}$$

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

آرئیه های نوع n باشد

$$\sigma = \sigma_n = q n_0 \mu_n \rightarrow n_0 \quad \text{مقاومت}$$

آرئیه های نوع p باشد

$$\sigma = \sigma_p = q p_0 \mu_p \rightarrow p_0 \quad \text{مقاومت}$$

آرئیه های خالص باشد

$$\sigma = q n_i (\mu_p + \mu_n)$$

$$\Rightarrow n_i = \frac{\sigma}{q(\mu_n + \mu_p)}$$

تقریباً از یک قطعه نیمه‌هادی n مستطولی به طول ۲cm و سطح مقطع ۱cm^۲ تحت ولتاژ ۱۷V، جریان ۱mA عبوری کند.

الف) دانستیم حاملهای الکتریکی این قطعه μ و در هم برآیم باید انرژی ϕ با چه نوع و چه مقدار حاملی به این قطعه افزوده بشود

تحت تأثیر ولتاژ ۱۷Vت جریان مددیله و کمترین حالت نیز برآیم را رسم کنید.

$$\mu_n = 750 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

$$\mu_p = 400 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$$

$$R = \frac{E}{I_q} = \frac{1}{1\text{mA}} = 1\text{k}$$

$$kT = 0.025\text{eV}$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19}$$

$$n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$$

$$E_g = 1.1\text{eV}$$

$$\phi = R \frac{A}{L} \Rightarrow \phi = 10^3 \times \frac{1}{1} = 1000 \Omega \cdot \text{cm}$$

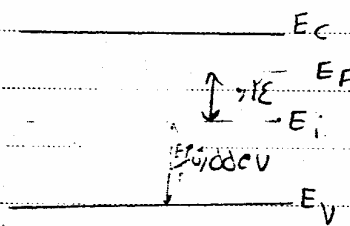
$$\sigma = \frac{1}{\phi} = \frac{1}{1000} = 0.001$$

$$\text{نوع } n \Rightarrow \sigma = \sigma_n = q n_0 \mu_n \Rightarrow 0.001 = 1.6 \times 10^{-19} \times 750 \times n_0$$

$$n_0 = \frac{0.001}{1.6 \times 10^{-19} \times 750} = 1.94 \times 10^{10}$$

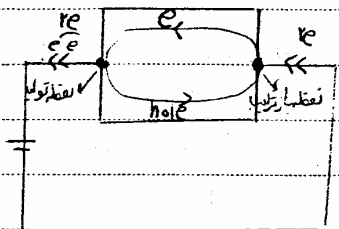
$$n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}} \Rightarrow E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} \Rightarrow E_F - E_i = 0.025 \times \ln \frac{1.94 \times 10^{10}}{1.5 \times 10^{10}}$$

$$E_F - E_i = 0.028$$



پتانسیل مثبت باعث ایجاد زوج جفت و الکترون در نیمه‌های n می‌شود که الکترون جذب قطب مثبت باتری می‌شود و جفت داخل نیمه‌های

به سمت قطب منفی حرکت می‌کند و در سطح اتصال نیمه‌های p قطب مثبت الکترون بازگویی می‌شود.



حفره از قطب مثبت به منفی آمده و قطب منفی با الکترون‌ها بازگویی می‌شود.

مثال: فرض در نیمه‌های خالص با $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ و $\mu_n = 2900 \frac{\text{cm}^2}{\text{V.s}}$ و $\mu_p = 1911 \frac{\text{cm}^2}{\text{V.s}}$ مقاومت محوری

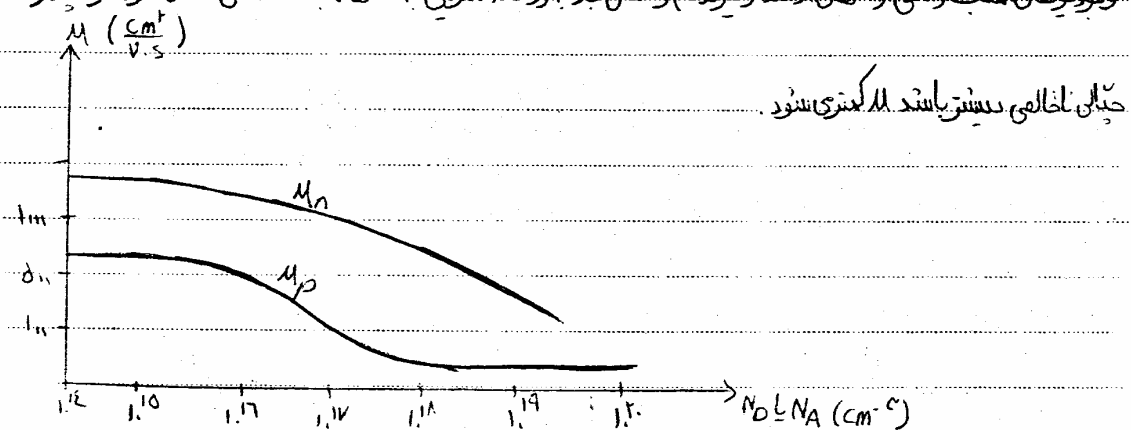
Ge را به دست آورید. $\sigma_i = q n_i (\mu_n + \mu_p) \Rightarrow \sigma_i = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.5 \times 10^{10} (2900 + 1911)$

$\sigma_i = 2.32 \times 10^{-7} (\Omega \text{cm})^{-1}$

$\rho = \frac{1}{\sigma_i} = 4.3 (\Omega \cdot \text{cm})$

وابستگی قابلیت حرکت μ به چگالی انجای ناخالص N_D و N_A

وجود یون‌های مثبت و منفی (انجای دهنده و گیرنده) و اعمال جاذبه و دفعه الکترونی به جاذبهها، باعث کاهش μ می‌شود هر چه در



چگالی ناخالصی بیشتر باشد μ کمتری می‌شود.

در 50°C در میان 10^{17} الکترون

۱- وابستگی قابلیت تحریف (α) به دما (T)

در دماهای خیلی پایین انرژی جنبشی حاملان الکترون یا حفره بسیار کم است و به سبب آن تأثیر یونهای دهنده یا گیرنده قوی می‌شوند.

→ ϵ کمترین
⑥* دماهای پایین

به کامیابی قابلیت تحریف می‌شوند

با افزایش دما انرژی جنبشی را در پی دارد و باعث اختلالی می‌شود و در نتیجه تأثیر یونهای مثبت و منفی خنثی می‌شوند.

با افزایش دما انرژی جنبشی حاملها افزایش می‌یابد و به دلیل این که در دماهای بالا انرژی کمتری
Lattice scattering سبب گشتاها

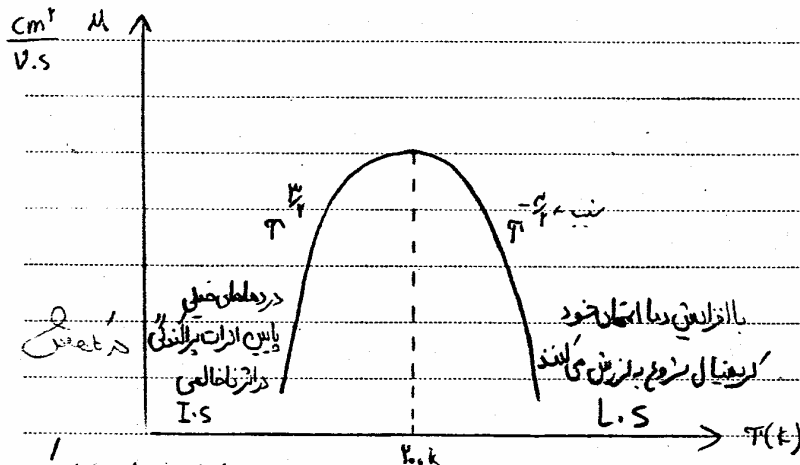
ولتیزش است و هم زایل می‌شود

معادنی بر اثر حرکت آزار دهنده حاملها می‌شود

دماهای پایین انرژی کم

ناخالصی

Impurity scattering



با افزایش دما این اثرات کم و کم زیاد می‌شود

دما }
ناخالصی } هم‌بندی طول بر روی α

تأثیر انقباضی باعث کاهش
در μ می شود

اشغال می: $\uparrow$ در خواص داخلی $\uparrow$ تأثیر بر یوگلی نسبت و هتو $\uparrow$

افزایش اجزای داخلی باعث کاهش قابلیت تحریک حاملهای حامل شود (به دلیل جاذبه بین یوگلی نسبت و هتو)

اگر μ برابر با خواص داخلی را داشته باشیم $\mu_n = \mu_p$

$$\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \downarrow \downarrow \downarrow \downarrow$$

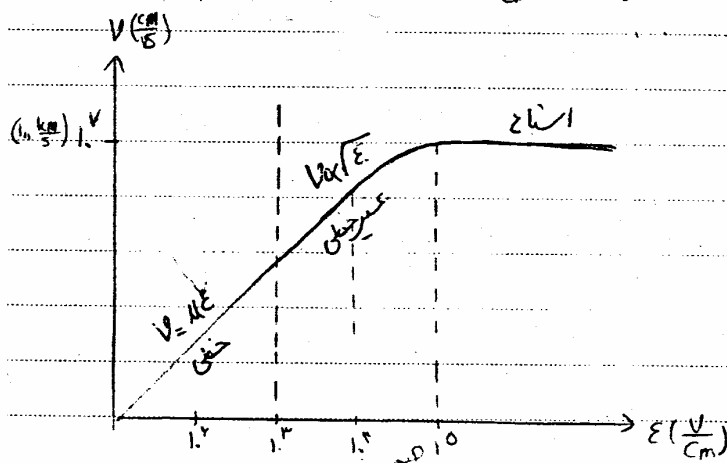
$$\sigma_n, \mu_n, \mu_p, \sigma_p$$

* این مقادیر مربوط به وابستگی قابلیت تحریک حامله حیاتی داخلی داخلی

رابطه میدان الکتریکی و سرعت حرکت:

$$v = \mu E$$

این رابطه در محدوده مرتبه نسبت فقط برای میدان الکتریکی کمتر از $\frac{10^4}{cm}$ برقرار است



افزایش بیش از حد میدان باعث افزایش بیش از حد انرژی حاملها و وجود شدید و ایجاد حرارت و بالا رفتن دمای قطعه و

در نهایت تلفات و انرژی و دمای قطعه افزایش میابد $10^4 < E$ باشد

نوع (ا) دیسکهای سیلیکون دهنده تقریباً مقدار 10^{17} cm^{-3} اضافه شده. الف) مقاومت محض

ب) نسبت وزنی سیلیکون ج) نوع نیمه‌های ورسم دیالیز باند انرژی د) ایزناتولن لیزنده به مقدار 10^{18} cm^{-3} اضافه شود

مقاومت محضی (حقیقی) ρ (ه) نوع نیمه‌های ورسم دیالیز باند انرژی

$$n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3} \quad \sigma_n = q n_i \mu_n = 1.7 \times 10^{-19} \times 1.5 \times 10^{10} \times 1000 = 2.55 \times 10^{-8} \text{ (الف)}$$

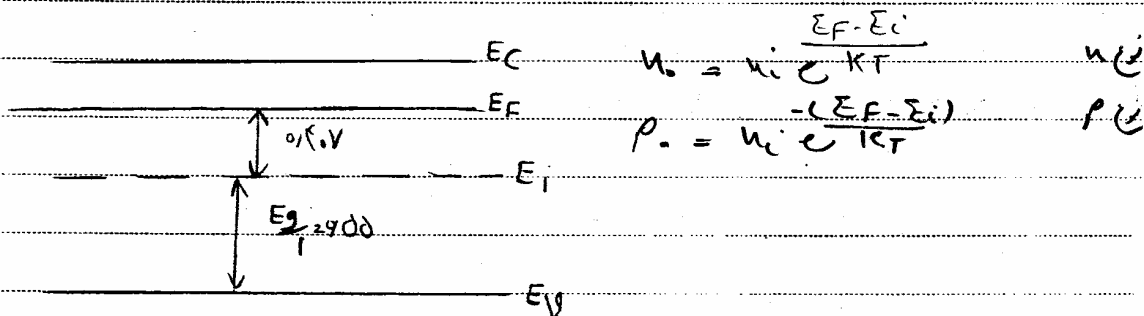
$$n_0 = n_p = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad \rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{17.28} = 5.79 \times 10^{-2} \text{ (ب)}$$

$$E_g = 1.1 \text{ eV} \quad kT = 0.0259 \text{ eV} \quad n_0 = n_p = 10^{17} \text{ cm}^{-3} \quad \text{ایزوتوپ دهنده به نیمه‌های نوع n}$$

$$\mu_n = 1500 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad \mu_p = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad \text{نسبت وزنی} = \frac{\text{وزن اتمی Si}}{\text{وزن اتمی P}} \times \frac{\text{میزان Si}}{\text{میزان P}} = \frac{28}{31} \times \frac{1.7 \times 10^{19}}{1.5 \times 10^{17}} = 1.0 \times 10^2$$

$$\text{وزن اتمی فسفر} = 31 \text{ g/mol} \quad \text{وزن اتمی Si} = 28 \text{ g/mol}$$

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} \Rightarrow E_F - E_i = 0.0259 \ln \frac{10^{17}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.41 \text{ eV}$$



$$N_A = 10^{18} \text{ cm}^{-3} \quad (د)$$

$$\sigma = \sigma_p = q p_0 \mu_p = 1.7 \times 10^{-19} \times 10^{18} \times 450 = 7.65 \times 10^{-8} \text{ (ه)}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 1.31 \times 10^7 \text{ (و)}$$

(۴۹)

$$E_i - E_F = kT \ln \frac{p_0}{n_i} \Rightarrow E_i - E_F = 0.0259 \ln \frac{10^{18}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.463 \text{ eV}$$

علاقه

بسیار نزدیک

٢) جريان اللترتوغا وحقوها و رسم ديلارم باندازي در حالت آمري

$$N_D = 3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_A = 2.9 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3} \quad \text{ب}$$

$$N_A = 10^{11} \text{ cm}^{-2} \quad \text{الف}$$

ب

$$\left. \begin{array}{l} np = n_i^2 \\ n + N_A = p + N_D \end{array} \right\} \Rightarrow np = 2.25 \times 10^4$$

$$n + 2.9 \times 10^{15} = p + 3 \times 10^{15}$$

$$np = 2.25 \times 10^4$$

$$\Rightarrow n(n - 0.1 \times 10^{15}) = 2.25 \times 10^4$$

$$n = p + 0.1 \times 10^{15}$$

$$n^2 - 0.1 \times 10^{15} n - 2.25 \times 10^4 = 0$$

$$a = 0.1 \times 10^{15} - 2(1) \left(-\frac{2.25 \times 10^4}{0.1 \times 10^{15}} \right) = 0.1 \times 10^{15} - 9 \times 10^4 = 1.0 \times 10^{14} - 9 \times 10^4 = (10^4 - 9) \times 10^4$$

$$= 31999 \times 10^4$$

$$n = \frac{0.1 \times 10^{15} \pm 31999 \times 10^4}{2} = \frac{(10000 \pm 31999) \times 10^4}{2} = 2.011 \times 10^{14} = 2.011 \times 10^4$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} \Rightarrow \frac{2.25 \times 10^4}{2.011 \times 10^{14}} = 1.118 \times 10^{-9}$$

٢)

۳) در یک نیمه هادی 1.1×10^{17} الکترون بر سانتیمتر مکعب رسیده مقدار بار حاصل رسیده اصله شود تا سطح خنثی 0.4 eV بالاتر از E_i شود.

$$n_i = 1.5 \times 10^{10}$$

$$kT = 0.0259 \text{ eV}$$

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} \Rightarrow 0.4 = 0.0259 \ln \frac{n_0}{1.5 \times 10^{10}}$$

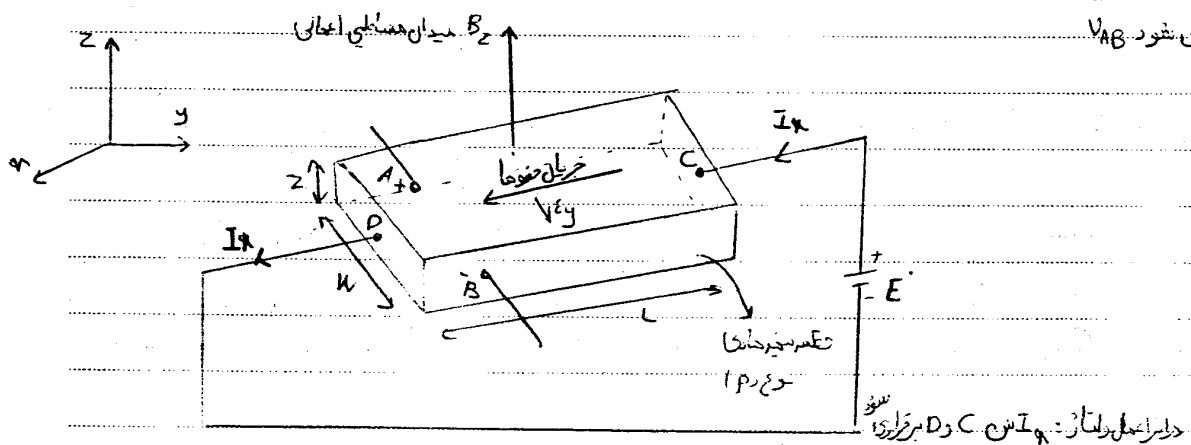
$$\ln \frac{n_0}{1.5 \times 10^{10}} = 15.44 \Rightarrow \frac{n_0}{1.5 \times 10^{10}} = 5.07582 \times 10^6$$

$$n_0 = 7.613 \times 10^{16} \Rightarrow n_0 = 7.3 \times 10^{16}$$

۸۴، ۱۲۵

اثر هال (Hall Effect) :
 - نیروی جاری
 - جابجایی حاملان الکتریکی
 - موصلیتی

موضوع آزمایش: اثر هال در یک نیمه هادی جریان به سرعت در یک میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان اعمال شود ولتاژی (در دو سر) ظاهر می شود V_{AB} .



هتینا الکتریکی را می توان به صورت $V_{AB} = R_H \cdot I_x \cdot B_z$ و ولتاژ اترهال

با اعمال میدان مغناطیسی B_z نا هتونی بر روی n و p حامل های حامل حفره ای حرکت از سمت D به سمت C و A به سمت B (در نیمه هادی p)

اما ولتاژ V_{AB} اجزای شود (در دو نیمه لاری)

اگر ولتاژها ۱) یعنی نوع پهنه گذاری $\Rightarrow R_H > 0 \rightarrow$ پهنه های نوع P $V_{AB} > 0$ if

2) $\Rightarrow R_H < 0 \rightarrow$ پهنه های نوع n $V_{AB} < 0$ if

روابط ریاضی

$$F_z = q(\epsilon + V_x B_z)$$

$\uparrow$ مغناطیسی
 $\downarrow$ سرعت حاملها
 $\rightarrow$ نیروی وارد بر هر جفت الکترون میدان الکتریکی و مغناطیسی

با توجه به اینکه با اعمال B هیچ تأثیری در مقدار I_x ایجاد نمی شود پس نیروی در جهت y رخ داده اعمال نمی شود.

$$F_y = q(\epsilon_y - V_x B_z) = 0 \Rightarrow \begin{cases} \epsilon_y = V_x B_z \\ \text{قبلاً } J_x = q P_0 V_x \end{cases} \Rightarrow \epsilon_y = \frac{J_x}{q P_0} B_z \quad (1)$$

$$R_H = \frac{1}{q P_0} \left(\frac{cm^2}{c} \right) \quad \text{ضریب هال}$$

$$\Rightarrow \epsilon_y = \frac{J_x}{q P_0} R_H B_z$$

$$\Rightarrow R_H = \frac{\epsilon_y}{\frac{J_x}{q P_0} B_z}$$

$$\epsilon_x = q P_0 V_x \rightarrow V_x = \frac{\epsilon_x}{q P_0}$$

①

۲) تعیین وابستگی حاملهای اکثریت

$$R = \frac{V}{I_x}$$

$$n \text{ نوع } \delta = \delta_n = q n_i \mu_n$$

$$n_i \leftarrow n \text{ نوع}$$

$$j = \frac{I_x}{A}$$

$$P_i \leftarrow P \text{ نوع}$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \rightarrow \rho = \frac{RA}{L}$$

$$\delta = \delta_p = q P_i \mu_p$$

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

$$\delta \text{ حاملی } = q n_i (\mu_n + \mu_p)$$

۴۲

$$R_H = \frac{-1}{q n}$$

٣) تفسیر قابلیت تحرک حاملها (م. ٤، ٤.١)

- تفسیر قابلیت تحرک حاملی الکتریکی:

$$P_H = \frac{1}{q R_H} = \frac{J_H B_z}{q E_y} = \frac{\frac{I_H}{W \cdot z} \cdot B_z}{q \frac{V_{AB}}{W}} = \frac{I_H B_z}{q z V_{AB}}$$

$$\Rightarrow P_H = \frac{I_H B_z}{z q V_{AB}}$$

تفسیر قابلیت تحرک حاملها:

$$R = \frac{V_{CD}}{I_H} = \rho \frac{L}{W \cdot z}$$

$$\rho = \sigma^{-1}$$

$$\rho = q p \mu_p \Rightarrow \mu_p = \frac{\sigma}{q p} = \sigma R_H$$

مثال) در یک نمونه Si ، 10^{14} اتمهای دهنده ($N_D = 10^{14}$) با حامل یکنه مطابقت کامل به مقاومت کمون P و مقاومت ولتاژهای را در نظر بگیرید و مشخص کنید.

$$\mu_n = 1400 \frac{cm^2}{Vs}$$

$$B_z = 10^{-5} \frac{wb}{cm}$$

$$I_H = 1.00 A$$

$$z = 1.00 cm$$

$$N_A = N_D = 10^{14} \text{ خیالی فلزها}$$

$$\sigma_n = q n \mu_n = 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{14} \times 1400 = 2.24 \times 10^{-4} (scm)^{-1}$$

$$\frac{1}{\sigma_n} = 4.46 \times 10^3 scm$$

⊙

$$R_H = \frac{-1}{qn_s} = -92,0 \frac{\text{cm}^3}{\text{C}}$$

$$V_{AB} = \frac{I_{AB} R_H}{z} = \frac{(10^{-3} \text{A}) (10^{-5} \frac{\text{cm}^3}{\text{C}})}{10^{-2} \text{cm}} \times (92,0) \frac{\text{cm}^3}{\text{C}}$$

$$V_{AB} = -92,0 \text{ mVolt}$$

منفی به ظاهر پهنی‌های نوع n است.

تغییر پهنی سطحی E_F :

حالت تعادل: هر یک به یکسایز خود در یک طرف و در طرف دیگر هم به هم می‌رسند. فقط در حالت تعادل است که هیچ جریانی وجود ندارد.

در حالت تعادل: $\frac{dE_F}{dn} = 0$ و در حالت تعادل الکترون‌ها و پهنی‌های به هم می‌رسند و در طول پهنی‌های ها

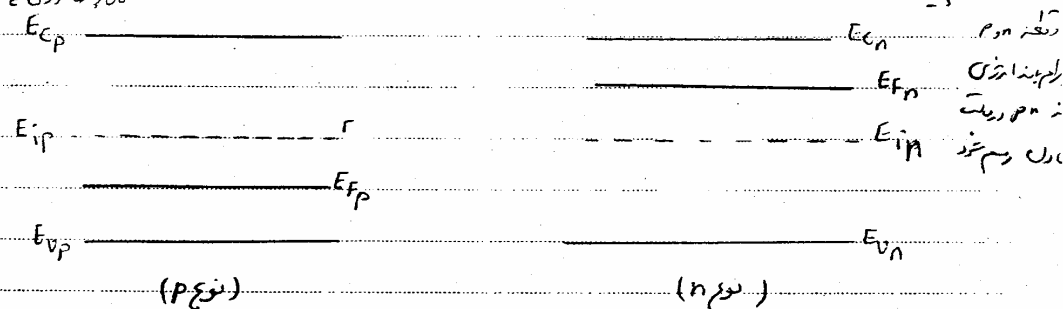
میزان می‌باشد. جریان صفر است.

با یکدیگر می‌توانند.

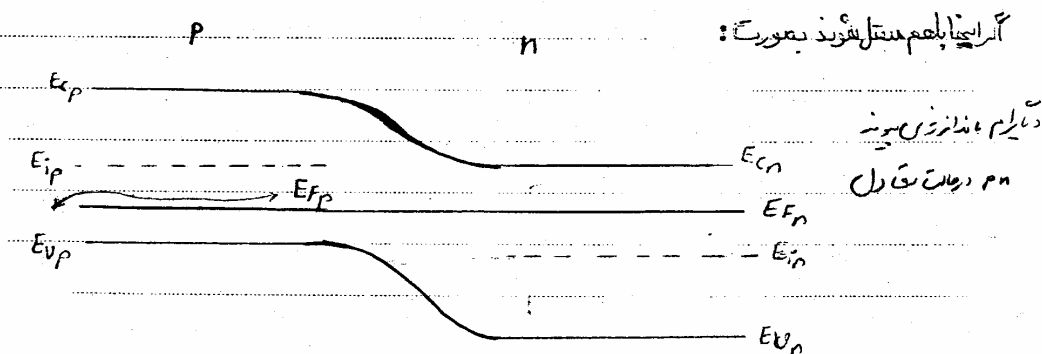
چون در یک نیمه‌هادی، سطح انرژی در حالت تعادل در هر دو طرف تغییر نمی‌کند.

مثال: پیوند pn در حالت تعادل

۱ ماده	۲ ماده
E_{F1}	E_{F2}
E_{C1}	E_{C2}
E_{V1}	E_{V2}



آنها با هم متصل می‌شوند به صورت:



(۴)

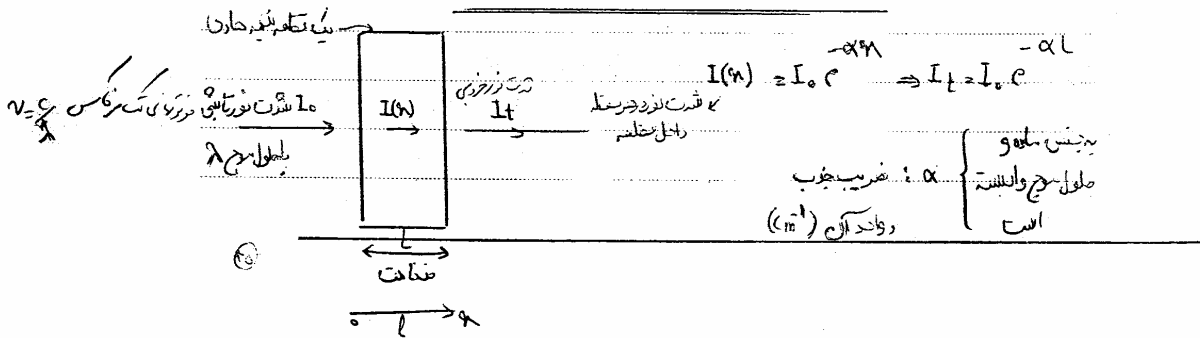
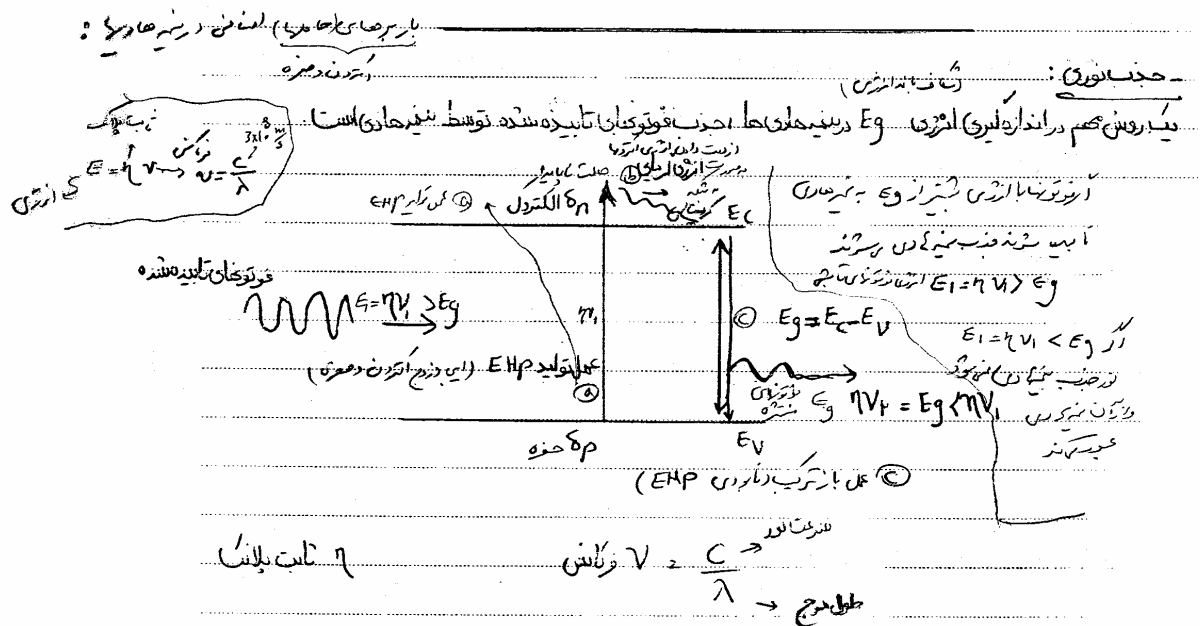
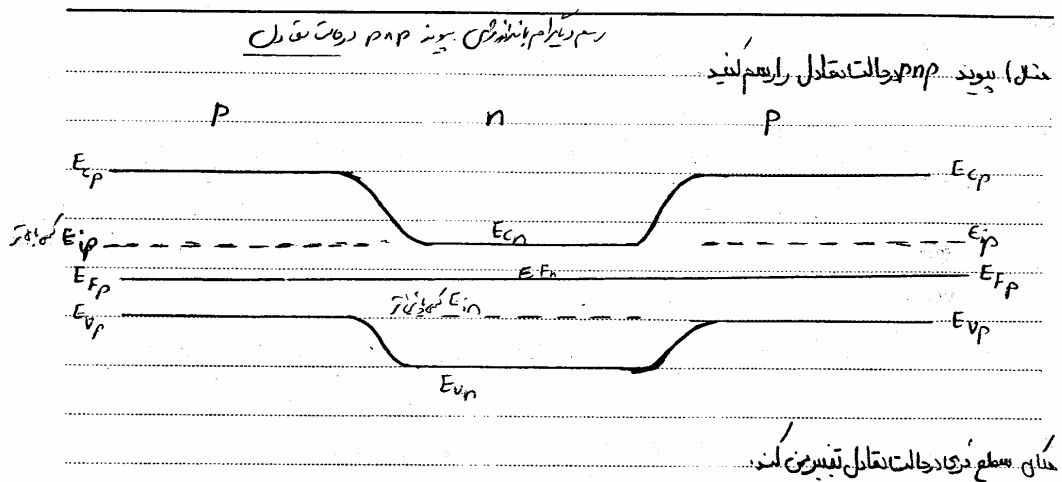
$$r_1 = \text{تعداد الکترون‌ها} \propto N_1(E) f_1(E) N_2(E) (1 - f_2(E))$$

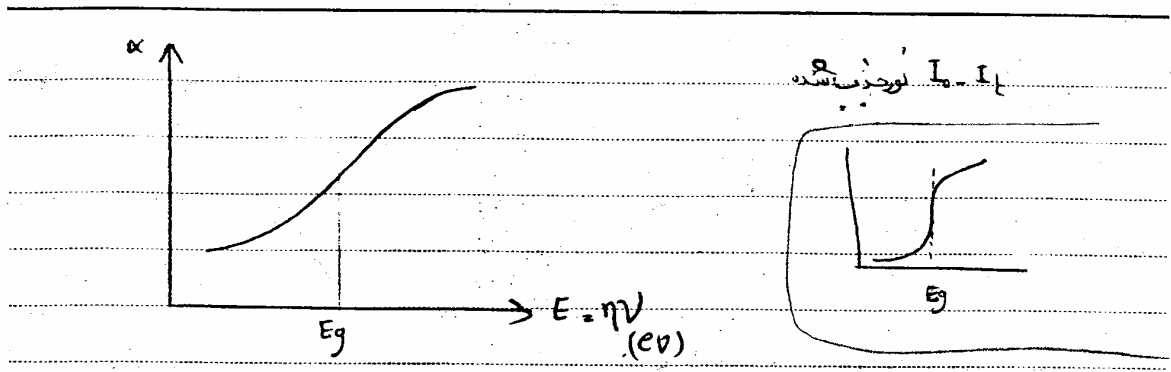
$$r_2 = \text{تعداد الکترون‌ها} \propto N_2(E) f_2(E) N_1(E) (1 - f_1(E))$$

$$\rightarrow r_1 = r_2 \quad N_1 f_1 N_2 (1 - f_2) = N_2 f_2 N_1 (1 - f_1)$$

$$N_1 f_1 N_2 - N_1 N_2 f_1 f_2 = N_1 f_2 N_2 - N_1 N_2 f_1 f_2$$

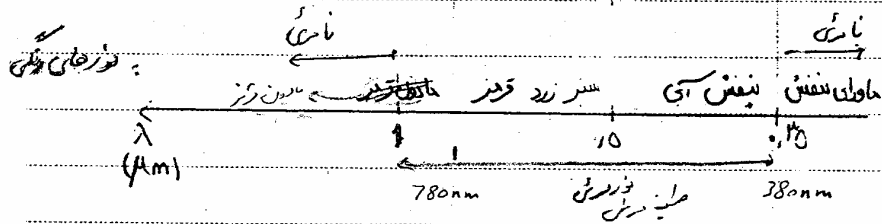
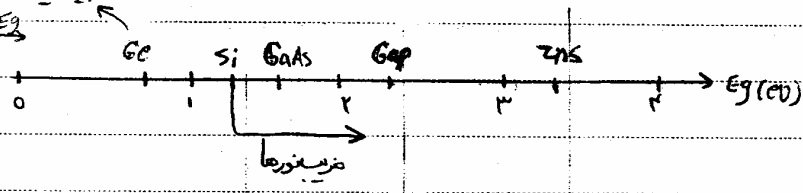
$$\rightarrow f_1(E) = f_2(E) \quad (1 + e^{\frac{E - E_{F1}}{kT}})^{-1} = (1 + e^{\frac{E - E_{F2}}{kT}})^{-1} \rightarrow E_{F1} = E_{F2}$$





$$E = \eta V = \eta \frac{c}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \Rightarrow E = \frac{1.24}{\lambda} \text{ (eV)}$$

بیشترین راندها به خودی خود می‌اند
و E_g نیز دارای مختلف

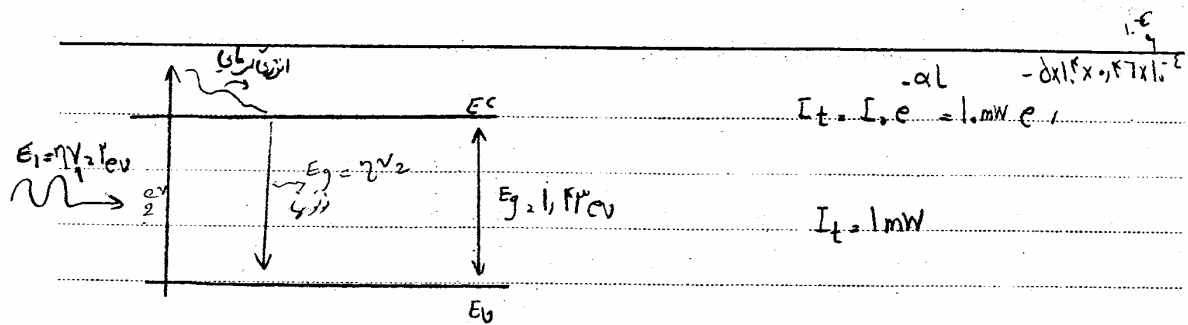


مطلوب $E_g < \eta V$ if

مثال: در یک نمونه GaAs با ضخامت $0.1 \mu m$ و نور تک رنگ با $2.2 eV$ تابیده شده منطبق $\alpha = 5 \times 10^4 cm^{-1}$ می‌باشد.

توان تابشی به نمونه $I_0 = 10 mW$ و $E_g = 1.42 eV$ برای مطلوبیت GaAs

الف) انرژی نل جذب شده توسط نمونه در برابر $I_0 - I_1$ ؟
ب) شرح انرژی گم‌شده را در نمونه به شکل نل از آن و لای
تداوم نل را با منبع چه ؟



الف) $I_0 - I_t = 9 \text{ mW} = 9 \times 10^{-3} \text{ W}$

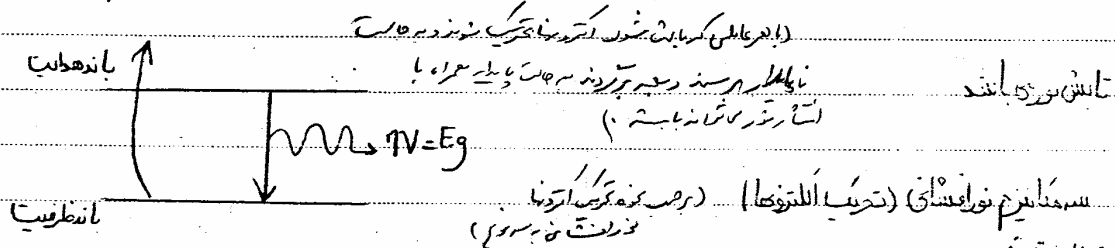
ب) $\frac{1.7 - E_g}{1.7} = \frac{1.43}{1.7} = 0.841$

انرژی برای جذب = انرژی جذب شده = $9 \times 0.841 = 7.569 \text{ mW}$

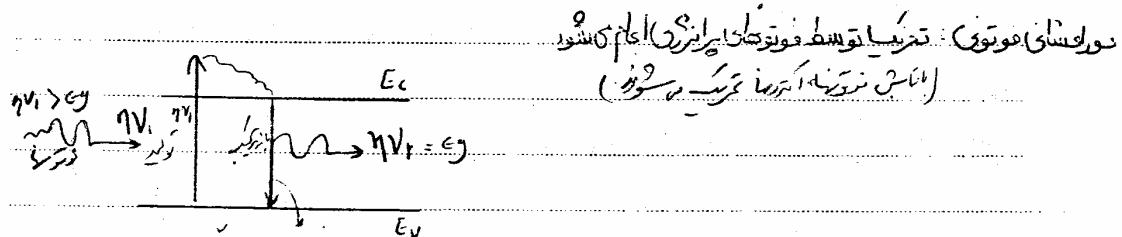
انرژی برای جذب = $7.569 \times 10^{-3} \text{ W}$

انرژی برای جذب = $7.569 \times 10^{-3} \text{ W}$

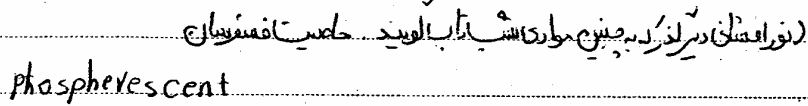
نورافشایی (luminescence): در هنگام بازگشت الکترونهای تحریف شده به حالت تعادل برای گرداندن



نورافشایی (luminescence): در هنگام بازگشت الکترونهای تحریف شده به حالت تعادل برای گرداندن

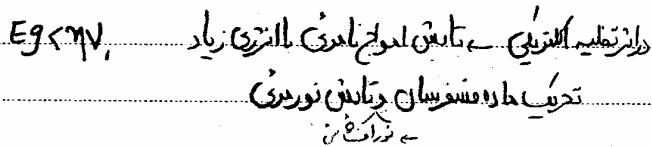


نورافشایی (luminescence): در هنگام بازگشت الکترونهای تحریف شده به حالت تعادل برای گرداندن



phosphorescent

تاریخ ۱۳۰۲



لائقِ فخر و سزا
(حصہ ۱)

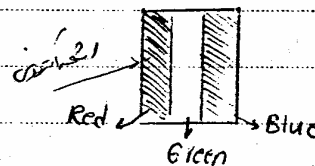
[illegible]

وقت تا لامپ شروع به تابش
25 msec دو باره

والمريض يستفيد من العلاج ٣ مائة لازم است

* بر حسب ایند این ماده چه چیز باشد و نگوی
مختلف دارد

ملویریوں (نئی) ۳ باتوں
(۸۵) تقریریں



RGβ (مارحفاش بصورت نوارها) شمردار

نورافشای الکترونی: در اثر جریان الکتریکی و انتقال حاملهای الکترون و یانز کرب با آنها (در پیوند pn در LED)
 جریان الکتریکی باعث انتقال حاملهای الکترون و یانز کرب می شود که با یکدیگر در ناحیه مشترک پیوند ترکیب می شوند و نور را تابان می دهند.
 در نورافشای الکترونی (LED) در پیوند pn

تفسیرات ریاضی حاملهای اضافی:

$$n_i^2 = n_0 p_0 \Leftrightarrow \begin{cases} n_0 \text{ جایی الکترونها} \\ p_0 \text{ جایی حفرها} \end{cases}$$

در حالت تعادل: $n(t) = n_0 + \delta n(t)$ $p(t) = p_0 + \delta p(t)$
 جایی الکترونها اضافی δn δp جایی حفرها اضافی
 در حالت تعادل: $n_i^2 = n_0 p_0$ $n_i^2 = n_0 p_0$ $n_i^2 = n_0 p_0$

تولید $Eh \nu$ δn δp
 $\delta n = \delta p$

سرعت باز ترکیب: نرخ تولید الکترون = تفسیر ریاضی (جایی) الکترونها و یانز کرب

$$\frac{dn(t)}{dt} = \alpha_v n_i^2 - \alpha_v n(t)p(t)$$

$$\frac{d\delta n(t)}{dt} = \alpha_v n_i^2 - \alpha_v (n_0 + \delta n(t))(p_0 + \delta p(t))$$

$$= \alpha_v n_i^2 - \alpha_v n_0 p_0 - \alpha_v \delta n p_0 - \alpha_v n_0 \delta p - \alpha_v \delta n \delta p$$

$$\frac{d\delta n(t)}{dt} = \alpha_v n_i^2 - \alpha_v (n_0 p_0 + (n_0 + p_0)\delta n + \delta n^2)$$

معادله را برای δn در نظر می گیریم (low injection) $\delta n \ll n_0, p_0$
 $\frac{d\delta n(t)}{dt} = -\alpha_v (n_0 + p_0)\delta n(t)$
 $\delta n(t) = \delta n(0)e^{-\frac{t}{\tau_n}}$
 $\tau_n = \frac{1}{\alpha_v (n_0 + p_0)}$
 $\delta n(0) = \delta n(t=0)$

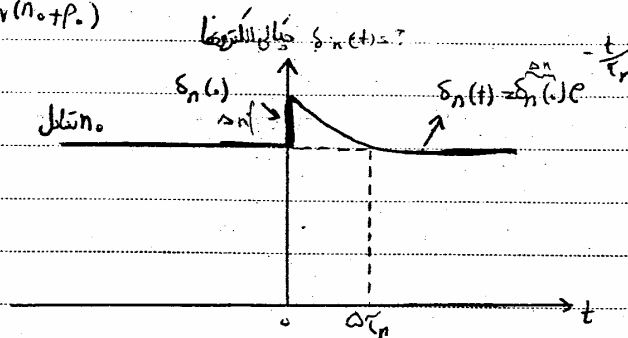
آر را در نظر می گیریم که در $t=0$ حلهای الکتریکی را می بینیم δn
 (نمایند)

سرعت باز ترکیب: $\tau_n = \frac{1}{\alpha_v (n_0 + p_0)}$

$$\frac{d\delta n(t)}{dt} = g(T) - r(T) = \alpha_v n_i^2 - \alpha_v n(t)p(t)$$

تغییر τ_n طول عمر بازنشسته الکترول

$$\frac{1}{\alpha_n(n_0 + p_0)}$$



τ_p طول عمر حفر بازنشسته الکترول است.

مثال: لایه‌های GaAs با $N_A = 1.10^{15} \text{ cm}^{-3}$ با تخلیه‌ی نوری و $n_i = 1.10^{12} \text{ cm}^{-3}$ در لحظه $t=0$ به

اندازه $1.10^{14} \text{ cm}^{-3}$ تولید شود تغییرات حاملان اضافی را حساب کنید $\tau_n = \tau_p = 1 \text{ ns}$

$$p_0 = N_A = 1.10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{1.10^{12}}{1.10^{15}} = 1.10^{-3} \text{ cm}^{-3}$$

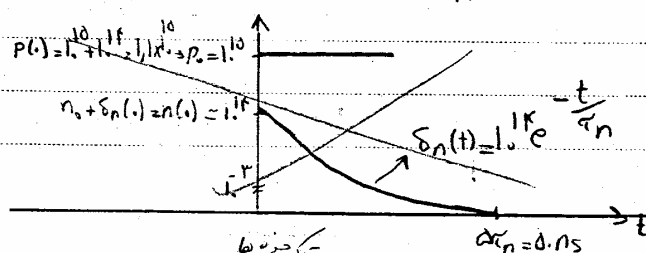
$$\delta n(0) = \delta p(0) = 1.10^{14}$$

$$\delta p(t) = \delta p(0) e^{-t/\tau_p} = 1.10^{14} e^{-t/\tau_p}$$

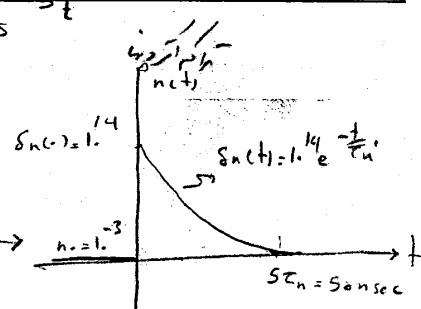
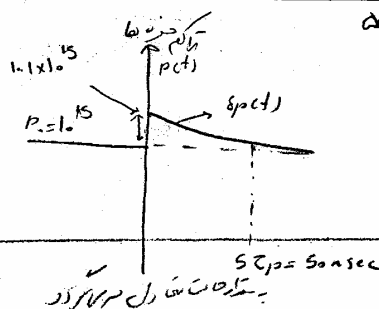
$$\delta n(t) = \delta n(0) e^{-t/\tau_n} = 1.10^{14} e^{-t/\tau_n}$$

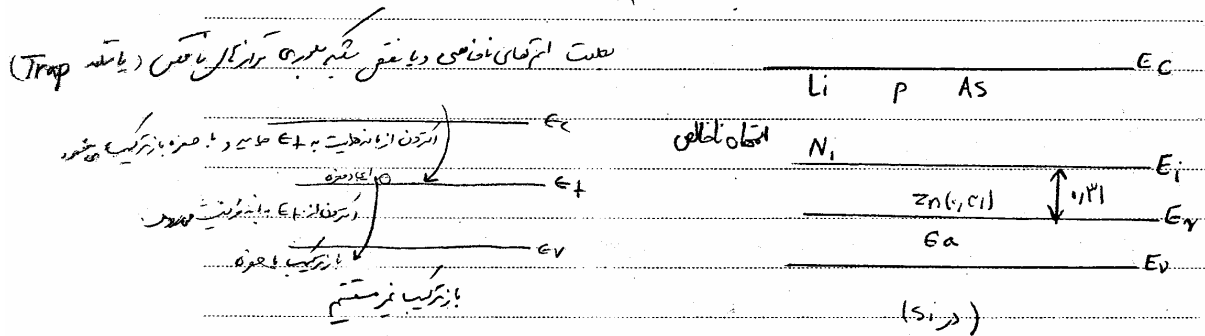
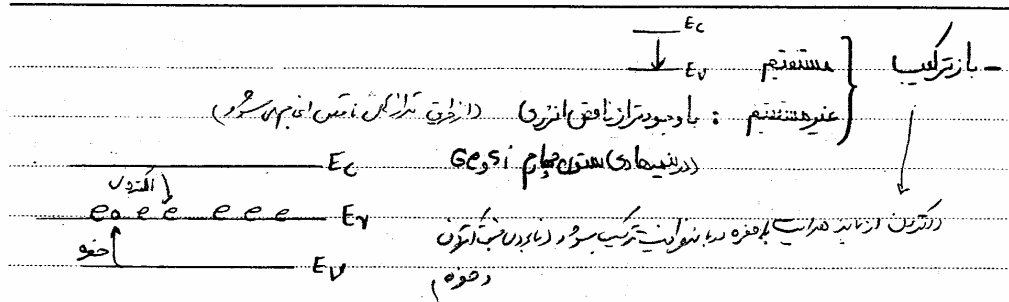
$$t \rightarrow p(t) = p_0 + \delta p(t) \Rightarrow p(t) = 1.10^{15} + 1.10^{14} e^{-t/\tau_p}$$

$$t \rightarrow n(t) = n_0 + \delta n(t) \Rightarrow n(t) = 1.10^{-3} + 1.10^{14} e^{-t/\tau_n}$$



(c)





تولید داندنار حامله

تولید نوری حامله، تولید نوری ختم باشند در انحصاری

تولید نوری حامله، تولید نوری ختم باشند در انحصاری

نرخ باز ترکیب = تولید نوری + تولید حامله

$$g(\pi) + g_{op} = \alpha_r n p$$

$$\alpha_r n_i^2 + g_{op} = \alpha_r (n_0 + \delta_n)(p_0 + \delta_p) = \alpha_r n_0 p_0 + \alpha_r [(p_0 + n_0)\delta_n + \delta_n^2]$$

$\delta_p = \delta_n$

صورت نظر از δ_n^2

$\Rightarrow g_{op} = \alpha_r (n_0 + p_0) \delta_n$

تولید نوری

تولید نوری

تولید نوری

$\frac{1}{\alpha_r (n_0 + p_0)}$

$g_{op} = \frac{\delta_n}{\tau_n}$

$\delta_n = g_{op} \cdot \tau_n$

کاملی آنتروپای

انتقالی و حالت داندنار

مثال: در مثال قبل ترازهای انرژی را بدست آورید

$$n = 1.2 \times 10^{14} \Rightarrow n = n_i e^{\frac{F_n - E_i}{kT}}$$

$$F_n - E_i = kT \ln \frac{n}{n_i} \Rightarrow F_n - E_i = 0.0259 \ln \frac{1.2 \times 10^{14}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.233 \text{ eV}$$

تفاوت انرژی نوارهای رسانندگی و نوارهای ظرفیت

$$E_i - F_p = kT \ln \frac{p}{n_i} = 0.0259 \ln \frac{2 \times 10^{13}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.187 \text{ eV}$$

محاسبه عرض نوارهای ظرفیت و رسانندگی در دو ناحیه نر (در حالت تعادل)

در دو ناحیه نر:

$$\delta n = g_p \tau_n$$

$$\delta p = g_p \tau_p$$

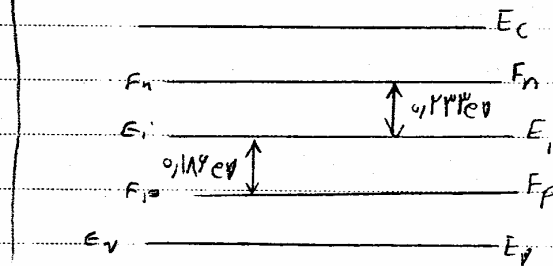
$$k = q (n_p \mu_n + p_p \mu_p)$$

$$\Delta \sigma = q (\delta n \mu_n + \delta p \mu_p)$$

$$= q g_p (\tau_n \mu_n + \tau_p \mu_p)$$

$$= 1.84 \times 10^{-4} \text{ S/cm}$$

در صورتی که در دو ناحیه نر، دما را از 300K به 400K تغییر دهیم، دما را از 300K به 400K تغییر دهیم، دما را از 300K به 400K تغییر دهیم.

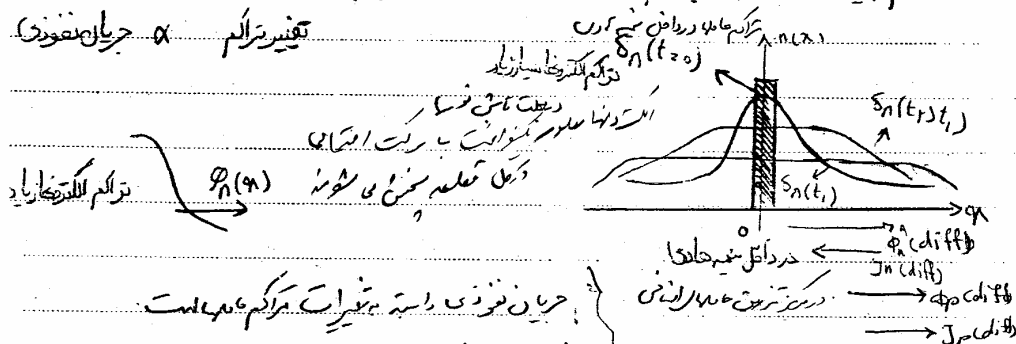


* در حالت تعادل بدون حاملهای اضافی $F_n = F_p = E_f$

جریان نفوذی (Diffusion):

از چلی به حاملهای ارای تراکم بیشتر هستند به چلی با تراکم کمتر هستند و این تفاوت باعث ایجاد جریان می شود.

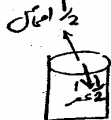
تغییر تراکم $\propto$ جریان نفوذی



جریان نفوذی رابطه مستقیم با تراکم حاملهاست

$$J_p(\text{diff}) \propto \frac{dp}{dx}$$

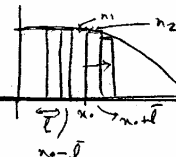
$$J_n(\text{diff}) \propto \frac{dn}{dx}$$



جریان در یک مدار الکتریکی است

در این مدار، جریان در یک مدار الکتریکی است

طول موصل به حامل بین از مقیاس سیمون مرشد
دستگاه E نواحی وسط آزاد



تیمه باقی می ماند

* $J_n = -q D_n \frac{dn(x)}{dx}$

جریان نفوذی الکترون

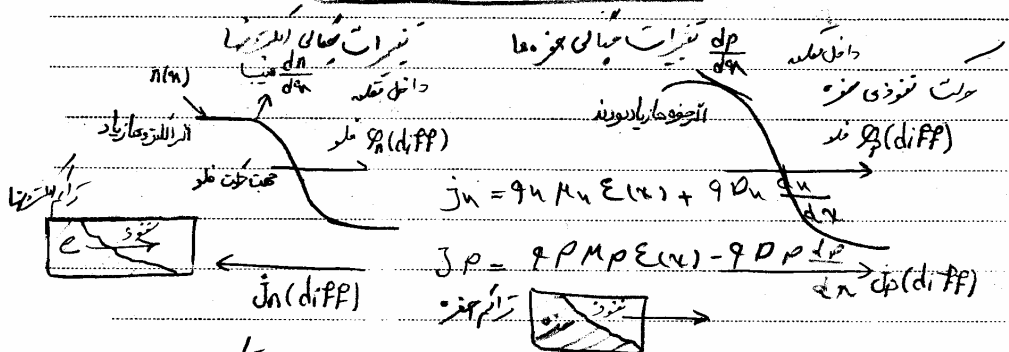
$q D_n \frac{dn(x)}{dx}$

جریان الکترون $n(x)$

$D_n \left(\frac{cm^2}{sec} \right)$

* $J_p (diffusion) = -q D_p \frac{dp(x)}{dx}$

جریان نفوذی حفرها



$J_n (drift) = q n \mu_n E(x)$

$J_p (drift) = q p \mu_p E(x)$

$E(x)$

$J_n (drift)$

$J_p (drift)$

$J_n (drift)$

$J_p (drift)$

$J_n (drift)$

$J_p (drift)$

$J_n (drift)$

$J_p (drift)$

$J_n (drift)$

$J_p (drift)$

$J_n (drift)$

$J_p (drift)$

$J_n (drift)$

$J_p (drift)$

$J_n (drift)$

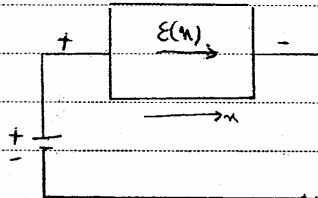
$J_p (drift)$

$$J_p(\text{drift}) + J_p(\text{diff}) = 0$$

$$q p n_1 \mu_p E(x) - q D_p \frac{dp(x)}{dx} = 0$$

رابطه میدان الکتریکی و انرژی الکتریکی $E(x)$ و پتانسیل الکتریکی $V(x)$ متناهی الکتریکی

فرض: یک قطعه نیمه رسانا در یک پتانسیل الکتریکی

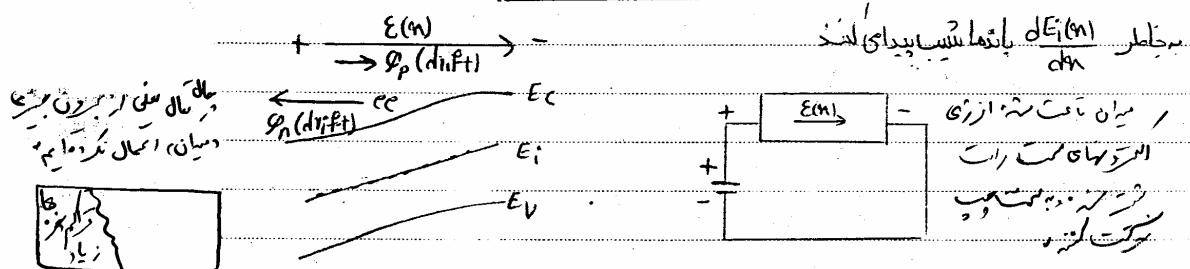
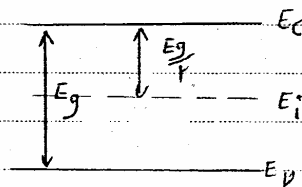


$$E(x) = - \frac{dV(x)}{dx}$$

$$\frac{dV}{dx} < 0$$

$$E(x) = \frac{1}{q} \frac{dE_i(x)}{dx} = \frac{1}{q} \frac{dE_i(x)}{dx}$$

معادلات E_i متناسب با تغییرات dE حساب



نسبت بوجود آمده باعث افزایش انرژی الکتریکی الکتریکی در سمت راست می شود و می تواند ایجاد

در جهت برعکس می شود

در جهت برعکس می شود
در جهت برعکس می شود
در جهت برعکس می شود

65

$$J_p = J_p(\text{drift}) + J_p(\text{diff})$$

$$J_p = q p n_1 \mu_p E(x) - q D_p \frac{dp(x)}{dx}$$

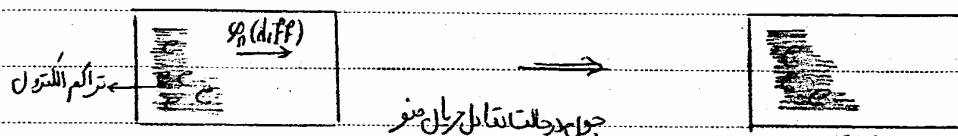
$$J_p = 0 \rightarrow E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx}$$

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

$$\frac{dp}{dx} = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} \times \frac{1}{kT} \left(\frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right) = p \times \frac{1}{kT} \frac{dE_i}{dx}$$

در حالت تعادل (بدون اعمال ولتاژ خارجی و میدان خارجی) یعنی نور پس‌تابنده نشود و طیف مادانه نفعود. پس جریان داخلی بین‌های متعادلست.

فرقی: در یک بین‌های در حالت تعادل:

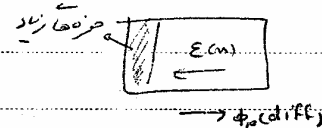


اهت پس، باید میدان الکتریکی داخلی ایجاد شود که باعث حالت تعادل نگه‌داران منو شود. جهت میدان الکتریکی تا الکترون‌ها صاف ماند.

میدان الکتریکی ساخته شده داخلی به منظور منو شدن جریان در حالت تعادل
Buttin

$$J_p = 0 = J_p(diff) + J_p(drift) = q p \mu_p E(x) - q D_p \frac{dp}{dx} = 0$$

$$E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$



در داخل
جول منو کردن در حالت
تعادل

$$p(x) = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}$$

$$\frac{dp}{dx} = \frac{n_i}{kT} e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} \left(\frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx} \right)$$

در حالت تعادل هیچ نیروی خارجی نیست

$$(2) \quad \frac{dp}{dx} = \frac{p}{kT} q E(x)$$

①, ④ $\epsilon(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{P} \frac{P}{kT} q \epsilon(x) \Rightarrow \boxed{\frac{kT}{q} = \frac{D_p}{\mu_p}}$ رابطه اینشتین

(نسبت ترمینال به یکدیگر است و همین در برابر است)

رابطه اینشتین: نسبت ضرایب نفوذ به موبیلیتی همواره در هر دمای مشخص ثابت است

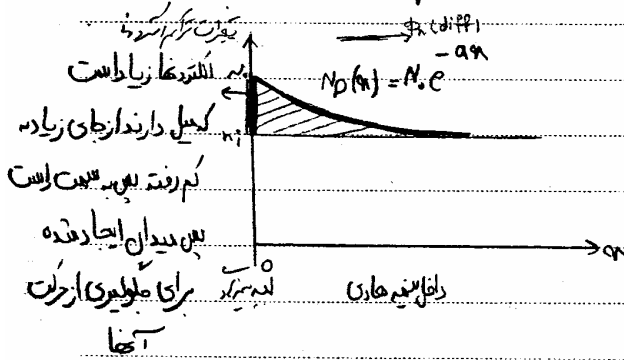
$$\frac{kT}{q} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{D_n}{\mu_n}$$

$\frac{kT}{q} = 0.0259 \text{ eV}$, $T = 300 \text{ K}$ در

	$\frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$	$\frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$	μ_n	μ_p
Ge	100	50	3900	1900
Si	38	12.5	1350	480

مثال: اگر در یک سیلیکون خالی از ناخالصی، طوری ناخالصی داریم که $N_D(x) = N_0 e^{-ax}$ در حالت تعادل میدان

$a = \frac{1}{1.5 \text{ cm}}$, $\frac{kT}{q} = 0.0259 \text{ eV}$



$\epsilon(x) = ?$
 $a = 1 \text{ (cm)}^{-1} = \frac{1}{1.5 \times 10^{-6}} = \frac{1}{1.5 \times 10^{-4} \text{ cm}}$

$$J_n = J_n(\text{drift}) + J_n(\text{diff})$$

$$J_n = q n \mu_n E(x) + q D_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_n = 0 \rightarrow E(x) = -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx}$$

در حالت تعادل $J_n = 0$ (چون برای مرکزین جریانی)
 $J_n(\text{drift}) + J_n(\text{diff}) = 0$

$$0 = J_n = q n \mu_n E(x) + q D_n \frac{dn}{dx}$$

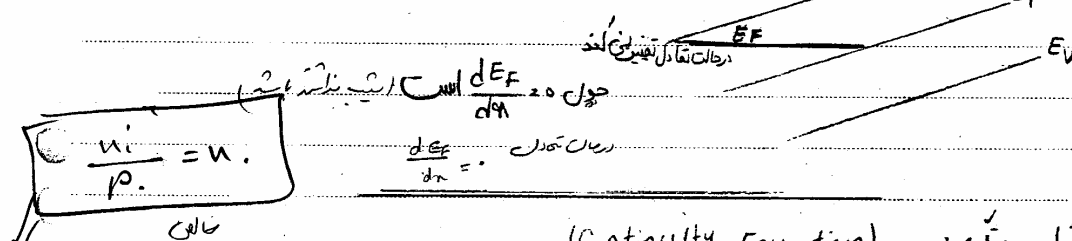
$$E(x) = - \left(\frac{D_n}{\mu_n} \right) \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} \quad n \approx N_D(x) = N_D e^{-ax}$$

$$E(x) = - \frac{kT}{q} \frac{1}{N_D e^{-ax}} (-N_D a e^{-ax})$$

$$E(x) = \frac{kT}{q} a$$

$$E(x) = 0.0259 \times \frac{1}{1.4} \Rightarrow E(x) = 18.9 \frac{V}{cm}$$

$$E(x) = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx}$$



معادله پیوستگی (Continuity Equation):

$$u_i: \delta = 9 n_i (m_p + m_n)$$

$$n \gg p, \delta = \delta_n = q u \cdot m_n \rightarrow \text{نوع n}$$

$$n \ll p, \delta = \delta_p = q u \cdot m_p \rightarrow \text{نوع p}$$

مسئله بازگشت در حالت تعادل: در حالت تعادل، تغییر در دensities می شود. $\delta = \delta^{-1} (n \cdot m_n)$ - ضریب بازگشت

$$\begin{aligned} J_p(x) &= q n_i \mu_p \delta = q (u \cdot m_n) \\ n_i &= 10^{17} \text{ cm}^{-3} \\ \delta &= 1.6 \times 10^{-10} \cdot (10^{17} \times 10^{18}) \rightarrow \delta = 1.6 \times 10^{-10} \\ \frac{\delta}{p} &= \frac{1.6 \times 10^{-10}}{31 \times 10^{17}} = 5.16 \times 10^{-28} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= N_A - N_D \quad N_A \gg N_D \\ &= N_D - N_A \quad N_A = 10^{18}, N_D = 10^{17} \end{aligned}$$

فرضیات: $\delta \ll n_i$

تجزیه: در یک نیمه هادی، δ با اتمهای دهنده و گیرنده تغییر می کند. δ کمالات اضافی ناشی از دهنده N_D

تجزیه: δ به تغییر نوع نیمه هادی و در سطح انرژی فرکانس δ رسم می شود. δ کمالات اضافی ناشی از گیرنده N_A

تجزیه: δ به تغییر نوع نیمه هادی و در سطح انرژی فرکانس δ رسم می شود. δ کمالات اضافی ناشی از گیرنده N_A

$$u_i = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}} \quad \mu_n = 1080 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \quad \mu_p = 320 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \quad kT = 0.0259 \text{ eV}$$

$$E_g = 1.1 \text{ eV}$$

$$n_i = 1.5 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$$

$$319 \text{ cm}^{-3}$$

$$kT = 0.0259 \text{ eV}$$

نرخ بازتولید - افزایش تراکم جاندار = تغییرات زمانی خدای جاندار
 حجم جمع ΔN_A در جمع ΔN_A
 درواغزبان

معادله دیفرانسیل

$$\frac{\delta p}{\delta t} = \frac{1}{q} \frac{\delta J_p}{\delta n} - \frac{\delta p}{\tau_p}$$

معادله دیفرانسیل

$$\frac{\delta n}{\delta t} = \frac{1}{q} \frac{\delta J_n}{\delta n} - \frac{\delta n}{\tau_n}$$

نرخ بازتولید

معادله دیفرانسیل

معادله دیفرانسیل: از قرار دادن جریانه‌های دیفرانسیل در معادله دیفرانسیل، به دست می‌آید

$$J_p(\text{diff}) = -q D_p \frac{\delta p(n)}{\delta n}$$

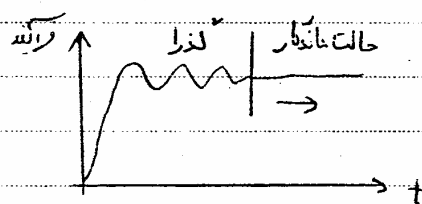
$$J_n(\text{diff}) = q D_n \frac{\delta n(n)}{\delta n}$$

معادلات دیفرانسیل

$$\frac{\delta p}{\delta t} = D_p \frac{\delta^2 p(n)}{\delta n^2} - \frac{\delta p(n)}{\tau_p}$$

$$\frac{\delta n}{\delta t} = D_n \frac{\delta^2 n(n)}{\delta n^2} - \frac{\delta n(n)}{\tau_n}$$

چون هم تغییرات زمانی و هم فضای وجود دارد
 یعنی حالت ماندگار را دنبال می‌کنیم.



حالت ماندگار (steady state)

تمرین ۲) تراکم درسیا و صفرها با رسم سیرام به اندازه‌گیری روفات

$$n_i = 1.5 \times 10^{16}$$

$$kT = 0.0259 \text{ eV}$$

$$N_A = 1.18 \times 10^{23} \text{ (لیت)}$$

$$N_A = 2.9 \times 10^{15}, N_D = 3 \times 10^{15} \text{ (ب)}$$

در می‌توانیم حالت‌های نوسانی را با استفاده از معادله دیفرانسیل

$$\frac{\delta \delta n}{\delta t} \rightarrow \text{در حالت ماندگار}$$

$$\frac{\delta \delta p}{\delta t} \rightarrow \text{معمولاً مشتق دوم تغییرات زیاد نیست}$$

یعنی مدالات دیفرانسیل در حالت ماندگار صورت می‌گیرد:

$$\frac{\delta^2 \delta p}{\delta n^2} = \frac{\delta p}{p_p \tau_p} = \frac{\delta p}{L_p^2}$$

$L_p^2 = p_p \tau_p$ را طول دیفرانسیل (m) می‌نامیم که مشخص می‌کند که چقدر قبل از بازگشت به حالت ماندگار می‌تواند.

$$\frac{\delta^2 \delta n}{\delta n^2} = \frac{\delta n}{p_n \tau_n} = \frac{\delta n}{L_n^2}$$

$$L_n^2 = p_n \tau_n$$

L_n طول دیفرانسیل

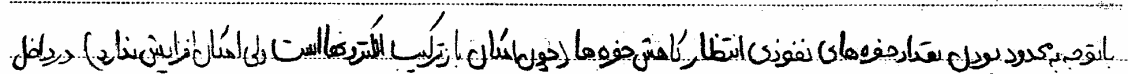
$$\left[\frac{\delta^2 \delta p}{\delta n^2} = \frac{\delta p(n)}{L_p^2} \right] \rightarrow \delta p(n) = A e^{\frac{n}{L_p}} + B e^{-\frac{n}{L_p}}$$

A و B از روی شرایط مرزی بدست می‌آید.

مثال ۳) یک تونل با 5×10^{-16} اتم بر ثانیه نفوذ شده می‌باشد. دما ۳۰۰ کلوین است. چقدر طول تونل است؟

$$h_i = 1.5 \times 10^{-16} \text{ اتم بر ثانیه}$$

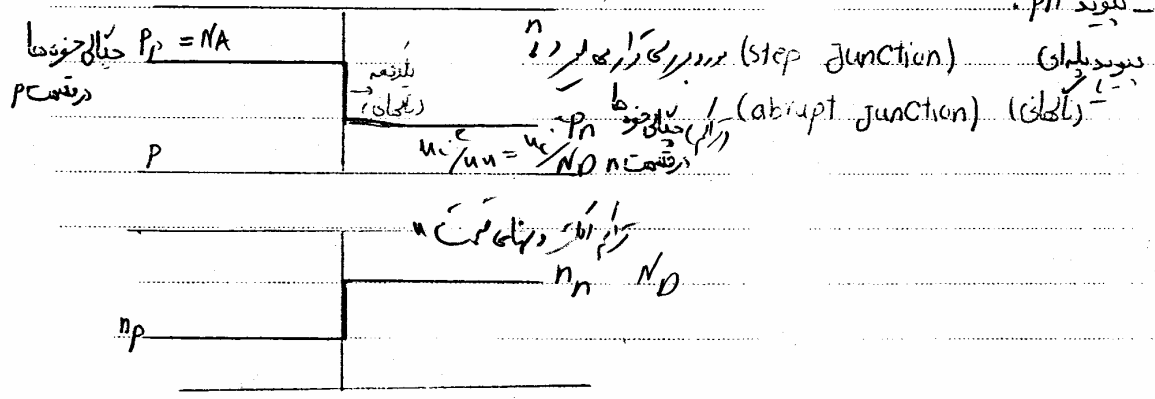
$$kT = 0.0259 \text{ eV}$$



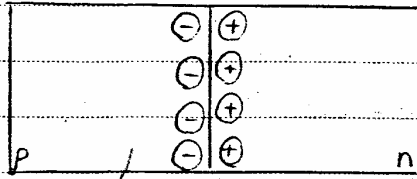
$$n \rightarrow \infty \Rightarrow A e^{\frac{n}{L_p}} \rightarrow \infty \Rightarrow \delta p \rightarrow \infty \text{ (not possible)} \rightarrow A = 0 \Rightarrow \delta p(n) = B e^{-\frac{n}{L_p}}$$

$\delta p(\cdot) = \Delta p = B e^{\cdot} = B$
 $\delta p(x) = \Delta p e^{-\frac{x}{L_D}}$
 $\int p = -q D_p \frac{\delta p}{\delta x} = q \frac{D_p}{L_D} B D e^{-\frac{x}{L_D}}$
 $\delta p(x) = ?$
 $\int p(x) = ?$
 ۲. چنانچه دیتایی خود را وارد کرد ۱/ مقدار اولیه را بزند

فصل دوم
- تولید ipn:



الکترونهای منفی و مثبت اتمهای شبه لایه

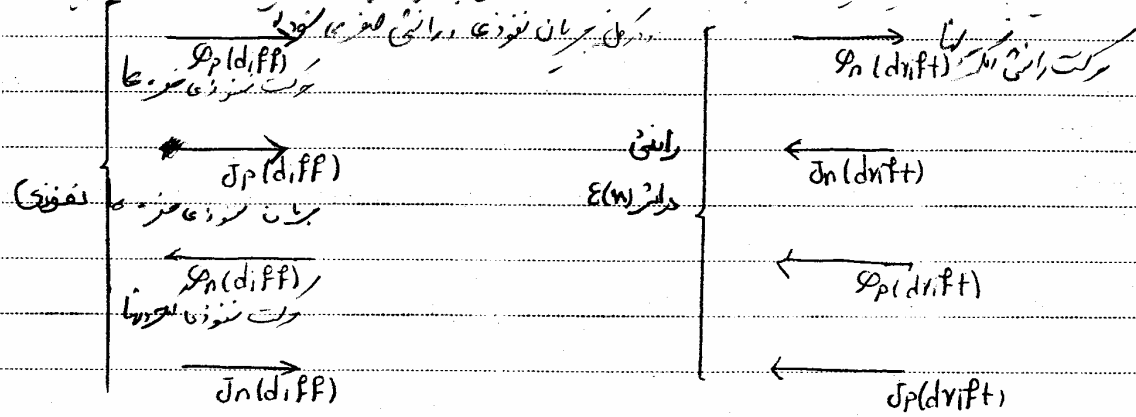


پیوند بلای p-n در حالت تعادل: یعنی تحت ولتاژ خارجی قرار ندارد.

در میان همزیستی:

در محل پیوند پیوند عایق از سمت p نفوذ می کرده و از سمت n نفوذ می کرده.

در نتیجه در محل پیوند پیوند مثبت و منفی ایسی مانده که با دیت میال الکتریکی می کنند و ایجاد جریان درونی می کنند.



در حالت تعادل:

$$J_n = J_n(drift) + J_n(diff) = 0$$

$$J_p = J_p(drift) + J_p(diff) = 0$$

transition Region

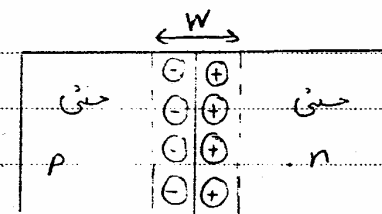
منطقه انتقال

Depletion Region

ناحیه تخلیه

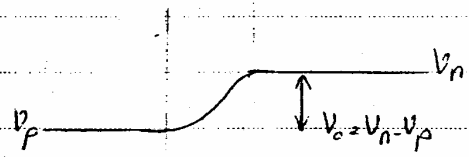
space charge Region

ناحیه بار فضایی



جریان فضایی مثبت و منفی در منطقه n

تفاوت پتانسیل پیوند در حالت تعادل



نموده یعنی: پتانسیل پیوندی حالت تعادل: $J_p = J_p(\text{drift}) + J_p(\text{diff}) = 0$

$$J_p = q p \mu_p E(x) - q D_p \frac{dp}{dx} = 0$$

$$E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx}$$

$$\frac{-dV(x)}{dx} = \left(\frac{kT}{q} \right) \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \xrightarrow{\text{انتگرال زدن}} \int_{V_p}^{V_n} dV = \frac{kT}{q} \int_{p_p}^{p_n} \frac{1}{p} dp \Rightarrow -(V_n - V_p) = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

$$p_p = N_A$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$\textcircled{1} \Rightarrow V_o = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n} \Rightarrow V_o = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{\frac{n_i^2}{N_D}}$$

$$V_o = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$\textcircled{1} e^{\frac{qV_o}{kT}} = \frac{p_p}{p_n} = \frac{\frac{n_i^2}{n_p}}{\frac{n_i^2}{n_n}} = \frac{n_n}{n_p} \quad \begin{matrix} \text{نسبت تراکم حاملان در ناحیه n} \\ \text{نسبت تراکم حاملان در ناحیه p} \end{matrix} = e^{\frac{qV_o}{kT}}$$

مثال: در یک پیوندی با p_n در حالت تعادل، رسم پتانسیل و پتانسیل با ولتاژ بیرونی V_o از روی آن و نتایج به دست می آید.

$$N_A = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$

$$N_D = 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$$

$$n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

سطح ولتاژ پیوندی نسبت به مشخص شود: به حل

$$N_A = p_p = n_i e^{\frac{E_{ip} - E_{fp}}{kT}}$$

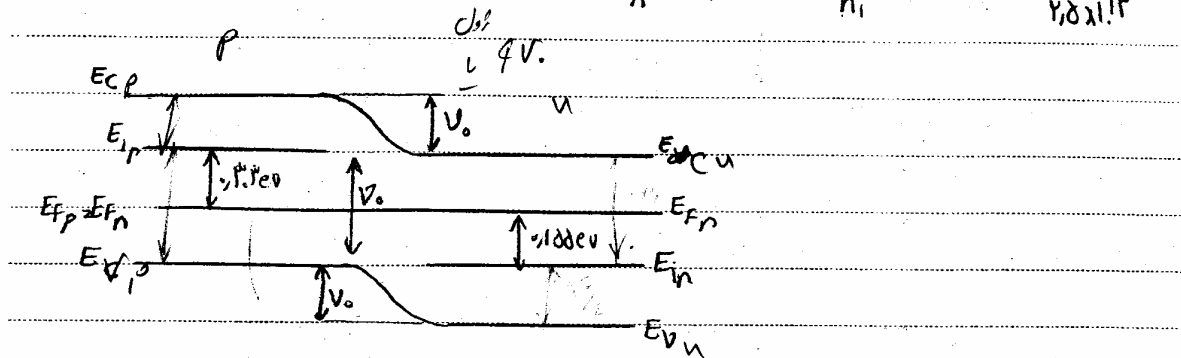
$$kT = 0.0259 \text{ V}$$

تقسیم بر 9 نسبت به kT را بر

حساب کرده بود تقسیم بر 9 است

$$E_{ip} - E_{fp} = kT \ln \frac{p_p}{n_i} = 0.0259 \ln \frac{3 \times 10^{18}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.32 \text{ eV}$$

$$n \approx N_D = n_n = n_i e^{\frac{E_{F_n} - E_{i_n}}{kT}} \Rightarrow E_{F_n} - E_{i_n} = kT \ln \frac{N_D}{n_i} = 0.0259 \ln \frac{10^{16}}{2.8 \times 10^{14}} = 0.108$$



$$V_0 = 0.108 + 0.108 = 0.216 \text{ eV}$$

$$e^{\frac{V_0}{kT}} = \frac{p_p}{p_n} = \frac{N_v e^{-\frac{(E_{F_p} - E_{v_p})}{kT}}}{N_v e^{-\frac{(E_{F_n} - E_{v_n})}{kT}}}$$

۱۷۵ : برای حالت
(برای انرژی های مختلف)
(برای انرژی های مختلف)

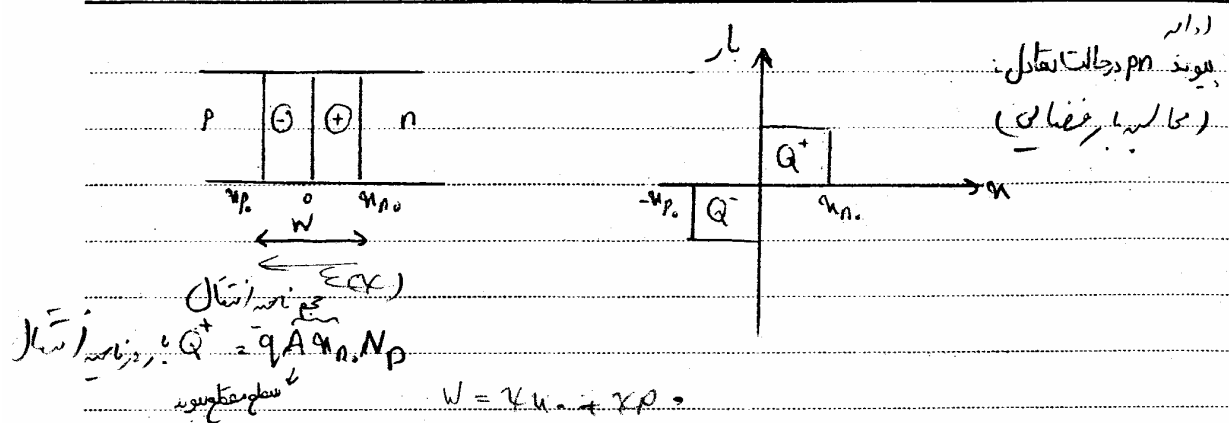
$$\rightarrow V_0 = E_{v_p} - E_{v_n}$$

$$V_0 = E_{c_p} - E_{c_n}$$

در این حالت، انرژی های مختلف را می توانیم به دست آوریم.

$$V_0 = (E_{c_p} - E_{f_p}) + (E_{f_n} - E_{c_n})$$

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.0259 \ln \frac{10^{16} \times 10^{16}}{(2.8 \times 10^{14})^2} = 0.216 \text{ eV}$$



چون مقدار بار در هر ناحیه برابر است
بار خنثی باشد

$$Q^+ = Q^-$$

$$qAq_{n0}N_D = qAq_{p0}N_A$$

$$(1) \quad q_{n0}N_D = q_{p0}N_A$$

$$Q^- = -qN_A$$

$$x_{n0} = 10^2 x_{p0}$$

$$N_A = 10^2 N_D$$

$$q_{p0} \gg q_{n0} \leftarrow N_A \ll N_D$$



$$(2) \quad W = x_{n0} + x_{p0}$$

$$q_{n0} = W - x_{p0} \Rightarrow q_{n0} = W - \frac{N_D}{N_A} x_{n0}$$

بیشترین فاصله انتقال
در عرضیت

$$(1) \text{ و } (2) \Rightarrow \begin{cases} x_{n0} = \frac{W N_A}{N_A + N_D} \\ x_{p0} = \frac{W N_D}{N_A + N_D} \end{cases}$$

$$q_{n0} \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right) = W \Rightarrow q_{n0} = \frac{W N_A}{N_A + N_D}$$

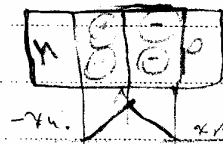
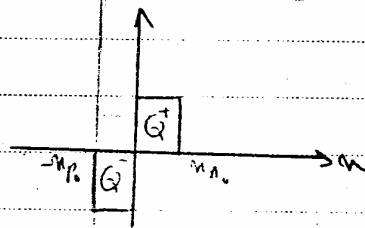
کافیت های

میدان الکتریکی در حوالی میوند:

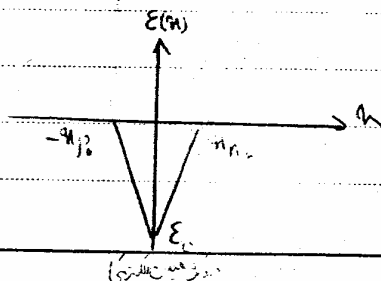
$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

ایستادن میدان الکتریکی

$$\bullet \text{ (iii) } n_0: \frac{d\varepsilon}{dn} = \frac{q_{ND}}{\varepsilon} \Rightarrow \int \varepsilon d\varepsilon = \frac{q_{ND}}{\varepsilon} \int_{n_0}^n dn \Rightarrow \varepsilon(n) = \frac{q_{ND}}{\varepsilon} (n - n_0)$$



الرسم سميت جب و مسميت راسبت بود توارسم سميت بالاصناف



$$\mathcal{E}(x, z) = \mathcal{E}_s = \frac{-q_N A x_{p0}}{\epsilon}$$

$$\mathcal{E}(x, z) = \mathcal{E}_s = \frac{-q_N D x_{n0}}{\epsilon}$$

حالات شدة المجال الكهربائي

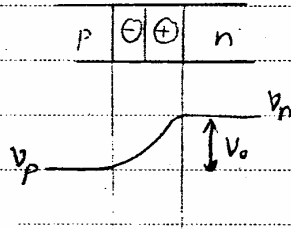
درجات تعادل

$$-\frac{dV(x)}{dx} = \mathcal{E}(x)$$

پتانسیل الکتریکی: $V(x)$

$$-\int_{x_p}^{x_n} dV(x) = \int_{x_p}^{x_n} \mathcal{E}(x) dx$$

رابطه $V(x)$ و $\mathcal{E}(x)$ صورت انتگرالی و دیفرانسیلی است



$$-(V_n - V_p) = \int_{-x_{p0}}^0 \frac{-q_N A}{\epsilon} (x + x_{p0}) dx + \int_0^{x_{n0}} \frac{q_N D}{\epsilon} (x - x_{n0}) dx$$

$$-V_0 = \frac{-q_N A}{\epsilon} \left[\frac{x^2}{2} + x x_{p0} \right]_{-x_{p0}}^0 + \frac{q_N D}{\epsilon} \left[\frac{x^2}{2} - x x_{n0} \right]_0^{x_{n0}}$$

$$-V_0 = \frac{-q_N A}{\epsilon} \left[\frac{x_{p0}^2}{2} + x_{p0}^2 \right] - \frac{q_N D x_{n0}^2}{2\epsilon}$$

$N_A x_{p0}$

$$V_0 = -\frac{1}{\epsilon} \epsilon_0 W = \frac{1}{\epsilon} \frac{q_N D x_{n0}^2}{2}$$

$\mathcal{E}(x=0)$

$$-V_0 = \frac{-q_N A x_{p0}}{\epsilon} \left(\frac{x_{p0} + x_{n0}}{2} \right)$$

$$\Rightarrow \boxed{-V_0 = \frac{\epsilon_0}{\epsilon} W} \quad \text{①} \quad \text{رابطه میان پتانسیل و عرض منطقه خنثی}$$

②

دانشیم $V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$

رابطه V_0 و W :

$$V_0 = + \frac{q N_D x_{n0}}{\epsilon} W \quad \left\{ \Rightarrow W = \left[\frac{\epsilon V_0}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \right.$$
 رابطه عرض ناحیه رسانا،
 $x_{n0} = \frac{W N_A}{N_A + N_D}$ و $x_{p0} = \frac{W N_D}{N_A + N_D}$
 در حالت تعادل: $x_{p0} \leftarrow x_n \leftarrow x_p \leftarrow W \leftarrow x_p \leftarrow x_n \leftarrow x_{p0}$

مثال: در یک پیوند نیمه‌ای p-n در حالت تعادل با سطح مقطع طریقی به شعاع 2.5×10^{-2} cm مطلوب است که:

$N_A = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
 $N_D = 1.17 \text{ cm}^{-3}$
 $E_g = 1.105 \text{ eV}$
 $\epsilon_r = 11.7$
 $\frac{kT}{q} = 0.0259 \text{ V}$
 $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$
 $r = 2.5 \times 10^{-2} \text{ cm}$

$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \Rightarrow V_0 = 0.259 \ln \frac{4 \times 10^{18} \times 1.17}{(1.5 \times 10^{10})^2}$
 $V_0 = 0.16 \text{ V}$

$W = \left[\frac{\epsilon V_0}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{\epsilon_r \epsilon_0 \times 1.17}{1.5 \times 10^{10}} \left(\frac{1}{4 \times 10^{18}} + \frac{1}{1.17} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$
 $W = 3.34 \times 10^{-5} \text{ cm} = 0.334 \text{ } \mu\text{m}$

$x_{n0} = \frac{W N_A}{N_A + N_D} = \frac{0.334 \times 10^{-5} \times 4 \times 10^{18}}{4 \times 10^{18} + 1.17} \Rightarrow x_{n0} = 0.334 \text{ } \mu\text{m}$
 $x_{p0} = W - x_{n0} = 0.0001 \text{ } \mu\text{m}$

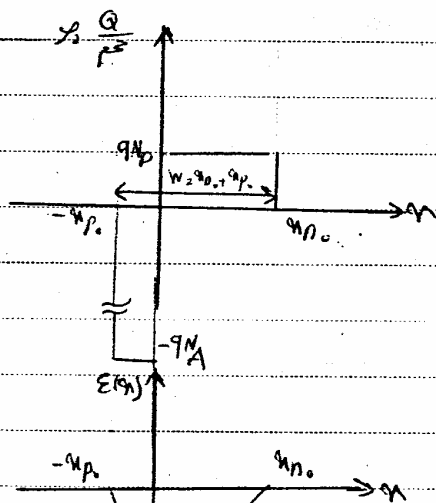
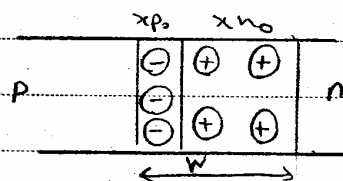
$N_A \gg N_D$ است
 انتقال داریم.

در نقطه است چون حاملان آن ۴۰۰ برابر بیشتر از ۱۰ است

$$A = 1.7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$Q^+ = q A n_0 N_D = 1.7 \times 10^{-3} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16} \times 10^{15} = 1.0 \times 10^{-10} \text{ C}$$

$$\mathcal{E}_0 = \frac{-V_0}{W} = \frac{-q N_D n_0}{\epsilon} = -0.1 \times 10^6 \frac{\text{V}}{\text{cm}}$$



توجه: اگر در نمره خالص 10^{16} باشد
 این، مقاومت مفروض است. یعنی 10^{16} است
 اگر 10^{15} باشد، 10^{16} است

$$n_i = 1.5 \times 10^{10}$$

$$K_T = 0.0259 \text{ eV}$$

$$N_D = 3 \times 10^{15}$$

$$N_A = 10^{15}$$

$$N_A = 2 \times 10^{15}$$

$$c_1 = 3$$

41