عناوین درس فیزیک الکترونیک

- میان‌ترم (۷ نمره)
  - تئوری باندها و نیمه‌هادی‌ها (فصل ۳)
- پایان‌ترم
  - پیوند pn (فصل ۵)
  - ترانزیستور BJT (فصل ۷)
  - ترانزیستور FET (فصل ۸)
  - پیوند فلز-نیمه‌هادی (فصل ۸)

منابع:

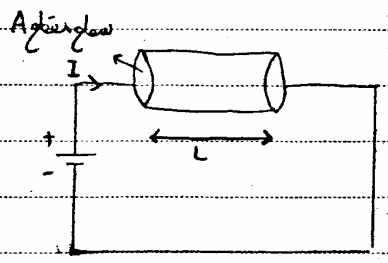
کتاب فیزیک الکترونیک مترجم: دکتر رویین نژ

solidstate Electronic
Devices Electronic and Technology

نویسنده: B. streetman

یادآوری:

مقاومت مخصوص (ρ (اهم cm)



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

(ولت / آمپر)

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

(اهم cm، اهم، cm^2، cm)

- دسته بندی اجسام از نظر مقدار مقاوتی که در برابر جریان الکتریکی از خود نشان می دهند.

۱) رسانا (Conductor) $\rho < 10^{-2}$ اهم cm

۲) عایق (Insulator) $\rho > 10^{5}$ اهم cm : هدایت بسیار ناچیزی دارد

۳) نیمه‌رسانا (semiconductor) : هدایت الکتریکی آنها قابل تنظیم می‌باشد

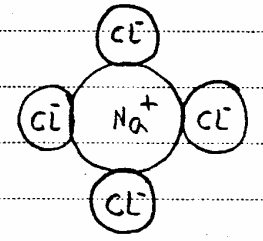
از مرز عایق تا هادی تنظیم می‌شود.

(Bonding)

از نظر نوع پیوند در جامدات:

۱) پیوند یونی: ناشی از جاذبه شدید بین یون‌های مثبت و منفی می‌باشد و هیچ الکترون آزادی ندارد. پس عایق است.

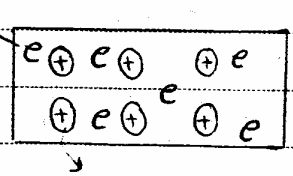
(Ionic)



(آرایش الکترونی)

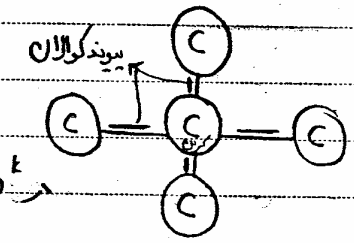
NaCl

۲) پیوند فلزی: در فلزات لایه آخر کمتر از ۳ الکترون دارد که براحتی آزاد می‌شود. (Metalic Banding)



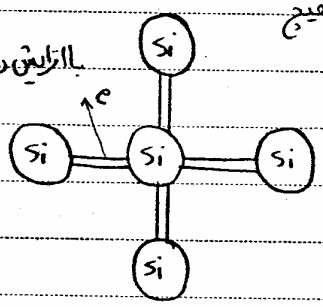
یونهای مثبت فلز که هیچ نقش در جذب الکترون ندارند چون در جای خود ثابت هستند.

۳) پیوند کوالانسی: (Covalent Bonding)



الماس:

با به استراک گذاشتن الکترونهای ظرفیت در اینجا الکترونها در دمای $T = 0^k$ هست هستند و آزاد نیست و تمام الکترونها در پیوندهای کوالان هستند و هیچ الکترون آزادی وجود ندارد.

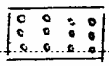


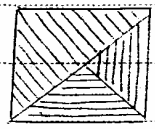
با افزایش دما یا تابش نور می‌توان پیوند را شکست و الکترون آزاد کرد.

نیم‌هادی‌ها
- تک عنصری (Element): فقط از یک نوع اتم تشکیل شده مثل: Si ، Ge
- مرکب (Compound):
  - ترکیبی از عناصر ستون ③ و ⑤ مثل: InSb و AlP ، AlAs ، GaSb ، GaP ، GaAs (آنتیموان، فسفر)
  - ترکیبی از عناصر ستون ② و ⑥ مثل: CdSe ، CdS ، ZnS ، ZnSe (در دمای نور (صفحه لامپ تصویر))

از نظر آرایش اتمی دو جامدات :

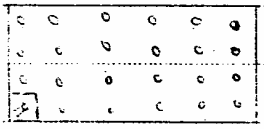
۱) جامدات بی شکل (Amorph) : اتمها فاقد ساختار بلوری می باشند و هیچگونه نظم هندسی در موقعیت اتمها وجود ندارد

۲) جامدات بلوری (periode struture) : آرایش خاصی از اتمها در تمام جامد تکرار می شود 

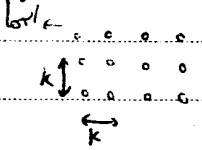
۳) جامد چند بلوری (poly crystal) : از تعداد زیادی ناحیه کوچک بلوری تشکیل شده 

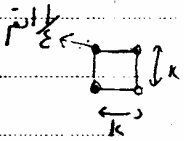
شبکه : به آرایش هندسی اتمی در بلور گفته می شود. (latti c)

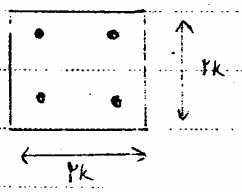
سلول یکه (واحد) : حداقل کننده شکل کل شبکه است که با تکرار منظم در کنار هم فرا گیرد شبکه حاصل می شود (unit cell)



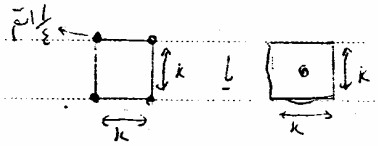
k : فاصله

(مثال 

سلولهای یکه : یا 



سلولهای اولیه : کوچکترین سلول یکه (primitive cell) :



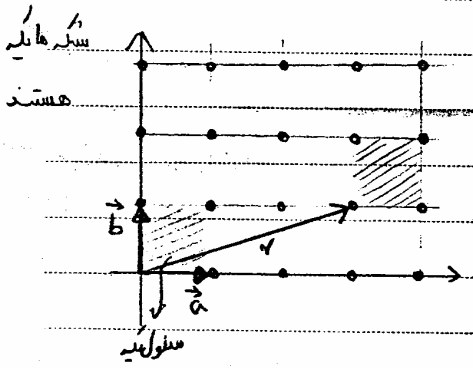
بردارهای پایه: (Basis vector):

$\vec{a}$ و $\vec{b}$ و $\vec{c}$

اگر سلول یکه توسط مضارب صحیح این بردارها منتقل شوند سلول یکه جدیدی شبیه سلول اصلی بدست می‌آید

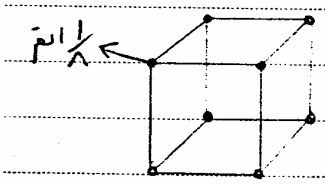
$$r = p\vec{a} + q\vec{b} + s\vec{c}$$

مثال) محل رئوس انتقال سلول یکه تحت بردار $r = 2\vec{a} + 2\vec{b}$



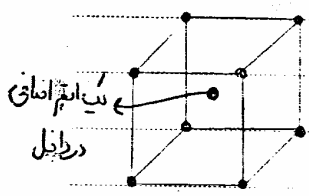
سلول‌های ملکولی: ساده‌ترین سلول سه‌بعدی سلول یکه یک مکعب است.

انواع سلول ملکولی:



1) ملکولی ساده SC (Simple cubic):

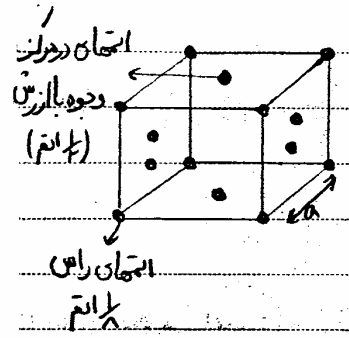
در هر سلول یکه SC: اتم $1 = 8 \times \frac{1}{8}$ رأس



2) ملکولی بدنه مرکزدار BCC (Body centered cubic):

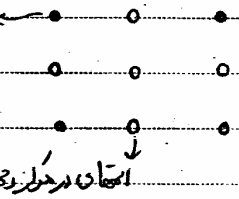
در هر سلول یکه BCC: اتم $2 = 1 + 8 \times \frac{1}{8}$

۳) مکعبی وجه مرکزدار fcc (Face centered cubic):



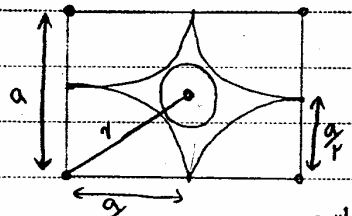
$6\times\frac{1}{2}+8\times\frac{1}{8}=4$ اتم در هر سلول fcc

مشاهده آرایش اتمها از دید هر وجه



ثابت شبکه (a): اندازه بعد سلول یک مکعبی

مثال) اگر فرض کنید تمام اتمها با هم مماس باشند (در fcc) چند درصد از فضای fcc توسط اتمها اشغال می‌شود.



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

شعاع هر اتم در حالت مماسی $r=\frac{\sqrt{2}}{4}a$

حجم هر اتم: حجم کره $=\frac{4}{3}\pi r^3=\frac{\pi a^3\sqrt{2}}{24}$

درصد اشغال شده توسط اتمها در سلول fcc یک $=\frac{\text{حجم هر اتم}\times 4\text{ اتم در سلول fcc}}{\text{حجم مکعب fcc } a^3}=\frac{\pi\sqrt{2}}{6}=\%74$

صفحه‌ها:

صفحه‌ها در شبکه‌های بلوری بیاری آیند و هر صفحه با شاخص‌های میلر (Miller Indices) نمایان می‌شود.

صفحه را با (hkl) نشان می‌دهند.

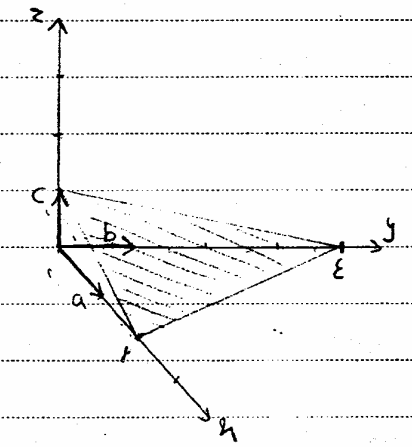
نحوه تعیین شاخص‌های میلر:

۱) تعیین اعداد نقطه برخورد صفحه با محورهای بلور

۲) معکوس کردن اعداد فوق

۳) ضریب‌در مخرج مشترک آنها

(مثال)



$\vec{a}$	$\vec{b}$	$\vec{c}$
۲	۴	۱

حال معکوس:

$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	۱

ضریب‌در مخرج مشترک

۲	۱	۴

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

* صفحات هواری شاخص‌های یکسانی دارند.

- صفحه‌ای که با یکی از محورها موازی باشد شاخص مربوطه صفری می‌شود. $\frac{1}{\infty}$

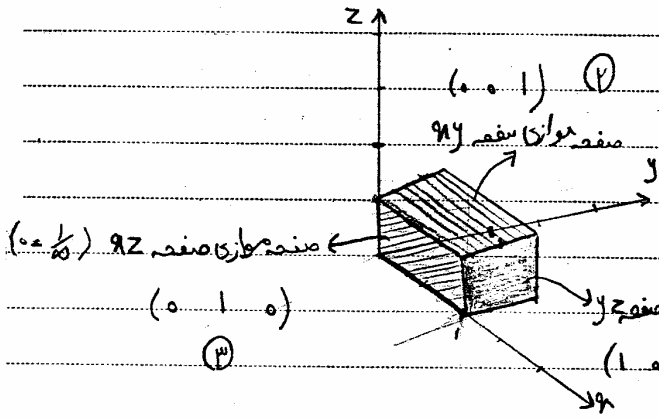
- اگر صفحه‌ای دو برآیرنده یکی از محورها باشد شاخص مربوطه به آن صفری می‌شود.

- اگر صفحه‌ای از مبدا عبور کند شاخص آن ۰ می‌شود و معنی ندارد پس به بی‌نهایت صفحه موازی آن تعلق می‌شود.

- اگر یکی از نقاط برخورد روی منفی محور باشد پس با بی‌نهایت منفی روی شاخص متناظر آن مشخص می‌شود.

(مثال) (۲ ∞ ۴)

(مثال)

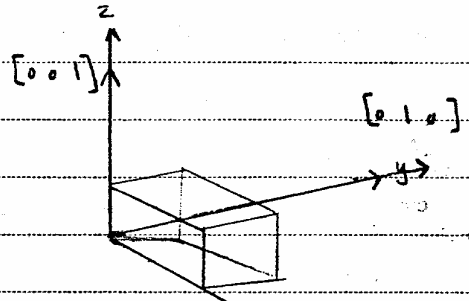


بقیه صفحات موازی این صفحات هستند پس شبیه اینجاست

① ② ③ } صفحات معادل

(چون دهنه اینجا در دو بعد صفر و در بعد سوم ∞ است) ⇒ با این بیان } یک نشان کافی است

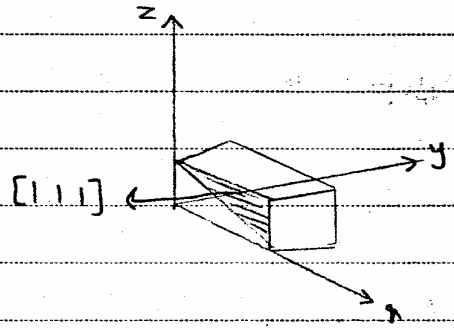
مثال)



جهت [۱۱۱]

فقط در سیستم‌های مکعبی جهت [hkl] بر صفحه [hkl] عمود است.

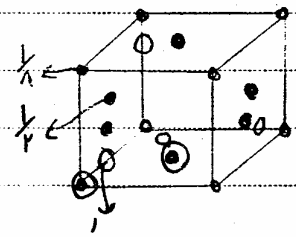
جهت‌های معادل
$\left\{\begin{matrix}[1\bar{0}0] \\ [0\bar{1}0] \\ [00\bar{1}]\end{matrix}\right\}$

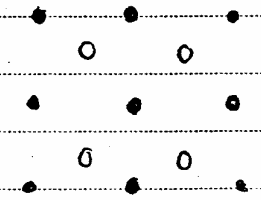


- سیستم الماس

همان سیستم FCC که چهار اتم اضافی در داخل سلول یکی از وجوه اصل $\frac{\vec{a}}{4} + \frac{\vec{b}}{4} + \frac{\vec{c}}{4}$ قرار گرفته است.

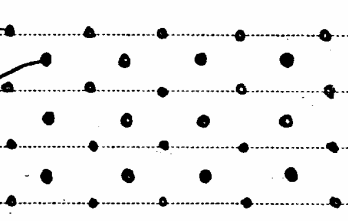
این ۴ اتم درون مکعب قرار دارند





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

در هر سلول یک سیستم الماسی



دو fcc در داخل هم ←

سبک الماس: که دو fcc متداخل هستند.

Si و Ge ساختار الماسی دارند که هر اتم با ۴ اتم کناری پیوند کوالانسی برقرار می‌کند.

سبک سولفید روی: (zinc, Blende) : نیم‌هادی GaAs دارای سبک سولفید روی است که همان سبک دو fcc متداخل الماسی است.

fcc اصلی مربوط به Ga و fcc نفوذی مربوط به As

مثال) مقدار چگالی ($\frac{gr}{cm^3}$) نیم‌هادی زیر را بدست آورید.

فرضیات: وزن اتمی Si : $28,1 \frac{gr}{mol}$

عدد آووگادرو: $6,022 \times 10^{23} \frac{atoms}{mole}$

ثابت سبک در سلول یک Si : $a : 5,43 \times 10^{-8} cm$

$$\frac{\text{۸ اتم در هر سلول}}{\text{حجم سلول } a^3} = \frac{8}{(5,43 \times 10^{-8})^3} = 5 \times 10^{22} \frac{atom}{cm^3}$$

$$\text{چگالی } (\frac{gr}{cm^3}) = \frac{5 \times 10^{22} \frac{atoms}{cm^3} \times 28,1 \frac{gr}{mol}}{6,022 \times 10^{23} \frac{atoms}{mol}} = 2,33 \frac{gr}{cm^3}$$

درمورد GaAs:

ثابت شبکه در سلول یک GaAs $a = 5.65 \times 10^{-8}\ cm$

وزن اتمی Ga: $69.7\ \frac{gr}{mole}$

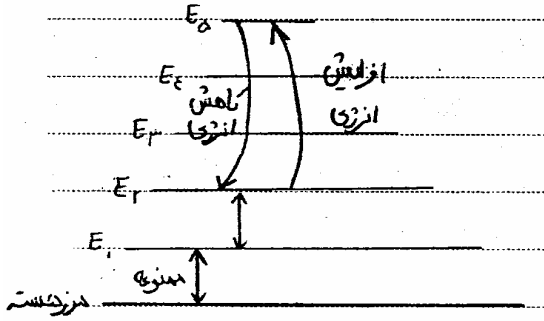
As: $74.9\ \frac{gr}{mole}$

$$\frac{\text{۴ اتم در هر سلول}}{a^3 \text{ حجم سلول}} = \frac{4}{(5.65\times10^{-8})^3} = 2.22\times10^{22}\ \frac{atoms}{cm^3}$$

$$\text{چگالی GaAs} = \frac{2.22\times10^{22}\ \frac{atoms}{cm^3} \times (74.9 + 69.7)\ \frac{gr}{mole}}{6.22\times10^{23}\ \left(\frac{atoms}{mole}\right)}$$

جلسه دوم ۸۳.۱۲.۲۰

- باندهای (نوار) انرژی (Energy Bands):



اگر یک اتم دهلوی مجزا در نظر گرفته شود با افزایش انرژی الکترون‌ها فقط بعضی از سطوح انرژی را اشغال می‌کنند یعنی هرچه دورتر می‌شود انرژی بیشتری می‌شود.

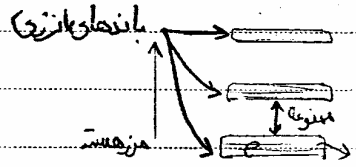
$E_5 - E_2 = \eta\nu$ ← افزایش انرژی نور

ثابت پلانک

$\eta = 6.63\times10^{-34}\ Js$

در عمل اتم مجزا وجود ندارد.

هنگامیکه مقدار زیادی اتم کنار هم قرار گیرند الکترون‌ها تحت تأثیر پارامترهای هسته و سایر الکترون‌ها قرار دارند

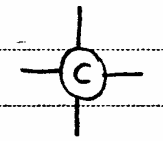


در عمل به این صورت می‌شود

حالت‌هایی وجود دارد و فقط می‌توانند الکترون‌ها را بپذیرند

الکترون‌ها قرار می‌گیرند

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



در 1s ← دو حالت قرارگیری الکترون

در 2s ← دو حالت قرارگیری الکترون

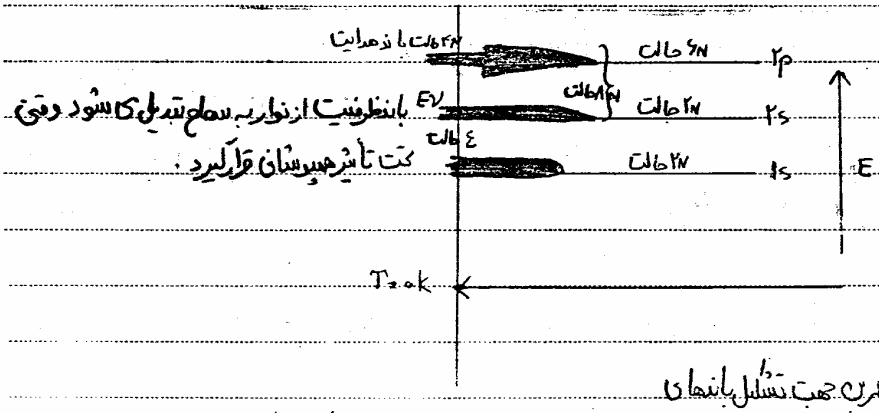
در 2p ← سه حالت قرارگیری الکترون

در N اتم کربن حالتها بصورت:

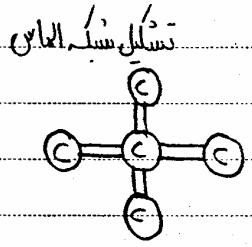
1s ← 2N حالت

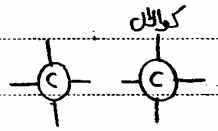
2s ← 2N حالت

2p ← 6N حالت



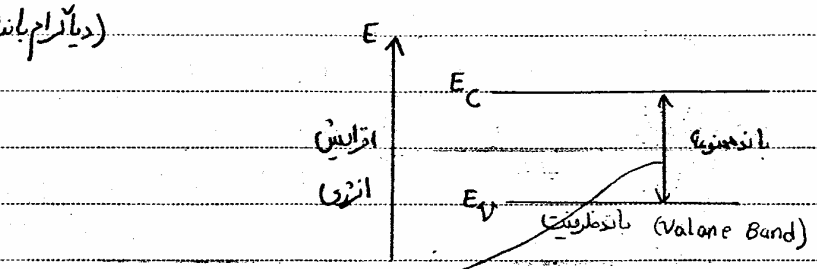
برای N اتم: نزدیک کردن اتمهای کربن جهت تشکیل پیوندها





Conduction Band (باندهدایت):

(دیاگرام باندانرژی)



باندگپ (شکاف) { Forbidden Band
Band gap

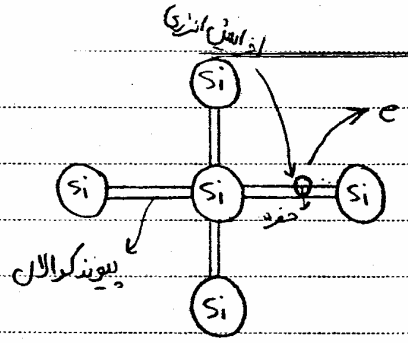
الکترون‌ها در E_V و یا در E_C هستند و در باندهدایت یا ظرفیت قرار دارند

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

در الماس ← $E_g = 5\,eV$ ← الکترون‌ولت ← نسبتاً این مقدار انرژی زیاد است پس عایق است ← عایق

نیمه‌هادی ← { Si ← $E_g = 1.1\,eV$
Ge ← $E_g = 0.7\,eV$

حامل‌های بار در نیمه‌هادی‌ها : (charge carriers)



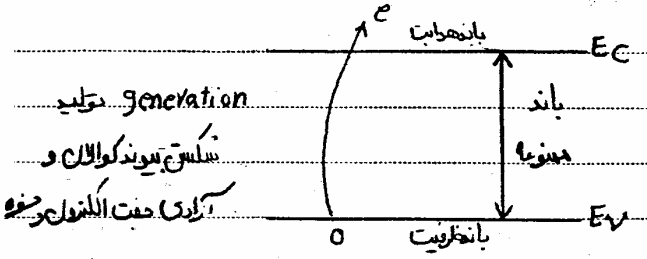
با هل دادن

در $0^\circ K$ (صفر مطلق) هیچ الکترون آزادی وجود ندارد و تمام پیوندهای کوالان برقرارند و سالم بسته شده‌اند

اگر به سیلیسیم تابیده و یا دما را زیاد کنیم موجب زیاد شدن انرژی جنبشی پیوند کوالان شده و سالم بسته می‌شوند و الکترون‌ها آزاد می‌شوند و از باند ظرفیت وارد باند هدایت می‌شود

وقتی پیوند سالم بسته می‌شود و الکترون آزاد می‌شود شدیداً نیاز به الکترون دارند و جای که خالی می‌شود حفره می‌آید

(دیاگرام باندانرژی)

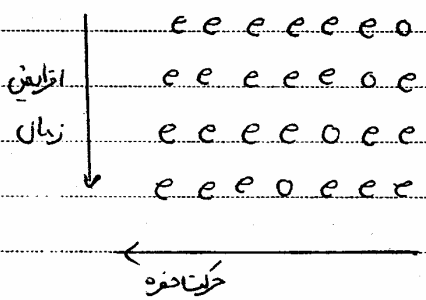


حفره: جای خالی الکترون در پیوند کوالان

الکترون در باندهدایت می‌تواند در هدایت الکتریکی موثر باشد
حفره در باند ظرفیت می‌تواند در هدایت الکتریکی موثر باشد
یعنی در لایه‌های پیوند کوالان تغییری کند

EHP
Electron Hole pair
تولید
حامل‌های بار

حرکت حفره در باند ظرفیت:



- نیمه‌هادی خالص (ذاتی): (Intrinsic semiconductor)

هیچ اتم ناخالصی ندارد فقط اتم‌های نیمه‌هادی است و در T=0°k هیچ حاملی ندارد (الکترون و حفره ندارد)

n_i = تراکم حاملها

چگالی حفره‌ها در حالت نیمه‌های خالص $n_i = p_i$ چگالی الکترون‌های نیمه‌هادی خالص

با افزایش دما حاملها بصورت حفت حفت آزاد می‌شوند

$Si : n_i = 1.5 \times 10^{10} \frac{electron}{cm^3}$ $T = 300\ k$

$Ge : n_i = 2.0 \times 10^{13}\ cm^{-3}$

در هر دمای همانطور که انتظار تولید داریم ممکن است عکس این عمل هم ایجاد شود یعنی از باند هدایت به باند ظرفیت که باز ترکیب می‌گوید

باز ترکیب : الکترون باند هدایت با یک حفره باند ظرفیت ترکیب می‌شود و ناپدید می‌شود EHP یعنی هم الکترون و هم حفره

از بین می‌رود.

سرعت باز ترکیب = سرعت تولید : در هر دمای T

در نیمه هادی خالص تنها عامل افزایش الکترونها افزایش دما انرژی است

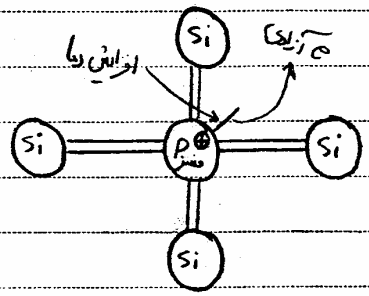
- نیمه هادی ناخالص (Extrinsic semiconductor) :

به غیر از اتمهای نیمه هادی اتمهای دیگری وجود دارند که با عمل Dopping یا آلیاژی اتمهای ناخالص به آن اضافه می‌شود

عمل افزودن اتمهای ناخالص به نیمه هادی به منظور افزایش درجه هدایت الکتریکی

دو نوع ناخالص
- دهنده (Donor) : اتمهای ستون پنجم جدول (فسفر، As، Sb)
- گیرنده (Accepter) : اتمهای ستون سوم جدول (Ga، B، In، AL)

ناخالصی دهنده: باعث افزایش الکترون‌ها و تبدیل شدن به نیم‌هادی نوع n

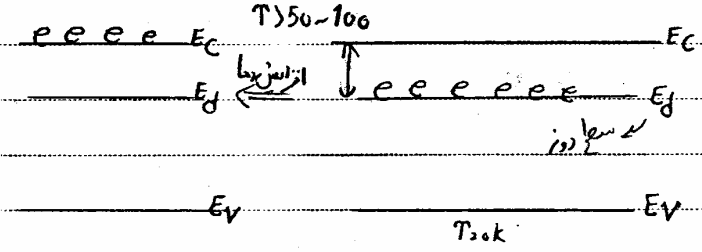
(مثال) 

در $T=0\,k$ تمام الکترون‌ها در پیوند کوالان هستند (از جمله الکترون اضافی)
اما با افزایش دما $T>50\sim100\,k$ الکترون پنجم آزاد می‌شود
و اتم‌های دهنده یونیزه می‌شوند.

پس در $T=300$ تمام اتم‌ها یونیزه شده اند و حیاتی الکترون‌ها همان حیاتی اتم‌های دهنده هستند.

حیاتی الکترون $\begin{cases} T=300\,k \\ n_0 = N_D \rightarrow \text{اتم‌های دهنده} \end{cases}$

در $0\,k$ سطح E_d پر از الکترون است
ولی با افزایش دما الکترون‌ها به باند هدایت منتقل می‌شوند



$E_C - E_d = \begin{cases} 0.01\,eV \rightarrow Ge \\ 0.03\,eV \sim 0.06\,eV \rightarrow Si \end{cases}$

اصلا خیلی کمی است پس در 300 درجه همه آزاد می‌شوند

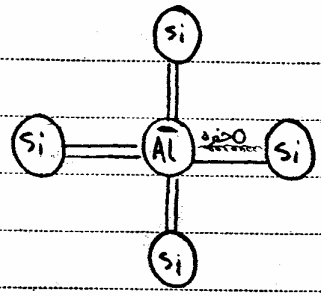
* اتم‌های دهنده باعث افزایش الکترون می‌شوند

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

برای Si $\Rightarrow n_i = 1.5\times10^{10}\,cm^{-3}$ $\Rightarrow$ آبرهمین ناخالصی مانند منگرد دارای N_D مقابل است

اضافه شود باعث افزایش تقریبی 10^5 برابر الکترون در این نیم‌هادی می‌شود و بسیار هدایت را افزایش می‌دهد

- ناخالصی گیرنده: با افزایش حفره‌ها و تبدیل شبه‌هادی نوع P می‌شود.



افزایش دما $T > 50 \sim 100$ ← حفره‌های ایجاد شده موثر در هدایت خواهند بود.

پس اتم‌های گیرنده یونیزه می‌شوند و به یون منفی تبدیل می‌شوند. $T = 300k$

چگالی اتم‌های گیرنده $\rightarrow$ $p_0 = N_A$ چگالی حفره

شبه‌هادی	minority حامل‌های اقلیت	majority carrier حامل‌های اکثریت
نوع n	حفره $p_0 \ll n_0$	الکترون $n_0 = N_D$
نوع P	الکترون $n_0 \ll p_0$	حفره $p_0 = N_A$

مثال) در شبه‌هادی Si که $n_i = 1.5 \times 10^{10}\ cm^{-3}$ آن را توسط اتم‌های دهنده فسفر ناخالص کردیم $N_D = 10^{15}\ cm^{-3}$

با فرض برابری تقریبی چگالی اتمی فسفر و Si مطلوبست تعیین نوع شبه‌هادی و حامل‌های اکثریت و نسبت وزنی؟

چگالی اتمی Si $= 5 \times 10^{22}\ cm^{-3}$

اتم‌های دهنده ← شبه‌هادی نوع n ← حامل‌های اکثریت الکترون $n_0 = N_D = 10^{15}$

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

فرض : si 1kg $\frac{1kg}{5\times10^{22}} = 2.10^{-22}kg$

۵۰ میلیارد الکترون آزاد می‌کنند

در برابر 1kg سیلیسیم، $2.10^{-22}kg$ ناخالصی باعث ایجاد الکترون‌های آزاد می‌شود.

- تابع فرمی دیراک (Fermi Dirac) :

تابع احتمالی است و مشخص می‌کند که احتمال اینکه الکترون در دمای T دارای انرژی E باشد.

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

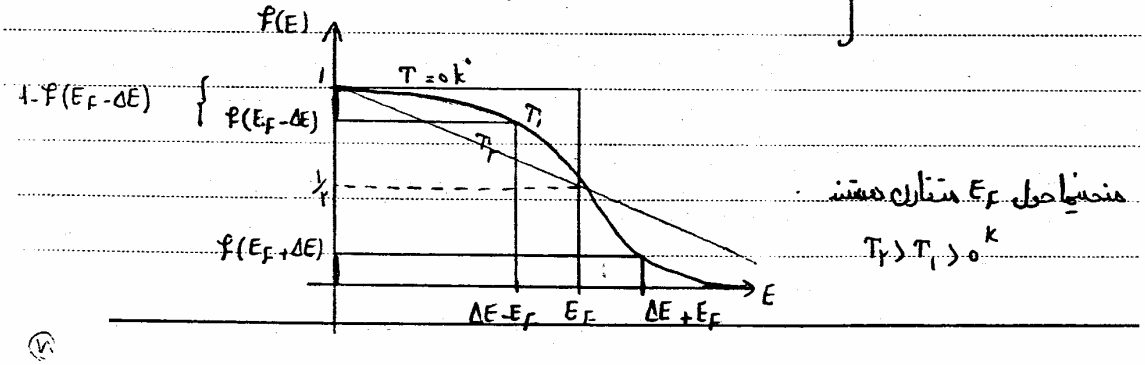
k : ثابت بولتزمان

اگر $E=E_F$ باشد $f(E_F)=\frac{1}{2}$ می‌شود $f(E_F) = \frac{1}{1+e^0} = \frac{1}{2}$

E_F انرژی سطح فرمی که احتمال اینکه الکترون، انرژی E_F را داشته باشد $\frac{1}{2}$ است.

در $T=0k^\circ$ (صفر مطلق) ⇐ اگر $E-E_F<0$ ⇐ $e^{\frac{E-E_F}{kT}}$ ⇐ 0 ⇐ $f(E)=1$

اگر $E-E_F>0$ ⇐ $e^{\frac{E-E_F}{kT}}$ ⇐ ∞ ⇐ $f(E)=0$



همیشه حول E_F متقارن هستند.

$T_2 > T_1 > 0^k$

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

$$f(E_F+\Delta E) = \left(1-f(E_F-\Delta E)\right)$$

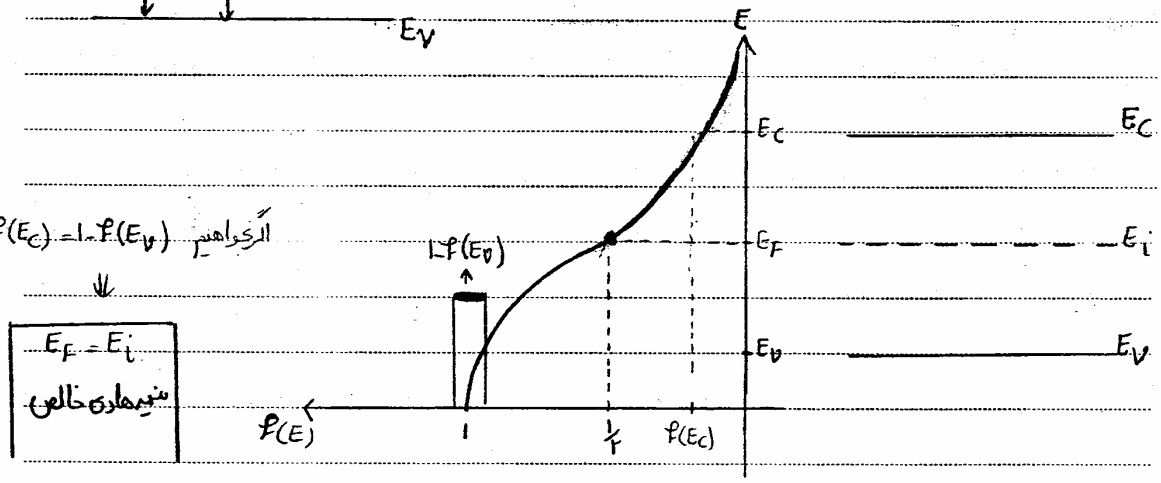
احتمال الکترون — احتمال حفره

تعیین موقعیت سطح فرمی در نیمه‌هاری‌ها

۱) نیمه‌هادی خالص $(n_i=p_i)$ ← $f(E_C)=1-f(E_V)$

E_i : سطح ذاتی

$$E_i = \frac{E_C+E_V}{2}$$



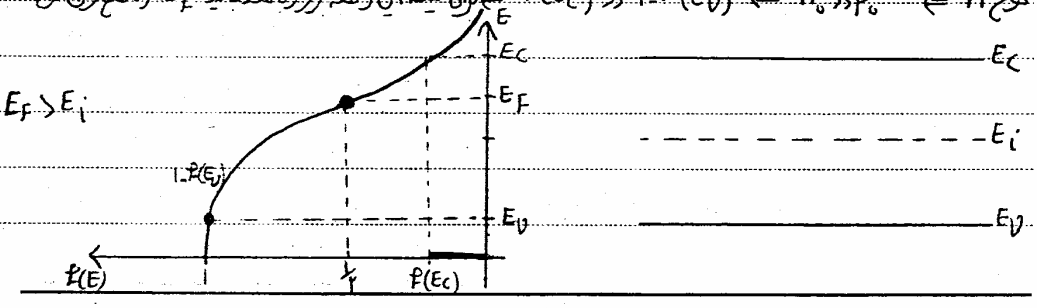
اگر داشته باشیم $f(E_C)=1-f(E_V)$

$E_F = E_i$

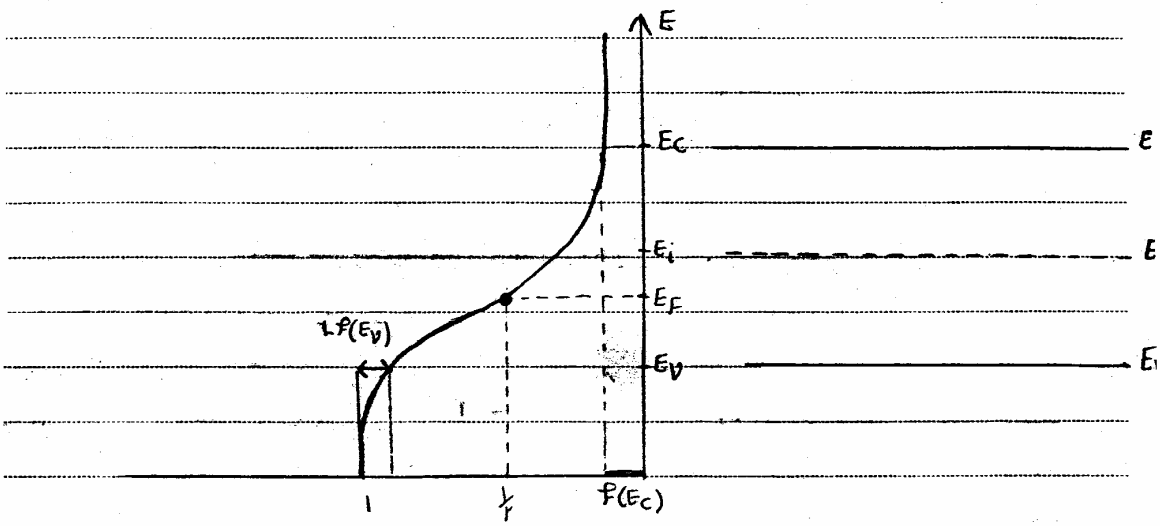
نیمه‌هادی خالص

نوع n ← $n_0 \gg p_0$ ← $f(E_C) \gg 1-f(E_V)$ ← برای اینکه این رابطه برقرار باشد باید E_F (سطح فرمی) از E_i بالاتر باشد

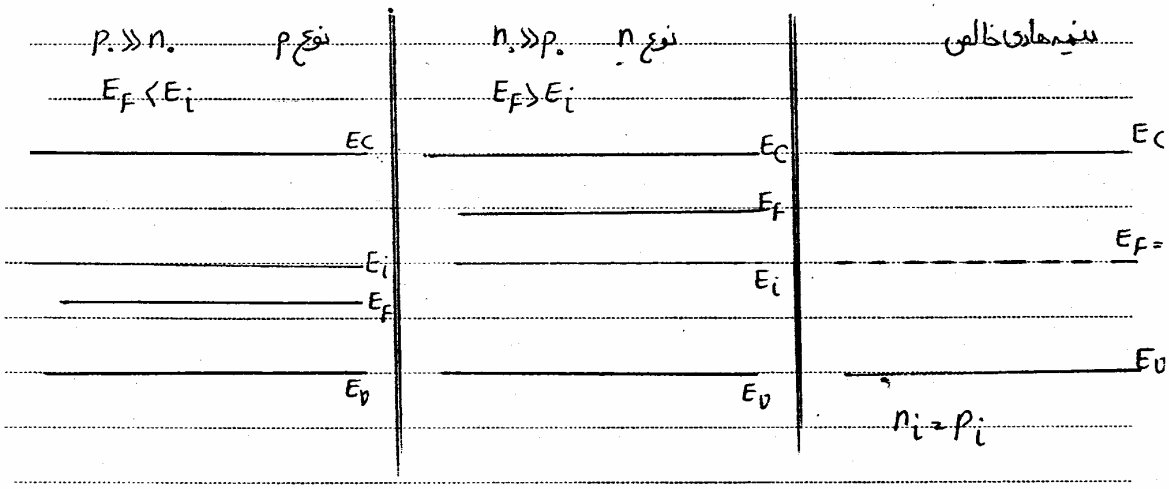
$E_F > E_i$ جون الکترون‌ها بیشتر از حفره‌اند



$E_F < E_i \Leftarrow 1-f(E_V) \gg f(E_C) \Leftarrow p_0 \gg n_0 \Leftarrow$ نوع p



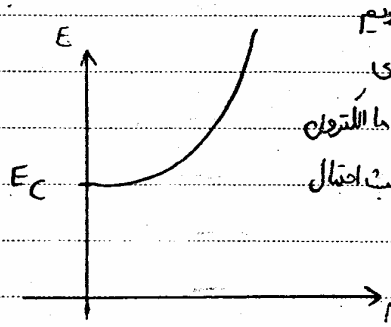
نتیجه:



- تعیین چگالی حاملها در نیمه‌هادی‌ها: $n_0 = ?$ و $p_0 = ?$

نیمه‌هادی نوع خالص ($n_i = p_i$)	نوع n	نوع p
	$N_D = n_0$	$P_0 = N_A$
	$P_0 \ll n_0$	$n_0 \ll P_0$

هرچه بطرف بالا رویم احتمال بیشتری برای الکترون وجود دارد اما الکترون در کدام جا قرار گیرد بحث احتمال مطرح می‌شود



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

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

(دو انرژی E حبد حالت برای اشغال شدن توسط الکترون وجود دارد)

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

(در چگالی حالتها به بزرگترین و کوچکترین با E_C و چگالی حالتهای خالی و بزرگترین معلوم با E_V می‌توان تراکم الکترون و تهار احاله کرد)

چون تعداد الکترونها مورد نظر است و جای آنها هم تنیت برای همین بار الکترونها را روی لبه باند هدایت آورده تا ساده شود.

E_C ——— دانسیته موثر حالت N_C

E_V ———

دانسیته موثر حالات تمام حالات برروی مرز باند هدایت در نظر گرفته می‌شود

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

η : ثابت پلانک $= 6{,}62 \times 10^{-34}\ J.s = 4{,}14 \times 10^{-15}\ eV.s$

k : ثابت بولتزمان $= 1{,}38 \times 10^{-22}\ \dfrac{J}{k} = 8{,}62 \times 10^{-5}\ \dfrac{eV}{k}$

T : درجه کلوین

m_n : جرم موثر $m_0 = 9{,}11 \times 10^{-31}\ kg$ جرم حالت سکون الکترون

الکترون‌ها برحسب بارهای اطراف (حیدا ها) وانرژی خود جرم‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند برای راحتی محاسبات جرم موثر را در نظر گرفته شده:

$$Si \begin{cases} m_n^* = 1.1\, m_0 \\ m_p^* = 0.54\, m_0 \end{cases} \qquad Ge \begin{cases} m_n^* = 0.55\, m_0 \\ m_p^* = 0.37\, m_0 \end{cases}$$

جرم حالت سکون

دانسیته الکترون‌ها در باند رسانش را $n_0 = f(E_C) N_C$ می‌نامیم

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

$E_C - E_F \gg kT \Leftarrow e^{\frac{E_C - E_F}{kT}} \gg 1$ می‌توان از یک صرف نظر کرد پس

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

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

دانسیته موج حالت حفره: تمام حالات پر روی مرز باند ظرفیت در نظر گرفته می‌شود.

جرم موثر حفره

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

$$P_0 = N_V \left(1 - f(E_V)\right)$$

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

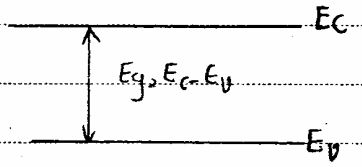
$E_F - E_V \gg kT \Rightarrow \frac{E_V - E_F}{kT} \ll 1$ در بخش مخرج صرف نظر از $e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}$

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

$$p_0 = N_V e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}$$

$$n_0 p_0 = N_C N_V e^{\frac{-(E_C - E_F)}{kT}} e^{\frac{(E_V - E_F)}{kT}}$$

$$\Rightarrow n_0 p_0 = N_C N_V e^{\frac{-(E_C - E_V)}{kT}}$$



$$\boxed{n_0 p_0 = N_C N_V e^{\frac{-E_g}{kT}} \quad (1)}$$

در نیمه‌هادی خالص:

$$n_i = p_i = n_0 = p_0 \Rightarrow E_F = E_i \ ?$$

تراکم حاملها $n_i = n_0 = N_C e^{\frac{-(E_C - E_i)}{kT}}$

تراکم حاملها $n_i = p_i = p_0 = N_V e^{\frac{(E_V - E_i)}{kT}}$

$$\boxed{n_i^2 = N_C N_V e^{\frac{-E_g}{kT}} \quad (2)}$$

نیمه‌هادی خالص

(2) و (1) $\Rightarrow$ $\boxed{n_i^2 = n_0 p_0}$ در شرایط عادی نیمه‌هادی خالص:

در نیمه‌هادی نوع n باشد $\Leftarrow$ معلوم $n_0 = N_D$ (Donor) $\leftarrow$ $\boxed{p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}}$

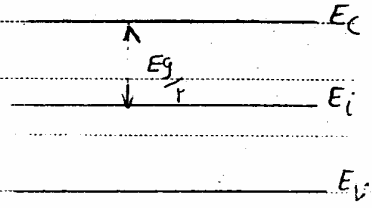
در نیمه‌هادی نوع p باشد $\Leftarrow$ معلوم $p_0 = N_A$ $\leftarrow$ $\boxed{n_0 = \frac{n_i^2}{p_0}}$

از رابطه ② با فرض $N_C = N_V$ داریم: $\boxed{n_i = N_C e^{-\frac{E_g}{2kT}}}$

حال در این فرم $n_0 = N_C e^{-\frac{(E_C - E_F)}{kT}}$ $\xrightarrow{E_i - E_C}$ $n_0 = N_C e^{-\left(\frac{E_C - E_i}{kT}\right)} e^{-\frac{(E_i - E_F)}{kT}}$

$$n_0 = N_C e^{-\frac{E_g}{2kT}} e^{-\frac{(E_i - E_F)}{kT}}$$

$$\boxed{\text{*}\quad n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}}$$



$$\begin{cases} n_i^2 = n_0 p_0 \\ n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}} \\ p_0 = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} \end{cases}$$

---

* مثال) اگر در نیمه‌هادی نوع Si، $n_i = 1.5 \times 10^{10}\ cm^{-3}$ و $kT = 0.259\ eV$، 300K و $E_g = 1.1\ eV$

و چنانچه اتم‌های ناخالص دهنده $N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$

$\rho \rightarrow E_i$

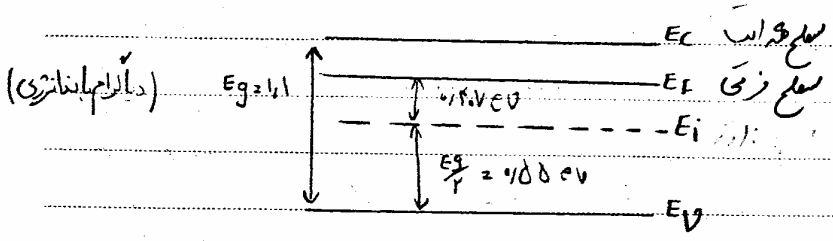
مطلوب است: نوع نیمه‌هادی، چگالی حامل‌های اکثریت و اقلیت و فاصله سطح فرمی از سطح ذاتی.

ناخالص دهنده: نوع n

چگالی حامل‌های اکثریت $n_0 = N_D$

چگالی حامل‌های اقلیت $p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{17}} = 2.25 \times 10^{3}\ cm^{-3}$

معادله * $E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} = 0.259 \ln \frac{10^{17}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.407\ eV$



۱۴۰۱/۰۱/۱۸ جلسه سوم

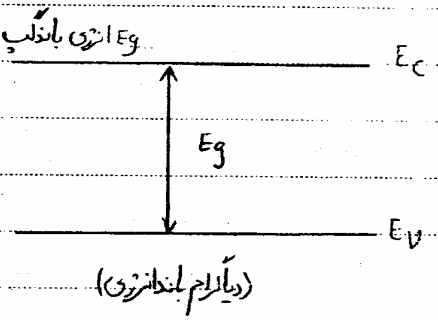
وابستگی حرارتی حامل‌ها:

چگالی حامل‌ها $n_i = p_i$

۱) در نیمه‌هادی خالص:

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

* چگالی موثر حالات الکترون در لبه باند هدایت
* چگالی موثر حالات حفره در لبه باند ظرفیت



$$n_i^2 = 4\left(\frac{2\pi m_n^* kT}{\eta^2}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\frac{2\pi m_p^* kT}{\eta^2}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{E_g}{kT}}$$

جرم موثر الکترون — جرم موثر حفره

N_C N_V

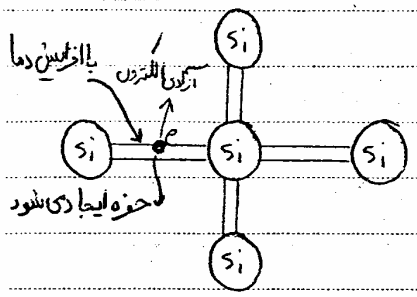
$$n_i = 2\left(\frac{2\pi kT}{\eta^2}\right)^{\frac{3}{2}}\left(m_n^* m_p^*\right)^{\frac{3}{4}} e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$ تابعی از T

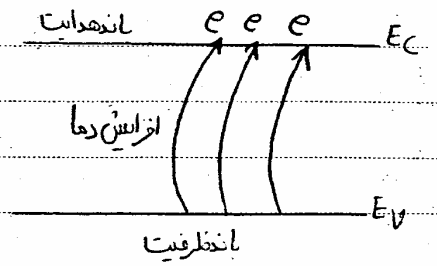
$n_i(T)$ وابسته به $T^{\frac{3}{2}}$ و $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$

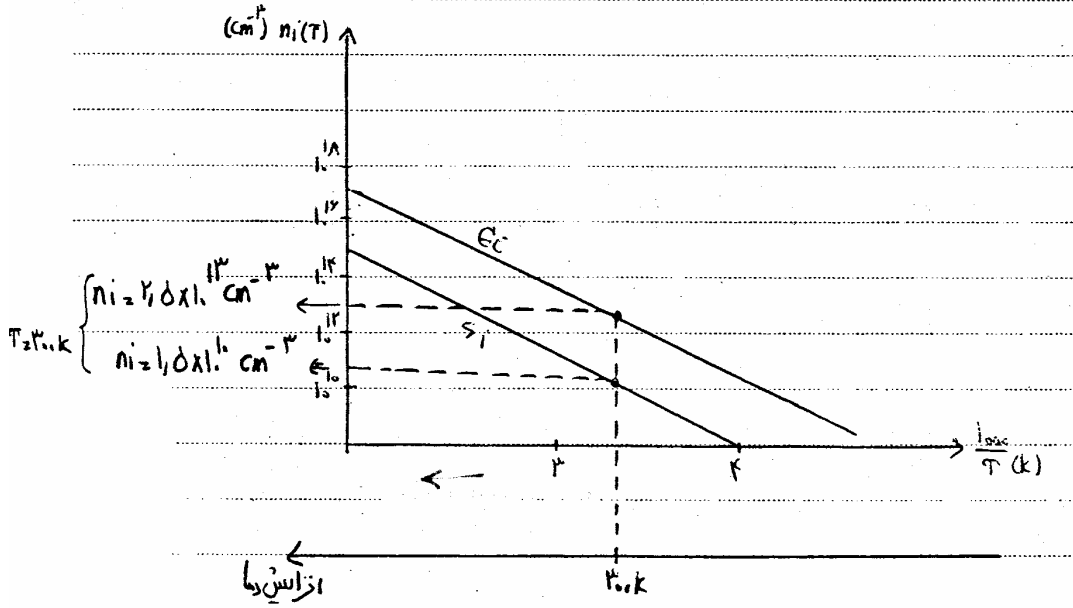
یعنی با افزایش دمای T، $T^{\frac{3}{2}}$ و $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ افزایش می‌یابد اما شدت افزایش $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ روی n_i موثرتر است

* شدت افزایش $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ روی n_i موثرتر است.

* با افزایش دما، حامل‌های داخلی به صورت $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ افزایش می‌یابد





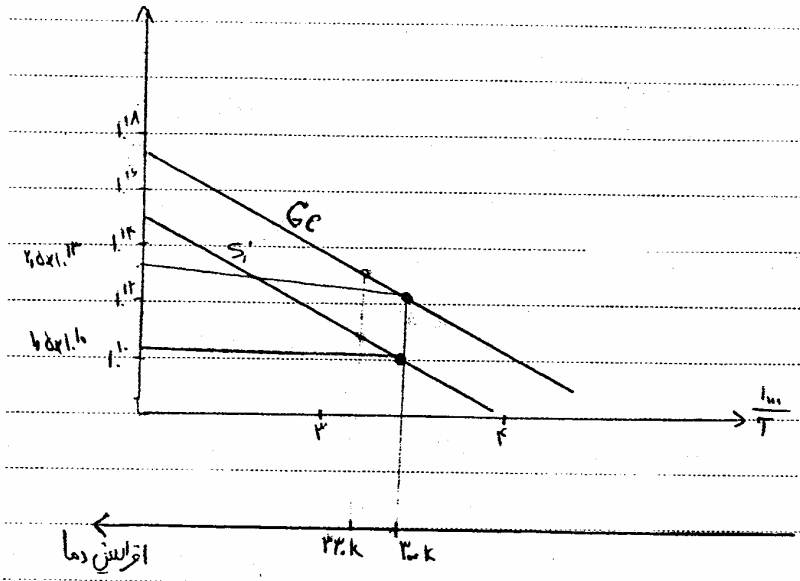


* مثال) در $T = 300k$ ناخالصی $N_D = 10^{11}$ را تزریق کنیم که این برای S_i به عنوان دهنده است و تبدیل به نوع n می‌شود (از خاصیت خالص‌تر خالص می‌شود چون n_i برابر S_i است) اما برای Ge تأثیری ندارد و Ge خالص باقی می‌ماند

Ge

$N_D = 10^{11} cm^{-3}$ {
$S_i \rightarrow$ نوع n چون $N_D = 10^{11} cm^{-3} > n_i = 1,5 \times 10^{10} cm^{-3}$
$Ge \rightarrow$ تأثیری ندارد $\rightarrow$ خالص n_i چون $N_D = 10^{11} cm^{-3} < 2,5 \times 10^{13} cm^{-3}$
}

* اما در دمای $T \geq 33K$ چون حامل‌های ذاتی n_i مربوط به Si از جدایی $N_D = 10^{15}$ بیشتری شود برای Si هم به عنوان رهنده محسوب



* در ناخالص بنودن نیمه هادی خالص با پیش دمای کار مورد نظر آزاد. *

---

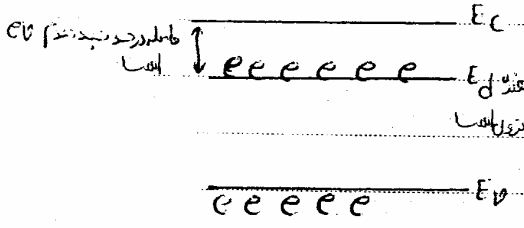
۲) در نیمه‌هادی ناخالص (Extrinsic):

$n_0(T)$ وابستگی حرارتی حامل‌ها در نیمه‌هادی (n یا p)

مثال) اگر فرض اتم‌های رهنده $N_D = 10^{15} cm^{-3}$ اضافه شوند

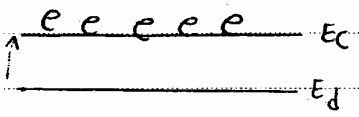
الف) در $T = 0K$ تمام الکترون‌ها در قید هسته هستند و هیچ الکترون آزادی وجود ندارد.

در ناخالص از نوع دهنده با سطح انرژی E_d حدود E_c ایجاد می‌شود.

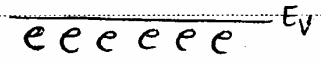


الکترون‌ها در سطح ظرفیت و یا در تراز E_d و E_c هستند

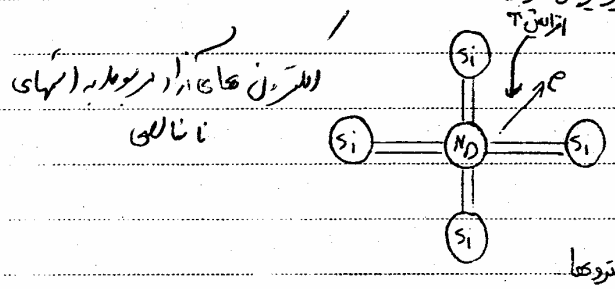
ب) آنرژی افزایش یابد $T_2 = 100\,k$ $(T_{1=100} < T < T_{max})$



* همه الکترون‌ها روی باند هدایت آمده اما در باند ظرفیت الکترون‌ها باقی می‌ماند

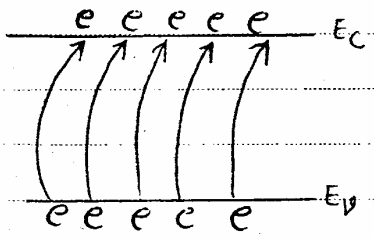


* تمام الکترون‌های اتم‌های دهنده N_D آزاد می‌شوند (یونیزه می‌شوند)

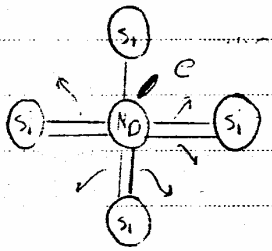


در نتیجه نیمه‌هادی نوع n ← $n_0 = N_D$ چگالی الکترون‌ها

ج) آنرژی $T > T_{max}$

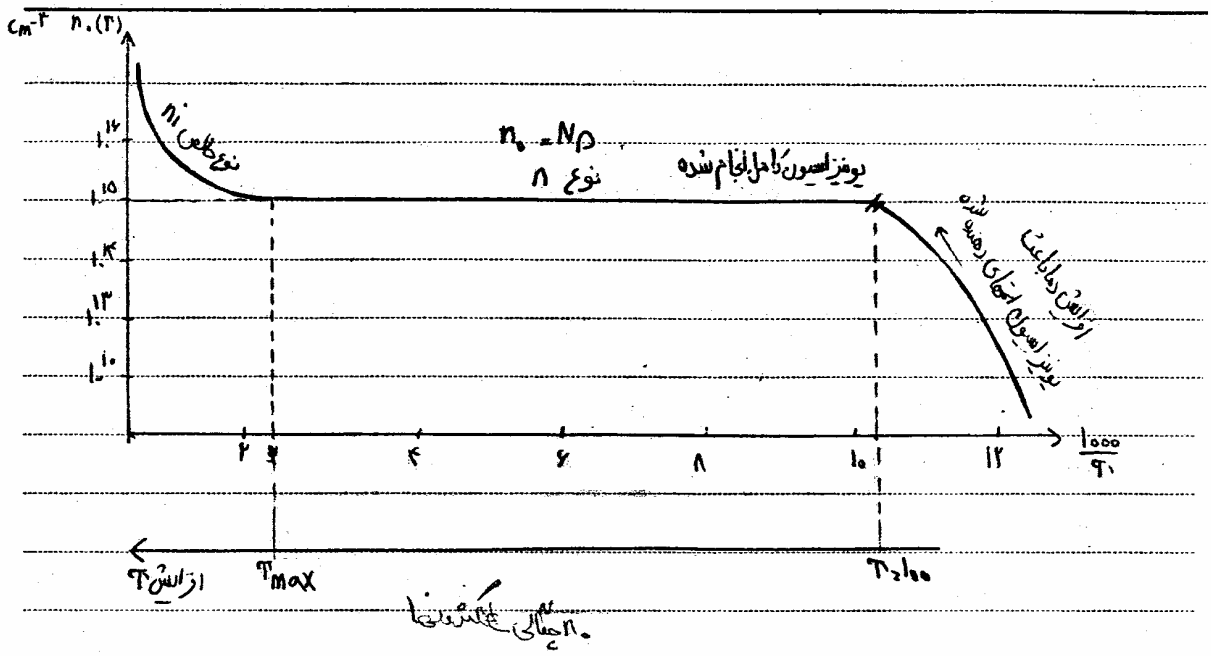


الکترون‌های پیوندهای کوالانسی اتم‌های Si هم بتدریج آزاد می‌شوند.



در نتیجه نیمه‌هادی خالص می‌شود $n_i(T)$

T_{max} { Si : $T > 200\,C$; Ge : $T > 100\,C$



خنثی بودن بار فضایی (space charge) و جبران سازی :

(بارهای مثبت و منفی با هم برابر باشند) ⇐ (حالت خنثی)

$$\underbrace{N_D + p_0}_{\text{مثبت}} = \underbrace{N_A + n_0}_{\text{منفی}}$$

N_D: یونهای دهنده، p_0: حفره، N_A: یونهای منفی، n_0: الکترون

یک عضو نیمه‌هادی خنثی است زیرا الکترونها و حفره‌ها با هم برابرند

روند جبران سازی

۱) نیمه‌هادی خالص $n_i = p_i$

E_C

E_F, E_i ـــــــــ سطح فرمی در وسط دو باند قرار دارد.

E_V

۲) ازدیاد اتمهای ناخالص رهنده ⇐ نیمه‌هادی نوع n

$n_0 = N_D$ حاملهای اکثریت

$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}$ حاملهای اقلیت

و E_F به E_C نزدیک می‌شود.

۳) افزودن ناخالصی پذیرنده N_A به نیمه‌هادی با این طوری که $N_A > N_D$ باشد بین نیمه‌هادی نوع n داریم

در این حالت قسمتی از الکترون‌های ایجاد شده با حفره‌های ایجاد پذیرنده جبران (یا ترکیب) می‌شوند

$$n_0 + N_A = p_0 + N_D \xrightarrow{\times n_0} n_0^2 - (N_D - N_A) n_0 - n_i^2 = 0 \qquad \left(p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}\right)$$

حال جواب‌های این معادله درجه دوم به طور کلی $n_0 = \dfrac{(N_D - N_A) \pm \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2}$

اگر $(N_D - N_A) \gg 4n_i^2 \Rightarrow \boxed{n_0 = N_D - N_A}$

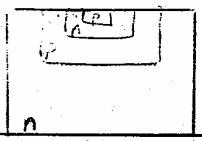
۴) افزودن ناخالصی پذیرنده N_A به نیمه‌هادی با این طوری که $N_A > N_D$ شود بین نیمه‌هادی نوع p داریم:

$$p_0 + N_D = N_A + n_0 \qquad \left(n_0 = \frac{n_i^2}{p_0}\right) \Rightarrow p_0^2 - (N_A - N_D) p_0 - n_i^2 = 0$$

حال جواب‌های معادله درجه دوم به طور کلی $p_0 = \dfrac{(N_A - N_D) \pm \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2}$

if $(N_A - N_D) \gg 4n_i^2 \Rightarrow \boxed{p_0 = N_A - N_D}$

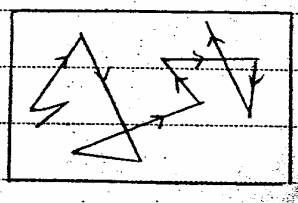
* با این روش با داشتن غلظت نیمه‌هادی نوع‌های مختلف حامل آن را می‌توان کنترل کرد.



افزودن N_A

در حامل‌های نیمه‌هادی خالص بوده و اضافه کردن ناخالصی پذیرنده رسانایی

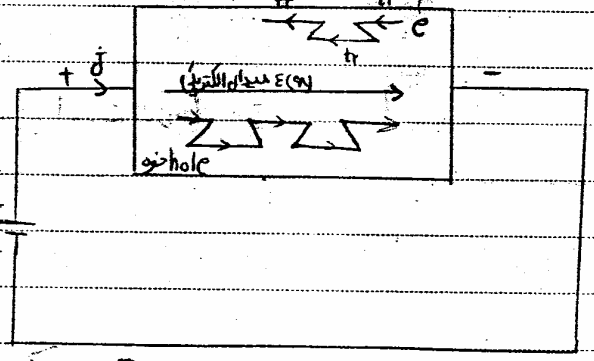
رانش (Drift) حاملها در میدان الکتریکی: در حالت تعادل یعنی حالتی که هیچ میدانی اعمال نشده حاملها (الکترونها و حفره‌ها) حرکات تصادفی و نامنظم دارند و بلور یک هیچ جریان خالص نتیجه نمی‌شود.



- احتمال اینکه الکترونها پس از زدن به مبدا اولیه بازگردد صفر است

با اعمال میدان الکتریکی حرکات حاملها منظم شده و در جهت میدان می‌شود و نتیجه حرکت آنها جریان رانش (drift) ایجاد می‌شود.

جریان‌ها عکس‌اند.



- الکترونها به طرف قطب مثبت می‌روند اما در این راه به شبکه کریستال برخوردی کنند و ممکن است جهت آنها عوض شود اما دوباره در جهت میدان حرکت می‌کنند.

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

حرکت مفید در جهت میدان

J_n (drift) جریان الکترون ← حرکت الکترون ρ_n

J_p (drift) ← حرکت حفره ρ_p

mobility

قابلیت حرکت الکترون $\mu_n = \frac{q\bar{t}}{m_n^*}$

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

m_n^*: جرم موثر الکترون (وابسته به ساختار انرژی بلور است)

μ واحد $= \frac{cm^2}{V.s}$

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

$V_{nx} = -\mu_n E(x)$ سرعت متوسط الکترون‌ها — جهت خلاف جهت

$\mu = \frac{q\bar{t}}{m_n^*}$ — $\bar{t}$: زمان متوسط بین برخورد الکترون‌ها، m_n^*: جرم مؤثر الکترون

$J_n(drift) = -qn_0 v_n$ — جهت جریان مثبت خلاف جهت حرکت الکترون‌ها

$I_n(drift)$ جریان رسانش الکترون‌ها / سطح مقطع هادی

$\frac{cm^2}{V(s)} = mobility$ — واحد تحرک‌پذیری

n_0: دانسیته الکترون‌ها

$$J_n(drift) = qn_0\mu_n E(x)$$

$\rightarrow \sigma = qn_0\mu_n$

$J_n = \sigma_n E$ — هدایت مخصوص

هدایت مخصوص ناشی از الکترون‌ها

* هرچه دانسیته الکترون‌ها بیشتر ↑ ⇐ جریان درفت ↑

در مورد حفره‌ها

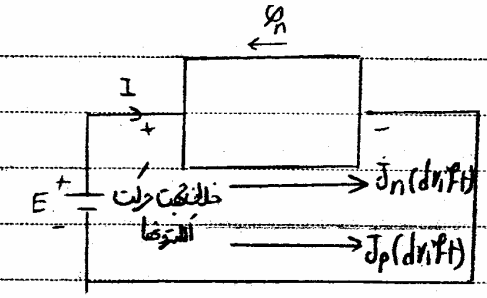
$v_p = \mu_p E(x)$

$J_p(drift) = qp_0 v_p$

$J_p = qp_0\mu_p E(x)$

$\Rightarrow \sigma_p = qp_0\mu_p$

$J_p = \sigma_p E$ — هدایت مخصوص ناشی از حفره‌ها



جریان رانشی کل $J(drift) = J_n(drift) + J_p(drift)$

$$\begin{cases} J(drift) = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p)\mathcal{E}(n) \\ J = \sigma E \end{cases}$$

مثال: نیمه‌هادی خالص با مقاومت مخصوص ρ

نمونه‌ها: Ge $\begin{cases} \mu_n = 3900 \ \frac{cm}{Vs} \\ \mu_p = 1900 \ \frac{cm^2}{Vs} \\ n_i = 2.5\times10^{13}\ cm^{-3} \\ T = 300\ K \end{cases}$

هدایت مخصوص کل $\sigma = q(n_0\mu_n + p_0\mu_p)$

$\sigma_i = qn_i(\mu_n+\mu_p) = 1.6\times10^{-19}\times2.5\times10^{13}\times(3900+1900)$

$\sigma_i = 2.32\times10^{-2}\ (\Omega cm)^{-1}$ $\quad \rho_i = (\sigma_i)^{-1} = 43\ \Omega cm$

σ هدایت مخصوص $(\Omega cm)^{-1}$ $\quad \rho = \sigma^{-1}$ مقاومت مخصوص (Ωcm)

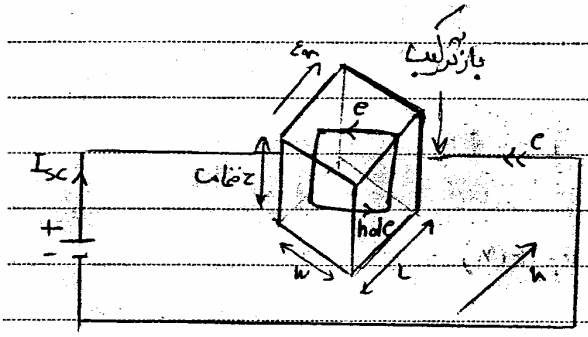
جریان رانشی (دریفت) در نیمه‌هادم‌ها ایجاد می‌شود و وابسته به چگالی حامل‌های بار است.

نیمه‌هادی خالص	نیمه‌هادی نوع n	نیمه‌هادی نوع p
$n_i = p_i$	$n_0 \gg p_0$	$p_0 \gg n_0$
$\sigma = \sigma_i = qn_i(\mu_n+\mu_p)$	$\sigma = \sigma_n = qn_0\mu_n$	$\sigma = \sigma_p = qp_0\mu_p$

- چرا $\mu_n \gg \mu_p$ است؟ زیرا حفره در الکترون اتم‌ها جاگزار رفته و در باند ظرفیت تغییر مکان می‌دهد و حفره تحت تسلط هسته است.

است و الکترون آزاد است. بعلت حرکت حفره‌ها در باند ظرفیت (پیوندهای کوالان) ⇐ قابلیت تحرک حفره کمتر از الکترون‌های باند هدایت می‌باشد.

- در اینجا این نیمه‌هادی تحت پتانسیل قرار گرفته است:



سطح مقطع $A = ZW$

$$R_{\text{مشخص}} = \frac{E_{\text{مشخص}}}{I_{\text{مشخص}}} \Rightarrow R = \rho \frac{L}{A} \quad \frac{\Omega cm}{cm^2}$$

$$\rho_{\text{مطلوب}} = \rho = R \frac{A}{L} \quad \frac{\text{مطلوب}}{\text{مطلوب}}$$

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

- اگر نیمه‌هادی نوع n باشد

$\sigma = \sigma_n = q n_0 \mu_n \rightarrow n_0$ مشخص

- اگر نیمه‌هادی نوع p باشد

$\sigma = \sigma_p = q p_0 \mu_p \rightarrow p_0$ مشخص

- اگر نیمه‌هادی خالص باشد

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

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

تمرین) از یک قطعه نیمه‌هادی n استوانه‌ای شکل به طول 2cm و سطح مقطع $1cm^2$ تحت ولتاژ 1V، جریان 1mA عبور می‌کند.

الف) با نسبت حامل‌های اکثریت این قطعه چه رسم دیاگرام باندانرژی؟ ب) چه نوع و چه مقدار ناخالصی به این قطعه اضافه شده

تا تحت تاثیر ولتاژ 1 ولت جریان صد میکرو آمپر از آن عبور کند؟ حالت نیز دیاگرام را رسم کنید.

$\mu_n = 750 \frac{cm^2}{V.S}$

$\mu_p = 500 \frac{cm^2}{V.S}$

$kT = 0.026 eV$

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

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

$E_g = 1.1 eV$

$$R = \frac{E}{I_R} = \frac{1}{1mA} = 1k$$

$$\rho = R\frac{A}{L} \Rightarrow \rho = 10^3 \times \frac{1}{2} = 500\ \Omega.cm$$

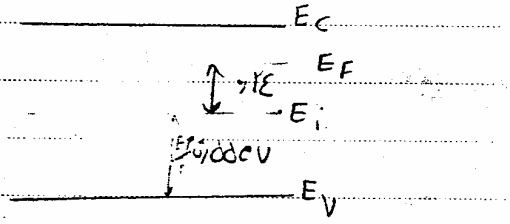
$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{500} = 0.002$$

نوع n $\Rightarrow \sigma = \sigma_n = qn_0\mu_n \Rightarrow 0.002 = 1.6 \times 10^{-19} \times 750 \times n_0$

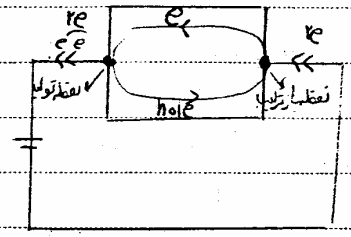
$$n_0 = \frac{0.002}{1200 \times 10^{-19}} = 1666 \times 10^{10}$$

$$n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}} \Rightarrow E_F - E_i = kT \ln\frac{n_0}{n_i} \Rightarrow E_F - E_i = 0.026 \times \ln\frac{1666 \times 10^{10}}{1.5 \times 10^{10}}$$

$E_F - E_i = 0.27$



پتانسیل مثبت باعث ایجاد زوج حفره و الکترون در نیمه‌هادی می‌شود که الکترون جذب قطب مثبت باتری می‌شود و حفره داخل نیمه‌هادی به سمت قطب منفی حرکت می‌کند و در سطح انتقال نیمه‌هادی به جای یک الکترون باز ترکیب می‌شود.



حفره که از قطب مثبت به منفی می‌رود و قطب منفی با الکترون‌ها ترکیب می‌شود

مثال) فرض در نیمه‌هادی خالص با $n_i = 2.5 \times 10^{13}\ cm^{-3}$ و $\mu_n = 3900\ \frac{cm^2}{V.s}$ و $\mu_p = 1900\ \frac{cm^2}{V.s}$ مقاومت مخصوص Ge را بدست آورید.

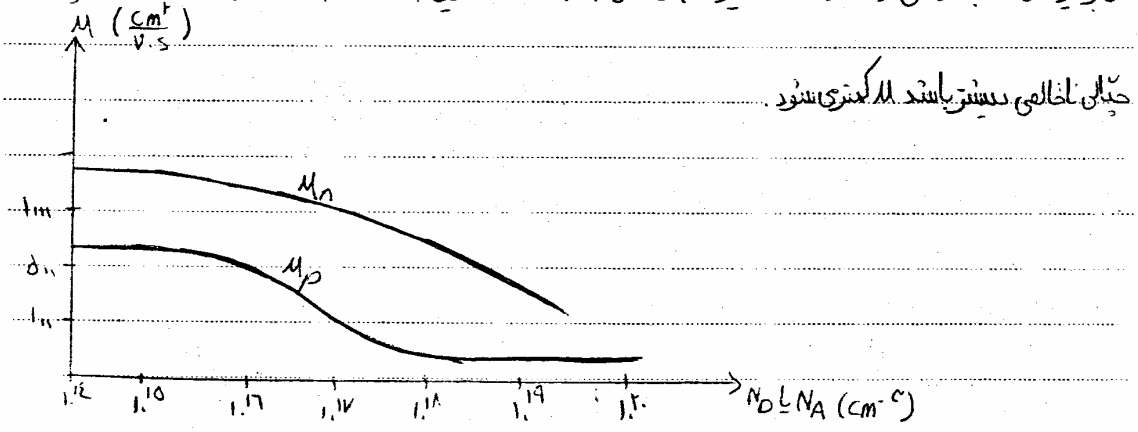
$$\sigma_i = q n_i (\mu_n + \mu_p) \Rightarrow \sigma_i = 1.6 \times 10^{-19} \times 2.5 \times 10^{13} (3900 + 1900)$$

$$\sigma_i = 2.32 \times 10^{-2}\ (\Omega cm)^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma_i} = 43\ (\Omega . cm)$$

وابستگی قابلیت حرکت μ به چگالی ناخالصی‌های خالص N_D و N_A

وجود یون‌های مثبت و منفی (ناخالصی‌های دهنده و گیرنده) و اعمال جاذبه و دافعه الکترون‌ها به حامل‌ها، باعث کاهش μ می‌شود هرچقدر چگالی ناخالصی بیشتر باشد μ کمتری می‌شود.



- وابستگی قابلیت تحرک (μ) به دما (T)

در دماهای خیلی پایین انرژی جنبشی حامل‌ها (الکترون یا حفره) بسیار کم است و به شدت تحت تأثیر یونهای دهنده یا گیرنده قرار می‌گیرند.

کم انرژی ← e

در دمای پایین

به کمی قابلیت تحرک می‌رسند.

با افزایش دما انرژی جنبشی آنها زیاد می‌شود و باعث افزایش μ می‌شود. و به تدریج تأثیر یونهای مثبت و منفی قرار می‌گیرند.

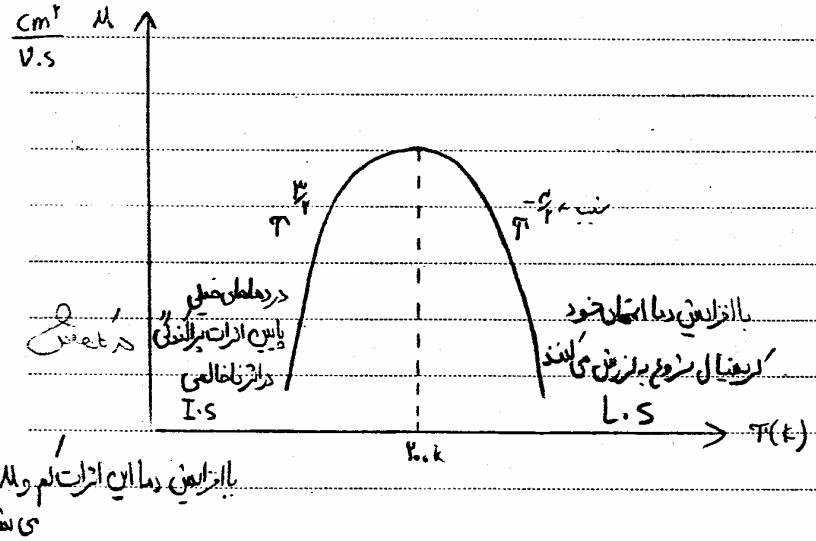
با افزایش دما انرژی جنبشی حامل‌ها افزایش می‌یابد و برخوردها بیشتر و بیشتر می‌شود.

Lattic scattring سبد کریستالی دمای بالا انرژی‌اند

ولرزش اتمها هم زیاد می‌شود

و مانعی بر سر حرکت آزادانه حامل‌ها می‌شود.

Impurity scattring ناخالصی دمای پایین انرژی‌اند.



مهم‌ترین عوامل بررسی μ { دما / ناخالصی

اثر ناخالصی: هرچه ناخالصی ↑ ← تأثیر بر پدیده‌ی هیستروزیس ↑ تغییر ناخالصی باعث تغییر $M_{اشباع}$

از این اتم‌های ناخالصی باعث ماندن قابلیت تغییر حالت‌هایی شود (به دلیل جاذبه بین پدیده‌ی هیستروزیس)

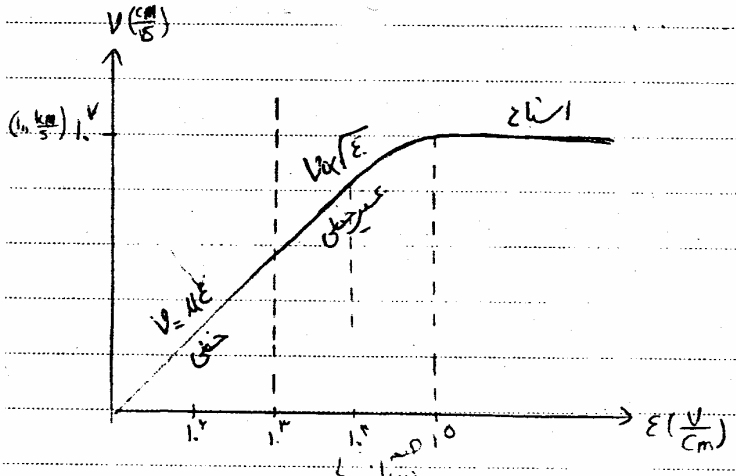
اگر σ برابر ناخالصی را ثابت بنامیم $M = f(\sigma)$

$\sigma \uparrow \quad q n_0 \mu_n \downarrow + q p_0 \mu_p \uparrow$ ← این قسمت مربوط به رابطه‌ی قابلیت تغییر M به میانگین اتم‌های ناخالصی

رابطه میدان الکتریکی و سرعت متوسط:

$$V = \mu E$$

این رابطه دقیق همیشه برقرار است فقط برای میدان الکتریکی کمتر از $10^3 \frac{V}{cm}$ برقرار است



افزایش بیش از حد میدان باعث افزایش بیش از حد انرژی حامل‌ها و برخورد شدید و ایجاد حرارت و بالا رفتن دمای مطلق و

در کتاب سئودوم رشته‌ی مطلق تغییر یابد $10^3 > E$ باشد

تمرین ۱) در یک نیمه‌هادی Si ناخالص دهنده فسفر به مقدار $10^{17}\,cm^{-3}$ اضافه شده الف) مقاومت مخصوص

ب) نسبت وزنی Si به فسفر ج) نوع نیمه‌هادی و رسم دیاگرام باندانرژی د) اگر ناخالص گیرنده به مقدار $10^{18}\,cm^{-3}$ اضافه شود

مقاومت مخصوص چقدر می‌شود؟ هـ) نوع نیمه‌هادی و رسم دیاگرام باندانرژی

الف) $\sigma = q n_0 \mu_n = 1.6\times10^{-19}\times10^{17}\times1080 = 17.28$

$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{17.28} = 5\times10^{-2}$

$n_0 = N_D = 10^{17}\,cm^{-3}$

$n_i = 1.5\times10^{10}\,cm^{-3}$

چگالی اتمهای Si $= 5\times10^{22}\,cm^{-3}$

$E_g = 1.1\,eV$

$kT = 0.259\,eV$

$T = 300$

$\mu_n = 1080\ \frac{cm^2}{V.S}$

$\mu_p = 320\ \frac{cm^2}{V.S}$

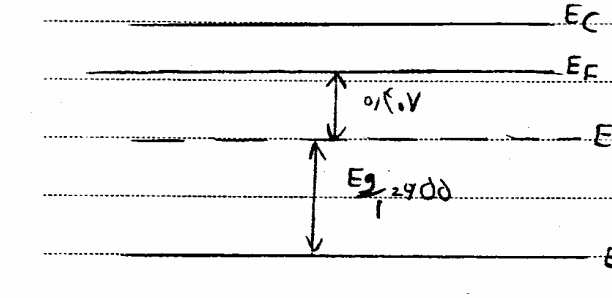
وزن اتمی فسفر $= 31\ \frac{gr}{mol}$

وزن اتمی Si $= 28.1\ \frac{gr}{mol}$

ب) نسبت وزنی $= \frac{\text{وزن اتمی Si}}{\text{چگالی Si}} \times \frac{\text{چگالی Si}}{\text{چگالی P}} \times \frac{\text{تعداد اتم P}}{\text{تعداد اتم Si}} = \frac{28.1}{31}\times\frac{5\times10^{22}}{10^{17}} = 4.5\times10^{5}$

ج) استعداد دهنده ← نیمه‌هادی نوع n ← $n_0 = N_D = 10^{17}$ حاملهای اکثریت

$E_F - E_i = kT \ln\frac{n_0}{n_i} \Rightarrow E_F - E_i = 0.259 \ln\frac{10^{17}}{1.5\times10^{10}} = 0.417\,eV$



نوع n $n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}$

نوع p $p_0 = n_i e^{-\frac{(E_F - E_i)}{kT}}$

د) $N_A = 10^{18}\,cm^{-3}$

$\sigma = \sigma_p = q p_0 \mu_p = 1.6\times10^{-19}\times10^{18}\times320 = 512\times10^{-1} = 51.2$

$\rho = \frac{1}{51.2} = 0.019$

0.8×10^{-8}

(۴۹)

هـ) نوع p

$E_i - E_F = kT \ln\frac{p_0}{n_i} \Rightarrow E_i - E_F = 0.259 \ln\frac{10^{18}}{1.5\times10^{10}} = 0.463$

E_i پایین‌تر از

۲) جریان الکترون‌ها و حفره‌ها و رسم دیاگرام باندانرژی در هر حالت برای $n_i = 1.5 \times 10^{10}$

الف) $N_A = 10^{18}\,cm^{-3}$ ب) $N_A = 2.9 \times 10^{15}\,cm^{-3}$ $N_D = 3 \times 10^{15}\,cm^{-3}$

ب

ب) $\left.\begin{aligned} np &= n_i^2 \\ n + N_A &= p + N_D \end{aligned}\right\} \Rightarrow \begin{aligned} np &= 2.25 \times 10^{20} \\ n + 2.9 \times 10^{15} &= p + 3 \times 10^{15} \end{aligned}$

$np = 2.25 \times 10^{20}$

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

$\Rightarrow n(n - 0.1 \times 10^{15}) = 2.25 \times 10^{20}$

$n^2 - 0.1 \times 10^{15} n - 2.25 \times 10^{20} = 0$

$\Delta = (0.1 \times 10^{15})^2 - 4(1)(-2.25 \times 10^{20}) = 0.01 \times 10^{30} - 9 \times 10^{20} = 10^{28} - 9 \times 10^{20} = (10^8 - 9)10^{20}$

$= 31622 \times 10^{10}$

$n = \dfrac{0.1 \times 10^{15} \pm 31622 \times 10^{10}}{2} = \dfrac{(10000 \pm 31622) \times 10^{10}}{2} = 20811 \times 10^{10} = 2.0811 \times 10^{6}$

$p = \dfrac{n_i^2}{n} \Rightarrow \dfrac{2.25 \times 10^{20}}{20811 \times 10^{10}} = 1.0808 \times 10^{6}$

۳) دریک نیم‌هادی ذاتی در ۲۰۰°C با افزایش E_i شود $n_i = 1,5 \times 10^{10}$

$kT = 0,259\ eV$

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} \Rightarrow 0,4 = 0,0259 \ln \frac{n_0}{1,5 \times 10^{10}}$$

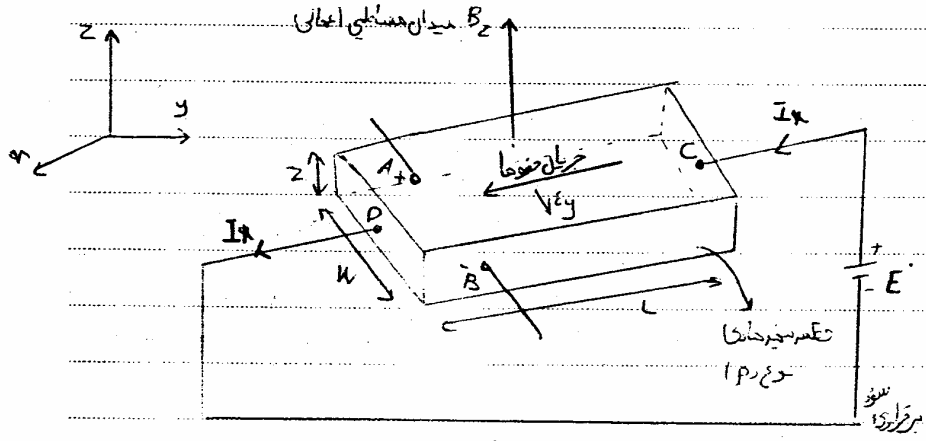
$$\ln \frac{n_0}{1,5 \times 10^{10}} = 15,44 \Rightarrow \frac{n_0}{1,5 \times 10^{10}} = 5078826,1$$

$$n_0 = 7,3152 \times 10^{10} \Rightarrow n_0 = 7,3 \times 10^{4}$$

۸۴٫۱۲۵

اثر هال (Hall effect) : { نوع نیم‌هادی
چگالی حامل‌های اکثریت
تحرک‌پذیری μ }

موضوع آزمایش: اندازه‌گیری جریان I_x سوراخ در نمونه نیم‌هادی که در میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان اعمال شود و ولتاژی در دو سر نمونه ایجاد می‌شود V_{AB}



در اثر اعمال ولتاژ: I_x از C و D برقرار می‌شود

میدان الکتریکی داخلی ← $V_{AB} = W \cdot E_y$ ← ولتاژ اثر هال

با اعمال میدان مغناطیسی B_z نامعلوم در جهت z مشخص شده، نیروی لورنتز حفره‌های متحرک از سمت C به D اثر می‌کند (در جهت I_x)

اما ولتاژ V_{AB} ایجاد می‌شود (در دو حالت)

کاربردهای اول ۱) تعیین نوع نیمه‌هادی

if $V_{AB}>0$ ⇒ نیمه‌هادی نوع p ⇒ $R_H>0$

if $V_{AB}<0$ ⇒ نیمه‌هادی نوع n ⇒ $R_H<0$

روابط ریاضی:

نیروی وارده بر حامل‌های الکتریکی در حضور یک میدان الکتریکی و مغناطیسی $F=q(\mathcal{E}+\vec{V}\otimes B_z)$

(ضرب خارجی، سرعت حامل‌ها)

با توجه به اینکه با اعمال B هیچ تأثیری در مقدار I_x ایجاد نمی‌شود پس نیروی وارده بر حامل‌ها اعمال نمی‌شود.

$$F_y=q(\mathcal{E}_y-V_x B_z)=0 \Rightarrow \begin{cases}\mathcal{E}_y=V_x B_z \\ \text{قبلاً } J_x=qp_0V_x\end{cases} \Rightarrow \mathcal{E}_y=\frac{J_x}{qp_0}B_z \quad (1)$$

ضریب هال $R_H=\frac{1}{qp_0}\left(\frac{cm^3}{C}\right)$

$$\Rightarrow \mathcal{E}_y=J_x R_H B_z \Rightarrow R_H=\frac{\mathcal{E}_y}{J_x B_z}$$

$\bar{F}_x=qE_0V_x \rightarrow V_x=\frac{\bar{v}}{E_0 q}$

۲) تعیین دانسیته حامل‌های الکتریسیته

(1)

در نوع n ← n_0

در نوع p ← p_0

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

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

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

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

نوع n $\delta=\delta_n=qn_0\mu_n$

$\delta=\delta_p=qp_0\mu_p$

حالتی $\delta=qn_i(\mu_n+\mu_p)$

۱۳- تعیین قابلیت تحرک حاملها (μ_n, μ_p)

نوع n: $R_H = \frac{-1}{qn_0}$

- تعیین دانسیته حاملهای اکثریت:

$$p_0 = \frac{1}{qR_H} = \frac{J_x B_z}{q\mathcal{E}_y} = \frac{\frac{I_x}{w.z} \cdot B_z}{q\frac{V_{AB}}{w}} = \frac{I_x B_z}{qzV_{AB}}$$

$$R_H = \frac{\mathcal{E}_y}{J_x B_z}$$

$$\Rightarrow p_0 = \frac{I_x B_z}{zqV_{AB}}$$

تعیین قابلیت تحرک حاملها:

$$\text{مقاومت } R = \frac{V_{CD}}{I_x} = \rho\frac{l}{w.z}$$

$$\text{مقاومت ویژه } \rho = \sigma^{-1} \text{ مقاومت}$$

$$\text{مقاومت } \sigma = qp_0\mu_p \Rightarrow \mu_p = \frac{\sigma}{qp_0} = \sigma R_H$$

مثال) ویفر نمونه n.s با 10^{17} اتم دهنده ($N_D = 10^{17}$) ناخالصی شده مطلوبست محاسبه مقاومت کمون ρ و مقاومت ورقه‌ای را در شرایط زیر مشخص کنید.

$\mu_n = 700 \frac{cm^2}{Vs}$

$B_z = 1.0 \frac{wb}{cm^2}$

$I_x = 100A$

$z = 100\mu m$

حاملهای اکثریت $n_0 = N_D = 10^{17}$

$$\sigma_n = qn_0\mu_n = 1.6\times10^{-19} \times 10^{17} \times 700 = 11.2 \ (\Omega cm)^{-1}$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma_n} = 0.0893 \ \Omega cm$$

$R_H = \frac{-1}{q n_0} = -۶۲٫۵ \frac{cm^3}{C}$ نیمه‌هادی نوع n

$V_{AB} = \frac{I_x B_z R_H}{z} = \frac{(10^{-3} A)(1^{-5} \frac{wb}{cm^2})}{10^{-2} cm} \times (-۶۲٫۵) \frac{cm^2}{C}$

$V_{AB} = -۶۲٫۵ \; mVolt$ منفی به‌طور نیمه‌هادی نوع n است.

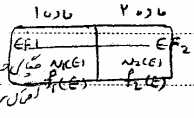
تغییرناپذیری سطح فرمی E_F:

حالت تعادل: هرچیز با کمی اصل خود در حالت تعادل تمایل دارد در حالت تعادل کمترین حالت ممکن را داشته باشد.

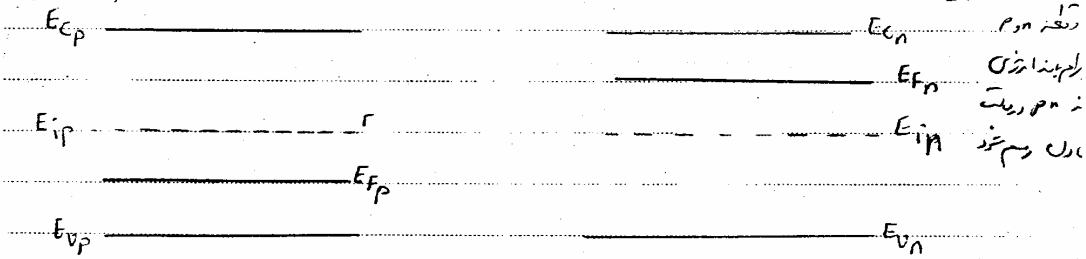
در حالت تعادل: $\frac{dE_F}{dn} = 0$ و در حالت تعادل آلوده‌کننده نیمه‌هادی به هم پیوند برقرار کنند E_F در طول نیمه‌هادی‌ها میزانش نمی‌باشد. جریان صفر است

با امکان تغییر می‌کند

چیزی که نیمه‌هادی حتماً در حالت تعادل سطح فرمی در همه‌ی آن تغییر نمی‌کند.

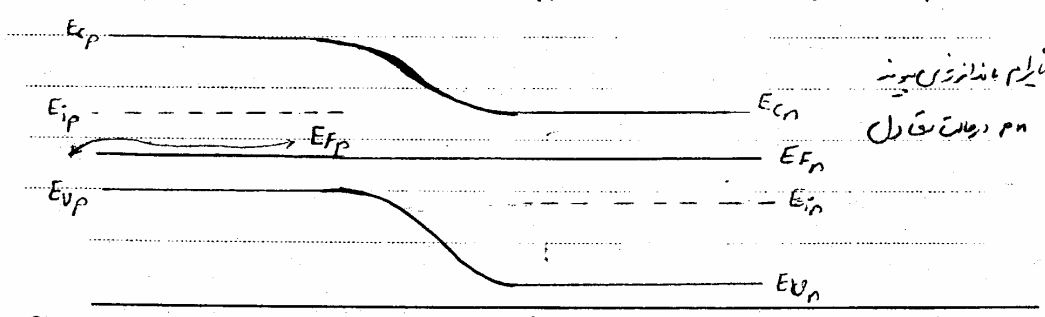


مثال) پیوند pn در حالت تعادل



دیاگرام باندانرژی پیوند pn در حالت تعادل

اگر اینها با هم متصل شوند به صورت:



دیاگرام باندانرژی پیوند pn در حالت تعادل

$r_1 =$ نرخ الکترون‌های ارتعاشی از ماده 1 به ماده 2 $\propto N_1(E) f_1(E) N_2(E) (1 - f_2(E))$ احتمال جای خالی

$r_2 =$ نرخ الکترون‌های ارتعاشی از ماده 2 به ماده 1 $\propto N_2(E) f_2(E) N_1(E) (1 - f_1(E))$

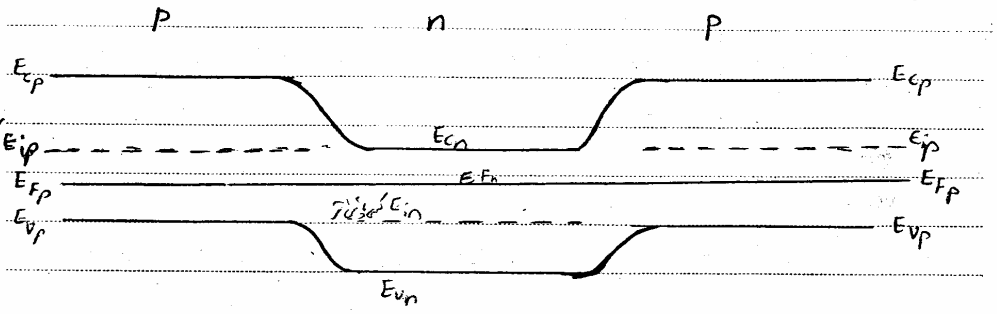
در حالت تعادل، جریان صفر $\rightarrow r_1 = r_2$ $\quad N_1 f_1 N_2 (1 - f_2) = N_2 f_2 N_1 (1 - f_1)$

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

$\rightarrow f_1(E) = f_2(E)$ $\quad (1 + e^{\frac{E - E_{F1}}{kT}})^{-1} = (1 + e^{\frac{E - E_{F2}}{kT}})^{-1} \rightarrow E_{F1} = E_{F2}$ در حالت تعادل ترمودینامیکی تراز فرمی همه‌جا یکسان است

رسم دیاگرام باندهای انرژی پیوند pnp در حالت تعادل

مثال) پیوند pnp در حالت تعادل را رسم کنید

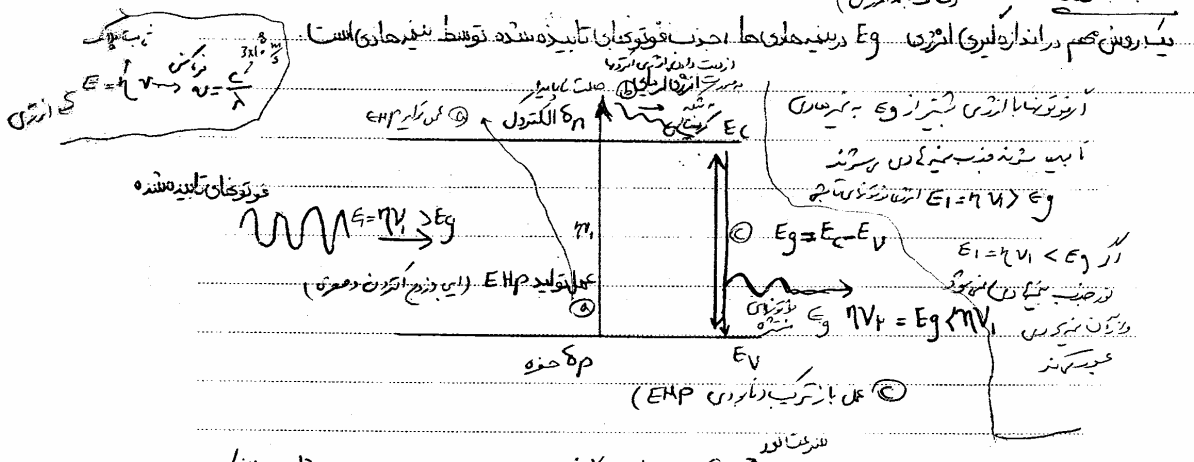


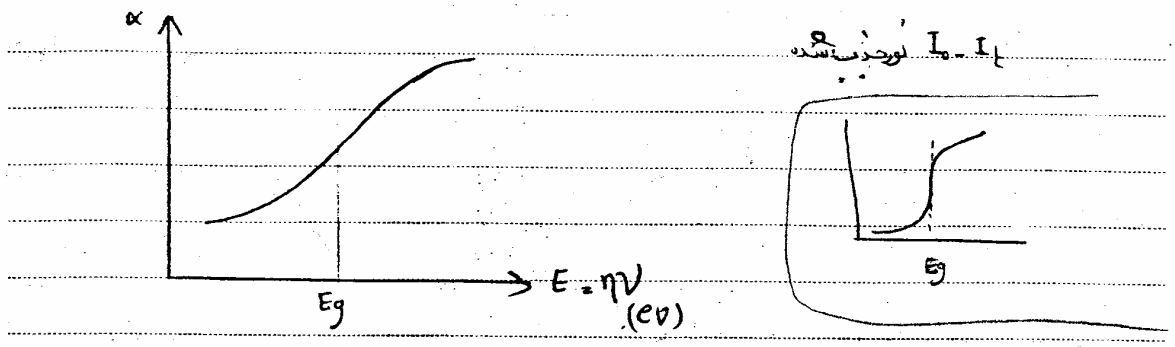
مثال سطح انرژی در حالت تعادل تفسیر می کند.

بار سرعت های حامل در نیمه هادی ها

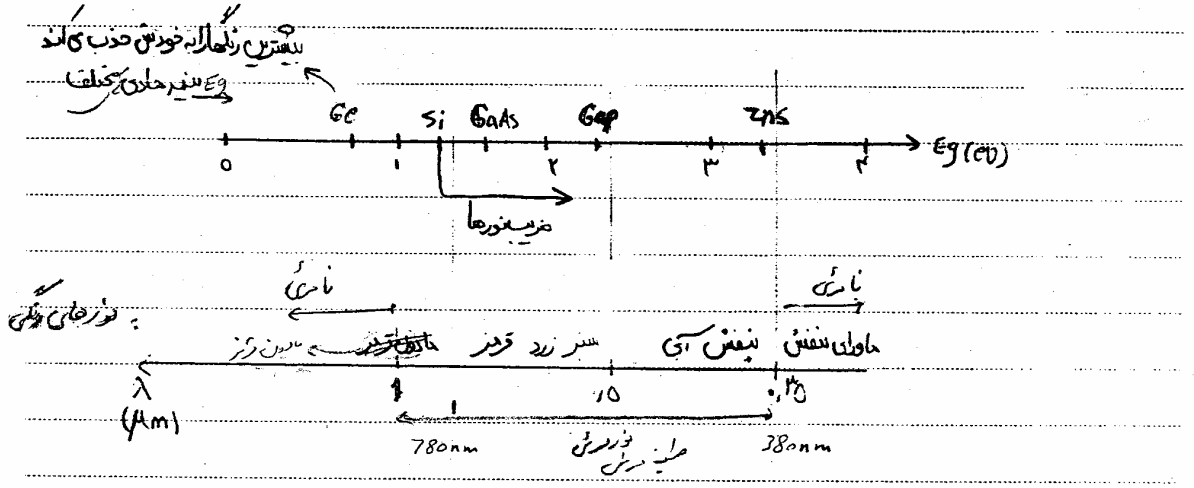
- جذب نوری:

یک فوتون هم اندازه انرژی E_g در نیمه هادی ها، جذب فوتوکنان تابیده شده توسط نیمه هادی است





$$E = \eta V = \eta \frac{C}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda} \Rightarrow {}^{(eV)}E = \frac{1,24}{\lambda}$$
$$(\mu m)$$



if $E_g < \eta V$ ← جذب

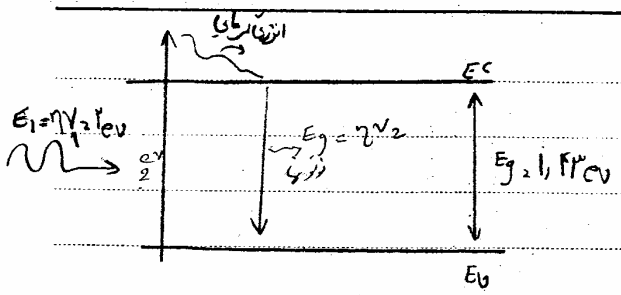
مثال) دریک نمونه GaAs با ضخامت $L = 2\mu m$ و نور تک رنگی با $\eta V = 2eV$ تابیده شده ضریب جذب $\alpha = 5 \times 10^4 cm^{-1}$ است.

توان تابشی به نمونه $I_0 = 10mW$ و $E_g = 1,43eV$ برای GaAs مطلوب است:

الف) انرژی کل جذب شده توسط نمونه (صفحه) در ثانیه ← $I_0 - I_t = ?$

ب) نوع انرژی گرمایی ایجاد شده به شبکه مثل از بازترکیب.

تعداد فوتون‌های ساطع شده؟



$I_t = I_0 e^{-\alpha L} = 1mW\, e^{-0,46 \times 1,4 \times 10^{-3}}$

$I_t = 1mW$

الف) انرژی جذب شده $I_0 - I_t = 9mW = 9 \times 10^{-3}\ \frac{J}{s}$

ب) درصدی که صرف انرژی گرمایی شد. $\frac{\eta\nu - E_g}{\eta\nu} = \frac{2-1,43}{2} = 0,285$

انرژی جذب شده = انرژی یک فوتون × تعداد فوتون‌های گسیل شده

$= 9 - 2.57 = 6.43mW$

تعداد فوتون‌های گسیل شده $= \frac{6,43 \times 10^{-3}}{\frac{1,9 \times 10^{-19} \times 1,43}{9}} = 2,8 \times 10^{16}\ \frac{1}{sec}$

انرژی گرمایی جذب شده $= 0,285 \times 9mW = 2,565 \times 10^{-3}\ \frac{J}{s}$

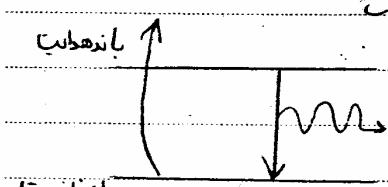
- نورافشانی (luminescence): درهنگام بازترکیب واهلشی که الکترون‌های تحریک شده به حالت تعادل برمی‌گردند اتفاق

(با عواملی که باعث می‌شوند الکترون‌ها تحریک شوند به حالت

تابش نوری باشد

ناپیوسته و مستقیم و مستقیم پرتو ندهد سرعت یا به صورت گرما باشد

استاد رشته می‌خواهد باشد ؟)



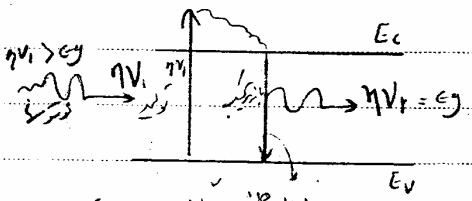
سه مکانیزم نورافشانی (تحریک الکترون‌ها) (در اثر چه تحریک الکترون‌ها

نورافشانی به سه روش)

۱) فوتونی
۲) کاتدی
۳) الکترونی

نورافشانی فوتونی: تحریک توسط فوتون‌ها (پرتو انرژی) انجام می‌شود

(با تابش فوتون‌ها الکترون‌ها تحریک می‌شوند)

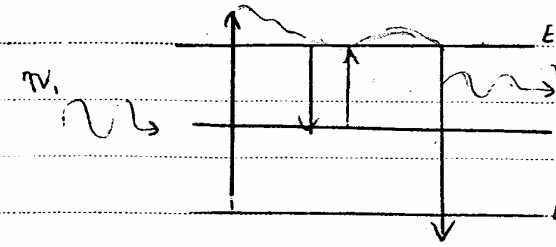


نورافشانی رزونانس (سریع)

10^{-8} sec زمان حدود تابش یک فوتون

10^{-3} s بیش از تحریک طول کشید تا نورافشانی انجام شود

ادامه در پایان ۷ بهمن



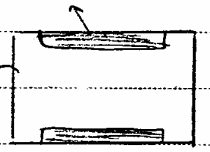
ترازهای انرژی بعلت وجود ناخالصی یا نقص شبکه بلوری

که باعث کند شدن عمل گذار تابش نوری میشود

(نورافشانی دیرگذر) به چنین موادی شب‌تاب گویند. خاصیت فسفرسان

phasphevescent

خاصیت فسفرسان



$E_g < ?V_1$ برانگیختگی الکتریکی ← تابش امواج نامرئی با انرژی زیاد

تحریک ماده فسفرسان و تابش نوری

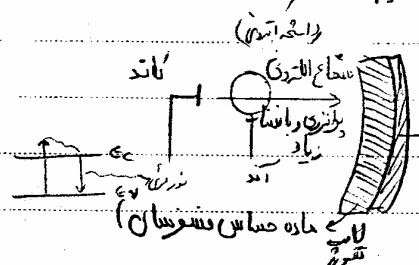
← نورافشانی

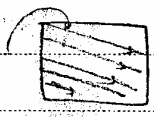
لامپ فلورسان

(مهتابی)

- نورافشانی کاتدی: تحریک توسط الکترونهای پرانرژی و با شتاب زیاد انجام می‌شود

مثل لامپ تصویر CRT ← برخورد به ماده فسفرسان





هر نقطه لامپ تصویر پیوسته در کمتر از 25 msec دوباره لایه آن بمباران مجدد میشود.

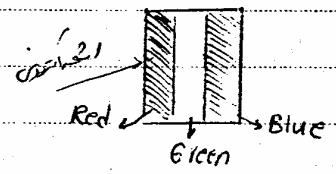
* اگر سیاه سفید باشد نیاز به ماده لازم است

و اگر رنگی باشد ۳ ماده لازم است

* بر حسب اینکه این ماده چه چیز باشد رنگ‌های مختلف دارد

تلویزیون رنگی ۳ کاتدی

(لامپ تصویر رنگی)



(ماده حساس به صورت لوزهای کوچک) RGB

- نورافشانی الکتریکی: در اثر جریان الکتریکی و انتقال حاملهای الکتریسیته و بازترکیب با آنها (در پیوند pn در LED)

جریان الکتریکی باعث انتقال حاملهای اقلیت یا اکثریت به نواحی می‌شود که با حاملهای دیگر بازترکیب می‌کنند و این بازترکیب باعث تولید نور می‌شود. در LED این نور را برای ما مفید است.

- تغییرات زمانی حاملهای اضافی:

در حالت تعادل: n_0 چگالی الکترونها، p_0 چگالی حفره‌ها

$$n_i^2 = n_0 p_0$$

چگالی الکترونها $n(t) = n_0 + \delta_n(t)$ (برای کم)

$\delta_n(t)$: تراکم اضافی الکترونها نسبت به حالت تعادل

چگالی حفره‌ها $p(t) = p_0 + \delta_p(t)$ (برای کم)

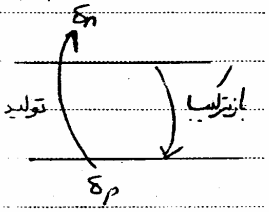
δ_p: تراکم اضافی حفره‌ها نسبت به حالت تعادل

$\delta_n = \delta_p$

نرخ بازترکیب = سرعت تولید حاملها

$g(T) = r(T)$

$* \quad \alpha_r n_i^2 = \alpha_r n_0 p_0$



$\delta_p = \delta_n$

سرعت بازترکیب = نرخ تولید حاملها = تغییر در مقدار (چگالی) الکترونهای باند هدایت

$$\frac{dn(t)}{dt} = \alpha_1 n_i^2 - \alpha_2 n(t) p(t)$$

δ_n, δ_p

$$\frac{d\delta_n(t)}{dt} = \alpha_1 n_i^2 - \alpha_2 (n_0 + \delta_n(t))(p_0 + \delta_p(t))$$

$$= +\alpha_2 n_i^2 - \alpha_2 n_0 p_0 - \alpha_2 \delta_n p_0 - \delta_n^2 - \alpha_2 p_0 \delta_n$$

$$\frac{d\delta_n(t)}{dt} = \alpha_1 n_i^2 - \alpha_2 (n_0 p_0 + (n_0 + p_0)\delta_n + \delta_n^2)$$

مسئله را وقتی که تزریق کم (low injection) است یعنی δ_n خیلی کمتر شود در نظر گیریم.

زمان بازترکیب $\tau_n = \frac{1}{\alpha_2 p_0}$ آنگاه

$$\frac{d\delta_n(t)}{dt} = -\alpha_2 p_0 \delta_n(t) \Rightarrow \delta_n(t) = \delta_n e^{-t/\tau_n}$$

$$\frac{d\delta_n(t)}{dt} + \alpha_2 (n_0 + p_0)\delta_n(t) = 0 \Rightarrow \delta_n(t) = \delta_n(0) e^{-t/\tau_n}$$

Δ_n مقدار اولیه $\Delta_n = \delta_n(0)$

$p \ll n_0$ تکمیل $p_0 \gg n_0$

$*$ Δ_n مقدار اولیه تزریق شده در لحظه $t = 0$ است.

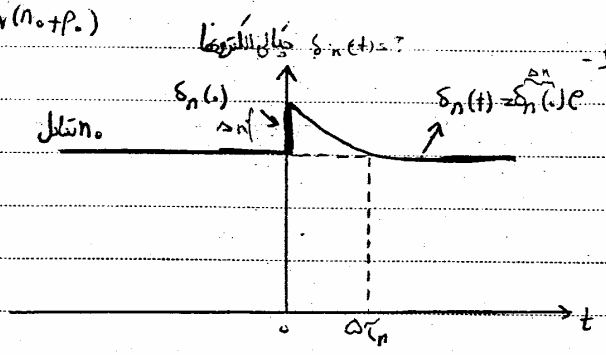
(نمایی شدن)

سرعت بازترکیب = سرعت تولید حاملها − تغییر در تراکم اضافی در زمان

$$\frac{d(\delta_n(t))}{dt} = g(T) - r(T) = \alpha_1 n_i^2 - \alpha_2 n(t) p(t)$$

تغییر

τ_n طول عمر بازترکیب الکترون $\simeq \frac{1}{\alpha_r(n_0+p_0)}$



τ_p طول عمر حفره‌ها در نیمه‌ی الکترونها است.

مثال) نیمه‌رسانای GaAs با $N_A = 10^{15}\,cm^{-3}$ با ناخالصی پذیرنده ناخالص شده و $n_i = 10^{6}\,cm^{-3}$ در لحظه $t=0$ به اندازه $10^{14}\,\frac{EHP}{cm^3}$ تولید شود. تغییرات حاملهای اضافی را محاسبه کنید.

$\tau_n = \tau_p = 10\,ns$

حبابی حفره‌ها $p_0 = N_A = 10^{15}\,cm^{-3}$

$$n_0 = \frac{n_i^2}{p_0} = \frac{10^{12}}{10^{15}} = 10^{-3}\,cm^{-3}$$

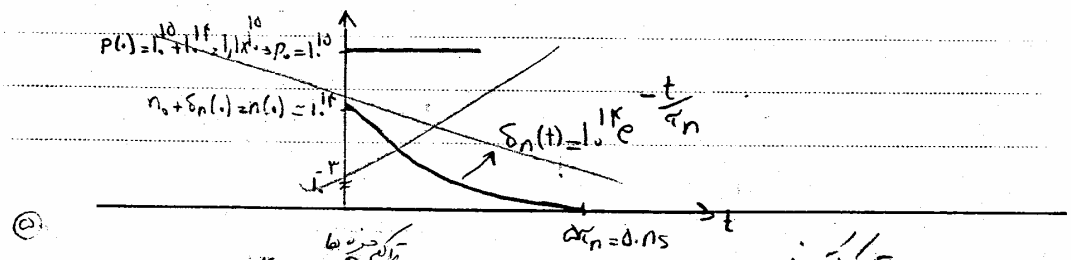
$\delta_n(0) = \delta_p(0) = 10^{14}$

$\delta_p(t) = \delta_p(0)\,e^{-t/\tau_p} = 10^{14}\,e^{-\frac{t}{\tau_{p0}}}$

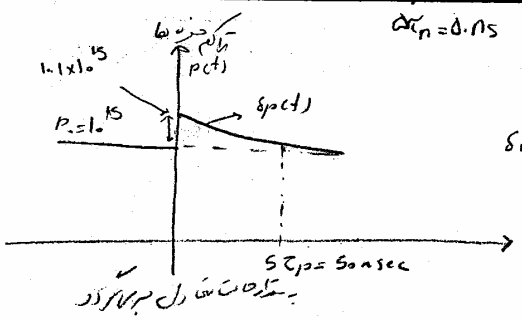
$\delta_n(t) = \delta_n(t=0)\,e^{-t/\tau_n} = 10^{14}\,e^{-\frac{t}{\tau_n}}$

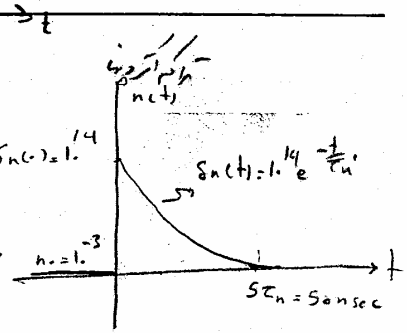
~~$t>0 \;:\; p(t) = p_0 + \delta_p(t) \Rightarrow p(t) = 10^{15} + 10^{14}\,e^{-\frac{t}{\tau_p}}$~~

~~$t>0 \;:\; n(t) = n_0 + \delta_n(t) \Rightarrow n(t) = 10^{-3} + 10^{14}\,e^{-\frac{t}{\tau_n}}$~~



@





- بازترکیب { مستقیم / غیرمستقیم : با وجود تراز(های) انرژی (از طریق ناخالصی یا نقص ساختار انجام می‌شود)

E_c — E_v

E_c — E_v (الکترون، حفره) — Ge و Si (در نیمه‌هادی‌های ذاتی چهارم)

الکترون از نوار هدایت به نوار ظرفیت ترکیب می‌شود (با از بین رفتن جفت الکترون و حفره)

E_c — E_t — E_v

الکترون از نوار هدایت به E_t حرکت می‌کند و با حفره بازترکیب می‌شود

الکترون از E_t به نوار ظرفیت می‌رود

بازترکیب با حفره

بازترکیب غیرمستقیم

بعلت انرژی‌های ناخواسته و یا نقص شبکه بلور که تراز انرژی ناخواسته (یا تله Trap) ایجاد می‌کند

E_c — Li P As

N_i — E_i

$Zn(Cl)$ — E_A — 0.31

E_a

E_v

امتحان نخالص

(در Si)

تولید حامل‌ها:

تولید نوری حامل‌های اضافی در اثر تابش نور با انرژی مناسب

جایگزین علاوه بر تولید حرارتی، تولید نوری هم با شدت در الکترون‌ها

نرخ بازترکیب = تولید نوری + تولید حرارتی

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

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

$\delta_p = \delta_n$

δ_n^2 صرف‌نظر از ⇒ $g_{op} = \alpha_r (n_0 + p_0)\delta_n$

$\frac{\text{تولید}}{\text{بازترکیب}}$ — حالت تعادل

$\tau_n = \frac{1}{\alpha_r (n_0 + p_0)}$ تعریف طول عمر بازترکیب الکترون

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

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

جایگزین الکترون‌های اضافی در حالت تعادل

مثال) $\delta_p = \tau_p g_{op}$ و $\delta_n = \tau_n g_{on}$ اگر $g_{op} = 10^{13} \frac{EHP}{cm^3}$ در هر سانتی‌متر نیمه‌هادی نوعی از Si با $n_0 = 10^{14} cm^{-3}$ و $\tau_n = \tau_p = 2\,\mu sec$ مطلوبست محاسبه چگالی حامل‌ها در حالت ماندگار. ناخالصی دهنده سبب تغییر در نوع n شده

$\Rightarrow \delta_n = n_0 = 10^{14} cm^{-3}$

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

$p_0 = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{14}} = 2.25 \times 10^6 cm^{-3}$ $\quad p_0 \ll n_0$

$\Rightarrow \delta_p = \delta_n = g_{op} \tau_n = 10^{13} \times 2 = 2 \times 10^{13} cm^{-3}$ ، $\delta_p = g_{op} \tau_p = 2 \times 10^{13} cm^{-3}$

چگالی الکترون‌ها در حالت ماندگار $n = n_0 + \delta_n \Rightarrow n = 10^{14} + 2 \times 10^{13} = 1.2 \times 10^{14}$

چگالی حفره‌ها در حالت ماندگار $p = p_0 + \delta_p \Rightarrow p = 2.25 \times 10^6 + 2 \times 10^{13} = 2 \times 10^{13}$

ترازهای شبه فرمی:

بدون حامل‌های اضافی سطح فرمی داریم: (FERMI)

سطح فرمی در حالت بدون حامل‌های اضافی در نیمه‌رسانا E_F

چگالی الکترون‌ها در حالت تعادل $n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}$

چگالی حفره‌ها در حالت تعادل $p_0 = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}$

با حامل‌های اضافی شبه فرمی داریم: (IMREF)

شبه تراز فرمی IMREF

چگالی الکترون‌ها $n = n_i e^{\frac{F_n - E_i}{kT}}$

در حالتی که حامل‌های اضافی وجود داشته باشد ترازهای شبه فرمی F_n ، F_p

چگالی حفره‌ها $p = n_i e^{\frac{E_i - F_p}{kT}}$

مثال) در مثال قبل تراز های شبه فرمی را بدست آورید

$n = 1.2\times10^{14} \Rightarrow n = n_i e^{\frac{F_n - E_i}{kT}}$

$+70^\circ C$ (تغییر تراز فرمی با دما)

$F_n - E_i = kT \ln\frac{n}{n_i} \Rightarrow F_n - E_i = 0.059 \ln\frac{1.2\times10^{14}}{1.5\times10^{10}} = 0.233\,eV$

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

$E_i - F_p = kT \ln\frac{p}{n_i} = 0.059 \ln\frac{2\times10^{13}}{1.5\times10^{10}} = 0.186\,eV$

- حاصلضرب چگالی حاملها در حالت تعادل ترمودینامیکی مستقل از تراز فرمی است (در حالت نیمه‌رسانا)

$\tau = g^{-1}$ (طول عمر حاملهای اقلیتی)

بعد از تابش نور: $\delta_n = g_{op}\tau_n$, $\delta_p = g_{op}\tau_p$

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

$\Delta\sigma = q(\delta_n\mu_n + \delta_p\mu_p)$

$= q g_{op}(\tau_n\mu_n + \tau_p\mu_p)$

- کاربرد در مقاومات نوری و ریسانس (فتورسیستور)

$g = \alpha^{-1}$

در فتورسیستورها از این رابطه برای استفاده می‌شود

E_C, F_n, E_i, F_p, E_V

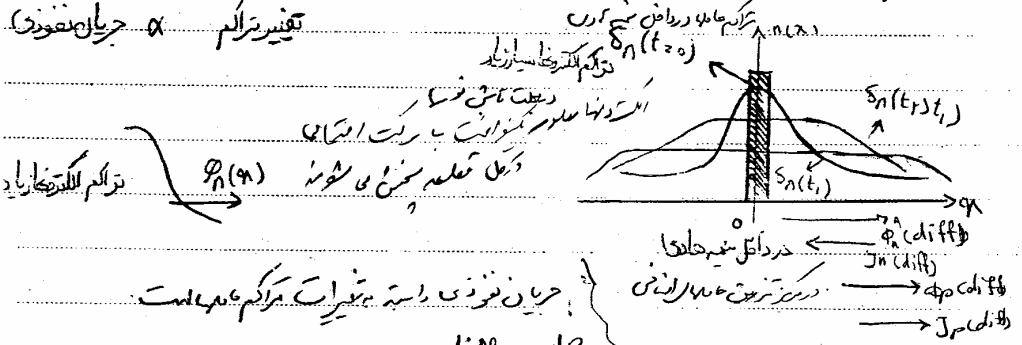
$0.233\,eV$, $0.186\,eV$

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

- جریان نفوذی (Diffusion): در اثر حرکت حاملها از نواحی پرتراکم به کم‌تراکم

از آنجایی که حاملها از تراکم بیشتر هستند به محل با تراکم کمتر حرکت می‌کنند و باعث ایجاد جریان می‌شود.

تغییر تراکم $\propto$ جریان نفوذی

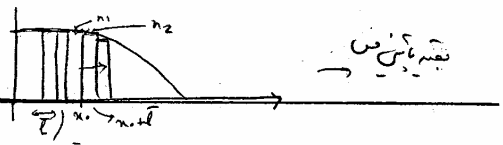


جریان نفوذی رابطه مستقیم با تغییرات تراکم حامل‌ها است

$J_{p(diff)} \propto \frac{dp}{dx}$

$J_{n(diff)} \propto \frac{dn}{dx}$

سپس از روی مکانیزم تغییرات مقاومت در اثر تابش نور مشخص می‌شود



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

$n(x)$ چگالی الکترون‌ها

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

$J_p(diffusion) = -qD_p \frac{dp(x)}{dx}$

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

$J_p = q\rho\mu_p E(x) - qD_p \frac{d\rho}{dx}$

$J_n(drift) = qn\mu_n E(x)$

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

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

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

$J = J_p + J_n$

$\Phi_n(x_0) = \frac{\bar{l}}{2\bar{t}}(n_1 - n_2)$

$\Phi_n(x) = \frac{\bar{l}^2}{2\bar{t}} \lim_{\Delta x \to 0} \frac{n(x) - n(x+\Delta x)}{\Delta x} \Rightarrow \Phi_n(x) = -\frac{\bar{l}^2}{2\bar{t}} \frac{dn(x)}{dx}$

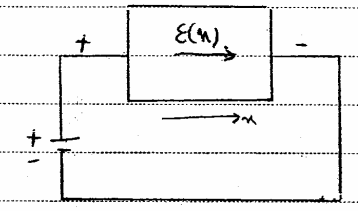
$D_n = \frac{\bar{l}^2}{2\bar{t}}$

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

- رابطه میدان الکتریکی $\mathcal{E}(x)$ و انرژی الکترون‌ها $E(x)$:

$$V(x) = -\frac{E(x)}{q}$$ پتانسیل الکتریکی — انرژی در میدان

فرض: یک قطعه را به ولتاژی متصل کنیم:

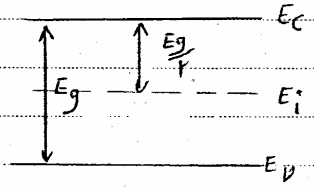


میدان الکتریکی $\mathcal{E}(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$ ← پتانسیل الکتریکی

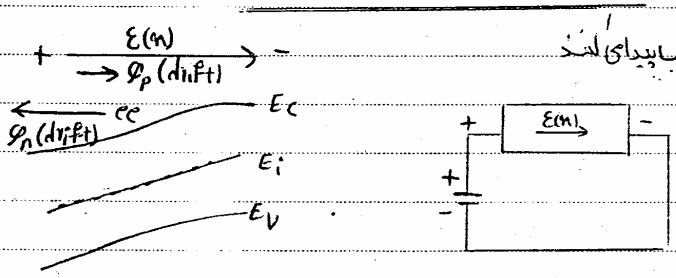
$\frac{dV}{dx} < 0$

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

تغییرات E_i متناسب با تغییرات dE هماست



به خاطر $\frac{dE_i(x)}{dx}$ باندها شیب پیدا می‌کنند



میدان باعث شده انرژی الکترون‌های کمتر رانت شروع به حرکت کنند

در اثر حرکت حفره‌ها

$\phi_p(drift)$

حرکت حفره‌ها

حرکت الکترون‌ها

+

میدان که باعث شده حفره‌ها شروع به حرکت کنند

شیب باعث ایجاد جریان الکترون‌ها در جهت راست شده (جریان به طرف چپ)

(۵۵)

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

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

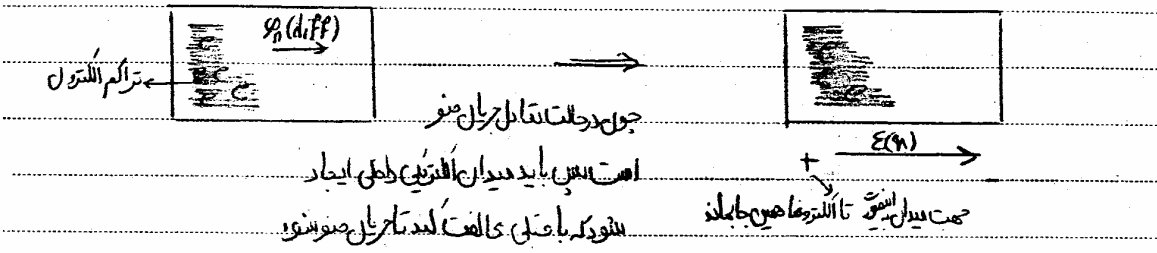
$p = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}$

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

در تعادل $= 0$

در حالت تعادل (بدون اعمال ولتاژ خارجی و میدان خارجی) یعنی نور به آن تابیده نشود و ... داده نشود) پس جریان داخل نیمه‌هادی صفر است

فرض: در نیمه‌هادی در حالت تعادل:

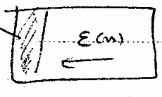


- میدان الکتریکی ساخته شده داخلی به منظور صفر شدن جریان در حالت تعادل

Built in

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

$$E(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \quad (2)$$ میدان الکتریکی ساخته شده در داخل جریان حرکت حاملهای متعرکز در حالت تعادل



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

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

$qE(x)$ — در حالت تعادل $= 0$

در حالت تعادل تراز فرمی صفر است

$$\frac{dp}{dx} = \frac{p}{kT} q E(x) \quad (3)$$

رابطه اینشتین $\frac{kT}{q} = \frac{D_p}{\mu_p}$ ← ① و ② $\varepsilon(x) = \frac{D_p}{\mu_p}\frac{1}{P}\frac{P}{kT} q\varepsilon(x)$

رابطه اینشتین: نسبت ضریب نفوذ به متحرکی هر حامل در هر دمای مشخص ثابت است

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

در $\frac{kT}{q} = 0.259\,eV$, $T = 300\,^\circ K$

	D_n ($\frac{cm^2}{s}$)	D_p	μ_n ($\frac{cm}{V.s}$)	μ_p
Ge	۱۰۰	۵۰	۳۹۰۰	۱۹۰۰
Si	۳۵	۱۲٫۵	۱۳۵۰	۴۸۰

مثال) اگر در یک نیمه‌هادی خالص از یک طرف طوری ناخالصی وارد شود که $N_D(x) = N_0 e^{-ax}$ در حالت تعادل میدان الکتریکی را در دست آورید و دیاگرام باندانرژی را رسم کنید.

$a = \frac{1}{10^{-4}}\,cm$ ، $\frac{kT}{q} = 0.259\,eV$

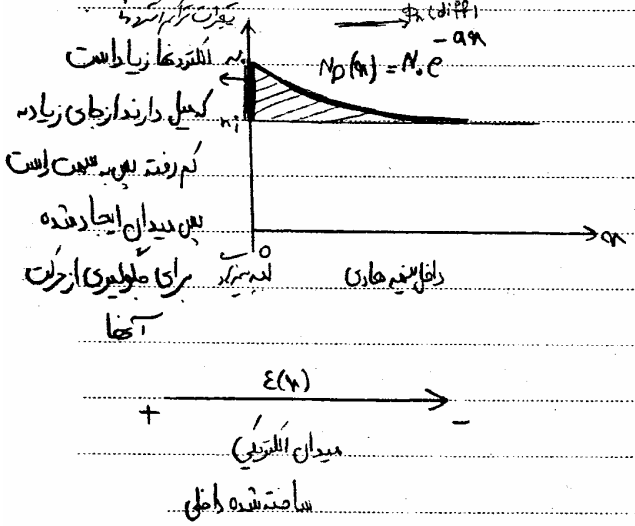
$\varepsilon(x) = ?$ $\frac{V}{cm}$ $\frac{cm^2}{s}$ $\frac{cm}{V.s}$

در تعادل داریم: $J_n = J_n(drift) + J_n(diff) = 0$

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

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

$a = \frac{1}{(\mu m)^{-1}} = \frac{1}{10^{-6}}$ (ب) $= \frac{1}{10^{-4}\,cm}$



گرادیان دانسیته = J_n در حالت تعادل

که ۰ برای متوقف کردن جریان

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

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

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{D_n}{\mu_n} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} \qquad \overset{kT}{\underset{q}{}}$$

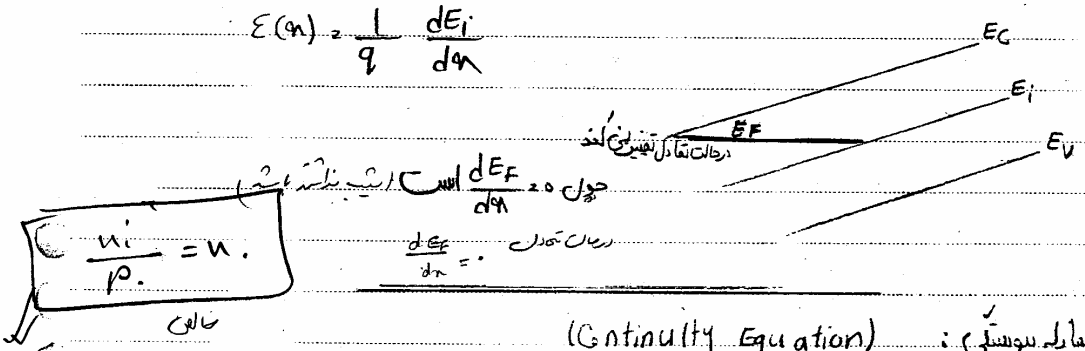
$$n = N_D(x) = N_0 e^{-ax}$$

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{kT}{q} \frac{1}{N_0 e^{-ax}} (-N_0 a e^{-ax})$$

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

$$\mathcal{E}(x) = 0.259 \times \frac{1}{10^{-4}} \Rightarrow \mathcal{E}(x) = 259 \frac{V}{cm}$$

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



چون $\frac{dE_F}{dx} = 0$ است ثابت باشد

$\frac{dE_F}{dx} = 0$ در حال تعادل

$\frac{n_i}{p_0} = n_0$

خالص

معادله پیوستگی : (Continuity Equation)

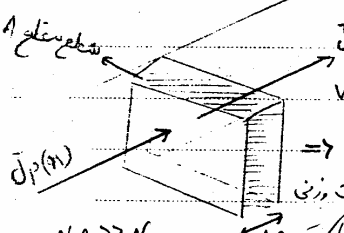
مساله بازترکیب در جاهایی حاملها از یک ناحیه‌ی نیمه‌رسانا در نظر گرفته شود.

n_i: $\sigma_i = q n_i (\mu_p + \mu_n)$ نیمه‌رسانای ذاتی

$n_0 \gg p_0$, $\sigma = \sigma_n = q n_0 \mu_n$ نیمه‌رسانای نوع n

$n_0 \ll p_0$, $\sigma = \sigma_p = q p_0 \mu_p$ نیمه‌رسانای نوع p

$\sigma^{-1} = \rho$ مقاومت مخصوص $(\Omega \cdot cm)^{-1}$



$\sigma = q(n_0 \mu_n)$ هدایت

$n_0 = N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$

$\Rightarrow \sigma = 1.6 \times 10^{-19} (10^{17} \times 1080) \rightarrow \rho = 5.8\ \Omega \cdot cm$

نسبت وزنی $\frac{Si}{P} = \frac{\text{وزن اتمی } Si \times \text{تراکم}}{\text{وزن اتمی } P \times \text{تراکم}} = \frac{28.1 \times 5 \times 10^{22}}{31 \times 10^{17}} = 4.53 \times 10^{5}$

$\sigma = q(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p)$

$= N_A - N_D$ $\quad N_A \gg N_D$

$= N_D - N_A$ $\quad N_A = 10^{18}$, $N_D = 10^{17}$,

فرصت تا ۲ هفته‌ی دیگر

تمرین) در یک نیمه‌رسانای Si با ناخالصی دهنده فسفر به تعداد $10^{17}\ cm^{-3}$ مقاومت مخصوص نسبت وزنی چقدر است؟ N_D یعنی تعداد اتم‌های ناخالصی دهنده

تعداد Si به فسفر برای نیمه‌رسانایی که در سطح انرژی فرمی طرح دیاگرام باندانرژی آن را با خالصی تقریبا به تعداد $10^{18}\ cm^{-3}$

برای این نیمه‌رسانا مقاومت مخصوص چقدر خواهد شد؟ نوع نیمه‌رسانا ؟ رسم دیاگرام باندانرژی ؟ مساله حل شود

$n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}$ $\quad \mu_n = 1080\ \frac{cm^2}{V \cdot s}$ $\quad \mu_p = 320\ \frac{cm^2}{V \cdot s}$ $\quad$ تراکم اتم‌ها در Si : $5 \times 10^{22}\ cm^{-3}$

وزن اتمی $Si = 28.1$ $\quad E_g = 1.1\ eV$ $\quad n_i = 1.5 \times 10^{10}\ cm^{-3}$

وزن اتمی $P = 31\ gr$ $\quad kT = 0.0259\ eV$

تغییرات زمانی چگالی حاملها در حجم $\Delta x A$ = افزایش تراکم حاملها در حجم $\Delta x A$ در واحد زمان − نرخ بازترکیب

حفره: $\frac{\partial \delta_p}{\partial t} = -\frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{\delta_p}{\tau_p}$

الکترون: $\frac{\partial \delta_n}{\partial t} = \frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{\delta_n}{\tau_n}$

δ_n: چگالی الکترونهای اضافی — δ_p: چگالی حفره‌های اضافی — تراکم — τ_p: زمان بازترکیب

معادله دیفیوژن: از قرارداد جریانهای دیفیوژن در معادله پیوستگی بدست می‌آید

$$J_p(diff) = -qD_p \frac{\partial \delta_p(x)}{\partial x}$$

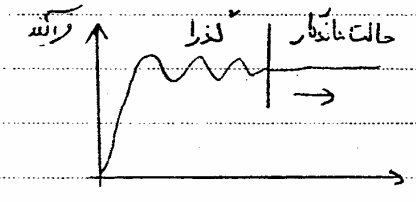
$$J_n(diff) = qD_n \frac{\partial \delta_n(x)}{\partial x}$$

معادلات دیفیوژن:

$$\frac{\partial \delta_p}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 \delta_p(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta_p(x)}{\tau_p}$$

$$\frac{\partial \delta_n}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 \delta_n(x)}{\partial x^2} - \frac{\delta_n(x)}{\tau_n}$$

چون هم تغییرات زمانی و هم مکانی وجود دارد تنها حالت ماندگار را بررسی می‌کنیم.



- حالت ماندگار (steadystate)

تمرین ۲) تراکم الکترونها و حفره‌ها را بر حسب تابعی از مکان در حالت

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

$KT = 0.0259\ eV$

الف) $N_A = 10^{18}\ cm^{-3}$

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

بررسی چگالی حاملهای تعادلی در حالت ماندگار با استفاده از معادله دیفیوژن

در حالت ماندگار $\frac{\partial \delta_n}{\partial t} = 0$

صفر انداشته چون تغییرات زمانیش را برده $\frac{\partial \delta_p}{\partial t} = 0$

یعنی معادلات دیفیوژن در حالت ماندگار بصورت:

$$\frac{\partial^2 \delta_p}{\partial x^2} = \frac{\delta_p}{D_p \tau_p} = \frac{\delta_p}{L_p^2}$$

$L_p^2 = D_p \tau_p$ را طول دیفیوژن (m) L_p گویند که مسافتی است که حفره قبل از بازترکیب طی می‌کند.

$$\frac{\partial^2 \delta_n}{\partial x^2} = \frac{\delta_n}{D_n \tau_n} = \frac{\delta_n}{L_n^2}$$

$L_n^2 = D_n \tau_n$

L_n: طول نفوذ الکترون

$$\frac{\partial^2 \delta_p}{\partial x^2} = \frac{\delta_{p(x)}}{L_p^2} \quad \xrightarrow{\text{حل}} \quad \delta_p(x) = \underbrace{A e^{\frac{x}{L_p}}}_{C_1} + \underbrace{B e^{-\frac{x}{L_p}}}_{C_2}$$

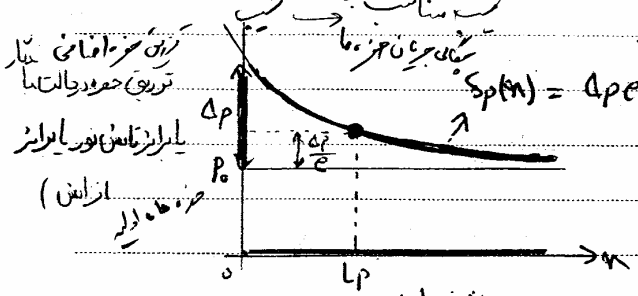
A و B از روی شرایط حدی بدست می‌آید.

تمرین ۳) یک نمونه Si با 10^{16} اتم بر سی‌سانتی‌متر مکعب ناخالصی دهنده اضافه شده که سطح انرژی $0.4\ eV$ پایین‌تر از E_c قرار دارد. تراکم اتم‌های دهنده چقدر است؟

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

$kT = 0.0259\ eV$

مثال) اگر در یک نیمه‌هادی از یک طرف چنان حفره‌های اضافی Δp اعمال شود تغییرات چنان حاملهای اضافی در داخل نیمه‌هادی در حالت



حالت دائمی طوری است که $\delta p(x)$ به صورت زیر است:

حل:

از حل معادله دیفیوژن

با توجه به محدود بودن مقدار حفره‌های تفوذی انتظار داشتن حفره‌ها (چون امکان بازترکیب الکترون‌ها است ولی امکان افزایش ندارد) در داخل

نیمه‌هادی محدود $\quad \delta p(x) = Ae^{x/L_p} + Be^{-x/L_p}$

$x \to \infty \Rightarrow Ae^{x/L_p} \to \infty \Rightarrow \delta p \to \infty$ غیرممکن است $\to A = 0 \Rightarrow \delta p(x) = Be^{-x/L_p}$

$\delta p(0) = \Delta p = Be^{0} = B \qquad J_p = -qD_p \left(\frac{\delta \delta p}{\delta x}\right) = \frac{qD_p}{L_p}\Delta p e^{-x/L_p}$

$\delta p(x) = \Delta p e^{-x/L_p}$ $\qquad \delta p(x) = ?$ $\qquad$ شیب

$J_p(x) = 0$ جریان

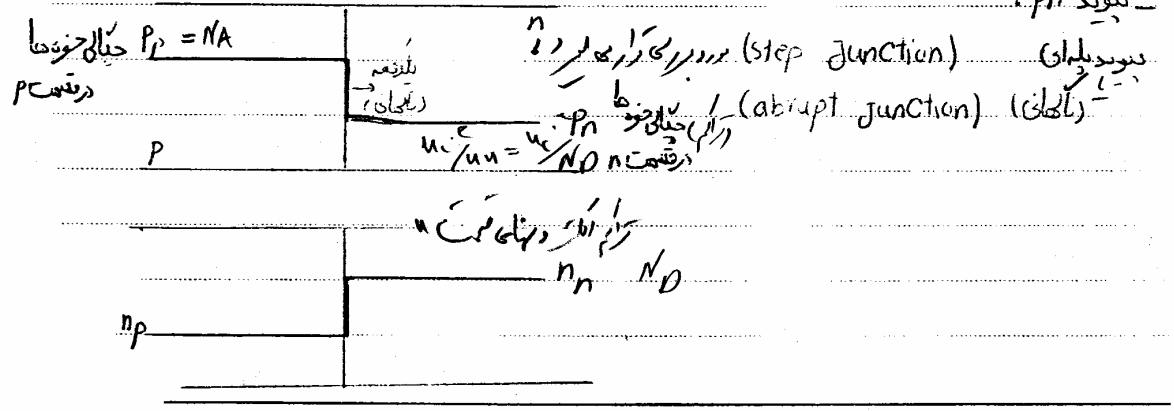
L_p: مسافتی که حفره‌های اضافی که $\frac{1}{e}$ مقدار اولیه‌ی می‌رسند.

فصل دوم

پیوند pn:

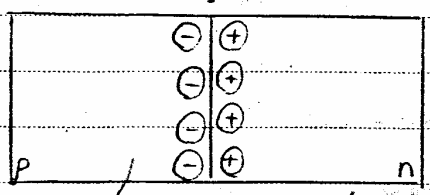
پیوند پله‌ای (step junction) پیوندی که در آن تغییرات ناخالصی از نوع p به نوع n در یک فاصله‌ی بسیار کوچک صورت می‌گیرد.

پیوند ناگهانی (abrupt junction)



الکترون‌ها یون‌های مثبت اتم‌های فلز را جای گذارده

پیوند pn در حالت تعادل: یعنی تحت ولتاژ خارجی قرار نداره

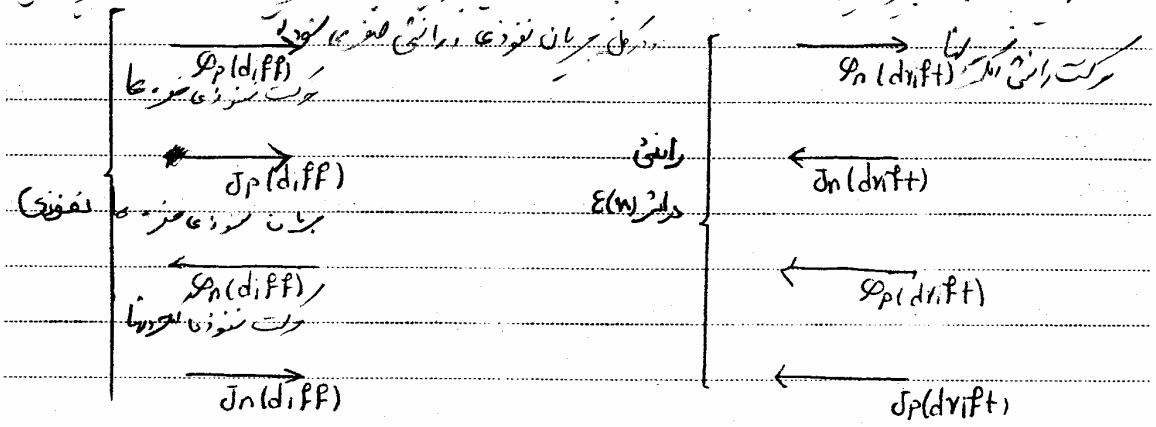


در این حالت:

در محل پیوند حفره‌ها از سمت p شروع به نفوذ به n کرده

و الکترون‌ها از سمت n به p نفوذ می‌کنند

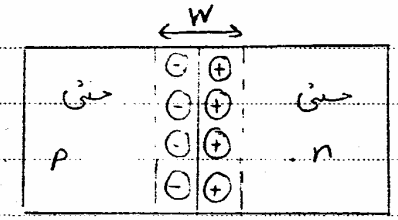
در نتیجه در محل پیوند یون‌های مثبت و منفی باقی می‌مانند که یک میدان الکتریکی می‌کنند و ایجاد جریان در جهت مخالف



در حالت تعادل:

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

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

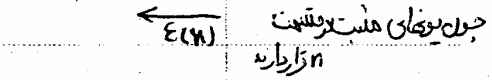


W: عرض ناحیه انتقال

transition Region

Depletion Region ناحیه تخلیه

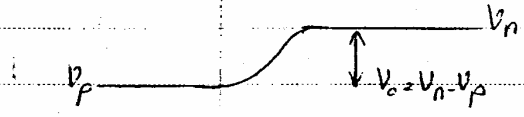
space Charge Region ناحیه بارفضایی



چون یون‌های مثبت در قسمت n قرار دارند

تغییرات

V_0 - تابعی از پتانسیل پیوند در حالت تعادل



نحوه‌ی بستن پتانسیل بیوند در حالت تعادل :

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

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

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

$$-\frac{dV(x)}{dx} = \frac{kT}{q} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \xrightarrow{\text{انتگرال گرفتن}} \int_{V_p}^{V_n} dV = \frac{kT}{q} \int_{P_p}^{P_n} \frac{1}{p} dp \Rightarrow -(V_n - V_p) = \frac{kT}{q} \ln \frac{P_p}{P_n}$$

$$P_p = N_A$$

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

$$① \Rightarrow V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{P_p}{P_n} \Rightarrow V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{\frac{n_i^2}{N_D}}$$

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

$$① \quad e^{\frac{qV_0}{kT}} = \frac{P_p}{P_n} = \frac{\frac{n_i^2}{n_p}}{\frac{n_i^2}{n_n}} = \frac{n_n}{n_p} = e^{-\frac{qV_0}{kT}}$$

نسبت تراکم حفره‌ها در دو طرف پیوند

نسبت تراکم الکترون‌ها در دو طرف پیوند

مثالی از دیود پیوند پله‌ای pn در حالت تعادل رسم نموده و دیاگرام باندانرژی و نقاط V_0 انرژی آن و سپس با نتیجه V_0 انرژی رابطه ریاضی.

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

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

$n_i = 2.5 \times 10^{13}$

$kT = 0.259\ V$ در اصباح

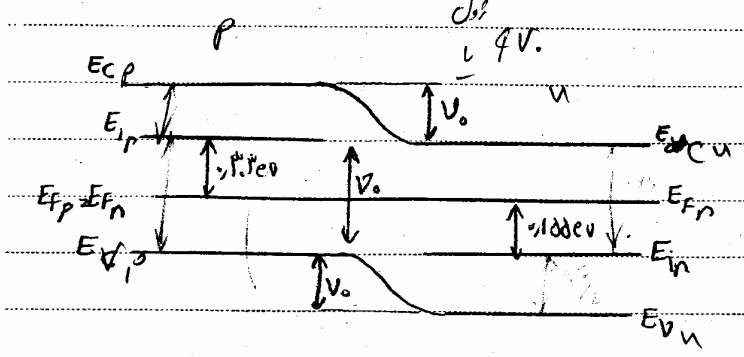
تقسیم بر q است لذا اگر kT را بر حسب ژول بود تقسیم بر q نمی‌کنیم

راه حل : سطح فرمی باید برای سمت p مشخص شود

$$N_A = P_p = n_i e^{\frac{E_{ip} - E_{Fp}}{kT}}$$

$$E_{ip} - E_{Fp} = kT \ln \frac{P_p}{n_i} = 0.259 \ln \frac{3 \times 10^{18}}{2.5 \times 10^{13}} = 0.33\ ev$$

در سمت n: $N_D = n_n = n_i e^{\frac{E_{Fn} - E_{in}}{kT}} \Rightarrow E_{Fn} - E_{in} = kT \ln \frac{N_D}{n_i} = 0.0259 \ln \frac{10^{16}}{2.5 \times 10^{13}} = 0.152$



از روی شکل $V_0 = 0.342 + 0.559 = 0.858 eV$

$$e^{\frac{V_0}{kT}} = \frac{p_p}{p_n} = \frac{N_V e^{\frac{-(E_{Fp} - E_{Vp})}{kT}}}{N_V e^{\frac{-(E_{Fn} - E_{Vn})}{kT}}}$$

(در حالت تعادل)

$$\rightarrow V_0 = E_{Vp} - E_{Vn}$$

یا

$$V_0 = E_{Cp} - E_{Cn}$$

یا

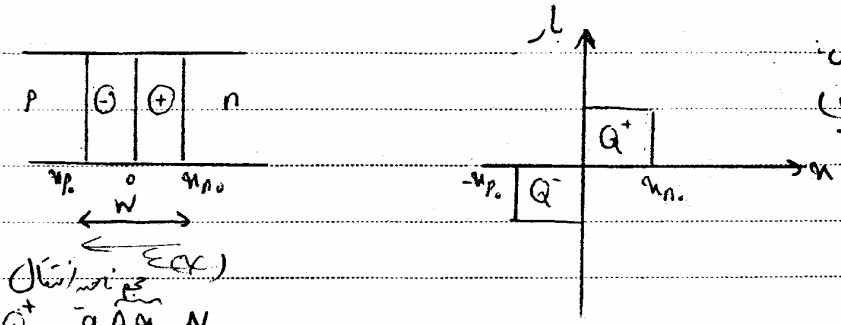
$$V_0 = (E_{ip} - E_{Fp}) + (E_{Fn} - E_{in})$$

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.0259 \ln \frac{3 \times 10^{18} \times 10^{16}}{(2.5 \times 10^{13})^2} = 0.858 eV$$

ادامه

پیوند pn در حالت تعادل:

(محاسبه با روش فضای تهی)



جمع ناحیه انتقال $Q^+ = qA x_{n0} N_D$ بار در ناحیه انتقال

سطح مقطع پیوند

$W = x_{n0} + x_{p0}$

چون مدار باز است، بار سمت راست و چپ باید با هم برابر باشند $Q^+ = |Q^-|$ خنثی بودن بار

$Q^- = -qA x_{p0} N_A$ بار در ناحیه انتقال

$qA x_{n0} N_D = qA x_{p0} N_A$

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

$N_A = 10^2 N_D \leftarrow x_{n0} = 10^2 x_{p0}$

مثال) اگر $N_A \ll N_D \leftarrow x_{p0} \gg x_{n0}$

$\rho = \frac{Q}{V}$ بار حجمی

$\rho^+ = \frac{Q^+}{A x_{n0}} = qN_D$

$\rho^- = \frac{Q^-}{A x_{p0}} = -qN_A$

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

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

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

(2) و (1) $\Rightarrow$

$$x_{n0} = \frac{WN_A}{N_A + N_D}$$

$$x_{p0} = \frac{WN_D}{N_A + N_D}$$

پیشروی در ناحیه انتقال

در بایاس

- میدان الکتریکی در حوالی پیوند:

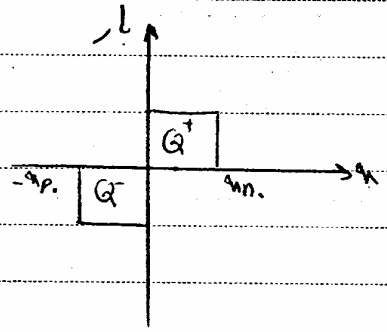
کاهش یابد

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

ε (اپسیلون) ضریب دی الکتریک

$\rho = \frac{Q}{V}$ حجم ← چگالی بار حجمی

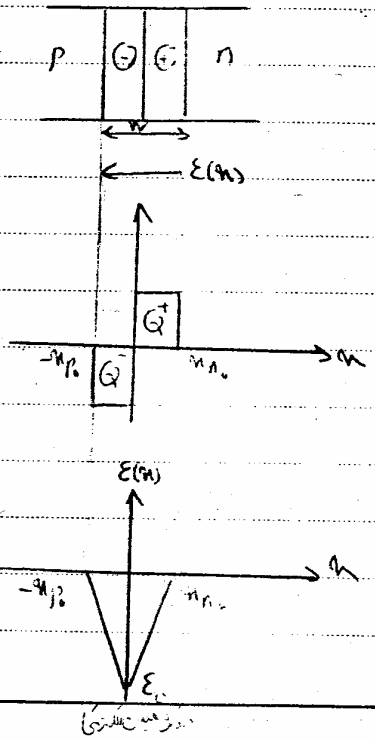
$\varepsilon = \varepsilon_x \varepsilon_y$ ← ضریب دی الکتریک خلا

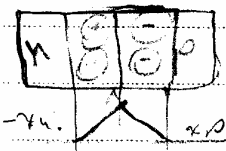


$-x_{p_0} < x < x_{n_0}$ در فاصله $\frac{dE}{dx} = \frac{-qN_A}{\varepsilon} \Rightarrow \int_0^E dE = \frac{-qN_A}{\varepsilon}\int_{-x_{p_0}}^{x} dx \Rightarrow E(x) = \frac{-qN_A}{\varepsilon}(x + x_{p_0})$

$0 < x < x_{n_0}$: $\frac{dE}{dx} = \frac{qN_D}{\varepsilon} \Rightarrow \int_0^E dE = \frac{qN_D}{\varepsilon}\int_{x_{n_0}}^{x} dx \Rightarrow E(x) = \frac{qN_D}{\varepsilon}(x - x_{n_0})$

در هر دو رابطه، رابطه $E(x)$ با x رابطه خطی دارد.





اگر n سمت چپ و p سمت راست بود نوار به سمت بالا کشیده می‌شد

$$\mathcal{E}(x=0) = \mathcal{E}_0 = \frac{-qN_A x_{p_0}}{\varepsilon}$$

$$\mathcal{E}(x=0) = \mathcal{E}_0 = \frac{-qN_D x_{n_0}}{\varepsilon}$$

برابر

حداکثر شدت میدان الکتریکی بوده

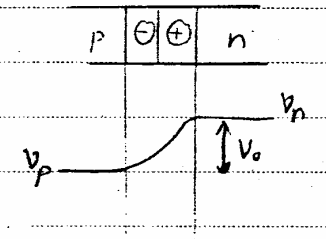
در حالت تعادل

پتانسیل الکتریکی $V(x)$:

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

$$-\int_{V_p}^{V_n} dV(x) = \int_{x_{p_0}}^{x_{n_0}} \mathcal{E}(x)\,dx$$

رابطه $V(x)$ و میدان $\mathcal{E}(x)$ صورت غیرخطی درجه ۲ (x^2)ی باشند



$$-(V_n - V_p) = \int_{-x_{p_0}}^{0} \frac{-qN_A}{\varepsilon}(x + x_{p_0})\,dx + \int_{0}^{x_{n_0}} \frac{qN_D}{\varepsilon}(x - x_{n_0})\,dx$$

$$-V_0 = \frac{-qN_A}{\varepsilon}\left.\frac{x^2}{2} + x x_{p_0}\right|_{-x_{p_0}}^{0} + \frac{qN_D}{\varepsilon}\left.\left(\frac{x^2}{2} - x x_{n_0}\right)\right|_{0}^{x_{n_0}}$$

$$-V_0 = \frac{-qN_A}{\varepsilon}\frac{x_{p_0}^2}{2} - \frac{qN_D x_{n_0}^2}{2\varepsilon} \rightarrow N_A x_{p_0} = N_D x_{n_0}$$

$$V_0 = -\frac{1}{2}\mathcal{E}_0 W = \frac{1}{2}\frac{q}{\varepsilon} N_D x_{n_0} W$$

$$-V_0 = \underbrace{\frac{-qN_A x_{p_0}}{2\varepsilon}}_{-\mathcal{E}_0}\underbrace{(x_{p_0} + x_{n_0})}_{W} \Rightarrow \boxed{-V_0 = \frac{\mathcal{E}_0}{2} W} \quad (1)$$

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

رابطه میدان و پتانسیل

رابطه W با V_0:

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

$$V_0 = -\frac{qN_D x_{n_0}}{2\epsilon} W$$

داشتیم $x_{n_0} = \frac{WN_A}{N_A+N_D}$

$$\Rightarrow \boxed{W = \left[\frac{2\epsilon V_0}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)\right]^{\frac{1}{2}}}$$

رابطه عرض ناحیه تهی‌ی تعادل W با تراکم ناخالصی‌ها و V_0

روال حل: $V_0 \leftarrow W \leftarrow x_{n_0} \leftarrow x_{p_0} \leftarrow \rho \leftarrow E(x), E_0, \dots$

مثال) دیود پیوند یکبعدی pn در حالت تعادل با سطح مقطع دایره‌ای به شعاع 2.54×10^{-2} مطلوبست کانسیم

V_0
x_{n_0}
x_{p_0}
Q^+
$\mathcal{E}_0$

رسم $\rho(x)$ و $E(x)$

$N_A = 4\times10^{18}\ cm^{-3}$

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

$\epsilon_0 = 8.85\times10^{-14}\ F/cm$

$\epsilon_r = 11.8$

$\frac{kT}{q} = 0.259\ V$

$n_i = 1.5\times10^{10}\ cm^{-3}$

شعاع $= 2.54\times10^{-2}\ cm$

$$V_0 = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} \Rightarrow V_0 = 0.259 \ln\frac{4\times10^{18}\times10^{16}}{(1.5\times10^{10})^2}$$

$$V_0 = 0.818\ V$$

$$W = \left[\frac{2\epsilon V_0}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{2\epsilon_0\epsilon_r \times 0.818}{1.6\times10^{-19}}\left(\frac{1}{4\times10^{18}}+\frac{1}{10^{16}}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$W = 3.34\times10^{-5}\ cm = 0.334\ \mu m$$

$$x_{n_0} = \frac{WN_A}{N_A+N_D} = \frac{0.334\times10^{-4}\times4\times10^{18}}{4\times10^{18}+10^{16}} \Rightarrow x_{n_0} = 0.3328\ \mu m$$

N_D کمتر از N_A است پس W نزدیک x_{n_0} خواهد بود.

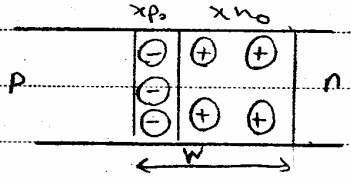
$$x_{p_0} = W - x_{n_0} = 0.0008\ \mu m$$

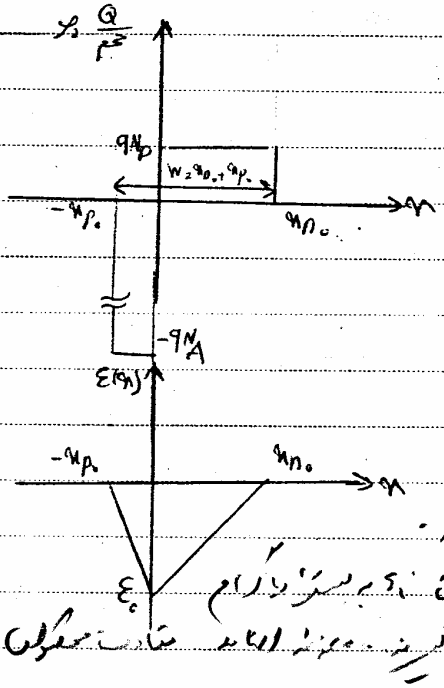
عدد کوچک است چون ناخالصی آن 100 برابر بیشتر از N_D است.

سطح مقطع $A = \pi r^2 = 2{,}1 \times 10^{-3}\ cm^2$

$$Q^+ = qAN_{n_0}N_D = 1{,}6 \times 10^{-19} \times 2{,}1 \times 10^{-3} \times 3{,}33 \times 10^{-5} \times 10^{16} = 1{,}08 \times 10^{-10}\ C$$

$$\mathcal{E}_0 = \frac{-2V_0}{W} = \frac{-qN_D N_{n_0}}{\epsilon} = -5{,}1 \times 10^{4}\ \frac{V}{cm}$$





تریخ ۱) در نمونه سیلیکن Si ناخالصی دهنده، مقدار $10^{17}\ cm^{-3}$ اضافه شده.

الف) مقاومت حفره‌ی این نمونه چقدر است؟ (ضریب پخش حفره $D_p = 12\ cm^2/s$)

ب) اگر مقدار ناخالصی گیرنده این نمونه $10^{16}\ cm^{-3}$ باشد مقاومت مشکل

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

② ترانزیستور اثر میدان وجود دارد در حالت بایاس کردن و بار در ناحیه‌ی ابزاری

$K_T =$ 0.9259

الف) $N_A = 10^{13}\ cm^{-3}$

$N_D = 3 \times 10^{13}$ ب) $N_A = 2.9 \times 10^{15}\ cm^{-3}$