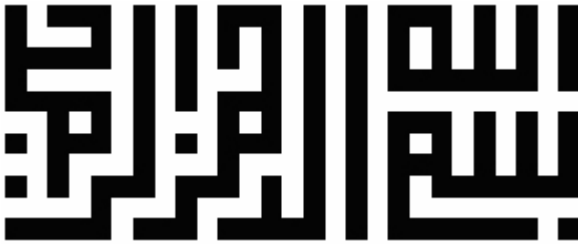


فـــــــیزیک الکترونیـــــــک

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 برند .

www.ir-micro.com

عناوین درس فیزیک الکترونیک

- میان ترم (۷ نمره)
  - تئوری باندها و نیزیک نیمه هادیها (فصل ۳)
- پایان ترم
  - پیوند pn (فصل ۵)
  - ترانزیستور BJT (فصل ۷)
  - ترانزیستور FET (فصل ۸)
  - پیوند فلز نیمه هادی (فصل ۸)

منابع:

کتاب فیزیک الکترونیک مترجم: دکتر روشن ن

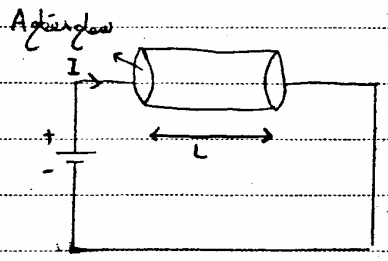
solidstate Electronic
Devices Electronic and Technology

نویسنده : B. streetman

www.ir-micro.com

یادآوری:

مقاومت مخصوص (ρ (Ωcm



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

(ولت / آمپر)

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

ρ: Ωcm ، R: Ω ، A: cm^2 ، L: cm

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

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

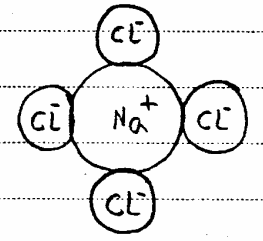
۲) عایق (Insulator) $\rho > 10^{5}$ Ωcm : هدایت بسیار ناچیز دارد

۳) نیمه‌رسانا (Semiconductor) : هدایت الکتریکی آنها قابل تنظیم می‌باشد
از مرز عایق تا هادی تنظیم می‌شود

(Bonding)

از نظر نوع پیوند در جامدات:

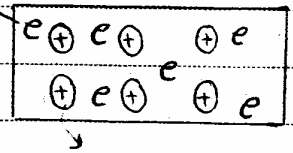
۱) پیوند یونی: ناشی از جاذبه شدید بین یون‌های مثبت و منفی می‌باشد و هیچ الکترون آزادی ندارد. پس عایق است.
(Ionic)



(آرایش الکترونی)
NaCl

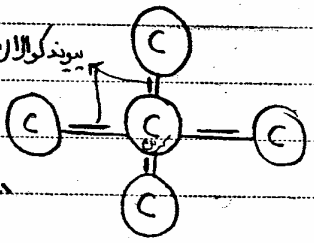
www.ir-micro.com

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 هدایت الکتریکی ندارند چون در جای خود ثابت هستند.

۳) پیوند کوالانسی: (Covalent Bonding)

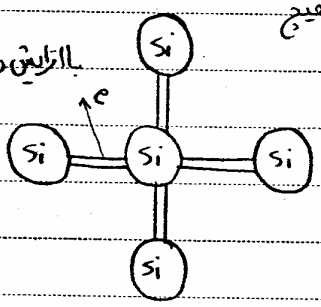


الماس:

در دمای $T = 0^k$ درجه حرارت

با به اشتراک گذاشتن الکترونهای ظرفیت در اینجا الکترونها

تحت دمای هستند هستند و آزاد نیستند و تمام الکترونها در پیوندهای کوالان هستند و هیچ



الکترون آزادی وجود ندارد.

با ترابش رما یا تابش نور می‌توان پیوند را شکست و الکترون آزاد کرد.

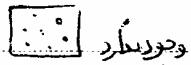
نیمه هادی‌ها

- 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 شش نوع (صفحه لاب بصورت)

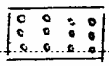
www.ir-micro.com

از نظر آرایش اتمی دو جامدات :

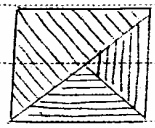
۱) جامدات بی شکل (Amorph) : اتمها فاقد ساختار بلوری می باشند و هیچگونه نظم هندسی در موقعیت اتمها وجود ندارد



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

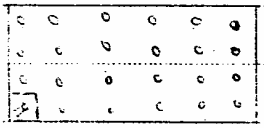


۳) جامد چند بلوری (poly crystal) : از تعداد زیادی ناحیه کوچک بلوری تشکیل شده



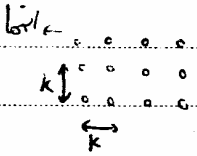
شبکه : به آرایش هندسی اتمی در بلور گفته می شود (lattic)

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

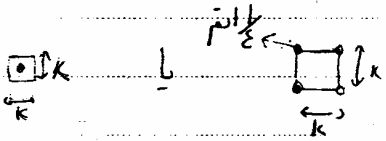


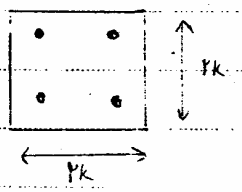
k : فاصله

(مثال

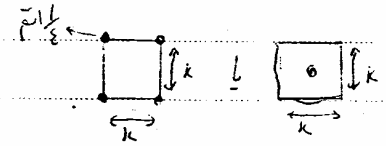


سلولهای یکه :





سلولهای اولیه : کوچکترین سلول یکه (primitive cell) :



www.ir-micro.com

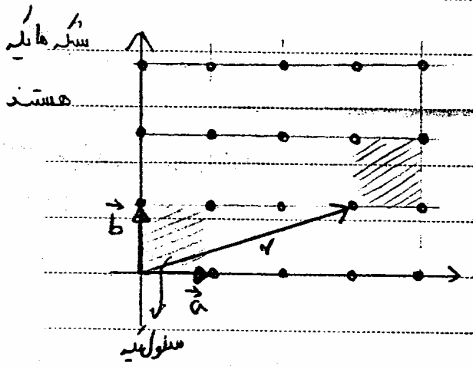
بردارهای پایه: (Basis vector):

$\vec{a}$ و $\vec{b}$ و $\vec{c}$

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

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

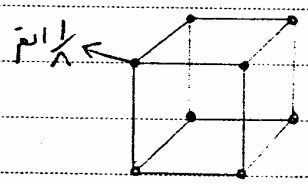
مثال) محل رسیدن انتقال سلول یکه تحت بردار $r = 3\vec{a} + 2\vec{b}$



شبکه‌های مکعبی: ساده‌ترین شبکه سه‌بعدی سلول یکه‌ی آن مکعب است.

انواع شبکه مکعبی:

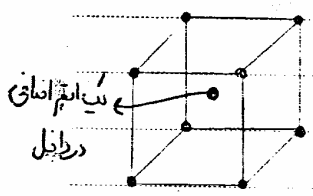
۱) مکعبی ساده SC (Simple cubic):



در هر سلول یکه SC

$$\text{اتم } 1 = \text{اتم } \frac{1}{8} \times \text{رأس } 8$$

۲) مکعبی بدنه مرکزدار BCC (Body centered cubic):

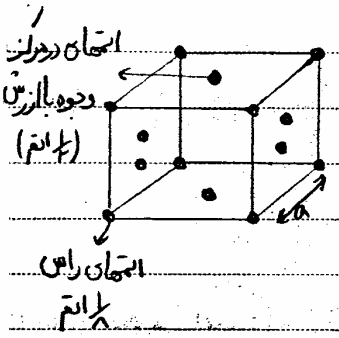


در هر سلول یکه BCC

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

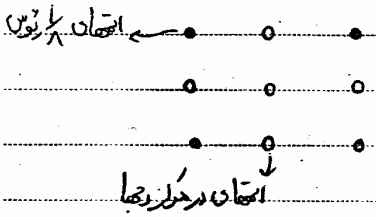
www.ir-micro.com

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



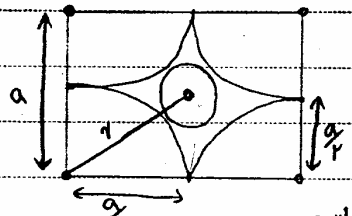
$6\times\frac{1}{2}+8\times\frac{1}{8}=4$ اتم در هر سلول fcc

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

www.ir-micro.com

صفحه‌ها:

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

صفحه را با (hkl) نشان می‌دهند.

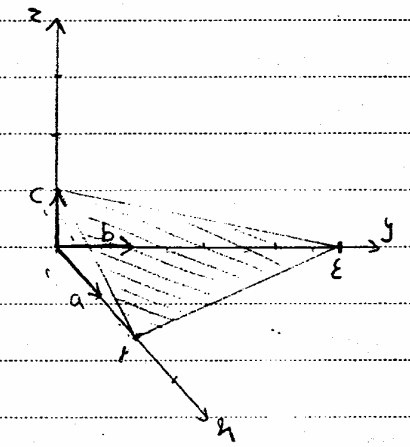
نحوه تعیین شاخص‌های میلر:

۱) تعیین اعداد نقطه برخورد صفحه با محورهای بلور

۲) معکوس کردن اعداد فوق

۳) ضریب بزرگ مشترک آنها

(مثال)



$\vec{a}$	$\vec{b}$	$\vec{c}$
۲	۴	۱

حال معکوس:

$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	۱

ضریب بزرگ مشترک

۲	۱	۴

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

* صفحات هوازی شاخص‌های یکسانی دارند.

www.ir-micro.com

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

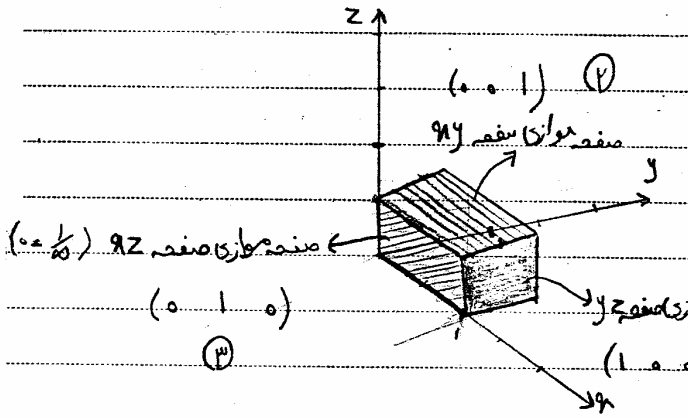
- اگر صفحه‌ای دو برآیرنده یکی از محورها باشد شاخص مربوطه به آن صفری می‌شود.

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

- اگر یکی از نقاط برخورد روی مبدا مختصات منفی محور باشد پس با بی‌نهایت صفحه روی شاخص مقابل آن شاخص ۰ می‌شود.

(مثال) (۲ ∞ ۴)

(مثال)



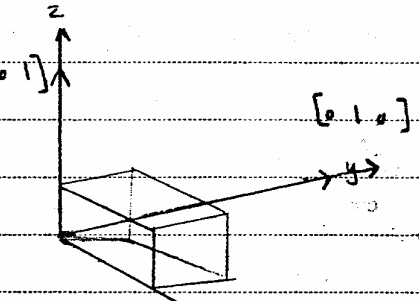
بقیه صفحات موازی این صفحات هستند پس شبیه اینجاست

① ② ③ } صفحات معادل

(چون دهنه اینجا در دو بعد صفر و در یک بعد سوی بی‌نهایت هستند) ⇒ با این بیان } بیشمار دهنه

www.ir-micro.com

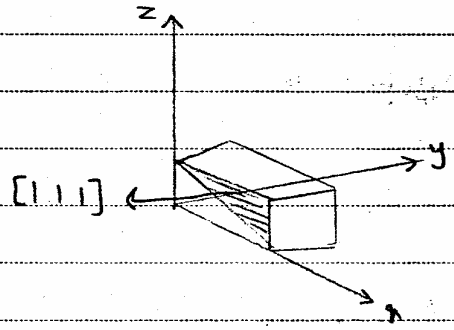
مثال)



جهت [۱۱۱]

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

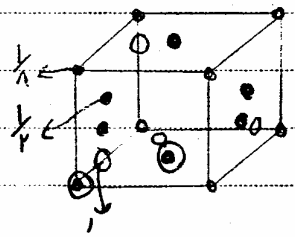
جهت‌های معادل $\begin{cases}[1\,0\,0]\\[0\,1\,0]\\[0\,0\,1]\end{cases}$

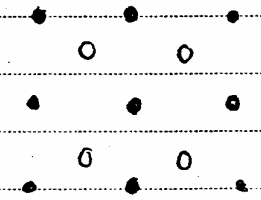


- سیستم الماس

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

این ۴ اتم درون مکعب قرار دارند



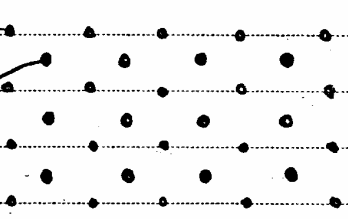


اتم $۴\times۱+۶\times\frac{۱}{۲}+۸\times\frac{۱}{۸}=۸$

در هر سلول یک سیستم الماسی

---

www.ir-micro.com



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) : نیمه‌هادی 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 ($\frac{gr}{cm^3}$) نیمه‌هادی Si 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 : $a : 5,43 \times 10^{-8} cm$

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

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

www.ir-micro.com

در مورد GaAs:

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

وزن اتمی Ga: $69.7\ \frac{gr}{mole}$

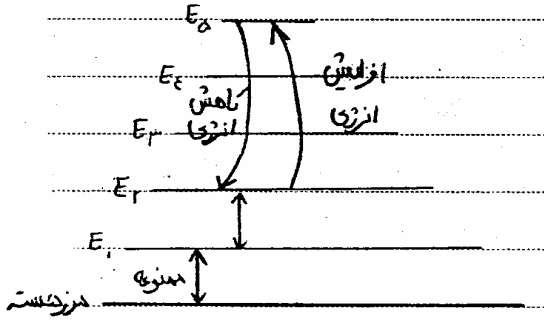
As: $74.9\ \frac{gr}{mole}$

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

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

جلسه دوم ۸۳.۱۲.۲۰

- باندهای (نوار) انرژی (Energy Bands):



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

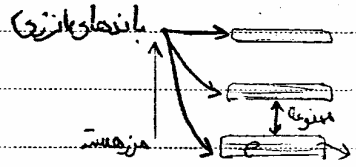
$E_5 - E_2 = \eta\nu$ ← افزایش انرژی نور

ثابت پلانک

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

در عمل اتم مجزا وجود ندارد.

همانطور که مقدار زیادی اتم کنار هم قرار گیرند الکترون‌ها تحت تأثیر پارامترهای مختلف و متنوعی قرار دارند.



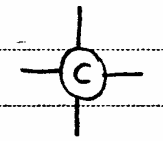
در عمل به این صورت می‌شود

راه‌های مختلف برای الکترون‌ها جهت گذر

حالت نباید اصلاً وجود داشته باشد و فقط می‌توانند گذر کنند.

www.ir-micro.com

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

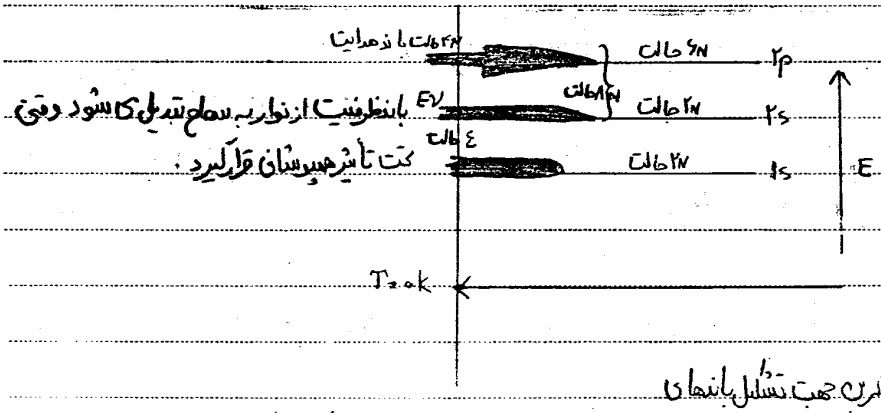
در 2p ← سه حالت قرارگیری الکترون

در N اتم کربن حالتها بصورت:

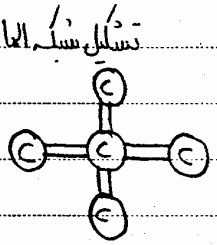
1s ← 2N حالت

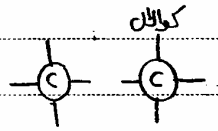
2s ← 2N حالت

2p ← 6N حالت



برای N اتم: نزدیک کردن اتمهای کربن جهت تشکیل پیوندها

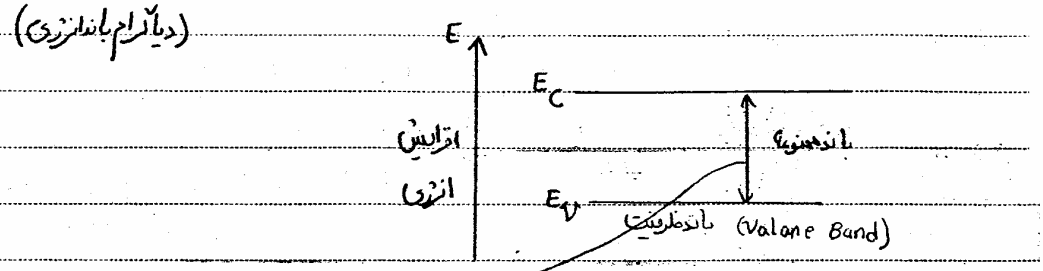




www.ir-micro.com

Conduction Band (باندهدایت):

(دیاگرام باندانرژی)



باندگپ (شکاف) { Forbidden Band
Band gap

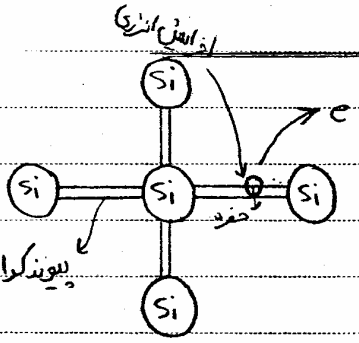
الکترونها در E_V و یا در E_C هستند و در باندممنوعه یافت نمی‌شوند

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

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)



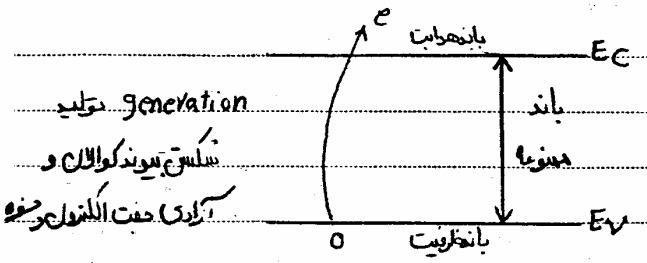
با طی شدن زمان

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

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

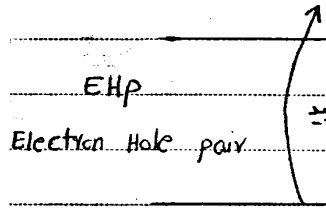
وقتی پیوند سلست می‌شود و الکترون آزاد می‌شود شدیداً نیاز به الکترون دارند و جایی که خالی می‌شود حفره می‌آید

www.ir-micro.com



(دیاگرام باندانرژی)

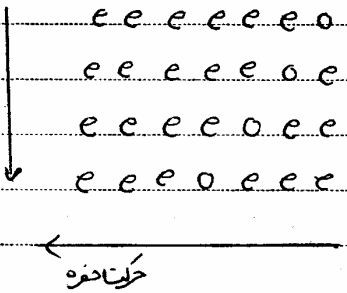
حفره: جای خالی الکترون در پیوند کوالان



حاملهای بار { 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

حرکت حفره در باند ظرفیت:



- نیمه‌هادی خالص (ذاتی): (Intrinsic semiconductor)

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

n_i = تراکم حاملها

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

www.ir-micro.com

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 دمای صفر همانطور که انتظار تولید داریم ممکن است کسی 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 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 نوع دیگری وجود دارند که با عمل Dopping یا آمیزی اتمهای ناخالص به آن اضافه می‌شود

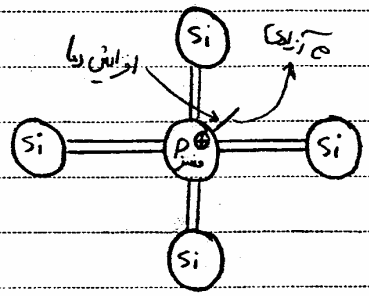
عمل افزودن اتمهای ناخالص به نیمه هادی به منظور افزایش درجه هدایت الکتریکی

دو نوع ناخالص:

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

www.ir-micro.com

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

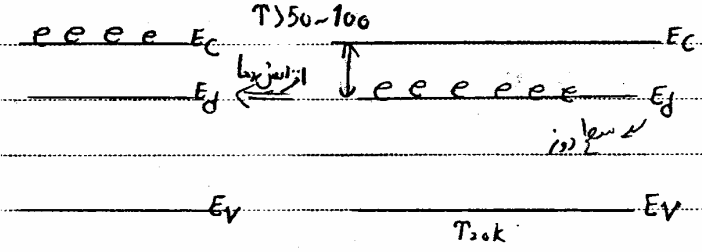
(مثال) 

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



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

تا صد خیلی کمی است پس در 300 درجه همه آزاد می‌شوند

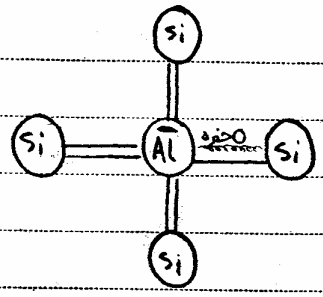
* اتم‌های دهنده باعث افزایش الکترون می‌شوند

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

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

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

www.ir-micro.com



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

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

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

چگالی اتم‌های گیرنده N_A ← چگالی حفره $p_0 = N_A$

نیمه‌هادی	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 نیمه‌هادی Si که $n_i = 1.5 \times 10^{10}\ cm^{-3}$ می‌باشد توسط اتم‌های دهنده فسفر ناخالص کردیم $N_D = 10^{15}\ cm^{-3}$

با فرض برآوری تقریبی چگالی اتمی فسفر و Si مطلوبست تعیین نوع نیمه‌هادی و حامل‌های اکثریت و نسبت آن‌ها؟

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

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

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

www.ir-micro.com

مثال: Si 1kg $\frac{1kg}{5\times10^{22}} = 2.10^{-22}kg$

۵۰۱ میلیارد الکترون را از باند ظرفیت به باند رسانش می‌رساند

در برابر 1kg سیلیسیم، $2.10^{-22}kg$ فسفر باعث ازدیاد الکترون‌ها می‌شود.

- تابع فرمی دیراک (Fermi Dirac):

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

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

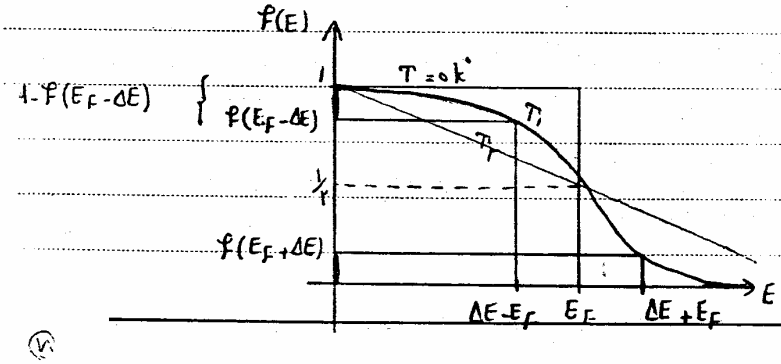
k: ثابت بولتزمان

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 $E-E_F<0$ ⇐ $e^{\frac{E-E_F}{kT}}=e^{-\infty}$ ⇐ $e^{-\infty}=0$ ⇐ $f(E)=1$

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



هنگامی با حول E_F متقارن هستند.

$T_2 > T_1 > 0^k$

www.ir-micro.com

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

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

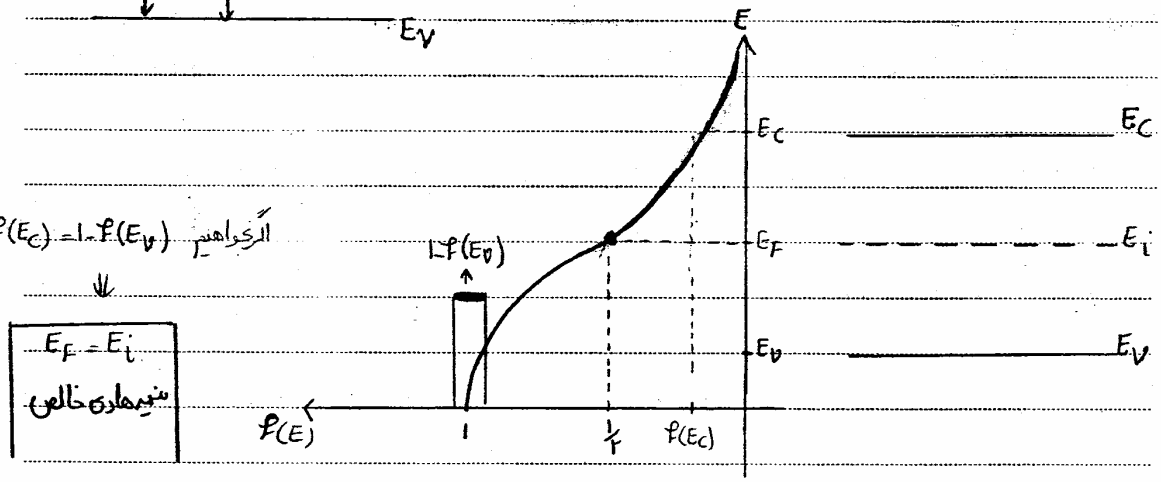
احتمال الکترون — احتمال حفره

تعیین موقعیت سطح فرمی در نیمه‌هادی‌ها

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

E_i : سطح ذاتی

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



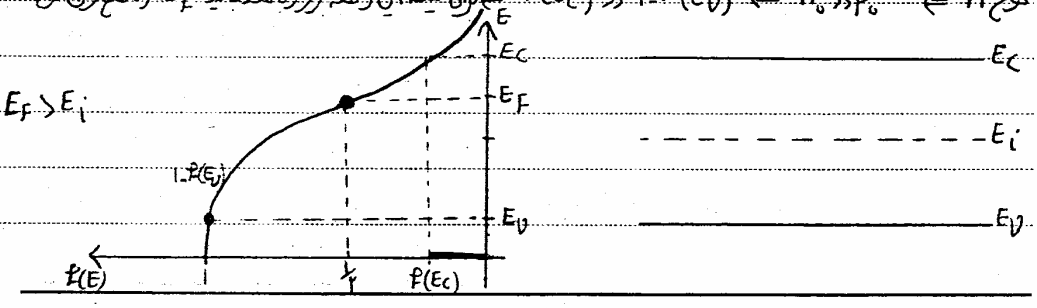
اگر داشته باشیم $f(E_C)=1-f(E_V)$

$E_F = E_i$

نیمه‌هادی خالص

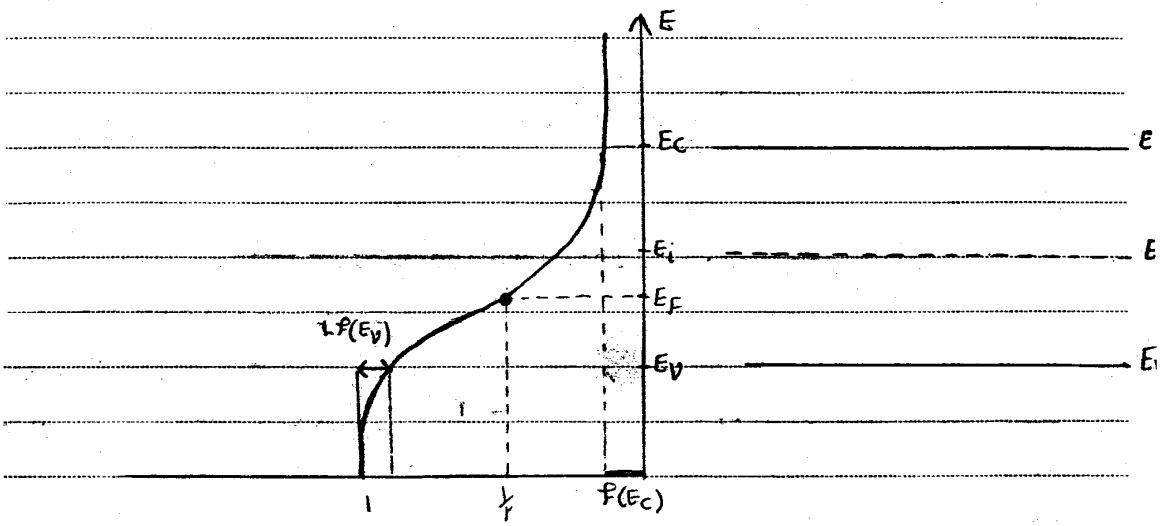
نوع n ← $n_0 \gg p_0$ ← $f(E_C) \gg 1-f(E_V)$ برای اینکه این رابطه برقرار باشد باید E_F (سطح فرمی) از E_i بالاتر باشد

$E_F > E_i$ چون الکترون‌ها بیشتر از حفره‌اند

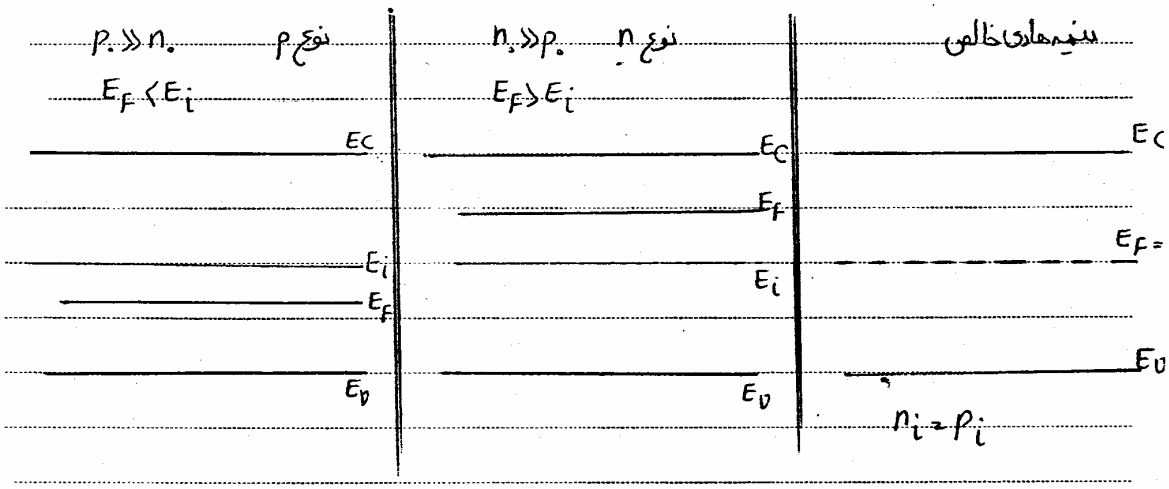


www.ir-micro.com

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



نتیجه:

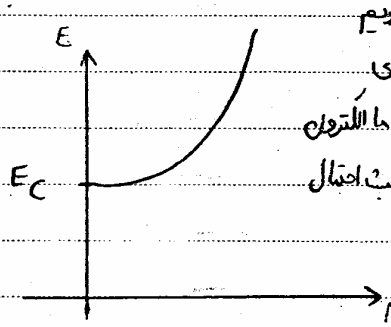


www.ir-micro.com

- تعیین چگالی حاملها در نیمه‌هادی‌ها: $n_0 \neq$ و $p_0 \neq$

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

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 بالا و یا چگالی حالتهای قابل دسترس معلوم باشد می‌توان تراکم الکترونها را محاسبه کرد)

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

E_C ——— دانسیته موثر حالت $e\ e\ e\ e$

E_V ———

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

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

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

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

T: درجه کلوین

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

www.ir-micro.com

الکترون‌ها برحسب باندهای انرژی (چاه‌ها) و انرژی 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 حالت حفره: تمام حالات پر روی مرز باند ظرفیت در نظر گرفته می‌شود.

جرم موثر حفره

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

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

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

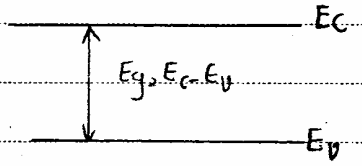
$E_F - E_V \gg kT \Rightarrow \frac{E_V - E_F}{kT} \ll 1$ در بخش مخرج صرف نظر $e^{\frac{E_V - E_F}{kT}}$ از

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

www.ir-micro.com

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

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



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

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 نیمه‌هادی خالص:

آلاینده‌دهنده نوع n باشد ← معلوم $n_0 = N_D$ Donor

$$\boxed{p_0 = \frac{n_i^2}{n_0}}$$

آلاینده‌دهنده نوع p باشد ← معلوم $p_0 = N_A$

$$\boxed{n_0 = \frac{n_i^2}{p_0}}$$

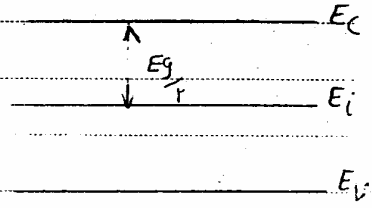
www.ir-micro.com

② از رابطه $N_C = N_V$ بازنویسی $\Rightarrow \boxed{n_i = N_C e^{\frac{-E_g}{2kT}}}$

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 داده $n_i = 1.5 \times 10^{10}\ cm^{-3}$ و $E_g = 1.1\ eV$ در $T = 300K$، $kT = 0.259\ eV$

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

مطلوب است: نوع نیمه‌هادی، چگالی حامل‌های اکثریت و اقلیت و فاصله سطح فرمی از سطح ذاتی $\rightarrow E_i$

ناخالص دهنده: نوع n

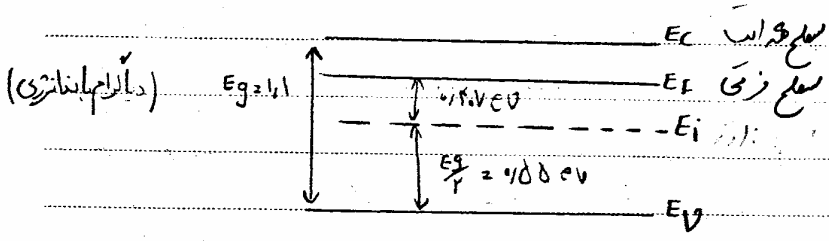
چگالی حامل‌های اکثریت $n_0 = N_D$

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

---

www.ir-micro.com



۱۴۰۱/۱۸

جلسه سوم

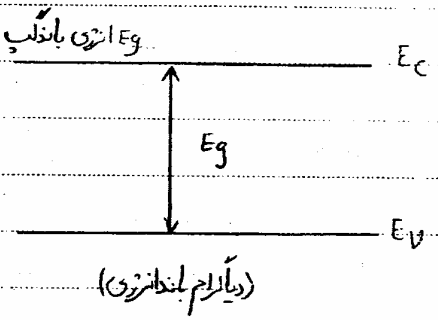
وابستگی حرارتی حاملها:

چگالی حاملها $n_i = p_i$

۱) در نیمه هادی 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



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

(m_n^*: جرم موثر الکترون، m_p^*: 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

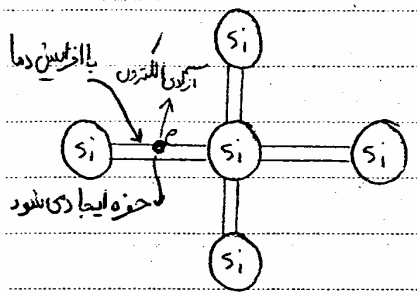
$n_i(T)$ وابسته به $T^{\frac{3}{4}}$ و $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$

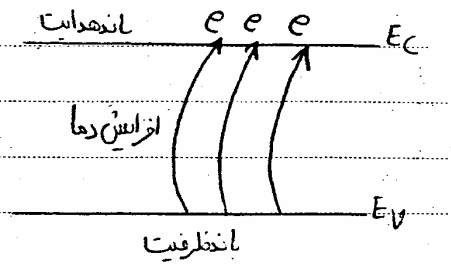
یعنی با افزایش دمای T، $T^{\frac{3}{4}}$ و $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ افزایش می‌یابد اما شدت افزایش $e^{-\frac{E_g}{2kT}}$ روی n_i موثرتر است.

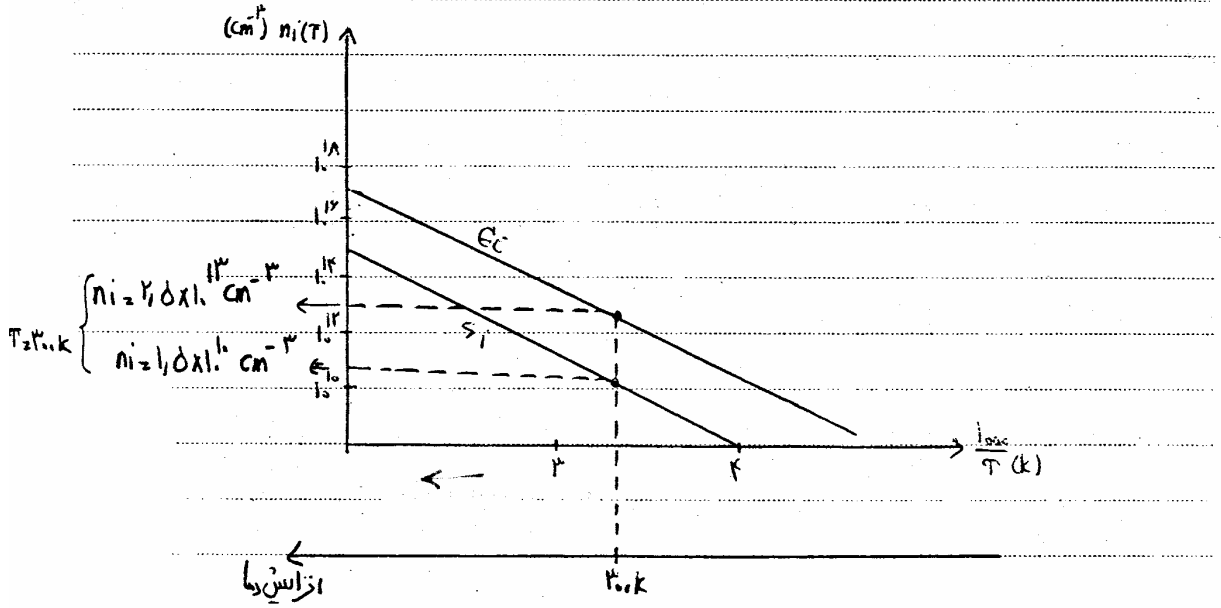
* شدت افزایش $e^{-\frac{E_g}{kT}}$ روی n_i موثرتر است.

www.ir-micro.com

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





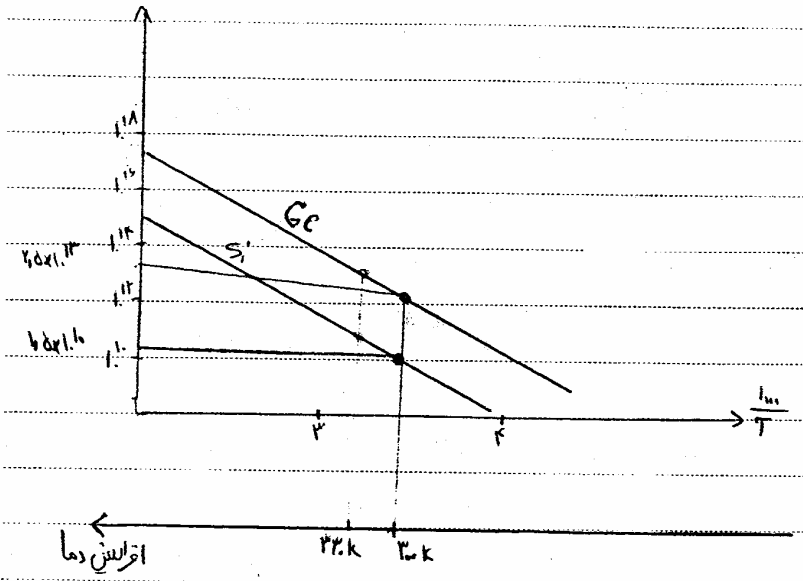


* مثال) در $T = 300k$ ناخالصی $N_D = 10^{11}$ را تزریق می‌کنیم که این برای S_i به عنوان دهنده است و تبدیل به نوع n می‌شود (از خاصیت حامل‌ها حامل‌های اقلیت می‌شود چون در S_i است) اما برای Ge تأثیری ندارد و Ge حامل‌های خود را می‌ماند

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

www.ir-micro.com

* اما در دمای $T \geq 300K$ چون حامل‌های ذاتی n_i مربوط به Si از حدّ $N_D = 10^{15}$ بیشتری شود برای Si هم به عنوان رهنده محسوب



بی شود.

* در ناخالص نمودن نیمه هادی خالص با بیشتر دمای کار مورد نظر را آلیم. *

---

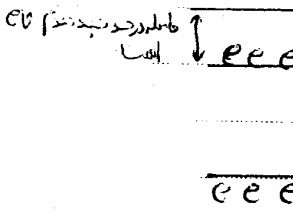
۲) در نیمه‌هادی ناخالص (Extrinsic):

$n_0(T)$ 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.

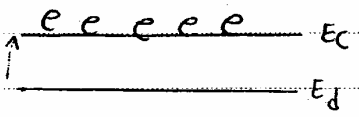
در ناخالص از نوع دهنده با سطح انرژی E_d حدّ نزدیک E_c ایجاد می‌شود.



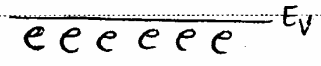
حامل‌ها در سطح ظرفیت و یا در تراز E_d و E_c هستند

www.ir-micro.com

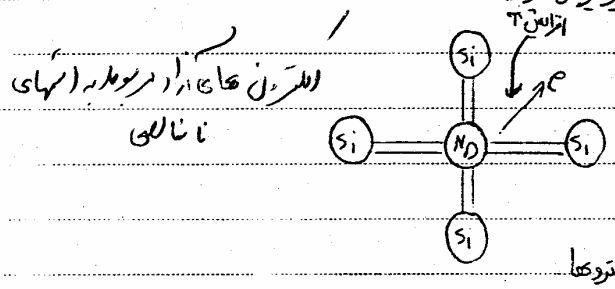
ب) آنرژی افزایش یابد $T_2 = 100k$ $(T_{min} < T < T_{max})$



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



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

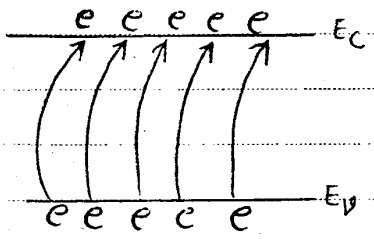


الکترون‌های آزاد در سوراخ‌های نا خالصی

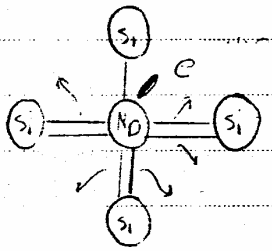
الکترون آزاد در سطح انرژی ناخالصی

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

ج) آنرژی $T > T_{max}$



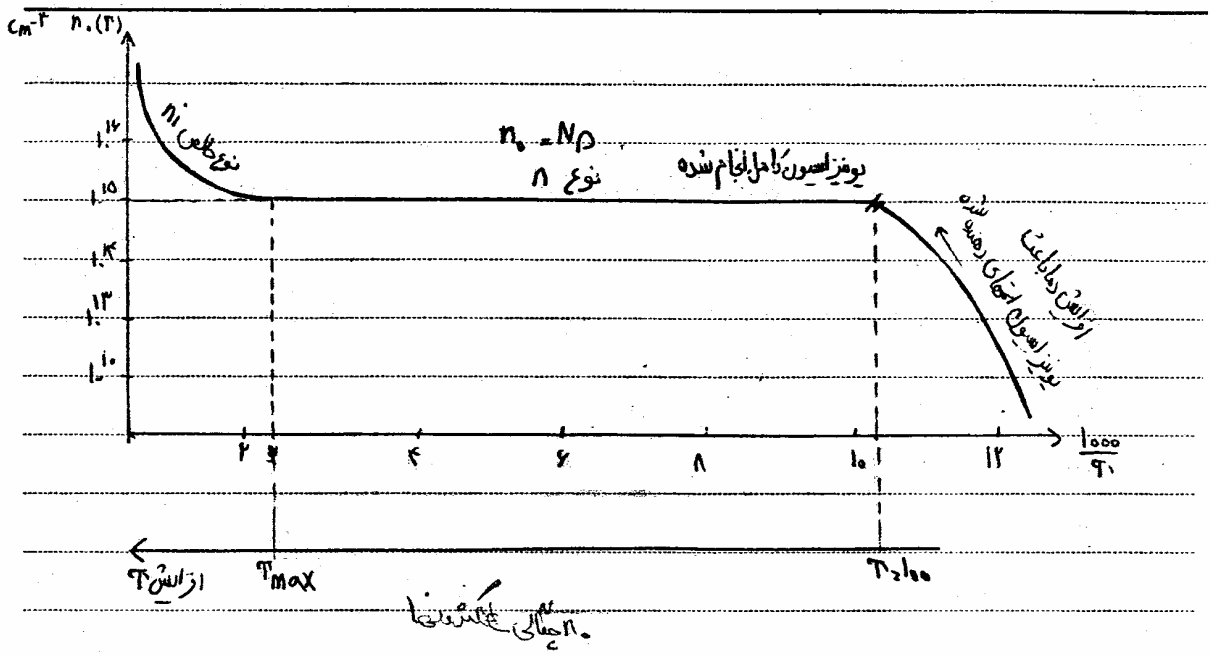
الکترون‌های پیوندهای کوالانسی اتم‌های Si هم بتدریج آزاد می‌شوند.



در نتیجه نیمه‌هادی خالص می‌شود $n_i(T)$

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

www.ir-micro.com



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

(بارهای مثبت و منفی با هم برابرند)

$N_D + p_0 = N_A + n_0$ (حالت خنثی)

مثبت: یونهای دهنده حفره — منفی: یونهای پذیرنده الکترون

یک مقدم نیمه‌هادی خنثی است

فرض اولیه استاتیکی

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) افزایش ناخالصی دهنده ← 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.

www.ir-micro.com

۳) افزودن اتم ناخالصی دهنده N_D به نیمه‌هادی با این طوری که $N_A < N_D$ باشد یعنی نیمه‌هادی نوع n داریم

در این حالت قسمتی از الکترون‌های اتم‌های دهنده با حفره‌های اتم‌های 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 دو را بطور کلی

$$n_0 = \frac{(N_D - N_A) \pm \sqrt{(N_D - N_A)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

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

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

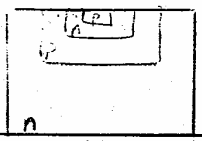
$$p_0 + N_D = N_A + n_0 \qquad \left(n_0 = \frac{n_i^2}{p_0}\right) \Rightarrow p_0^2 - (N_A - N_D)\, p_0 - n_i^2 = 0$$

حال جواب‌های این معادله درجه دو را بطور کلی

$$p_0 = \frac{(N_A - N_D) \pm \sqrt{(N_A - N_D)^2 + 4n_i^2}}{2}$$

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

* با این روش با انتخاب نوع نیمه‌هادی و نوع ناخالصی می‌توان آن را کنترل کرد.



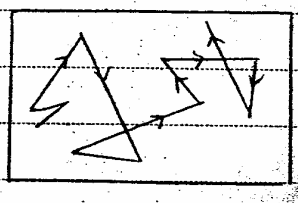
افزودن N_D

در این نیمه‌هادی ناخالصی پذیرنده و اضافه کردن اتم‌های دهنده را اتم‌های پذیرنده در واقع تراز رسانش تهی

www.ir-micro.com

رانش (Drift) حاملها در میدان الکتریکی: ... حرکت منظم حاملها تحت تاثیر میدان الکتریکی

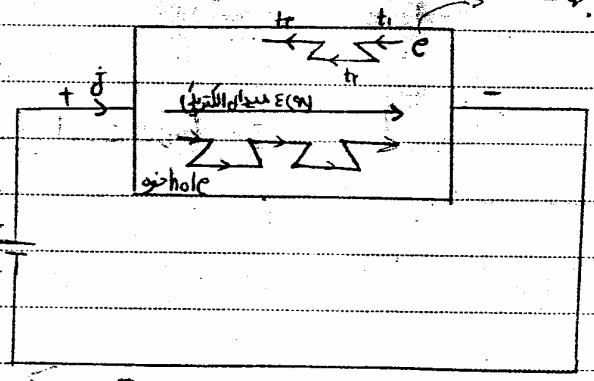
در حالت تعادل یعنی حالتی که هیچ میدانی اعمال نشده حاملها (الکترونها و حفره‌ها) حرکات تصادفی و نامنظم دارند و لذا هیچ جریان خالص منتقل نمی‌شود.



- احتمال اینکه الکترونها پس از زدن به مسیر 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 برخورد می‌کنند و ممکن است جهت آنها عوض شود اما دوباره در جهت میدانها حرکت می‌کنند.

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

P_n (mean free time)

حرکت الکترون

J_n (drift) جریان الکترون

حرکت مفید در جهت میدان

P_p حرکت حفره

J_p (drift)

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

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

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

واحد $\mu = \frac{cm^2}{V.s}$

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

www.ir-micro.com

$V_n = -\mu_n E(x)$ سرعت متوسط الکترونها — جهت خلاف جهت

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

$J_n(drift) = -qn_0 v_n$ — جهت جریان عکس جهت حرکت الکترون

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

n_0 چگالی الکترون

$\frac{cm^2}{V(s)} = mobility$ — ثابت تناسب

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

$$\rightarrow \sigma = qn_0\mu_n$$

$J_n = \sigma_n E$ — هدایت مخصوص

هدایت مخصوص ناشی از الکترونها

* هرچه چگالی الکترونها بیشتر ↑ ⇐ جریان درفت ↑

در مورد حفره‌ها

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

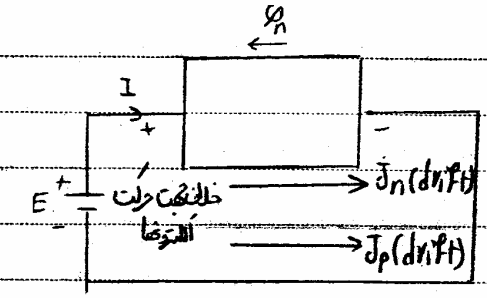
$$J_p(drift) = qp_0 V_p$$

$$J_p = qp_0\mu_p E(x)$$

$$\Rightarrow \sigma_p = qp_0\mu_p$$

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

www.ir-micro.com



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

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

مثال: نیمه‌هادی خالص با مقاومت مخصوص $\rho = ?$

نمونه: σ_e { $\mu_n = 3900 \frac{cm}{vs}$, $\mu_p = 1900 \frac{cm^2}{vs}$, $n_i = 2.5\times10^{13}\ cm^{-3}$, $T = 300^\circ K$

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

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

$\sigma_i = 2.32\times10^{-2}\ (\Omega cm)^{-1}$ مقاومت مخصوص $\rho_i = \sigma_i^{-1}$ $(\Omega cm)^{-1}$ $\rho_i = (8.1)^{-1} = 11.5\ \Omega cm$

جریان رانشی (دریفت) در نیمه‌هادی‌ها ایجاد می‌شود و وابسته به تحرک حامل‌های باند.

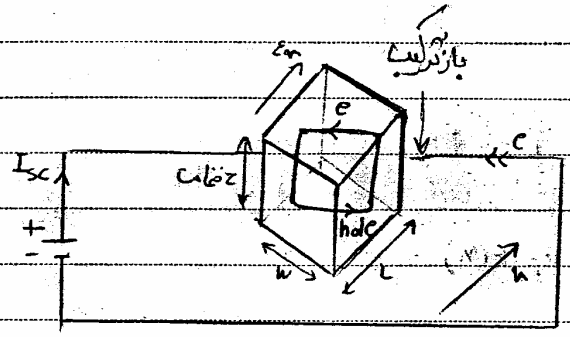
نیمه‌هادی خالص	نیمه‌هادی نوع n	نیمه‌هادی نوع p
$n_i = p_i$	$n_0 \gg p_0$	$p_0 \gg n_0$
$\sigma = \sigma_i = qn_i(\mu_n+\mu_p)$	$\sigma = \sigma_n = qn_0\mu_n$	$\sigma = \sigma_p = qp_0\mu_p$

- چرا $\mu_n \gg \mu_p$ است؟ زیرا حفره در لایه‌های اتمها جابجا می‌شود و در باند ظرفیت تغییر حال می‌دهد و حفره تحت تسلط هسته است.

www.ir-micro.com

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

- در اینجا یک نیمه‌هادی تحت پتانسیل قرار گرفته است:



سطح مقطع $A = ZW$

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

$$\rho_{\text{مطلوب}} = \rho = R \frac{A}{L} \quad \frac{\text{مطلوب}}{\text{مطلوب}} \qquad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

- 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

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

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

www.ir-micro.com

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.

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

$\mu_p = 250 \frac{cm^2}{V.s}$

$kT = 0.026 eV$

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

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

$E_g = 1.1 eV$

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

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

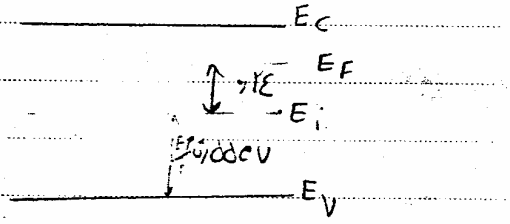
$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{500} = 0.002$$

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

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

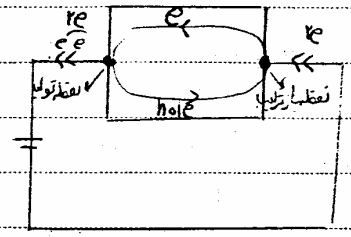
$$n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}} \Rightarrow E_F - E_i = kT \ln\frac{n_0}{n_i} \Rightarrow E_F - E_i = 0.026 \times \ln\frac{1666 \times 10^{10}}{1.5 \times 10^{10}}$$

$E_F - E_i = 0.28$



www.ir-micro.com

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 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.

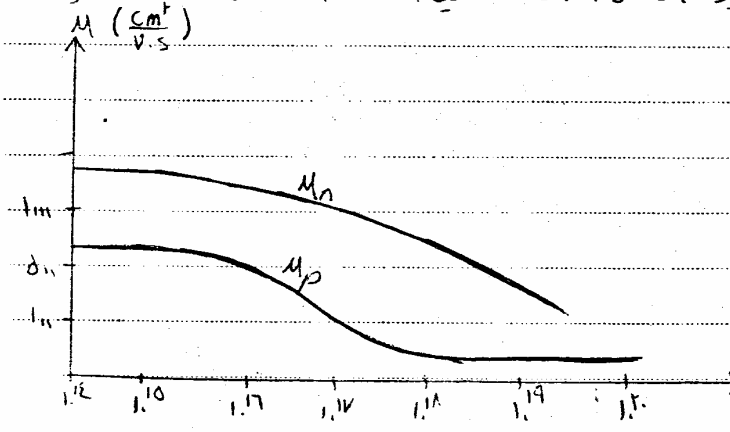
$$\sigma_i = q n_i (\mu_n + \mu_p) \Rightarrow \sigma_i = 1.6 \times 10^{-19} \times 2.5 \times 10^{13} (3900 + 1900)$$

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

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

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.

---

www.ir-micro.com

- وابستگی قابلیت تحرک (μ) به دما (T)

ذرات حامل خیلی پایین انرژی جنبشی حامل‌ها (الکترون یا حفره) بسیار کم است و بسیار تحت تأثیر یونهای دهنده یا گیرنده قرار می‌گیرند.

کم انرژی ← e

در دمای پایین

در این حالت قابلیت تحرک کم می‌شود.

با افزایش دما انرژی جنبشی حامل‌ها زیاد می‌شود و در نتیجه تأثیر یونهای مثبت و منفی قرار می‌گیرند.

با افزایش دما انرژی جنبشی زیادی دارد و باعث افزایش μ می‌شود. و در نتیجه تأثیر یونهای مثبت و منفی قرار می‌گیرند.

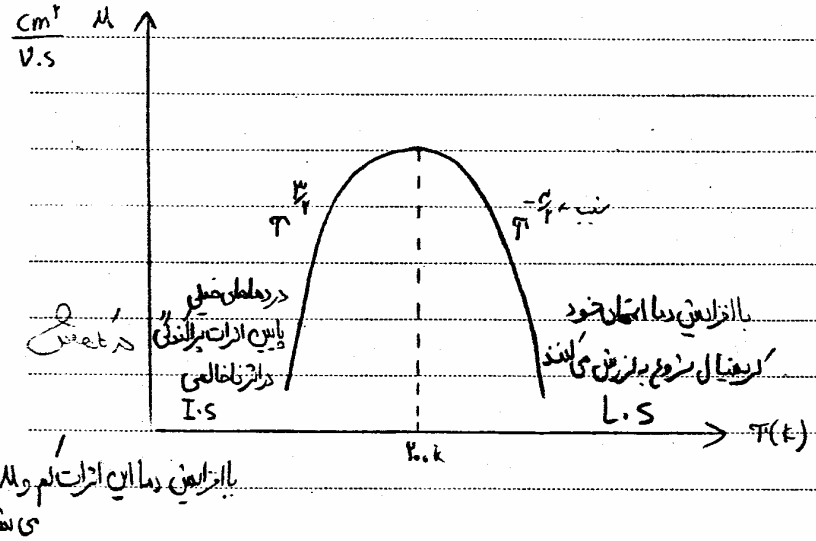
با افزایش دما انرژی جنبشی حامل‌ها افزایش می‌یابد و برخوردها بیشتر و بیشتر می‌شود

Lattic scattring سبد کریستالی در دمای بالا انرژی دارند

و لرزش اتم‌ها هم زیاد می‌شود

و مانعی بر سر حرکت آزادانه حامل‌ها می‌شود.

Impurity scattring ناخالصی در دمای پایین انرژی دارند.



مهم‌ترین عوامل بررسی μ { دما / ناخالصی

www.ir-micro.com

اثر خالی: ... ↑ ← تأثیر بر پیوندهای هسته‌ای ↑ ... تغییر ناچیز جرمی باعث کاهش جرم هسته می‌شود

از این اتم‌های خالی باعث داشتن قابلیت تغییر حالت‌هایی می‌شود (به دلیل جاذبه بین پیوندهای هسته و هسته)

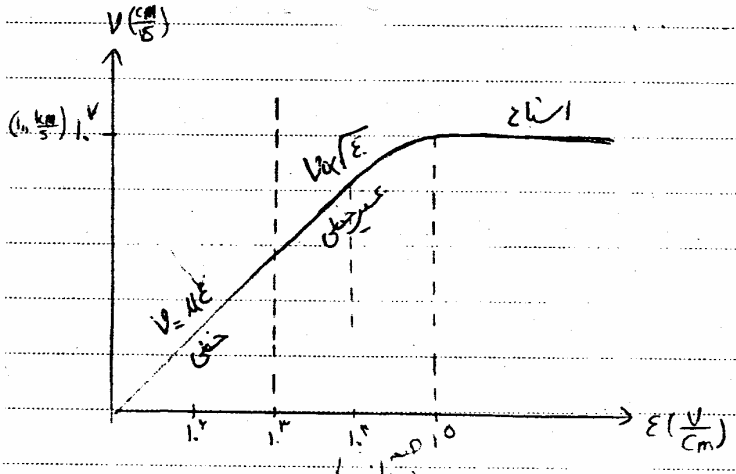
اگر ۵٪ برابر خالی داشته باشیم $M_n = 0.1$

$\sigma_2 \quad 90\,\mu_n + 9P.M_p$ ← این قسمت مربوط به وابستگی قابلیت تغییر M به میزان اتم‌های خالی

رابطه میدان الکتریکی و سرعت متوسط:

$V = ME$

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



از این به بعد میدان باعث ازدیاد بیش از حد انرژی حامل‌ها و برخورد شدید و ایجاد حرارت و بالا رفتن دمای سیستم و

در کتاب ثانویه دینوی سیستم لغزش باید $E < 10^3$ باشد

www.ir-micro.com

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

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

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

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

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 $= 31\ \frac{gr}{mol}$

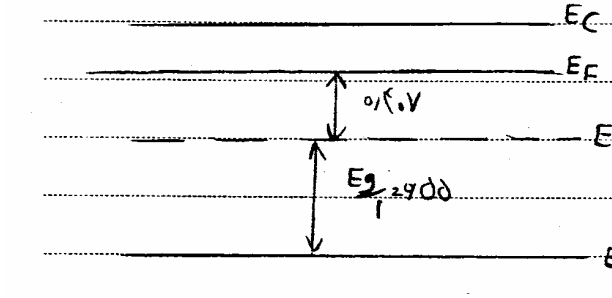
وزن اتمی Si $= 28.1\ \frac{gr}{mol}$

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

0.9

نیمه‌هادی نوع n ← چگالی اتمهای دهنده $= N_D = 10^{17}$ حاملهای اکثریت $n_0 = N_D = 10^{17}$

$E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} \Rightarrow E_F - E_i = 0.259 \ln \frac{10^{17}}{1.5\times10^{10}} = 0.42\,eV$



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^{-1}

(۲۹)

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

هاتوع p

E_i پایین‌تراز

www.ir-micro.com

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

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

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

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

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

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

$= 31622 \times 10^{10}$

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

$p = \frac{n_i^2}{n} \Rightarrow \frac{2.25 \times 10^{20}}{20811 \times 10^{10}} = 1.081 \times 10^{6}$

www.ir-micro.com

۳) در یک نیم‌هادی ذاتی با 10^{17} اتم‌های ناخالصی دهنده اضافه می‌شود تا سطح فرمی E_F به اندازه ۰٫۲ eV بالاتر از E_i شود. $n_i = 1.5 \times 10^{10}$

$kT = 0.259\ eV$

$$E_F - E_i = kT \ln \frac{n_0}{n_i} \Rightarrow 0.2 = 0.259 \ln \frac{n_0}{1.5 \times 10^{10}}$$

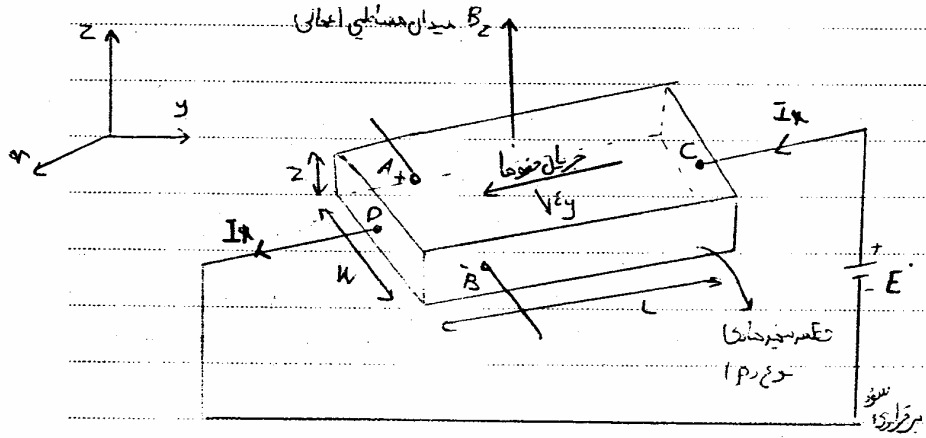
$$\ln \frac{n_0}{1.5 \times 10^{10}} = 15.44 \Rightarrow \frac{n_0}{1.5 \times 10^{10}} = 5078826.1$$

$$n_0 = 7.3152 \times 10^{10} \Rightarrow n_0 = 7.3 \times 10^{4}$$

۸۴٫۱۲۵

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

موضوع آزمایش: اندازه‌گیری جریان I_x که سبب ایجاد پتانسیل میدان مغناطیسی عمود بر جهت جریان می‌شود و ولتاژی در دو سر دیگر ایجاد می‌شود V_{AB}



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

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

با اعمال میدان مغناطیسی B_z نامتعادل می‌شود و V_{AB} مشاهده می‌شود یعنی خطوط‌های هم‌پتانسیل عمود بر I_x (در راستای I_x) است.

www.ir-micro.com

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 میدان الکتریکی و مغناطیسی $F = q(\mathcal{E} + V \otimes B_z)$ (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.

$$F_y = q(\mathcal{E}_y - V_x B_z) = 0 \Rightarrow \begin{cases} \mathcal{E}_y = V_x B_z \\ \text{قبلاً } J_x = q p_0 V_x \end{cases} \Rightarrow \mathcal{E}_y = \frac{J_x}{q p_0} B_z \quad (1)$$

ضریب هال $R_H = \frac{1}{q p_0} \left(\frac{cm^3}{C}\right)$

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

$\bar{c}_x = q p_0 V_x \rightarrow V_x = \frac{\bar{c}}{p_0 q}$

(1)

۲) تعیین دانسیته حامل‌های الکتریسیته

$R = \frac{V}{I_x}$ $\quad$ نوع n: $\delta = \delta_n = q n_0 \mu_n$ $\quad$ در نوع n: n_0

$J = \frac{I_x}{A}$ $\quad$ در نوع p: p_0

$R = \rho \frac{L}{A} \Rightarrow \rho = \frac{RA}{L}$ $\quad$ $\delta = \delta_p = q p_0 \mu_p$

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

حالت کلی $\delta = q n_i (\mu_n + \mu_p)$

www.ir-micro.com

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) دریک نمونه Si با 10^{17} اتم دهنده ($N_D = 10^{17}$) ناخالص شده مطلوبست محاسبه مقاومت کمون ρ و مقاومت ویژه آن 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 الکترونها $n_0 = N_D = 10^{17}$

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

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

www.ir-micro.com

$R_H = \frac{-1}{qn_0} = -62.5 \frac{cm^3}{C}$ نیمه‌هادی نوع n

$V_{AB} = \frac{I_x B_z R_H}{z} = \frac{(10^{-3}A)(1.0 \frac{wb}{cm^2})}{10^{-2}cm} \times (-62.5) \frac{cm^2}{C}$

$V_{AB} = -62.5 \ mVolt$ منفی به‌طور نیمه‌هادی نوع n است.

تغییر ناپذیری سطح فرمی E_F:

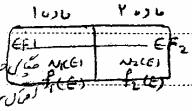
حالت تعادل: مرسوم به کمی اصل خود در حالت تعادل نوارهای دگرگونی تمام مقدار در حالت تعادل کنند چیزی

در حالت تعادل: $\frac{dE_F}{dn} = 0$ و در حالت تعادل آن‌چه در تمام نیمه‌هادی‌ها هم پیوند برقرار است E_F در طول نیمه‌هادی‌ها

میدانی نمی‌باشد. جریان صفر است

با امکان تغییر می‌کند

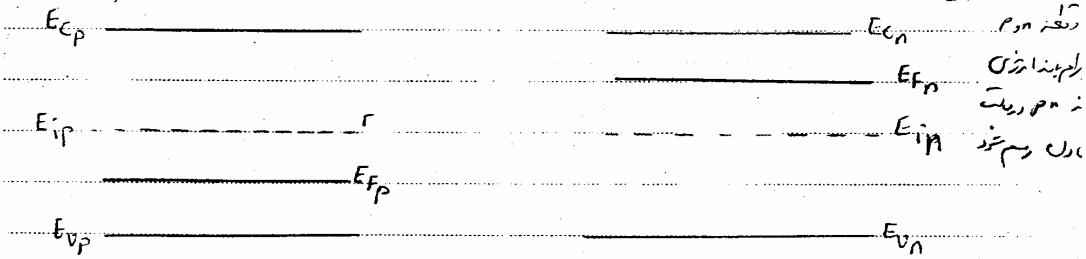
چیزی که نیمه‌هادی تعیین می‌کند تا از تغییر می‌کند



مثال

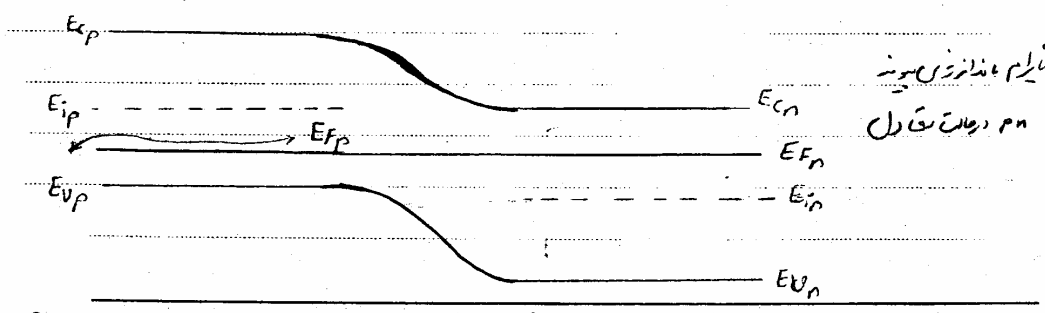
احتمال پر شدن انرژی E

مثال) پیوند pn در حالت تعادل



دیاگرام باندانرژی پیوند pn در حالت تعادل

اگر اینها با هم متصل شوند به صورت:



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

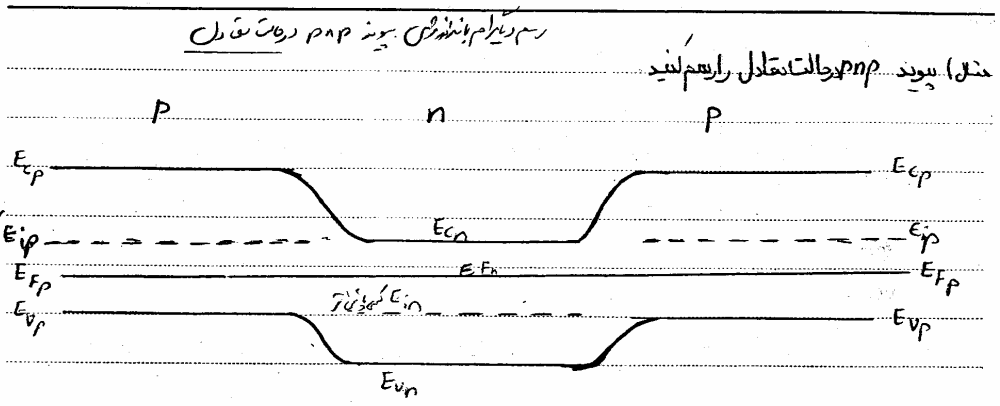
$r_2 = $ نرخ الکترون‌های از ماده 2 به 1 $\propto N_2(E) f_2(E) N_1(E)(1-f_1(E))$

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

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

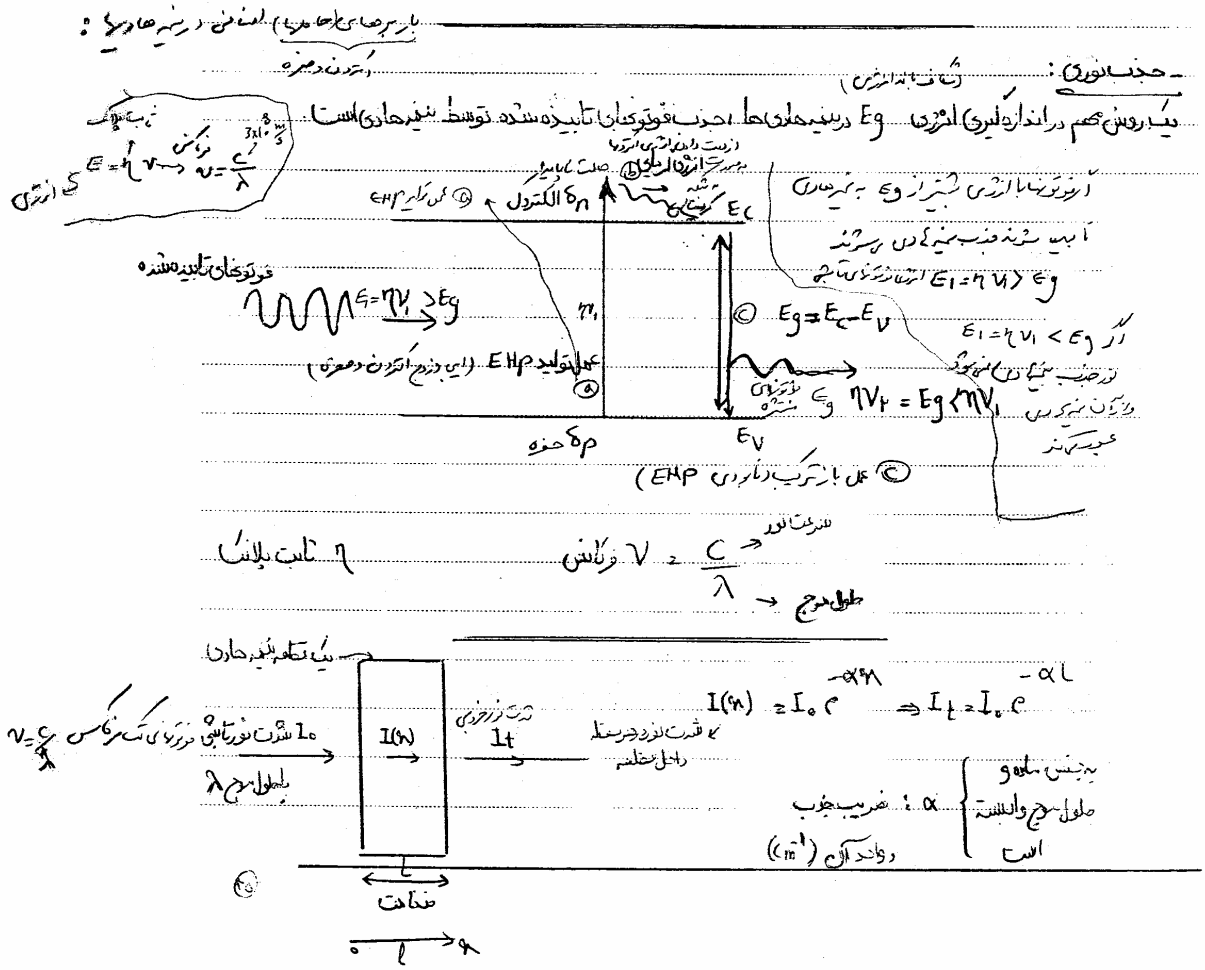
$\rightarrow f_1(E) = f_2(E)$ $\quad (1+e^{\frac{E-E_{F1}}{kT}})^{-1} = (1+e^{\frac{E-E_{F2}}{kT}})^{-1} \rightarrow E_{F1} = E_{F2}$ در حالت تعادل یک پیوند

www.ir-micro.com

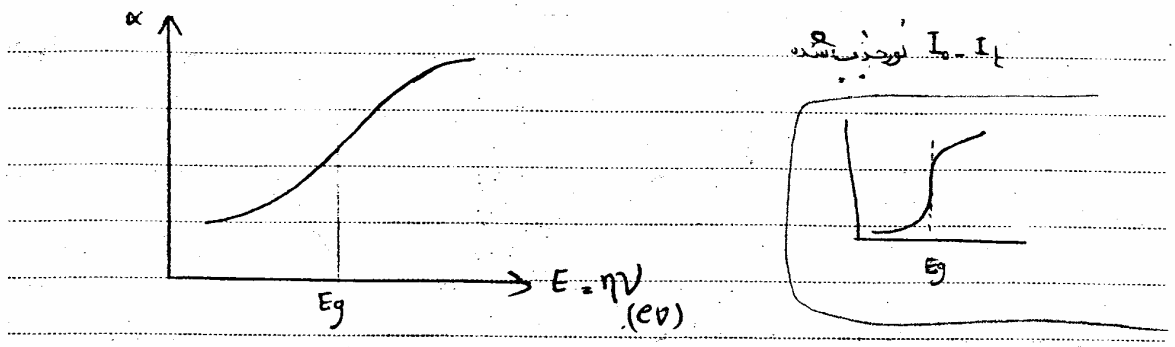


مثال) پیوند pnp در حالت تعادل را رسم کنید

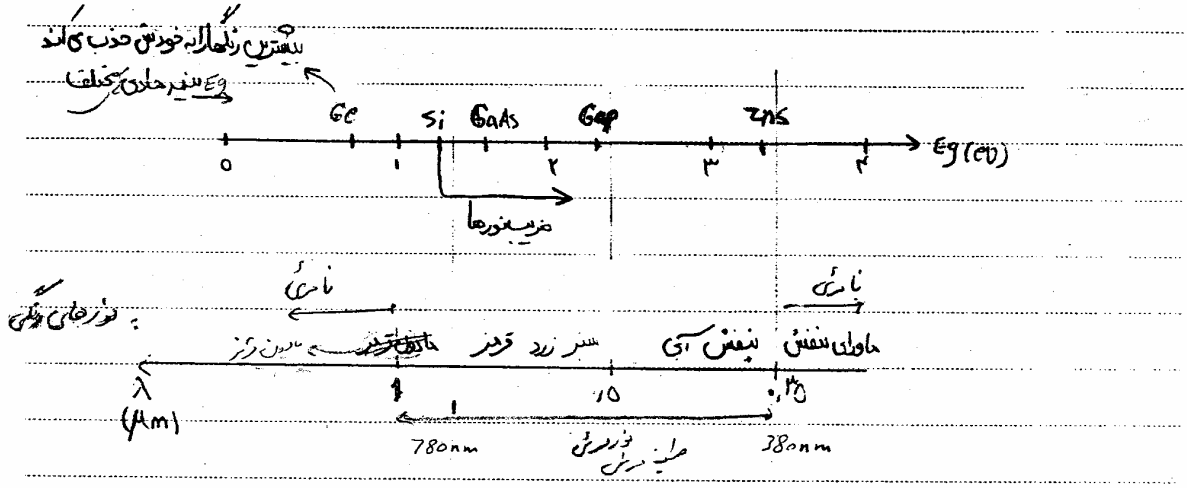
مثال: سطح انرژی در حالت تعادل تفسیر می‌کند.



www.ir-micro.com



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



if $E_g < \eta V$ ← جذب

مثال) دریک نمونه GaAs با ضخامت $L = 2,6\mu m$ نور تکرنگی با $\eta V = 2eV$ تابیده شده ضریب جذب $\alpha = 5 \times 10^4 cm^{-1}$ است.
متمرکز شده

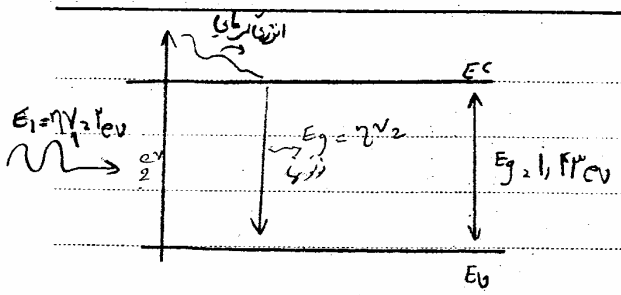
توان تابشی به نمونه $I_0 = 10mW$ و $E_g = 1,23eV$ برای GaAs مطلوبست:

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

ب) نوع انرژی گسیل یافته شده به شبکه حامل از باز ترکیب.

تعداد فوتون‌های ساطع شده؟

www.ir-micro.com



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

$I_t = 1mW$

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

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

انرژی جذب شده = انرژی فوتون‌های عبوری − انرژی فوتون‌های عبور کرده

$= 9 - 2.57 = 6.43mW$

تعداد فوتون‌های عبور کرده $= \frac{9,42 \times 10^{-4}}{\frac{1,9 \times 10^{-19} \times 1,43}{9}} = 2,18 \times 10^{16}$ فوتون بر ثانیه

انرژی جذب شده $= 0,285 \times 9mW = 2,75 \times 10^{-3} \frac{J}{s}$

$\frac{2,75}{2,57}$

- نورافشانی (luminescence): درهنگام بازترکیب واهشتگی که الکترون‌های تحریک شده به حالات تعادل برمی‌گردند اتمان

(با هر عاملی که باعث شود الکترون‌ها تحریک شوند به حالت

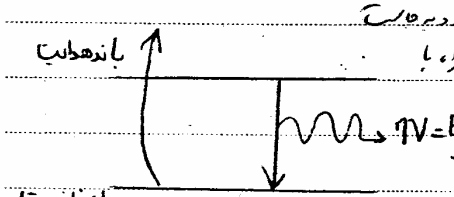
تابش نوری باند — نابالا (هر سند دهنده سه حالت یا بالاتر همراه با استار رشد می‌شاند بالاتر)

سه مکانیزم نورافشانی (تحریک الکترون‌ها) (در اثر کدام تحریک الکترون‌ها نورافت می‌کنند)

۱) فوتونی

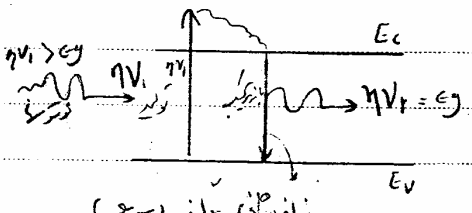
۲) کاتدی

۳) الکترونی



نورافشانی فوتونی: تحریک توسط فوتون‌ها (پرانرژی) انجام می‌شود

(با تابش فوتون، الکترون‌ها تحریک می‌شوند)



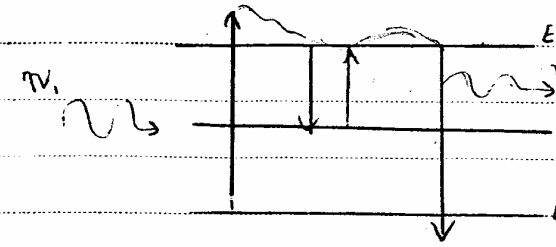
نورافشانی رزونانس (رزونانس)

10^{-8} sec زمان حدود تابش یک فوتون

10^{-8} s بیش از تحریک طول کشید تا نورافشانی انجام شود

ادامه در پایان ۷ بخش

www.ir-micro.com



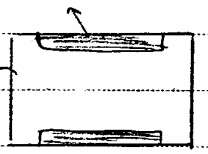
تراز ناخالصی
بعلت وجود ناخالصی یا
نقص شبکه بلوری

باعث کم شدن عملکرد تابش نوری شود

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

phasphevescent

خاصیت فسفرسان



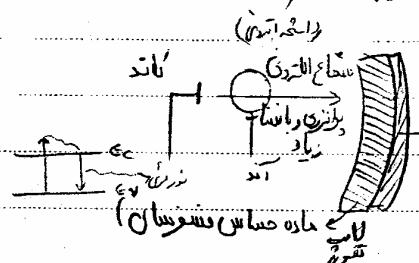
$E_g < 7V_1$ — تابش امواج نامرئی با انرژی زیاد

تحریک ماده فسفرسان و تابش نوری

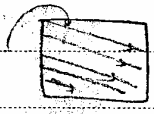
لامپ فلورسان

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

مثل لامپ تصویر CRT — لایه‌های ماده فسفرسان



هر لحظه کامل تصویر عوض می‌شود



در ۴۵ msec دوباره اشعه بآن برخورد میکند.

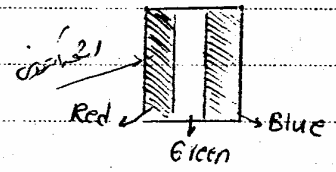
* اگر سیاه سفید باشد نیاز به ماده لازم است

و اگر رنگی باشد ۳ ماده لازم است

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

تلویزیون رنگی ۳ ناند

(لامپ تصویر رنگی)



ماده محافظ به صورت لوزی‌های منظم RGB

www.ir-micro.com

- 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 به مقدار زیاد می‌شود که با بازترکیب، انرژی آزاد می‌شود و این انرژی به صورت نور از LED ساطع می‌شود.

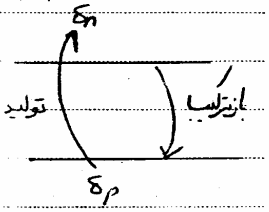
- تغییرات زمانی حاملهای اضافی:

در حالت تعادل: $n_i^2 = n_0 p_0$ ⇐ n_0 چگالی الکترونها، p_0 چگالی حفره‌ها

چگالی الکترونها $n(t) = n_0 + \delta_n(t)$ (δ_n: تراکم الکترونهای اضافی)

چگالی حفره‌ها $p(t) = p_0 + \delta_p(t)$ (δ_p: تراکم حفره‌های اضافی)

$\delta_n = \delta_p$



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

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

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

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

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

مسأله را وقتی که تزریق کم (low injection) است یعنی δ_n خیلی کمتر شود در نظر گیریم. $p_0 \gg n_0$

$$\frac{d\delta_n(t)}{dt} = -\alpha_2 p_0 \delta_n(t) \qquad \tau_n = \frac{1}{\alpha_2 p_0}$$

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

$\Delta_n = \delta_n(0)$ مقدار اولیه

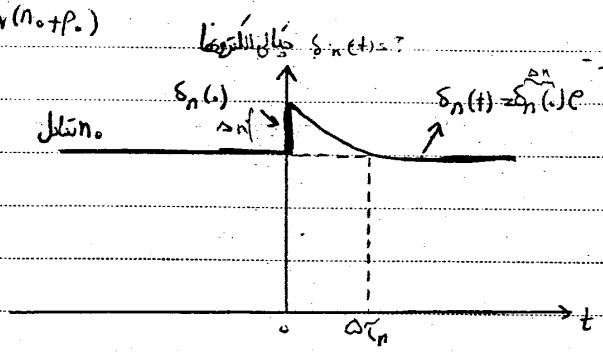
* Δ_n آزمایش کنترل مقدار حاملهای اقلیت در لحظه $t = 0$

نرخ تولید حرارتی − سرعت بازترکیب = تغییر تراکم حاملهای اضافی در زمان

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

www.ir-micro.com

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



τ_p طول عمر حفره‌ها در نیمه‌رسانای 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 حاملان اضافی را محاسبه کنید.

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

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

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

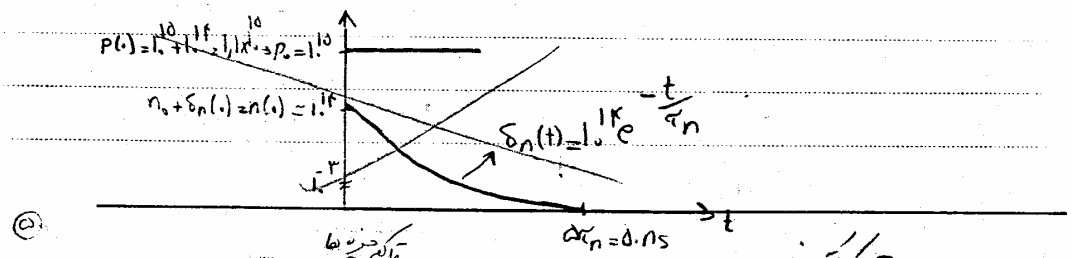
$$\delta_n(0)=\delta_p(0)=10^{14}$$

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

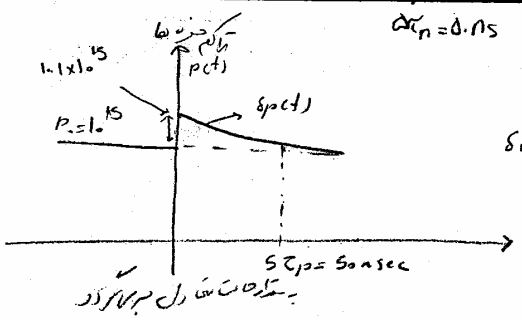
$$\delta_n(t)=\delta_n(t=0^+)e^{-t/\tau_n}=10^{14}e^{-\frac{t}{\tau_n}}$$

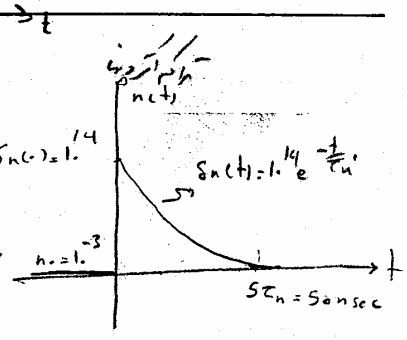
~~$t>0:\ p(t)=p_0+\delta_p(t)\Rightarrow p(t)=10^{15}+10^{14}e^{-\frac{t}{\tau_p}}$~~

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

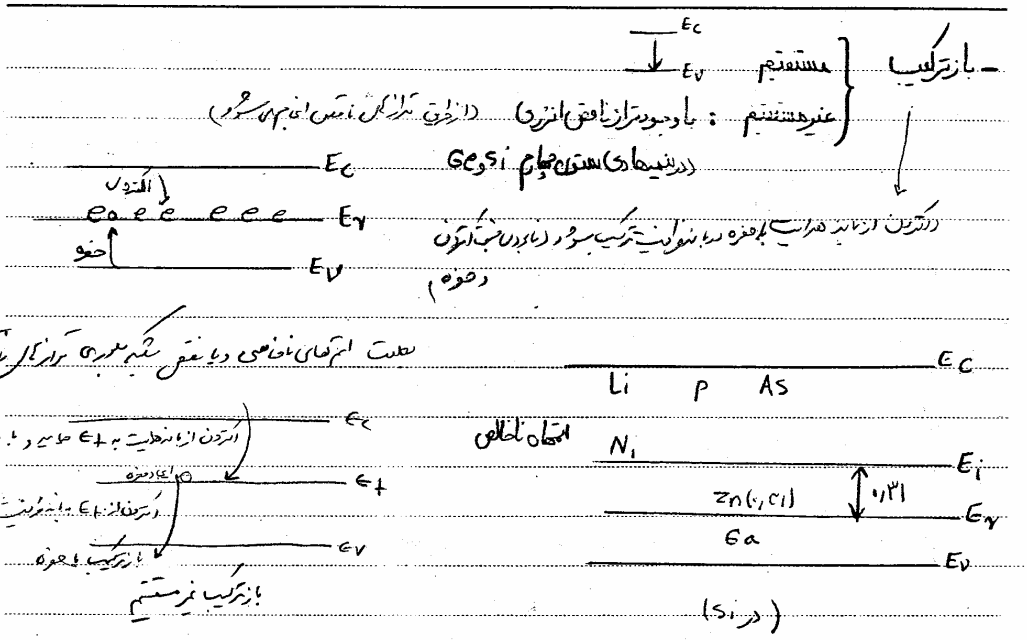


(a)





www.ir-micro.com



تولید حاملها:
تولید حرارتی، تولید نوری، تصادم یونش (Impact Ionization)

نرخ بازترکیب = تولید نوری + تولید حرارتی

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

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

$\delta_p = \delta_n$

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

$\alpha_r (n_0 + p_0) = \tau_n^{-1}$

نرخ تولید نوری / نرخ بازترکیب

δ_n: تغییرات چگالی الکترون‌ها و حفرات حامل‌ها

τ_n: طول عمر بازترکیب الکترون

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

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

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

www.ir-micro.com

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 میلی‌ثانیه تصویر تابیده شده از Si با $n_0 = 10^{14} cm^{-3}$ و $\tau_n = \tau_p = 2\,msec$ مطلوبست محاسبه چگالی حامل‌ها در حالت ماندگار. ناخالصی دهنده سبب تغییر در نوع n شده

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

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

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

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

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)

چگالی الکترون‌ها در حالت تعادل $n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}$ سطح فرمی در حالت بدون حامل‌های اضافی و نیمه‌رسانای ذاتی E_F

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

با حامل‌های اضافی شبه فرمی داریم: (IMREF)

چگالی الکترون‌ها $n = n_i e^{\frac{F_n - E_i}{kT}}$ شبه تراز فرمی IMREF برای F_n

چگالی حفره‌ها $p = n_i e^{\frac{E_i - F_p}{kT}}$ در حالتی که حامل‌های اضافی وجود داشته باشد ترازهای شبه فرمی F_p ، F_n

www.ir-micro.com

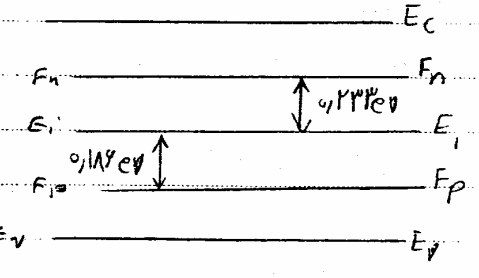
مثال) در مثال قبل تراز های نسبی را بدست آورید

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

$F_n - E_i = kT \ln\frac{n}{n_i} \Rightarrow F_n - E_i = 0.0259 \ln\frac{1.2\times10^{14}}{1.5\times10^{10}} = 0.233\,eV$

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

$E_i - F_p = kT \ln\frac{p}{n_i} = 0.0259 \ln\frac{2\times10^{13}}{1.5\times10^{10}} = 0.186\,eV$

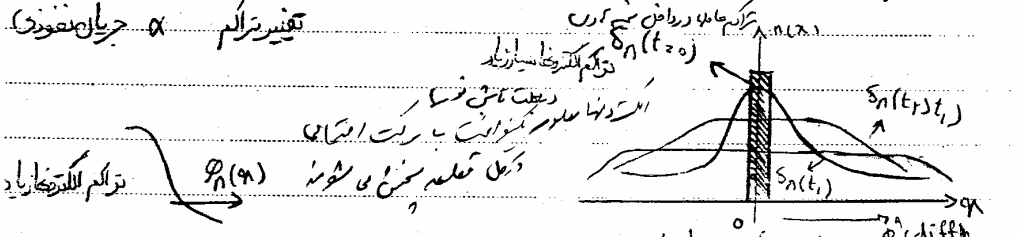


- حالت تعادل بدون حاملهای اضافی: $F_n = F_p = E_F$

- جریان نفوذی (Diffusion): در اثر حرکت تصادفی حاملها از نواحی پرتراکم به کم تراکم

از آنجایی که حاملها از نواحی پرتراکم بیشتر هستند به سمت نواحی کم تراکم حرکت میکنند و باعث ایجاد جریان می شود.

جریان نفوذی $\propto$ گرادیان تراکم



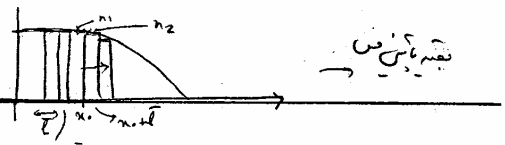
جریان نفوذی رابطه مستقیم با تغییرات تراکم حامل است

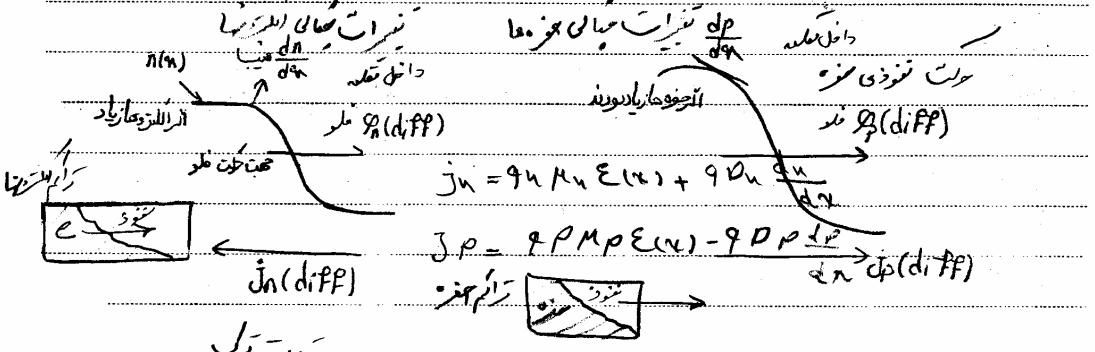
$J_{p(diff)} \propto \frac{dp}{dx}$

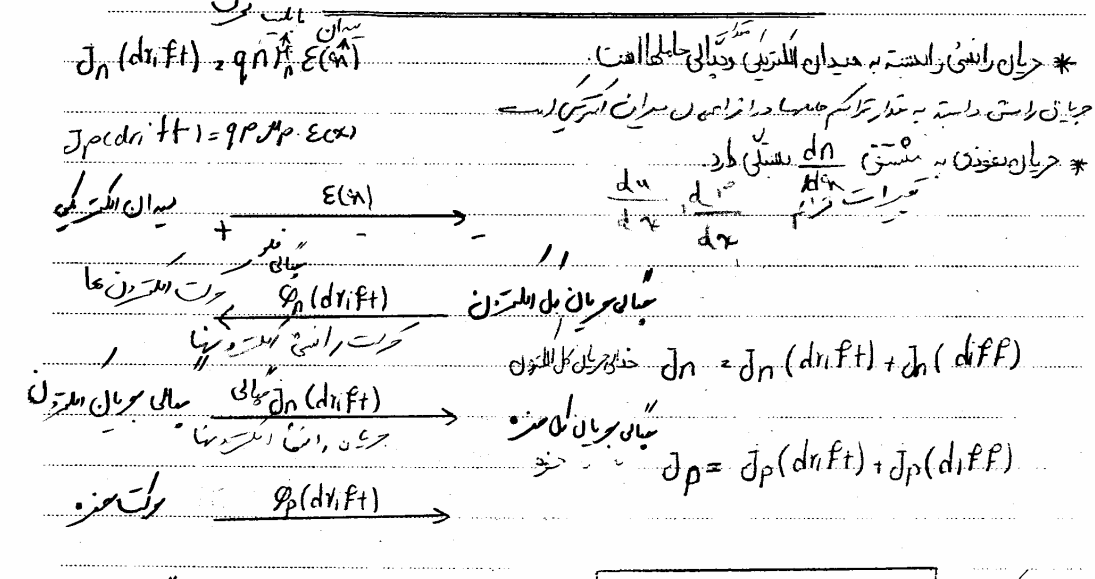
$J_{n(diff)} \propto \frac{dn}{dx}$

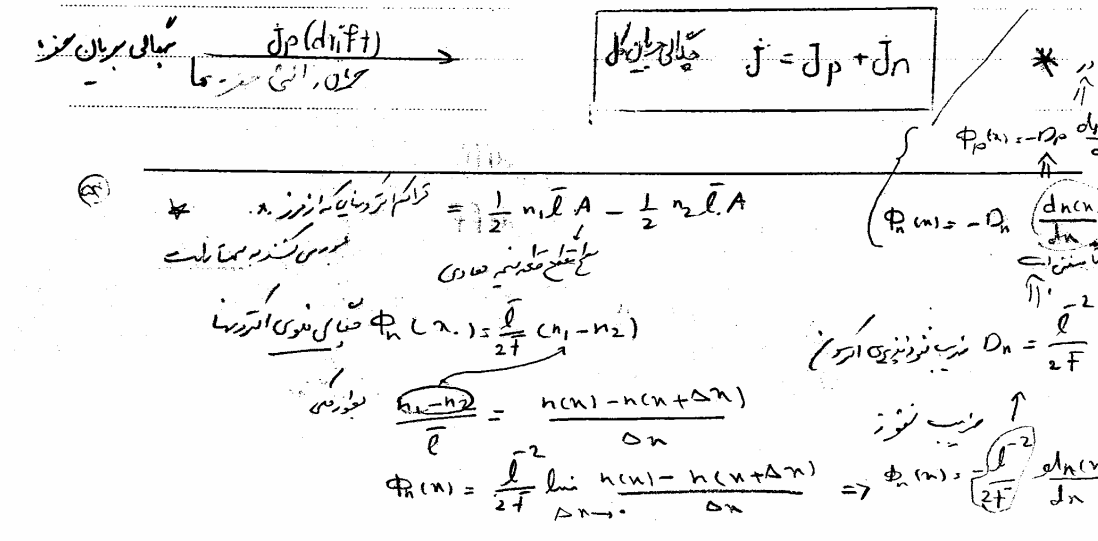
این از روی منحنی تغییرات تراکم حامل در راستای نفوذ محاسبه می شود

www.ir-micro.com









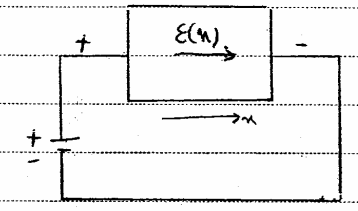
www.ir-micro.com

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

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

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

فرض: یک قطعه را به ولتاژی متصل کنیم:

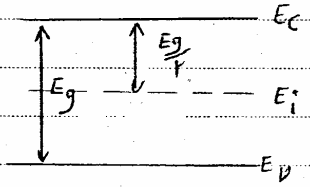


میدان الکتریکی $\mathcal{E}(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$ ← پتانسیل الکتریکی

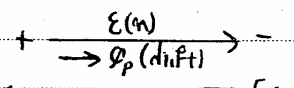
$\frac{dV}{dx} < 0$

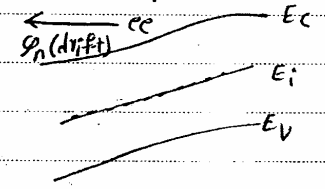
$$\mathcal{E}(x) = \frac{1}{q}\frac{dE(x)}{dx} = \frac{1}{q}\frac{dE_i(x)}{dx}$$

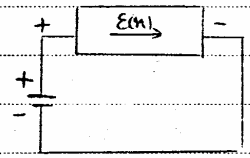
تغییرات E_i متناسب با تغییرات dE خواهد بود



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

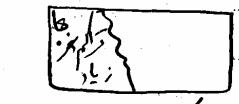




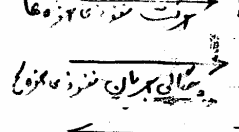


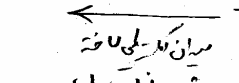
میدان تحت تاثیر انرژی الکترون‌ها حرکت را به سمت چپ شروع کرده و به سمت چپ حرکت کنند.

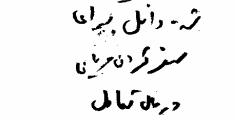
شیب بوجود آمده باعث افزایش انرژی الکترون‌ها در سمت راست شده تا به طرف چپ (پ) آیند



$\phi_p(drift)$







حالت تعادل وقتی از بیرون جریانی (میدان) اعمال نکرده‌ایم.

در تعادل هیچ جریانی نداریم

$$J_p = J_p(drift) + J_p(diff)$$ رانشی — نفوذی

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

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

صفر — در تعادل

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

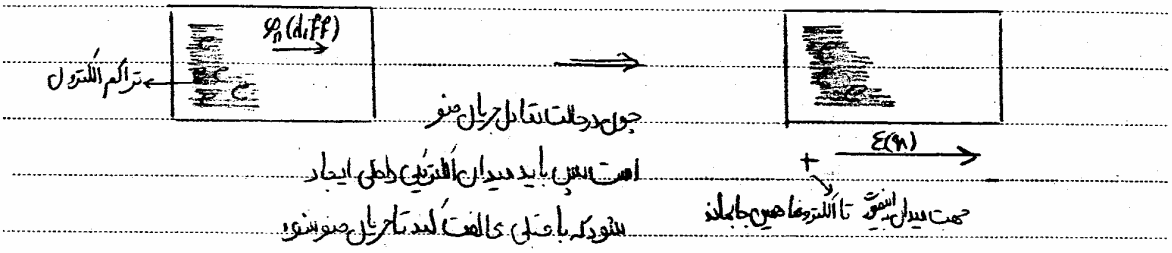
$$\frac{dp}{dx} = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}} \times \frac{1}{kT}\left(\frac{dE_i}{dx} - \cancel{\frac{dE_F}{dx}}\right) = p \times \frac{1}{kT}\frac{dE_i}{dx}$$

در تعادل $= 0$

www.ir-micro.com

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 یک نیمه‌هادی در حالت تعادل:

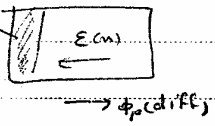


- میدان الکتریکی ساخته شده داخلی به منظور صفر شدن جریان در حالت تعادل

Built in

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

$$\mathcal{E}(x) = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{p} \frac{dp}{dx} \quad (2)$$ میدان الکتریکی ساخته شده در داخل جریان برای صفر کردن در حالت تعادل



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

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

$q\mathcal{E}(x)$ — در حالت تعادل $= 0$

در حالت تعادل تراز فرمی صفر است

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

www.ir-micro.com

رابطه اینیشتین

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

ضریب نفوذ / ضریب تحرک پذیری

①و② $\quad \varepsilon(x) = \frac{D_p}{\mu_p}\frac{1}{P}\frac{P}{kT}q\varepsilon(x) \Rightarrow \frac{kT}{q} = \frac{D_p}{\mu_p}$

رابطه اینیشتن: نسبت ضریب نفوذ به تحرک پذیری هر حامل در هر دمای مشخص ثابت است

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

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

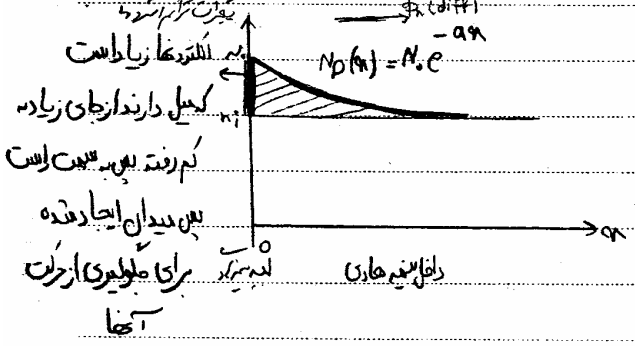
	D_n ($\frac{cm^2}{s}$)	D_p ($\frac{cm^2}{s}$)	μ_n ($\frac{cm}{V.s}$)	μ_p ($\frac{cm}{V.s}$)
Ge	۱۰۰	۵۰	۳۹۰۰	۱۹۰۰
Si	۳۵	۱۲٫۵	۱۳۵۰	۴۸۰

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.

$\varepsilon(x) = ?$

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

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



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

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

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

$\varepsilon(x)$ میدان داخلی ناشی از میدان الکتریکی ساخته شده

J_n در حالت تعادل $= 0$ برای ساکن شدن جریان

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

www.ir-micro.com

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

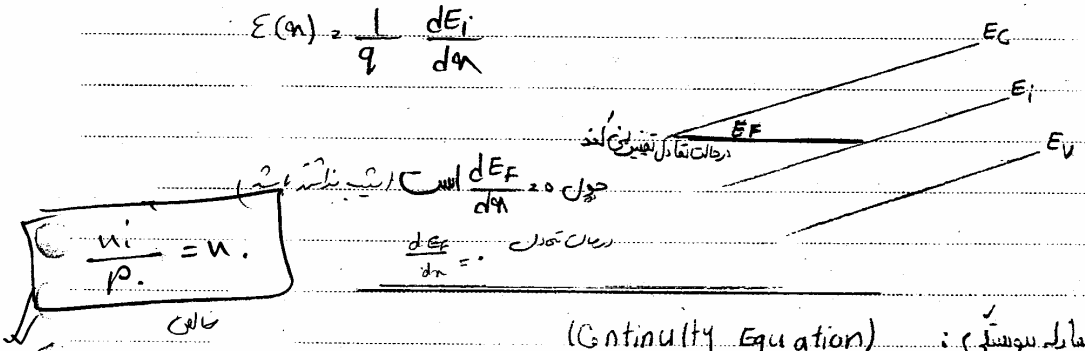
$$\mathcal{E}(x) = -\frac{D_n}{\mu_n}\frac{kT}{q}\frac{1}{n}\frac{dn}{dx} \qquad n = N_D(x) = N_0 e^{-ax}$$

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

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

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

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



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

$\frac{dE_F}{dx} = 0$ در حال تعادل

$\frac{n_i}{\rho_0} = n_0$

خالی

معادله پیوستگی : (Continuity Equation)

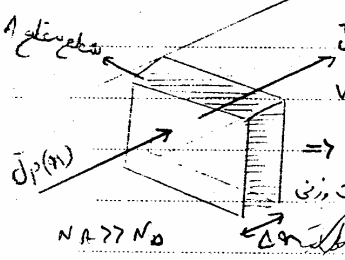
مساله بازترکیب در حالتی که از یک طرف نور تابیده شود.

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

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

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

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



ضخامت Δx

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

$\sigma = q n_0 \mu_n$ $\quad n_0 = N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$

$\Rightarrow \sigma = 1.6\times10^{-19}(10^{17}\times 1080) \rightarrow \rho = 5.8\ \Omega cm$

نسبت وزنی $\frac{Si}{P} = \frac{\text{وزنا‌ی Si در حجم}}{\text{وزنا‌ی P در حجم}} = \frac{28.1\times10^{22}}{31\times10^{17}} = 4.53\times10^{5}$

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

$= N_A - N_D$

$= N_D - N_A$

فرصت تا ۲ هفته دیگر

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

مقدار Si به فسفر برای نیمه‌رسانای ذاتی و در سطح انرژی فرمی را رسم و دیاگرام باندانرژی آن را با ناخالصی آلومینیم به مقدار $10^{18}\ cm^{-3}$ بدان نیمه‌رسانا اضافه شود، مقاومت مخصوص چقدر خواهد شد؟ نوع نیمه‌هادی ؟ رسم دیاگرام باندانرژی ؟ مساله حل شود

$n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{kT}}$ $\quad \mu_n = 1080\ \frac{cm^2}{V.s}$ $\quad \mu_p = 320\ \frac{cm^2}{V.s}$ $\quad$ تراکم اتم‌ها در Si $5\times10^{22}\ cm^{-3}$

وزنا‌ی فسفر $= 31\ gr$ $\quad E_g = 1.1\ eV$ $\quad n_i = 1.5\times10^{10}\ cm^{-3}$

وزنا‌ی Si $= 28.1$ $\quad kT = 0.0259\ eV$

www.ir-micro.com

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

τ_p: زمان بازترکیب

δ_n: چگالی الکترونهای اضافی

δ_p: چگالی حفره‌های اضافی

تراکم

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

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

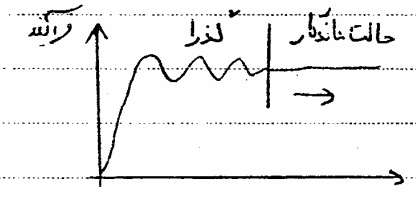
$$J_n(diff) = qD_n\frac{\partial \delta_n(x,t)}{\partial x}$$

معادلات دیفیوژن:

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

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

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

$n_i = 1.5\times10^{10}$

$KT = 0.0259\ eV$

الف) $N_A = 10^{18}\ cm^{-3}$

ب) $N_A = 2.9\times10^{15}$, $N_D = 3\times10^{15}$

www.ir-micro.com

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

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

$\frac{\partial \delta_p}{\partial t} = 0$ صفر گذاشته چون تغییرات زمانیش را گرفته

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

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

A و B از روی شرایط حدودی بدست می‌آید.

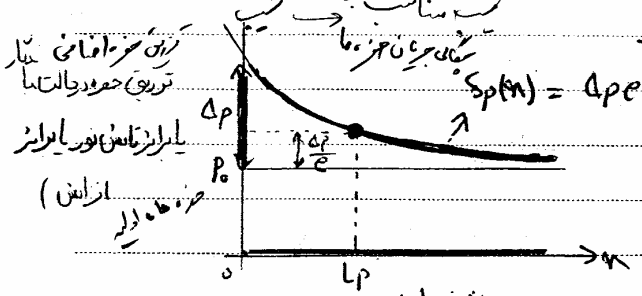
تمرین ۳) یک نمونه Si با 10^{16} اتم بر سی‌سی ناخالص شده چنانچه ناخالصی دهنده اضافه شود که سطح فرمی $0.4\ eV$ بالاتر از E_i شود، تراکم اتم‌های دهنده چقدر است؟

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

$kT = 0.0259\ eV$

www.ir-micro.com

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



حالت‌دائمی خطی است $\delta p(x)$ به صورت زیر است: $\delta p(x) = \Delta p e^{-x/L_p}$

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

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

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

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

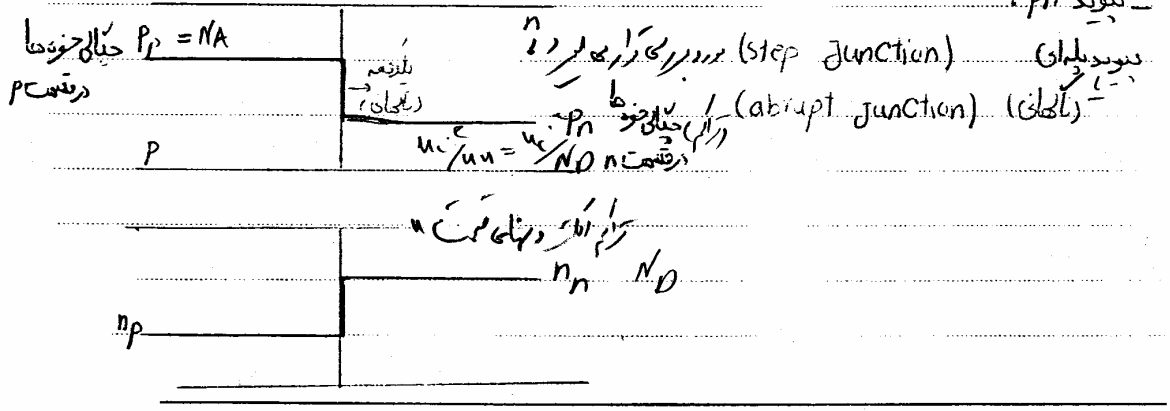
$J_p(x) = ?$ عمر

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

فصل دوم

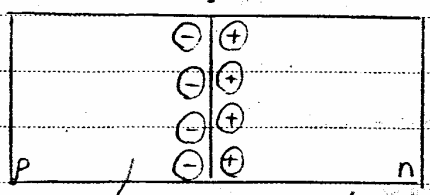
پیوند pn:

پیوند یکنواخت (step junction) پیوند ناگهانی (abrupt junction)



www.ir-micro.com

الکترون‌ها یونهای مثبت اتمهای فقد رها می‌گذارند



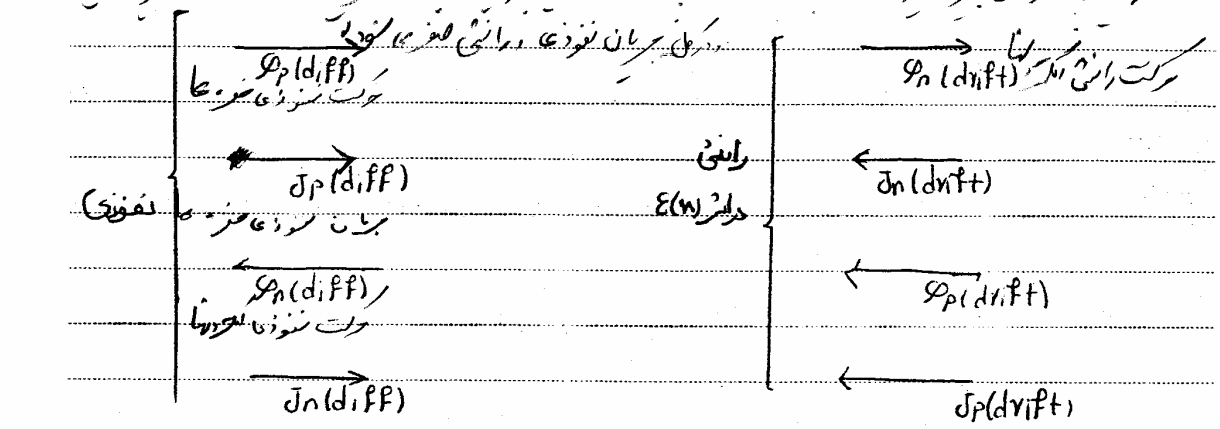
پیوند pn در حالت تعادل: یعنی تحت ولتاژ خارجی قرار نداره

در این حالت:

جریان کل پیوند صفر است J_n نفوذی = J_n رانشی

J_p نفوذی = J_p رانشی

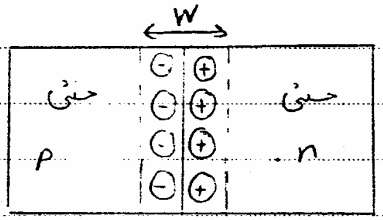
در نتیجه در محل پیوند یونهای مثبت و منفی باقی می‌مانند (ثابت) و یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند و ایجاد جریان رانشی می‌کنند



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

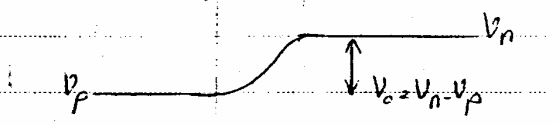
space Charge Region ناحیه بارفضایی

جون یونهای مثبت بر قسمت n دارد دارند

$\mathcal{E}(x)$

تغیرات

V_0 - تانسیل پیوند در حالت تعادل



www.ir-micro.com

نحوه محاسبه پتانسیل پیوند در حالت تعادل:

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

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

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

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

$$P_p = N_A$$

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

$$\text{(i)} \Rightarrow V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{P_p}{P_n} \Rightarrow V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{\frac{n_i^2}{N_D}}$$

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

$$\text{(i)} \quad e^{\frac{qV_0}{kT}} = \frac{P_p}{P_n} = \frac{\frac{n_i^2}{n_p}}{\frac{n_i^2}{n_n}} = \frac{n_n}{n_p} = \text{نسبت تراکم حفره‌ها در دو طرف} = \text{نسبت تراکم الکترون‌ها در دو طرف}$$

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

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

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

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

$kT = 0.259\ V$ در اصطلاح تقسیم بر q است اما اگر kT را بر حسب ژول بدهد تقسیم بر q نیست

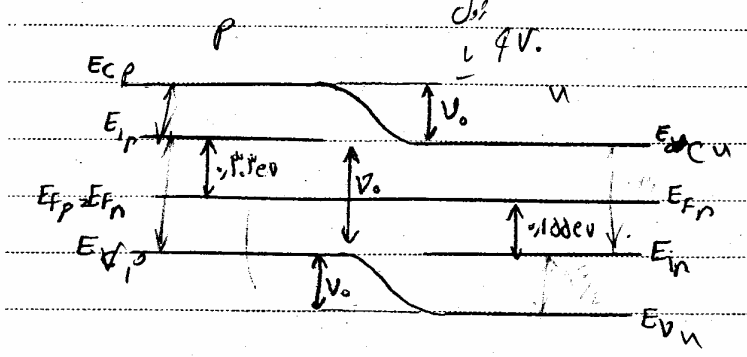
راه حل: سطح فرمی باید برای نیمه p مشخص شود

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

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

www.ir-micro.com

در حالت $N_D = n_n = n_i e^{\frac{E_{Fn}-E_{in}}{kT}} \Rightarrow E_{Fn}-E_{in} = kT\ln\frac{N_D}{n_i} = \%۲۵۹\ln\frac{۱۰^{۱۶}}{۲٫۵\times۱۰^{۱۳}} = \%۱۵۲$



از روی شکل $V_0 = \%۳۰۳ + \%۱۵۵ = ۰٫۸۵۸ eV$

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

مثال ۱۷: مثال مقالات (رابطه ولتاژ حاجز مقالات) (رابطه حاجز با ولتاژ)

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

یا

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

اگر ترکیب نیمه‌رسانا تغییر نکند V_0 ثابت است

یا

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

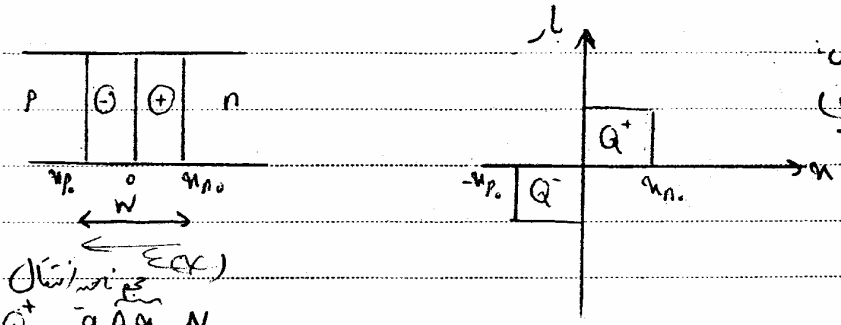
$$V_0 = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} = \%۲۵۹\ln\frac{۳\times۱۰^{۱۸}\times۱۰^{۱۶}}{(۲٫۵\times۱۰^{۱۳})^2} = ۰٫۸۵۸ eV$$

www.ir-micro.com

ادامه

پیوند pn در حالت تعادل:

(محاسبه با رفتار فضایی)



بار در ناحیه تهی‌سازی $Q^+ = qA x_{n_0} N_D$

سطح مقطع پیوند

$W = x_{n_0} + x_{p_0}$

چون مجموع بار در ناحیه تهی‌سازی خنثی بودن بار است $Q^+ = |Q^-|$

$Q^- = -qA x_{p_0} N_A$

$qA x_{n_0} N_D = qA x_{p_0} N_A$

$$\textcircled{1} \quad \boxed{x_{n_0} N_D = x_{p_0} N_A}$$

$N_A = 10^2 N_D \leftarrow x_{n_0} = 10^2 x_{p_0}$

مثال) اگر $N_A \ll N_D \leftarrow x_{p_0} \gg x_{n_0}$

$\sigma = \frac{Q}{A}$ چگالی بار

$\sigma^+ = \frac{Q^+}{A x_{n_0}} = qN_D$

$\sigma^- = \frac{Q^-}{A x_{p_0}} = -qN_A$

$$\textcircled{2} \quad W = x_{n_0} + x_{p_0}$$

$x_{n_0} = W - x_{p_0} \Rightarrow x_{n_0} = W - \frac{N_D}{N_A} x_{n_0}$

$x_{n_0}\left(1 + \frac{N_D}{N_A}\right) = W \Rightarrow x_{n_0} = \frac{W N_A}{N_A + N_D}$

②و① $\Rightarrow$

$$x_{n_0} = \frac{W N_A}{N_A + N_D}$$

$$x_{p_0} = \frac{W N_D}{N_A + N_D}$$

پیشروی ناحیه انتقال در هر بیشت

— میدان الکتریکی در حوالی پیوند:

کاهش تابش

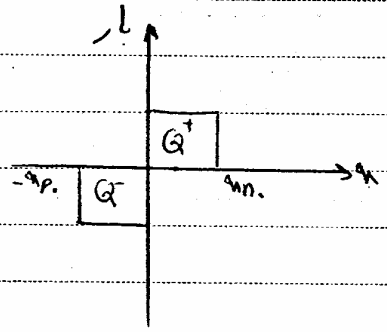
$$\frac{dE(x)}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon}$$

ε (اپسیلون) ضریب گذردهی الکتریکی

www.ir-micro.com

$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$ ضریب دی الکتریک خلا — سی

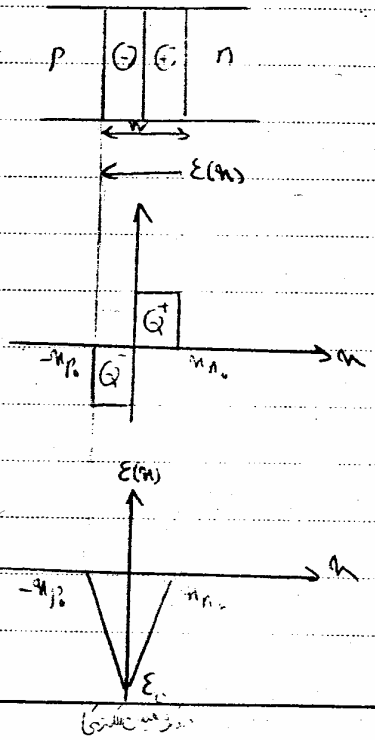
ρ چگالی حجمی بار $= \frac{Q}{\text{حجم}}$

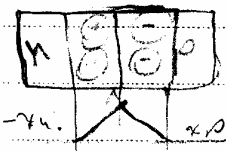


$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{-qN_A}{\varepsilon} \Rightarrow \int_0^{\varepsilon} d\varepsilon = \frac{-qN_A}{\varepsilon}\int_{-x_{p0}}^{x} dx \Rightarrow \varepsilon(x) = \frac{-qN_A}{\varepsilon}(x + x_{p0}) \quad ; \quad -x_{p0} < x < 0$$

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = \frac{qN_D}{\varepsilon} \Rightarrow \int_0^{\varepsilon} d\varepsilon = \frac{qN_D}{\varepsilon}\int_{x_{n0}}^{x} dx \Rightarrow \varepsilon(x) = \frac{qN_D}{\varepsilon}(x - x_{n0}) \quad ; \quad 0 < x < x_{n0}$$

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





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

www.ir-micro.com

$$\mathcal{E}(x=0) = \mathcal{E}_0 = \frac{-qN_A x_{p_0}}{\varepsilon}$$
$$\mathcal{E}(x=0) = \mathcal{E}_0 = \frac{-qN_D x_{n_0}}{\varepsilon}$$

برابر

حداکثر شدت میدان الکتریکی بوده

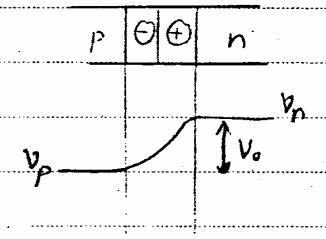
در حالت تعادل

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 $\mathcal{E}(x)$ همواره غیرخطی و درجه ۲ (x^2)ی باشد



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

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

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

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

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

$-\mathcal{E}_0$ — W

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

رابطه میدان و پتانسیل

www.ir-micro.com

رابطه W با V_0:

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

$$V_0 = + \frac{q N_D x_{n_0}}{2\epsilon} W$$
$$x_{n_0} = \frac{W N_A}{N_A + N_D}$$ داشتیم

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

رابطه عرض ناحیه تهی‌ی و W با تراکم ناخالصی‌ها و V_0

روش حل: $V_0 \leftarrow W \leftarrow x_{n_0} \leftarrow x_{p_0} \leftarrow \rho$ و ϵ

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

V_0
x_{n_0} و رسم $\rho(x)$ و $E(x)$
x_{p_0}
C_j
ε_0

$N_A = 4 \times 10^{18} \, cm^{-3}$
$N_D = 10^{16} \, cm^{-3}$
$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \, F/cm$
$\varepsilon_r = 11.8$
$\frac{kT}{q} = 0.259 \, V$
$n_i = 1.5 \times 10^{10} \, cm^{-3}$
شعاع $r = 2.54 \times 10^{-2} \, cm$

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

$$V_0 = 0.78 \, V$$

$$W = \left[\frac{2\epsilon V_0}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{2\epsilon_0 \epsilon_r \times 0.78}{1.6 \times 10^{-19}} \left(\frac{1}{4 \times 10^{18}} + \frac{1}{10^{16}} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$W = 3.34 \times 10^{-5} \, cm = 0.334 \, \mu m$$

$$x_{n_0} = \frac{W N_A}{N_A + N_D} = \frac{0.334 \times 10^{-4} \times 4 \times 10^{18}}{4 \times 10^{18} + 10^{16}} \Rightarrow x_{n_0} = 0.3328 \, \mu m$$

N_D و N_A است پس
انتظار داریم x_{n_0} به W نزدیک شود

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

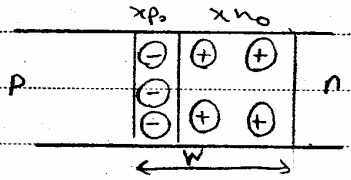
عدد کوچک است چون تراکم ناخالصی آن ۴۰۰ برابر بیشتر از N_D است

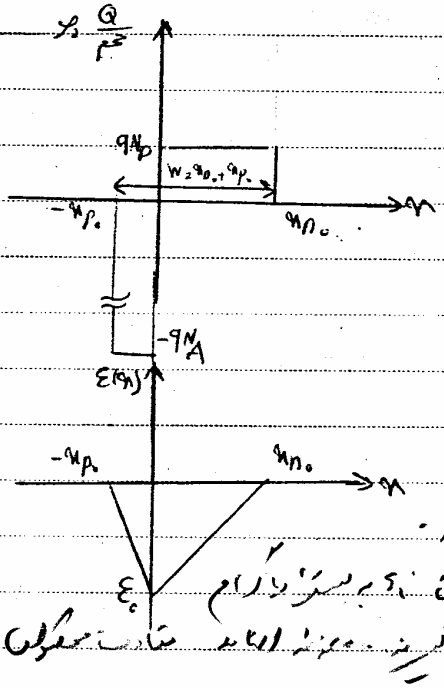
www.ir-micro.com

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

$$Q^+ = qAN_{n_0}N_D = 1/6\times10^{-19} \times 2/10 \times 10^{-3} \times 3/33\times10^{-5} \times 10^{16} = 1/08\times10^{-10}\ C$$

$$\mathcal{E}_0 = \frac{-2V_0}{W} = \frac{-qN_D N_{n_0}}{\epsilon} = -5/1\times10^{4}\ \frac{V}{cm}$$





تبدیل ۱ در ترانزیستور Si ناخالصی دهنده، منتز 10^{17} اضافه کرده.

الف) مقاومت حفره‌ها بیشتر، زیرا تعداد حفره‌ها کمتر است.

ب) اگر بتوان 10^{18} ناخالصی گیرنده اضافه کرد مقاومت همگون

$n_i = 1.5\times10^{10}$

$KT =$ 0.0259 eV

الف) $N_A = 10^{13}$

$N_D = 3\times10^{13}$ ب) $N_A = 2.9\times10^{15}$