بسمه تعالی

جزوه

فیزیک الکترونیک

دانشگاه

صنعتی امیر کبیر

استاد

دکتر غفوری فرد

درجه خلوص: عناصری که برای ساخت نیمه‌هادی به کار برده می‌شوند باید از درجهٔ خلوص بالایی برخوردار باشند، که حداقل آن 10^{-9} است. یعنی به ازای هر 10^{9} اتم فقط یک اتم ناخالصی می‌تواند باشد. به فرض اگر برای هر $1\,cm^3$ از جسم 10^{23} اتم داشته باشیم، مقدار ناخالصی 10^{13} می‌تواند باشد.

از طرفی با اضافه کردن ناخالصی عمدی نیز می‌توان ضریب هدایت نیمه‌هادی را تغییر داد. حد این نوع ناخالصی بین 10^{-3} و 10^{-8} است. یعنی به هر cm^3 از جسم می‌توانیم بین 10^{14} تا 10^{19} ناخالصی اضافه کنیم و بیشتر از آن باعث تبهگن degenerate شدن جسم می‌شود.

ساختار اتمی اجسام:

۱- بی‌شکل (آمورفز) که در این حالت اتمها کاملاً نامنظم قرار گرفته‌اند. مانند شیشه

۲- کریستالی یا بلوری که در این حالت اتمها کاملاً منظم قرار گرفته‌اند.
(تک بلوری)

۳- چند بلوری در این حالت اتمها در تمام طول جسم دارای نظم یکسان نیستند ولی در قسمتهای مختلف جسم از نظم خاصی برخوردارند.

آنچه که برای ساخت نیمه هادی ها به کار می رود جسم کریستالی است.

سلول واحد unit cell : به یک بخش از بلور که از حرکت آن کل بلور تشکیل می‌شود سلول واحد گفته می‌شود. مانند آجرهای یک دیوار. سلول واحد الزاماً کوچکترین واحد سازندهٔ بلور نیست. یک بلور می‌تواند چند نوع سلول واحد داشته باشد، امّا باید ساده‌ترین آن را انتخاب کرد.

یک نوع سلول واحد سلول مکعبی ساده (Simple Cube) s.c. است که در شکل زیر نشان داده شده است:

اگر با چنین سلولی یک بلور بسازیم برای هر سلول فقط یک اتم اختصاص پیدا می‌کند.

نوع دیگر سلول واحد، مکعبی بدنه دار است. (body cente cubic) b.c.c.

نوع سوم مکعبی با وجوه اتم دار (Face centered cubic) F.c.c. است. در این سلول علاوه بر رئوس، در هر وجه مکعب نیز یک اتم قرار دارد. لذا اگر با چنین سلولی بلور بسازیم برای هر سلول فقط ۴ اتم اختصاص می‌یابد.

اگر اتمهای یک F.c.c. را در جهت یک قطر اصلی مکعب به اندازهٔ $\frac{1}{4}$ قطر لغزش بدهیم نوع چهارم سلول واحد تشکیل می‌شود که به آن شبکهٔ الماسی Diamond گفته می‌شود.

ساخت بلور با شبکهٔ الماسی باعث می‌شود که به هر سلول ۸ اتم اختصاص یابد.

اگر دو سلول F.c.c از جنس های Ga و As در کنار هم قرار گیرند سلول نوع پنجم

بوجود می آید که به آن مخلوط روی Zinc blende گفته می شود.

نیروهای وارد شونده به یک اتم در یک سلول:

برای بررسی چنین نیروهایی باید ابتدا تعداد اتمهای مجاور را در یک سلول بدانیم.

اتمهای مجاور نزدیکترین اتمها به اتم مورد نظر ما هستند. در سلول مکعبی ساده

هر اتم دارای ۶ اتم مجاور است. در سلول مکعبی بدنه دار اتمهای مجاور ۸ تا

با فاصلهٔ $\frac{a\sqrt{3}}{2}$ هستند و در F.c.c اتمهای مجاور ۱۲ تا با فاصله $\frac{a\sqrt{2}}{2}$ هستند.

در شبکه الماسی تعداد اتمهای مجاور ۴ تا با فاصلهٔ $\frac{a\sqrt{3}}{4}$ هستند.

از نظر سطحی نیز می توان دانسیتهٔ شبکه های مختلف را با هم مقایسه کرد:

به عنوان مثال برای یک F.c.c برای یک وجه آن به مساحت a^2، دو اتم اختصاص

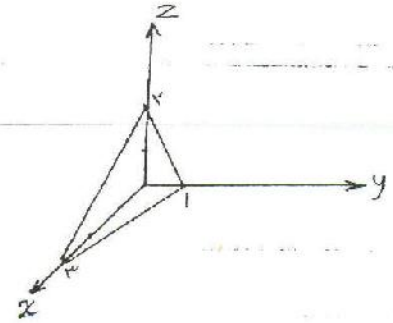
می یابد. ($\frac{2}{a^2}$ #/cm۲). در مورد s.c. این عدد ($\frac{1}{a^2}$ #/cm۳) است. در F.c.c اگر

صفحهٔ قطر را در نظر بگیریم فقط شامل یک اتم است و مساحت آن $a^2\sqrt{2}$ است. لذا

$\frac{1}{a^2\sqrt{2}}$ #/cm۲ تعداد اتم آن در واحد سطح خواهد بود.

(۳ , ۱ , ۲)

$\frac{1}{3}$, $\frac{1}{1}$, $\frac{1}{2}$



به (۳, ۱, ۲) که صفحهٔ بالا را مشخص می‌کنند، اندیس میلر یا ضرایب میلر می‌گوییم. اگر یکی از ضرایب میلر منفی بود، علامت منفی روی آن می‌گذاریم. از خواص ضرایب میلر این است که یک صفحه را مشخص نمی‌کنند، بلکه تمام صفحات معادل هم را مشخص می‌کنند.

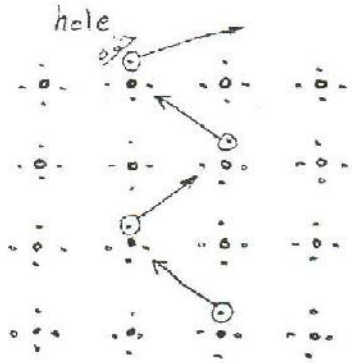
$\langle 0\ 0\ 1 \rangle$ تمام جهات معادل ، $[0\ 0\ 1]$ یک خط عمود بر صفحه ، $\{0\ 0\ 1\}$ تمام صفحات معادل ، $(0\ 0\ 1)$ یک صفحه

تمرین: اگر اتمها را به صورت گلوله‌های توپر در نظر بگیریم بگویید در s.c ، bcc ، fcc ، Diam. و zinc blende چند درصد اتم خالی است. تعداد اتمهای مجاور را نیز مشخص کنید.

پایان فصل اول

فصل دوم:

تمام نیمه‌هادی‌ها در صفر درجهٔ کلوین، عایق هستند چون الکترونها هیچ انرژی برای آزاد شدن ندارند.



در هادی ها جریان بوسیلهٔ الکترون منتقل می شود. در نیمه هادی ها جریان از حرکت الکترون ها

و حفره ها بوجود می آید.

$$I_e + I_h$$

جریان الکترونی — جریان حفره ای

در این فصل فقط شرایط تعادل را بررسی می کنیم. یعنی میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی،

فشار و نیرو وجود ندارد و درجهٔ حرارت یکنواخت است و هیچ عاملی که با زمان تغییر بکند،

نداریم. نخست اتم Si را بررسی می کنیم.

$$Si : 10^{22} \ \#/cm^3$$

$$14e - 14p - 14n$$

برای راحتی کار در مرحلهٔ اول اتم هیدروژن را بررسی می کنیم:

(یادآوری) مدل اتمی رادرفورد برای این اشکالات بود: * طبق فرضیهٔ اولیهٔ اتم باید

پیوسته اما طبق آزمایشهایی گسستگی آن ثابت شد * نهایتاً الکترون روی هستهٔ می افتاد

و اتم از بین می رفت.

مدل اتمی بوهر

قانون اول: قوانین مکانیک کلاسیک

$$\vec{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r_{12}^2}\vec{a}_{R_{12}}$$

قانون دوم:

$$|\vec{L}| = |\vec{r}\times m\vec{v}| = n\frac{h}{2\pi} \quad \text{یا} \quad mvr = n\hbar$$

قانون سوم: روی این مدارها الکترون تشعشع نمی کند.

$$\nu = \frac{E_f - E_i}{h}$$

با توجه به قوانین بالا شعاع اتم را بدست آورید.

$$F_e = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} = \overbrace{\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}}^{F_e} = \overbrace{\frac{mv^2}{r}}^{F_m} \quad , \quad v = \frac{n\hbar}{mr}$$

$$\longrightarrow \frac{m}{r}\cdot\left(\frac{n\hbar}{mr}\right)^2 = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \longrightarrow \boxed{r = \frac{n^2 h^2 \varepsilon_0}{\pi Z e^2 m} = \frac{4\pi\varepsilon_0 \hbar^2 n^2}{mZe^2}}$$

$$\longrightarrow \boxed{v = \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 \hbar}\cdot\frac{1}{n}}$$

برای اتم هیدروژن : $Z=1, \quad e = 1.6\times10^{-19} \quad , \quad n=1$

$\longrightarrow \quad r = 0.53\ A^\circ = 0.53\times10^{-10}\ m$ شعاع اولین تراز اتمی

$, \quad v = 2.2\times10^{8}\ cm$

سرعت فوق از سرعت نور است و لذا نیازی به در نظر گرفتن فرضیه نسبیت نداریم.

حال انرژی یک الکترون بر روی یک مدار را محاسبه می‌کنیم.

$$T.E. = \overset{K.E.}{\text{انرژی جنبشی}} + \overset{P.E.}{\text{انرژی پتانسیل}}$$

$$\overset{K.E.}{\text{انرژی جنبشی}} = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\cdot\frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

$$P.E. = \int_{\infty}^{r} F\,dr = \int_{-\infty}^{r} \frac{Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\,dr = \frac{-Ze^2}{4\pi\varepsilon_0 r}$$

$$\longrightarrow T.E. = -\frac{Ze^2}{2(4\pi\varepsilon_0 r)}$$

یعنی انرژی کل منفی است.

$$\longrightarrow T.E. = -\frac{Ze^2}{2(4\pi\varepsilon_0)} \cdot \frac{mZe^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

$$\longrightarrow \boxed{T.E._n = \frac{-mZ^2e^4}{2(4\pi\varepsilon_0\hbar)^2} \cdot \frac{1}{n^2}}$$

رابطهٔ بالا کوانتیزه بودن انرژی را نشان می‌دهد.

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h} \quad , \quad R_\infty \equiv \frac{me^4}{4(4\pi\varepsilon_0)^2\hbar^3}$$

$$\longrightarrow \cancel{T.E. = R_\infty Z^2 \cdot \frac{1}{n^2}} \longrightarrow \nu = R_\infty Z^2\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

$$\longrightarrow \cancel{\frac{R_\infty}{h} \overset{?}{=} \frac{me^4}{2(4\pi\varepsilon_0)^2 h^2 (2\pi\hbar)}}$$

$$\nu = \frac{E}{h} = \frac{mZ^2e^4}{2(4\pi\varepsilon_0)^2\hbar^2 h} \cdot \frac{1}{n^2} = \frac{mZ^2e^4}{4\pi(4\pi\varepsilon_0)^2\hbar^3} \cdot \frac{1}{n^2}$$

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{mZ^2e^4}{4\pi(4\pi\varepsilon_0)^2\hbar^3}\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

ν فرکانس تشعشع است که اگر الکترون از تراز n_i به n_f برود از خود تشعشع می‌کند.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad , \quad K \equiv \frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$$

K: عدد موج

$$K = Z^2 R_\infty\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \quad , \quad R_\infty \equiv \frac{me^4}{4\pi(4\pi\varepsilon_0)^2\hbar^3 c}$$

برای اتم هیدروژن $Z=1$ است در نتیجه:

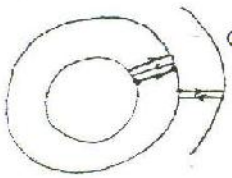
$$K = R_\infty\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

اگر اتم بخواهد یونیزه شود باید n_i بینهایت باشد.

$$\longrightarrow \quad K = R_\infty \cdot \frac{Z}{n^2} \quad , \quad E_n = \frac{13.6}{n^2} \quad (e.v.)$$

$$\frac{P_{n=2}}{P_{n=1}} = \frac{e^{-E_{n=2}/kT}}{e^{-E_{n=1}/kT}} \quad , \quad K = 1.38 \times 10^{-5} \quad J/e.v.\,K$$

رابطه بالا شدت خطوط یا تعداد آنها را نشان می‌دهد. هر خط نشان دهندهٔ یک انتقال



از یک تراز به تراز دیگر است.

محاسبهٔ مرکز ثقل سیستم مقابل:

$$\longrightarrow \quad Mx = m(l-x) \quad \longrightarrow \quad x = \frac{m}{M+m} l \quad , \quad l-x = \frac{M}{M+m} l$$

$$mvr = n\frac{h}{2\pi}$$ قانون اول بوهر:

$$v = r\omega$$

$$\longrightarrow \quad l = m(l-x)^2\omega$$ الکترون ، $$L = Mx^2\omega$$ هسته

$$\longrightarrow \quad L_T = m(l-x)^2\omega + Mx^2\omega = n\frac{h}{2\pi}$$

$$\longrightarrow \quad L_T = m \cdot \frac{M^2 l^2}{(m+M)^2}\omega + \frac{Mm^2 l^2}{(M+m)^2}\omega = \frac{mM(m+M)}{(m+M)^2} l^2\omega$$

$$\longrightarrow \quad L_T = \frac{mM}{(m+M)} l^2\omega \quad \longrightarrow \quad L_T = \frac{m}{1+\frac{m}{M}} l^2\omega$$

در مقایسه با $L = ml^2\omega$ در می‌یابیم که: $m \longrightarrow \frac{m}{1+\frac{m}{M}}$ reduced mass جرم کاهش یافته

$$\frac{m}{M} \longrightarrow 0$$

در اتم هیدروژن که $\frac{m}{M} = \frac{1}{2000}$ است فرض بالا قابل قبول است.

مشکلات مدل اتمی بوهر :

۱- بوهر هیچ توجیه فیزیکی برای فرضیاتش نداشت.

۲- بوهر فرض کرده بود که الکترونی که در یک تراز ثابت می‌چرخد تشعشع نمی‌کند.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0$$

$$\frac{1}{r^2}\cdot\frac{\partial}{\partial r}\left(r^2\cdot\frac{\partial V}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2 \sin\theta}\cdot\frac{\partial}{\partial \theta}\left(\sin\theta\cdot\frac{\partial V}{\partial \theta}\right) = 0$$

برای حل :

$$V = R(r)\cdot P(\theta)$$

$$\longrightarrow \frac{1}{\sin^2\theta}\cdot\frac{\partial^2 P}{\partial \theta^2} + P(\theta) = \alpha^2$$

برای حل باید، n عدد کوانتوم اصلی و l عدد کوانتوم زاویه‌ای را باید داشته باشیم.

$n = 1, 2, \ldots$ $\quad$ $l = 0, 1, 2, \ldots, n-1$

اصل طرد پائولی : این اصل بیان می‌کند که هیچ دو الکترونی نمی‌توانند دارای n و l و m و s یکسان باشند. به عنوان مثال :

در مدار اول : $n = 1$, $l = 0$, $m = 0$, $s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

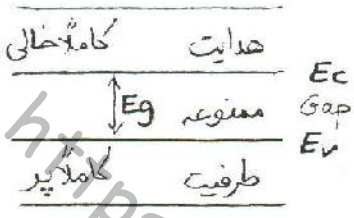
در مدار دوم : $n = 2$, $l = 0$, $m = 0$, $s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$ یا $l = 1$

$m \to -1 \longrightarrow s = +\frac{1}{2}, s = -\frac{1}{2}$

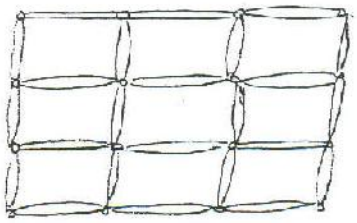
$m \to 0 \longrightarrow s = +\frac{1}{2}, s = -\frac{1}{2}$

$m \to 1 \longrightarrow s = +\frac{1}{2}, s = -\frac{1}{2}$

بنابراین مدار دوم از دو لایه تشکیل شده است که در مجموع حامل ۸ الکترون خواهد بود.



الگوی انرژی در $0^\circ K$



الگوی پیوندی در $0^\circ K$

E_c: Conduction Energy $\qquad$ E_v: valance Energy

در فلزات $E_G = 0$ ، در الماس $E_G = 5\ e.v.$ ، در SiO_2 $E_G = 8\ e.v.$ ،

در Si $E_G = 1.12\ e.v.$ و در Ge $E_G = 0.67\ e.v.$ است.

با افزایش درجهٔ حرارت الکترونها می‌توانند از باند ظرفیت جدا شده و به باند هدایت بروند.

الکترونهایی که در باند هدایت قرار می‌گیرند حاملها یا ناقلهای الکتریسیته هستند.

در هادی ها ناقل ها فقط الکترون هستند ولی در نیمه هادی ها ناقل ها الکترون ها و حفره ها

هستند.

انرژی E $\qquad$ میدان الکتریکی $\vec{\mathcal{E}}$

$\vec{F} = -e\vec{\mathcal{E}}$ ، $\vec{F} = m\vec{a}$

الکترون آزاد $\qquad$ الکترون آزاد

$\longrightarrow \vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{-e\vec{\mathcal{E}}}{m} \longrightarrow \vec{v} = -\frac{et}{m}\vec{\mathcal{E}}$

در بررسی حرکت الکترون اگر به جای m از m_e^* که جرم مؤثر آن است قرار دهیم تمام

نیروهای وارده به الکترون را نیز در بر دارد.

$m = 9.11 \times 10^{-28}\ gr$

ماده	m_n^*/m	m_e^*/m
Si	۱٫۱	۰٫۵۹
Ge	۰٫۵۵	۰٫۳۷
Ga/As	۰٫۶۸	۰٫۵۴

نیمه‌هادی ذاتی (intrinsic semiconductor)

نیمه‌هادی ذاتی یعنی نیمه‌هادیی که کاملاً خالص است و هیچ ناخالصی به آن اضافه نشده است. لذا در صفر درجهٔ کلوین در چنین نیمه‌هادیی:

$$n = p = 0$$

(تعداد الکترون آزاد — تعداد حفره)

در صورت افزایش دما الکترون از باند ظرفیت به هدایت می‌رود. در این حالت نیز در نیمه‌هادی ذاتی $n_i = p_i$ است. در اتم Si در درجهٔ حرارت اتاق (۳۰۰°K):

$$n_i = p_i = 10^{10} \ \#/cm^3$$

اگر این عدد را با تعداد کل الکترونهای موجود در چنین اتمی مقایسه کنیم:

$$5\times10^{22} \ \text{اتم}/cm^3 \longrightarrow 4\times5\times10^{22} = \underline{\underline{2\times10^{23}}} \ elec/cm^3$$

پس از مقایسه به عدد 10^{-13} خواهیم رسید.

در فلزات تعداد الکترونهای آزاد برابر تعداد کل اتمها در یک cm^3 از فلز است.

برای افزایش ضریب هدایت باید ناخالصی اضافه کنیم. حداکثر ناخالصی ناخواسته که می‌توانیم اضافه کنیم $10^{+13} \ \#/cm^3$ است. (تعداد الکترون)

$$10^{-9}\times10^{22} = 10^{13} \ \#/cm^3$$

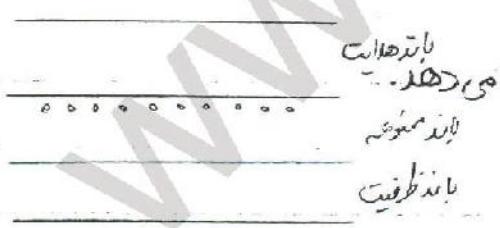
حداقل اتم ناخالصی که به طور عمدی اضافه می‌شود 10^{14} #/cm³ (تعداد اتم) و حداکثر آن 10^{18} - 10^{19} #/cm³ است.

اگر ناخالصی که اضافه می‌کنیم از عناصر ستون پنجم باشد آن‌گاه تعداد n_i را از P_i بیشتر کرده‌ایم و اگر از ستون سوم اضافه کنیم تعداد P_i را از n_i بیشتر کرده‌ایم. به ازای هر اتم ستون پنجم که اضافه می‌کنیم یک سطح انرژی در باند ممنوعه نزدیک به سطح هدایت ایجاد می‌شود که الکترون به راحتی از آن به باند هدایت می‌رود. به همین ترتیب به ازای هر اتم ستون سوم که اضافه می‌کنیم یک سطح انرژی در باند ممنوعه نزدیک به سطح ظرفیت ایجاد می‌شود که حفره به راحتی از آن به باند ظرفیت می‌رود و لذا در هر حال هدایت افزایش پیدا می‌کند.

n , دهنده , doner ستون پنجم

P , گیرنده , acceptor ستون سوم

شکل زیر نیمه هادی نوع n در صفر کلوین را نشان می‌دهد.



برای آزاد شدن الکترون از تراز اول یک عنصر باید مقدار ۱۳٫۶ e.v به آن انرژی بدهیم به این انرژی، انرژی وابستگی (binding Energy) گفته می‌شود.

$$E_{(H)} = \frac{m^2 e^4}{2(4\pi\varepsilon_0)^2 \hbar^3}$$

هیدروژن

اگر بخواهیم مقدار این انرژی را برای یک نیمه‌هادی مثل Si حساب کنیم باید از رابطه

$$\frac{m_n^{*2} e^4}{2(4\pi\varepsilon_{R_{Si}})^2 \hbar^2}$$

زیر استفاده کنیم:

هستهٔ ثانویه: به هسته یک اتم به اضافهٔ تمام مدارهایی از آن که تکمیل شده‌اند هستهٔ ثانویه گفته می‌شود.

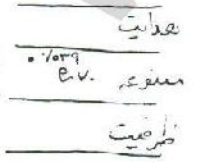
$$\frac{E_P}{E_H} = \frac{m_{n_P}^*}{m} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{R_P}^2} \longrightarrow E_P = (13.6)\times(1.1)\times\left(\frac{1}{11.8^2}\right) = \frac{1}{10}\ e.v.$$

فسفر

با مقایسه ۱/۱۰ با ۱۳/۶ مشاهده می‌کنیم که اتمهای فسفر به راحتی وارد باند هدایت می‌شوند.

بخشنده	E_B	پذیرنده	E_B
Sb	۰/۰۳۹	B	۰/۰۴۵
P	۰/۰۴۴	Al	۰/۰۵۷
As	۰/۰۴۹	Ga	۰/۰۶۵
		In	۰/۱۶

به عنوان مثال ۰/۰۳۹ برای Sb بیان می‌کند که با اضافه کردن Sb به عنوان ناخالصی به نیمه‌هادی سیلیکون یک الکترون در فاصلهٔ ۰/۰۳۹ e.v. از باند هدایت در باند ممنوعه ایجاد می‌گردد که کل فاصلهٔ باند ممنوعه ۱/۱۲ e.v. است.

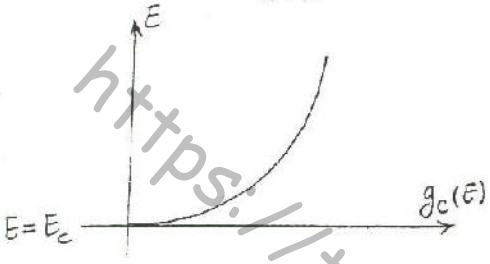


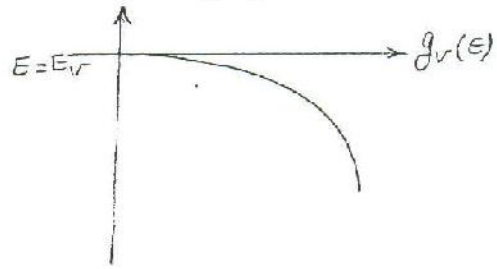
توزیع حاملهای n و p:

$$\underbrace{n(E)}_{\text{تعداد الکترونها}} = \underbrace{g_c(E)}_{\text{تعداد سطوح در واحد حجم در انرژی}} \cdot \underbrace{f(E)}_{\text{احتمال پر بودن این سطح انرژی}} \quad , \quad \underbrace{P(E)}_{\text{تعداد حفره‌ها}} = g_v(E) \cdot \underbrace{\left[1 - F(E)\right]}_{\text{احتمال خالی بودن سطح انرژی}}$$

واحد g_c ($\#/$ انرژی . حجم)

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





اگر $m_n^* = m_p^*$ باشد منحنی‌ها متقارن می‌شوند.

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

به E_F سطح انرژی فرمی، گویند. این سطح انرژی در باند ممنوعه قرار دارد. اگر $T = 0^\circ K$ باشد

آن‌گاه دو حالت بوجود می‌آید:

if $E > E_F$ $\quad f(E) = 0$

if $E < E_F$ $\quad f(E) = 1$

یعنی در صفر مطلق تمام سطوح بالاتر از سطح فرمی کاملاً خالی و تمام سطوح پایین‌تر از آن

کاملاً پر هستند. پس سطح فرمی در جایی مثل باند ممنوعه قرار دارد. در $T > 0^\circ K$ خواهیم

داشت:

if $\underbrace{E = E_F}_{\text{سطح فرمی}}$ $\quad f(E) = \frac{1}{2}$

یعنی سطح فرمی در تمام درجه‌های حرارت احتمال پر یا خالی بودن آن برابر هستند.

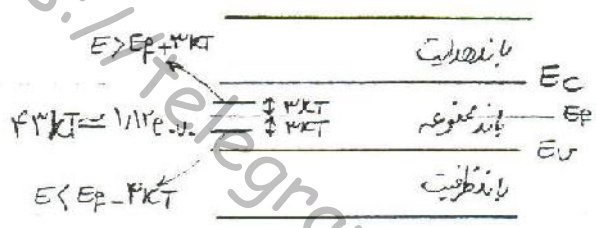
$k = 8.62 \times 10^{-5}$ e.v./K ,

در درجه حرارت اتاق: $300^\circ K$

$kT = 25.86 \times 10^{-3}$ e.v. $\cong 0.26$ e.v.

اگر $E - E_F \geq 3KT$ $\xrightarrow{\text{آن‌گاه}}$ $e^{\frac{E-E_F}{KT}} > e^{3}$

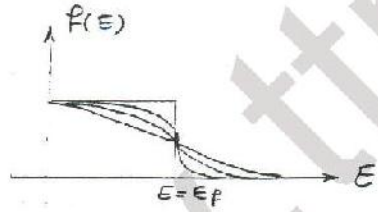
$$\longrightarrow f(E) = e^{-\frac{E-E_F}{KT}} = \exp\left(-\frac{E-E_F}{KT}\right)$$

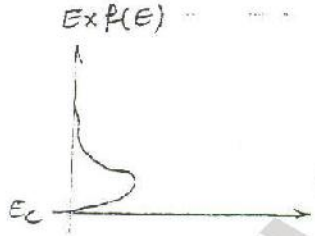


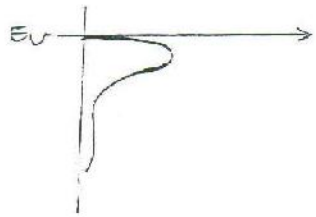
اگر $E - E_F < -3KT$ $\longrightarrow$ $f(E) = 1 - \exp\left(\frac{E-E_F}{KT}\right)$

$\frac{1}{1+x} \cong 1 - x$

احتمال وجود حفره در باند ظرفیت $1 - f(E) \cong \exp\left(\frac{E-E_F}{KT}\right)$







نیمه‌های تبهگن degenerate : در نیمه‌هادی نوع n ، تبهگن به نیمه‌هادیی گفته می‌شود که در

آن : $E_C - E_F \leq 3KT$ و در نوع p : $E_F - E_V \leq 3KT$

با توجه به فاصلهٔ E_F از مرکز باند ممنوعه می‌توان پی به مقدار ناخالصی نیمه‌هادی برد.

به طوری که هرچه از مرکز باند ممنوعه دور می‌شویم مقدار ناخالصی افزایش می‌یابد.

$$n=\int_{E=E_C}^{E} g_C(E)\, f(E)\, dE \quad , \quad P=\int_{E}^{E_V} g_V(E)\,[1-f(E)]\, dE$$

اگر تعداد کل حفره ها را بخواهیم باید در انتگرال P ، E را صفر قرار دهیم و اگر تعداد کل

الکترون ها را بخواهیم در انتگرال n ، E را ∞ قرار می دهیم.

احتمال وجود الکترون در باند هدایت

احتمال وجود حفره در باند ظرفیت

یادآوری:

$$f(E)=\frac{1}{1+e^{\frac{E-E_F}{KT}}} \quad , \quad 1-f(E)=\frac{1}{1+e^{-\left(\frac{E-E_F}{KT}\right)}}$$

$$n=\int_{E_C}^{\infty}\frac{m_n^*\sqrt{2m_n^*(E-E_C)}}{\pi^2\hbar^3}\cdot\frac{1}{1+e^{\frac{E-E_F}{KT}}}\,dE=\frac{m_n^*\sqrt{2m_n^*}}{\pi^2\hbar^3}\int_{E_C}^{\infty}\frac{\sqrt{E-E_C}}{1+e^{\frac{E-E_F}{KT}}}\,dE$$

$$x\equiv\frac{E-E_C}{KT} \quad , \quad dE=KT\,dx \quad , \quad x_F\equiv\frac{E_F-E_C}{KT}$$

$$\longrightarrow n=\frac{m_n^*\sqrt{2m_n^*}}{\pi^2\hbar^3}\cdot(KT)^{3/2}\cdot\int_0^{\infty}\frac{x^{1/2}\,dx}{1+e^{x-x_F}} \quad , \quad \Gamma_{1/2}(x_F)\equiv\int_0^{\infty}\frac{x^{1/2}\,dx}{1+e^{x-x_F}}=\frac{\sqrt{\pi}}{2}e^{x_F}$$

تابع گاما

$$\longrightarrow n=\frac{m_n^*\sqrt{2m_n^*}}{\pi^2\hbar^3}\cdot(KT)^{3/2}\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}\cdot e^{\frac{E_F-E_C}{KT}}$$

$$\frac{m_n^*\sqrt{2m_n^*}}{\pi^2\hbar^3}(KT)^{3/2}$$

$$N_C\equiv 2\left[\frac{2\pi m_n^* KT}{h^2}\right]^{3/2}$$ چگالی موثر حالات در باند هدایت

$$2\left[\frac{2\pi m_n^* KT}{4\pi^2\hbar^2}\right]^{3/2}=\frac{(m_n^* KT)^{3/2}}{\sqrt{2}\,\pi\sqrt{\pi}\,\hbar^3}=\frac{(m_n^* KT)^{3/2}}{\pi^2\hbar^3}\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}}=\frac{m_n^*\sqrt{2m_n^*}\,(KT)^{3/2}}{\pi^2\hbar^3}\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

$$=\left[\frac{m_n^* KT}{2\pi\hbar^2}\right]^{3/2}\cdot\frac{2}{\sqrt{\pi}}$$

$$\longrightarrow n=\frac{2}{\sqrt{\pi}}N_C\cdot\Gamma_{\frac{1}{2}}(x_F)=\frac{2}{\sqrt{\pi}}\cdot\frac{\sqrt{\pi}}{2}N_C\cdot e^{\frac{E-E_F}{KT}}$$

N_C, N_V, E_C, E_V, E_F

$\longrightarrow n = N_C e^{\frac{E_F - E_C}{KT}}$ n و P در این حالت دارای دو عدد ثابت و سه سطح انرژی هستند.

به عنوان تمرین رابطهٔ مقابل را بدست آورید : $P = N_V e^{\frac{E_V - E_F}{KT}}$

در مورد نیمه هادی ذاتی :

$$n_i = N_C . e^{\frac{E_i - E_C}{KT}} \quad , \quad P_i = N_V . e^{\frac{E_V - E_i}{KT}}$$

$$\longrightarrow N_C . e^{-\frac{E_C}{KT}} = n_i . e^{-\frac{E_i}{KT}} \quad , \quad N_V . e^{\frac{E_V}{KT}} = n_i e^{\frac{E_i}{KT}}$$

$$\longrightarrow n = N_C . e^{\frac{E_F}{KT}} . e^{-\frac{E_C}{KT}} = e^{\frac{E_F}{KT}} . n_i . e^{-\frac{E_i}{KT}}$$

$$P = N_V . e^{\frac{E_V}{KT}} . e^{-\frac{E_F}{KT}} = e^{\frac{E_i}{KT}} . n_i . e^{-\frac{E_F}{KT}}$$

$$\longrightarrow n = n_i . e^{\frac{E_F - E_i}{KT}} \quad , \quad P = n_i . e^{\frac{E_i - E_F}{KT}}$$

در اینجا n و P یک عدد ثابت و دو سطح انرژی دارند.

$$\longrightarrow n . P = n_i^2$$

برای نیمه هادی سیلیکن : $n = P = n_i = 10^{10}$

اگر N_D حداقل اتم ناخالصی اضافه شده باشد : $N_D = 10^{14} \ \#/cm^3$

$$np = 10^{20} \quad , \quad n = 10^{14} \quad , \quad p = 10^{6}$$

خنثی بودن نیمه‌هادی :

N_D : number of donner $\qquad$ N_A : number of acceptor

کل بار نیمه هادی $Q = -nq + pq + \overset{+}{N_D}\cdot q - \overset{-}{N_A}\cdot q = 0$

n: تعداد الکترون ها ، p: تعداد حفره ها ، N_D: تعداد اتمهای بخشنده یونیزه شده ، N_A: تعداد اتمهای گیرنده یونیزه شده

$$\longrightarrow \quad P - n + N_D - N_A = 0$$

۱- نیمه هادی ذاتی :

$N_D = N_A = 0$

$$P - n = 0 \longrightarrow P = n$$

$$np = n^2 = n_i^2 \longrightarrow n = p = n_i$$

۲- نیمه هادی نوع n :

$N_D \gg N_A$

$$\longrightarrow P - n + N_D = 0 \longrightarrow \frac{n_i^2}{n} - n + N_D = 0$$

$$\longrightarrow n_i^2 - n^2 + n.N_D = 0 \longrightarrow n^2 - N_D.n + n_i^2 = 0$$

$$\longrightarrow n = \frac{N_D \pm \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}{2} \longrightarrow n = \frac{N_D}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}$$

$$, \quad P = \frac{n_i^2}{n} \longrightarrow P = \frac{2n_i^2}{N_D + \sqrt{N_D^2 + 4n_i^2}}$$

, $n_i = 10^{10}$ #/cm³ در سیلیکن

, $N_D = 10^{14}$ #/cm³

$$\longrightarrow \boxed{n \cong \frac{N_D + N_D}{2} = N_D} \quad , \quad \boxed{P = \frac{n_i^2}{N_D}}$$

۳- نیمه هادی نوع P : $N_A \gg N_D$

$$\longrightarrow P - n - N_A = 0 \longrightarrow P - \frac{n_i^2}{P} - N_A = 0$$

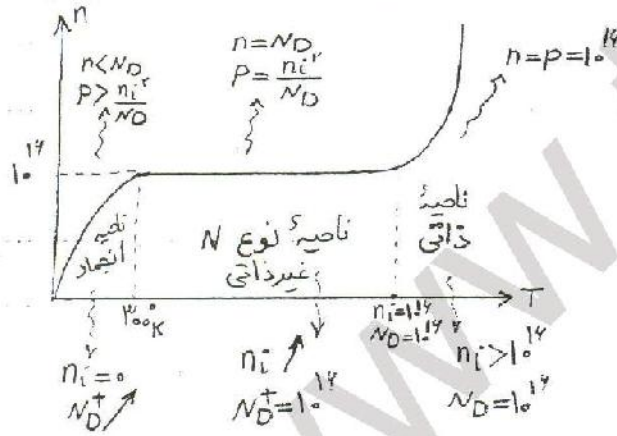
$$\longrightarrow P^2 - N_A \cdot P - n_i^2 = 0 \longrightarrow P = \frac{N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}{2}$$

$$, \quad n = \frac{2n_i^2}{N_A + \sqrt{N_A^2 + 4n_i^2}}$$

$$P = \frac{N_A + N_A}{2} = N_A \quad , \quad n = \frac{n_i^2}{N_A}$$

به طور کلی در یک نیمه هادی n_i به شدت از دما تبعیت می کند و با افزایش دما زیاد می شود.

در درجهٔ حرارت بالا تمام نیمه هادی ها به نیمه هادی ذاتی تبدیل می شوند. نمودار زیر مربوط به یک نیمه هادی نوع n با $N_D = 10^{16}$ است :



یادآوری :

$$n_i = N_C e^{\frac{E_i - E_C}{KT}} \quad , \quad P_i = N_V \cdot e^{\frac{E_V - E_i}{KT}}$$

$$N_C = 2\left[\frac{2m_n^* KT}{h^2}\right]^{3/2} \quad , \quad N_V = 2\left[\frac{2m_p^* KT}{h^2}\right]^{3/2}$$

$$n_i P_i = n_i^2 = N_C N_V \cdot e^{\frac{E_V - E_C}{KT}}$$

$$\longrightarrow \boxed{n_i = \sqrt{N_C N_V} \cdot e^{-\frac{E_G}{2KT}}}$$

۱- نیمه هادی ذاتی :

$$n_i = N_C \cdot e^{\frac{E_i - E_C}{KT}} = P_i = N_V \cdot e^{\frac{E_V - E_i}{KT}}$$

$$N_C \cdot e^{\frac{E_i - E_C}{KT}} = N_V \cdot e^{\frac{E_V - E_i}{KT}}$$

$$\longrightarrow \frac{N_C}{N_V} = e^{\frac{E_V - E_i - E_i + E_C}{KT}}$$

$$\longrightarrow Ln \frac{N_C}{N_V} = \frac{E_V + E_C - 2E_i}{KT}$$

$$\longrightarrow E_i = \frac{1}{2}(E_C + E_V) - \frac{1}{2} KT \, Ln \frac{N_C}{N_V}$$

$$E_i = \frac{1}{2}(E_C + E_V) - \frac{1}{2} KT \cdot Ln \left(\frac{m_n^*}{m_p^*}\right)^{3/4}$$

$$E_i = \frac{1}{2}(E_C + E_V) - \frac{3}{4} KT \cdot Ln \left(\frac{m_n^*}{m_p^*}\right)$$

$$E_i = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{3}{4} KT \cdot Ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*}\right)$$

بیان کنندهٔ محل سطح فرمی

در نیمه هادی سیلیکن :

$$\frac{m_p^*}{m_n^*} = \frac{0.59}{1.1} = 0.54$$

$$\longrightarrow E_i = \frac{1}{2}(E_C + E_V) + \frac{3}{4} KT \, Ln \, 0.54 = \frac{1}{2}(E_C + E_V) - 0.012 \ eV$$

۲- نیمه هادی نوع n :

$$n = N_D$$

$$n = n_i \cdot e^{\frac{E_F - E_i}{KT}} \quad , \quad N_D = n_i^{\frac{E_F - E_i}{KT}}$$

$$\frac{N_D}{n_i} = e^{\frac{E_F - E_i}{KT}} \quad , \quad E_F - E_i = KT \cdot Ln \frac{N_D}{n_i}$$

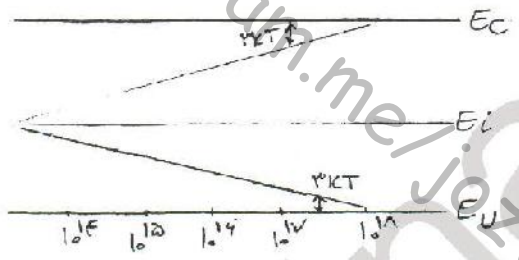
$$\longrightarrow \quad E_F = E_i + KT.Ln\frac{N_D}{n_i}$$

۳- ضیاه‌های نوع P :

$$P = N_A$$

$$P = N_A = n_i \cdot e^{\frac{E_i - E_F}{KT}}, \qquad \frac{N_A}{n_i} = e^{\frac{E_i - E_F}{KT}}$$

$$E_i - E_F = KT.Ln\frac{N_A}{n_i} \longrightarrow E_F = E_i - KT.Ln\frac{N_A}{n_i}$$



تمرین : مطلوب است مقدار ناخالصی دهنده های Ge , Si برای اینکه تبهگن بشوند.

فصل سوم : حرکت حامل‌ها

الف- حرکت نامنظم که در اثر درجهٔ حرارت بوجود می آید.

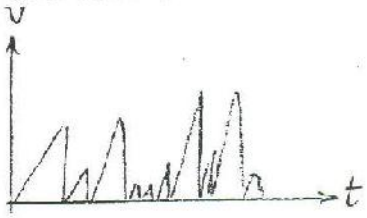
ب - حرکت منظم که در اثر عوامل زیر بوجود می آید : ۱- رانش ۲- نفوذ ۳- ترکیب و تولید

سرعت حرکت نامنظم حدود 3×10^{7} cm/sec و سرعت حرکت منظم حدود cm/sec است.

حرکت رانشی (drift velocity) در اثر وجود میدان الکتریکی است. حرکت نفوذی در اثر شیب یا گرادیان ذرات است. یعنی از محلی که تعداد الکترون بیشتر است به محل کمتر نفوذ می‌کند. ترکیب و تولید و ایجاد الکترون و حفره نیز نوع سوم حرکت منظم است.

$\vec{F} = -q\vec{\mathcal{E}}$, $\vec{F} = m\vec{a} = -q\vec{\mathcal{E}}$

$\vec{a} = \frac{-q}{m}\vec{\mathcal{E}}$, $\vec{v} = -\frac{q}{m}t\vec{\mathcal{E}}$



هر الکترون مجموعی از حرکت منظم و نامنظم دارد. در حرکت منظم الکترونها به صورت تصادفی به هم برخورد کرده و در هر برخورد کل انرژی خود را از دست می‌دهند (منحنی بالا)، اما نهایتاً برآیند حرکت‌ها در یک سمت است.

جریان :

طول استوانه : $v_d t$

حجم استوانه : $v_d A t$

تعداد بارها : $n v_d A t$

مقدار بارها : $q n v_d A t$

$I = \frac{Q}{t} = q n v_d A$, $|\vec{J}| = \frac{I}{A}$

$\longrightarrow J = q.n.v_d$, $\vec{v_d} = \mu_n . \vec{\mathcal{E}}$

$\vec{J}_{N_{drift}} = q.\mu_m . n\vec{\mathcal{E}}$, $\vec{J}_{P_{drift}} = q.\mu_p . P.\vec{\mathcal{E}}$

, $\vec{J}_{drift} = \vec{J}_{N_d} + \vec{J}_{N_p} = q(P.\mu_p + n\mu_n)\vec{\mathcal{E}}$

ناقلهای الکتریکی در هادی‌ها فقط الکترونها هستند : $\vec{J} = \delta\vec{\mathcal{E}} = q\mu_m n\vec{\mathcal{E}}$

در نیمه‌هادی‌ها ناقلها الکترون و حفره‌ها هستند که نهایتاً جهت جریانی در جهت میدان ایجاد می‌کنند. در نوع P بیشتر جریان به علت حفره‌ها و نوع n به علت الکترونها است.

① قابلیت تحرک. mobility : μ_n , μ_p

واحد mobility : $cm^2/volt.sec$

مقدار mobility به مقدار ناخالصی، درجهٔ حرارت و جنس نیمه‌هادی بستگی دارد.

② مقدار عددی:

به فرض برای نیمه‌هادی Si با : N_A یا N_D 10^{14} $\#/cm^3$

, $T = 300^\circ K$

$\mu_n = 1340$ $cm^2/V.sec$, $\mu_p = 490$ $cm^2/V.sec$

③ تعبیر فیزیکی: μ_p یا μ_n بالا نشان می‌دهد که امکان حرکت بیشتر و برخوردها کمتر است.

④ بستگی به غلظت ناخالصی:

با توجه به منحنی μ برحسب غلظت ناخالصی (شکل ۳-۵ کتاب) مشاهده می‌کنیم که در ناخالصی های کمتر برخوردها با شبکهٔ اتمهای متراکم صورت می‌گیرد و مکانیزم غالب این شبکه اتمها هستند امّا در ناخالصی های زیاد برخوردها با ناخالصی خواهند بود.

⑤ بستگی به دما: بستگی μ به دما در منحنی های شکل ۳-۶ کتاب آمده است و هرچه دما زیاد می‌شود μ کم می‌شود. در ناخالصی های پائین مکانیزم غالب شبکه اتمها هستند که هر

چه دما زیاد می‌شود اتمها متلاطم‌تر شده و برخوردها بیشتر می‌شوند. اما در ناخالصی زیاد که مکانیزم غالب برخورد با شبکه است با زیاد شدن دما برخوردها کمتر می‌شود.

در ناخالصی‌های متوسط چون از هر دو مکانیزم وجود دارد و یکی کم و دیگری زیاد می‌شود لذا منحنی

هدایت خواص دارای ماکزیمم خواهد بود.

$\vec{J} = \sigma \vec{E}$ ، $\sigma = q(\mu_n . n + \mu_p . P)$ ضریب هدایت یا هدایت ویژه

، $\rho = \frac{1}{q(\mu_n . n + \mu_p . P)}$ مقاومت ویژه

در نیمه‌هادی نوع n : $n \overset{\text{حداقل}}{=} 10^{14}$ ، $P \overset{\text{حداکثر}}{=} 10^{4}$

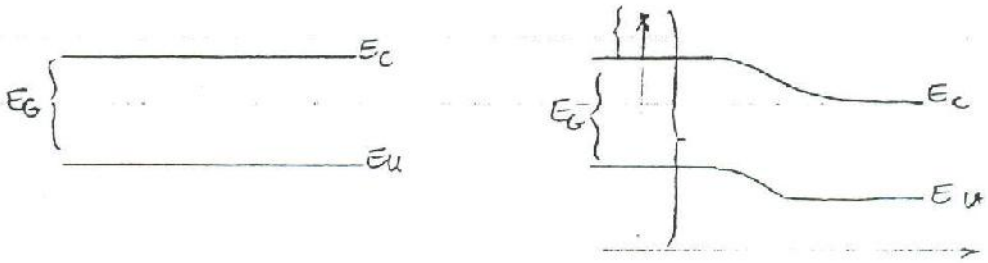
$$\longrightarrow \rho = \frac{1}{q . \mu_n . n} = \frac{1}{q . \mu_n . N_D}$$

و در نیمه‌هادی نوع P :

$$\rho = \frac{1}{q . \mu_p . P} = \frac{1}{q . \mu_p . N_A}$$

انرژی پتانسیل الکترون $P.E. = -q.V$ یا $P.E. = E_{ref} - q.V$

در منحنی E_c و E_v همواره فاصله E_c و E_v ثابت است. (E_G ثابت)



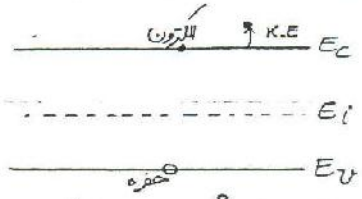
$$\longrightarrow P.E. = E_c - E_{ref} \longrightarrow -q.V = E_c - E_{ref}$$

$$P.E. = E - q.V$$

$$\longrightarrow V = \frac{-1}{q}\left[E_c - E_{ref}\right]$$

$$\mathcal{E} = -\nabla V = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_c}{dx} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_v}{dx} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_i}{dx}$$

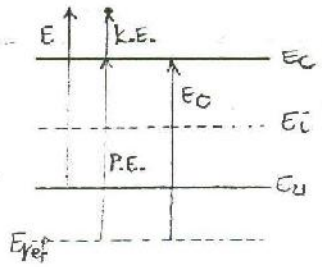
در شرایطی که میدان الکتریکی نداریم:



$$\frac{dE_v}{dx} = \frac{dE_c}{dx} = \frac{dE_i}{dx} = 0$$

حداقل انرژی لازم برای ایجاد یک زوج الکترون-حفره $E = E_G$ است. یعنی الکترون در این حالت دقیقاً از E_v جدا شده و به E_c می‌رود. انرژی جنبشی الکترون پس از جدا شدن صفر است.

اگر انرژی بیشتری بدهیم حفره پایین‌تر از E_v و الکترون بالاتر از E_c قرار می‌گیرد و دارای انرژی جنبشی نیز خواهد بود.



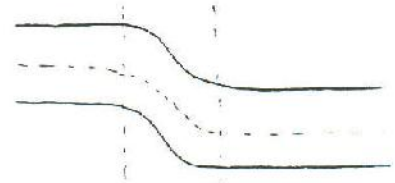
$$P.E. = E_c - E_{ref} \quad , \quad P.E. = -qV$$

$$-qV = E_c - E_{ref} \longrightarrow V = \frac{-1}{q}\left[E_c - E_{ref}\right]$$

$$\vec{\mathcal{E}} = -\vec{\nabla} V \longrightarrow \mathcal{E} = -\frac{dV}{dx}$$

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q}\cdot\frac{d}{dx}\left[E_c - E_{ref}\right] \longrightarrow \mathcal{E} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_c}{dx}$$

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_c}{dx} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_v}{dx} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_i}{dx}$$



رابطه رانش drift :

$$J_{N_d} = q.\mu_n n.E \quad , \quad J_{P_d} = q.\mu_p.P.E$$

۲- نفوذ : یعنی اگر در یک ناحیه از نیمه هادی غلظت الکترون زیاد شود، الکترونها شروع به پخش شدن می‌کنند تا غلظت در تمام نقاط یکسان شود. تحت آزمایشی می‌توان بطریق نمودار نوع یک نیمه هادی را تشخیص داد.

$$\vec{J}_{P_D} = -q.D_p.\vec{\nabla}P$$

D → Diffusion

یعنی هرچه شیب حفره (یا حامل) بیشتر باشد جریان بیشتر است.

$$\vec{J}_{N_D} = q.D_N.\vec{\nabla}n$$

جریان در جهت زیاد شدن شیب است.

$$\vec{J}_N = \vec{J}_{N_D} + \vec{J}_{N_d} \qquad \vec{J}_P = \vec{J}_{P_d} + \vec{J}_{P_D}$$

$$\vec{J}_N = q.\mu_n.n\vec{E} + q.D_N.\vec{\nabla}n \qquad \vec{J}_P = q\mu_p P\vec{E} - qD_p\vec{\nabla}P$$

$$, \quad \vec{J} = \vec{J}_N + \vec{J}_P$$

رابطه انیشتین :

۱- در داخل هر نیمه هادی E_F مستقل از مکان است.

$$\frac{dE_F}{dx} = \frac{dE_F}{dy} = \frac{dE_F}{dZ} = 0$$

در یک نیمه هادی اگر غلظت نیمه هادی تغییر کند E_C تغییر کرده و $\mathcal{E}$ میدان الکتریکی مخالف صفر داریم.

تمامی فرمولها برای شرایط تعادل و غیرتبهگن است.

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_i}{dx} \quad , \quad n = n_i \cdot e^{\frac{E_F - E_i}{KT}}$$

$$\longrightarrow \frac{dn}{dx} = n_i\left(-\frac{dE_i}{dx}\right)\cdot e^{\frac{E_F - E_i}{KT}}$$

$$\longrightarrow \frac{dn}{dx} = -\frac{n}{KT}\cdot\frac{dE_i}{dx} = -\frac{n}{KT}\cdot q\mathcal{E} = -n\cdot\frac{q\mathcal{E}}{KT}$$

در شرایط تعادل: $J = 0$

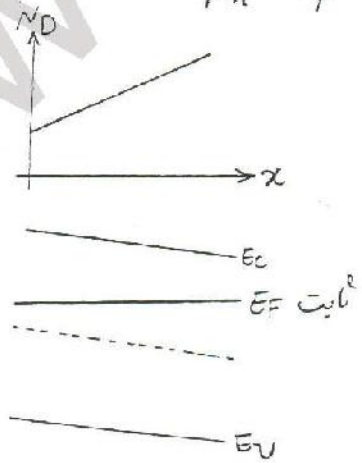
$$J = J_N + J_P \longrightarrow J_N = J_P = 0$$

J_N نمی تواند $-J_P$ باشد چون الکترونها در یک جهت و حفره ها در جهت دیگر حرکت کرده و تجمع بارها بوجود می آید و این غیرممکن است.

$$q\cdot\mu_n n\mathcal{E} + qD_N\frac{dn}{dx} = 0 \longrightarrow q\mu_n n\mathcal{E} + qD_N\left(-\frac{n}{KT}q\mathcal{E}\right) = 0$$

$$\longrightarrow \mu_n - D_N\frac{q}{KT} = 0 \longrightarrow \mu_n = \frac{qD_N}{KT}$$

روابط اینشتین: $\longrightarrow \frac{D_N}{\mu_n} = \frac{KT}{q} \quad , \quad \frac{D_P}{\mu_P} = \frac{KT}{q}$



با توجه به اینکه E_F ثابت و مستقل از مکان است اغتشاش غلظت ناخالصی باعث کاهش E_c و E_v می شود.

مثال عددی :

$N_D = 10^{14}\ \#/cm^3$, $\mu_n = 1300\ cm^2/v.sec$

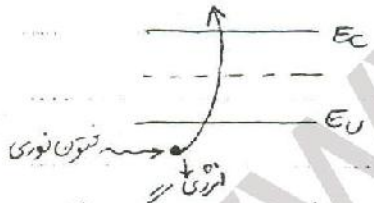
$\frac{KT}{q} = 0.026$, $D_N = 0.026 \times 1300 = 350\ cm^2/sec$

۳ـ ترکیب و تولید (recombination and Generation)

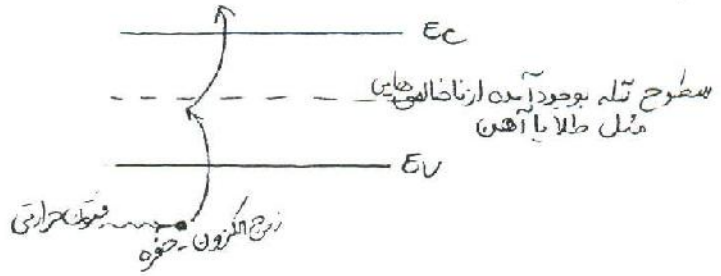
ترکیب و تولید مستقیماً باعث ایجاد حرکت نمی‌شوند بلکه عوامل حرکت یعنی چگالی $\vec{J}$ را تغییر می‌دهند که باعث تغییر جریان خواهد شد. مورد دیگر این است که ترکیب و تولید عوامل مجزا نبوده و همواره با هم وجود دارند.

دو نوع ترکیب و تولید وجود دارند : ترکیب و تولید نوری ، ترکیب و تولید حرارتی

ترکیب و تولید نوری : با جذب یک فتون نورانی یک زوج الکترون حفره ایجاد می‌شود و با صدور یک فتون نورانی یک الکترون و حفره با هم ترکیب می‌شوند.



ترکیب و تولید حرارتی همانند ترکیب و تولید نوری است که با فتون حرارتی صورت می‌گیرد. با این تفاوت که در ترکیب و تولید حرارتی چون فتون حرارتی انرژی کمتری از فتون نوری دارد الکترون به طور غیر مستقیم و در دو مرحله از E_V جدا شده و به E_C می‌رود.



ترکیب و تولید فقط غلظت حاملها را تغییر می‌دهند.

حال فرمول کلی را با استفاده از سه عامل ایجاد جریان می‌نویسیم:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{\text{حرارت}} + \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{\text{نور}} + \frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{\text{بقیه پدیده‌ها}}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{\text{حرارت}} + \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{\text{نور}} + \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{\text{بقیه پدیده‌ها}}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t}\Big|_{\text{نورانی}} = \frac{\partial p}{\partial t}\Big|_{\text{نورانی}} = G_L \quad \left(\#/cm^3.sec\right)$$

برای ساده‌سازی G_L را در کل حجم نیمه‌هادی ثابت فرض می‌کنیم.

در حال تعادل n_0 و P_0 داریم. بعد از تابش نور:

$$n = n_0 + \Delta n$$
$$P = P_0 + \Delta P$$

هرچه تعداد الکترون ـ حفره بیشتر باشد طبیعتاً امکان ترکیب و تولید آن نیز بیشتر است.

بعد از تابش نور n و P را داریم. حال اگر نور را قطع کنیم تعدادی از الکترون ـ حفره‌ها شروع به ترکیب شدن می‌کنند.

$$\underbrace{\frac{\partial n}{\partial t}}_{\text{سرعت ترکیب شدن}} = -C_N.\overbrace{N_T}^{\text{تعداد سطح}}\Delta n \quad , \quad C_N N_T \equiv \frac{1}{\tau_n}$$

τ_n : طول عمر

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -C_P.N_T\Delta P \quad , \quad C_N.N_T \equiv \frac{1}{\tau_P}$$

$$\longrightarrow \frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\Delta n}{\tau_n} \quad , \quad \frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{\Delta P}{\tau_P} \quad , \quad \langle t \rangle = \tau_n , \tau_P$$

طول عمر حفره اضافی بوجود آمده

به عنوان مثال در نیمه‌هادی نوع n (Si):

$n_i = 10^{10}\ \#/cm^3$, $n_0 = N_D = 10^{14}\ \#/cm^3$

$$P_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = 10^{6}\ \#/cm^3$$

$10^{9}\ /cm^3$ زوج الکترون-حفره

$$\longrightarrow n = 10^{14} + 10^{9} = 10^{14} \quad , \quad np \neq n_i^2$$

$$P = 10^{6} + 10^{9} = 10^{9}$$

مشاهده می‌کنیم که حامل اکثریت هیچ تغییری نمی‌کند و حامل اقلیت است که تغییر می‌کند. عمل بالا را L.L.I (low level Injection) تزریق ضعیف می‌گوئیم. تزریق الکترون حفره در این شرایط به نحوی است که تعداد حامل های اکثریت را تغییر ندهد.

برعکس N_A و N_D که تحت کنترل ما هستند N_T (مربوط به ناخالصی غیرعمدی) را نمی‌توانیم کنترل بکنیم و با توجه به اینکه τ_p و τ_n به N_T بستگی دارند لذا مقادیر τ_p و τ_n را نمی‌توان به طور دقیق بدست آورد و از آزمایش بدست می‌آیند.

$\tau_p = 10^{-3}\ sec$ در نیمه‌هادی خیلی خالص N_T کم

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\text{رانش}} + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\text{نفوذ}} + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\substack{R-G \\ \text{حرارتی}}} + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\substack{R-G \\ \text{نورانی}}} + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\text{پدیده‌های دیگر}}$$

$$\left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\text{رانش}} + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\text{نفوذ}} = \frac{1}{q}\left[\frac{\partial J_{Nx}}{\partial x} + \frac{\partial J_{Ny}}{\partial y} + \frac{\partial J_{Nz}}{\partial z}\right]$$

۳۵

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$ معادله پیوستگی بار و جریان

$$\begin{cases} \left.\dfrac{\partial n}{\partial t}\right|_{\text{رانش}} + \left.\dfrac{\partial n}{\partial t}\right|_{\text{نفوذ}} = \dfrac{1}{q}\vec{\nabla}\cdot\vec{J}_N \\ \left.\dfrac{\partial P}{\partial t}\right|_{\text{رانش}} + \left.\dfrac{\partial P}{\partial t}\right|_{\text{نفوذ}} = \dfrac{-1}{q}\vec{\nabla}\cdot\vec{J}_P \end{cases}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\vec{\nabla}\cdot\vec{J}_N + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\substack{R-G\\ \text{حرارتی}}} + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\substack{R-G\\ \text{نوری}}} + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\text{بقیه پدیده‌ها}}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{-1}{q}\vec{\nabla}\cdot\vec{J}_P + \left.\frac{\partial P}{\partial t}\right|_{\substack{R-G\\ \text{حرارتی}}} + \left.\frac{\partial P}{\partial t}\right|_{\substack{R-G\\ \text{نوری}}} + \left.\frac{\partial P}{\partial t}\right|_{\text{بقیه پدیده‌ها}}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{J}_N \longrightarrow \frac{\partial J_{Nx}}{\partial x} \longrightarrow \frac{\partial J_N}{\partial x}$$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{J}_P \longrightarrow \frac{\partial J_{Px}}{\partial x} \longrightarrow \frac{\partial J_P}{\partial x}$$

$$\vec{J}_N = q\mu_n n\vec{\mathcal{E}} + qD_N\vec{\nabla}n \longrightarrow J_N = q\mu_n n\mathcal{E} + qD_N\frac{dn}{dx}$$

شرطی که غیر از I اما وجود دارد این است که $\mathcal{E}$ خیلی کوچک باشد. $\mathcal{E} \simeq 0$

$$J_N \cong qD_N\frac{dn}{dx}, \quad qD_N\frac{\partial n(x,t)}{\partial x}$$

$$\longrightarrow \begin{cases} \dfrac{\partial n(x,t)}{\partial t} = D_N\dfrac{\partial^2 n(x,t)}{\partial x^2} - \dfrac{\Delta n(x,t)}{\tau_n} + G_L + \text{بقیه پدیده‌ها} \\ \dfrac{\partial P(x,t)}{\partial t} = -D_P\dfrac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2} - \dfrac{\Delta P(x,t)}{\tau_P} + G_L + \text{بقیه پدیده‌ها} \end{cases}$$ معادلات پیوستگی

معادلات بالا معادلات اصلی بار و جریان هستند.

طول عمر (عمر متوسط): متوسط زمانی که یک حفره زندگی می‌کند که در حدود 10^{-6} s است.

$$\frac{1}{q}\vec{\nabla}\cdot\vec{J} = \frac{1}{q}\left(\frac{\partial J_{Nx}}{\partial x} + \frac{\partial J_{Ny}}{\partial y} + \frac{\partial J_{Nz}}{\partial z}\right)$$

$$J_N = \underbrace{q\mu_n n\mathcal{E}}_{\text{بسیار کوچک}}^{\text{مولفه رانشی}} + \overbrace{qD_N\frac{\partial n}{\partial x}}^{\text{مولفه نفوذی}}$$

$$\frac{1}{q}\vec{\nabla}\cdot\vec{J} \longrightarrow \frac{1}{q}\cdot\frac{\partial J_{Nx}}{\partial x} \quad , \quad \longrightarrow J_N = qD_N\frac{\partial n}{\partial x}$$

$$\longrightarrow \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\text{رانشی}} + \left.\frac{\partial n}{\partial t}\right|_{\text{نفوذی}} = \frac{1}{q}\cdot qD_N\frac{\partial^2 n}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial n_p(x,t)}{\partial t} = D_N\cdot\frac{\partial^2 n_p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p(x,t)}{\tau_N} + G_L + \text{بقیه پدیده‌ها}$$

$$\frac{\partial P_n(x,t)}{\partial t} = D_P\cdot\frac{\partial^2 P_n(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta P_n(x,t)}{\tau_P} + G_L + \text{بقیه پدیده‌ها}$$

همچنین نیمه‌هادی در حال تعادل روابط مقابل صادق است:

$n \neq n(x)$

$P \neq p(x)$

یعنی توزیع ناخالصی در طول نیمه‌هادی یکنواخت است و غلظت ناخالصی تابع مکان نیست.

برای حل معادلات بالا شرایط تعادل را در نظر می‌گیریم و از بقیه پدیده‌ها صرفنظر می‌کنیم:

$$n = n_0 + \Delta n \longrightarrow \frac{\partial n}{\partial x} = \frac{\partial n_0}{\partial x} + \frac{\partial \Delta n}{\partial x} = \frac{\partial \Delta n}{\partial x}$$

$$P = P_0 + \Delta P \qquad \frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_0}{\partial x} + \frac{\partial \Delta P}{\partial x} = \frac{\partial \Delta P}{\partial x}$$

$$\longrightarrow \frac{\partial \Delta P_n(x,t)}{\partial t} = D_P\frac{\partial^2 \Delta P_n(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta P_n(x,t)}{\tau_P} + G_L$$

$$\frac{\partial \Delta n_p(x,t)}{\partial t} = D_N\frac{\partial^2 \Delta n_p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p(x,t)}{\tau_n} + G_L$$

برای سادگی ابتدا چند حالت خاص را در نظر می‌گیریم:

۱- حالت پایدار: یعنی تابعیت زمانی نداریم.

$$\begin{cases} D_N \dfrac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} - \dfrac{\Delta n}{\tau_n} + G_L = 0 \\ D_P \dfrac{\partial^2 \Delta P}{\partial x^2} - \dfrac{\Delta P}{\tau_P} + G_L = 0 \end{cases}$$

۲- در غیاب شیب غلظت یا بدون جریان نفوذی

$$\frac{\partial^2 \Delta n}{\partial x^2} = 0 \quad , \quad \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial x^2} = 0$$

۳- در غیاب جریان رانشی

۴- در غیاب نور $G_L = 0$

۵- در غیاب ترکیب و تولید حرارتی

$$\frac{\Delta n_P}{\tau_P} = 0 \quad , \quad \frac{\Delta P_n}{\tau_n} = 0$$

۶- در حالت پایدار و در غیاب نور

$$D_N \frac{d^2 \Delta n_P(x)}{dx^2} - \frac{\Delta n_P(x)}{\tau_n} = 0$$

$$D_P \cdot \frac{d^2 \Delta P_n(x)}{dx^2} - \frac{\Delta P_n(x)}{\tau_P} = 0$$

$$\longrightarrow \Delta P_n(x) = A_1 e^{-x/L_P} + B e^{x/L_P} \quad , \quad L_P \equiv \sqrt{D_P \tau_P}$$

طول نفوذ

$$\Delta n_P(x) = A_1 e^{-x/L_N} + B_1 e^{x/L_N} \quad , \quad L_N \equiv \sqrt{D_N \tau_N}$$

۷- در غیاب شیب غلظت و بدون نور

$$\frac{d \Delta n_P(t)}{dt} = -\frac{\Delta n_P(t)}{\tau_n} \qquad \Delta n_P(t) = \Delta n_P(0) e^{-t/\tau_n}$$

$$\longrightarrow$$

$$\frac{d \Delta P_n(t)}{dt} = -\frac{\Delta P_n(t)}{\tau_P} \qquad \Delta P_n(t) = \Delta P_n(0) e^{-t/\tau_P}$$

۸- صفحات شیب غلظت و حالت پایدار

$$\Delta n_p = G_L \cdot \tau_n$$

$$\Delta P_n = G_L \cdot \tau_p$$

۹- حالت پایدار - بدون نور - بدون ترکیب و تولید حرارتی

$$D_N \cdot \frac{d^2 \Delta n_p(x)}{dx^2} = 0 \qquad \Delta n_p(x) = Ax + B$$

$$\longrightarrow$$

$$D_p \cdot \frac{d^2 \Delta P_n(x)}{dx^2} = 0 \qquad \Delta P_n(x) = A'x + B'$$

محاسبهٔ طول نفوذ (L_N یا L_p)

$$D_p = \mu_p \cdot \frac{KT}{q}$$

$$L_p = \sqrt{\left(\mu_p \frac{KT}{q}\right)\tau_p} = \sqrt{(0.024)(500)(10^{-6})} = 3.5 \times 10^{-3}\ cm$$

مثال:

$N_D = 10^{15}\ \#/cm^3$, $T = 300\,^\circ K$, $G_L = 10^{17}\ \#/cm^3.sec$

$\tau_p = 1\ \mu sec$, $\Delta P_n = ?$

$n_i = 10^{10}\ \#/cm^3$, $N_D = 10^{15} \gg n_i$

$n_0 = N_D = 10^{15}\ \#/cm^3$, $P_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = 10^5\ \#/cm^3$

, $G_L = 10^{17}\ \#/cm^3.sec$

$$\Delta P_n = G_L \cdot \tau_p = 10^{11} \longrightarrow n = 10^{11} + 10^{15} = 10^{15}$$

$$P = 10^5 + 10^{11} = 10^{11}$$

$$\frac{d\Delta P_n(t)}{dt} = -\frac{\Delta P_n(t)}{\tau_n} + G_L \longrightarrow \Delta P_n(t) = A \cdot e^{-t/\tau_n} + G_L \cdot \tau_p$$

$t=0$: $\Delta P_n(0)=0$

$$\rightarrow \boxed{\Delta P_n(t) = G_L \cdot \tau_p \left(1-e^{-t/\tau_p}\right)}$$

$t \rightarrow \infty$: $\Delta P_n(t) = G_L \cdot \tau_p$

$$\langle x \rangle = \frac{\int x e^{-x/L_p} dx}{\int e^{-x/L_p} dx} = L_p$$

اگر نیمه‌هادی در حال تعادل نباشد روابط برای تراز فرمی دیگر معنی ندارد. در مسئله قبل هم

$n = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{KT}}$ (1)

$p = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{KT}}$ (2)

$n=10^{15}$, $p=10^{11}$ و دیگر نمی‌توانیم از $np=n_i^2$ استفاده کنیم.

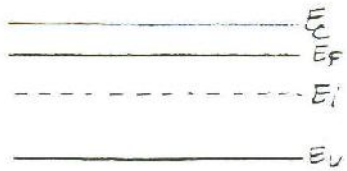
شبه فرمی quasi-Fermi level :

$$n = n_i . e^{\frac{F_N - E_i}{KT}} \qquad F_N = E_i + KT \ln \frac{n}{n_i}$$

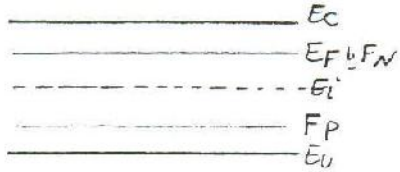
یا

$$p = n_i . e^{\frac{E_i - F_P}{KT}} \qquad F_P = E_i - KT \ln \frac{p}{n_i}$$

در مثال فوق قبل از اینکه نور تابیده شود با توجه به (1) و (2) :



اما بعد از تابش نور F_N و F_P خواهیم داشت که F_N همان E_F قبلی است.



در این حالت :

$$F_N = E_i + kT \cdot \ln \frac{n_0}{n_i}$$

$$F_P = E_i - 0.024 \ln 10 = E_i - 0.06 \quad eV.$$

$$\vec{J}_P = q\mu_P P \vec{E} - qD_P \vec{\nabla} P \quad (1)$$

$$\longrightarrow \vec{\nabla} P = \frac{n_i}{kT} \cdot e^{\frac{E_i - F_P}{kT}} \left[\vec{\nabla} E_i - \vec{\nabla} F_P\right]$$

$$\longrightarrow \vec{\nabla} P = \frac{P}{kT} \cdot \left[\vec{\nabla} E_i - \vec{\nabla} F_P\right]$$

$$\longrightarrow \vec{\nabla} P = \frac{qP}{kT} \vec{E} - \frac{P}{kT} \vec{\nabla} F_P$$

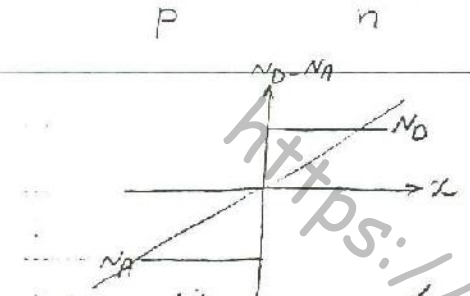
$$\xrightarrow{(1)} \vec{J}_P = q\mu_P P \vec{E} - qD_P \frac{qP}{kT} \vec{E} + qD_P \cdot \frac{P}{kT} \vec{\nabla} F_P$$

$$\longrightarrow \vec{J}_P = qP\vec{E} \left[\cancel{\mu_P - \frac{qD_P}{kT}}\right] + qD_P \cdot \frac{P}{kT} \vec{\nabla} F_P$$

$$\longrightarrow \vec{J}_P = \mu_P \cdot P \cdot \vec{\nabla} F_P \quad , \quad \vec{J}_N = \mu_n n \vec{\nabla} F_N$$

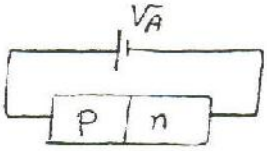
اگر F_N و F_P تابع مکان نباشند جریان داخل نیمه‌هادی صفر است. این موضوع با نگاه کردن به سطوح شبه فرمی مشخص می‌شود.

تزریق آلیاژی نیمه‌هادی نوع P در نوع n :



در این حالت اتصال بین n و P ، اتصال پله‌ای یا ناگهانی است که در نمودار بالا مشاهده می‌شود.

البته با روشهای دیگر تزریق می‌توان به اتصال خطی یا شیب دار نیز رسید. آنچه در عمل وجود دارد حالتی بین پله ای و شیب دار است.



بایاس مستقیم $V_A > 0$ ، بدون بایاس $V_A = 0$

بایاس معکوس $V_A < 0$ ،

فرضیات :

۱- اتصال کاملاً پله‌ای ۲- N_D ، N_A در طول قسمت های n و p ثابت هستند.

۳- مسئله یک بعدی ۴- اتصالات کاملاً اهمی هستند.

۵- طول n و p نسبت به طول نفوذ (L_n ، L_p) بینهایت هستند.

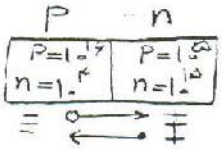
۶- حالت تعادل یعنی : $G_L = 0$ ، $V_A = 0$ ، $\nabla T = 0$ ، $\vec{E} = 0$ ، $\vec{H} = 0$.

به عنوان نمونه:

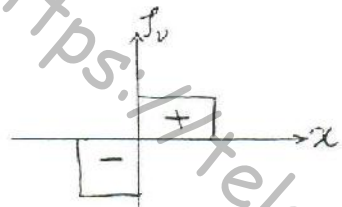
$P_p = 10^{16}\ \#/cm^3$ ، $n_p = 10^{4}\ \#/cm^3$

$n_n = 10^{15}\ \#/cm^3$ ، $P_n = 10^{5}\ \#/cm^3$

$N_A = 10^{16}$ ، $N_D = 10^{15}$

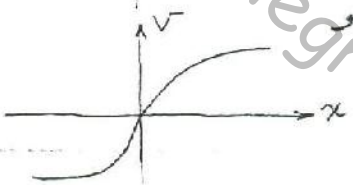


در این حالت الکترونها به سمت ناحیهٔ p و حفره‌ها به سمت ناحیهٔ n حرکت می‌کنند و بارهای

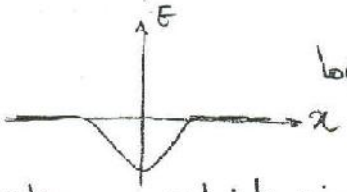


مثبت و منفی را در این دو ناحیه تولید می‌کنند.

در اثر این بارهای مثبت و منفی پتانسیلی خواهیم داشت و



در اثر این پتانسیل میدان بوجود می‌آید.



پتانسیل یا میدان بوجود آمده در مقابل حرکت الکترون‌ها

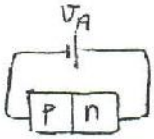
و یا حفره‌ها سد می‌شود. در ابتدا تجمع الکترون و حفره‌ها زیاد بوده و میدان بسیار کوچک

است. با گذشت زمان و حرکت ناقل‌ها از تجمع آنها کاسته شده و بر شدت میدان مخالف

افزوده می‌شود تا نهایتاً در یک نقطه تعادل برقرار شود. این پتانسیل یک پتانسیل داخلی

Built in Potential است.

اگر پتانسیل خارجی مانند روبرو اعمال کنیم سد پتانسیل



قویتر می‌شود:

ضریب دی الکتریک

$$\nabla\cdot\vec{D}=\rho_v \longrightarrow \vec{\nabla}\cdot\vec{\mathcal{E}}=\frac{\rho_v}{\varepsilon}\ , \qquad \varepsilon=K_s\varepsilon_0 \text{ یا } \varepsilon_R\varepsilon_0$$

$$\longrightarrow \vec{\nabla}\cdot\vec{\mathcal{E}}=\frac{\rho_v}{K_s\varepsilon_0} \longrightarrow \frac{d\mathcal{E}}{dx}=\frac{\rho_v}{K_s\varepsilon_0}$$

$$\longrightarrow \boxed{\mathcal{E}=\int\frac{\rho_v}{K_s\varepsilon_0}dx} \qquad \rho_v=q(p-n+N_D^{+}-N_A^{-})$$

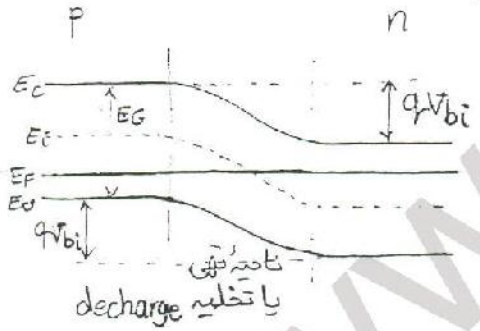
$$\vec{J}=\vec{J}_P+\vec{J}_N=0 \ , \qquad J_N=J_{N_d}+J_{N_D}=0$$
$$J_P=J_{P_d}+J_{P_D}=0$$

$$\vec{\mathcal{E}}=-\vec{\nabla}\vec{V} \longrightarrow V=-\int\mathcal{E}.dx$$

$$\longrightarrow V(x)=-\int_{-\infty}^{x}\mathcal{E}\,dx$$

همانطور که قبلاً گفته شد در حالت تعادل

E_F مستقل از مکان است.



به ناحیهٔ بالا به این دلیل ناحیهٔ تهی گفته می‌شود که خالی از بار متحرک است. چون پس از حرکت

ناقلها و ایجاد بار علی مثبت و منفی، این بارها دیگر قادر به حرکت نیستند.

فاصلهٔ E_F به E_V در ناحیهٔ P کمتر از فاصلهٔ E_C به E_F در ناحیهٔ n است چون $N_A=10^{15}$ و $N_D=10^{16}$.

$$\mathcal{E}=\frac{1}{q}\cdot\frac{dE_i}{dx}=\frac{1}{q}\cdot\frac{dE_c}{dx}=\frac{1}{q}\cdot\frac{dE_v}{dx}$$

در این حالت اگر الکترون بخواهد از ناحیهٔ n به P برود باید به اندازهٔ qV_{bi} انرژی داشته باشد

و همین گونه است در مورد حفره.

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{\rho_v}{K_s \varepsilon_0} \quad , \quad \mathcal{E}(x) = \frac{1}{K_s \varepsilon_0}\int \rho_v(x)\,dx$$

$$\longrightarrow \rho_v = \left(\frac{1}{K_s \varepsilon_0}\right)^{-1} \cdot \frac{d\mathcal{E}}{dx}$$

$$\mathcal{E} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_i}{dx} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_c}{dx} = \frac{1}{q}\cdot\frac{dE_v}{dx} \longrightarrow \rho_v = \left(\frac{K_s \varepsilon_0}{q}\right)\frac{d^2E_i}{dx^2}$$

لذا تمام اطلاعاتی که راجع به ρ_v بخواهیم بدانیم می‌توانیم از روی تقعر منحنی بدست آوریم.

$$V_A = 0 \ , \quad J = 0 \ , \quad J = J_P + J_N = 0 \ , \quad J_P = 0 \ , \quad J_N = 0$$

$$J_N = q\mu_n n \mathcal{E} + q D_N \frac{dn}{dx} = 0 \longrightarrow \mathcal{E} = -\frac{D_N}{\mu_n}\cdot\frac{1}{n}\cdot\frac{dn}{dx}$$

$$\longrightarrow \mathcal{E} = -\frac{KT}{q}\cdot\frac{1}{n}\cdot\frac{dn}{dx}$$

$$\longrightarrow V_{bi} = -\int_{-\infty}^{+\infty} -\frac{KT}{q}\cdot\frac{1}{n}\cdot\frac{dn}{dx}\,dx = +\frac{KT}{q}\int_{x(-\infty)}^{x(+\infty)}\frac{dn}{n} = +\frac{KT}{q}\,Ln(n)\Big|_{x(-\infty)}^{x(+\infty)}$$

$$\longrightarrow V_{bi} = +\frac{KT}{q}\,Ln\frac{N_D}{n_i^2/N_A}$$

$$\longrightarrow V_{bi} = \frac{KT}{q}\,Ln\frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

V_{bi} پتانسیلی است که در بین نواحی n و p بدون هیچ پتانسیل خارجی بوجود می‌آید. حد نهایی

V_{bi} وقتی است که نیمه‌هادی وارد تبهگنی می‌شود.

$$\longrightarrow V_{bi} = ۰/۰۲۶ \times Ln\frac{10^{31}}{10^{20}} = ۰/۰۲۶ \times ۲۵/۳ = ۰/۶۵۷ \text{ ولت}$$

$N_D = 1.6\times10^{18}$, $N_A = 7.77\times10^{16}$ سرتیمگنی :

$$\longrightarrow V_{bimax} = 0.026\times 36.8 = 0.95$$

V_{bimax} را می‌توان از روی نوارهای انرژی نیز بدست آورد.

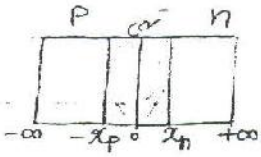
$$E_G = 1.12 \longrightarrow \frac{1.12}{0.026} = 43.0V\ kT$$

$$(43.0V - (3+3))\,kT = 37.0V\,kT = 0.96$$ یا $1.12\times\frac{37.0V}{43.08} = 0.96$

تقریب تهی :

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{q}{k_s\varepsilon_0}\left(p - n + N_D^+ - N_A^-\right)$$

حل معادله بالا مشکل است چون N_A^- ، N_D^+ ، n ، p همگی تابعی از x است. برای حل آن از تقریبی به نام تقریب تهی استفاده می‌شود. در این تقریب :



N_A ثابت در $-\infty \leq x \leq -x_p$

N_D ثابت در $x_n \leq x \leq \infty$

یعنی در قسمت بدنه و در دو طرف N_A و N_D ثابت هستند.

چون ناقل متحرک نداریم:

$$N_A \gg n_p \ , \ N_A \gg p_p \ , \ N_D \gg n_n \ , \ N_D \gg p_n$$

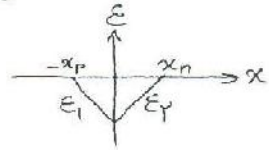
$$\longrightarrow \begin{cases} \dfrac{dE}{dx} = \dfrac{-q}{K_s\varepsilon_0} N_A \ , & -x_p \leq x \leq 0 \quad : \text{ناحیهٔ تهی } p \\ \dfrac{d\mathcal{E}}{dx} = \dfrac{q}{K_s\varepsilon_0} N_D \ , & 0 \leq x \leq x_n \quad : \text{ناحیهٔ تهی } n \end{cases}$$

$$\mathcal{E}(x) = \int_0^{\mathcal{E}(x)} d\mathcal{E} = \int_{-x_p}^{x} -\frac{q}{K_s\varepsilon_0} N_A\, dx \longrightarrow \mathcal{E}(x) = \frac{-qN_A}{K_s\varepsilon_0}(x + x_p)$$

منحنی خط پائین رونده در $\mathcal{E}$

$$\mathcal{E}(x)=\int_0^{\mathcal{E}(x)} d\mathcal{E}=\frac{qN_D}{K_s\varepsilon_0}\int_{x_n}^{x} dx=\frac{qN_D}{K_s\varepsilon_0}(x-x_n)=\frac{-qN_D}{K_s\varepsilon_0}(x_n-x)$$

$$\longrightarrow \mathcal{E}_2(x)=\frac{qN_D}{K_s\varepsilon_0}(x-x_n)$$



$$\frac{qN_A}{K_s\varepsilon_0}(x+x_p)\overset{x=0}{=}\frac{qN_D}{K_s\varepsilon_0}(x_n-x)\longrightarrow N_A x_p=N_D x_n$$

با توجه به رابطه بالا می‌توان $W=x_n+x_p$ عرض ناحیه تخلیه را بدست آورد.

$$N_A x_p \times qA=N_D x_n \times qA$$

$$\mathcal{E}=-\frac{dV}{dx}\quad,\quad V=-\int \mathcal{E}\,dx\quad,\quad V_{bi}=(V_{x_n}-V_0)+(V_0-V_{x_p})$$

$$\rho=q(P-n+N_D^+-N_A^-)$$

$$\begin{matrix}N_A\gg P_p\\ N_A\gg n_p\end{matrix}\longrightarrow \rho_V=-qN_A \qquad \begin{matrix}N_D\gg P_n\\ N_D\gg P_{n_n}\end{matrix}\longrightarrow \rho_V=qN_D$$

در نواحی دیگر : $x<-x_p\ ,\ x>x_n\ :\ \rho=0$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{D}=\rho_V\quad,\quad \vec{\nabla}\cdot\vec{\mathcal{E}}=\frac{\rho_V}{K_s\varepsilon_0}\longrightarrow\frac{d\mathcal{E}}{dx}=\frac{\rho_V}{K_s\varepsilon_0}$$

$$d\mathcal{E}=\frac{\rho_V}{K_s\varepsilon_0}dx\quad,\quad \mathcal{E}(x)=\int_0^{\mathcal{E}(x)}\frac{\rho_V}{K_s\varepsilon_0}dx$$

$$\longrightarrow \mathcal{E}(x)=\frac{1}{K_s\varepsilon_0}\int_{-x_p}^{x}-qN_A\,dx=\frac{-q\cdot N_A}{K_s\cdot\varepsilon_0}(x+x_p)$$

$$\mathcal{E}(x)=\int_0^{\mathcal{E}(x)}\frac{qN_D}{K_s\varepsilon_0}dx=\frac{qN_D}{K_s\varepsilon_0}\int_{x_n}^{x}dx=\frac{-qN_D}{K_s\varepsilon_0}(x_n-x)$$

$$AqN_A\cdot x_p=AqN_D\cdot x_n\longrightarrow N_A x_p=N_D x_n$$

$$\vec{\mathcal{E}}(x) = -\vec{\nabla} V \longrightarrow \frac{dV}{dx} = -\mathcal{E}(x)$$

$$\longrightarrow V(x) = -\int_0^{V(x)} dV = -\int_0^{V(x)} \mathcal{E}\, dx = +\int_{-x_p}^{x} \frac{qN_A}{K_s\varepsilon_0}(x+x_p)dx = \frac{qN_A}{2K_s\varepsilon_0}(x+x_p)^2\Big|_{-x_p}^{x}$$

$$\longrightarrow V(x) = \frac{qN_A}{2K_s\varepsilon_0}(x+x_p)^2$$ درناحیهٔ p :

$$\int_{V(x)}^{V_{bi}} dV = V_{bi} - V(x) = -\int_x^{x_n} \frac{qN_D}{K_s\varepsilon_0}(x-x_n)dx$$ درناحیهٔ n :

$$\longrightarrow V_{bi} - V(x) = \frac{-qN_D}{2K_s\varepsilon_0}(x-x_n)\Big|_x^{x_n} = \frac{qN_D}{2K_s\varepsilon_0}(x-x_n)^2$$

$$\longrightarrow V(x) = V_{bi} - \frac{qN_D}{2K_s\varepsilon_0}(x-x_n)^2 \longrightarrow V(x) = V_{bi} - \frac{qN_D}{2K_s\varepsilon_0}(x_n-x)^2$$

هنگامی که دوقطبی الکتریکی وجود نداشته باشد پتانسیل الکتریکی پیوسته خواهد بود :

$$\longrightarrow V(0^-) = \frac{qN_A}{2K_s\varepsilon_0}x_p^2 = V(0^+) = V_{bi} - \frac{qN_D}{2K_s\varepsilon_0}x_n^2$$

$$\longrightarrow \frac{qN_A}{2K_s\varepsilon_0} \times \frac{N_D^2}{N_A^2}x_n^2 = V_{bi} - \frac{qN_D}{2K_s\varepsilon_0}x_n^2$$

$$\longrightarrow V_{bi} = \frac{q}{2K_s\varepsilon_0}x_n^2\left[\frac{N_D^2}{N_A} + N_D\right]$$

$$\longrightarrow V_{bi} = \frac{qN_D}{2K_s\varepsilon_0}\left(1+\frac{N_D}{N_A}\right) = \frac{qN_D}{2K_s\varepsilon_0}\cdot\frac{N_A+N_D}{N_A}x_n^2$$

$$\longrightarrow x_n = \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q}V_{bi}\frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)}\right]^{1/2}, \quad x_p = \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q}V_{bi}\frac{N_D}{N_A(N_D+N_A)}\right]^{1/2}$$

$$W = x_n + x_p$$ عرض ناحیهٔ تهی :

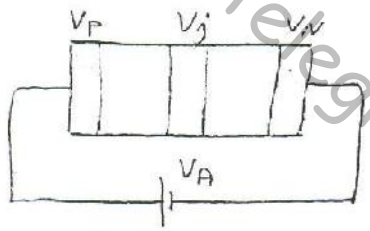
$$V_{bi} = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$\longrightarrow W = \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q} V_{bi} \frac{1}{N_A+N_D}\right]^{1/2} \cdot \left[\sqrt{\frac{N_A}{N_D}} + \sqrt{\frac{N_D}{N_A}}\right]$$

$$\longrightarrow W = \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q} V_{bi} \frac{1}{N_A+N_D} \cdot \frac{1}{N_D N_A}\right]^{1/2} \cdot (N_A+N_D)$$

$$\longrightarrow W = \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q} V_{bi} \frac{N_A+N_D}{N_A N_D}\right]^{1/2}$$

بعد از اعمال ولتاژ خارجی :



$$V_A - V_P + V_j - V_N = 0$$

if $V_A = 0 \longrightarrow V_P + V_N = V_j = V_{bi}$ یا $V_P + V_N = V_{bi}$

$V_A \neq 0 \longrightarrow V_A + V_j = V_P + V_N \quad , \quad V_j = V_{bi} - V_A$

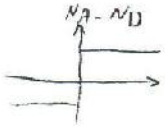
$$\longrightarrow x_n = \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q}(V_{bi}-V_A)\frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)}\right]^{1/2}$$

$$x_p = \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q}(V_{bi}-V_A)\frac{N_D}{N_A(N_D+N_A)}\right]^{1/2}$$

$$W = \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q}(V_{bi}-V_A)\frac{N_A+N_D}{N_A N_D}\right]^{1/2}$$

اگر $V_A > V_{bi}$ شود باید افت پتانسیل در خارج از ناحیهٔ تهی را نیز در نظر بگیریم و دیگر نمی‌توانیم

از فرمولهای بالا استفاده کنیم (مگر اینکه افت را در بدنه در نظر بگیریم).

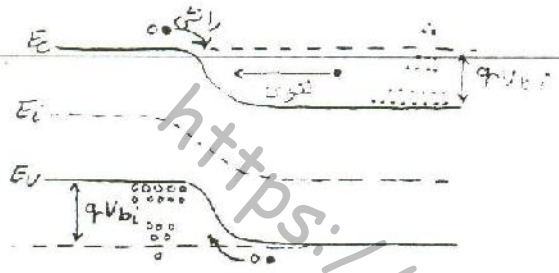


تاکنون تمام موارد گفته شده برای دیود پله‌ای بود.

$$N_A(x) - N_D(x) = \begin{cases} N_A & x<0 \\ N_D & x>0 \end{cases}$$

تمرین : تمام مطالب گفته شده را برای دیود خطی بازگو کنید. $N_A(x) - N_D(x) = -ax$

$V_{bi} = \frac{2KT}{q} \ln \frac{a x_n}{2 n_i}$ بدست آورید



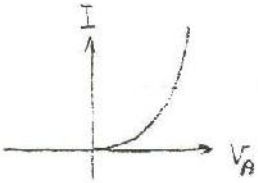
$$J_N = \underset{\text{نفوذی}}{J_N} + \underset{\text{رانشی}}{J_N} = 0$$

$$J_P = \underset{\text{نفوذی}}{J_P} + \underset{\text{رانشی}}{J_P} = 0$$

در بایاس مستقیم جریان نفوذی و در بایاس معکوس جریان رانشی غالب خواهند بود.

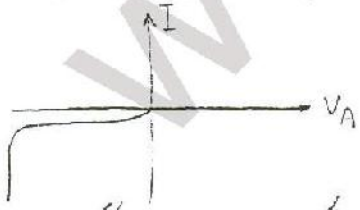
در بایاس مستقیم با افزایش پتانسیل، سد پتانسیل کاهش یافته و در نتیجه تعداد الکترون ها به صورت نمایی افزایش می یابد. این الکترونها در جریان نفوذی دخالت مستقیم خواهند داشت.

در این بایاس جریان رانشی تغییری نمی کند.



در نتیجه منحنی جریان - ولتاژ در بایاس مستقیم به صورت نمایی است :

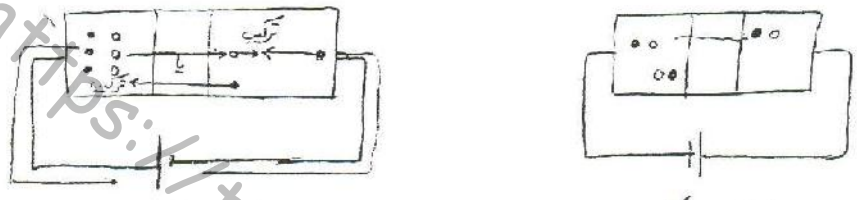
در بایاس معکوس هرچه پتانسیل معکوس را زیاد می کنیم سد پتانسیل قوی تر شده و جریان نفوذی به سرعت کاهش می یابد. جریان رانشی هم که مقدار ثابتی است. لذا در این حالت جریان رانشی غالب خواهد بود. منحنی جریان - ولتاژ :



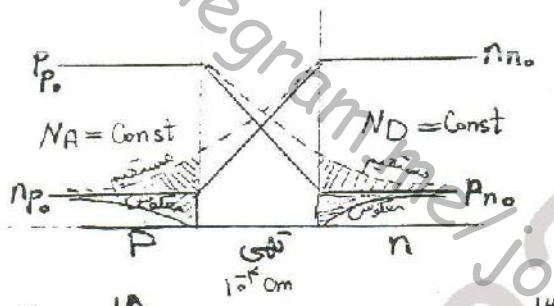
در هر دو حالت با توجه به اینکه جریان رانشی به تعداد زوج الکترون - حفره بستگی دارد و تعداد آنها مستقل از پتانسیل و وابسته به درجه حرارت است، لذا جریان رانشی در این دو حالت ثابت می ماند.

در حالت تعادل :

$$J_N = 0 \quad , \quad J_{N_d} = -J_{N_D} \quad , \quad J = J_N + J_P = 0$$
$$J_P = 0 \quad , \quad J_{P_d} = -J_{P_D}$$



بایاس مستقیم　　بایاس معکوس



$P_{P_0} = N_A = 10^{15}$　　$\frac{dP}{dx} = 10^{19}$　　$n_{n_0} = 10^{14}$

$n_{P_0} = 10^{5}$　　$P_{n_0} = 10^{4}$

با توجه به ارقام و اعداد بالا در منحنی نشان داده شده، n_{n_0} باید بالاتر از P_{P_0} و P_{n_0} پایین‌تر از n_{P_0} باشد.

در بایاس مستقیم مقداری حفره از P به n و تعدادی الکترون اضافی از n به P تزریق می‌شود که در منحنی نشان داده شده است. (در حالت بایاس معکوس نیز عکس این عمل صورت می‌گیرد)

هنگامی که یک ولتاژ متناوب به دیود اعمال می‌شود و دیود مرتباً در بایاس مستقیم و معکوس می‌رود زمانی برای تخلیه بارهای بوجود آمده در هر دو بایاس صرف می‌شود و T_1 گذار روشنایی و T_2 گذار خاموشی تعریف می‌شوند. برای کاهش زمان تخلیه بارها

$$\frac{\partial \Delta n_p(x,t)}{\partial t} = D\frac{\partial^2 \Delta n_p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p(x,t)}{\tau_n} + G_L + \text{عوامل دیگر}$$

* شرایط پایدار $\frac{\partial \Delta n_p(x,t)}{\partial t}=0$ * بدون نور $G_L=0$

* بدون پدیده دیگر جمله آخر صفر

$$\longrightarrow \frac{d^2\Delta n_p(x)}{dx^2} - \frac{\Delta n_p(x)}{L_n^2}=0 \quad , \quad L_n=\sqrt{D_n\tau_n}$$

$\longrightarrow \Delta n_p(x)$ معلوم $\longrightarrow$ $J_n = qD_N\frac{d\Delta n_p}{dx}$

$$\Delta n_p = n - n_0 \quad , \quad \frac{\partial n}{\partial x}=\frac{\partial \Delta n}{\partial x} \quad , \quad \frac{\partial n}{\partial t}=\frac{\partial \Delta n}{\partial t}$$

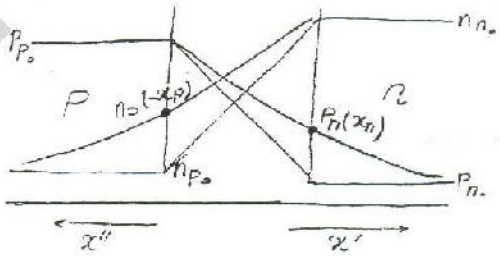
$$\begin{cases} D_N\frac{d^2\Delta n_p(x)}{dx^2} - \frac{\Delta n_p(x)}{\tau_n}=0 \\ D_p\frac{d^2\Delta P_n(x)}{dx^2} - \frac{\Delta P_n(x)}{\tau_p}=0 \end{cases}$$

و در ناحیه‌ی تهی ترکیب و تولید وجود ندارد.

$$\xrightarrow{\text{حل معادله}} \Delta n_p(x'') = A_1 e^{-x''/L_N} + A_2 e^{x''/L_N}$$

$$\Delta P_n(x') = B_1 e^{-x'/L_p} + B_2 e^{+x'/L_p}$$

$$, \quad L_N=\sqrt{D_N\tau_n} \quad , \quad L_p=\sqrt{D_p\tau_p}$$



۱- در نمیه های بسیار بلند

$$\Delta P_n(x'\to\infty)=0 \longrightarrow A_2=0$$

$$\Delta n_p(x''\to\infty)=0 \longrightarrow B_2=0$$

$$\Delta P_n(x') = B_1 e^{-x'/L_p} \quad , \quad \Delta n_p(x'') = A_1 e^{-x''/L_N}$$

$$J_N = q\mu_n n\mathcal{E} + qD_N\frac{dn}{dx} \simeq 0$$

$$\longrightarrow \mathcal{E} \simeq \frac{-D_N}{\mu_n}\frac{1}{n}\cdot\frac{dn}{dx} = -\frac{KT}{q}\cdot\frac{1}{n}\cdot\frac{dn}{dx}$$

$$V_j = V_{bi} - V_A = -\int_{-x_p}^{x_n} \mathcal{E}(x)\,dx = \int_{-x_p}^{x_n} \frac{KT}{q}\cdot\frac{1}{n}\cdot\frac{dn}{dx}\,dx$$

$$\longrightarrow V_{bi} - V_A = \frac{KT}{q}\int_{n(-x_p)}^{n(x_n)} \frac{dn}{n} = \frac{KT}{q}\cdot \ln n\Big|_{n(-x_p)}^{n(x_n)}$$

$$\longrightarrow \ln n(x_n) - \ln n(-x_p) = \frac{q}{KT}(V_{bi} - V_A)$$

$$\longrightarrow \ln\frac{n(x_n)}{n(-x_p)} = \frac{q}{KT}(V_{bi} - V_A)$$

$$\longrightarrow \frac{n(x_n)}{n(-x_p)} = e^{\frac{qV_{bi}}{KT}}\cdot e^{-\frac{qV_A}{KT}} \longrightarrow n(-x_p) = n(x_n)\cdot e^{\frac{-qV_{bi}}{KT}}\cdot e^{\frac{qV_A}{KT}}$$

$$\longrightarrow n_p(-x_p) = n_n(x_n)\cdot e^{\frac{-qV_{bi}}{KT}}\cdot e^{\frac{qV_A}{KT}}$$

$$,\ n_n(x_n)\cdot P_n(x_n) = n_i^2 \longrightarrow n_n(x_n) = \frac{n_i^2}{P_n(x_n)}$$

$$\longrightarrow n_p(-x_p) = \frac{n_i^2}{P_n}\cdot e^{+\frac{qV_A}{KT}}\cdot e^{-\frac{qV_{bi}}{KT}} \quad ,\ V_{bi} = \frac{KT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

$$\longrightarrow n_p(-x_p) = n_n(x_n)\cdot\frac{n_i^2}{N_A N_D}\cdot e^{qV_A/KT} \quad ,\ n_n(x_n) = N_D$$

$$\longrightarrow n_p(-x_p) = \frac{n_i^2}{N_A}\cdot e^{qV_A/KT} \quad ,\ \frac{n_i^2}{N_A} = \frac{P_{p_0}\cdot n_{p_0}}{P_{p_0}} = n_{p_0}$$

$$\longrightarrow n_p(-x_p) = n_{p_0}\cdot e^{qV_A/KT} \quad ,\ P_n(+x_n) = P_{n_0}\cdot e^{qV_A/KT}$$ به همین ترتیب

$$A_1 = \Delta n_p(x''=0) = n_p - n_{p_0} \quad ,\ B_1 = \Delta P_n(x'=0) = P_n - P_{n_0}$$

$$,\ n_p = n_{p_0} + \Delta n_p \longrightarrow n_p = n_{p_0}\left[1 + e^{qV_A/KT}\right]$$

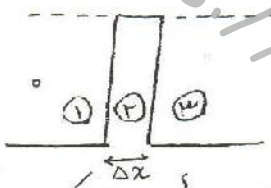
$$\Delta P_n = P_n - P_{n_0} \quad ,\ \Delta P_n(x'=0) = B_1 e^{0} = P_{n_0}(e^{qV_A/KT} - 1)$$

$$\longrightarrow B_1 = P_{n_0}(e^{qV_A/KT} - 1) \longrightarrow \Delta P_n(x') = P_{n_0}(e^{qV_A/KT} - 1)\cdot e^{-x'/L_p}$$

به همین ترتیب $\longrightarrow \Delta n_p(x'') = n_{p_0}(e^{qV_A/KT} - 1)\cdot e^{-x''/L_N}$

شکست بهمنی : در این پدیده میدان به قدری شدید است که به ذرات سرعت دهد و باعث برخورد و

در نتیجه تولید الکترون - حفره شود.



اصل عدم تعیین هایزنبرگ $\Delta x \Delta P_x \geqslant h$ ($P_x = mv_x$)

$\Delta E \Delta t \geqslant h$

اگر Δx خیلی کوچک شود دیگر نمی توان راجع به مکان دقیق الکترون رأی صادر کرد و ممکن است

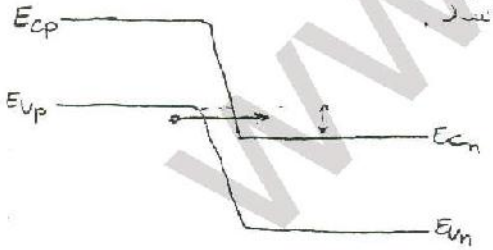
در هر طرفی از سد پتانسیل باشد.

شرایط عبور الکترون از سد پتانسیل : (تونل زنی)

۱- اولاً عرض ناحیه تهی (Δx) خیلی کم باشد که در دیود $P^+ - n^+$ برقرار است.

۲- در طرف P الکترونی وجود داشته باشد که بتواند تونل بزند.

۳- در طرف n هم جایی برای الکترون وجود داشته باشد.



به این دیود، دیود تونلی یا زنر گفته می شود.

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\cdot\frac{d^2\psi}{dx^2} + V\psi(x) = E\psi(x) \quad , \quad P(x) = \psi^*(x)\cdot\psi(x)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\cdot\frac{d^2\psi}{dx^2} = E\psi$$

① ناحیه $\psi_1(x) = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$, $K = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$

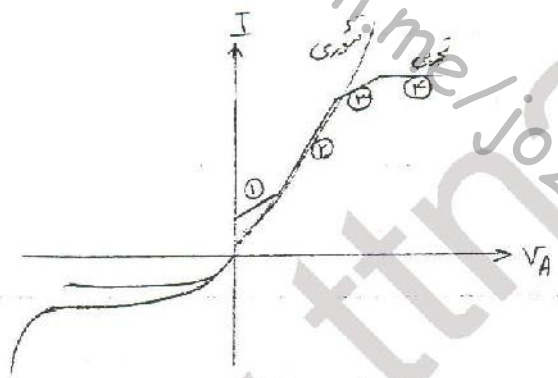
③ ناحیه $\psi_3(x) = Ce^{ikx} + De^{-ikx}$, $-\frac{\hbar^2}{2m}\cdot\frac{d^2\psi_2}{dx^2} + V\psi_2 = E\psi_2(x)$

if $V_A = ۰/۱$ ولت $\longrightarrow e^{۳/۸۴} = ۴۶/۵$

$$\longrightarrow \begin{cases} V_A > ۰/۱ \text{ ولت} \rightsquigarrow I = I_0 e^{qV_A/KT} \\ V_A < -۰/۱ \text{ ولت} \rightsquigarrow I = -I_0 \end{cases}$$

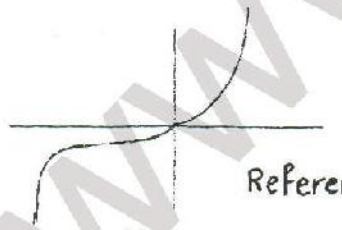
مولفهٔ $I_0 e^{qV_A/KT}$ مولفهٔ نفوذی جریان و مولفهٔ $-I_0$ مولفهٔ رانشی جریان است.

تمام معادلات بالا از ابتدا بر پایهٔ ناخالصی‌های اقلیت نوشته شد و در صورت تأثیر ناخالصی‌های اکثریت معادلات تغییر خواهند کرد.



در شکل بالا منحنی جریان دیود با استفاده از معادلهٔ آن و آزمایش نشان داده شده است.

انحراف از حالت ایده‌آل:



Reference diode

$$I = \frac{E - V_{BR}}{R}$$ ولتاژ شکست

در ولتاژ V_{BR} پدیدهٔ شکست رخ می‌دهد.

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{qN_D}{K_S \varepsilon_0}(x_n - x)$$

$$\mathcal{E}(x) = \frac{-qN_A}{K_S \varepsilon_0}(x_p + x)$$

$$|\mathcal{E}|_{max} = \mathcal{E}(0) = -\frac{qN_D}{K_S \varepsilon_0}$$

$$x_n = \left[\frac{2K_S \varepsilon_0}{q}(V_{bi} - V_A)\frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)}\right]^{1/2}$$

$$\longrightarrow |\mathcal{E}|_{max} = \mathcal{E}(0) = -\left[\frac{2q}{K_s \varepsilon_0} \cdot \frac{N_A N_D^2}{N_D(N_A+N_D)}(V_{bi}-V_A)\right]^{1/2}$$

$$\longrightarrow |\mathcal{E}|_{max} = \mathcal{E}(0) = -\left[\frac{2q}{K_s \varepsilon_0}(V_{bi}-V_A)\frac{N_A N_D}{N_A+N_D}\right]^{1/2} \equiv \mathcal{E}_{CR}$$

$\mathcal{E}_{CR}$ حداقل میدانی است که می‌تواند باعث برخورد یک الکترون به اتم دیگر شده و یک الکترون آزاد کند.

$$\vec{v} = \mu_n \cdot \vec{\mathcal{E}} \quad , \quad E = \frac{1}{2} m v^2$$

$$\mathcal{E}_{CR}^2 = \frac{2q}{K_s \varepsilon_0}(V_{bi}-V_A)\frac{N_A N_D}{N_A+N_D} \quad , \quad -V_A \equiv V_{BR}$$

$$\frac{2q}{K_s \varepsilon_0}(V_{bi}+V_{BR})\frac{N_A N_D}{N_A+N_D} = C_1$$

$$V_{BR} \gg V_{bi} \longrightarrow \frac{2q}{K_s \varepsilon_0} V_{BR} \frac{N_A N_D}{N_A+N_D} = C_1$$

$$\longrightarrow V_{BR} = C_1 \frac{K_s \varepsilon_0}{2q} \cdot \frac{N_A N_D}{N_A+N_D} \longrightarrow V_{BR} = C_2 \cdot \frac{N_A N_D}{N_A+N_D}$$

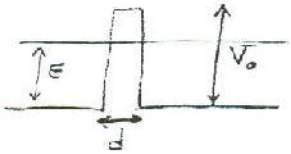
in $P^+ n$: $V_{BR} = C_2 \frac{1}{N_D}$

in $P n^+$: $V_{BR} = C_2 \frac{1}{N_A}$

در ناحیهٔ بایاس مستقیم غلظت زیاد است و ترکیب غالب بر تولید است. در ناحیه بایاس معکوس چون غلظت کم است لذا تولید زیاد انجام می‌شود. با تولید الکترون و حفره عامل موثر جریان رانشی (یعنی تعداد) زیاد شده و جریان زیاد می‌شود. به این جریان، جریان تولید گوئیم. در نتیجه در بایاس معکوس با

$$\psi_2(x) = Fe^{\beta x} + Ge^{-\beta x} \quad , \quad \beta = \frac{\sqrt{2m(V-E)}}{\hbar}$$

$$\left[\frac{C}{A}\right]^2 = \left[1 + \frac{(qV_0 \sinh \beta d)^2}{4E(qV_0 - E)}\right]^{-1}$$



در بایاس مستقیم:

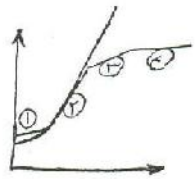
$$I = I_0(e^{qV_A/kT} - 1)$$

$$V_A > 0.1\,V \longrightarrow I = I_0 e^{qV_A/kT}$$

$$\longrightarrow \ln I = \ln I_0 + \frac{qV_A}{kT}$$

$$y = a + bx$$

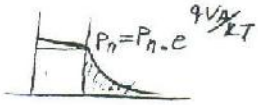
یعنی اگر I را در مقیاس نیم لگاریتمی رسم کنیم باید یک خط شود. امّا عملاً این گونه نیست و چند



ناحیه با شیب مختلف داریم:

① $1.03 < n < 1.06$ ، $b' = \frac{q}{nkT}$ ، $b = \frac{q}{kT}$

② $$I = I_0(e^{qV_A/kT} - 1) + \underbrace{q\frac{Ani}{2\tau_0}(e^{qV_A/2kT} - 1)}_{\text{جریان ترکیب}}$$



وجود ترکیب در بایاس مستقیم در ناحیهٔ تهی باعث می شود که تعدادی از الکترونها در ناحیهٔ تهی از بین

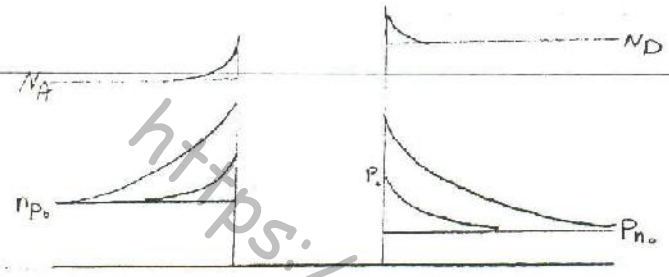
بروند (ترکیب شوند). لذا در ابتدای ورود به ناحیه تهی باید تعداد الکترون بیشتری داشته

باشیم تا پس از عبور از ناحیهٔ تهی P_n را داشته باشیم. (در شکل با خط قرمز نشان داده شده است)

مشابه فرمول بالا در بایاس معکوس برای جریان تولید نیز وجود دارد:

$$I = -I_0 - q\frac{Ani}{2\tau_0}W$$

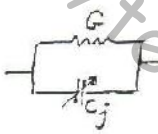
تزریق شدید



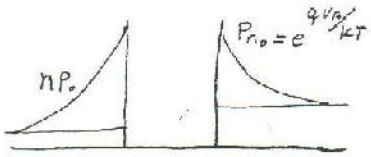
ناحیه ۳ :

خازن اتصال junction capacitance :

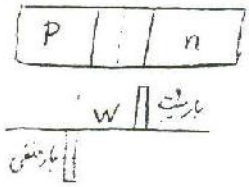
$$Y = G + jC_j\omega$$



پاسخ حاملهای اکثریت بسیار سریع تر از پاسخ



حاملهای اقلیت است. و این حاملها هستند که عرض



ناحیه تهی را تشکیل می دهند.

$$C_j = \frac{S\varepsilon}{W} = \frac{K_s \varepsilon_0 A}{W}$$

$$, \quad W = \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q}(V_{bi} - V_A)\frac{N_A+N_D}{N_A N_D}\right]^{1/2}$$

$$\longrightarrow C_j = \frac{K_s\varepsilon_0 A}{\left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q}(V_{bi}-V_A)\frac{N_A+N_D}{N_A N_D}\right]^{1/2}} \longrightarrow C_j \propto (V_{bi}-V_A)^{-1/2}$$

$$V_A \gg V_{bi} \longrightarrow C_j \propto \frac{1}{|V_A|^{1/2}} \quad , \quad \overset{\text{کل}}{V_a} = \overset{dc}{V_A} + \overset{ac}{v_a}$$

تمام فرمولهای بالا به شرطی درستند که :

$$v_a \ll V_A \longrightarrow \Delta W \ll W$$

در این حالت:

$$v_a > 0 \ : \ \Delta W < 0$$
$$v_a < 0 \ : \ \Delta W > 0$$

زمان پاسخ حاملهای اکثریت حدود 10^{-12} تا 10^{-10} ثانیه است و در نتیجه این مقدار خیلی کوچکتر

از فرکانس $f = 10^{8}\,Hz$ خواهد بود.

$T = 10^{-8}\,sec$

افزایش ولتاژ جریان بیشتر شده و منحنی شیب خواهد داشت. خواهیم دید که در بایاس مستقیم

نیز ترکیب باعث افزایش جریان خواهد شد.

G #/cm³.sec

$dn = G\,dV = GA\,dx$ #/زمان

$dQ = qGA\,dx \longrightarrow Q = \int_{-x_p}^{x_n} qAG\,dx$

$I = -qAGW$

$G \equiv \frac{n_i}{2\tau_0}$, $\tau_0 = \frac{\tau_n + \tau_p}{2} \longrightarrow I = -qA\frac{n_i}{2\tau_0}W$

$I = I_0(e^{qV_A/kT} - 1) - qA\frac{n_i}{2\tau_0}W$, $V_A < -0.1$

$\longrightarrow I = -\left[I_0 + qA\frac{n_i}{2\tau_0}W\right]$

$I_0 = -qAn_i^2\left[\frac{D_N}{L_N}\cdot\frac{1}{N_A} + \frac{D_P}{L_P}\cdot\frac{1}{N_D}\right]$

$I_{R-G} = -qA\frac{n_i}{2\tau_0}W$

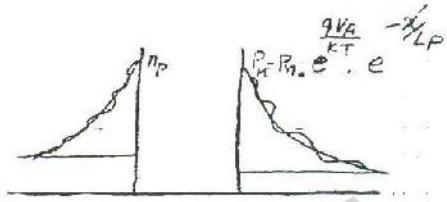
$P\text{-}n^+$: $I_0 = -qAn_i^2\left[\frac{D_N}{L_N}\cdot\frac{1}{N_A}\right] = -qAn_i^2\frac{L_N}{\tau_n}\cdot\frac{1}{N_A}$

در عمل I_{R-G} دیود سیلیکن حدود ۵۰ برابر I_0 است.

تمرین: وضعیت را برای دیود ژرمانیوم بررسی کنید و بیان کنید کدامیک از دیودها به دیود ایده‌آل

نزدیکتر است.

تمام فرمولهای بدست آمده برای بایاس معکوس بود و اکنون برای بایاس مستقیم محاسبه می‌کنیم:



در اینجا بوجود آورنده منحنی های مقابل عوامل تفوذی هستند

و همان طور که می دانیم عوامل تفوذی حاملهای اقلیت هستند.

در نتیجه چون سرعت پاسخ حاملهای اقلیت کم است در بایاس مستقیم حالت دینامیک داریم. در حالی

که در بایاس معکوس چون سرعت پاسخ حاملهای اکثریت زیاد بود حالت استاتیک فرض می کردیم.

$$\frac{\partial \Delta n_p(x,t)}{\partial t} = D_N \frac{\partial^2 \Delta n_p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p(x,t)}{\tau_n} + G_L + \text{بقیه پدیده ها}$$

با فرض $G_L = 0$ و اینکه بقیه پدیده ها وجود ندارند:

$$\frac{\partial \Delta n_p(x,t)}{\partial t} = D_N \frac{\partial^2 \Delta n_p(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_p(x,t)}{\tau_n}$$

$$\Delta n_p(x,t) = \overline{\Delta n_p(x)} + \tilde{P}_n(x,t)$$

$$\longrightarrow \frac{\partial \tilde{P}_n(x,t)}{\partial t} = D_N \frac{d^2 \overline{\Delta n_p(x)}}{dx^2} + D_N \frac{\partial^2 \tilde{P}_n(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\overline{\Delta n_p(x)}}{\tau_n} - \frac{\tilde{P}_n(x,t)}{\tau_n}$$

$$\longrightarrow \begin{cases} 0 = D_N \dfrac{d^2 \overline{\Delta n_p(x)}}{dx^2} - \dfrac{\overline{\Delta n_p(x)}}{\tau_n} & \longleftarrow \text{معادله اول قبلاً حل شده است} \\ \dfrac{\partial \tilde{P}_n(x,t)}{\partial t} = D_N \dfrac{\partial^2 \tilde{P}_n(x,t)}{\partial x^2} - \dfrac{\tilde{P}_n(x,t)}{\tau_n} & \text{برای حل معادله روبرو فرضیات زیر را در} \end{cases}$$

نظر می گیریم: $\tilde{P}_n(x,t) = f(t) \cdot g(x)$, $f(t) = C_1 e^{j\omega t}$, $g(x) = P_n(x)$

$$\longrightarrow C_1 j\omega P_n(x) e^{j\omega t} = D_N \frac{d^2 P_n(x)}{dx^2} C_1 e^{j\omega t} - \frac{C_1 P_n(x) e^{j\omega t}}{\tau_n}$$

$$Y = G + jC_j\omega \quad , \quad Y(f < 10^{\wedge} Hz) = G_0 + jC_j\omega$$

$$P^+n : \; C_j \propto N_D^{1/4} \quad , \quad Pn^+ : \; C_j \propto N_A^{1/4}$$

تمرین: اگر $N_A - N_D$ خطی باشد بدست آورید که: $C_j \propto \frac{1}{|V_{Bi}|^{1/4}}$

در بایاس صفر

$$C_{j_0} = \frac{K_s \varepsilon_0 A}{\left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q} V_{bi} \frac{N_A+N_D}{N_A N_D}\right]^{1/2}} \longrightarrow C_j = \frac{C_{j_0}}{\left(\frac{-V_A}{V_{bi}}+1\right)^{1/4}}$$

و در حالت کلی: $C_j = \frac{C_{j_0}}{\left[1-\frac{V_A}{V_{bi}}\right]^m} \quad , \quad \frac{1}{3} \leq m \leq \frac{1}{2}$

محاسبهٔ کندوکتانس G =

در حالت dc: $I_1 = I_0\left(e^{qV_A/KT} - 1\right)$

در حالت ac: $I_2 = I_0\left(e^{qV_a/KT} - 1\right) \longrightarrow I = I_0\left(e^{q(V_a+V_A)/KT} - 1\right)$

$$i_A = I_A + i_a$$

$$\longrightarrow i_a = I(V_a) - I(V_A) = I(V_A + V_a) - I(V_A)$$

$$\longrightarrow i_a = I(V_A) + \frac{dI}{dV_A} V_a + \cdots - I(V_A) \longrightarrow i_a \cong \frac{dI}{dV_A} V_a$$

$$G = \frac{i_a}{V_a} = \frac{dI}{dV_A} = \frac{qI_0}{KT} e^{qV_A/KT} = \frac{q}{KT}\left[I_0 e^{qV_A/KT} - I_0 + I_0\right]$$

$$\longrightarrow G = \frac{q}{KT}(I + I_0) \quad , \quad \text{مقاومت دینامیک} \quad r = \frac{KT}{q(I+I_0)}$$ حالت ایده آل:

$$I = I_0\left(e^{qV_A/KT} - 1\right) - \frac{q n_i}{2\tau_0} A W$$

حالت واقعی:

$$\frac{dI}{dV_A} = \frac{q}{KT}(I + I_0) - \frac{q n_i}{2\tau_0} A \frac{dW}{dV_A} \quad , \quad \frac{dW}{dV_A} = \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q} \cdot \frac{N_A+N_D}{N_A N_D}\right]^{1/2} \left(-\frac{1}{2}\right)(V_{bi} - V_A)^{-1/2}$$

$$\longrightarrow G = \frac{dI}{dV_A} = \frac{q}{KT}(I + I_0) + \frac{qA}{4\tau_0} n_i \left[\frac{2K_s\varepsilon_0}{q} \cdot \frac{N_A+N_D}{N_A N_D} \cdot \frac{1}{V_{bi} - V_A}\right]^{1/2}$$

$$Y(\omega=0) = \frac{qA}{KT}\left[q\frac{D_p}{L_p}n_{p_0}\right].e^{\frac{qV_A}{KT}} = G_0$$

$$Y = G_0\sqrt{1+j\omega\tau_p} \longrightarrow Y = G_0\sqrt{A}.e^{j\varphi/2} \quad , \quad A = (1+\omega^2\tau_p^2)^{1/2}$$

$$, \quad tg\,\varphi = \omega\tau_p$$

$$Y = G_0(1+\omega^2\tau_p^2)^{1/4}.e^{j\varphi/2} = G_0(1+\omega^2\tau_p^2)^{1/4}.(\cos\varphi/2 + j\sin\varphi/2)$$

$$\longrightarrow G = G_0(1+\omega^2\tau_p^2)^{1/4}.\cos\varphi/2$$

$$, \quad \omega C_D = G_0(1+\omega^2\tau_p^2)^{1/4}.\sin\varphi/2$$

$$, \quad G_0 = \frac{q}{KT}I_0 \quad , \quad G_0 = \frac{q}{KT}(I+I_0)$$

$$G \propto I \quad , \quad G_0 = \frac{q}{KT}(I+I_0) = \frac{dI}{dV_A}$$

$$C_D \propto I$$

در دیود p^+-n :

if $\omega\tau_p \ll 1/5$ then

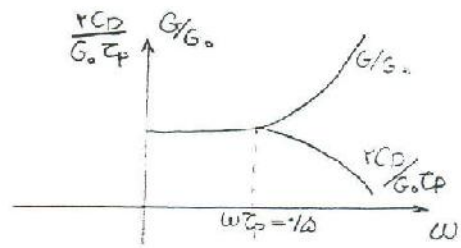
$$\longrightarrow G \simeq G_0 = \frac{q}{KT}(I+I_0) = \frac{dI}{dV_A}$$

$$Y = G_0\sqrt{1+j\omega\tau_p} \xrightarrow{\omega\tau_p<1/5} Y \simeq G_0(1+\tfrac{1}{2}j\omega\tau_p) = G_0 + \tfrac{1}{2}j\overset{G}{G_0}\omega\tau_p$$

$$\longrightarrow \omega C_D = \frac{1}{2}G\omega\tau_p$$

$$\longrightarrow C_D = \frac{1}{2}G\tau_p$$

$$\frac{G}{G_0} \simeq 1 \quad , \quad \frac{2C_D}{G\tau_p} \simeq 1$$

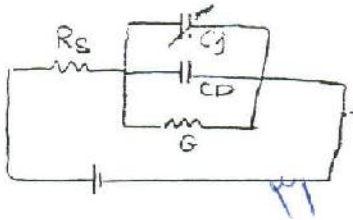


در دیود $p-n^+$:

$$Y = \frac{qA}{KT}\left[q\frac{D_N}{L_N}n_{p_0}\sqrt{1+j\omega\tau_n}\right].e^{\frac{qV_A}{KT}}$$

$$G_0 \propto I \quad , \quad G \propto I \quad , \quad \frac{2C_D}{G_0\tau_n} \quad , \quad \frac{G}{G_0}$$

سوال امتحانی: بگوئید هر کدام از المانهای مقابل در مدل دیود به چه چیزهایی بستگی دارند



$$\longrightarrow C_1 j\omega P_n(x) = D_N \frac{d^2 P_n(x)}{dx^2} - \frac{P_n(x)}{\tau_n} \longrightarrow \frac{d^2 P_n(x)}{dx^2} = \left[\frac{j\omega}{D_N} + \frac{1}{D_N \tau_n}\right] P_n(x)$$

$$\longrightarrow \frac{d^2 P_n(x)}{dx^2} = \left[\frac{j\omega\tau_n + 1}{D_N \tau_n}\right] P_n(x) \quad , \quad D_N \tau_n = L_N^2 \quad , \quad \left(\frac{1+j\omega\tau_n}{D_N\tau_n}\right)^{-1} = L_N^{*2}$$

$$\longrightarrow P_n(x) = A_1 e^{x/L_N^*} + A_2 e^{-x/L_N^*} \quad , \quad L_N^* = L_N \times \frac{1}{\sqrt{1+j\omega\tau_n}}$$

$$x \longrightarrow \infty \ : P_n = 0 \longrightarrow A_1 = 0 \qquad \longrightarrow \tilde{P}_n(x,t) = A . e^{-x/L_N^*} . e^{j\omega t}$$

بدست می‌آید که $A = P_{n0}$ و درنتیجه : $\tilde{P}_n(x,t) = P_{n0}\, e^{-x/L_N^*} . e^{j\omega t}$

$$P_n(0,t) = P_{n0}\, e^{\frac{q(V_A+v_a)}{KT}} = P_{n0}\, e^{\frac{qV_A}{KT}} e^{\frac{qv_a}{KT}} = P_{n0}\, e^{\frac{qV_A}{KT}} \left[1 + \frac{qv_a}{KT} + \cdots\right]$$

$$\longrightarrow \tilde{P}_{n0} = \frac{qv_a}{KT} P_{n0}\, e^{\frac{qV_A}{KT}} \qquad \longrightarrow \tilde{P}_n(x,t) = \frac{qv_a}{KT} P_{n0}\, e^{\frac{qV_A}{KT}} . e^{\frac{-x}{L_N^*}} . e^{j\omega t}$$

قبلاً دیدیم که : $J = q\mu_n n \mathcal{E} + q D_N \frac{dn}{dx}$ ~~در اینجا جهت بایاس معکوس فقط جریان~~

$$i = -qAD_p \frac{dP_n}{dx}\Big|_{x=0}$$

~~ازطرفی داریم~~ و درنتیجه :

$$\longrightarrow i_a = -qAD_p . \frac{qv_a}{KT} P_{n0}\, e^{qV_A/KT} . \frac{1}{L_p^*} e^{j\omega t} . e^{-x/L_p^*}$$

$$Y = \frac{i}{v_a} = \frac{qA}{KT}\left[q \frac{D_p}{L_p^*} P_{n0}\right] . e^{qV_A/KT} . e^{j\omega t} \quad , \quad L_p^* = \frac{L_p}{\sqrt{1+j\omega\tau_p}}$$

$$\longrightarrow Y = \frac{qA}{KT}\sqrt{1+j\omega\tau_p}\left[q\frac{D_p}{L_p}P_{n0}\right] . e^{qV_A/KT}$$

$G = \mathrm{Re}\,Y$

$C\omega_D = \mathrm{Im}\,Y$

$$Y = \frac{qA}{KT}\left[q\frac{D_p}{L_p}P_{n0}\sqrt{1+j\omega\tau_p} + q\frac{D_N}{L_N}n_{p0}\sqrt{1+j\omega\tau_n}\right] . e^{qV_A/KT}$$

$$P^+ - n : \quad P_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D} \quad , \quad n_{p0} = \frac{n_i^2}{N_A} \quad , N_A \gg N_D \quad , \quad P_{n0} \gg n_{p0}$$

$$\longrightarrow Y = \frac{qA}{KT}\left[q\frac{D_p}{L_p}n_{p0}\sqrt{1+j\omega\tau_p}\right] . e^{qV_A/KT}$$

اگر τ_p کمتر شود اولاً بار کمتری جمع می‌شود و ثانیاً زمان کمتری برای تخلیه نیاز دارد.

$$\frac{\partial \Delta P_n(x,t)}{\partial t} = \frac{-1}{q}\cdot\frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{\Delta P_n(x,t)}{\tau_p} + \underbrace{G_L + \text{بقیه پدیده‌ها}}_{\text{وجود ندارند}}$$

$$\longrightarrow \frac{d}{dt}\int^{\infty} qA\left[\Delta P_n(x,t)\right]dx = -A\int^{\infty}\frac{\partial J_p}{\partial x}dx - \frac{qA}{\tau_p}\int \Delta P_n(x,t)\,dx$$

$$\longrightarrow \frac{dQ_p(t)}{dt} = -A\left[J_p(\infty) - J_p(x_n)\right] - \frac{Q_p(t)}{\tau_p}$$

$$\longrightarrow \frac{dQ_p(t)}{dt} = A J_p(x_n) - \frac{Q_p(t)}{\tau_p}$$

$$p^+-n : \quad \frac{dQ_p(t)}{dt} = \underbrace{i(t)}_{\text{جریان}} - \underbrace{\frac{Q_p(t)}{\tau_p}}_{\text{ترکیب}}$$

رابطه بالا نشان می‌دهد که بار به دو عامل جریان و ترکیب بستگی دارد.

$$\frac{dQ_p}{dt} = -I_R - \frac{Q_p(t)}{\tau_p} \longrightarrow \frac{dQ_p(t)}{I_R + \frac{Q_p(t)}{\tau_p}} = -dt$$

$$\longrightarrow \int_{Q_p(t=0^+)}^{0}\frac{dQ_p(t)}{I_R + \frac{Q_p(t)}{\tau_p}} = -\int_0^{t_s} dt$$

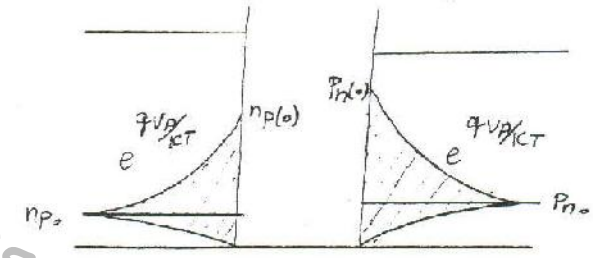
$$\longrightarrow -t_s = \tau_p \cdot \ln\left[I_R + \frac{Q_p(t)}{\tau_p}\right]\Bigg|_{Q_p(t=0^+)}^{0}$$

$$\longrightarrow t_s = \tau_p \cdot \ln\left[I_R + \frac{Q_p(0^+)}{\tau_p}\right] - \tau_p \cdot \ln I_R$$

$$\longrightarrow t_s = \left(\frac{\ln I_R + \frac{Q_p(0^+)}{\tau_p}}{I_R}\right)\times \tau_p \longrightarrow t_s = \tau_p \cdot \ln\left[1 + \frac{Q_p(0^+)}{I_R\,\tau_p}\right]$$

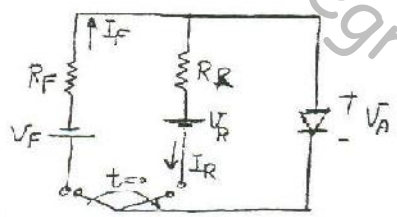
$$Q_p(0^+) = Q_p(0^-)$$

$$t<0 : \quad \frac{dQ_p}{dt} = I_F - \frac{Q_p(t)}{\tau_p} \longrightarrow Q_p(0^-) = \tau_p \cdot I_F$$

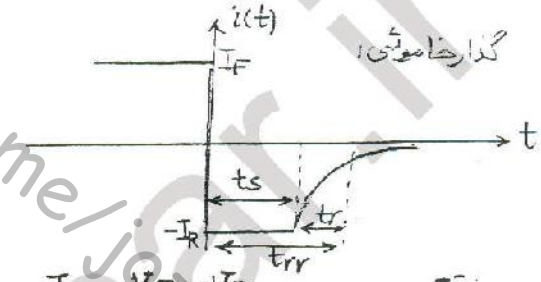


روشن : بایاس مستقیم I

خاموش : بایاس معکوس $-I_0$



گذار خاموشی:



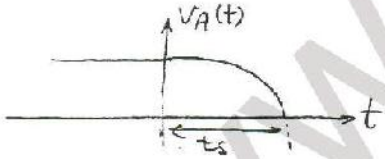
بایاس مستقیم :

$$V_F - I_F R_F - V_A = 0 \longrightarrow I_F = \frac{V_F - V_A}{R_F}$$

$$V_F \gg V_A \longrightarrow I_F \simeq \frac{V_F}{R_F}$$

بایاس معکوس :

$$V_R - I_R R_R + V_A = 0 \longrightarrow I_R = \frac{V_R + V_A}{R_R}$$



مفهوم خاموشی : $I < 0.1\, I_R$

t_{rr} : reverse recovery time زمان بازیافت معکوس

$t_{rr} = t_s + t_r$, t_s : storate time زمان انبارداری

t_r : recovery time زمان بازیافت

برای اینکه زمان t_s کوچکتر و کمتر شود باید بار کمتری ذخیره شود. برای اینکه بار کمتر ذخیره شود می توانیم یا V_A را کاهش دهیم و یا τ_p ، L_p را کاهش دهیم.

$$P_{n_0}\left[e^{qV_A/kT} - 1\right] . e^{-x/L_p} \qquad \tau_p \downarrow \quad L_p \downarrow$$

$\longrightarrow \quad Q_p(\infty) = I_F \cdot \tau_p$ رابطه مقابل نشان می‌دهد که در این حالت

سوئیچ کردن طولانی می‌شود.

$$P_n(x',t) = P_{n_0} \cdot e^{qV_A/KT} \cdot e^{-x'/L_p}$$

$$\Delta P_n(x',t) = P_{n_0}\left[e^{qV_A/KT} - 1\right] e^{-x'/L_p}$$

$$\longrightarrow Q_p(t) = I_F \tau_p (1 - e^{-t/\tau}) = qAP_{n_0}\left[e^{qV_A/KT} - 1\right] \int_0^\infty e^{-x'/L_p} dx'$$

$$\longrightarrow I_F \tau_p (1 - e^{-t/\tau}) = qAP_{n_0}\left[e^{qV_A/KT} - 1\right]\left[-L_p \cdot e^{-x'/L_p}\right]_0^\infty$$

$$= qAP_{n_0} L_p \left[e^{qV_A/KT} - 1\right]$$

$$\longrightarrow \frac{I_F \tau_p (1 - e^{-t/\tau})}{qAP_{n_0} L_p} + 1 = e^{qV_A/KT}$$

$$\longrightarrow V_A(t) = \frac{KT}{q} \ln\left[1 + \frac{I_F \tau_p (1 - e^{-t/\tau})}{qAP_{n_0} L_p}\right] \quad , \quad V_A(0) = 0$$

$$, \quad V_A(\infty) = \frac{KT}{q} \ln\left[1 + \frac{I_F \tau_p}{qAP_{n_0} L_p}\right]$$

با افزایش I_F ، یا τ_p ، $V_A(\infty)$ افزایش یافته و نتیجه سرعت سوئیچینگ کاهش

می‌یابد و به‌طور کلی چه در گذار روشنایی و چه در گذار خاموشی، هرچه بار افزایش

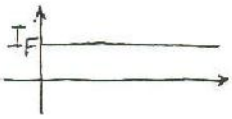
یابد سرعت سوئیچینگ کم می‌شود.

$$t_s = \tau_p \cdot Ln\left[1 + \frac{I_F \tau_p}{I_R \tau_p}\right] \longrightarrow t_s = \tau_p \cdot Ln\left[1 + \frac{I_F}{I_R}\right]$$

$$\longrightarrow \frac{I_F + I_R}{I_R} = e^{t_s/\tau_p} \xrightarrow{\text{در حالت دقیق تر}} \frac{I_F + I_R}{I_R} = erf\sqrt{t_s/\tau_p}$$

گذار روشنایی :

$$I = -I_0 \quad , \quad P_n = P_{n_0} e^{qV_A/KT} \quad , \quad \begin{array}{l} V_A > 0 \longrightarrow P_n > P_{n_0} \\ V_A < 0 \longrightarrow P_n < P_{n_0} \end{array}$$



هنگامی که پالس جریانی I_F به شکل مقابل را داریم ابتدا V_A از مقادیر منفی به صفر می رسد. در این مرحله حاملهای اکثریت پاسخ می دهند. سپس V_A از صفر به مقادیر مثبت افزایش می یابد که در این مرحله حاملهای اقلیت پاسخ می دهند.

شیب منحنی بار، جریان است و در اینجا چون جریان ثابت است لذا شیب منحنی بار باید ثابت باشد.

$$\underbrace{\frac{dQ_p(t)}{dt}}_{\text{تغییرات بار}} = \underbrace{i(t)}_{\text{جریان}} - \underbrace{\frac{Q_p(t)}{\tau_p}}_{\text{ترکیب}}$$

$$t > 0 : \frac{dQ_p(t)}{dt} = I_F - \frac{Q_p(t)}{\tau_p}$$

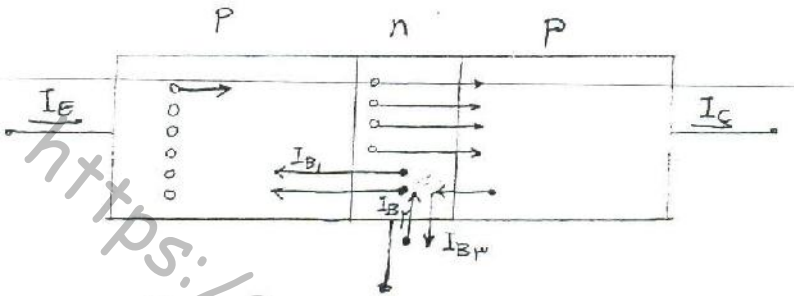
تبدیل لاپلاس :

$$sQ_p(s) - Q_p(0) = \frac{I_F}{s} - \frac{Q_p(s)}{\tau_p}$$

چون در لحظه صفر هیچ جریانی نداریم، لذا : $Q_p(0^+) = 0$

$$\longrightarrow \left[s + \frac{1}{\tau_p}\right] Q_p(s) = \frac{I_F}{s} \longrightarrow Q_p(s) = \frac{I_F}{s(s + 1/\tau_p)} = \frac{I_F \tau_p}{s} - \frac{I_F \cdot \tau_p}{s + 1/\tau_p}$$

$$\longrightarrow Q_p(t) = I_F \tau_p \left(1 - e^{-t/\tau_p}\right)$$



$$I_E = I_{Ep} + I_{En}$$

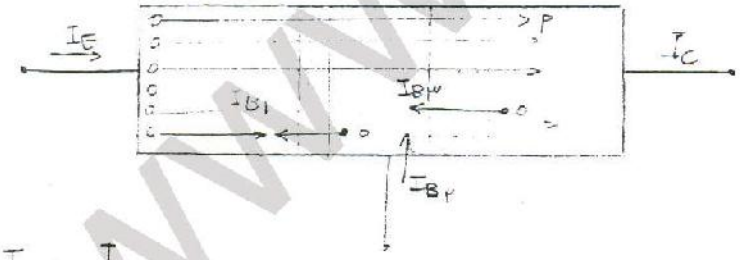
$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn}$$

$$I_B = I_{B_1} + I_{B_2} - I_{B_3}$$

$$I_{En} \equiv I_{B_1} \quad , \quad I_{Cn} \equiv I_{B_3}$$

I_{B_2} درنتیجه ترکیب بوجود می‌آید لذا در ترانزیستور ایده‌آل I_{B_2} صفر است.

تمرین : V_{EC} و I_C را برای pnp در هر چهار ناحیه مشخص کرده و جریانها را بنویسید. تمام موارد فوق را برای npn انجام دهید.



$$I_E = I_{Ep} + I_{En}$$

$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn}$$

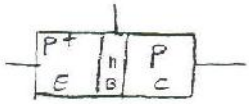
$$I_B = I_E - I_C = (I_{Ep} + I_{En}) - (I_{Cp} + I_{Cn}) \quad , \quad W \ll L_p$$

$$I_B = \underbrace{(I_{Ep} - I_{Cp})}_{I_{B_2}} + \underbrace{I_{En}}_{I_{B_1}} - \underbrace{I_{Cn}}_{I_{B_3}}$$

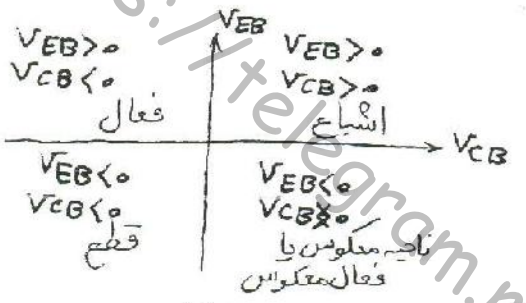
$$I_B = I_{B_1} + I_{B_2} - I_{B_3}$$

$$N_{AE} \gg N_{DB} \gg N_{AC}$$

کتاب سوم : ترانزیستور



$$\overset{N_E}{N_{AE}} \gg \overset{N_B}{N_{DB}} \gg \overset{N_C}{N_{AC}}$$

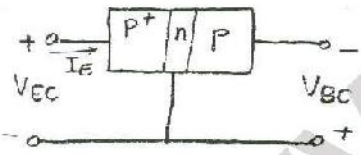


$$I_C \equiv I_{Cp} + I_{Cn}$$

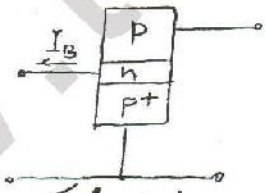
$$I_B = I_{B1} + I_{B2} - I_{B3}$$

$$, \xrightarrow{KCL} I_E = I_C + I_B$$

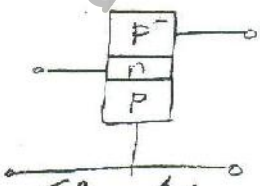
$$V_{EB} = V_{EC} + V_{CB} \xrightarrow{KVL} V_{EC} = V_{EB} - V_{CB}$$



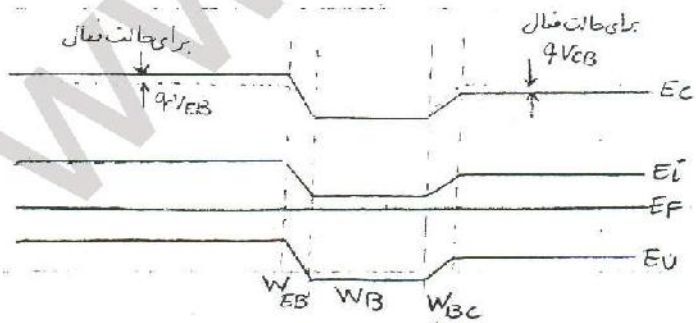
بیس مشترک



امیتر مشترک

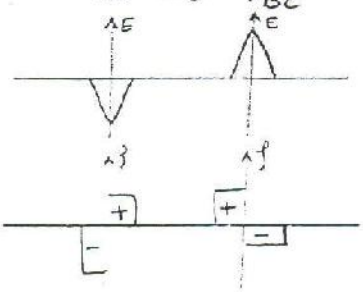


کلکتور مشترک



نوار انرژی در حالت تعادل

برای یک ترانزیستور PnP



$$\longrightarrow \beta_{dc} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{I_C/I_E}{1 - I_C/I_E} = \frac{\alpha_{dc}}{1-\alpha_{dc}}$$

$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn} = \alpha_T I_{Ep} + I_{Cn} = \alpha\gamma + \frac{I_{Ep}}{\gamma} + I_{Cn}$$

$$\longrightarrow I_C = \alpha_{dc} I_E + I_{Cn}$$

اگر ورودی باز باشد آن گاه : $I_E = 0$

$$\longrightarrow I_C(I_E=0) = I_{CB0} \longrightarrow I_C = \alpha_{dc} I_E + I_{CB0}$$

$$I_C = \alpha_{dc}(I_C + I_B) + I_{CB0}$$

$$(1-\alpha_{dc}) I_C = \alpha_{dc} I_B + I_{CB0}$$

$$I_C = \frac{\alpha_{dc}}{1-\alpha_{dc}} I_B + \frac{I_{CB0}}{1-\alpha_{dc}} = \beta_{dc} I_B + \frac{I_{CB0}}{1-\alpha_{dc}}$$

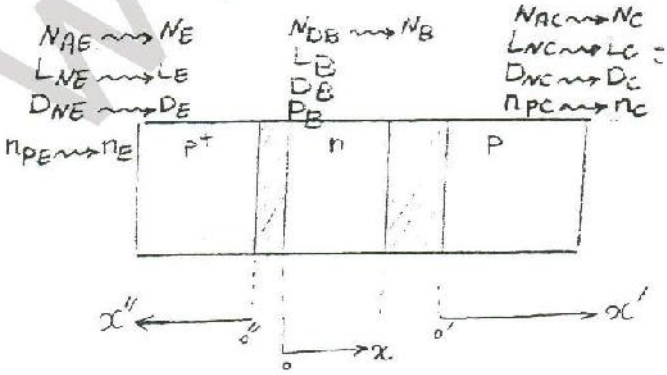
$$\frac{1}{1-\alpha_{dc}} = 1 + \frac{\alpha_{dc}}{1-\alpha_{dc}} = \frac{1-\alpha_{dc}+\alpha_{dc}}{1-\alpha_{dc}} = \frac{1}{1-\alpha_{dc}}$$

$$\frac{1}{1-\alpha_{dc}} = (\beta_{dc}+1)$$

$$I_C = \beta_{dc} I_B + (1+\beta_{dc}) I_{CB0}$$

$$I_C(I_B=0) = I_{CE0} \longrightarrow I_C = \beta_{dc} I_B + I_{CE0}$$

فصل دوم کتاب سوم :



$$I_E = I_{Ep} + I_{En}$$

$$I_E = I_{Ep}(0) + I_{En}(0'') = -qAD_B \left.\frac{d\Delta P_n(x)}{dx}\right|_{x=0} - qAD_E \left.\frac{d\Delta n_E(x'')}{dx''}\right|_{x''=0}$$

$$I_E = I_{Ep} + I_{En} \quad , \quad I_{Ep} \gg I_{En}$$

$$\longrightarrow I_E \approx I_{Ep}$$

$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn} \quad , \quad I_{Cp} \gg I_{Cn}$$

$$\longrightarrow I_C \approx I_{Cp}$$

$$I_{Cp} \simeq I_{Ep} \quad , \quad I_C \simeq I_E \quad , \quad I_C < I_E$$

$$I_B = \underset{\text{کوچک}}{I_{B_1}} + \underset{\text{کوچک}}{I_{B_2}} - \underset{\text{کوچک}}{I_{B_3}}$$

۱- ضریب انتقال از بیس

$$\alpha_T \equiv \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}}$$

در حالت ایده آل می خواهیم α_T برابر یک باشد. α_T بیان می کند که چند درصد حفره ها هنگام عبور از بیس ترکیب می شوند و چند درصد عبور کرده و وارد کلکتور می شوند.

۲- بازده تزریق امیتر

$$\gamma \equiv \frac{I_{Ep}}{I_E} = \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}}$$

۳- α_{dc}.

$$\alpha_{dc} \equiv \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_{Cp} + I_{Cn}}{I_{Ep} + I_{En}}$$

$$V_{EB} > 0 \quad , \quad I_{Cp} \gg I_{Cn}$$

$$\longrightarrow \alpha_{dc} \simeq \frac{I_{Cp}}{I_{Ep} + I_{En}} = \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}} \cdot \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}}$$

$$\longrightarrow \alpha_{dc} = \alpha_T \cdot \gamma \quad , \quad \alpha_{dc} \longrightarrow 1$$

۴- β_{dc}

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B}$$

شرایط مرزی:

$$\Delta P_B(0) = P_{B_0}\left(e^{qV_{EB}/KT} - 1\right)$$

$$\Delta P_B(w) = P_{B_0}\left(e^{qV_{CB}/KT} - 1\right)$$

$$\Delta n_E(0'') = n_{E_0}\left(e^{qV_{EB}/KT} - 1\right) \quad , \quad n_E(\infty'') = 0$$

$$n_C(0') = n_{P_0}\left(e^{qV_{CB}/KT} - 1\right) \quad , \quad \Delta n_C(\infty') = 0$$

در ناحیهٔ امیتر ~~و بدون ترکیب و تولید~~:

$$\frac{d^2 \Delta n_E(x'')}{dx''^2} = \frac{\Delta n_E(x'')}{L_E^2}$$

$$\Delta n_E(x'') = C_1 e^{-x''/L_E} + C_2 e^{x''/L_E}$$

$$\Delta n_E(\infty'') = 0 \longrightarrow C_2 = 0$$

$$\Delta n_E(0'') = n_{E_0}\left(e^{qV_{EB}/KT} - 1\right) \longrightarrow C_1 = n_{E_0}\left(e^{qV_{EB}/KT} - 1\right)$$

$$\rightarrow \Delta n_E(x'') = n_{E_0}\left(e^{qV_{EB}/KT} - 1\right) . e^{-x''/L_E}$$

در ناحیهٔ کلکتور:

$$\frac{d^2 \Delta n_C(x')}{dx'^2} = \frac{\Delta n_C(x')}{L_C^2}$$

$$\Delta n_C(x') = C_3 e^{-x'/L_C} + C_4 e^{x'/L_C}$$

$$\Delta n_C(\infty') = 0 \longrightarrow C_4 = 0$$

$$\Delta n_C(0') = n_{C_0}\left(e^{qV_{CB}/KT} - 1\right) \longrightarrow C_3 = n_{C_0}\left(e^{qV_{CB}/KT} - 1\right)$$

$$\longrightarrow \Delta n_C(x') \quad n_{C_0}\left(e^{qV_{CB}/KT} - 1\right) . e^{-x'/L_E}$$

در ناحیهٔ بیس و بدون ترکیب و تولید:

$$\frac{d^2 P_B(x)}{dx^2} = \frac{\Delta P_B(x)}{L_B^2}$$

$$L_B = \infty \quad , \quad \frac{d^2 P_B(x)}{dx^2} = 0 \longrightarrow \Delta P_B(x) = C_5 + C_6 x$$

$$C_5 = \Delta P_B(0) = P_{B_0}\left(e^{qV_{EB}/KT} - 1\right)$$

$$I_C = I_{Cp}(x=W) + I_{Cn}(0') = -qAD_B \frac{d\Delta P_B(x)}{dx}\Big|_{x=W} + qAD_C \frac{d\Delta n_C(x')}{dx'}\Big|_{x'=0'}$$

معادلات بالا را با چند فرض حل می‌کنیم:

ابتدا فرض می‌کنیم که در هر دو ناحیه تهی ترکیب و تولید نداریم. ۲- دومین فرض ما این است که در بدنه نیز ترکیب و تولید نداریم. ۳- تزریق ضعیف و چند فرض دیگر که در دیود نیز داشتیم.

اکنون باید $n_E(x'')$ ، $n_C(x')$ ، $P_B(x)$ را محاسبه کنیم.

$$\frac{\partial n_E(x,t)}{\partial t} = D_N \frac{\partial^2 n_E(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_E(x,t)}{\tau_n}$$

$$0 = D_N \frac{\partial^2 n_E(x,t)}{\partial x^2} - \frac{\Delta n_E(x,t)}{\tau_n}$$

حالت پایدار:

$$\longrightarrow \frac{d^2 \Delta n_E(x'')}{dx^2} - \frac{\Delta n_E(x'')}{L_n^2} = 0 \longrightarrow \Delta n_E(x'') = A_1 e^{-x''/L_E} + B_1 e^{x''/L_E}$$

به همین ترتیب

$$\longrightarrow \Delta n_C(x') = A_2 e^{-x'/L_C} + B_2 e^{x'/L_C}$$

$$\Delta P_B(x) = A_2 e^{-x/L_B} + B_2 e^{x/L_B}$$

شرایط مرزی

$$\longrightarrow B_1 , B_2 = 0$$

$$\Delta P_B(0'') = A_2 + B_2 = P_n$$

$$\frac{\partial \Delta P_n}{\partial t} = D_P \frac{\partial^2 \Delta P_n}{\partial x^2} - \frac{\Delta P_n}{\tau_P} \longrightarrow D_B \frac{d^2 \Delta P_B}{dx^2} = \frac{\Delta P_B(x)}{\tau_B}$$

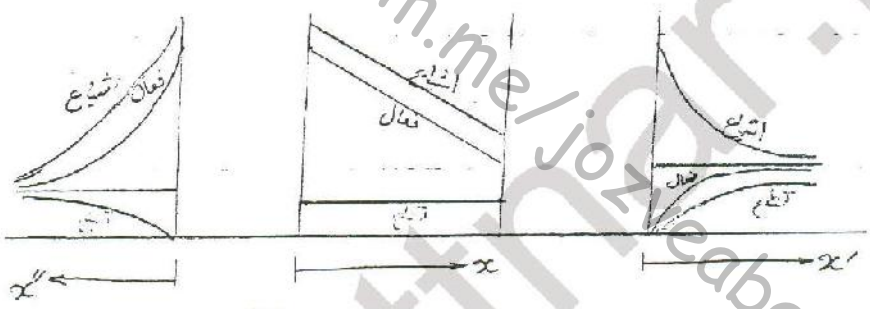
$$\longrightarrow \frac{d^2 \Delta P_B}{dx^2} = \frac{\Delta P_B(x)}{D_B \tau_B} = \frac{\Delta P_B(x)}{L_B^2}$$

پس قسمت اعظم جریان بیس جریان الکترونهایی است که از بیس به امیتر می‌روند.

تمرین: در ناحیهٔ بایاس معکوس نیز جریانها را بیابید. (ناحیهٔ قطع)

اکنون فرض می‌کنیم که ترکیب در بیس نیز داشته باشیم:

$$\longrightarrow \Delta P_B(x) = A_1 e^{-x/L_B} + A_r e^{x/L_B}$$



$$\longrightarrow A_1 + A_r = \Delta P_B(0) = P_{B_0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right)$$

$$A_1 e^{-W/L_B} + A_r e^{W/L_B} = P_{B_0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right)$$

$$\left[P_{B_0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - A_r\right] e^{-W/L_B} + A_r e^{W/L_B} = P_{B_0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right)$$

$$\longrightarrow A_r\left[e^{W/L_B} - e^{-W/L_B}\right] = -P_{B_0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) e^{-W/L_B} + P_{B_0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right)$$

$$\longrightarrow \begin{cases} A_r = \dfrac{P_{B_0}}{2\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)}\left[\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right) - \left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) e^{-W/L_B}\right] \\ A_1 = P_{B_0}\left[\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - \dfrac{1}{2\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)}\left[\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right) - \left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) e^{-W/L_B}\right]\right] \end{cases}$$

$$\longrightarrow \Delta P_B(x) = \frac{P_{B_0}}{2\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)}\left[\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) \ldots\right.$$

$$\Delta P_B(x) = P_{B_0}\left[\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right)\frac{\sinh\left(\frac{W-x}{L_B}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)} + \left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right)\frac{\sinh\left(\frac{x}{L_B}\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)}\right]$$

$$C_4 = \left[\Delta P_B(W) - C_3\right]/W = -\frac{\Delta P_B(0) - \Delta P_B(W)}{W}$$

$$\longrightarrow \Delta P_B(x) = \Delta P_B(0) - \frac{\Delta P_B(0) - \Delta P_B(W)}{W} x$$

$$I_E = +\frac{qAD_B}{W} P_{B_0}\left[(e^{qV_{EB}/kT} - 1)(e^{qV_{CB}/kT} - 1)\right] + qA\frac{D_E}{L_E} n_{E_0}(e^{qV_{EB}/kT} - 1)$$

$$I_E = qA\left[\frac{D_E}{L_E} n_{E_0} + \frac{D_B}{W} P_{B_0}\right](e^{qV_{EB}/kT} - 1) - qA\frac{D_B}{W} P_{B_0}(e^{qV_{CB}/kT} - 1)$$

چون فرض کرده‌ایم که در بیس ترکیب نداریم، در نتیجه تعداد حفره‌هایی که از امیتر وارد بیس می‌شوند برابر تعداد حفره‌هایی است که از بیس وارد کلکتور می‌شوند.

$$\longrightarrow I_{Cp}(W) = I_{Ep}(0)$$

$$\longrightarrow I_C = qA\frac{D_B}{W} P_{B_0}(e^{qV_{EB}/kT} - 1) - qA\left[\frac{D_C}{L_C} n_{C_0} + \frac{D_B}{W} P_{B_0}\right](e^{qV_{CB}/kT} - 1)$$

$$\longrightarrow I_B = I_E - I_C = \underbrace{qA\frac{D_E}{L_E} n_{E_0}(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1)}_{I_{B_1}} + \underbrace{qA\frac{D_C}{L_C} n_{C_0}(e^{qV_{CB}/kT} - 1)}_{I_{B_3}}$$

$I_{B_2} = 0$ است چون فرض کرده‌ایم که ترکیب نداریم.

در ناحیهٔ فعال:

$$I_E \cong qA\left[\frac{D_B}{W} P_{B_0} + \frac{D_E}{L_E} n_{E_0}\right] e^{qV_{EB}/kT}, \quad \xrightarrow{N_{AE} \gg N_{DB}} n_E \ll P_B$$

پس قسمت اعظم جریان امیتر جریان حفره‌ها است:

$$\rightarrow I_E \simeq qA\frac{D_B}{W} P_{B_0} e^{qV_{EB}/kT}$$

$$I_C \simeq qA\frac{D_B}{W} P_{B_0} e^{qV_{EB}/kT}$$

$$I_B \simeq qA\frac{D_E}{L_E} n_{E_0} e^{qV_{EB}/kT}$$

یعنی $I_{B_1} \gg I_{B_3}$:

$$\longrightarrow I_{B2} = \frac{qA}{\tau_B}\int_0^W \left[\Delta P_B(0) - \frac{\Delta P_B(0) - \Delta P_B(W)}{W}x\right]dx$$

$$I_{B2} = \frac{qA}{\tau_B}\left[\Delta P_B(0)W - \frac{1}{2}\left(\Delta P_B(0) - \Delta P_B(W)\right)W\right]$$

$$I_{B2} = \frac{qA}{2\tau_B}\left[\Delta P_B(0) + \Delta P_B(W)\right]W = \frac{qA}{2\tau_B}W P_{B_0}\left[\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}} - 1\right) + \left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}} - 1\right)\right]$$

برای بدست I_B شبه ایده آل I_{B2} با I_{B1} ترانزیستور ایده آل جمع می کنیم:

شبه ایده آل

$$I_B = qA\left[\frac{D_E}{L_E}n_{E_0} + \frac{W}{2\tau_B}P_{B_0}\right]\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}} - 1\right) + qA\left[\frac{D_C}{L_C}n_{C_0} + \frac{W}{2\tau_B}P_{B_0}\right]\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}} - 1\right)$$

حدود اعداد: n^+p^-

$n_{E_0} = 10^2$, $P_{B_0} = 10^4$, $D_E = 10\ cm$

$L_E = 10\ \mu$, $W = 1.5\ \mu$, $\tau_B = 1\ \mu s$, $n_{C_0} = 10^5$

$$I_{B1} \propto \frac{D_E}{L_E}n_{E_0} = \frac{10}{25\times10^{-4}}\times10^2 = 4\times10^5$$

$$I_{B2} \propto \frac{W}{2\tau_B}P_{B_0} = \frac{1.5\times10^{-4}}{2\times10^{-6}}\times10^4 = 0.75\times10^6 = 7.5\times10^5$$

پس I_{B2} بدست آمده در این بخش در حدود همان I_{B1} است.

$$I_{E2} \propto \frac{D_C}{L_C}n_{C_0} = \frac{15.6\times\ \ \times10^5}{39.5\times10^{-4}} = 2\times10^9$$

$$I_E = I_{Ep} + I_{En}$$

باتوجه به اینکه $I_{En} = I_{B1} \simeq I_{B2}$ لذا اگر ترکیب را در نظر نگیریم I_{B2} را نخواهیم داشت و باتوجه

به اینکه I_{En} خیلی کوچکتر از I_{Ep} است لذا بدون ترکیب I_E زیاد تغییر نمی کند:

$\longrightarrow$ شبه ایده آل $I_E = I_E$ ایده آل

$$I_E = I_{Ep}(0) + I_{En}(0'')$$

نسبت به قبل تغییری نمی‌کند

$$I_E = -qAD_B \frac{d\Delta P_B(x)}{dx}\Big|_{x=0} - qA \frac{d\Delta n_E(x'')}{dx''}\Big|_{x''=0}$$

$$I_E = -qAD_B P_{B_0}\left[\left(e^{qV_{EB}/kT}-1\right)\left(-\frac{1}{L_B}\right)\coth\left(\frac{W}{L_B}\right) + \left(e^{qV_{CB}/kT}-1\right)\left(\frac{1}{L_B}\right)\frac{1}{\sinh\frac{W}{L_B}}\right]$$

$$+ qA\frac{D_E}{L_E} n_{E_0}\left(e^{qV_{EB}/kT}-1\right)$$

$$I_E = qA\left[\frac{D_E}{L_E} n_{E_0} + \frac{D_B}{L_B} P_{B_0}\coth\left(\frac{W}{L_B}\right)\right]\left(e^{qV_{EB}/kT}-1\right) - qA\frac{D_B}{L_B} P_{B_0}\left(e^{qV_{CB}/kT}-1\right)\frac{1}{\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)}$$

... I_C را خودتان حساب کنید و جواب زیر را بدست آورید:

$$I_C = qA\frac{D_B}{L_B} P_{B_0}\frac{\left(e^{qV_{EB}/kT}-1\right)}{\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)} - qA\left[\frac{D_B}{L_B} P_{B_0}\coth\left(\frac{W}{L_B}\right) + \frac{D_C}{L_C} n_{C_0}\right]\left(e^{qV_{CB}/kT}-1\right)$$

$$, \quad I_B = qA\left[\frac{D_E}{L_E} n_{E_0} + \frac{D_B}{L_B} P_{B_0}\coth\left(\frac{W}{L_B}\right) - \frac{D_B}{L_B} P_{B_0}\frac{1}{\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)}\right]\left(e^{qV_{EB}/kT}-1\right)$$

$$- qA\left[\frac{D_B}{L_B} P_{B_0}\frac{1}{\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)} + \frac{D_B}{L_B} P_{B_0}\coth\left(\frac{W}{L_B}\right) + \frac{D_C}{L_C} n_{C_0}\right]\left(e^{qV_{CB}/kT}-1\right)$$

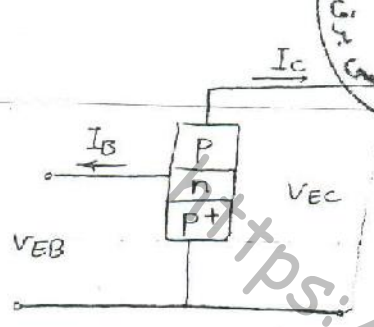
تمرین: مولفه‌های جریان را در I_B ، I_C ، I_E مشخص کنید.

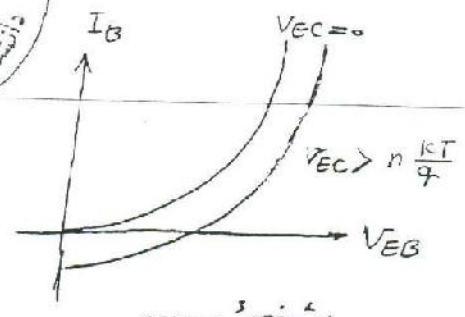
سه فرمول بدست آمده در بالا برای ترانزیستور واقعی می‌باشند.

ترانزیستور شبه ایده آل: ترانزیستوری است که در ناحیهٔ بیس ترکیب وجود دارد و منحنی غلظت آن خطی است. (منحنی P_B خط مستقیم است).

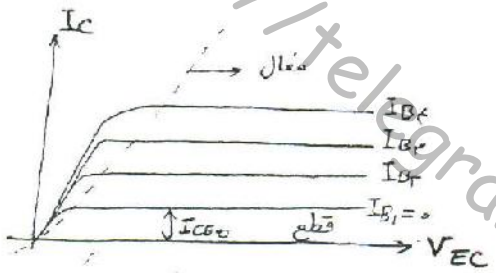
مقداری که باید ترکیب شود

$$I_{B_r} = \frac{\Delta Q_B}{\tau_B} = \frac{qA}{\tau_B}\int \Delta P_B(x)\,dx$$





مشخصهٔ ورودی



مشخصهٔ خروجی:

$I_{B_4} > I_{B_3} > I_{B_2} > I_{B_1}$

همراه هر جریان الکترونی که وارد امیتر می‌شود یک جریان حفره ای وجود دارد که از آن خارج می‌شود

$I_E = I_{Ep} + I_{En}$

جریان حفره‌ای $\ll$ جریان الکترونی

ولذا $I_{CE_0} \gg I_{CB_0}$ (درحالت امیتر مشترک)

$$I_C = \frac{qAD_B}{W} P_{B_0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right) - qA\left[\frac{D_C}{L_C} n_{C_0} + \frac{D_B}{W} P_{B_0}\right]\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}}-1\right)$$

درناحیهٔ فعال که $V_{EB} > 0$ است خواهیم داشت:

$$I_C \cong qA\frac{D_B}{W} P_{B_0} e^{\frac{qV_{EB}}{KT}} + qA\left[\frac{D_C}{L_C} n_{C_0} + \frac{D_B}{W} P_{B_0}\right] - \frac{qAD_B}{W} P_{B_0}$$

$$\longrightarrow \quad I_C \simeq qA\frac{D_B}{W} P_{B_0} e^{qV_{EB}/KT}$$

$$I_B = \frac{qAD_E}{L_E} n_{E_0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right) + qA\frac{D_C}{L_C} n_{C_0}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}}-1\right)$$

$$\longrightarrow \quad I_B = qA\frac{D_E}{L_E} n_{E_0} e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}$$

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\frac{D_B}{W} P_{B_0}}{\frac{D_E}{L_E} n_{E_0}} = \frac{D_B}{D_E}\cdot\frac{L_E}{W}\cdot\frac{P_{B_0}}{n_{E_0}} = \frac{D_B}{D_E}\cdot\frac{L_E}{W}\cdot\frac{N_{AE}}{N_{DB}}$$

$$I_C = I_{Cp} + I_{Cn} \xrightarrow{\text{به همین ترتیب}} \text{شبه ایده‌آل } I_C = \text{ایده‌آل } I_C$$

$$\text{شبه ایده‌آل } I_B = \text{ایده‌آل } I_B + I_{Bm}$$

رفتم پای تخته مشخصه های ورودی و خروجی امیتر مشترک را افتاده است

$$\alpha_{dC} = \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_{Cp} + I_{Cn}}{I_{Ep} + I_{En}} \simeq \frac{I_{Cp}}{I_{Ep} + I_{En}} \quad : V_{CB} = 0 \text{ برای}$$

$$\rightarrow I_C = \frac{qAD_B}{W} p_{B_0} \left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right)$$

$$\rightarrow I_E = qA\left[\frac{D_E}{L_E} n_{E_0} + \frac{D_B}{W} p_{B_0}\right]\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right)$$

$$\longrightarrow \alpha_{dC} = \frac{\frac{qAD_B}{W} p_{B_0}}{qA\left[\frac{D_E}{L_E} n_{E_0} + \frac{D_B}{W} p_{B_0}\right]} = \frac{1}{1 + \frac{D_E}{D_B} \cdot \frac{W}{L_E} \cdot \frac{n_{E_0}}{p_{B_0}}}$$

$$, \; n_{E_0} = \frac{n_i^2}{N_{AE}} \quad , \quad p_{B_0} = \frac{n_i^2}{N_{DB}}$$

$$\longrightarrow \alpha_{dC} = \frac{1}{1 + \frac{D_E}{D_B} \cdot \frac{W}{L_E} \cdot \frac{N_{DB}}{N_{AE}}}$$

برای $n_{E_0} = 10^{2}$, $p_{B_0} = 10^{4}$, $W = 10^{-4}\,cm$, $D_B = 20$

$D_E = 5$, $L_E = 20 \times 10^{-4}\,cm$

$$\longrightarrow \alpha_{dC} = \frac{1}{1 + \frac{1}{800}} \simeq 1 - \frac{1}{800} = 0/999$$

$$\gamma = \frac{I_{Ep}}{I_E} = \frac{qA\frac{D_B}{W} p_{B_0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right)}{qA\left[\frac{D_E}{L_E} n_{E_0} + \frac{D_B}{W} p_{B_0}\right]\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right)} = \frac{D_B/W \; p_{B_0}}{\frac{D_E}{L_E} n_{E_0} + \frac{D_B}{W} p_{B_0}}$$

$$\longrightarrow \gamma = \frac{1}{1 + \frac{1}{800}} = 0/999$$

$$\alpha_T = \frac{I_{Cp}}{I_{Ep}} = 1$$

ترکیب دو بیس نداریم.

$$I_R = qA\left[\frac{D_C}{L_C} n_{C_0} + \frac{D_B}{W} P_{B_0}\right]\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right)$$

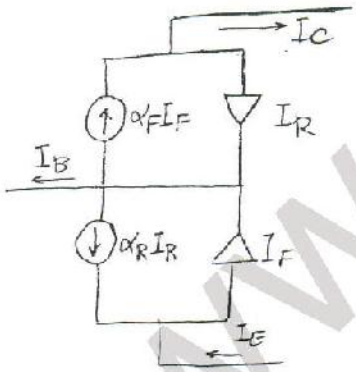
$$I_R = I_{R_0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right) \quad , \quad I_{R_0} = qA\left[\frac{D_C}{L_C} n_{C_0} + \frac{D_B}{W} P_{B_0}\right]$$

$$\alpha_F I_{F_0} = qA\frac{D_B}{W} P_{B_0} = \alpha_R I_{R_0}$$

$$I_B = I_E - I_C = I_F - \alpha_R I_R - \alpha_F I_F + I_R$$

$$\longrightarrow \quad I_B = (1-\alpha_F) I_F + (1-\alpha_R) I_R$$

$$\alpha_F I_{F_0} = \alpha_R I_{R_0} \equiv I_S \quad , \quad \begin{matrix} \alpha_F, I_F, I_S \\ \alpha_R, I_R, I_S \end{matrix}$$



$$I_B + \alpha_R I_R + \alpha_F I_F - I_R - I_F = 0$$

$$I_B = I_R - \alpha_R I_R + I_F - \alpha_F I_F$$

$$I_B = (1-\alpha_R) I_R + (1-\alpha_F) I_F$$

$$I_{CB_0} = I_C\,(I_E = 0) \quad , \quad I_{CE_0} = I_C\,(I_B = 0)$$

$$I_{CB_0}(I_E = 0) \longrightarrow I_F - \alpha_R I_R = 0$$

$$I_{F_0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - \alpha_R I_{R_0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right) = 0$$

$$I_{F_0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) + \alpha_R I_{R_0}$$

$$I_F = -\alpha_R I_{R_0}$$ در ناحیه فعال:

$$I_C = \alpha_F I_F - I_R$$

تمرین: در ترانزیستور npn نیز برای هر سه حالت امیتر مشترک بیس مشترک کلکتور مشترک موارد

یادگاری از کاوه — هر بخش، به چه عواملی بستگی دارد

انجام شده را بنویسید (تکرار نکنید). (از قبیل مشخصه‌های ورودی و خروجی، بحث راجع به آنها و ...)

$$I_E = qA\left[\frac{D_E}{L_E}n_{E_0} + \frac{D_B}{W}P_{B_0}\right]\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right) - qA\left(\frac{D_B}{W}P_{B_0}\right)\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}}-1\right)$$

$$\boxed{I_E = I_F - \alpha_R I_R}$$

$$I_F = qA\left[\frac{D_E}{L_E}n_{E_0} + \frac{D_B}{W}P_{B_0}\right]\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right)$$

$$I_F = I_{F_0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right) \quad , \quad I_{F_0} = qA\left[\frac{D_E}{L_E}n_{E_0} + \frac{D_B}{W}P_{B_0}\right]$$

$$, \quad \alpha_R I_R = qA\frac{D_B}{W}P_{B_0}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}}-1\right)$$

$$\alpha_R I_R = \alpha_R I_{R_0}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}}-1\right) \quad , \quad \alpha_R I_{R_0} = qA\frac{D_B}{W}P_{B_0}$$

$$I_E = I_{F_0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right) - \alpha_R I_{R_0}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}}-1\right)$$

$$I_C = \frac{qAD_B}{W}P_{B_0}\left[e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right] - qA\left[\frac{D_E}{L_C}n_{C_0} + \frac{D_B}{W}P_{B_0}\right]\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}}-1\right)$$

$$I_C = \alpha_F I_F - I_R$$

$$\alpha_F I_F = \frac{qAD_B}{W}P_{B_0}\left[e^{qV_{EB}/KT}-1\right]$$

$$\alpha_F I_F = \alpha_F I_{F_0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right) \quad , \quad \alpha_F I_{F_0} = qA\frac{D_B}{W}P_{B_0}$$

تمام انحرافاتی که در دیود وجود داشت در ترانزیستور نیز وجود دارد و علاوه بر آنها چند پدیدهٔ دیگر نیز در ترانزیستور وجود دارد.

$$\alpha_T \equiv \frac{I_{CP}}{I_{EP}} \quad , \quad \gamma = \frac{I_{EP}}{I_E}$$

$$\alpha_{dc} = \frac{I_C}{I_E} = \frac{I_{CP}+I_{Cn}}{I_{EP}+I_{En}} = \frac{I_{CP}}{I_{EP}+I_{En}}$$

$$\beta_{dc} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{\alpha_{dc}}{1-\alpha_{dc}}$$

$$I_{CBO} = I_C\,(I_E=0) \quad , \quad I_{CEO} = I_C\,(I_B=0)$$

حال می‌خواهیم آیا این ضرایب تعریف شده ثابت باقی می‌مانند یا نه.

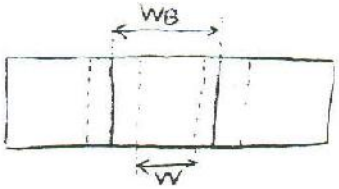
$$I_E = qA\left[\frac{D_E}{L_E}n_{e_0} + \frac{D_B}{W}P_{B_0}\right]\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right) - qA\frac{D_B}{W}P_{B_0}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}}-1\right)$$

$$I_E\,(\text{ناحیهٔ فعال}) \equiv qA\left[\frac{D_E}{L_E}n_{E_0} + \frac{D_B}{W}P_{B_0}\right]\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}\right) + \frac{D_B}{W}P_{B_0}\,qA$$

$$N_{AE} \gg N_{DB} \longrightarrow n_{E_0} \ll P_{B_0}$$

$$\longrightarrow I_E\,(\text{ناحیهٔ فعال}) \cong qA\frac{D_B}{W}P_{B_0}\,e^{qV_{A}/KT} + qA\frac{D_B}{W}P_{B_0}$$

$$\longrightarrow I_E\,(\text{ناحیهٔ فعال}) \simeq qA\frac{D_B}{W}P_{B_0}\,e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}$$



$$W = W_B - W_{EB} - W_{CB}$$

$$I_{CB_0} = I_C \,(I_E = 0)$$

$$I_{CB_0} = \alpha_F(-\alpha_R I_{R_0}) - I_R = -\alpha_F \alpha_R I_{R_0} - I_{R_0}\left(e^{qV_{CB}/KT} - 1\right)$$

$$I_{CB_0} = -\alpha_F \alpha_R I_{R_0} + I_{R_0} = (1 - \alpha_F \alpha_R)\, I_{R_0}$$

$$I_{CE_0} = I_C \,(I_B = 0)$$

$$I_B = 0 \;:\quad (1-\alpha_F) I_F + (1-\alpha_R) I_R = 0 \longrightarrow I_F = \frac{-(1-\alpha_R) I_R}{1-\alpha_F}$$

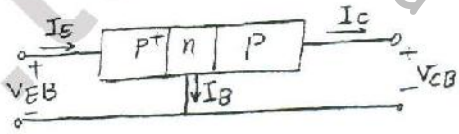
$$I_R = -I_{R_0} \qquad I_F = +\frac{1-\alpha_R}{1-\alpha_F} I_{R_0}$$

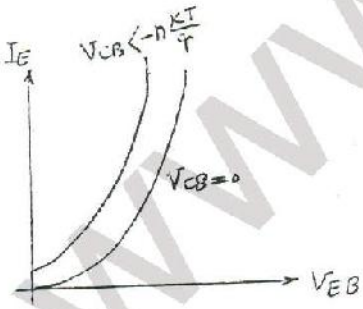
$$I_C = \alpha_F I_F - I_R = \alpha_F I_F + I_{R_0}$$

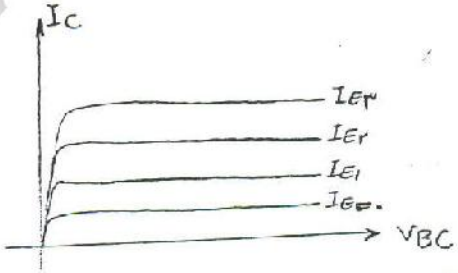
$$I_{CE_0} = \alpha_F I_F + I_{R_0} = \frac{(1-\alpha_R)\alpha_F}{1-\alpha_F} I_{R_0} + I_{R_0}$$

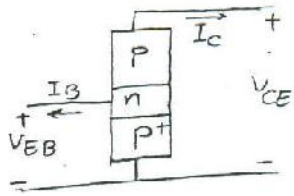
$$I_{CE_0} = \frac{\alpha_F - \alpha_R \alpha_F + 1 - \alpha_F}{1-\alpha_F} = \frac{1-\alpha_R \alpha_F}{1-\alpha_F} I_{R_0}$$

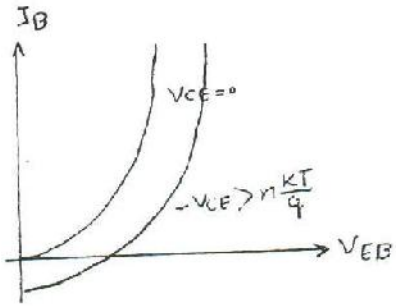
ترانزیستور ایده آل

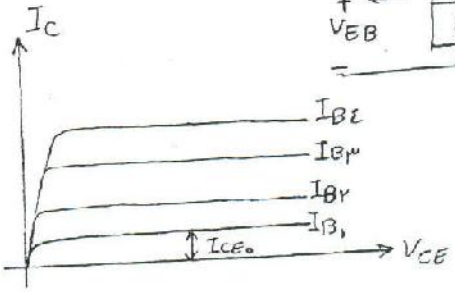












با افزایش ولتاژ عرض ناحیهٔ تهی W کم می‌شود و در نتیجه مقدار I_E بیشتر خواهد شد.

$$I_C = qA\left[\frac{D_B}{W}P_{B_0} - \frac{W}{2\tau_B}P_{B_0}\right]\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right) - qA\left[\frac{D_C}{L_C}n_{C_0} + \frac{D_B}{W}P_{B_0} + \frac{W}{2\tau_B}P_{B_0}\right] \times \left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}}-1\right)$$

برای رسم I_C نیاز داریم که I_E ثابت باشد. همان طور که بیان شد چون I_E افزایش یافته است برای ثابت ماندن آن V_{EB} را خودمان کم می‌کنیم. حال با توجه به اینکه W کم و V_{EB} کم شده است لذا مقدار I_C (با توجه به رابطه آن) تقریباً ثابت می‌ماند و این نیز در منحنی I_C به ازای I_E ثابت کاملاً مشهود است.

به غیر از این پدیدهٔ کم شدن W دو پدیده دیگر نیز وجود دارد: یکی جریان سطحی در اطراف بیس و کلکتور و دیگری تولید در ناحیهٔ تهی. با توجه به این سه پدیده (انحراف)، منحنی I_C کاملاً افقی نبوده و مقداری شیب خواهد داشت.

$$I_B = qA\frac{D_E}{L_E}n_{E_0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}}-1\right) + qA\frac{D_C}{L_C}n_{C_0}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}}-1\right) + I_{Br}$$

$$I_B \cong qA\frac{D_E}{L_E}n_{E_0}\left(e^{qV_{EB}/KT}\right) + I_{Br}$$

$$I_E = I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - \alpha_R I_{R0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right)$$

در ناحیهٔ فعال:

$$\boxed{I_E \simeq I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}}$$

$$I_C = \alpha_F I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - I_{R0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right)$$

ناحیهٔ فعال:

$$\boxed{I_C \cong \alpha_F I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}}$$

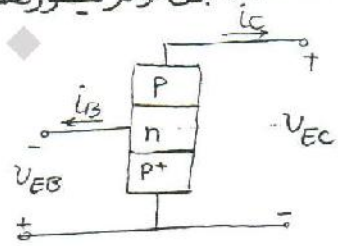
$$I_B = (1-\alpha_F)\, I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}$$

سیگنال کوچک:

مدل هیبرید-پی: ابتدا خازنهای پائین را بررسی می‌کنیم:

$f < 5\times10^{8}\ \text{Hz} = 500\ \text{MHz}$

این خازنها مانند C های برای ترانزیستور هستند.



$$i_B = I_B + i_b \qquad v_{EB} = V_{EB} + v_{eb}$$

$$i_C = I_C + i_c \qquad v_{EC} = V_{EC} + v_{ec}$$

$$\underline{i_E = I_E + i_e} \qquad v_{CB} = V_{CB} + v_{cb}$$

در امیتر مشترک وجود ندارند.

$$i_E = I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - \alpha_R I_{R0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right) \simeq I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}$$

$$i_C = \alpha_F I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - I_{R0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right) \simeq \alpha_F I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}$$

$$i_B = (1-\alpha_F) I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) + (1-\alpha_R) I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) \simeq (1-\alpha_F) I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}$$

$$,\ I_{F0} = qA\left[\frac{D_E}{L_E} L_{E0} + \frac{D_B}{W} P_{B0}\right]$$

$$v_{CB} = v_{CE} + v_{EB} = v_{EB} - v_{EC}$$

$$i_C = f_1(v_{EB}, v_{EC}) = f_1(V_{EB} + v_{eb},\ V_{EC} + v_{ec})$$

$$i_B = f_2(v_{EB}, v_{EC}) = f_2(V_{EB} + v_{eb},\ V_{EC} + v_{ec})$$

$$i_C = f_1(V_{EB}, V_{EC}) + \left.\frac{\partial f_1}{\partial v_{EB}}\right|_{V_{EC}} v_{eb} + \left.\frac{\partial f_1}{\partial v_{EC}}\right|_{V_{EB}} v_{ec} + \cdots$$

$$\longrightarrow I_C = f_1(V_{EB}, V_{EC}) \quad , \quad i_c \cong \left.\frac{\partial f_1}{\partial v_{EB}}\right|_{V_{EC}} v_{eb} + \left.\frac{\partial f_1}{\partial v_{EC}}\right|_{V_{EB}} v_{ec}$$

$$i_c = g_m v_{eb} + g_o v_{ec} \longrightarrow g_m = \frac{i_c}{v_{eb}}\ (v_{ec} = 0)$$ ترانس کانداکتانس

$$g_o = \frac{i_c}{v_{ec}}\ (v_{eb} = 0)$$ کانداکتانس (قابلیت هدایت) خروجی

$$, \quad r_o = \frac{1}{g_o} = \frac{v_{ec}}{i_c}$$ مقاومت خروجی برای وقتی که سیگنال ورودی اتصال کوتاه باشد.

به همین ترتیب برای جریان بیس حساب می‌کنیم:

$$i_B = f_2(V_{EB} + v_{eb},\ V_{EC} + v_{ec})$$

$$i_B = f_2(V_{EB}, V_{EC}) + \left.\frac{\partial f_2}{\partial v_{EB}}\right|_{V_{EC}} v_{eb} + \left.\frac{\partial f_2}{\partial v_{EC}}\right|_{V_{EB}} v_{ec} + \cdots$$

$$I_B = f_2(V_{EB}, V_{EC}) \quad , \quad i_b \cong \left.\frac{\partial f_2}{\partial v_{EB}}\right|_{V_{EC}} v_{eb} + \left.\frac{\partial f_2}{\partial v_{EC}}\right|_{V_{EB}} v_{ec}$$

$$i_b = (g_\pi + g_\mu)\, v_{eb} - g_\mu v_{ec}$$

$$\longrightarrow g_\pi + g_\mu = \frac{i_b}{v_{eb}}\ (v_{ec} = 0)$$ قابلیت هدایت ورودی (کانداکتانس)

$$g_\mu = -\frac{i_b}{v_{ec}}\ (v_{eb} = 0)$$ قابلیت هدایت فیدبک معکوس

$$I_E = I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - \alpha_R I_{R0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right)$$

در ناحیهٔ فعال:

$$\boxed{I_E \simeq I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}}$$

$$I_C = \alpha_F I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - I_{R0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right)$$

ناحیهٔ فعال:

$$\boxed{I_C \cong \alpha_F I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}}$$

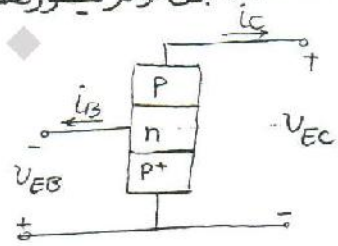
$$I_B = (1-\alpha_F)\, I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}$$

سیگنال کوچک:

مدل هیبرید-پی: ابتدا خازنهای پائین را بررسی می‌کنیم:

$f < 5\times10^{8}\ \text{Hz} = 500\ \text{MHz}$

این خازنها مانند C های برای ترانزیستور هستند.



$$i_B = I_B + i_b \qquad v_{EB} = V_{EB} + v_{eb}$$

$$i_C = I_C + i_c \qquad v_{EC} = V_{EC} + v_{ec}$$

$$\underline{i_E = I_E + i_e} \qquad v_{CB} = V_{CB} + v_{cb}$$

در امیتر مشترک وجود ندارند.

$$i_E = I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - \alpha_R I_{R0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right) \simeq I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}$$

$$i_C = \alpha_F I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) - I_{R0}\left(e^{qV_{CB}/kT} - 1\right) \simeq \alpha_F I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}$$

$$i_B = (1-\alpha_F) I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) + (1-\alpha_R) I_{F0}\left(e^{qV_{EB}/kT} - 1\right) \simeq (1-\alpha_F) I_{F0}\, e^{qV_{EB}/kT}$$

$$,\ I_{F0} = qA\left[\frac{D_E}{L_E} L_{E0} + \frac{D_B}{W} P_{B0}\right]$$

$$v_{CB} = v_{CE} + v_{EB} = v_{EB} - v_{EC}$$

$$\longrightarrow \quad Q_I = 0 \quad , \quad Q_B = Q_N$$

$$i_C(t) = \frac{Q_B}{\tau_t} \quad \text{یا} \quad \boxed{i_C(t) = \frac{Q_N(t)}{\tau_t}}$$

$$Q_B(V_{CB}=0) \equiv Q_{sat}$$

$$Q_{sat} = I_{Csat} \cdot \tau_t \quad , \quad V_{EB} \ll V_S \quad \text{یا} \quad V_{EB} = 0$$

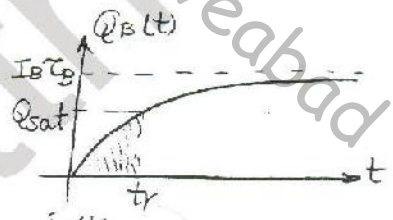
$$\longrightarrow V_S - R_S\, i_B(t) = 0$$

$$V_{EB} = V_S - R_S\, i_B(t) \qquad \longrightarrow I_B \cong \frac{V_S}{R_S}$$

$$V_{EC} = V_{CC} - R_L \cdot i_C(t)$$

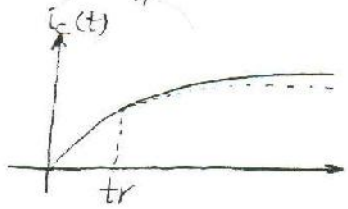
$$\longrightarrow \frac{dQ_B(t)}{dt} = i_B(t) - \frac{Q_B(t)}{\tau_B} \quad , \quad i_B(t) = I_B$$

$$\longrightarrow Q_B(t) = I_B \tau_B (1 - e^{-t/\tau_B})$$



$$i_C(t) = \frac{Q_N}{\tau_t} \quad , \quad Q_N = Q_{sat}$$

$$\longrightarrow i_C(t) = \frac{Q_B(t)}{\tau_t} = \frac{I_B \tau_B (1 - e^{-t/\tau_B})}{\tau_t}$$



$$\frac{I_C}{I_B} = \frac{\frac{\tau_B I_B}{\tau_t}}{I_B} = \frac{\tau_B}{\tau_t} = \beta_F$$

$$I_{Csat} = \frac{Q_{sat}}{\tau_t} = \frac{I_B \tau_B (1 - e^{-t_r/\tau_B})}{\tau_t} \longrightarrow t_r = \tau_B \ln\left[\frac{1}{1 - \frac{I_{Csat} \cdot \tau_t}{I_B \cdot \tau_B}}\right]$$

$$t_r = \tau_B \ln\left[\frac{1}{1 - \frac{\tau_t}{\tau_B} \cdot \frac{R_S}{R_L} \cdot \frac{V_{CC}}{V_S}}\right]$$

برای کاهش t_r یا باید I_B ، I_{Csat} را کاهش دهیم یا I_B را افزایش دهیم.

$$t_r = \tau_B \ln\left[\frac{1}{1 - \frac{V_{CC}}{V_S} \cdot \frac{R_S}{R_L} \cdot \frac{\tau_t}{\tau_B}}\right]$$

سوئیچینگ در ترانزیستور :

اشباع :	$V_{CB}>0$	$V_{EB}>0$	روشنایی
	$V_{CB}<0$	$V_{EB}>0$	خاموشی
قطع :	$V_{CB}<0$	$V_{EB}<0$	

اگر بخواهیم از اشباع به قطع برویم بیشترین بار باید در بیس جابجا شود.

$V_{EB}>0$, $V_{CB}=0$ آستانهٔ اشباع , $Q_B = Q_N$ بار بیس

$V_{EB}=0$, $V_{CB}>0$ آستانهٔ اشباع , $Q_B = Q_I$

$\longrightarrow Q_B = Q_N + Q_I$

$Q_N = qA\frac{W}{2}\Delta P_B(0)$, $Q_I = qA\frac{W}{2}\Delta P_B(W)$

$\Delta P_B(0) = P_{B_0}(e^{qV_{EB}/kT}-1)$, $\Delta P_B(W) = P_{B_0}(e^{qV_{CB}/kT}-1)$

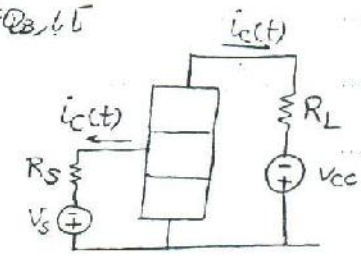
$I_E = I_{Ep} + I_{En} \simeq I_{Ep}$, $I_{En} = I_{B_1} \simeq 0$

$I_C = I_{Cp} + I_{Cn} \simeq I_{Cp}$, $I_{Cn} = I_{B_3} \simeq 0$

$I_B = I_{B_1} + I_{B_3} - I_{B_2} \simeq I_{B_2} = \frac{Q_B}{\tau_p}$ زمانی که طول می‌کشد تا بار Q_B ترکیب شود

$$\frac{dQ_B(t)}{dt} = i_B(t) - \frac{Q_B(t)}{\tau_B}$$

$i_C(t) = ?$



$\Delta P_B(W) = 0$ for $V_{CB}=0$ ناحیهٔ فعال در آستانهٔ اشباع

تمرین: برای کلکتور مشترک، بیس مشترک و یا ترانزیستور npn و یا برای ناحیهٔ غیرفعال همین قطع و اشباع

مراحل را طی کنید.

$$i_C \simeq \alpha_F I_{F_0} e^{qv_{EB}/kT}$$

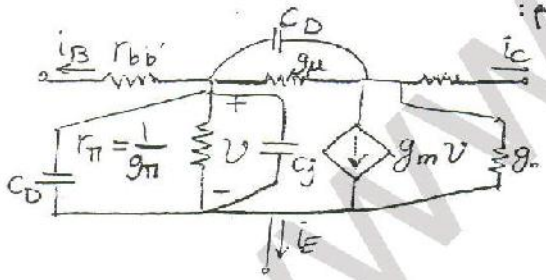
در ترانزیستور ایده آل مهمترین تقریبی که در نظر می گرفتیم این بود که عرض بیس ثابت است و لذا I_{F_0} هم ثابت خواهد بود.

(فقط برای ترانزیستور ایده آل)

$$g_m = \frac{i_c}{v_{eb}}(v_{ec}) = \frac{\partial F_1}{\partial v_{EB}}\Big|_{v_{EC}} = \frac{q}{kT}\alpha_F I_{F_0} e^{qv_{EB}/kT}$$

$$g_m = \frac{q}{kT} i_C \simeq \frac{q}{kT} I_C \quad , \quad g_o = \frac{i_c}{v_{ec}}(v_{eb}=0) = \frac{\partial F_1}{\partial v_{EC}}\Big|_{v_{EB}} = 0$$

در نتیجه می توانیم مدار معادل زیر را داشته باشیم:



$$, \quad v = -v_{eb}$$

تمرین:
مقادیر عناصر مدار را بالا را محاسبه کرده و برای npn نیز انجام دهید.

گذار خاموشی :

$I_B \rightsquigarrow 0$

$$\frac{dQ_B}{dt} = -\frac{Q_B}{\tau_B} \quad , \quad Q_B = Q_0 e^{-t/\tau_B}$$

$I_B \rightsquigarrow -I_B$

$$\frac{dQ_B}{dt} = -I_B - \frac{Q_B(t)}{\tau_B} \longrightarrow Q_B(t) = I_B \tau_B (2e^{-t/\tau_B} - 1)$$

$Q_B(t) > Q_{sat}$

$$i_C(t = t_{sd}) = \frac{\tau_B I_B}{\tau_t}(2e^{-t_{sd}/\tau_B} - 1)$$

$$\longrightarrow t_{sd} = \tau_B \ln \frac{I_B \tau_B}{I_{Csat} \cdot \tau_t \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2}\frac{I_B \tau_B}{I_{Csat}\tau_t}\right]}$$

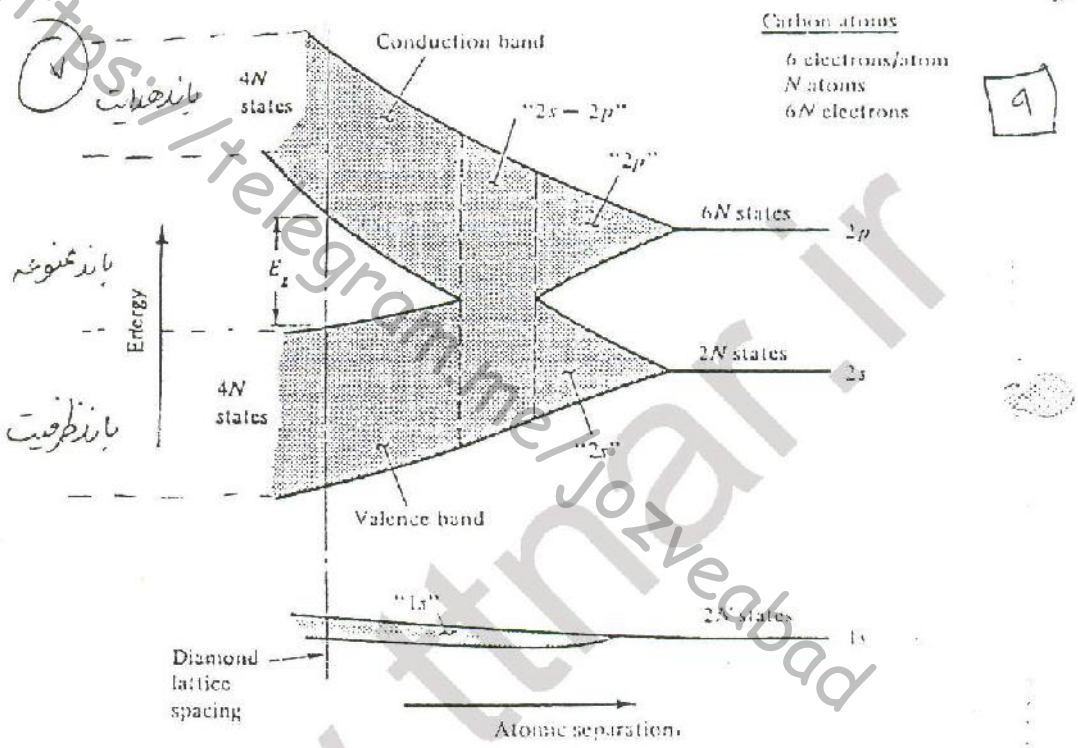


Figure 3-3. Formation of energy bands as a diamond crystal is formed by bringing together isolated carbon atoms. (From *Electrons and Holes in Semiconductors*, by W. Shockley, (C) 1950 by Litton Educational Publishing Co., Inc.; by permission of Van Nostrand Reinhold, Co., Inc.)

$1s^2 2s^2 2p^2$ in the ground state. Each atom has available two $1s$ states, two $2s$ states, six $2p$ states, and higher states (see Tables 2-1 and 2-2). If we consider N atoms, there will be $2N$, $2N$, and $6N$ states of type $1s$, $2s$, and $2p$, respectively. As the interatomic spacing decreases, these energy levels split into bands, beginning with the outer ($n = 2$) shell. As the "$2s$" and "$2p$" bands grow, they merge into a single band composed of a mixture of energy levels. This band of "$2s$–$2p$" levels contains $8N$ available states. As the distance between atoms approaches the equilibrium interatomic spacing of diamond, this band splits into two bands separated by an *energy gap* E_g. The upper band (called the *conduction band*) contains $4N$ states, as does the lower (*valence*) band. Thus, apart from the low-lying and tightly bound "$1s$" levels, the diamond crystal has two bands of available energy levels separated by an energy gap E_g wide, which contains no allowed energy levels for electrons to occupy. This gap is sometimes called a "forbidden band," since in a perfect crystal it contains no electron energy states.