فیزیک الکترونیک

دانشگاه آزاد اسلامی –واحد تهران جنوب

استاد حسینی جوبه

تهیه کننده : حامد مظاهری

Hamed.mazaheri@Gmail.com

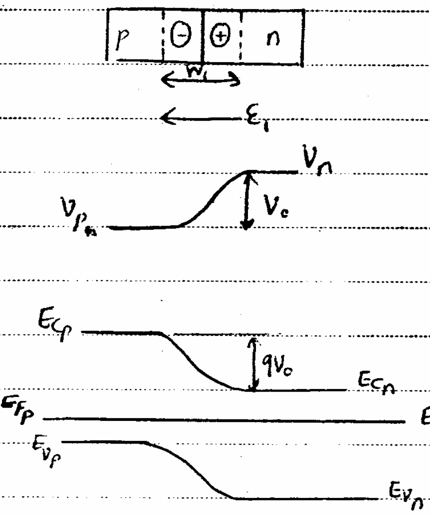
شما نیز می توانید مطالب و مقالات خود را برای ما ارسال کنید تا با نام خودتان در سایت قرار داده شود تا دیگر دوستان نیز از آن بهره برند .

سیوندهای pn: درحالت تعادل وتحت بایاس از نظر پتانسیل پیوند، دیاگرام باندانرژی، جریانهای دریفت و دیفیوژن

تحت بایاس:
- $V_f > 0$ بایاس مستقیم (forward biased) → سمت p مثبت تر از n است
- $-V_r < 0$ بایاس معکوس (Reverse) → سمت n مثبت تر از p است

+ p|n −

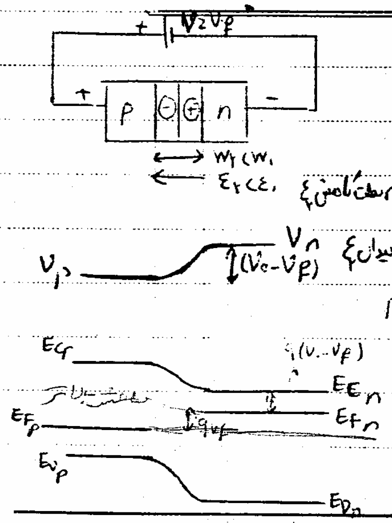
درحالت تعادل:



	حرکت حامل ϕ	جهت جریان J
1) دیفیوژن حفره	$\xrightarrow{a_1}$ p→n	→
2) دریفت حفره	$\xleftarrow{b_1 = a_1}$ $\lvert b \rvert = \lvert a \rvert$	←
3) دیفیوژن الکترون	$\xleftarrow{c_1}$ $\lvert c \rvert = \lvert d \rvert$	→
4) دریفت الکترون	$\xrightarrow{d_1 = c_1}$	←
	جمع کل $c_1 + d_1$	←

این جریانها با هم مساوی و مختلف الجهت هستند.

در بایاس مستقیم که p مثبت تر شود:



	حرکت حامل ϕ	جهت جریان J
دیفیوژن حفره ← نفوذ حفره های اکثریت p به داخل n بعلت کاهش $\mathcal{E}$	$\xrightarrow{a_2 \gg a_1}$	→
دریفت حفره یعنی حفره های اقلیت n به p بعلت میدان $\mathcal{E}$	$\leftarrow$ $b_2 \ll a_2$	←
دیفیوژن الکترون نفوذ الکترونهای اکثریت n به p	$\xleftarrow{c_2 \gg c_1}$	→
دریفت الکترون یعنی الکترونهای اقلیت p به n	$\rightarrow$ $a_2 \ll c_2$	←

در بایاس مستقیم جریان دریفت کمتر از جریان دیفیوژن است

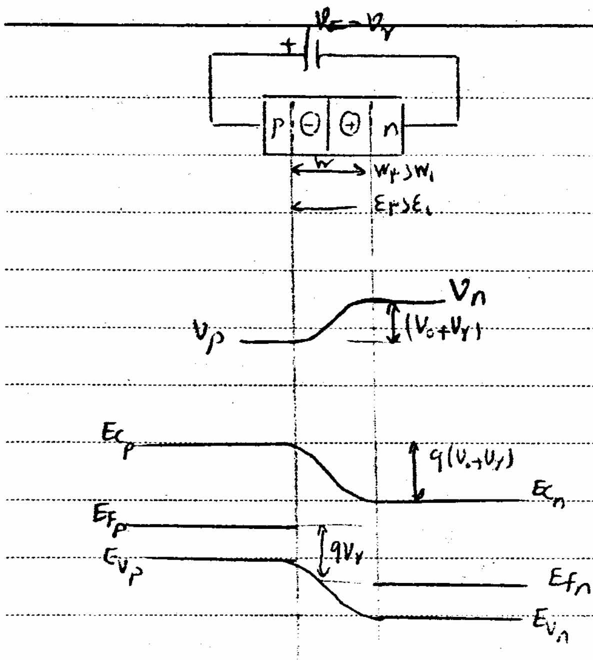
جریان دیفیوژن الکترون و حفره با هم جمع شده و جریان دیود ایجاد میکند

(۷۰)

در بایاس مستقیم. با اعمال $V = +V_f$ میدان الکتریکی اعمالی بر خلاف میدان الکتریکی داخلی است در نتیجه باعث غلبه جریان دیفیوژن بر جریان دریفت می شود چون جریان دیفیوژن ناشی از حاملهای اکثریت است. انتظار جریان قابل توجه می رود

- با اعمال بایاس معکوس: میدان اعمالی هم جهت با میدان داخلی است در نتیجه جریان دیفیوژن تقریبا صفر و جریان دریفت ایجاد می شود جریان دریفت چون ناشی از حاملهای اقلیت است بسیار کوچک است بنابراین جریان معکوس ناچیزی ایجاد می شود

در بایاس معکوس:



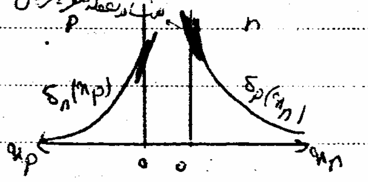
	حرکت حامل Φ	جهت جریان J
دیفیوژن حفره	$\rightarrow$ $a_2 < a_1$	$\rightarrow$
دریفت حفره	$\leftarrow$ $b_2 > a_2$	$\leftarrow$
دیفیوژن الکترون	$\leftarrow$ $a_2 < c_1$	$\rightarrow$
دریفت الکترون	$\rightarrow$ $d_2 < c_2$	$\leftarrow$

جریان خیلی کمی در اثر دریفت در حالت معکوس ایجاد می شود به دلیل اینکه سطح پتانسیل قوی تر شده و جلوی حرکت حاملهای اکثریت را می گیرد.

* در بایاس مستقیم: به علت کاهش سد پتانسیل پیوند ($V_0 - V_f$) جریان ناشی از جریان نفوذی (دیفیوژن) حاملها خواهد بود که چون مربوط به حاملهای اکثریت می باشد جریان زیادی خواهد بود

در بایاس معکوس: به علت افزایش سد پتانسیل پیوند $V_0 + V_r$ جریان نفوذی بسیار کم است و جریان ناشی از جریان دریفت حاملهای اقلیت که بسیار کم هستند ایجاد می شود که با افزایش میدان الکتریکی جریان، افزایش محسوسی نخواهد داشت.

رابطه جریان و ولتاژ پیوند pn: $I = I_0 \left(e^{qV/kT} - 1\right)$ ← جریان پیوند (V: ولتاژ پیوند)

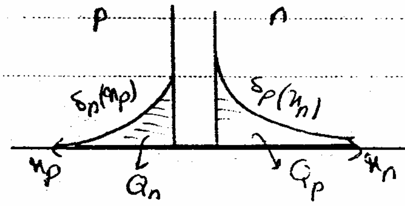


از دو روش:

۱) روش اول: شیب حاملهای نفوذی در مرز پیوند

$$I_p(x_n = 0) - I_n(x_p = 0) = I$$

روش دوم: بارهای تزریقی در هر سمت در حالت پایدار



$$I = I_p - I_n \qquad \begin{cases} I_n = \dfrac{Q_n}{\tau_n} \\ I_p = \dfrac{Q_p}{\tau_p} \end{cases}$$

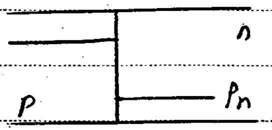
- چگالی حاملهای اضافی تزریقی:

$\delta_p(x_n) = ?$

$\delta_n(x_p) = ?$

(1) در حالت تعادل داشتیم: $\frac{p_p}{p_n} = e^{\frac{qV_0}{kT}} \Rightarrow p_p = p_n e^{\frac{qV_0}{kT}}$

چگالی حفره‌های سمت p p_p



(1) از رابطه $\rightarrow N_A = p_p$

همان p_p چون حفره‌های بایاس باشد چندان تغییر نمی‌کند

$\frac{p(x_{p_0})}{p(x_{n_0})} = e^{\frac{q(V_0-V)}{kT}}$

تحت بایاس V

$V = \begin{cases} +V_f & \text{بایاس مستقیم} \\ -V_r & \text{بایاس معکوس} \end{cases}$

تغییر می‌کند که تراکم حفره‌ها در ناحیه n

تحت بایاس سد و عبارت تحلیل می‌شود $V_0 - V$

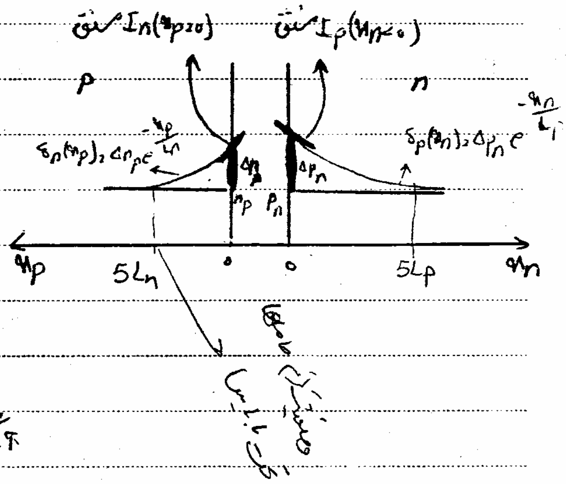
$\frac{p_n e^{\frac{qV_0}{kT}}}{p(x_{n_0})} = e^{\frac{q(V_0-V)}{kT}}$

چگالی حفره‌ها در ناحیه n $\Rightarrow p(x_{n_0}) = p_n e^{\frac{qV}{kT}}$

چگالی حفره‌ها اضافی در ناحیه n $\Delta p_n = p(x_{n_0}) - p_n$

همان تراکم حفره‌های اضافی

چگالی حفره‌ها اضافی در ناحیه n $\Delta p_n = p_n \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$



$\Delta p_n = \delta_p(x_n = 0) = p_n\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$

(2) در حالت تعادل $\frac{n_n}{n_p} = e^{\frac{qV_0}{kT}} \longrightarrow n_n = n_p e^{\frac{qV_0}{kT}}$

(3) در بایاس $\frac{n(x_{n_0})}{n(x_{p_0})} = e^{\frac{q(V_0-V)}{kT}}$

$n(x_{p_0}) = n_p e^{\frac{qV}{kT}}$

$\frac{n_p e^{\frac{qV_0}{kT}}}{n(-x_{p_0})} = e^{\frac{q(V_0-V)}{kT}}$

چگالی الکترون‌های اضافی در ناحیه P $\Delta n_p = n_p\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$

تراکم الکترون‌ها در ناحیه P $n(-x_{p_0}) = n_p e^{\frac{qV}{kT}}$

$\Delta n_p = n(-x_{p_0}) - n_p = n_p\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$

$$\Delta n_p = \delta_n(x_p=0) = n_p\left(e^{\frac{qV}{kT}}-1\right)$$

معادله دیفیوژن حفره:

$$\frac{\partial^2 \delta_p(x_n)}{\partial x_n^2} - \frac{\delta_p(x_n)}{L_p^2} = 0$$

حل معادله : ① $\delta_p(x_n) = \delta_p(x_n=0)\, e^{-\frac{x_n}{L_p}} = \Delta p_n\, e^{-\frac{x_n}{L_p}}$

چگالی حفره‌های اضافی در n

حل با فرض $L_p \ll$ طول ناحیه n

معادله دیفیوژن الکترون:

$$\frac{\partial^2 \delta_n(x_p)}{\partial x_p^2} - \frac{\delta_n(x_p)}{L_n^2} = 0$$

② $\delta_n(x_p) = \Delta n_p\, e^{-\frac{x_p}{L_n}}$

چگالی الکترونهای اضافی در p

حل با فرض $L_n \ll$ طول ناحیه p

راه اول: مشتق گیری:

ضریب نفوذ

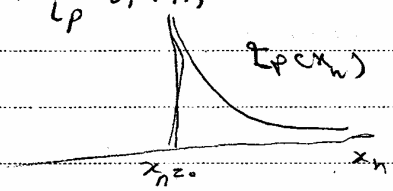
چگالی جریان دیفیوژن حفره $J_p(diff) = -qD_p \frac{d\delta_p(x_n)}{dx_n}$ ①

سطح مقطع سوند

$$I_p(x_n) = A \cdot J_p(diff)$$

سطح مقطع

$$I_p(x_n) = qA\frac{D_p}{L_p}\Delta p_n\, e^{-\frac{x_n}{L_p}} = qA\frac{D_p}{L_p}\delta_p(x_n)$$

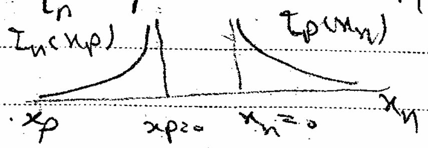


③ $I_p(x_n=0) = qA\frac{D_p}{L_p}\Delta p_n$

جریان نفوذ الکترون $J_n(diff) = qD_n \frac{\partial \delta_n(x_p)}{\partial x_p}$ ④

$$I_n(x_p) = A \cdot J_n(diff) \Rightarrow I_n(x_p) = -qA \frac{D_n}{L_n} \Delta n_p e^{\frac{-x_p}{L_n}}$$

$$I_n(x_n) = \frac{-qAD_n}{L_n} \delta n(x_p)$$



(F) $$I_n(x_p=0) = -qA \frac{D_n}{L_n} \Delta n_p$$

*

$$I = I_p^{\theta}(x_n=0) - I_n^{F}(x_p=0) \xrightarrow{\text{تامل}}$$

چون محورهای x_p و x_n
خلاف جهت هم هستند

$$I = qA\left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p\right)\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$$

$$I = I_0\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$$

I_0 وابسته به مشخصات فیزیکی و هندسی پیوند دارد.

با توجه $$p_n = \underbrace{p_p}_{N_A} e^{\frac{-qV_0}{kT}}$$

$$n_p = \underbrace{n_n}_{N_D} e^{\frac{-qV_0}{kT}}$$

$$I_0 = qA\left(\frac{D_p}{L_p} N_A + \frac{D_n}{L_n} N_D\right) e^{\frac{-qV_0}{kT}} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$$

$$\Rightarrow I = I_0\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$$

روش دوم: $$Q_p = qA \int_0^{\infty} \delta_p(x_n)\, dx_n$$

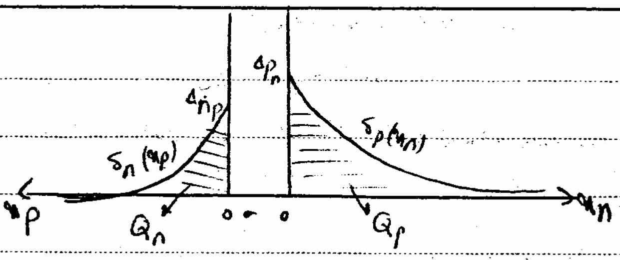
$$Q_p = qA \Delta p_n \int_0^{\infty} e^{\frac{-x_n}{L_p}} dx_n$$

$$Q_p = qAL_p \Delta p_n$$

---

(۷۴) * $$I_n(x_n) = -qAD_n \delta n(x_p)$$

جریان کل در هر نقطه $$I(x) = I_p(x_n) - I_n(x_p) \qquad I(x=0) = I_p(x_n=0) - I_n(x_p=0)$$



$$L_p^2 = D_p \tau_p$$

$$I_p(x_n = 0) = \frac{Q_p}{\tau_p} = qA\frac{L_p}{\tau_p}\Delta p_n$$

$$I_p(x_n = 0) = qA\frac{D_p}{L_p}\Delta p_n$$

$$Q_n = -qA\int_0^\infty \delta_n(x_p)\,dx_p = -qAL_n\Delta n_p$$

$$I_n(x_p = 0) = \frac{Q_n}{\tau_n} = -qA\frac{D_n}{L_n}\Delta n_p$$

$$I = I_p(x_n = 0) - I_n(x_p = 0)$$

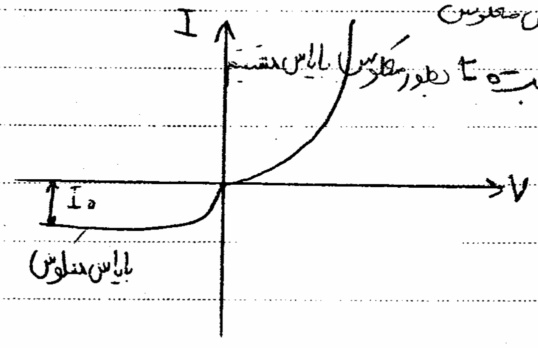
$$I = I_0\left(e^{qV/kT} - 1\right)$$

بایاس مستقیم $\Rightarrow V = V_f \xrightarrow{if} V_f \gg \frac{kT}{q} \Rightarrow I = I_0 e^{qV_f/kT}$

بایاس معکوس $\Rightarrow V = -V_r \xrightarrow{if} -V_r \ll \frac{-kT}{q} \Rightarrow I = I_0\left(\cancel{e^{-qV_r/kT}} - 1\right) \Rightarrow I = I_0$

$I = -I_0$ در بایاس معکوس

I_0 جریان اشباع معکوس جریان بستگی به T به طور معکوس



مثال: در یک پیوند پله‌ای pn دیاگرام باند انرژی در حالت تعادل را رسم کرده و مقدار V_0 را بدست آورید و با مقدار حاصل از فرمول مقایسه کنید

ب) x_{n0} و x_{p0}، W، Q^+، Q^- و $\mathcal{E}$ را بدست آورید. $\mathcal{E}(x)$ و $V(x)$ را رسم کنید

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

$\frac{kT}{q} = 0.0259\ V$

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

$N_D = 10^{16} \times 5\ cm^{-3}$

$E_g = 1.1\ eV$

$\epsilon = 11.8\, \epsilon_0$

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$

تمرین) در پیوند بلندی pn تحت بایاس $V_F = 0.37$ ، I_p و I_n را برحسب n رسم نمایید ، $\delta p(n)$ ، $\delta n(x_p)$ را رسم نمایید

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

$\mu_p = 400$

$\mu_n = 1000$

$\tau_p = \tau_n = 10\mu s$

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

- نحوهٔ تغییرات چگالی حاملهای اقلیت تحت بایاس :

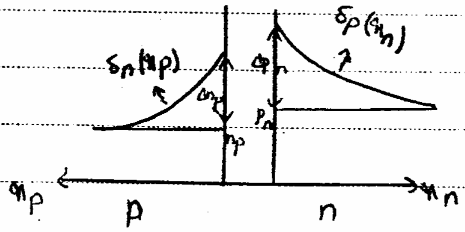
n چگالی حفره‌ها در : $\delta_p(x_n) = \Delta p_n e^{-\frac{x_n}{L_p}}$

p چگالی الکترونها در : $\delta_n(x_p) = \Delta n_p e^{-\frac{x_p}{L_n}}$

$\Delta p_n = p_n(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$

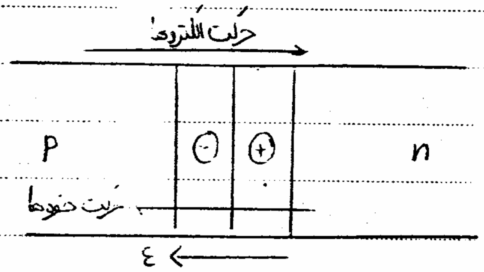
$\Delta n_p = n_p(e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$

در بایاس مستقیم ⇐



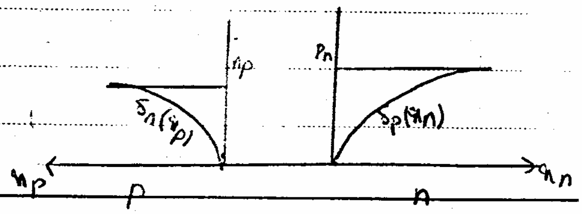
در بایاس معکوس :

$V = -V_r \Rightarrow \begin{cases} -V_r \ll -\frac{kT}{q} \\ e^{-\frac{qV_r}{kT}} = 0 \end{cases}$



$\Delta p_n = -p_n$

$\Delta n_p = -n_p$

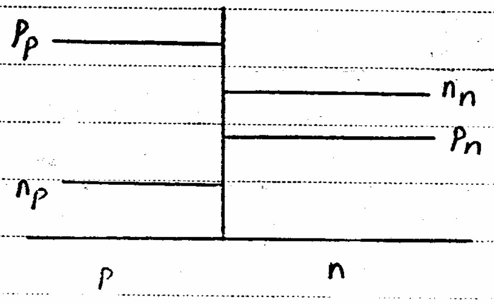


- پیوند p^+n : یا غلظت در قسمت p خیلی بیشتر از قسمت n است.

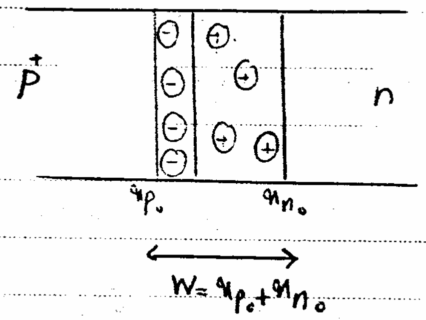
$$\underset{\text{در } n}{n_n} = N_D \ll \underset{\text{در } p}{N_A} = p_p$$

$$\frac{n_i^2}{p_n} \ll \frac{n_i^2}{n_p}$$

$\boxed{\text{در } p^+n : \quad n_p \ll p_n}$



چون $N_D \ll N_A \leftarrow x_{n_0} \gg x_{p_0}$



$$I = I_0 \left(e^{qV/kT} - 1 \right)$$

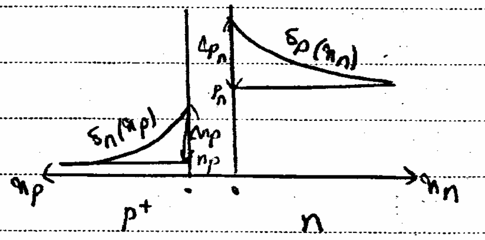
$$I = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) \left(e^{qV/kT} - 1 \right)$$

در p^+n چون $n_p \ll p_n$ پس از $\frac{D_n}{L_n} n_p$ صرف‌نظر:

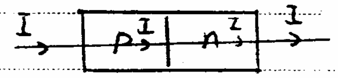
$$I \simeq qA \frac{D_p}{L_p} p_n \left(e^{qV/kT} - 1\right)$$

جریان در پیوند p^+n تقریباً جریان حفره‌ها می‌باشد که در مدارات سوئیچینگ بکار می‌رود.

$$I = I_p(x_n = 0)$$



- جریان‌های داخل پیوند pn :



$$I = I_0 \left(e^{qV/kT} - 1\right)$$

$$I = I_p + I_n$$

در سمت n : $I(x_n) = I_p(x_n) + I_n(x_n)$

قبلاً بدست آمده : $I_{p_1} = I_p(x_n) = qA \frac{D_p}{L_p} p_n \left(e^{qV/kT} - 1\right) e^{-x_n/L_p}$

$$I_n(x_n) = I(x_n) - I_p(x_n)$$

$$\Rightarrow I_n(x_n) = qA\left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p\right)\left(e^{qV/kT} - 1\right) - qA \frac{D_p}{L_p} p_n \left(e^{qV/kT} - 1\right) e^{-x_n/L_p}$$

$$I_n(x) = qA \frac{D_p}{L_p} p_n \left(e^{qV/kT} - 1\right)\left(1 - e^{-x_n/L_p}\right) + qA \frac{D_n}{L_n} n_p \left(e^{qV/kT} - 1\right)$$

$I_n(x) = I_{n2}(x_n) + I_{n3}$ ← مستقل از x_n

وابسته به x_n

در قسمت p : $I(x_p) = I_p(x_p) + I_n(x_p)$

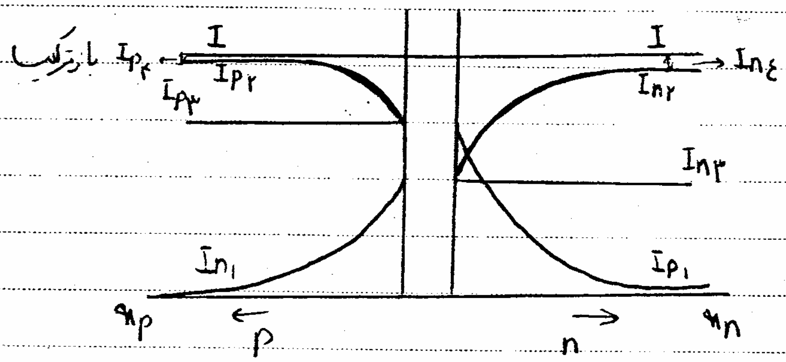
قبلاً بدست آمده : $I_{n_j}' = I_n(x_p) = qA \dfrac{D_n}{L_n} n_p \left(e^{qV/kT} - 1\right) e^{-\frac{x_p}{L_n}}$

$$I_p(x_p) = I(x_p) - I_n(x_p)$$

$$I_p(x_p) = qA \frac{D_n}{L_n} n_p \left(e^{qV/kT} - 1\right)\left(1 - e^{-\frac{x_p}{L_n}}\right) + qA \frac{D_p}{L_p} p_n \left(e^{qV/kT} - 1\right)$$

$$I_p(x_p) = \underbrace{I_{p2}(x_p)}_{\text{وابسته به } x_p} + \underbrace{I_{p3}}_{\text{مستقل از } x}$$

جریانهای داخل پیوند pn :



I_{p_1} : جریان حفره‌های نفوذی از p به n

I_{n_1} : جریان الکترونهای نفوذی از n به p

I_{n2} : جریان الکترونهای قسمت n جهت بازترکیب با حفره‌های نفوذی I_{p_1}

I_{p2} : جریان حفره‌های قسمت p جهت بازترکیب با الکترونهای نفوذی I_{n_1}

I_{p_3} : جریان حفره‌های اکثریت قسمت p جهت تأمین جریان حفره‌های نفوذی به n

I_{n_3} : جریان الکترون‌های اکثریت قسمت n جهت تأمین جریان الکترون‌ها نفوذی به p

I_{n_4} : جریان الکترون‌ها اکثریت قسمت n که در ناحیه تخلیه در محل پیوند با حفره‌ها (I_{p_4}) بازترکیب می‌شوند (جریان بسیار ناچیز)

I_{p_4} : جریان حفره‌های اکثریت قسمت p که در ناحیه تخلیه در محل پیوند با الکترون‌ها (I_{n_4}) بازترکیب می‌شوند

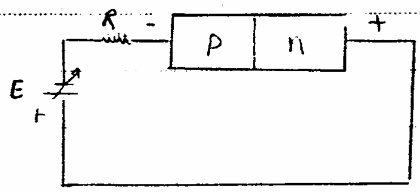
در رابطه I و V ظاهر نشد چون کوچک بوده

I : در هر V که ارتفاع منحنی جمع شوند I کل که از داخل پیوند عبور می‌کند را می‌دهند.

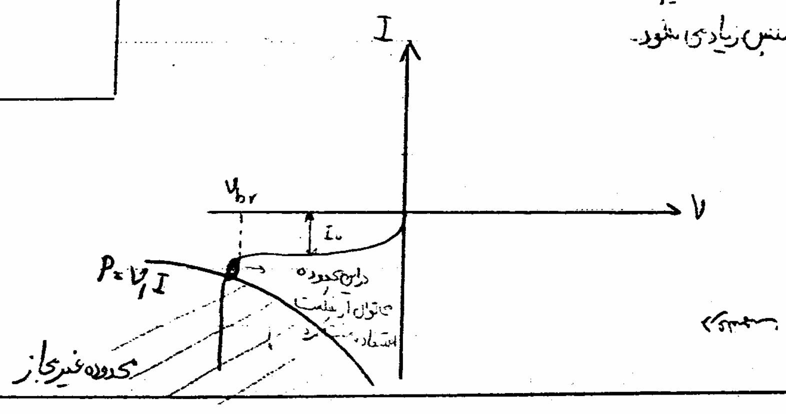
شکست در پیوند pn :

در بایاس معکوس و با اعمال ولتاژ حدود ولتاژ شکست (V_{br} : break down) عمل شکست انجام می‌شود و جریان معکوس زیادی از پیوند عبور می‌کند.

اگر این جریان معکوس توسط مدار محدود شود و در حد مجاز توان قابل تحمل پیوند pn باشد، شکست مخرب نخواهد بود.



اگر E را خیلی زیاد کنیم جریان آنچنان زیاد نمی‌شود تا وقتی که به ولتاژ شکست می‌رسد و سپس زیاد می‌شود.



$$I = \frac{E - V_{br}}{R}$$

- شکست پیوند در اثر افزایش بیش از حد میدان الکتریکی در مرز پیوند ایجاد می‌شود

ولتاژ پیوند در حالت تعادل

شدت میدان الکتریکی $\varepsilon_0 = \frac{2(V_0 + V_r)}{W}$ ولتاژ معکوس

عرض ناحیه تخلیه

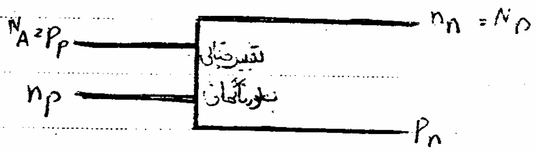
عوامل تعیین‌کننده } کاهش W ← افزایش ε_0

در افزایش ε_0 } افزایش V_r ← افزایش ε_0

شکست } زنری

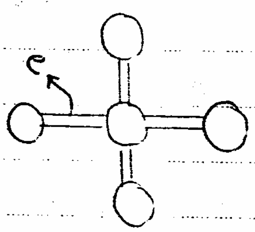
بهمنی

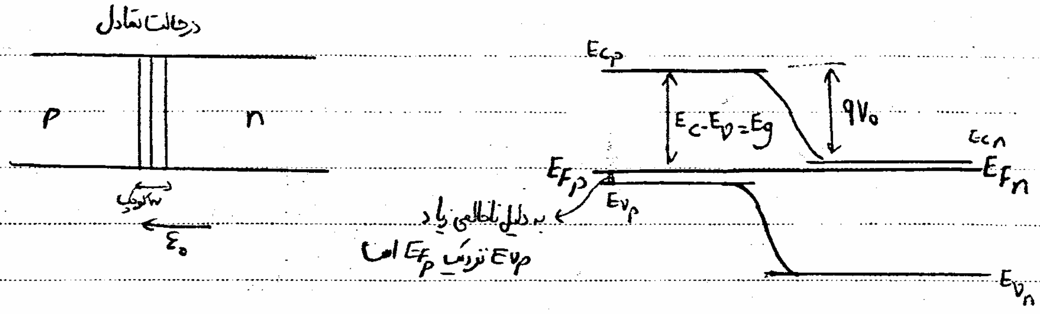
شکست زنری: پیوندهای با ناخالصی زیاد دو طرف n و p ← که باعث کاهش W و افزایش ε_0 می‌شود



N_A و N_D زیادتر (از 10^{17}) هستند

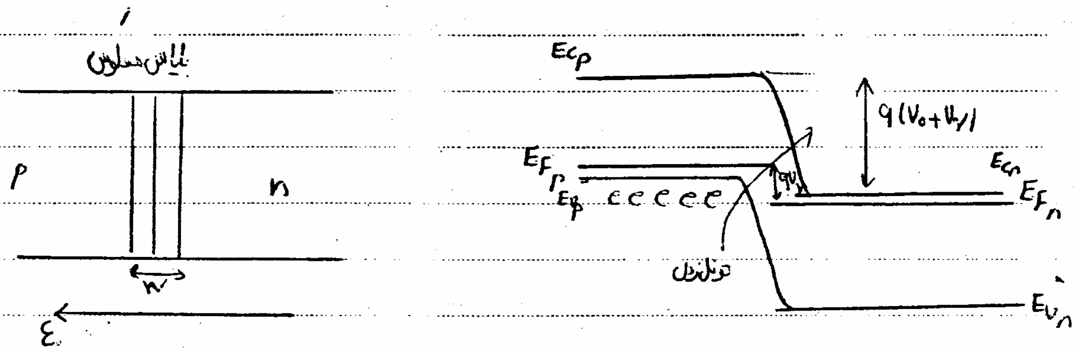
در شکست زنری: میدان الکتریکی توی باعث آزادسازی مستقیم الکترونها از پیوندهای کووالانسی می‌شود در نتیجه جریان معکوس ناگهان به شدت زیادی شود





نتیجه کلی ⇒ V_0 (ولت) $<$ E_g (eV)

با اعمال بایاس



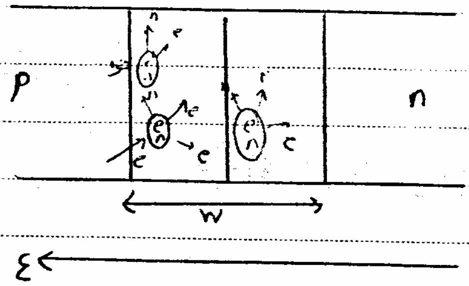
تونل زدن: حرکت از باند ظرفیت p به باند هدایت n را تونل زدن گویند (به دلیل ناخالصی زیاد و W کم)

* شکست زنری در ولتاژهای پایین (کمتر از 6V) اتفاق می افتد

شکست بهمنی (آوالانچ Avalanch) ناخالصی در قسمت p و n معمولی است (زیاد نیست)
(با افزایش V_r ← $\mathcal{E}_0$ افزایش می یابد)
افزایش میدان الکتریکی باعث افزایش انرژی جنبشی الکترونها و برخورد آنها با پیوند کووالان و آزادسازی زوج الکترون حفره (EHP)

جدید پر انرژی و پرشتاب که شوند این حاملها جدید آزاد شده خود باعث آزادی حاملهای جدید می شوند و بصورت بهمن وار ادامه دارد

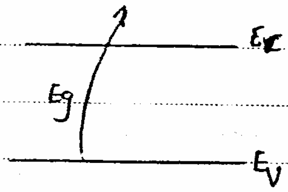
و یکدفعه جریان بهمن زیادی برقرار می‌شود.



$$M = \frac{1}{1-\left(\frac{V}{V_{br}}\right)^{n}}$$

ضریب حاملی M ؛ V : ولتاژ معکوس اعمالی ؛ V_{br} : ولتاژ شکست

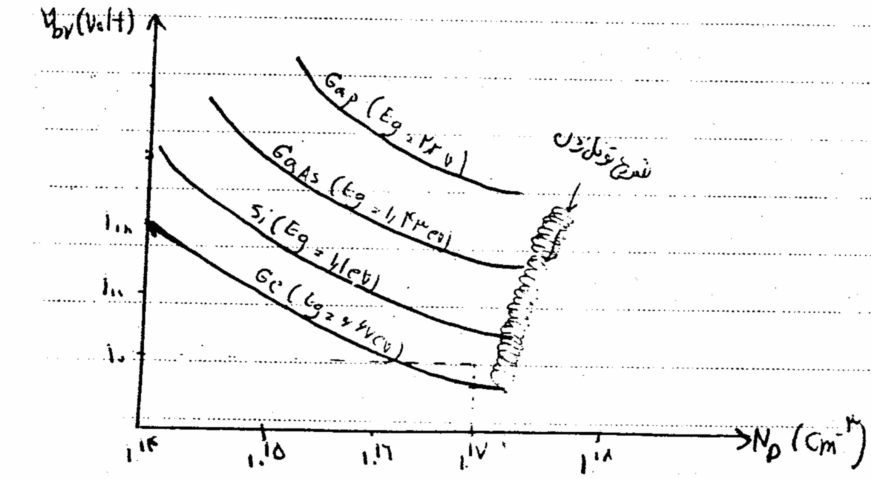
$$\begin{cases} V \to V_{br} \\ M \to \infty \end{cases}$$



هرچه E_g بزرگ‌تر باشد باید انرژی بیشتری داشته باشد و ولتاژ شکست بیشتر باشد.

$$\begin{cases} \text{ناخالصی کمتر} \\ E_g \ \text{بیشتر} \end{cases} \Rightarrow \text{ولتاژ شکست بالاتر}$$

نمودار تغییرات ولتاژ شکست برحسب چگالی اتمهای ناخالصی دهنده N_D برای نیمه‌هادی‌های مختلف در پیوند p^+n



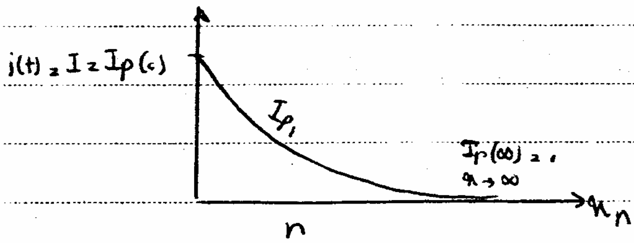
شرایط گذرا (ac):

- تغییرات زمانی بارهای ذخیره شده $Q_p(t)$:

معادله پیوستگی

$$\int_0^x -\frac{\partial J_p(x,t)}{\partial x} = \int_0^x \left(q\,\frac{\delta_p(x,t)}{\tau_p} + q\,\frac{\partial \delta_p(x,t)}{\partial t}\right)$$

$$J_p(0) - J_p(x) = q\int_0^x \left[\frac{\delta_p(x,t)}{\tau_p} + \frac{\partial \delta_p(x,t)}{\partial t}\right] dx$$

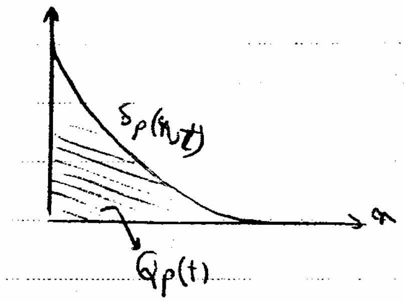


چگالی جریان $J = \frac{i}{A}$ $\quad$ $i(t) = AJ$

سطح مقطع دیود

if $x \to \infty \Rightarrow i_p(0) = i(t)$ و $i_p(\infty) = 0$

$$i(t) = \overbrace{\frac{qA}{\tau_p}\int_0^\infty \delta_p(x,t)\,dx}^{Q_p(t)} + qA\,\frac{\partial}{\partial t}\int_0^\infty \delta_p(x,t)\,dx$$



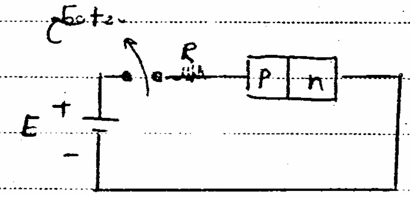
جریان لحظه‌ای دیود $\quad i(t) = \frac{Q_p(t)}{\tau_p} + \frac{dQ_p(t)}{dt}$

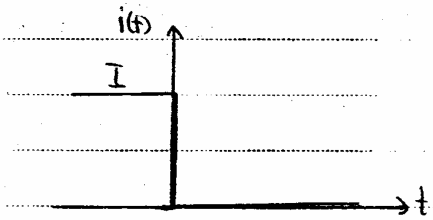
جریان لحظه‌ای پیوند = نرخ بازترکیب بار + تغییرات لحظه‌ای بار

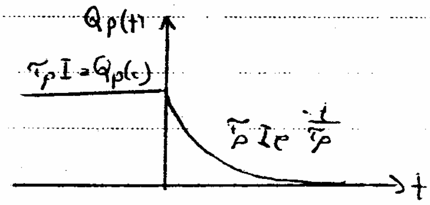
$$\begin{cases} \text{در حالت دائم بار} = \dfrac{dQ_p(t)}{dt} = 0 \\ i(t) = \dfrac{Q_p(t)}{\tau_p} \end{cases}$$

۲- اگر از پیوند pn در مدت زیادی جریان I عبور کند و در لحظه صفر $t=0$ جریان قطع شود

در زمانهای بزرگتر از صفر $t \geq 0$ مقدار تغییرات زمانی بارهای ذخیره شده و ولتاژ دو سر پیوند $V(t) = ?$







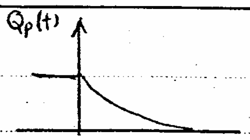
$$Q_p(0) = \tau_p I$$

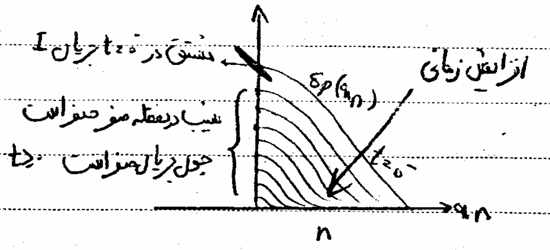
$$t \geq 0 \Rightarrow 0 = i(t) = \frac{Q_p(t)}{\tau_p} + \frac{dQ_p(t)}{dt}$$

$$\text{تبدیل لاپلاس} \Rightarrow \frac{Q_p(s)}{\tau_p} + sQ_p(s) - Q_p(0) = 0$$

$$Q_p(s) = \frac{\tau_p I}{s + \frac{1}{\tau_p}} \xrightarrow{\text{تبدیل معکوس}} \boxed{Q_p(t) = \tau_p I e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t \geq 0}$$

τ_p: طول عمر حفره که به نوع نیمه‌هادی بستگی دارد.





(منحنی شبه نمایی است)

$$Q_p = qA\int_0^{\infty} \delta_p(x_n,t)\, dx_n$$

$$Q_p(t) = qAp_n\left(e^{\frac{qV(t)}{kT}}-1\right)\int_0^{\infty} e^{-\frac{x_n}{L_p}} dx_n$$

$$Q_p(t) = qAp_n L_p\left(e^{\frac{qV(t)}{kT}}-1\right)$$

$$V(t) = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{\tau_p I}{qAL_p p_n} e^{-\frac{t}{\tau_p}}-1\right)$$

برای تسریع در کاهش بار، طول قسمت n باید خیلی کمتر از طول نفوذ حفره باشند

$L_p >> n$ طول قسمت

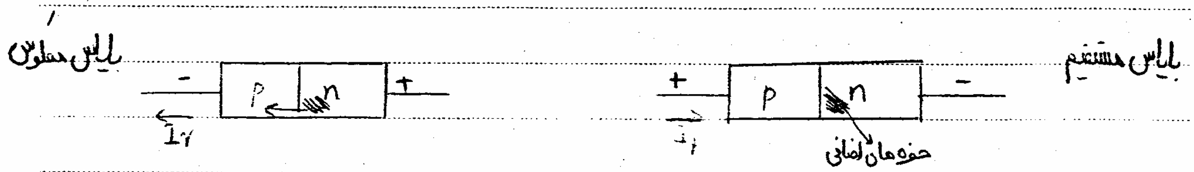
یا دیود باریک

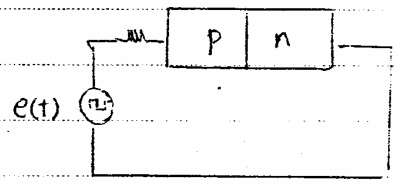
narrow base Diode

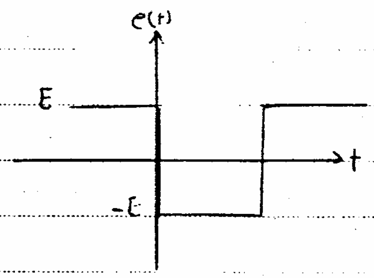
گذرای بازیابی معکوس پیوند pn : (Reverse Recovery Transent)

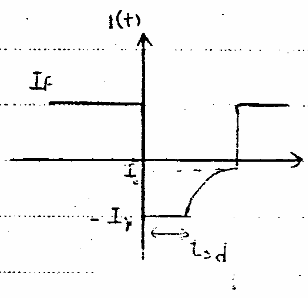
اگر پیوند pn تحت بایاس مستقیم که جریان I_F از آن عبور می‌کند بطور ناگهانی تحت بایاس معکوس قرار گیرد برای مدت زیادی جریان معکوس زیادتر از آن عبور می‌کند و پس از گذشت زمان مربوطه به جریان اشباع معکوس می‌رسد.

علت آن: وجود حفره‌های اضافی در قسمت n که تحت بایاس مستقیم قرار گرفته‌اند و تحت بایاس معکوس در جهت عکس حرکت می‌کنند.



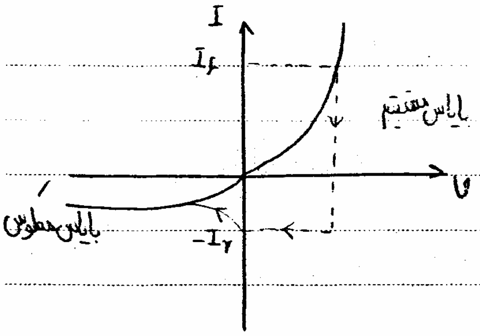


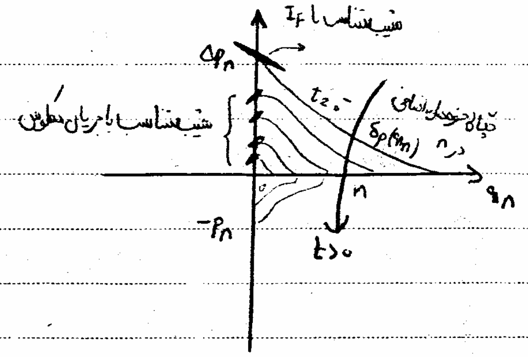




زمان تأخیر ذخیره بار.

Storage Delay time





برای محاسبه t_{sd} ، مدت زمانی که طول می‌کشد حفره‌های اضافی صفر شوند محاسبه می‌شود

$$i(0^-) = I_F$$

$$Q_p(0^-) = \tau_p I_F$$

$$t\geq 0 \qquad i(t) = -I_r \xrightarrow{t>0} i(t) = \frac{Q_p(t)}{\tau_p} + \frac{dQ_p(t)}{dt}$$

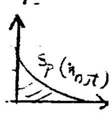
تبدیل لاپلاس

$$-\frac{I_r}{s} = \frac{Q_p(s)}{\tau_p} + sQ_p(s) - Q_p(0^-)$$

$$Q_p(s) = \frac{\tau_p I_F}{s+\frac{1}{\tau_p}} - \frac{I_r}{s(s+\frac{1}{\tau_p})}$$

$$\boxed{① \quad t\geq 0 \qquad Q_p(t) = \tau_p\left(-I_r + (I_F + I_r)e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right)}$$

تقریب بدست آوردیم:



$$\begin{cases} Q_p(t) = qA\int \delta p(x_n,t)\,dx_n = qA\,\Delta p_n(t)\int_0^{\infty} e^{-\frac{x_n}{L_p}}\,dx_n \\ Q_p(t) = qA L_p \Delta p_n(t) \end{cases}$$

$$\Delta p_n(t=t_{sd}) = 0$$

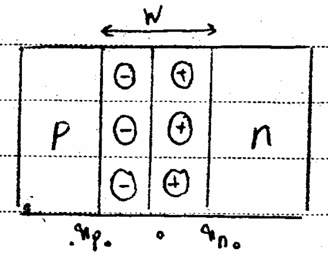
$$\boxed{②,① \rightarrow t_{sd} = \tau_p \ln\left(1+\frac{I_F}{I_r}\right)}$$

یک روش برای تعیین τ_p می‌تواند بکار رود

خازن پیوند pn :

پیوند pn دو اثر خازنی در مدارات از خود نشان می‌دهد.

می‌شود
۱) خازن پیوند C_j : خازن پیوند در اثر وجود بارهای مثبت و منفی که در هر پیوند در اثر وجود یونهای مثبت و منفی اتمهای دهنده و پذیرنده ایجاد



$$Q^+ = |Q^-|$$

$$Q^+ = qAx_{n0}N_D \quad \text{و} \quad x_{n0} = \frac{WN_A}{N_A+N_D}$$

$$\overset{①}{\Rightarrow} Q^+ = \frac{qAN_AN_D}{N_A+N_D}W$$

$$② \quad W = \left[\frac{2\epsilon(V_0-V)}{q}\,\frac{N_A+N_D}{N_AN_D}\right]^{\frac{1}{2}} \quad \overset{①,②}{\Longrightarrow} \quad Q = A\left[2q\epsilon(V_0-V)\frac{N_AN_D}{N_A+N_D}\right]^{\frac{1}{2}}$$

بار Q وابستگی غیرخطی با $(V_0-V)^{\frac{1}{2}}$ ولتاژ دارد

ولتاژ اعمالی ، ولتاژ پیوند در حالت تعادل

$$V = \begin{cases} +V_F & \text{بایاس مستقیم} \\ -V_r & \text{بایاس معکوس} \end{cases}$$

$$C_j = \frac{dQ}{d(V_0-V)} \Rightarrow \boxed{C_j = \frac{A}{2}\left[\frac{2q\epsilon}{\underbrace{(V_0-V)}_{V_0(1-\frac{V}{V_0})}}\,\frac{N_AN_D}{(N_A+N_D)}\right]^{\frac{1}{2}}}$$

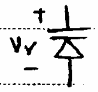
$$C_{j0} = \frac{A}{2}\left[\frac{2q\epsilon}{V_0}\,\frac{N_AN_D}{(N_A+N_D)}\right]^{\frac{1}{2}}$$ خازن پیوند در حالت تعادل

خازن پیوند در ولتاژ V $C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1-\frac{V}{V_0}}}$

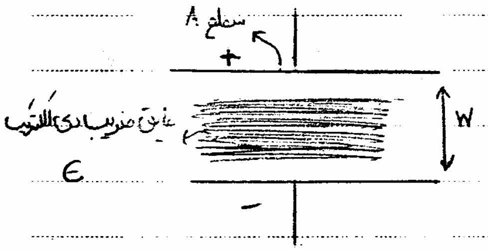
در بایاس مستقیم $V = V_F \uparrow \rightarrow C_j \uparrow$

در بایاس معکوس $V = -V_r$

* مقدار خازن پیوند در بایاس معکوس کمتر از بایاس مستقیم است و با افزایش V_F مقدار C_j زیاد می‌شود و کاربرد اثر خازنی C_j در بایاس معکوس در مدارات VCO (اسیلاتور کنترل‌شونده با ولتاژ) به عنوان varactor است



فرمول خازن C_j: اگر خازن را بصورت دو صفحه که توسط آنها عایق باشد در نظر بگیریم:



$$C_j = \epsilon \frac{A}{W}$$

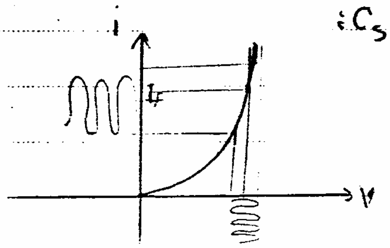
$$W = \left[\frac{2\epsilon (V_0 - V)}{q} \frac{N_A N_D}{(N_A+N_D)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$C_{j0} = \frac{A}{2}\left[\frac{2q\epsilon N_D}{V_0}\right]^{\frac{1}{2}} \leftarrow \text{دیود } p^+n \ (N_A \gg N_D) \leftarrow \text{خازن پیوند در حالت تعادل } C_{j0} = \frac{A}{2}\left[\frac{2\epsilon q}{V_0} \frac{N_A N_D}{(N_A+N_D)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

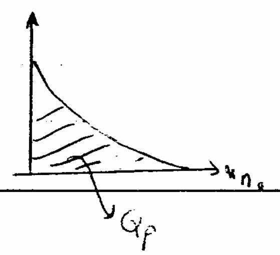
---

(۲) خازن ذخیره بار C_s:

خازن ذخیره بار $C_s = \frac{dQ}{dV}$



هدایت دینامیکی $G_s = \frac{dI}{dV}$



$$Q_p(t) = \tau_p I = \tau_p I_0 e^{\frac{V}{V_T}}$$

$$C_s = \frac{dQ_p(t)}{dV} = \frac{\tau_p I_0 e^{V/V_T}}{V_T} = \frac{\tau_p I}{V_T} = \tau_p G_s$$

$$G_s = \frac{dI}{dV} = \frac{I_0}{V_T} e^{V/V_T} = \frac{I}{V_T}$$

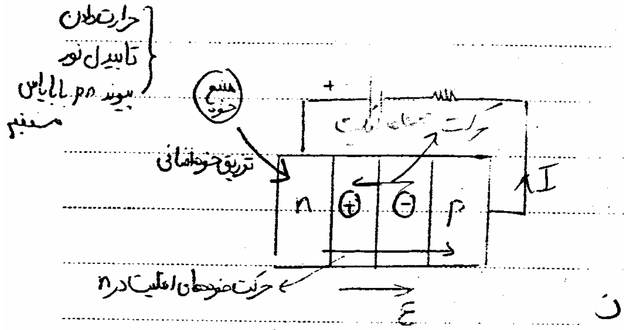
دربایاس مستقیم دو اثر خازنی پیوند $\begin{cases} \text{خازن پیوند } C_j \\ \text{خازن ذخیره بار } C_s \text{ : که نسبت به } C_j \text{ موثرتری باشد زیرا رابطه نمایی با ولتاژ دارد} \end{cases}$

$$C_s = \frac{\tau_p}{V_T} I_0 e^{V/V_T}$$

فصل (۷)

ترانزیستور دو قطبی BJT (Bipolar Junction transistor)

مبانی عملکرد BJT :

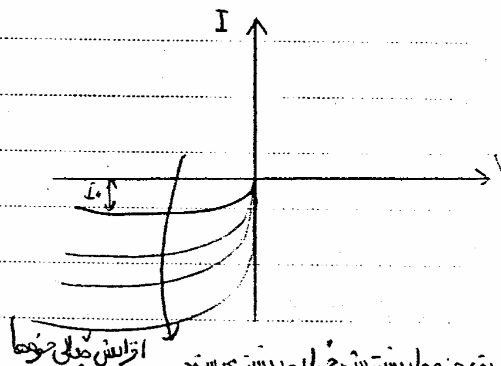


پیوند pn تحت بایاس معکوس، چون حفره‌های اقلیت هستند پس جریان ناچیزی از حرکت حفره‌های اقلیت ایجاد می شود

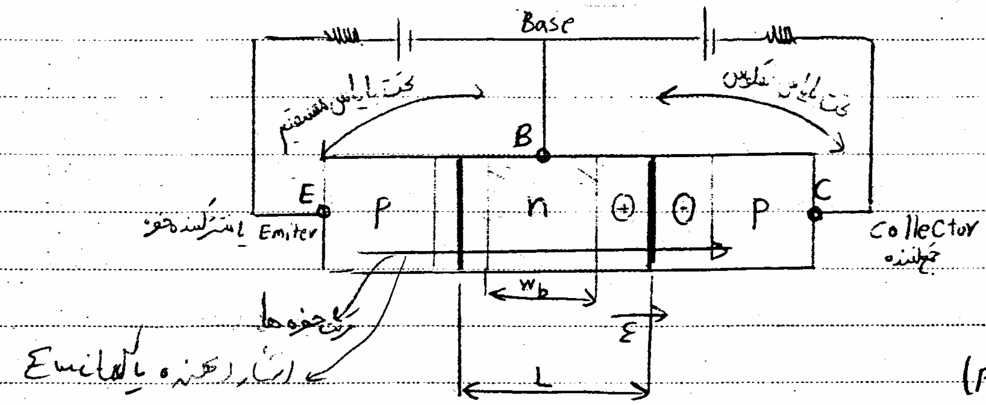
دوقطبی گفته می شود چون هر دو حامل (اکثریت و اقلیت) در جریان آن موثر است

بررسی اصول کار :

پیوند pn بایاس معکوس :



هرچه تزریق حفره‌ها بیشتر شود جریان بیشتر می شود



(ترانزیستور pnp)

L : عرض هندسی بیس

W_b : عرض موثر بیس (منطقه خنثی)

همیشه $W_b < L$

* برای اینکه ترانزیستور خوب با راندمان بالا باشد (1) $W_b \ll L_p$ (طول نفوذ حفره در pnp) باشد تا حفره های کمتری در بیس باز ترکیب شوند

(2) ناخالصی در امیتر $\gg$ ناخالصی در بیس تا اثر جریان امیتر همان جریان حفره ها باشد

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

بیس $N_A \gg N_D$ در pnp

بیس $N_D \gg N_A$ در npn

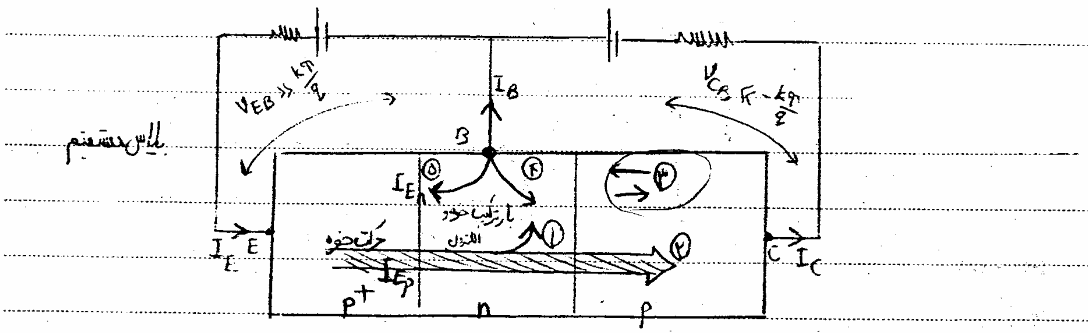
$$I_{Ep} \gg I_{En} \rightarrow I_E = I_{Ep}$$

بررسی جریانهای داخل ترانزیستور BJT:

نوع pnp تحت بایاس نرمال یعنی:
- پیوند امیتر بیس بصورت بایاس مستقیم
- پیوند کلکتور بیس بصورت بایاس معکوس

در pnp:

ناحیه فعال:
$$V_{EB} \gg \frac{kT}{q}$$
$$V_{CB} \ll -\frac{kT}{q}$$



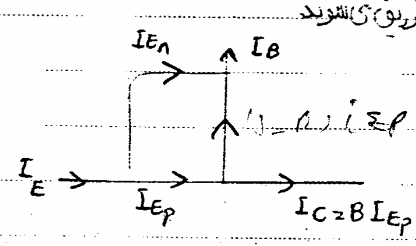
① جریان حفره‌های مثبت امیتر که در بیس بازترکیب می‌شوند

② جریان حفره‌های مثبت امیتر که توانسته‌اند به کلکتور برسند

③ جریان حامل‌های اقلیت تحت بایاس معکوس بیس کلکتور

④ جریان الکترون‌های بیس که با حفره‌های تزریقی از امیتر بازترکیب می‌شوند ①

⑤ جریان الکترون‌های بیس که تحت بایاس مستقیم پیوند امیتر بیس به امیتر تزریق می‌شوند



B : ضریب انتقال بیس ← $B < 1$

$I_C = B I_{Ep}$

ایده‌آل $B \to 1$

$\gamma < 1 \Rightarrow \gamma = \frac{I_{Ep}}{I_E} = \frac{I_{Ep}}{I_{En} + I_{Ep}}$

بازده تزریق امیتر

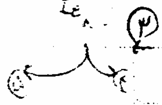
ایده‌آل $\gamma \to 1$

α نسبت انتقال جریان

$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{B I_{Ep}}{I_E} = B\gamma$

$\alpha < 1$

ایده‌آل $\alpha \to 1$



$+$ ④
$+$ ⑤
$-$ ③
} I_B تشکیل شده از

$$I_B = I_E - I_C$$

$$\beta = \frac{i_C}{i_B} = \frac{i_C}{i_E - i_C} = \frac{1}{\frac{i_E}{i_C} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha} - 1} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \qquad \begin{cases} \alpha \to 1 \\ \beta \to \infty \end{cases}$$

$$\alpha < 1 \longrightarrow \beta \gg 1 \text{ امانا}$$

ترانزیستور BJT : منبع جریان کنترل شونده با جریان ورودی است

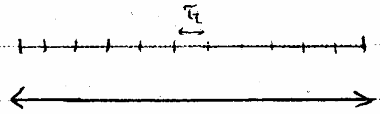
$\frac{Q_p}{\tau_p}$ بار داخل بیس / بار ترکیب $= i_B$ شعر حفره‌ها از پهنای بیس

$\frac{Q_p}{\tau_t} = i_C$ ، τ_t زمان انتقال ؛ زمان لازم برای زمان ترانسمیشن بیس

$$\tau_t = \frac{W_b^2}{2D_p}$$

زمان انتقال حامل از امیتر به کلکتور — ضریب نفوذ حفره‌ها

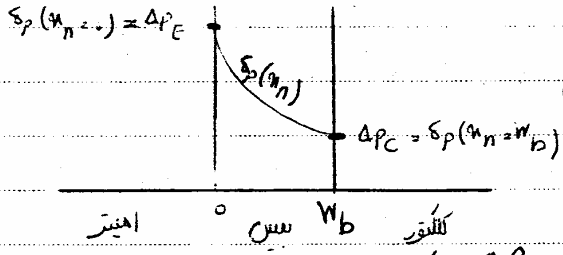
$$i_C = \frac{Q_p}{\tau_t}$$



$$\beta = \frac{i_C}{i_B} = \frac{\frac{Q_p}{\tau_t}}{\frac{Q_p}{\tau_p}}$$

$$\tau_p = \beta\,\tau_t$$

حل معادله دیفیوزن در بیس :



بدست آوردن معادلات جریان‌های ترانزیستور i_B و i_E و i_C

مراحل :

۱) تعیین مقدار تراکم حفره‌های اضافی در مرز امیتر Δp_E و مرز کلکتور

$$\Delta p_E = p_n\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1\right)$$ چگالی حفره‌های اضافی در مرز امیتر بیس

۲) تعیین تغییرات تراکم حفره‌های اضافی در داخل بیس با حل معادله دیفیوزن که $\delta p(x)$ تعیین می‌شود.

$$\Delta p_C = p_n\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1\right)$$ چگالی حفره‌های اضافی در مرز کلکتور بیس

معادله دیفوزن:
$$\frac{\partial^2 \delta p(x_n)}{\partial x_n^2} = \frac{\delta p(x_n)}{L_p^2}$$

حل معادله دیفوزن
$$\delta p(x_n) = C_1 e^{\frac{x_n}{L_p}} + C_2 e^{-\frac{x_n}{L_p}}$$

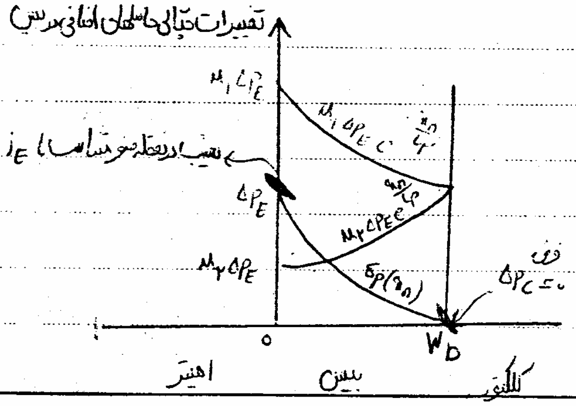
C_1 و C_2 مشخص می‌شود
$$\begin{cases} \delta p(x_n = 0) = \Delta p_E = C_1 + C_2 \\ \delta p(x_n = W_b) = \Delta p_C = C_1 e^{\frac{W_b}{L_p}} + C_2 e^{-\frac{W_b}{L_p}} \end{cases}$$

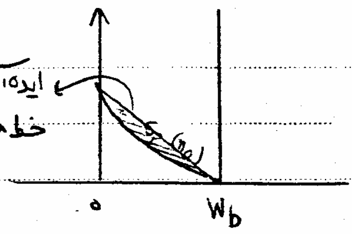
$\delta p(x_n) = C_1 e^{\frac{x_n}{L_p}} + C_2 e^{-\frac{x_n}{L_p}}$ مشخص می‌شود
$$\begin{cases} C_1 = \dfrac{\Delta p_C - \Delta p_E e^{-\frac{W_b}{L_p}}}{e^{\frac{W_b}{L_p}} - e^{-\frac{W_b}{L_p}}} \\[2ex] C_2 = \dfrac{\Delta p_E e^{\frac{W_b}{L_p}} - \Delta p_C}{e^{\frac{W_b}{L_p}} - e^{-\frac{W_b}{L_p}}} \end{cases}$$

$$\text{if} \quad \Delta p_C \simeq 0 \Rightarrow \delta p(x_n) = \Delta p_E \frac{e^{\frac{W_b}{L_p}} \times e^{-\frac{x_n}{L_p}} - e^{-\frac{W_b}{L_p}} \times e^{\frac{x_n}{L_p}}}{e^{\frac{W_b}{L_p}} - e^{-\frac{W_b}{L_p}}}$$

$$\boxed{\delta p(x_n) = M_1 \Delta p_E e^{-\frac{x_n}{L_p}} - M_2 \Delta p_E e^{\frac{x_n}{L_p}}}$$

M_1 و M_2 تعریف می‌شود
$$\begin{cases} M_1 = \dfrac{e^{\frac{W_b}{L_p}}}{e^{\frac{W_b}{L_p}} - e^{-\frac{W_b}{L_p}}} \\[2ex] M_2 = \dfrac{e^{-\frac{W_b}{L_p}}}{e^{\frac{W_b}{L_p}} - e^{-\frac{W_b}{L_p}}} \end{cases}$$





تمرین) در پیوند پله‌ای pn زیر، دیاگرام باند انرژی در ۳۰۰K را رسم کنید. اگر سطح مقطع دیود دایره‌ای به قطر 1mm باشد مطلوب است محاسبه x_{n_0} و x_{p_0} ، W ، Q ، $\mathcal{E}_0$ و رسم $\mathcal{E}(x)$ و $\varphi(x)$

$E_g = 1.1\,eV$

$\epsilon = 11.8\,\epsilon_0$

$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}$

$N_A = 10^{17}$

$N_D = 5 \times 10^{16}$

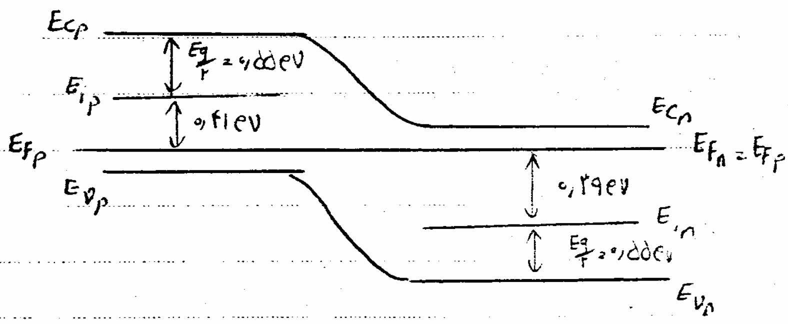
$n_i = 1.5 \times 10^{10}$

n درقسمت $N_D = n_0 = n_i e^{\frac{E_{F_n} - E_{i_n}}{kT}}$

$$E_{F_n} - E_{i_n} = kT \ln \frac{N_D}{n_i} = 0.026 \ln \frac{5 \times 10^{16}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.39\,eV$$

p درقسمت : $N_A = p_0 = n_i e^{\frac{E_{i_p} - E_{F_p}}{kT}}$

$$E_{i_p} - E_{F_p} = kT \ln \frac{N_A}{n_i} = 0.026 \ln \frac{10^{17}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.41\,eV$$



(دیاگرام باند انرژی پیوند pn در حالت تعادل)

$V_0 = (E_{ip} - E_{Fp}) + (E_{Fn} - E_{in}) = ۰٫۴۱ + ۰٫۳۹ = ۰٫۸\,V$

و $V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^۲} = ۰٫۰۲۶ \ln \frac{۱۰^{۱۷} \times ۵ \times ۱۰^{۱۶}}{(۱٫۵ \times ۱۰^{۱۰})^۲} = ۰٫۸V$

$A = \pi r^۲ = ۳٫۱۴ \times (۱۰ \times ۱۰^{-۶})^۲ = ۰٫۷۸ \times ۱۰^{-۶}\,cm^۲$

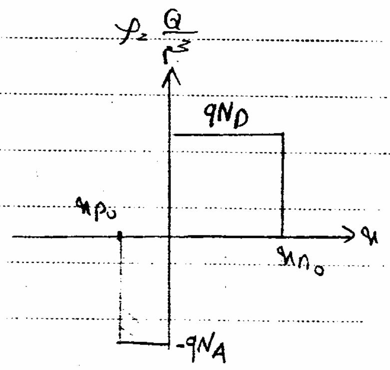
$W = \left[\frac{۲\epsilon V_0}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)\right]^{۱/۲} \Rightarrow W = \left[\frac{۲ \times ۱۱٫۸ \times ۸٫۸۵ \times ۱۰^{-۱۴} \times ۰٫۸}{۱٫۶ \times ۱۰^{-۱۹}}\left(\frac{1}{۱۰^{۱۷}} + \frac{1}{۵ \times ۱۰^{+۱۶}}\right)\right]^{۱/۲}$

$W = ۱٫۷۷ \times ۱۰^{-۵}\,cm$

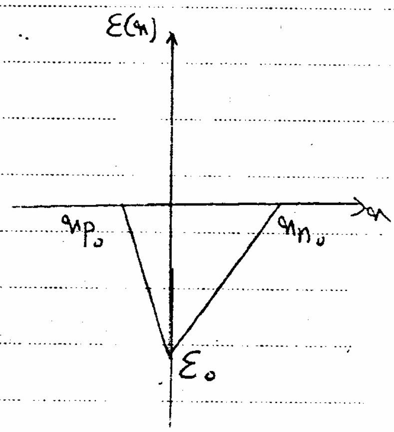
$x_{p_0} = \frac{W N_D}{N_A + N_D} = ۵۹ \times ۱۰^{-۷}\,cm$

$x_{n_0} = W - x_{p_0} = ۱٫۱۸ \times ۱۰^{-۵}\,cm$

$Q^+ = qA x_{n_0} N_D = ۷٫۳۶ \times ۱۰^{-۱۴}\,C$



$\mathcal{E}_0 = \frac{-۲V_0}{W} = -۰٫۹ \times ۱۰^۵\,\frac{V}{cm}$



تمرین) در پیوند pn تحت بایاس مستقیم با ولتاژ $V_f = 0{,}37\,V$ مطلوبست محاسبه $I_p(x_n)$ ، $I_n(x_n)$ ، $\delta_p(x_p)$ ، $\delta_n(x_n)$ و رسم

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

$\tau_n = \tau_p = 10\,\mu s$

$\mu_p = 400\ \frac{cm^2}{V}$

$\mu_n = 1000\ \frac{cm^2}{V}$

$A = 10^{-4}\,cm^2$

$n_i = 2{,}5\times 10^{+13}$

$$I_p(x_n) = qA\,\frac{D_p}{L_p}\,\overset{\frac{n_i^2}{N_D}}{p_n}\,e^{-\frac{x_n}{L_p}}\left(e^{\frac{qV}{kT}}-1\right) \qquad V_f = 0{,}3$$

$$\frac{D_p}{L_p} = \sqrt{\frac{D_p^2}{D_p\tau_p}} = \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} = \sqrt{\frac{\mu_p kT}{q\tau_p}} \qquad \frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q},\quad \frac{kT}{q} = 0{,}026$$

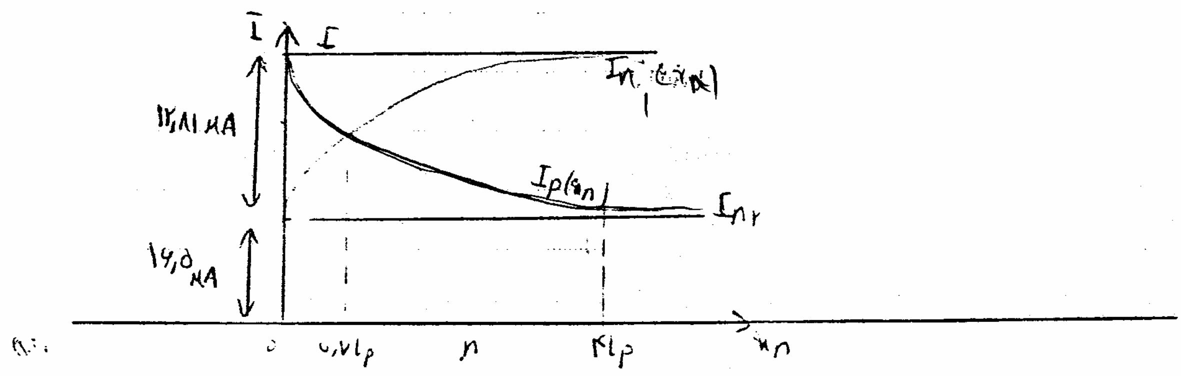
$$I_p(x_n) = 1{,}6\times 10^{-19}\times 10^{-4}\times\sqrt{\frac{400\times 0{,}026}{10\times 10^{-6}}}\left(\frac{(2{,}5\times 10^{13})^2}{10^{17}}\right)e^{-\frac{x_n}{L_p}}$$

$$I_{p(x_n)} = 12{,}81\times 10^{-6}\,e^{-\frac{x_n}{L_p}}$$

جریان الکترونها $$I_n(x_n) = \overset{\text{جریان کل}}{I} - I_p(x_n) = qA\left[\frac{D_p}{L_p}\left(1-e^{-\frac{x_n}{L_p}}\right)p_n + \frac{D_n}{L_n}n_p\right]\left(e^{\frac{qV}{kT}}-1\right)$$

$$I_n(x_n) = \underbrace{12{,}81\times 10^{-6}\left(1-e^{-\frac{x_n}{L_p}}\right)}_{I_{n_1}} + \underbrace{14{,}5\times 10^{-6}}_{I_{n_2}}$$

$$I_n(x_n) = I_{n_1}(x_n) + I_{n_2}$$



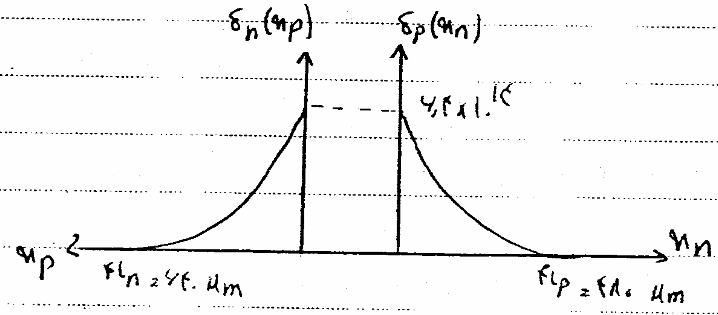
$V_f = 0/3$

$$\delta_n(x_p) = n_p e^{-\frac{x_p}{L_n}} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$$

$$\frac{n_i^2}{N_A} e^{-\frac{x_p}{L_n}} \left(e^{\frac{0/3}{0/026}} - 1\right) \Rightarrow \delta_n(x_p) = 6/4 \times 10^{-14} e^{-\frac{x_p}{L_n}}$$

$$\delta_p(x_n) = p_n \left(e^{\frac{qV_f}{kT}} - 1\right) e^{-\frac{x_n}{L_p}}$$

$$\frac{n_i^2}{N_D} \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right) e^{-\frac{x_n}{L_p}} = 6/4 \times 10^{14} e^{-\frac{x_n}{L_p}}$$



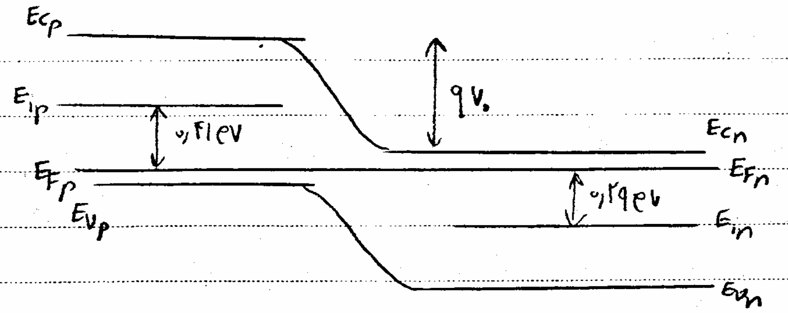
تمرین) در یک دیود pn ، V_0 را روی دیاگرام انرژی بدست آورده و همچنین I و I_0 را برای $V_f = 0/5V$ محاسبه کنید

$$n_0 = n_i e^{\frac{E_{F_n} - E_{i_n}}{kT}} \Rightarrow E_{F_n} - E_{i_n} = kT \ln \frac{n_0}{n_i} = kT \ln \frac{N_D}{n_i}$$

$$\Rightarrow E_{F_n} - E_{i_n} = 0/026 \ln \frac{10^{17}}{1/5\times10^{10}} = 0/45\,eV$$

در حالت تعادل $E_{F_n} = E_{F_n}$

$$E_{i_p} - E_{F_p} = kT \ln \frac{N_A}{n_i} = 0/41\,eV$$



$$V_0 = (E_{ip} - E_{Fp}) + (E_{Fn} - E_{in}) = 0.41 + 0.29 = 0.7\,V$$

یا $$V_0 = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A N_D}{n_i^2} = 0.026\ln\frac{10^{17}\times 10^{15}}{(1.5\times 10^{10})^2} = 0.7\ \text{Volt}$$

$$I_0 = qA\left[\left(\frac{D_p}{L_p}\right)p_n + \left(\frac{D_n}{L_p}\right)n_p\right]$$

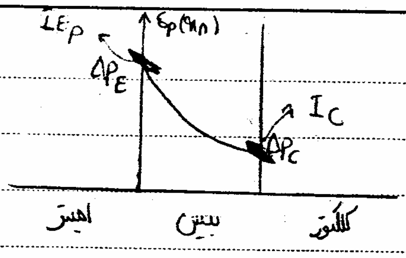
$$I_0 = qAn_i^2\left(\sqrt{\frac{\mu_p kT}{q\tau_p}}\times\frac{1}{N_D} + \sqrt{\frac{\mu_n kT}{q\tau_n}}\times\frac{1}{N_A}\right)$$

μ_p در n — μ_n در p

$$I_0 = 4.4\times 10^{-10}A$$

$$I = I_0\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right) = 4.4\times 10^{-10}\left(e^{\frac{0.5}{0.026}} - 1\right) = 0.99\,\mu A$$

تعیین معادلات جریان‌های ترانزیستور BJT:



$$\delta p(x_n) = C_1 e^{\frac{x_n}{L_p}} + C_2 e^{-\frac{x_n}{L_p}} \Rightarrow \frac{d\delta p(x_n)}{dx_n} = \frac{C_1}{L_p} e^{\frac{x_n}{L_p}} + \frac{C_2}{L_p} e^{-\frac{x_n}{L_p}}$$

جریان دیفوزیون $I_p = -qAD_p \dfrac{d\delta p(x_n)}{dx_n}$

$$I_{Ep} = I_p(x_n = 0) = qAD_p \left.\frac{d\delta p(x_n)}{dx_n}\right|_{x_n = 0}$$

$$* \quad I_{Ep} = \frac{qAD_p}{L_p}(C_2 - C_1)$$

اگر $\gamma = 1 \Rightarrow I_E = I_{Ep}$

$$I_C = I_p(x_n = W_b)$$

$$I_C = qA\frac{D_p}{L_p}\left(C_2 e^{-\frac{W_b}{L_p}} - C_1 e^{\frac{W_b}{L_p}}\right)$$

$$I_B = I_E - I_C$$

با جایگذاری C_1 و C_2 که قبلاً بدست آمده در معادلات I_{Ep} و I_C و استفاده از روابط توابع هیپربولیک

$$\coth x = \frac{e^x + e^{-x}}{e^x - e^{-x}} \qquad \sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2}$$

$$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$$

$$I_{Ep} = qA\frac{D_p}{L_p}\left(\Delta p_E \, \mathrm{Cth}\frac{W_b}{L_p} - \frac{\Delta p_C}{\sinh\frac{W_b}{L_p}}\right)$$

$$I_C = qA\frac{D_p}{L_p}\left(\frac{\Delta p_E}{\sinh\frac{W_b}{L_p}} - \Delta p_C \, \mathrm{Cth}\frac{W_b}{L_p}\right) \quad *$$

$$I_B = I_E - I_C$$

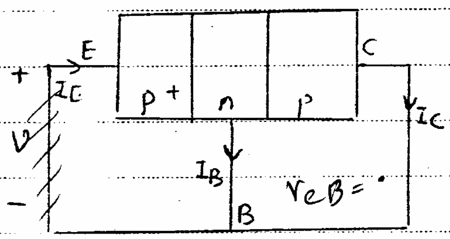
اگر $\gamma = 1 \rightarrow I_E = I_{Ep}$

$$\Delta p_E = p_n\left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}} - 1\right)$$

$$\Delta p_C = p_n\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}} - 1\right)$$

$$I_B = \frac{qAD_p}{L_p}\left[(\Delta p_E + \Delta p_C)\tanh\frac{W_b}{2L_p}\right]$$

مثال) اگر ۱ = γ باشد جریانها را در مدار زیر بدست آورید.



کلکتور بیس اتصال کوتاه شده است

$$V_{CB} = 0 \Rightarrow \Delta p_C = p_n\left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}} - 1\right)$$

$$V_{EB} \gg \frac{KT}{q}$$

$$\Rightarrow \boxed{\Delta p_C = 0}$$

وقتی در معادله (*) Δp_C حذف شود:

$$I_{Ep} = qA\frac{D_p}{L_p}\Delta p_E \, \mathrm{Cth}\frac{W_b}{L_p}$$

$$I_C = qA\frac{D_p}{L_p}\frac{\Delta p_E}{\sinh\frac{W_b}{L_p}}$$

$$I_B = I_E - I_C$$

اگر $\gamma = 1 \rightarrow I_E = I_{Ep}$

$$\Rightarrow I_B = \frac{qAD_p}{L_p}\Delta p_E \tanh\frac{W_b}{2L_p}$$

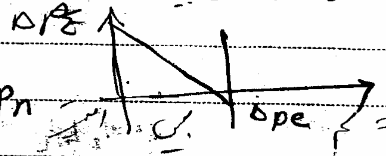
تعریف جریانها:

در pnp

بایاس نرمال:
پیوند امیتر بیس در بایاس مستقیم $V_{EB} \gg \frac{kT}{q}$
پیوند کلکتور بیس در بایاس معکوس $V_{CB} \ll \frac{-kT}{q}$

$$\Delta p_E = p_n e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}$$

$$\rightarrow \Delta p_C = p_n \left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1 \right) \simeq -p_n$$



فرض $\Delta pe = 0$

اگر $\Delta p_C = -p_n$ باشد قابل صرفنظر کردن می‌باشد

تقریب معادلات جریان

$$I_E = I_{Ep} = qA \frac{D_p}{L_p} \Delta p_E \operatorname{Cth}\left(\frac{W_b}{L_p}\right)$$

$$I_C = qA \frac{D_p}{L_p} \frac{\Delta p_E}{\sinh\left(\frac{W_b}{L_p}\right)}$$

$$I_B = I_E - I_C$$

اگر $\gamma = 1 \Rightarrow I_E = I_{Ep}$

$$\Rightarrow I_B = \frac{qAD_p}{L_p} \Delta p_E \tanh \frac{W_b}{2L_p}$$

بسط سری توابع هیپربولیک:

$$\operatorname{sech} y = 1 - \frac{y^2}{2} + \frac{5y^4}{24} + \cdots$$

$$\tanh y = y - \frac{y^3}{3} + \cdots$$

اگر $y \ll 1$ باشد می‌توان از مقادیر درجه ۲ به بالا صرفنظر کنیم

$$\frac{1}{\sinh y} = \frac{1}{y} - \frac{y}{6} + \frac{7y^3}{360} + \cdots$$

$$\operatorname{Cth} y = \frac{1}{y} + \frac{y}{3} - \frac{y^3}{45} + \cdots$$

در ترانزیستور با راندمان بالا باید $W_b \ll L_p \leftarrow \frac{W_b}{L_p} \ll 1 \leftarrow y = \frac{W_b}{L_p} \ll 1$

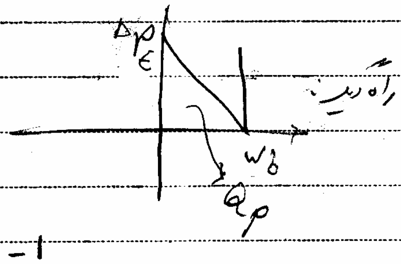
اگر از تقریب معادلات

معادلات تقریبی جریانها با استفاده از بسط هیپربولیک

$$\begin{cases} I_E = qA\frac{D_p}{L_p}\Delta p_E\left(\frac{1}{\frac{W_b}{L_p}} + \frac{\frac{W_b}{L_p}}{3}\right) \\ I_C = qA\frac{D_p}{L_p}\Delta p_E\left(\frac{1}{\frac{W_b}{L_p}} - \frac{\frac{W_b}{L_p}}{6}\right) \\ I_B = I_C - I_E = \frac{qAW_b\Delta p_E}{2\tau_p} \end{cases}$$

γ راندمان تزریق امیتر

$$\gamma = \frac{I_{Ep}}{I_{Ep}+I_{En}} = \left(\frac{I_{Ep}+I_{En}}{I_{Ep}}\right)^{-1}$$



$$\gamma = \left(1 + \frac{I_{En}}{I_{Ep}}\right)^{-1}$$

p ... $\rightarrow N_D$

سمت n و تحلیل نیست

$$\gamma = \left[1 + \frac{L_p n_n \mu_n^{p}}{L_n^{p} p_p \mu_p^{n}} \tanh\frac{W_b}{L_p^{n}}\right]^{-1}$$

p طول نفوذ الکترون در سمت

$\rightarrow N_A$

$$\gamma = \left[1 + \frac{W_b n_n \mu_n^{p}}{L_n^{p} p_p \mu_p^{n}}\right]^{-1}$$

$$\alpha = \beta\gamma = \frac{I_C}{I_E} = \operatorname{sech}\frac{W_b}{L_p}$$

$$\frac{I_C}{I_B} = \beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

مثال) اگر یک ترانزیستور pnp با ناخالصی امیتر ده برابر ناخالصی بیس باشد. موبیلیتی حامل اقلیت در امیتر نصف موبیلیتی حاملهای اقلیت در بیس باشد و پهنای بیس یک دهم طول نفوذ حامل اقلیت باشد و طول عمرهای حاملها برابر $\tau_p=\tau_n$ باشد α و B را مشخص کنید

N_A (امیتر) $= 10 N_D$ (بیس)

$\frac{1}{2}\mu_p^n = \mu_n^p$ (امیتر)

$W_b = 0.1 L_p^n$

$$\text{چون } \tau_p=\tau_n \Rightarrow \frac{L_p}{L_n} = \sqrt{\frac{D_p\tau_p}{D_n\tau_n}}$$

$$\Rightarrow \frac{L_p}{L_n} = \sqrt{\frac{D_p}{D_n}} = \sqrt{\frac{\mu_p^n \frac{KT}{q}}{\mu_n^p \frac{KT}{q}}}$$

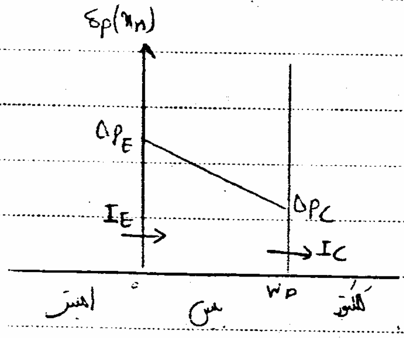
$$\Rightarrow \frac{L_p}{L_n} = \sqrt{\frac{\mu_p}{\mu_n}} = \sqrt{2}$$

$$\alpha = B\gamma = \left[\cosh\frac{W_b}{L_p^n} + \frac{L_p^n n_n \mu_n^p}{L_n^p p_p \mu_p^n}\sinh\frac{W_b}{L_p^n}\right]^{-1}$$

0.5 0.1

$$\alpha = \left[\cosh 0.1 + \sqrt{2}\times 0.1\times 0.5\times \sinh 0.1\right]^{-1} \Rightarrow \alpha = 0.988$$

$$B = \frac{\alpha}{1-\alpha} = 82$$



- مدل جفت دیودی The Coupled Diode (ابرز مول)

این مدل برای ترانزیستور BJT در هر ناحیه ای باشد می‌تواند بکار رود.

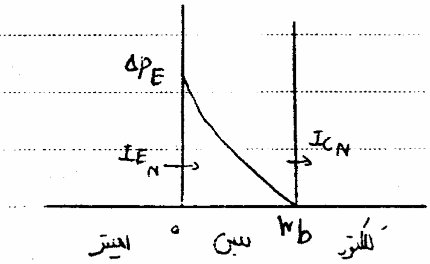
$$I_C = b\Delta p_E - a\Delta p_C = I_{C_N} + I_{C_I}$$

$$I_E \simeq I_{E_p} = a\Delta p_E - b\Delta p_C = I_{E_N} + I_{E_I}$$

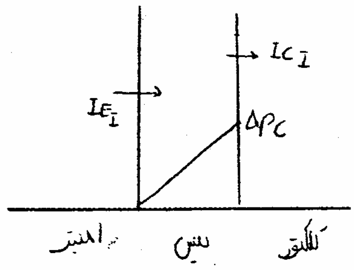
وابسته به مشخصات فیزیکی و هندسی

$$\begin{cases} a = qA \dfrac{D_p}{L_p} \dfrac{1}{\sinh \frac{W_b}{L_p}} \\ b = qA \dfrac{D_p}{L_p} \coth \dfrac{W_b}{L_p} \end{cases}$$

$$\text{if} \quad \Delta p_C = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_E = \underbrace{I_{E_N}}_{\text{نرمال عادی}} = a\Delta p_E \\ I_C = I_{C_N} = b\Delta p_E \end{cases}$$



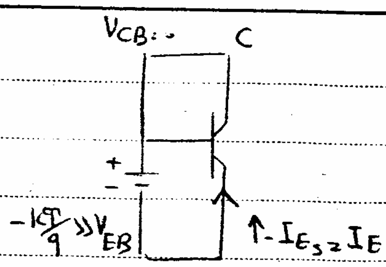
$$\text{if} \quad \Delta p_E = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_E = \underbrace{I_{E_I}}_{\text{(inverse) معکوس}} = -b\Delta p_C \\ I_C = I_{C_I} = -a\Delta p_C \end{cases}$$



اگر $V_{CB} = 0 \rightarrow \Delta p_C = 0 = p_n\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1\right) = 0$

$$I_E = I_{E_N} = a\Delta p_E = \underbrace{a p_n}_{I_{E_S}}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1\right) = I_{E_S}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1\right)$$

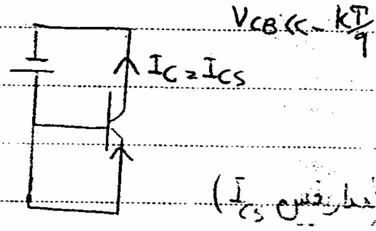
اگر $V_{EB} \ll -\frac{kT}{q} \rightarrow I_E = -I_{E_S}$



(مدار تعیین I_{E_S})

اگر $V_{EB}=0 \Rightarrow \Delta p_E = 0 \rightarrow I_C = I_{C_I} = -a\Delta p_C = -\overset{I_{CS}}{a p_n}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1\right)$

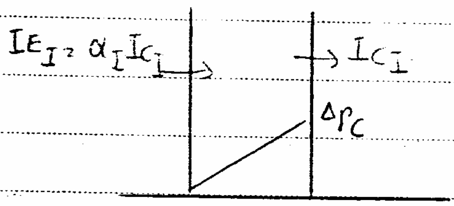
$$I_C = -I_{CS}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1\right)$$

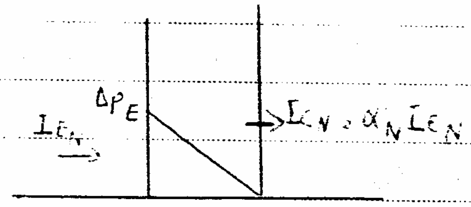


(مدار تعیین I_{CS})

$$I_{E_N} = I_{E_S}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right) \rightarrow I_{C_N} = \alpha_N I_{E_N}$$

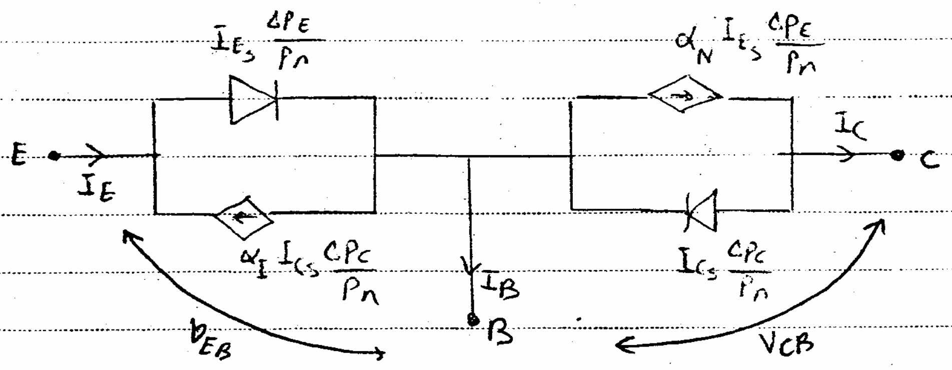
$$I_{C_I} = -I_{CS}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1\right) \rightarrow I_{E_I} = \alpha_I I_{C_I}$$





(*) $I_E = I_{E_N} + I_{E_I} = I_{E_N} + \alpha_I I_{C_I} = I_{E_S}\frac{\Delta p_E}{p_n} - \alpha_I I_{CS}\frac{\Delta p_C}{p_n}$

$$I_E = \underbrace{I_{E_S}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right)}_{\text{رابطه دیود pn}} - \alpha_I I_{CS}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1\right)$$



مدل ابرزمول
Ebers & Moll

معادلات ابرزمول * $I_C = I_{CN} + I_{CI} = \alpha_N I_{Es}\frac{\Delta P_E}{P_n} - I_{Cs}\frac{\Delta P_C}{P_n}$

$$I_C = \alpha_N I_{Es}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right) - I_{Cs}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1\right)$$

همواره $\alpha_N I_{Es} = \alpha_I I_{Cs}$

در معادلات ابرزمول

$$① \quad I_E = I_{Es}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right) - \underbrace{\alpha_I I_{Cs}}_{\alpha_N I_{Es}}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1\right)$$

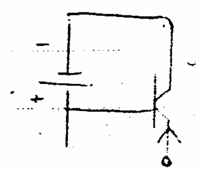
$$② \quad I_C = \underbrace{\alpha_N I_{Es}}_{\alpha_I I_{Cs}}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right) - I_{Cs}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1\right)$$

در α_N ضرب کرده وسپس $I_C - \alpha_N I_E$ رابدست آورده.

$$I_C = \alpha_N I_E - I_{C0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right)$$

$$I_{C0} = (1-\alpha_N\alpha_I)I_{Cs}$$

I_{C0} مفهوم $\Rightarrow$ اگر $I_E = 0$ و $V_{CB} \ll \frac{-kT}{q}$



امیتر باز

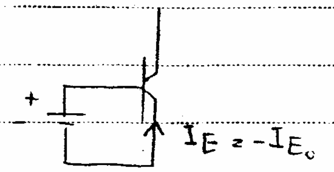
$$\Rightarrow I_C = I_{C0}$$

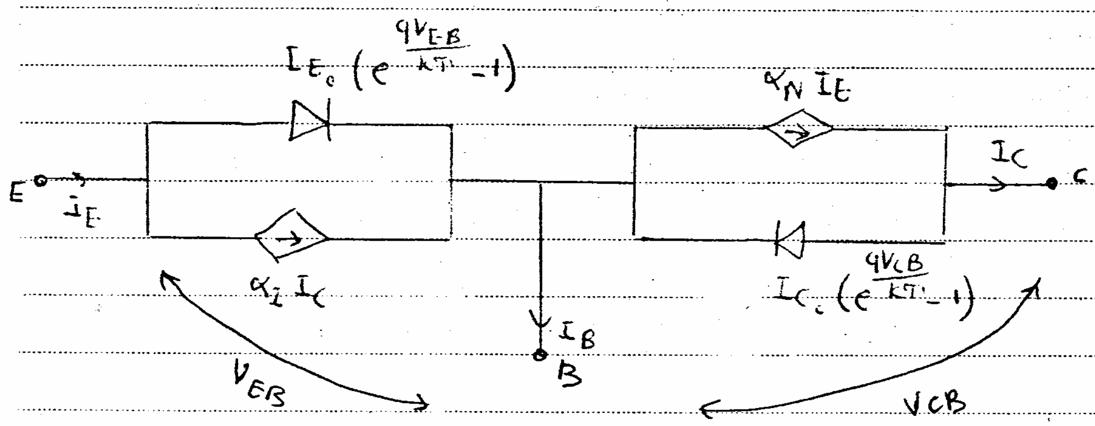
جریان کلکتور بیس وقتی امیتر باز است

معادلات ابرز مول

$$\begin{cases} I_E = \alpha_I I_C + I_{E_0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}-1\right) \\ I_C = \alpha_N I_E - I_{C_0}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}}-1\right) \end{cases}$$

تعریف : $I_{E_0} = (1-\alpha_N \alpha_I) I_{E_S}$

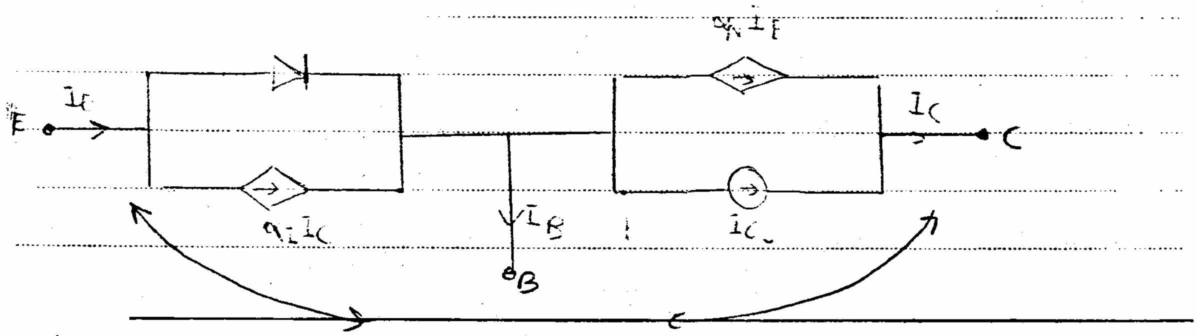




(مدل ابرز مول)

در تحلیل مدارات بایاسینگ مختلف ترانزیستور از این دو مدل ابرز مول می توان استفاده نمود

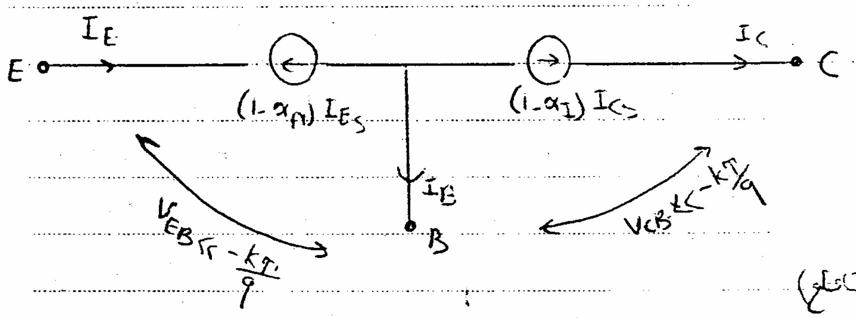
مثلاً در بایاسینگ نرمال انتظار داریم
$$\begin{cases} V_{EB} \gg \frac{kT}{q} \\ V_{CB} \ll -\frac{kT}{q} \end{cases}$$
در pnp



ـ حالت قطع ترانزیستور : هر دو پیوند بطور معکوس بایاس شده اند

$$\text{در } pnp \quad \begin{cases} V_{EB} \ll -\frac{kT}{q} \\ V_{CB} \ll -\frac{kT}{q} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \Delta p_C = -p_n \\ \Delta p_E = -p_n \end{cases}$$

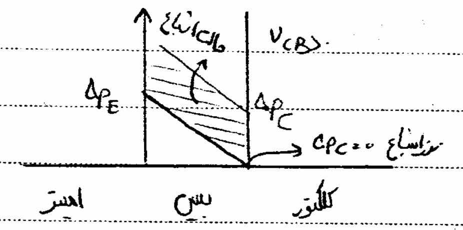
$$\begin{cases}
I_E = I_{ES}\dfrac{\Delta p_E}{p_n} - \alpha_I I_{CS}\dfrac{\Delta p_C}{p_n} \\
\quad = -I_{ES} + \underbrace{\alpha_I I_{CS}}_{\alpha_N I_{ES}} \\
* \; I_E = -(1-\alpha_N) I_{ES} \\
I_C = \alpha_N I_{ES}\dfrac{\Delta p_E}{p_n} - I_{CS}\dfrac{\Delta p_C}{p_n} \\
\quad = -\overbrace{\alpha_N I_{ES}}^{\alpha_I I_{CS}} + I_{CS} \\
I_C = (1-\alpha_I) I_{CS} \\
I_B = I_E - I_C
\end{cases}$$

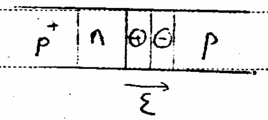


(مدار معادل در حالت قطع)

- حالت اشباع ترانزیستور:

اگر پیوند امیتر بیس در بایاس مستقیم باشد از هنگامیکه ولتاژ پیوند کلکتور بیس صفر می شود و سپس بایاس مستقیم می شود ترانزیستور به اشباع می رود.

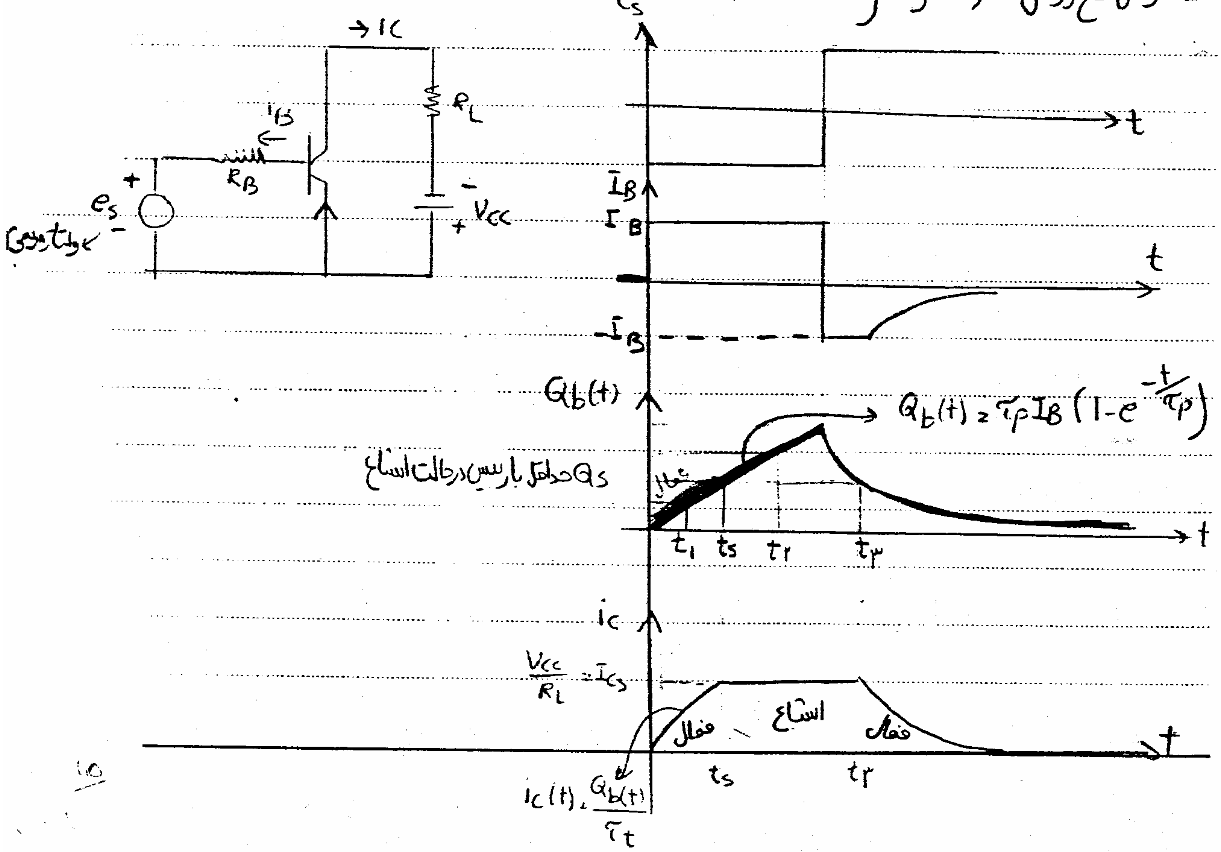


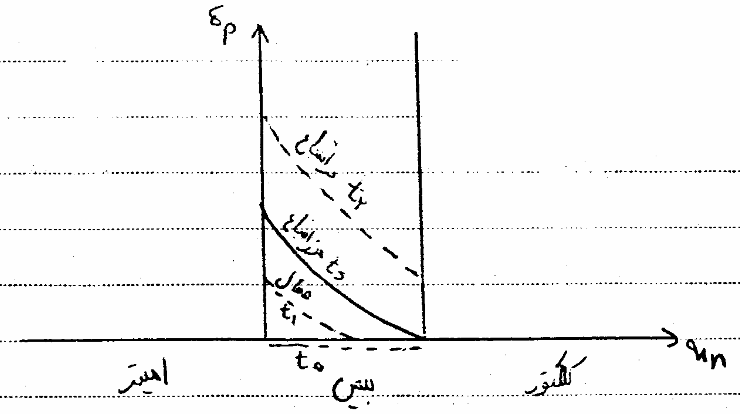


در اشباع $I_B > \frac{I_{CS}}{\beta}$

$$I_{CS} = \frac{V_{CC} - V_{CE\,sat}}{R_C}$$

- مراحل قطع و وصل (switching cycle)





تغییرات $Q_b(t)$

$$i_B(t) = \frac{Q_b(t)}{\tau_p} + \frac{dQ_p(t)}{dt}$$

$Q_b(0) = 0$

$$t \geq 0 \Rightarrow I_B = \frac{Q_b}{\tau_p} + \frac{dQ_b}{dt}$$

لاپلاس $\quad \frac{I_B}{s} = \frac{Q_b(s)}{\tau_p} + sQ_b(s)$

$$Q_b(s) = \frac{I_B}{s(s+\frac{1}{\tau_p})} \Rightarrow Q_b(t) = I_B\tau_p\left(1-e^{-\frac{t}{\tau_p}}\right)$$

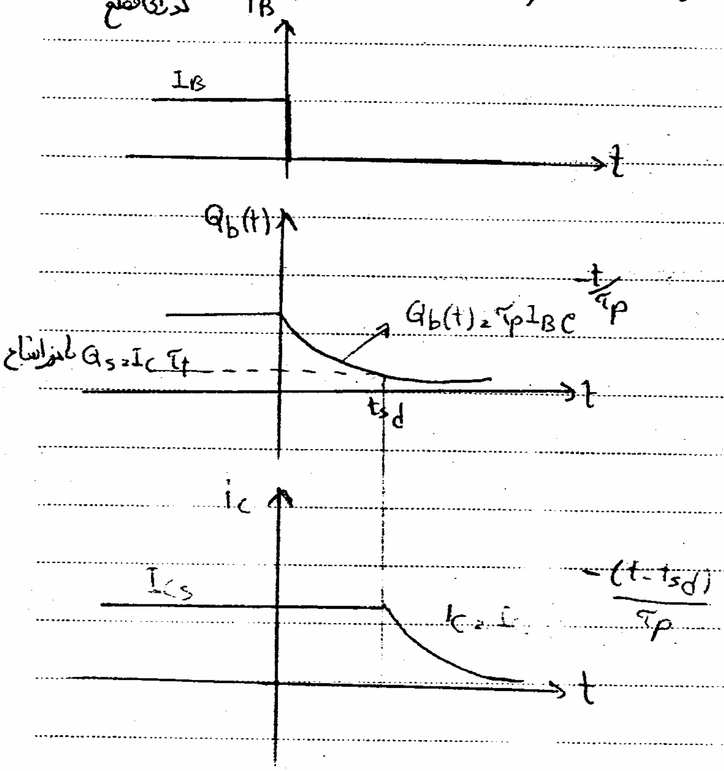
جریان کلکتور بیس: $\quad i_C(t) = \frac{Q_b(t)}{\tau_t}$ تغییر می‌کند

تعیین زمان اشباع شدن: $\quad i_C(t=t_s) = I_{Cs} = \frac{V_{CC}-V_{CE(sat)}}{R_L}$

$$\frac{I_B\tau_p}{\tau_t}\left(1-e^{-\frac{t_s}{\tau_p}}\right) = I_{Cs} \Rightarrow \boxed{t_s = \tau_p \ln\frac{1}{1-\frac{I_{Cs}}{\beta I_B}}}$$

برای سوئیچ خوب که سریع اشباع شود باید τ_p کم باشد و $I_{Cs} < \beta I_B$ باشد

گذرای قطع



تعیین $Q_b(t)$

$$i_B(t) = \frac{Q_b(t)}{\tau_p} + \frac{dQ_b(t)}{dt}$$

$$Q_b(0^-) = \tau_p I_B$$

$$t > 0 \Rightarrow 0 = \frac{Q_b}{\tau_p} + \frac{dQ_b}{dt}$$

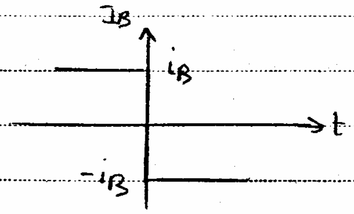
تبدیل لاپلاس $$0 = \frac{Q_b(s)}{\tau_p} + sQ_b(s) - Q_b(0^-)$$

$$Q_b(s) = \frac{I_B \tau_p}{\left(s + \frac{1}{\tau_p}\right)} \rightarrow Q_b(t) = I_B \tau_p e^{-t/\tau_p}$$

$$Q_b(t = t_{sd}) = I_{Cs} \tau_t = \tau_p I_B e^{-\frac{t_{sd}}{\tau_p}}$$

زمان تأخیر در خروج اشباع $t_{sd} = \tau_p \ln \frac{\beta I_B}{I_{cs}}$

چون $\frac{\tau_t}{\tau_p} = \beta$

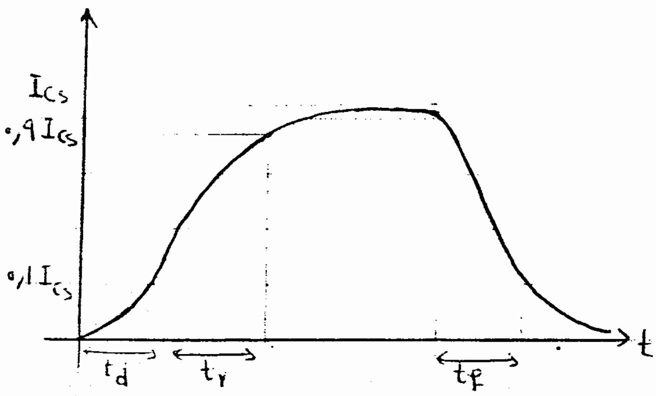


برای کاهش t_{sd} بهتر است که I_B در $t>0$ بجای صفر مقدار منفی داشته باشد

برای تعیین $Q_b(t)$ باید بجای صفر در معادلات $-I_B$ قرار دهیم

$$-I_B = \frac{Q_b}{\tau_p} + \frac{dQ_b}{dt}$$

$$Q_b(t) = \tau_p I_B \left(2e^{-\frac{t}{\tau_p}} - 1\right)$$

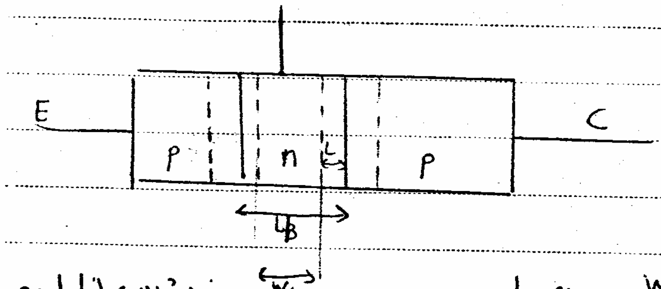


t_d : زمان تأخیر delay

t_r : زمان (rise time) از ۰٫۱ تا ۰٫۹ I_{cs}

t_f : (fall time) زمان افت از ۰٫۹ به ۰٫۱ I_{cs}

باریک شدن بیس (Base narrowing):

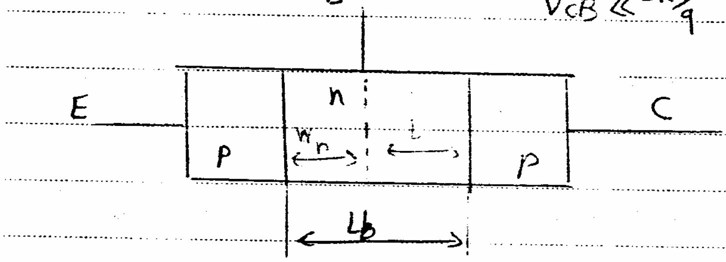


عرض موثر بیس (فاصله بین دو
در حالت تعادل : فضای تخلیه
با قسمت خنثی بیس)

$$L = x_{n_0} = \frac{WN_A}{N_A+N_D} = \left[\frac{2\epsilon V_0}{q}\left(\frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)}\right)\right]^{1/2}$$

تحت بایاس نرمال:

$V_{CB} \ll -\frac{kT}{q}$

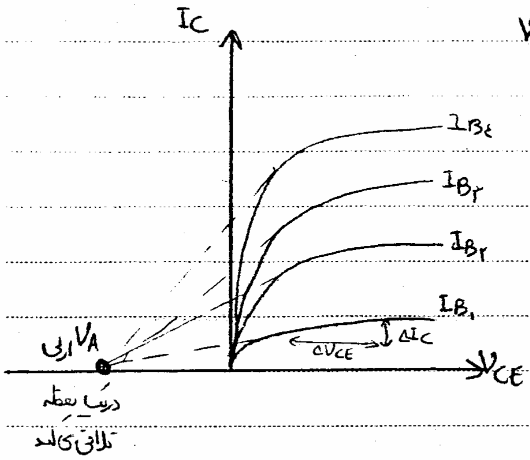


ولتاژ دو سر پیوند CB $\quad V_0 - V_{CB} \simeq -V_{CB} = V_{BC}$

$$L = x_{n_0} = \frac{WN_A}{N_A+N_D} = \left[\frac{2\epsilon (V_0 - V_{CB})}{q}\left(\frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)}\right)\right]^{1/2}$$

$$x_{n_0} = L = \left[\frac{2\epsilon V_{BC} N_A}{qN_D(N_A+N_D)}\right]^{1/2} \xrightarrow{\text{اگر } N_A \gg N_D} L = \left(\frac{2\epsilon V_{BC}}{qN_A}\right)^{1/2}$$

$|V_{CB}|\uparrow \rightarrow L\uparrow \rightarrow \downarrow W_b$ کاهش عرض موثر بیس ← باریک شدن بیس یا مدولاسیون پهنای بیس یا اثر ارلی



بررسی باریک شدن بیس (ارلی) در مشخصه I_C برحسب V_{CE}

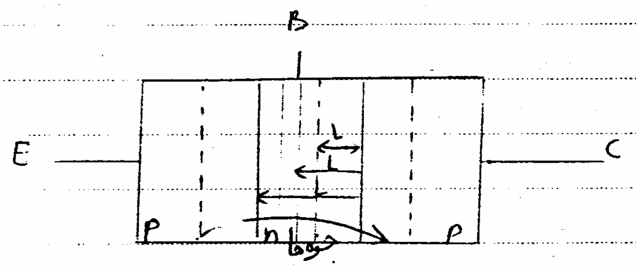
$$V_{CE}\uparrow \to |V_{CB}|\uparrow \to L\uparrow \to W_b\downarrow \to B\uparrow \qquad B = \frac{i_C}{i_{Ep}}$$

$$\Rightarrow \uparrow\alpha \quad \downarrow B\delta \Rightarrow \beta = \frac{\alpha\uparrow}{1-\alpha\uparrow}$$

$$\Rightarrow \uparrow I_C = \uparrow\beta I_B + (\beta^{\uparrow}+1) I_{C0}$$

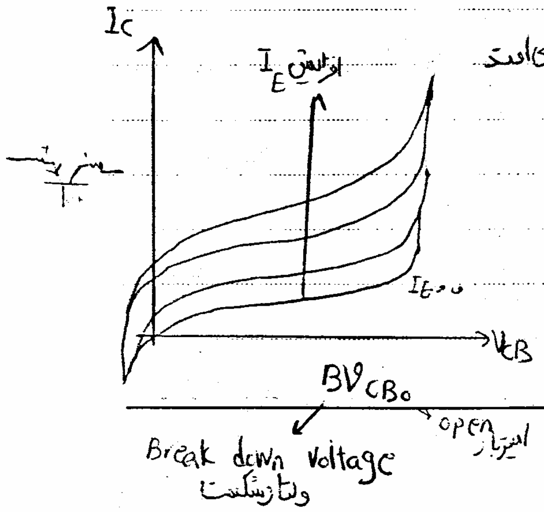
$$\frac{\Delta I_C}{\Delta V_{CE}} = h_{oe} = r_o^{-1} = \left(\frac{V_A}{I_C}\right)^{-1}$$

با افزایش ولتاژ معکوس کلکتور بیس



اگر آنقدر زیاد شود که $W_b = 0$ (رسیدن دو فضای تخلیه دو پیوند)

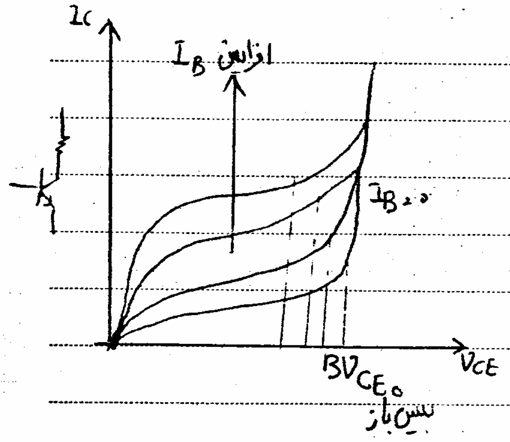
punch through به هم رسیدن جریان حفره‌ها شدت زیاد می‌شود می‌تواند باعث معیوب شدن ترانزیستور می‌شود



معمولاً قبل از p.T. عمل شکست بهمنی پیوند کلکتور بیس اتفاق می‌افتد

$$I_C = (\alpha_N I_E + I_{C0}) M \quad \text{ضریب بهمنی}$$

$$= (\alpha_N I_E + I_{C0}) \frac{1}{1-\left(\frac{V_{CB}}{BV_{CB0}}\right)^2}$$



$$I_E = I_C + I_B$$

اگر $I_B = 0 \rightarrow I_E = I_C$

$$I_C = (\alpha_N I_E + I_{C_0}) M$$

$$I_C = \frac{M I_{C_0}}{1 - M\alpha_N}$$

$$V_{CE} = V_{CB} + \cancel{V_{BE}} \simeq V_{CB}$$

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{V_{CE}}{BV_{CB_0}}\right)^n}$$

اگر $1 - M\alpha_N = 0$ شکست اتفاق می‌افتد و $I_C \rightarrow \infty \Leftarrow 1 - \left(\frac{BV_{CE_0}}{BV_{CB_0}}\right)^n \times \alpha = 0$

ولتاژ شکست

$$\Rightarrow BV_{CE_0} = BV_{CB_0}\sqrt[n]{1 - \alpha_N} \Rightarrow BV_{CE_0} \ll BV_{CB_0}$$

بیس باز   امیتر باز

$V_{EB} \gg \frac{kT}{q}$

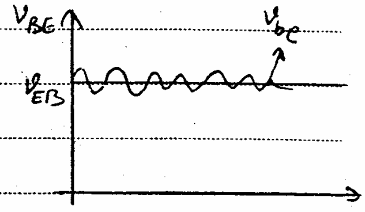
— حل سیگنال کوچک (small signal)

چگالی حفره‌های اضافی در مرز امیتر بیس $\Delta p_E(t) = p_n\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1\right) \simeq p_n e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}$

$$\text{کل } v_{EB} = V_{EB} + v_{be}$$

DC   ac

$$\Delta p_E(t) = p_n e^{\frac{q(V_{EB}+v_{eb})}{kT}} = \underbrace{p_n e^{\frac{qV_{EB}}{kT}}}_{\Delta p_E(DC)} e^{\frac{qv_{eb}}{kT}}$$



اگر $x \ll 1 \Rightarrow e^{x} = x+1 \rightarrow x = \frac{v_{eb}}{kT/q} \ll 1$ سیگنال کوچک

$$\Delta p_E(t) = \Delta p_E(dc)\left(1+\frac{qv_{eb}}{kT}\right)$$

$$Q_N(t) = \frac{1}{2} qAW_b \Delta p_E(t)$$

$$Q_N(t) = \frac{1}{2} qAW_b \Delta p_E(DC)\left(1+\frac{qv_{eb}}{kT}\right)$$

$$i_B(t) = \frac{Q_N(t)}{\tau_p} + \frac{dQ_N(t)}{dt}$$

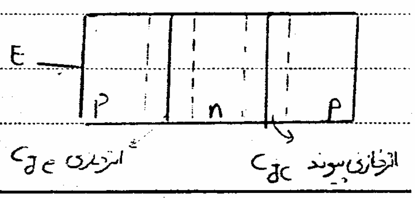
$$i_B(t) = I_B + \underbrace{\underbrace{\frac{qI_B}{kT}}_{G_{se}} v_{eb} + \overbrace{\frac{q}{kT} I_B \tau_p}^{C_{se}} \frac{dv_{eb}}{dt}}$$

کل $i_B(t) = I_B^{(DC)} + i_b(ac)$

$$i_b = \underset{\text{هدایت}}{G_{se}} v_{eb} + \underset{\text{خازن}}{C_{se}} \frac{dv_{eb}}{dt}$$

$$G_{se} = \frac{q}{kT} I_B = \frac{I_B}{V_T} = \frac{I_C}{\beta V_T} = \frac{1}{r_\pi}$$

$$C_{se} = \frac{qI_B}{kT}\tau_p = G_{se}\tau_p = \frac{\tau_p}{r_\pi}$$



کل خازن بیس امیتر $C_\pi = C_{se} + C_{je}$

باید ناحالص امیتر گذاشته شود در C_{j0}

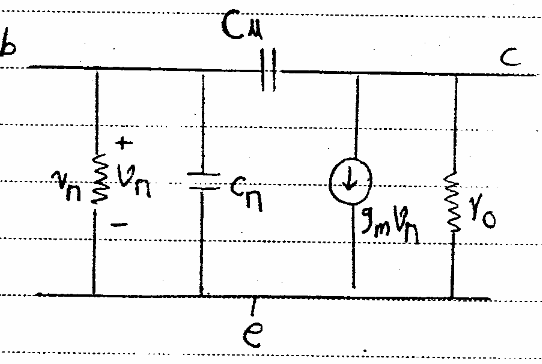
$$C_{j0} = \frac{A}{2}\left[\frac{2q\epsilon}{V_0}\,\frac{N_A N_D}{(N_A+N_D)}\right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{و} \quad C_{je} = \frac{C_{je0}}{\sqrt{1-\frac{V_{EB}}{V_{0EB}}}}$$

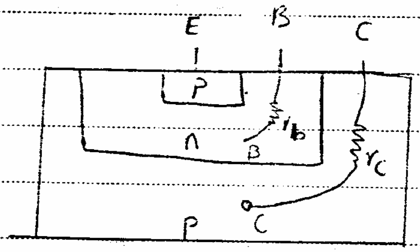
خازن کلکتور بیس $C_\mu = C_{jc} = \dfrac{C_{jc0}}{\sqrt{1-\frac{V_{CB}}{V_{0CB}}}}$

چون $\tau_p = B\tau_t$

$$i_C = \frac{Q_N(t)}{\tau_p} = \beta I_B + \frac{q\beta I_B v_{eb}}{kT}$$

$$g_m = \frac{q\beta I_B}{kT} = \frac{\beta I_B}{V_T} = \frac{I_C}{V_T} = \frac{1}{\frac{r_\pi}{\beta}}$$





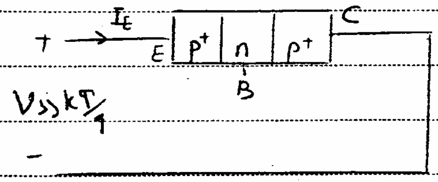
r_b مقاومتهای سیمهای تا بیس واقعی

r_c کلکتور واقعی

تمرین) ترانزیستور متقارن p^+np^+ به صورت‌های زیر بسته شده با فرض $V \gg \frac{kT}{q}$ برای هر مدار حفره‌های اضافی در بیس $\delta p(x_n)$ را رسم نمایید

$$\begin{cases} \alpha_N = \alpha_I = \alpha \\ I_{CS} = I_{ES} \end{cases}$$

(در این مدارات ... از مدل ابرز مول استفاده کنید)



$V \gg \frac{kT}{q}$

حل: طبق مدار B باز $\rightarrow I_B = 0 \Rightarrow V = V_{EB} + V_{BC}$

ابرز مول

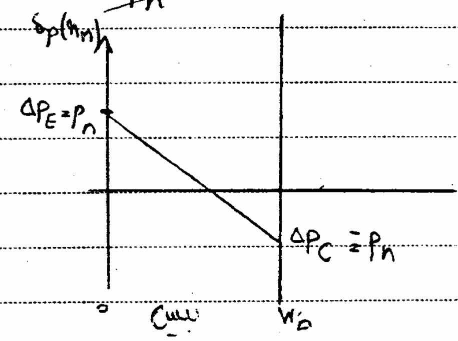
$$V_{EB} \ll V_{BC} \Rightarrow V \simeq V_{BC} \gg \frac{kT}{q} \Rightarrow V_{CB} \ll -\frac{kT}{q}$$

$$\Rightarrow \Delta p_C = p_n \left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1\right) \Rightarrow \Delta p_C = -p_n \qquad I_B = I_E - I_C$$

$$I_B = I_{ES}\frac{\Delta p_E}{p_n} - \alpha_I I_{CS}\frac{\Delta p_C}{p_n} - \alpha_N I_{ES}\frac{\Delta p_E}{p_n} + I_{CS}\frac{\Delta p_C}{p_n}$$

طبق مدار $I_B = 0$: $(1-\alpha) I_{ES} \frac{\Delta p_E}{p_n} + (1-\alpha) I_{ES} \frac{\Delta p_C}{\cancel{p_n}} = 0$

$$\Rightarrow \Delta p_E = -\Delta p_C = p_n$$



ب) $V_{EB} = ?$

$$I_B = 0 \rightarrow I_E = I_C \Rightarrow \cancel{\alpha I_C} + I_{E0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1\right) = \cancel{\alpha I_E} - I_{C0}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1\right)$$

$$\Rightarrow e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} = e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} + 2 \Rightarrow V_{EB} = \frac{kT}{q}\ln 2 \simeq 0/027$$

ج) $I_E = ?$

$$I_B = 0 \Rightarrow I_C = I_E$$

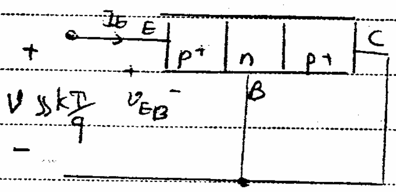
ا) از دید دیودی

$$I_E = \alpha I_C + I_{E0}\left(e^{\frac{qV_{EB}}{kT}} - 1\right)$$

$$I_E = \alpha I_E + I_{E0}(۲-1) \Rightarrow I_E = \frac{I_{E0}}{1-\alpha}$$

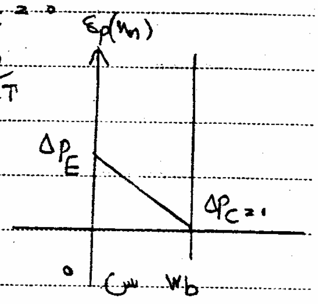
$$I_E = \frac{(1-\alpha^2) I_{ES}}{1-\alpha} = (1+\alpha) I_{ES}$$

شکل (b):



طبق مدار : $V_{CB} = 0 \to \Delta p_C = 0$

$$V_{EB} = V \gg \frac{kT}{q} \to \Delta p_E = p_n e^{\frac{qV}{kT}}$$



از دید مدار $V_{CB} = 0 \to I_C = \alpha I_E + I_{C0}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{q}} - 1\right)$

ب) $I_E = ?$

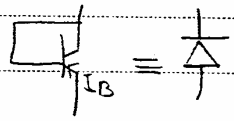
$$\to I_C = \alpha I_E$$

از دید $I_E = \alpha I_C + I_{E0} e^{\frac{qV}{kT}}$

$$I_E = \alpha^2 I_E + I_{E0} e^{\frac{qV}{kT}}$$

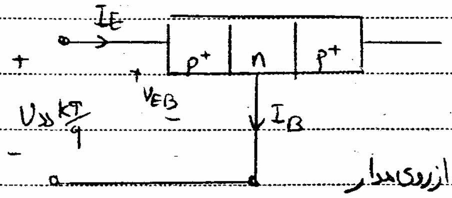
$$I_E = \frac{I_{E0}}{1-\alpha^2} e^{\frac{qV}{kT}} = I_{ES} e^{\frac{qV}{kT}}$$

p_n شبیه شرایط $I_E = I_{ES} e^{\frac{qV}{kT}}$



ج) $I_B = I_E - I_C = I_E - \alpha I_E = \frac{I_{E0}}{1+\alpha} e^{\frac{qV}{kT}}$

سئوال ۷ (c) :



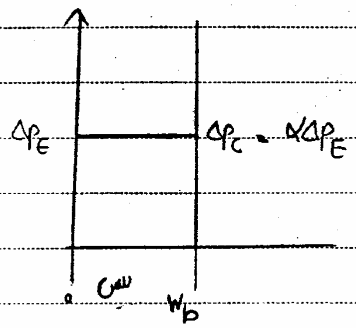
الف) توزیع حاملهای اضافی در بیس $\delta_p(x_n)$ ؟

از روی مدار : $V_{EB} = V \gg \frac{kT}{q}$

$$\Delta p_E = p_n e^{\frac{qV}{kT}}$$

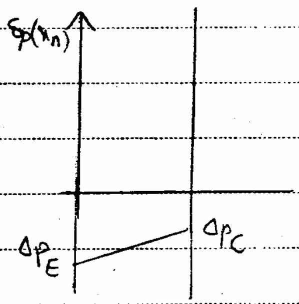
طبق مدار $I_C = 0$

$$\frac{I_{CS}}{p_n}\left(\alpha \Delta p_E - \Delta p_C\right) = 0 \rightarrow \Delta p_C = \alpha \Delta p_E$$



ب) اگر $V \ll -\frac{kT}{q}$ یعنی V منفی باشد $\delta_p(x_n)$ و V_{CB} و I_E ؟

$$V = V_{EB} \ll -\frac{kT}{q} \rightarrow \Delta p_E = -p_n \rightarrow \Delta p_C = \alpha \Delta p_E = -\alpha p_n$$

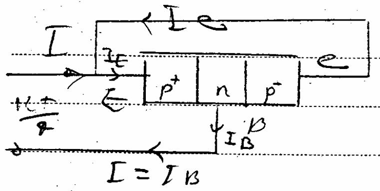


طبق مدار $I_C = 0$

$$V_{EB} = V \ll -\frac{kT}{q} \rightarrow I_E = \cancel{\alpha I_C} - I_{E_0} = -I_{E_0}$$

چون $I_C = 0 \rightarrow \alpha I_E - I_{C_0}\left(e^{\frac{qV_{CB}}{kT}} - 1\right) = 0$

$$V_{CB} = \frac{kT}{q}\ln(1-\alpha)$$



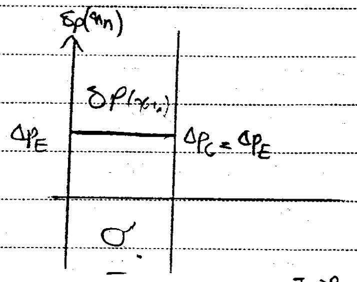
شکل (b) : ج)

طبق شکل : $V = V_{EB} \gg \frac{kT}{q}$

ابرز مول I_C, I_E.

$\rightarrow \Delta p_E = p_n e^{qV/kT}$

طبق مدار : $V_{CB} = V \gg \frac{kT}{q} \rightarrow \Delta p_C = p_n e^{qV/kT}$



ب) $I = ?$ $\qquad I = I_E - I_C$

ابرز مول داریم

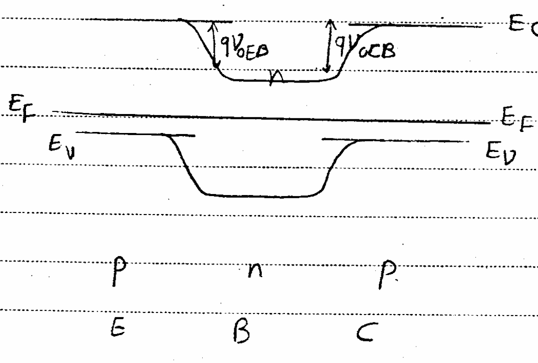
$$I = \alpha I_C + I_{E_0}\left(e^{qV/kT} - 1\right) - \alpha I_E + I_{C_0}\left(e^{qV/kT} - 1\right)$$

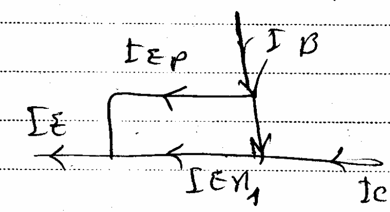
$$I = -\alpha I + 2 I_{E_0} e^{qV/kT}$$

$$I = \frac{2 I_{E_0}}{1+\alpha} e^{qV/kT} = \frac{2(1-\alpha^2) I_{E_S}}{1+\alpha} e^{qV/kT} = 2(1-\alpha) I_{E_S} e^{qV/kT}$$

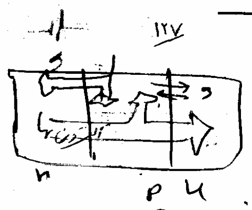
۲) دیاگرام باند انرژی را برای ترانزیستور pnp و npn در حالت تعادل و تحت بایاس نرمال

تعادل





$I_C = B I_{En}$



جریانهای مختلف در ترانزیستور npn در ناحیه فعال :

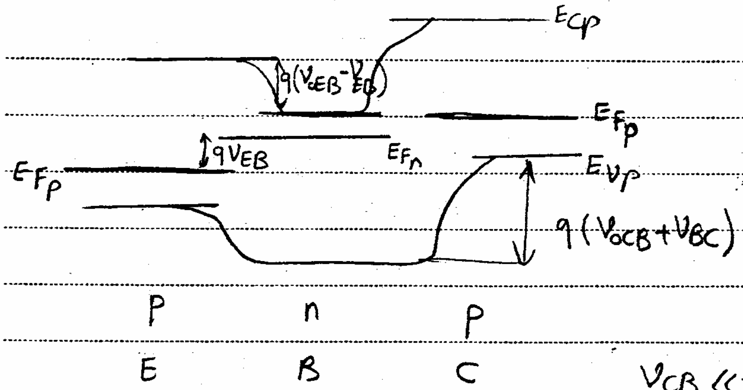
۱- جریان الکترونهای تزریقی از امیتر به بیس که موفق به عبور از بیس می‌شوند I

۲- جریان [illegible] با [illegible] معکوس [illegible] کلکتور

۴- جریان [illegible] الکترون [illegible] برای [illegible] جریان [illegible] (۸)

۵) [illegible]

۶- جریان الکترونهای تزریقی از امیتر به بیس که [illegible] ترکیب (۱) می‌شوند



$V_{EB} \gg \frac{kT}{q}$ $\qquad$ $V_{CB} \ll -\frac{kT}{q}$

۳) در یک ترانزیستور متقارن p^+np^+ الف) جریان $I_{CS} = I_E = ?$

ب) اگر $V_{CB} = ۴۰V$ باشد جریان I_B را به ازای $\alpha = ۱$ برای $V_{EB} = ۰٫۳V$ و برای $۰٫۶V$ محاسبه کنید.

ج) مقادیر α و β را محاسبه کنید.

$\mu_p^p = ۲۰۰$ $\qquad$ $\mu_n^n = ۱۳۰۰$

$\tau_n^p = ۰٫۱\,\mu sec$ $\qquad$ $N_A = ۱۰^{۱۷}$ $\qquad$ $N_D = ۱۰^{۱۵}$ $\qquad$ $W_b = ۰٫۵\,\mu m$

$n_i = ۱٫۵ \times ۱۰^{۱۰}$ $\qquad$ $\frac{kT}{q} = ۰٫۰۲۶$ $\qquad$ $\mu_n^p = ۷۰۰$ $\qquad$ $A = ۱۰^{-۴}\,cm^۲$

حل: $L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{\frac{\mu_p kT}{q}\tau_p} = ۱۰٫۸ \times ۱۰^{-۳}\,cm$

$$\frac{D_p}{L_p} = \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} = \sqrt{\frac{\mu_p \frac{kT}{q}}{\tau_p}}$$

$$p_n = \frac{n_i^۲}{N_D} = ۲٫۲۵ \times ۱۰^۵$$

روابط β و γ و α

$I_{Es} = \left(qA \frac{D_p}{L_p} p_n\right) \mathrm{Cth} \frac{W_b}{L_p} = ۰/۸۴\ pA$

ب) $\alpha_I = \alpha_N$ چون متقارن

$\alpha = B\gamma = B\times 1 = \mathrm{sech} \frac{W_b}{L_p} = ۰/۹۹$

$I_B = I_E - I_C = (1-\alpha) I_{Es} \left(e^{\frac{qV_{EB}}{KT}} - 1\right) - (\alpha - 1) I_{Cs} \left(e^{\frac{qV_{CB}}{KT}} - 1\right)$

$I_B = \begin{cases} ۰/۸۶nA & V_{EB} = ۰/۳ \\ ۰/۸۸nA & V_{EB} = ۰/۶ \end{cases}$

ج) از رابطه γ $\Rightarrow \gamma = ۰/۹۹۸$

$\alpha = B\gamma = ۰/۹۹۸$

$B = \frac{\alpha}{1-\alpha} = ۸۲$