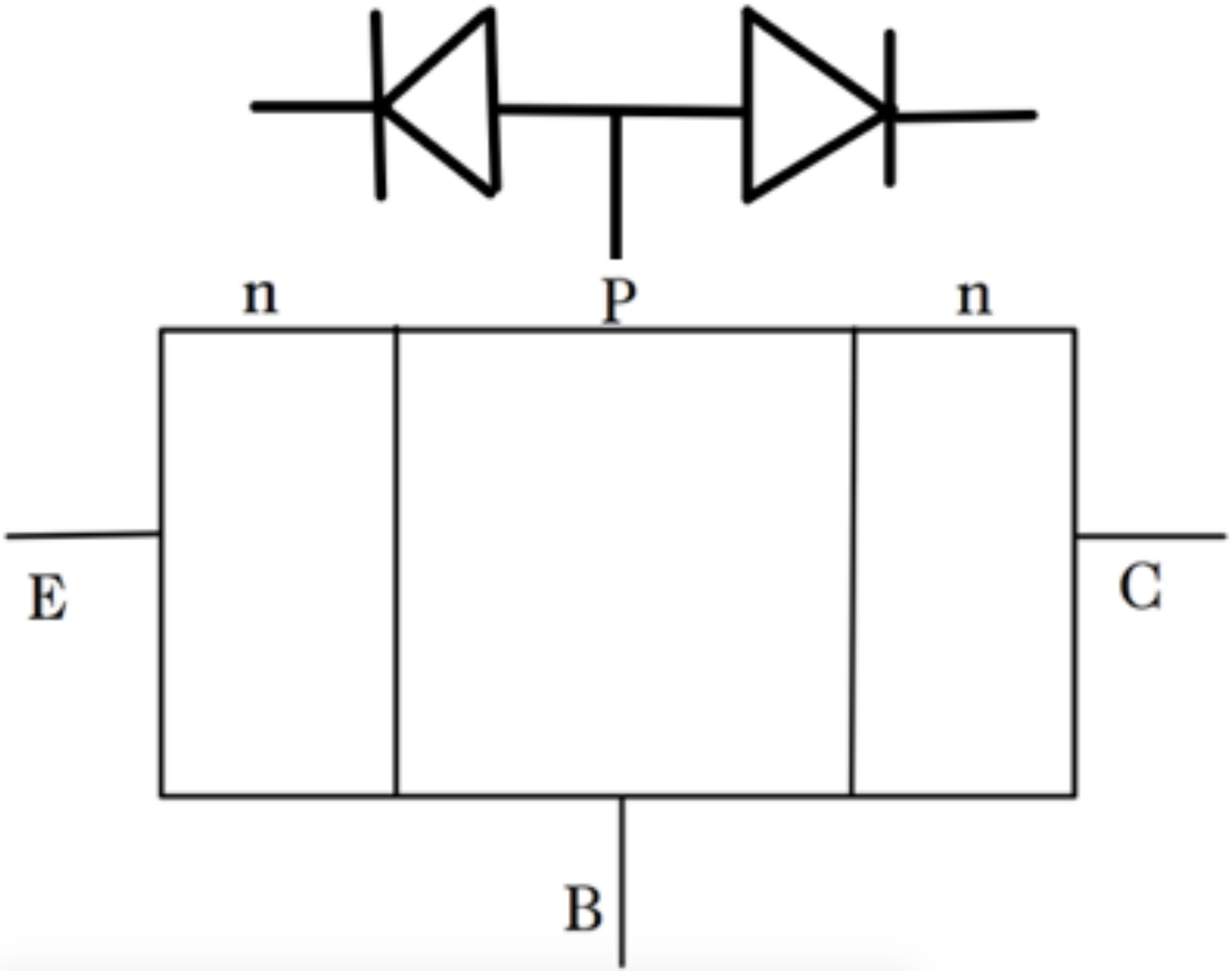
به نام خدا

فیزیک الکترونیک
ترانزیستورهای دو قطبی

ارائه دهنده: حسین کرمی طاهری

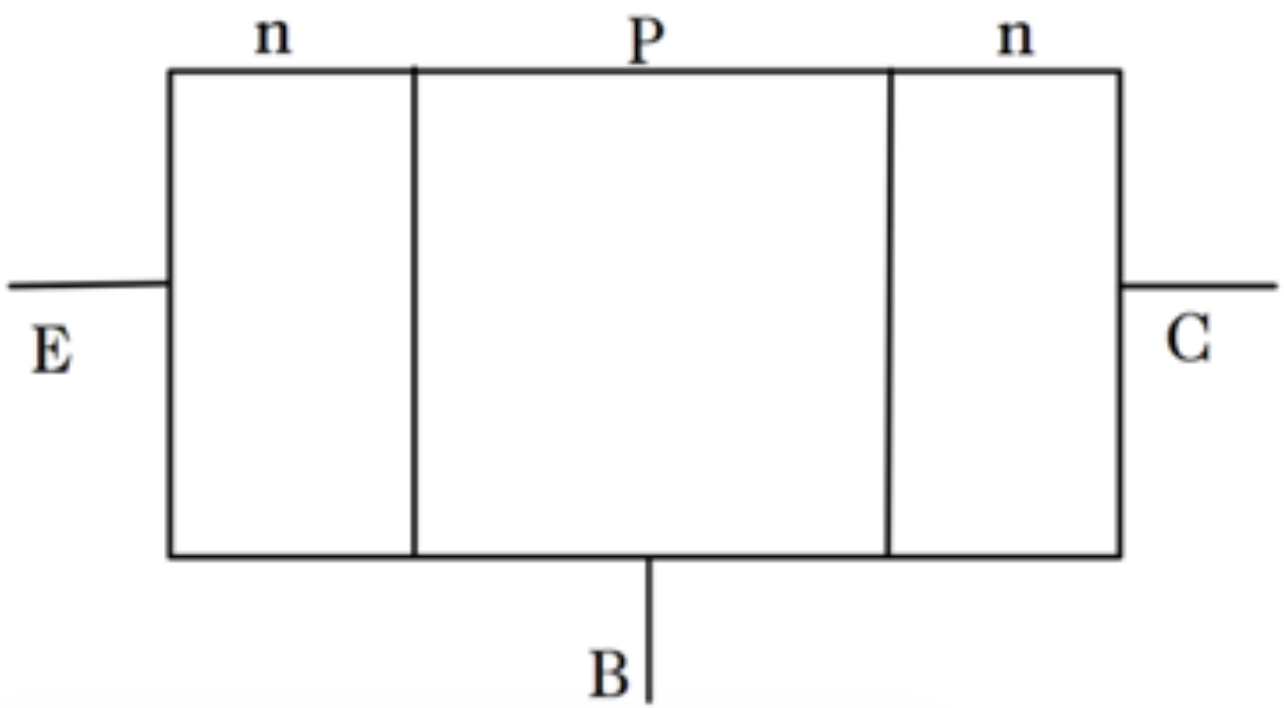
ساختار یک ترانزیستور دو قطبی npn

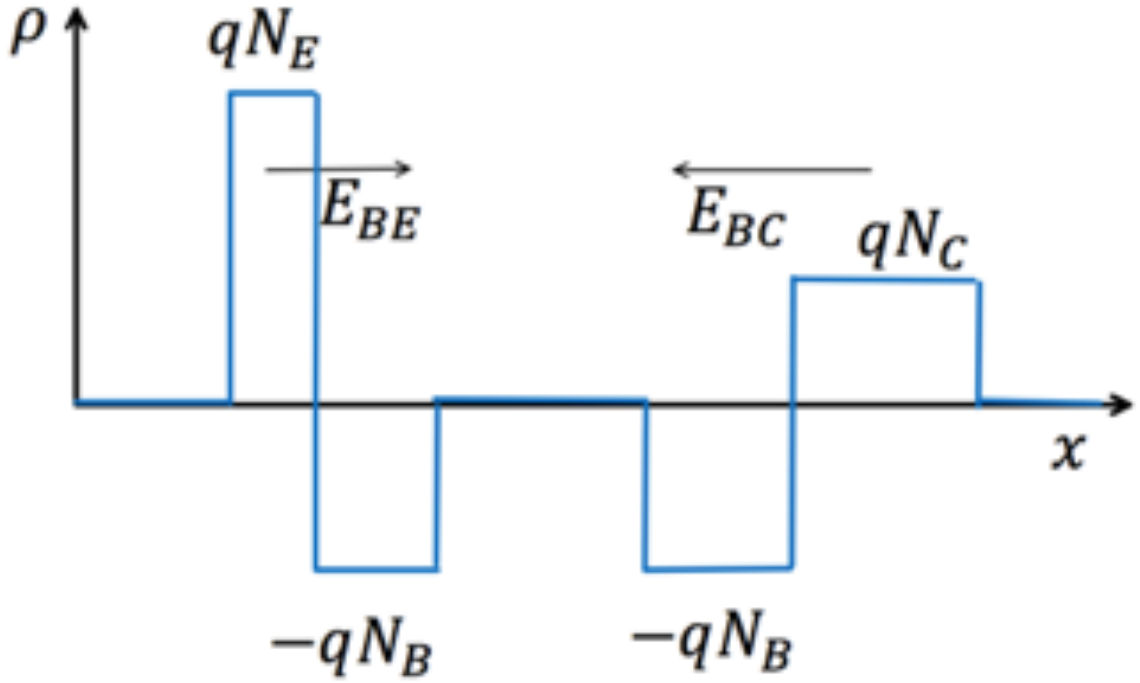


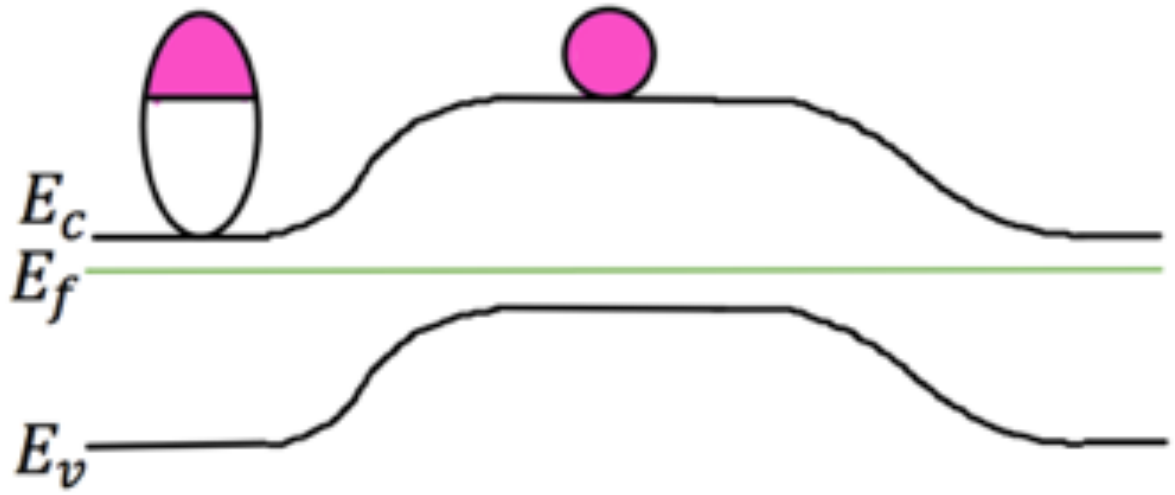
- مشابه دو دیود پشت به پشت
- متشکل از دو پیوند pn
- **هدف**: تحلیل ساختار و طراحی صحیح آن به منظور دستیابی به رفتار ترانزیستوری به جای دو دیود پشت به پشت

دیاگرام باند حالت تعادل

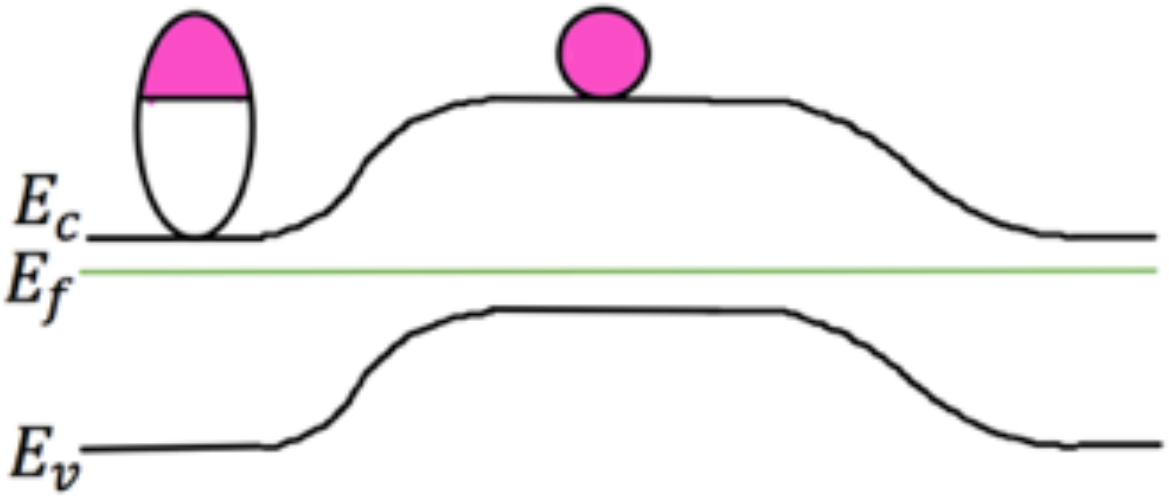
- در حالت تعادل جریان خالص الکترون ها برابر صفر است
- به طور مشابه جریان حفره ها نیز صفر است



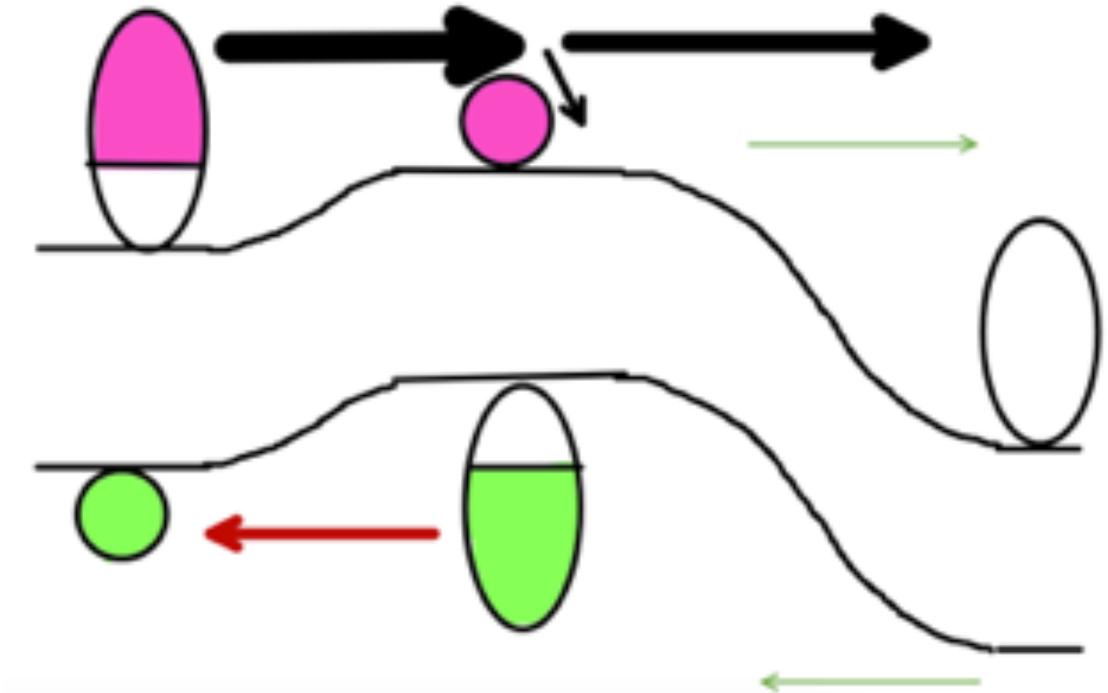


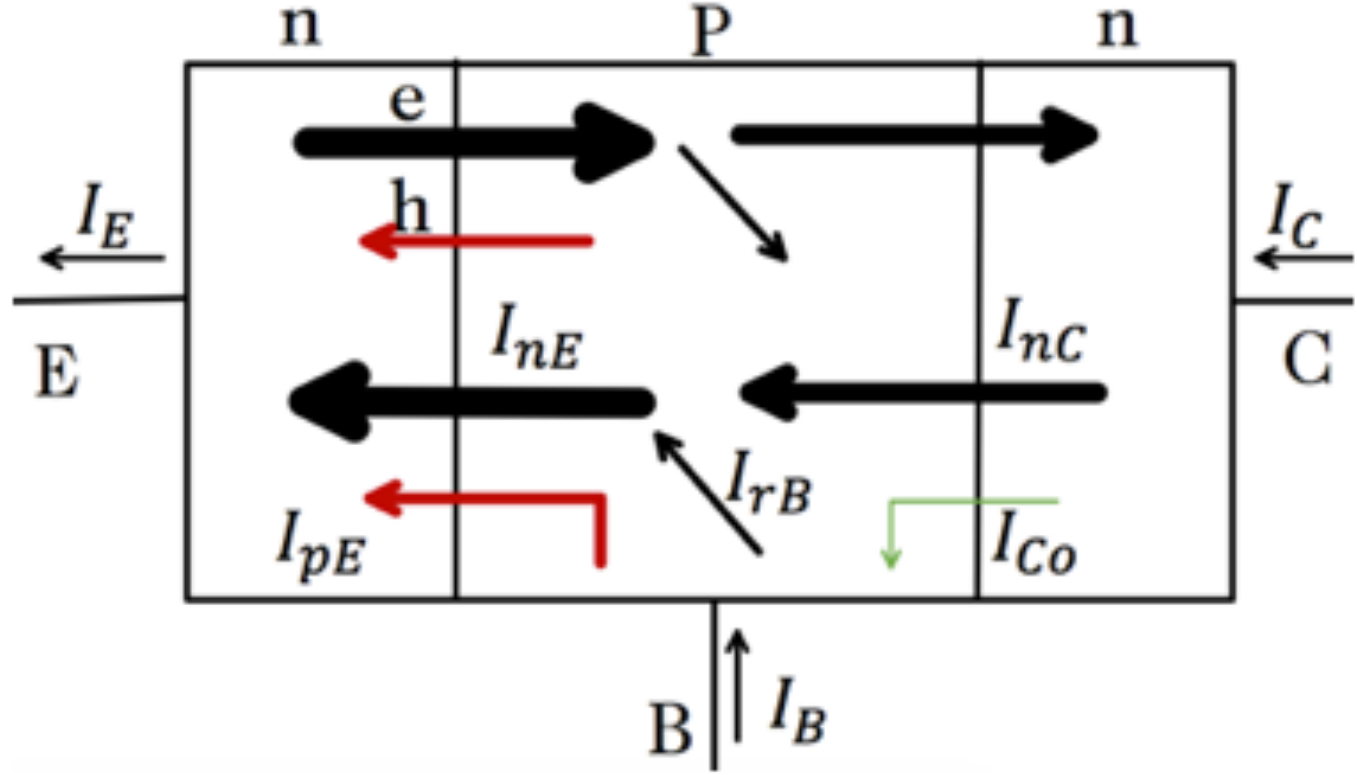


دیاگرام باند در بایاس فعال

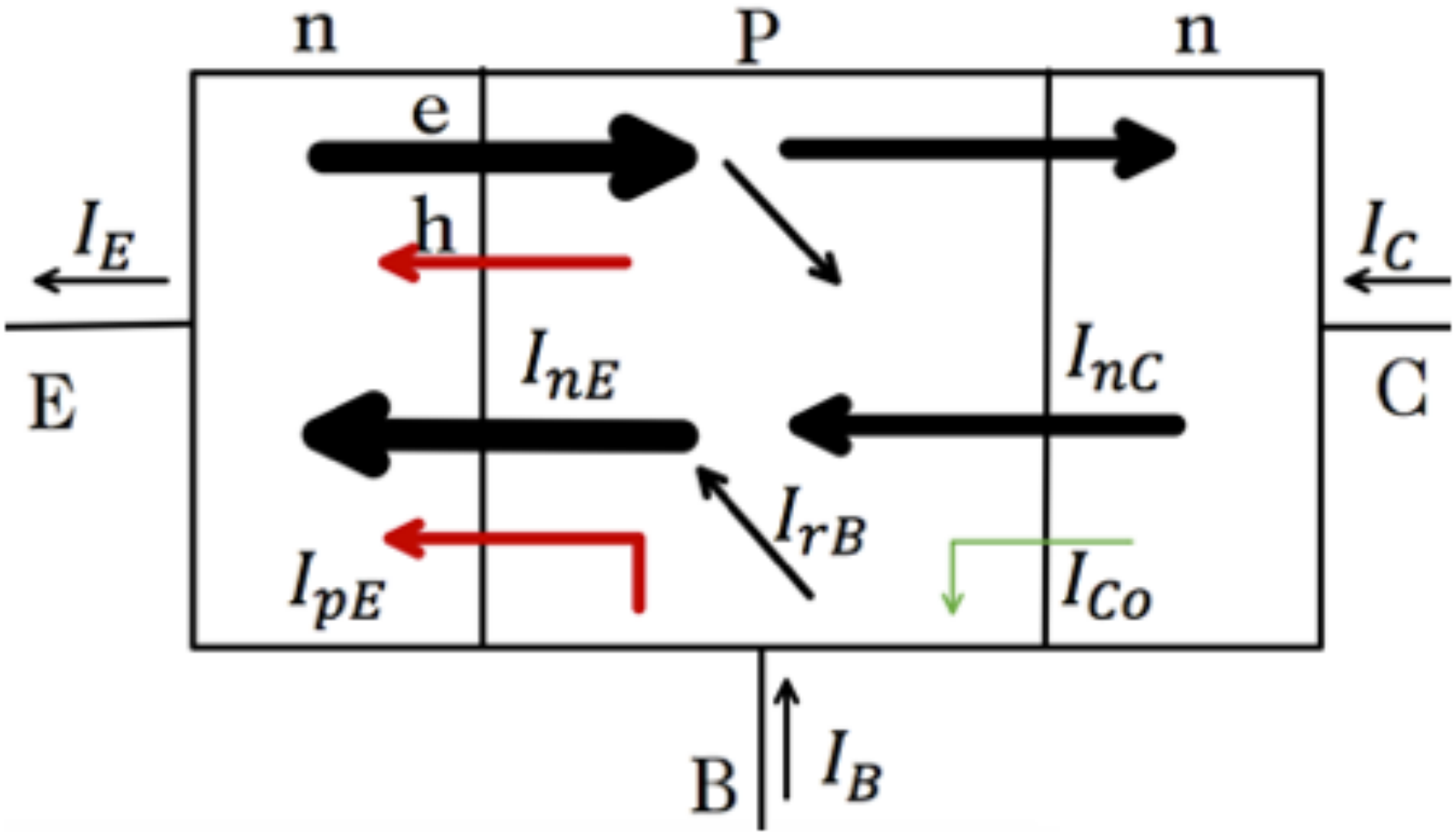


- ایجاد جریان در پایه های مختلف ترانزیستور





جریان پایه های ترانزیستور دو قطبی npn



$$I_E = I_{nE} + I_{pE}$$

$$I_C = I_{nC} + I_{Co}$$

$$I_B = I_{pE} + I_{rB} - I_{Co}$$

$$I_{rB} = I_{nE} - I_{nC}$$

بهره جریان بیس مشترک ترانزیستور دو قطبی npn: α

$$\alpha = \frac{\mathrm{I_C}}{\mathrm{I_E}} \approx \frac{I_{nC}}{I_E} = \frac{I_{nC}}{I_{nE}} \frac{I_{nE}}{I_E} = \alpha_T \, \gamma$$

- فاکتور انتقال $\alpha_T = \frac{I_{nc}}{I_{nE}}$ راندمان تزریق امیتر $\gamma = \frac{I_{nE}}{I_E}$
- هدف: طراحی مناسب ترانزیستور دو قطبی به منظور نزدیک کردن α به یک
- نزدیک کردن فاکتور انتقال به یک: کوچک کردن عرض بیس و استفاده از ترانزیستورهای رانشی
- نزدیک کردن راندمان تزریق به یک: دوپینگ زیاد امیتر و استفاده از ساختار غیر متجانس

چگالی حامل های اقلیت در ناحیه خنثی بیس

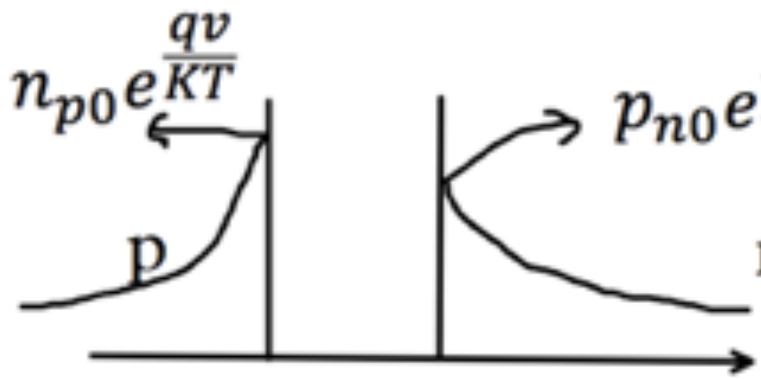
$$0 = -\frac{n_p -}{\tau_n n_{p0}} + D_n \frac{d^2 n_p}{dx^2}$$

$$n_p(0 < x < W) = \checkmark$$

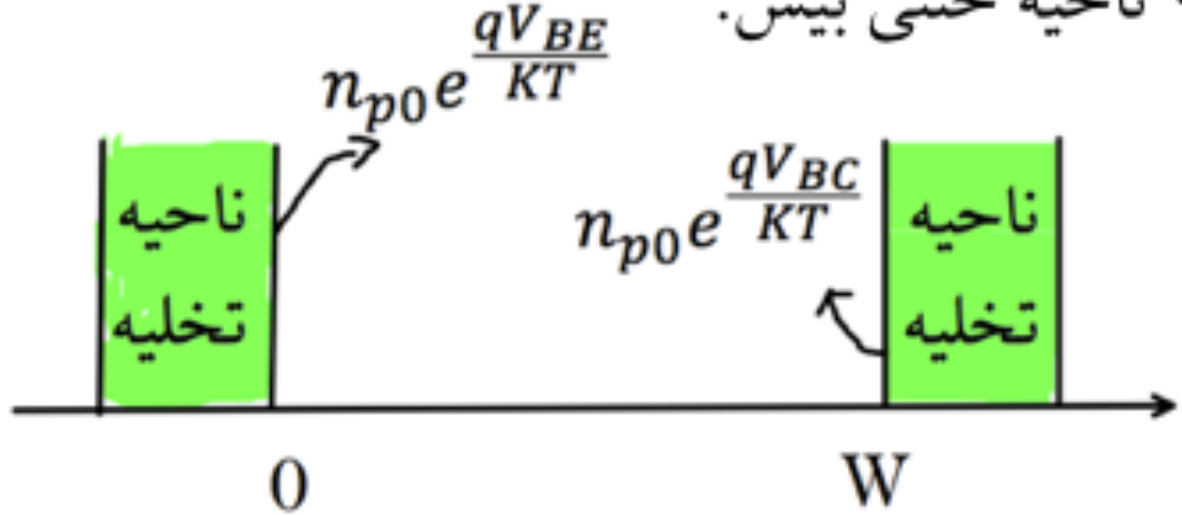
$$I_{nE} = AqD_n \frac{dn_p}{dx}(0) = \checkmark$$

$$I_{nC} = AqD_n \frac{dn_p}{dx}(W) = \checkmark$$

- در پیوند pn:



- ناحیه خنثی بیس:



جریان های الکترونی در حالت بایاس فعال

$$V_{BC} < 0 \Rightarrow e^{\frac{qV_{BC}}{KT}} \approx 0 \Rightarrow n_p(x = W) \approx 0$$

- دو حالت حدی:

۱ـ عرض مؤثر بیس خیلی بزرگتر از طول نفوذ باشد $W \gg L_n$

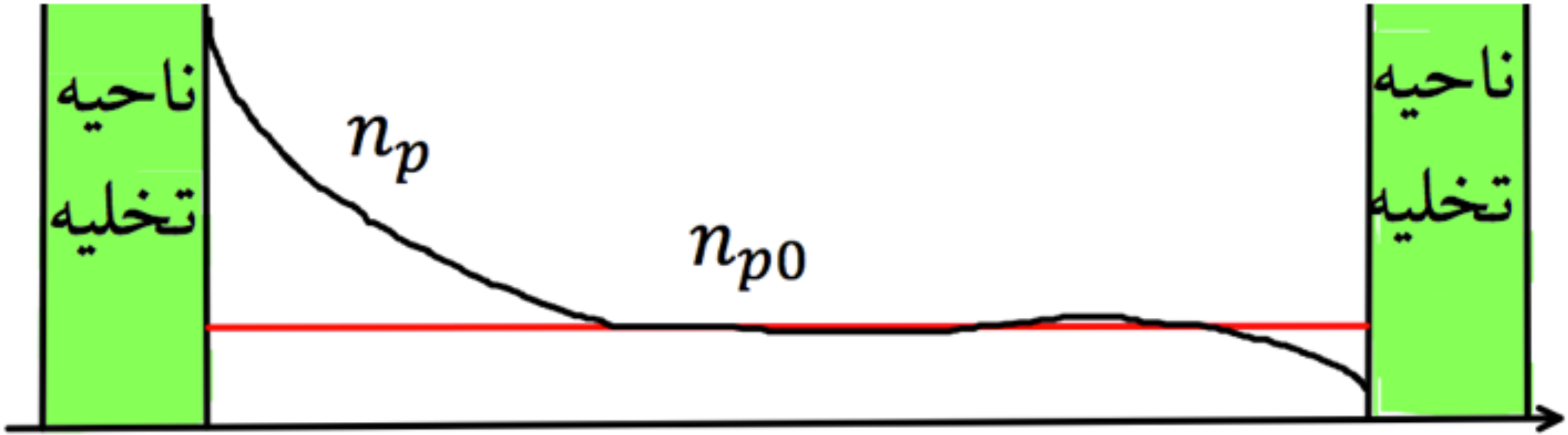
$$I_{nE} = \frac{AqD_n n_{p0}}{L_n} \coth\left(\frac{W}{L_n}\right) e^{\frac{qV_{BE}}{KT}}$$

۲ـ عرض مؤثر بیس خیلی کوچکتر از طول نفوذ باشد $W \ll L_n$

$$I_{nC} = \frac{AqD_n n_{p0}}{L_n} \; cosech\left(\frac{W}{L_n}\right) e^{\frac{qV_{BE}}{KT}}$$

$$I_{rB} = I_{nE} - I_{nC}$$

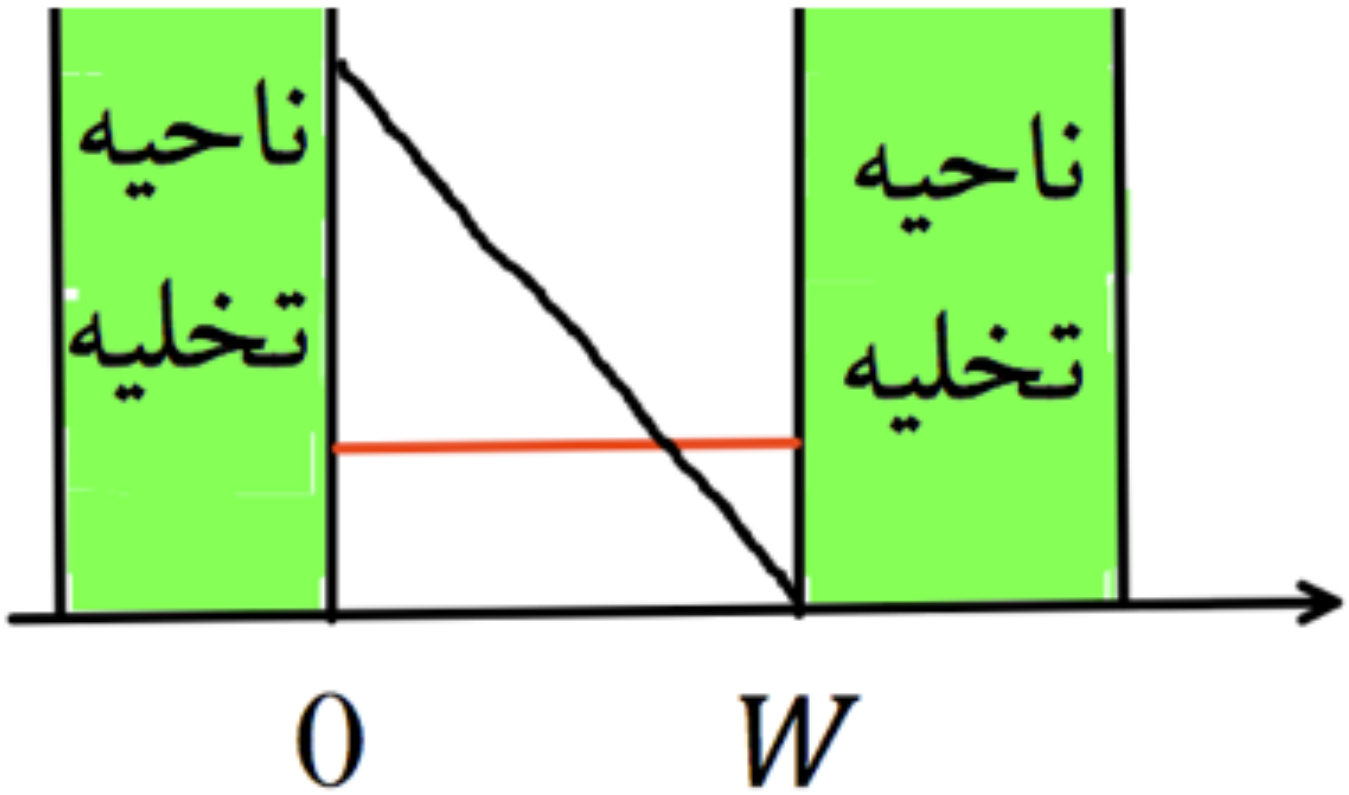
عرض مؤثر بیس خیلی بزرگتر از طول نفوذ



$$I_{nE} \approx \frac{AqD_n n_{p0}}{L_n} e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} \longrightarrow \alpha_T \approx 0$$

$$I_{nC} \approx 0$$

عرض مؤثر بیس خیلی کوچکتر از طول نفوذ



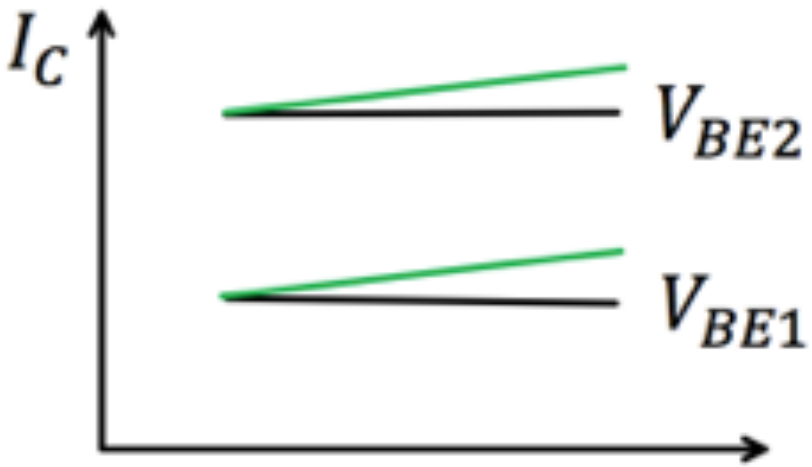
- چگالی حامل های اقلیت در ناحیه خنثی بیس تغییرات تقریبا خطی دارد

$$I_{nE} \approx I_{nC} \approx \frac{AqD_n n_{p0}}{W} e^{\frac{qV_{BE}}{KT}}$$

$$\Rightarrow \alpha_T \approx 1$$

اثر ارلی

$$I_{nE} \approx I_{nC} \approx \frac{AqD_n n_{p0}}{W} e^{\frac{qV_{BE}}{KT}}$$



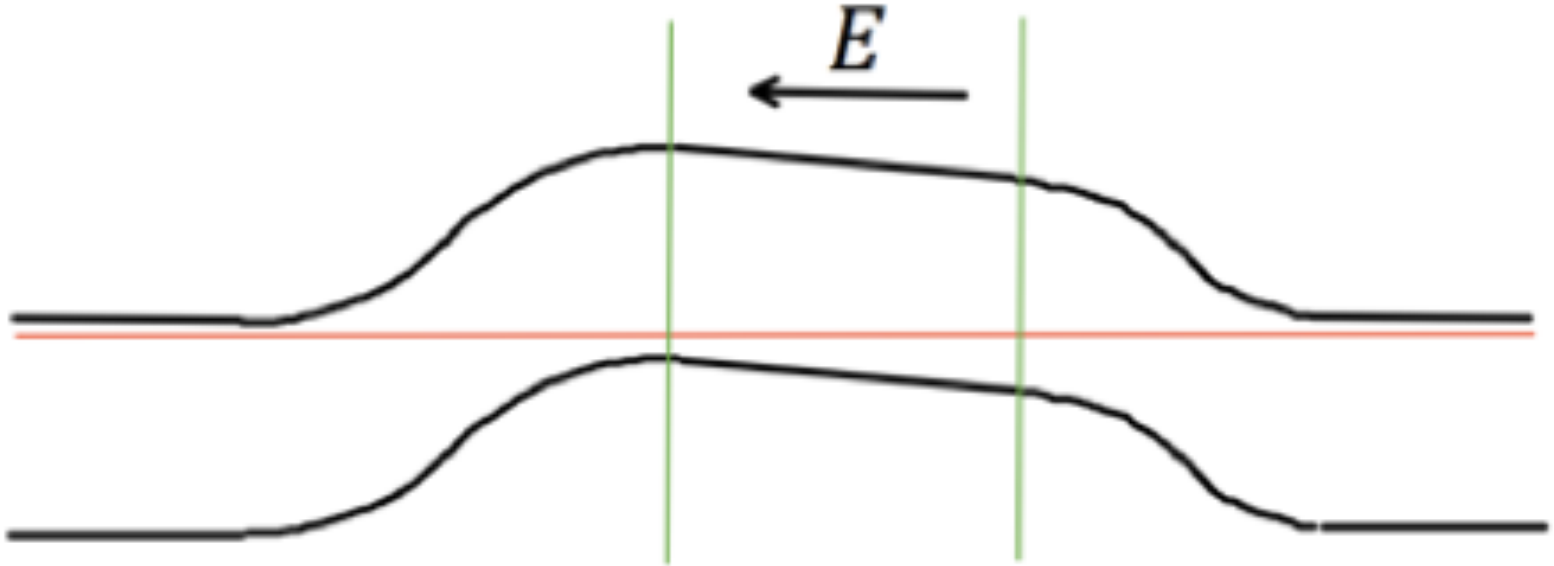
$$V_{CE} = V_{BE} - V_{BC}$$

- افزایش ولتاژ CE با منفی تر کردن ولتاژ BC منجر به افزایش ناحیه تخلیه سمت بیس ـ کالکتور خواهد شد.
- در نتیجه عرض ناحیه خنثی بیس کاهش و جریان کالکتور افزایش می‌یابد.

ترانزیستور رانشی

- دوپینگ ناحیه بیس از سمت امیتر به سمت کالکتور کاهش پیدا می کند.

دیاگرام باند در حالت تعادل



- شیب منفی دیاگرام باند در ناحیه خنثی بیس ⇐ میدان الکتریکی داخلی منفی در ناحیه خنثی بیس ⇐ اعمال نیرو به الکترون های تزریق شده از امیتر به بیس به سمت کالکتور ⇐ بخشی از این الکترون ها عرض بیس را با مکانیزم رانش طی می کنند.

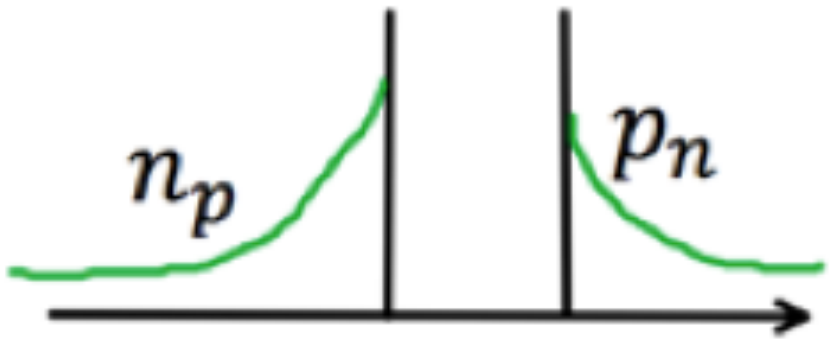
محاسبه I_{pE}

- پیوند pn:

$$J = J_n + J_p$$

$$J_n = \frac{qD_n n_{p0}}{L_n}\left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1\right)$$

$$J_p = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p}\left(e^{\frac{qV}{KT}} - 1\right)$$



- ترانزیستور دوقطبی npn:

به دلیل محدود بودن عرض امیتر

$$I_{pE} = \frac{AqD_{p,E}p_{n0,E}}{W_E}\left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1\right)$$

راندمان تزریق

$$\gamma = \frac{I_{nE}}{I_E} = \frac{I_{nE}}{I_{nE} + I_{pE}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{pE}}{I_{nE}}}$$

- دو مکانیزم بهینه کردن راندمان تزریق امیتر:

۱ ـ افزایش دوپینگ امیتر نسبت به بیس

۲ ـ کاهش چگالی ذاتی حامل ها در امیتر نسبت به بیس

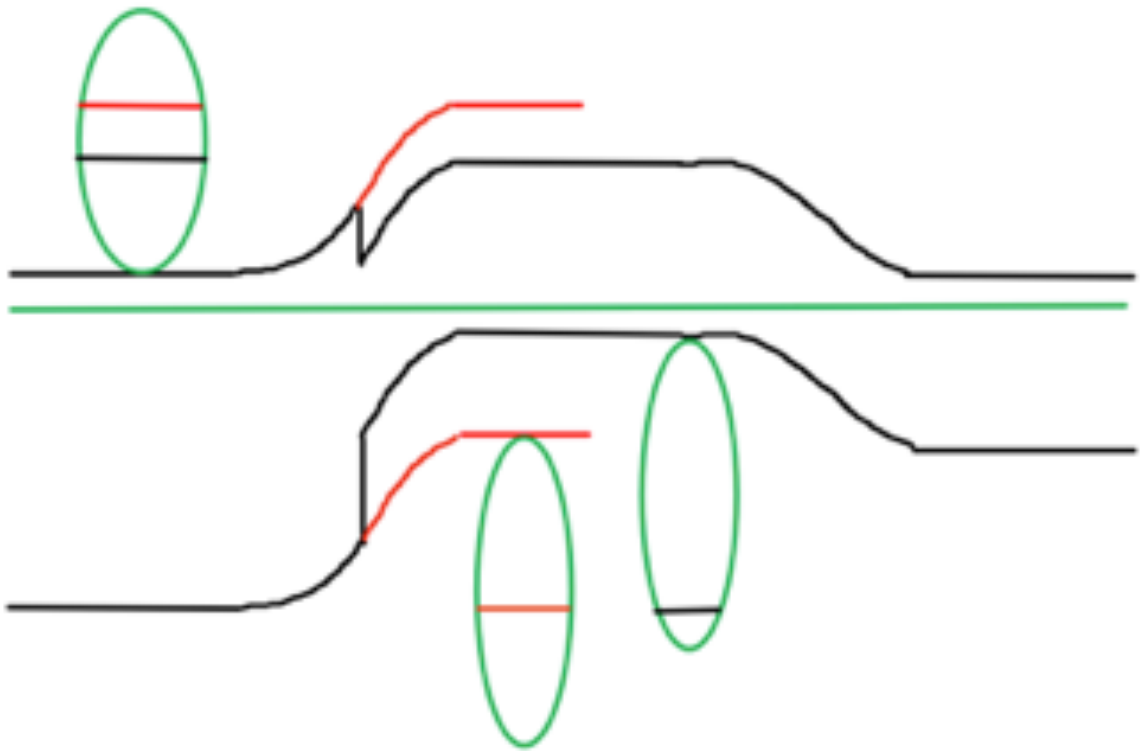
$$\frac{I_{pE}}{I_{nE}} \approx 0 \Rightarrow \gamma \approx 1$$

$$\frac{I_{pE}}{I_{nE}} = \frac{\frac{D_{p,E} p_{n0,E}}{W_E}}{\frac{D_n n_{p0}}{W}} = \frac{\frac{D_{p,E} n_{i,E}^2}{W_E N_E}}{\frac{D_n n_{i,B}^2}{W N_B}} \approx \frac{N_B}{N_E} \frac{n_{i,E}^2}{n_{i,B}^2}$$

HBT: Heterojunction Bipolar Transistor

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

- امیتر از ماده ای با گاف انرژی بزرگتر انتخاب کنند.



- سد مقابل الکترون های به اندازه ΔE_C کاهش و سد مقابل حفره ها به اندازه ΔE_V افزایش می یابد.
- بنابراین جریان الکترون ها نسبت به جریان حفره ها افزایش می یابد و راندمان تزریق بهتر می شود.