





کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس:	  
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

درس ۱۵ = دیود پیوند pn (I)

مشخصات جریان - ولتاژ

۱ نوامبر ۲۰۰۵




محتویات

۱- پیوند pn تحت بایاس

۲- مشخصات جریان - ولتاژ


تکالیف خواندنی

Howe و Sodini، فصل ۶، بخش‌های ۶/۳ - ۶/۱

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس:	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project 
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

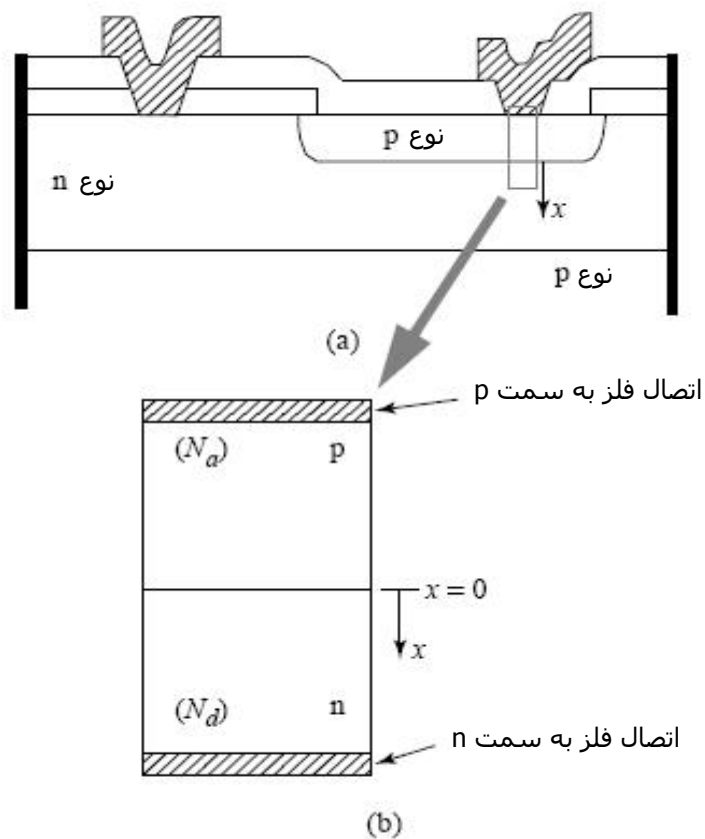
سؤالات کلیدی

- چرا دیود پیوند pn یکسو سازی جریان را انجام می دهد؟
- چرا جریان پیوند در بایاس مستقیم افزایش می یابد به صورت $\sim \exp \frac{gV}{kT}$ ؟
- وابستگی های محوری جریان اشباع چه هستند (فاکتور جلوی نمایی)؟

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	عنوان درس: لبیکال ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT


۱- پیوند pn تحت بایاس

روی ناحیه ذاتی تمرکز کنید:

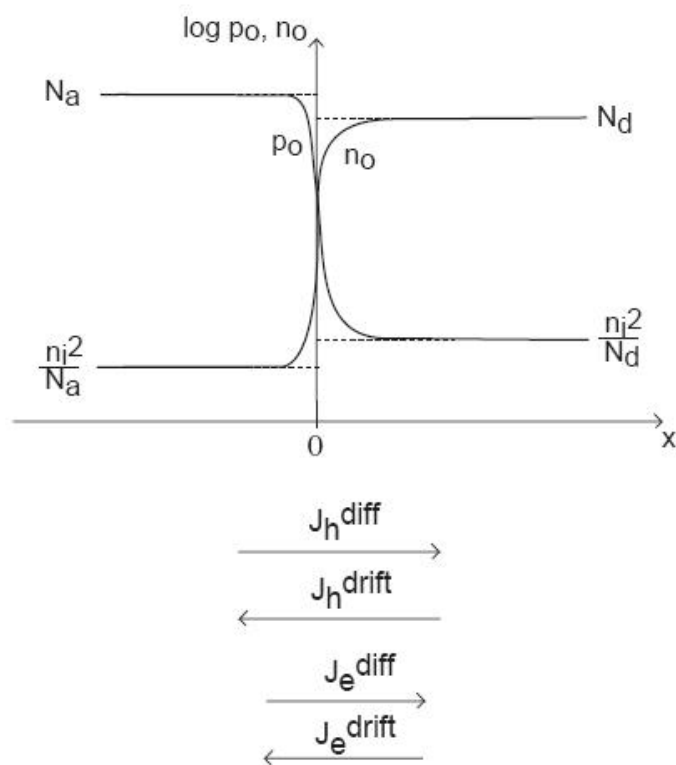


به محض اعمال ولتاژ:

- الکترو استاتیک به هم می خورد: ناحیه تهی وسعت می یابد یا کوچک می شود
- جریان جاری می شود (با رفتار یکسو شوندگی)
- ذخیره شارژ حامل



کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	بهشتی عنوان درس:	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

نمودارهای حامل در تعادل حرارتی:



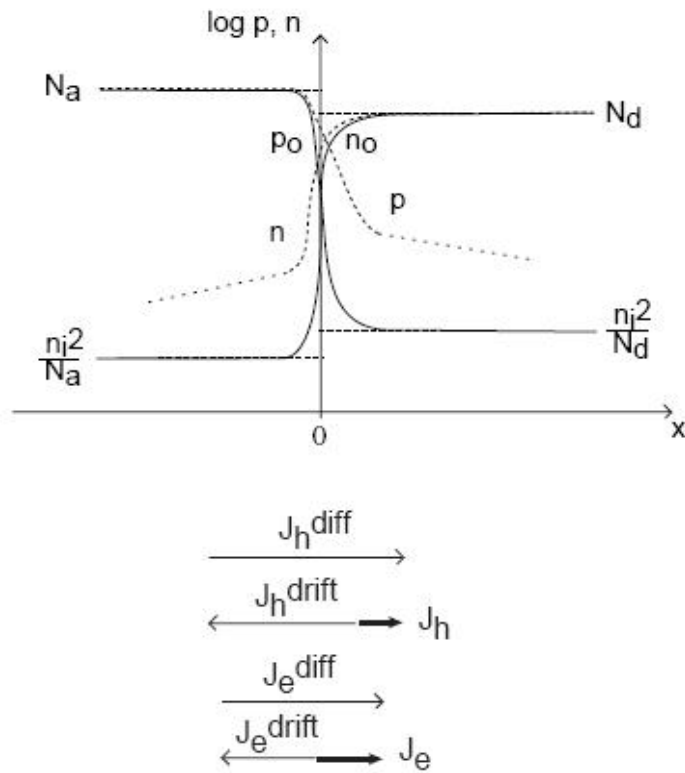
داخل SCR در تعادل حرارتی: بالانس دینامیکی بین رانش و نفوذ برای الکترون‌ها و حفره‌ها.

$$|J_{\text{نفوذ}}| = |J_{\text{رانش}}|$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

تراکم حامل در پیوند pn تحت بایاس:

● برای $V > 0$ ، $V \downarrow \Rightarrow \phi_B \downarrow \Rightarrow |E_{SCR}| \downarrow \Rightarrow$ |ارانش J|



تعداد جریان در SCR شکسته شده است:



$$|نفوذ J| < |ارانش J|$$

● جریان نفوذ خالص در SCR

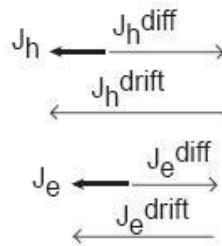
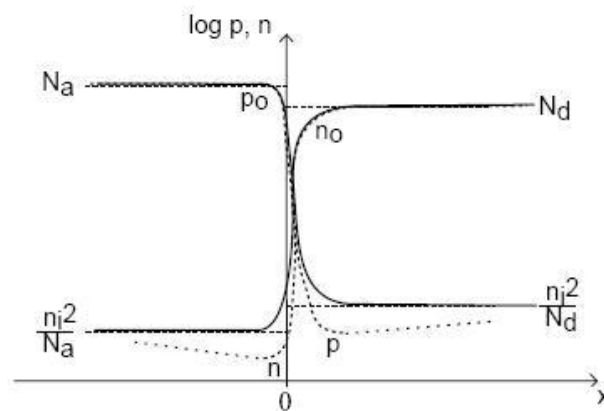
\Leftarrow تزریق حامل اقلیت به QNR

\Leftarrow فزونی تراکم حامل اقلیت در QNR

مقدار زیادی از حامل اکثریت در QNR \Leftarrow جریان می‌تواند بالا باشد.

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

● برای $V < 0$ ، $\uparrow \phi_B - V \Rightarrow \uparrow |E_{SCR}| \Rightarrow \uparrow$ |رانش J |



تعدادل جریان در SCR شکسته شده است:



$$|نفوذ J| > |رانش J|$$

● جریان رانش خالص در SCR

⇐ استخراج حامل اقلیت از QNR

⇐ کمبود تراکم حامل اقلیت در QNR

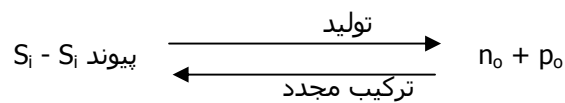
⇐ چندتایی حامل اکثریت در QNR ⇒ جریان کوچک.

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

اگر تراکم حامل اقلیت در QNR از حالت تعادل حرارتی تغییر کند چه اتفاقی می افتد؟

← تعادل بین تولید و ترکیب مجدد شکسته شده

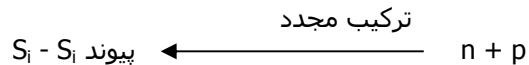
● در تعادل حرارتی: نرخ شکستن پیوندهای $S_i - S_i$ با نرخ تشکیل پیوندها در حال تعادل است



● در صورت تزریق حامل اقلیت:

← تراکم حامل بالای تعادل

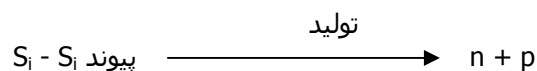
← ترکیب مجدد غالب می شود







● در صورت استخراج حامل اقلیت:

← تراکم حامل زیر تعادل

← تولید غالب می شود



کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس:	  
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

تولید و ترکیب مجدد کجا اتفاق می‌افتد؟

در ادوات مدرن، ترکیب مجدد عمدتاً در سطوح اتفاق می‌افتد:

● تناوب کریستالی ایده‌آل در یک سطح شکسته شده



⇐ تعداد زیادی پیوندهای شکسته شده: مراکز تولید و ترکیب مجدد

● ادوات مدرن بسیار کوچک هستند

⇐ نسبت سطح به حجم بالا

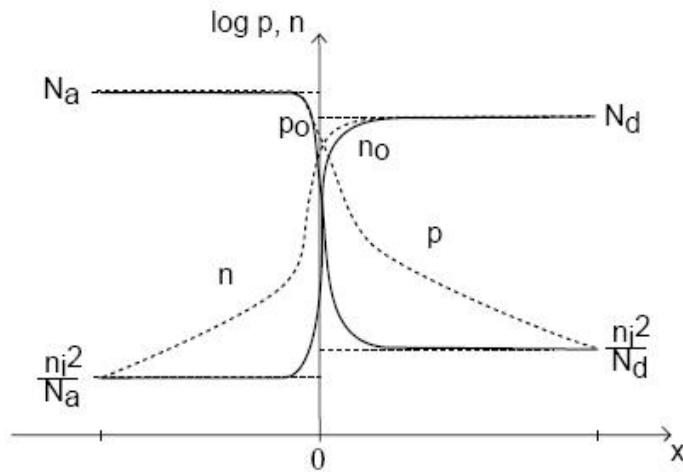
فعالیت تولید و ترکیب مجدد بالا در سطوح ⇐ تراکم حامل چندان از مقادیر تعادل نمی‌تواند منحرف شود:

$$n(s) \approx n_0, p(s) \approx p_0$$

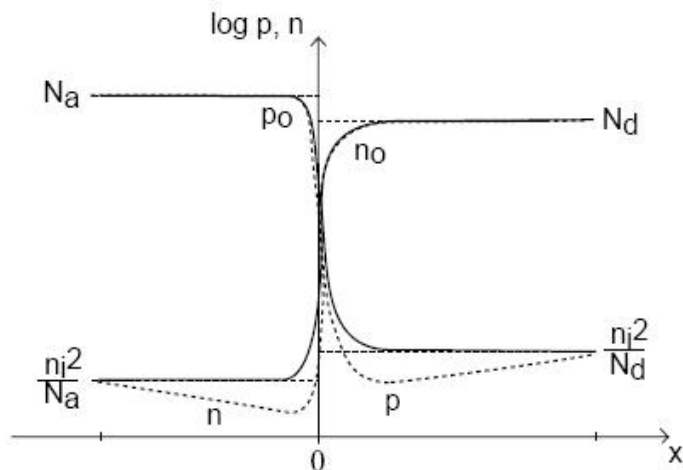
کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT


تصویر فیزیکی کامل برای دیود pn تحت بایاس:

- بایاس مستقیم: حامل های اقلیت تزریق شده به داخل QNR نفوذ می کنند \Leftarrow در سطح نیمه هادی ترکیب مجدد می شوند



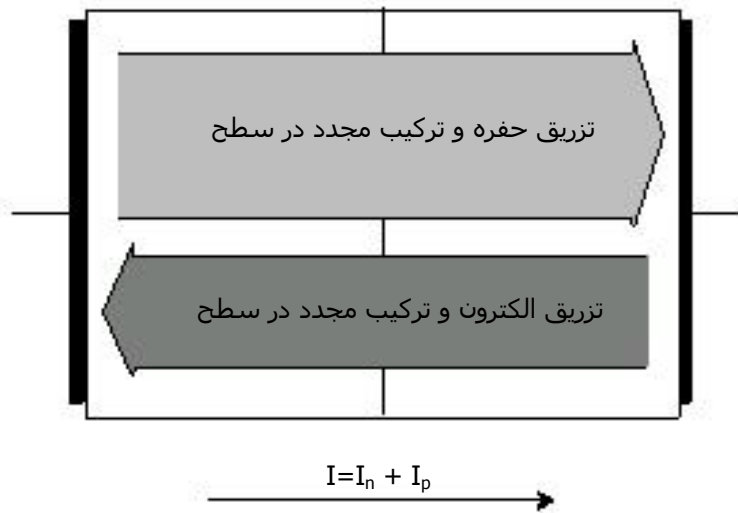
- بایاس معکوس: حامل های اقلیت استخراج شده توسط SCR \Leftarrow در سطح تولید شده و از طریق QNR نفوذ می کنند



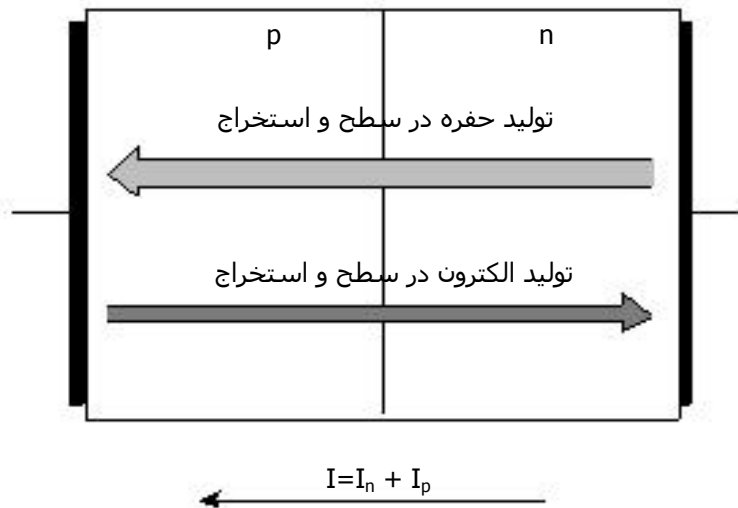
کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT



دید کلی جریان:

● بایاس مستقیم:



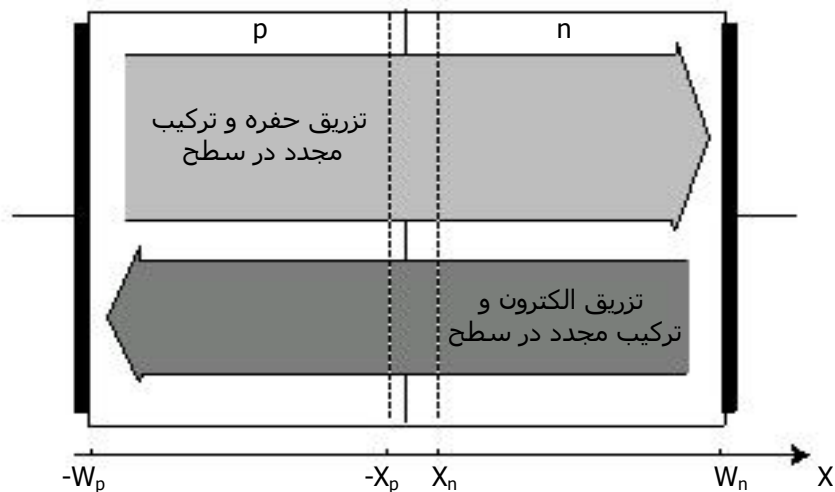
● بایاس معکوس:



کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

چه چیزی اندازه جریان دیود را محدود می‌کند؟

- نه نرخ تولید یا ترکیب مجدد در سطح
- نه نرخ تزریق یا استخراج از طریق SCR
- نرخ نفوذ از طریق QNR's





توسعه مدل تحلیلی جریان:

۱- تراکم حامل‌های اقلیت در لبه‌های SCR محاسبه کنید، $P(x_n)$ و $n(-x_p)$

۲- جریان نفوذ حامل اقلیت را در هر QNR محاسبه کنید، I_p و I_n

۳- جریان‌های نفوذ حفره و الکترون را جمع کنید، $I = I_n + I_p$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

۲- مشخصات جریان - ولتاژ

□ قدم اول: محاسبه شرایط مرزی حامل اقلیت در لایه های SCR

در تعادل حرارتی در SCR، $|J| = |J_{\text{رانش}}|$ و

$$\frac{n_o(x_1)}{n_o(x_2)} = \exp \frac{q[\phi(x_1) - \phi(x_2)]}{kT}$$

9

$$\frac{P_o(x_1)}{P_o(x_2)} = \exp \frac{-q[\phi(x_1) - \phi(x_2)]}{kT}$$


در SCR تحت بایاس $|J| \neq |J_{\text{رانش}}|$ ، اما اگر تفاوت در مقایسه با مقادیر مطلق جریانها کوچک باشد:

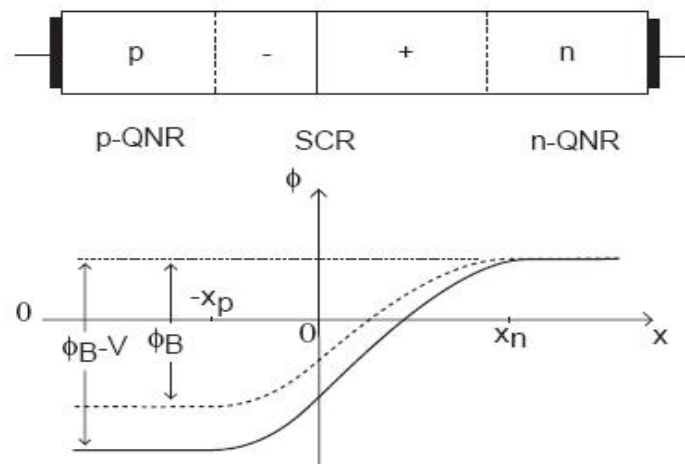
$$\frac{n(x_1)}{n(x_2)} \approx \exp \frac{q[\phi(x_1) - \phi(x_2)]}{kT}$$

9

$$\frac{p(x_1)}{p(x_2)} \approx \exp \frac{-q[\phi(x_1) - \phi(x_2)]}{kT}$$

این حالت شبیه تعادلی خوانده می شود.

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	بیست و یکمین عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT



سیس در لبه‌های SCR :

$$\frac{n(x_n)}{n(-x_p)} \approx \exp \frac{q[\phi(x_n) - \phi(x_p)]}{kT} = \exp \frac{q(\phi_B - V)}{kT}$$



و

$$\frac{p(x_n)}{p(-x_p)} \approx \exp \frac{-q[\phi(x_n) - \phi(-x_p)]}{kT} = \exp \frac{-q(\phi_B - V)}{kT}$$

اما:

$$p(-x_p) \approx N_a \quad \text{and} \quad n(x_n) \approx N_d$$

این تخمین سطح پایین تزریق است [جلسه بعد با جزئیات بیشتر بحث خواهد شد].

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس:	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

سپس:

$$n(-x_p) \approx N_d \exp \frac{q(V - \phi_B)}{kT}$$

و

$$p(x_n) \approx N_a \exp \frac{q(V - \phi_B)}{kT}$$

پتانسیل درون ساخته:



$$\phi_B = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

جایگزین در بالا کنید و به دست آورید:

$$n(-x_p) \approx \frac{n_i^2}{N_a} \exp \frac{qV}{kT}$$

و

$$p(x_n) \approx \frac{n_i^2}{N_d} \exp \frac{qV}{kT}$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

وابستگی ولتاژ:

● تعادل ($V = 0$):

$$n(-x_p) = \frac{n_i^2}{N_a} \quad p(x_n) = \frac{n_i^2}{N_d}$$

● مستقیم ($V > 0$):

$$n(-x_p) \gg \frac{n_i^2}{N_a} \quad p(x_n) \gg \frac{n_i^2}{N_d}$$

حاملین زیادی برای تزریق در دسترس هستند:

← $V \uparrow$ تراکم حامل‌های تزریق شده

← جریان مستقیم می‌تواند بالا باشد.

● معکوس ($V < 0$):

$$n(-x_p) \ll \frac{n_i^2}{N_a} \quad p(x_n) \ll \frac{n_i^2}{N_d}$$


حاملین کمی برای استخراج در دسترس هستند.

← جریان معکوس کوچک است.

تراکم حامل اقلیت به طور محو شدنی کوچک می‌شود:

← جریان معکوس اشباع می‌شود.

خواص یکسو کنندگی دیود pn از شرایط مرزی حامل اقلیت در لبه‌های SCR ناشی می‌شود.

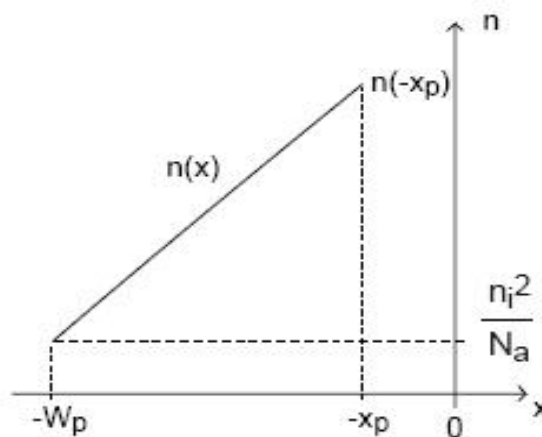
کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

□ قدم دوم: جریان نفوذ در QNR :

معادله نفوذ (برای الکترون‌ها در QNR - p):

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$$

داخل QNR - p، الکترون‌ها برای رسیدن و ترکیب مجدد شدن در محل اتصال نفوذ می‌کنند $J_n \ll$ در QNR - p ثابت است $n(x) \ll$ خطی است





شرایط مرزی:

$$n(x = -W_p) = n_o = \frac{n_i^2}{N_a} \quad n(-x_p) = \frac{n_i^2}{N_d} \exp \frac{qV}{kT}$$

نمودار الکترون:

$$n_p(x) = n_p(-x_p) + \frac{n_p(-x_p) - n_p(-W_p)}{-x_p + W_p} (x + x_p)$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

$$n_p(x) = n_p(-x_p) + \frac{n_p(-x_p) - n_p(-W_p)}{-x_p + W_p}(x + x_p)$$


جگالی جریان الکترون:

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} = qD_n \frac{n_p(-x_p) - n_p(-W_p)}{W_p - x_p}$$

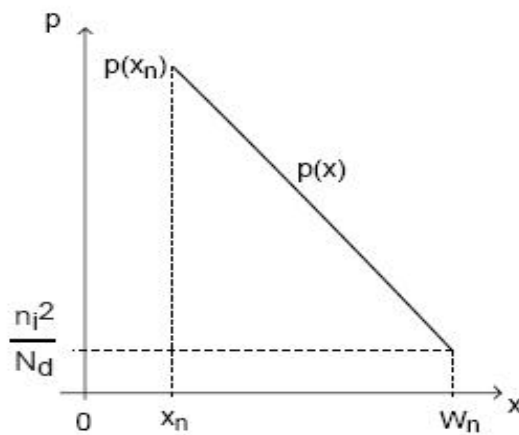
$$= qD_n \frac{\frac{n_i^2}{N_a} \exp \frac{qV}{kT} - \frac{n_i^2}{N_a}}{W_p - x_p}$$

یا

$$J_n = q \frac{n_i^2}{N_a} \frac{D_n}{W_p - x_p} (\exp \frac{qV}{kT} - 1)$$



کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	بهشتی عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

به طور مشابه برای شارش حفره در n-QNR :



چگالی جریان حفره:

$$J_p = q \frac{n_i^2}{N_d} \frac{D_p}{W_n - x_n} \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right)$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس:	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

□ قدم سوم: هر دو مؤلفه جریان را جمع کنید:

$$J = J_n + J_p = qn_i^2 \left(\frac{1}{N_a} \frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{1}{N_d} \frac{D_p}{W_n - x_n} \right) \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right)$$

جریان:

$$I = qAn_i^2 \left(\frac{1}{N_a} \frac{D_n}{W_p - x_p} + \frac{1}{N_d} \frac{D_p}{W_n - x_n} \right) \left(\exp \frac{qV}{kT} - 1 \right)$$

اغلب به صورت زیر نوشته می‌شود:



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

با

$$I_0 \equiv \text{جریان اشباع [A]}$$

B.C. (شرایط مرزی) شامل هر دو بایاس مستقیم و معکوس می‌باشند \Leftarrow معادله در بایاس مستقیم و معکوس معتبر است

[این نتیجه با جزئیات جلسه بعد بحث خواهد شد]

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس:	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی	ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

نتایج کلیدی

- اعمال ولتاژ بر پیوند pn بر هم خوردن تعادل بین رانش و نفوذ را در SCR نتیجه می دهد:
- در بایاس مستقیم، حامل های اقلیت به داخل نواحی شبه خنثی تزریق می شوند
- در بایاس معکوس، حامل های اقلیت از نواحی شبه خنثی استخراج می شوند
- در بایاس مستقیم، حامل های اقلیت تزریق شده در سطح ترکیب مجدد می شوند
- در بایاس معکوس، حامل های اقلیت استخراج شده در سطح تولید می شوند
- محاسبه شرایط مرزی در امتداد SCR حالت شبه تعادلی را توسعه می دهد: تعادل بین نفوذ و رانش در SCR به میزان خیلی کمی توزیع شده است
- مرحله محدود کردن نرخ شارش جریان: نفوذ از طریق نواحی شبه خنثی
- مشخصات جریان - ولتاژ دیود pn

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