





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 ۵ - الکترو استاتیک پیوند PN و MOS (II)

پیوند PN در تعادل حرارتی




۲۲ سپتامبر ۲۰۰۵

محتویات

- ۱- مقدمه‌ای بر پیوند pn
- ۲- الکترواستاتیک پیوند pn در تعادل حرارتی
- ۳- تخمین تخلیه
- ۴- پتانسیل‌های اتصال


تکلیف خواندنی

Howe و Sodini، فصل ۳، بخش‌های ۳/۴ - ۳/۳

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

سوالات کلیدی

- در صورتی که توزیع ناخالصی در یک نیمه هادی به طور ناگهانی از نوع n به نوع p تغییر یابد چه اتفاقی می افتد؟
- آیا یک توصیف ساده از الکترواستاتیک پیوند pn وجود دارد؟

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	بهشتی 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

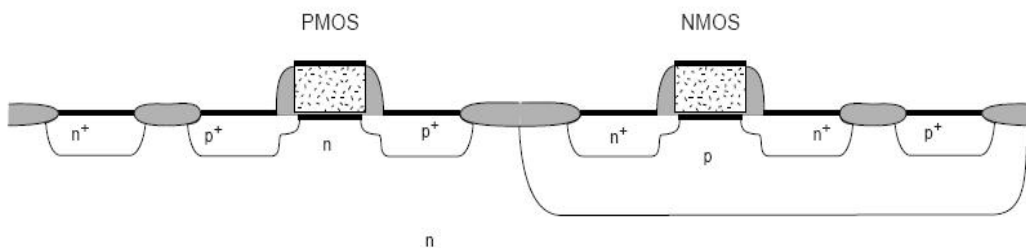
۱- مقدمه ای بر پیوند pn

● پیوند pn: ناحیه p و ناحیه n در ارتباط تنگاتنگ


● چرا پیوند p-n ارزش مطالعه دارد؟

به طور بالقوه در هر یک از ادوات نیمه هادی وجود دارد!

مثال: سطح مقطع CMOS

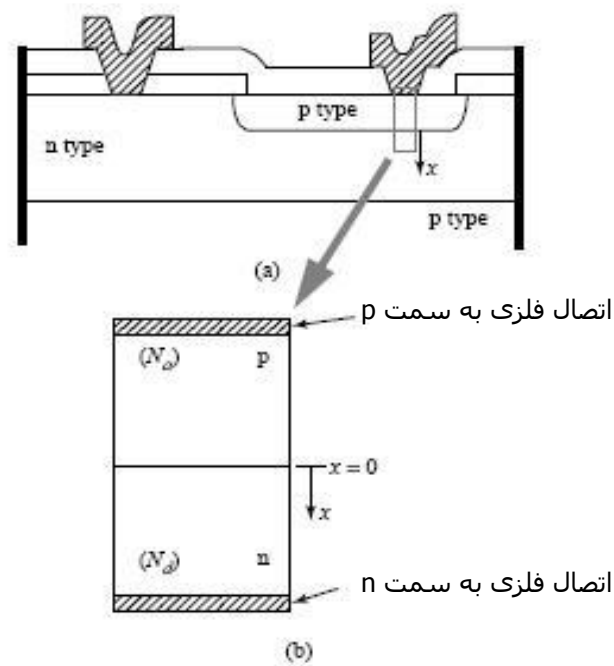


فهم پیوند p-n برای درک عملکرد ترانزیستور الزامی است.

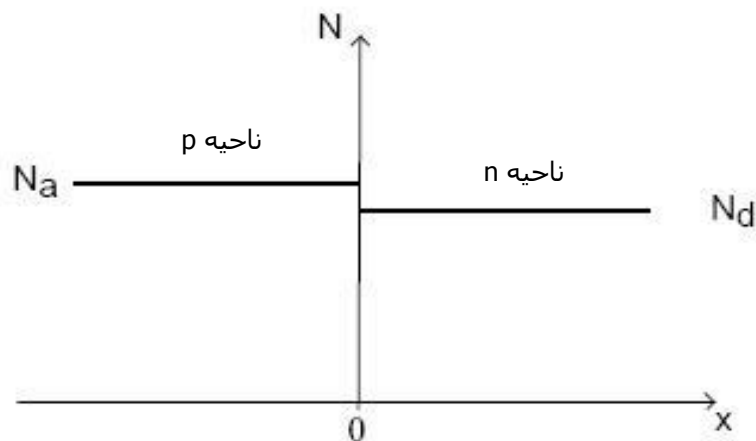
کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	عنوان درس: لبق ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT



۲- الکترواستاتیک پیوند p-n در تعادل

بر روی ناحیه ذاتی تمرکز کنید:



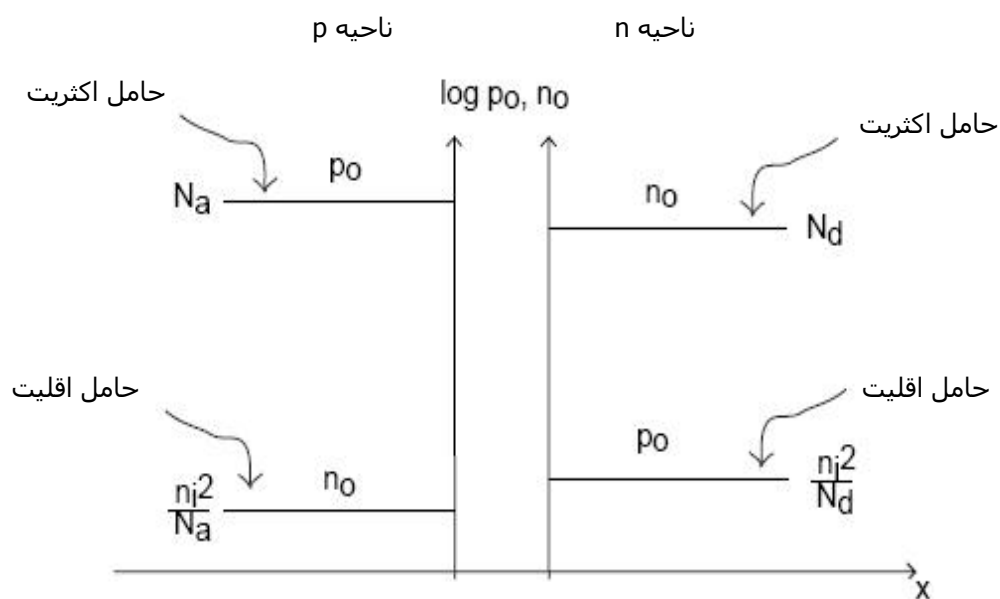
توزیع ناخالصی در پیوند ناگهانی p-n:



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


توزیع تراکم حامل در تعادل حرارتی چگونه است؟

ابتدا درباره دو سمت جداگانه فکر کنید:

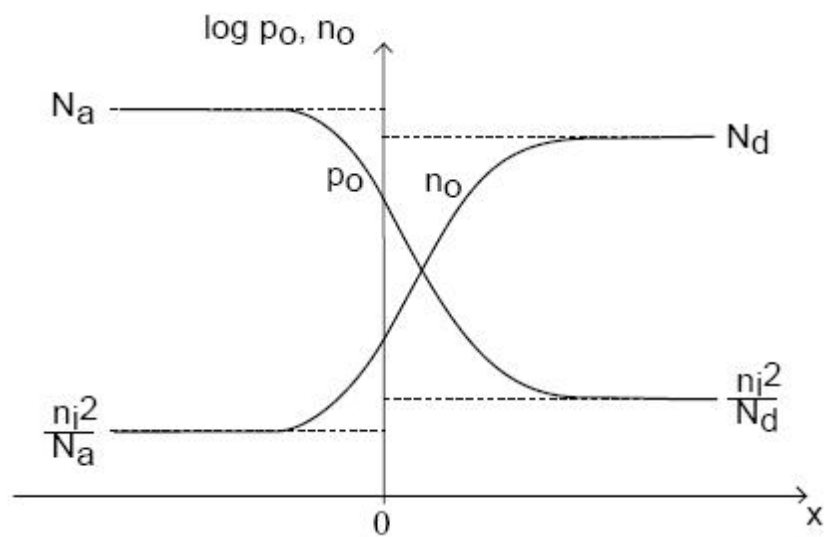


حالا آنها را کنار هم بگذارید، چه اتفاقی می افتد؟


نفوذ الکترون‌ها و حفره‌ها از سمت حامل اکثریت به اقلیت تا زمانی که رانش، نفوذ را متعادل می‌کند.

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

روند حامل حاصل شده در تعادل حرارتی:

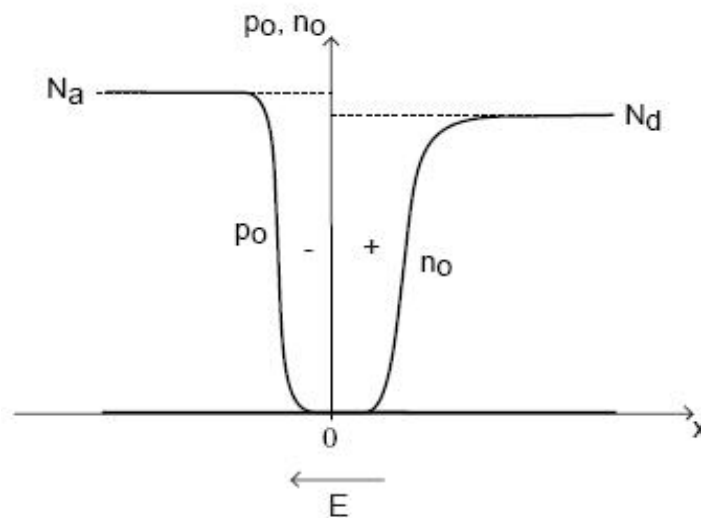


- دور از محل متالورژیک پیوند: هیچ اتفاقی نمی‌افتد
- دو ناحیه شبه خنثی
- اطراف محل متالورژیک پیوند: رانش حامل باید نفوذ را خنثی کند
- ناحیه فضای بار

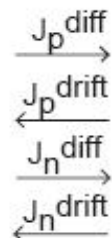
کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

در یک مقیاس خطی:

تعادل حرارتی: تعادل بین رانش و نفوذ





تعادل حرارتی: تعادل بین رانش و نفوذ



می تواند نیمه هادی را به سه ناحیه تقسیم کند:

- دو ناحیه شبه خنثی p و n (QNR's)
- یک ناحیه فضایی شارژ (SCR)

حالا می خواهیم مقادیر $n_0(x)$ و $p_0(x)$ و $p(x)$ و $E(x)$ و $\phi(x)$ را بدانیم. الکترواستاتیک را با استفاده از تخمین قدرتمند، اما ساده حل کنید.

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCV 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

۳- تخمین تخلیه

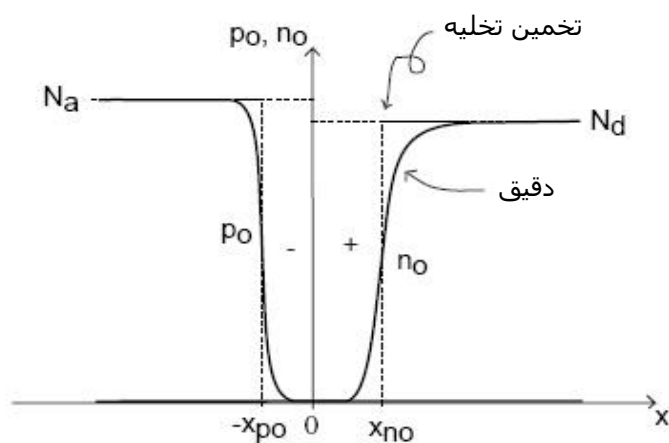
● فرض کنید QNR (ناحیه شبه خنثی)

به طور ایده آل خنثی شارژ شده است

● فرض کنید SCR (ناحیه فضایی شارژ) از حامل‌ها تخلیه است (ناحیه تخلیه)

● گذر تیز بین SCR و QNR

(باید محاسبه کنیم x_{p0} و x_{n0} را کجا قرار دهیم)




● $x < -x_{p0}$ $p_0(x) = N_a, n_0(x) = \frac{n_i^2}{N_a}$

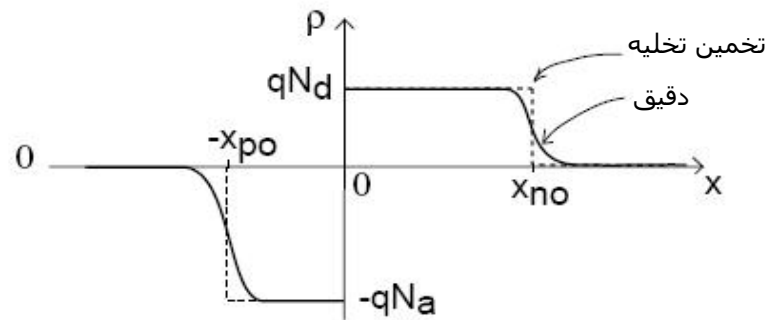
● $-x_{p0} < x < 0$ $p_0(x), n_0(x) \ll N_a$

● $0 < x < x_{n0}$ $n_0(x), p_0(x) \ll N_d$


● $x_{n0} < x$ $n_0(x) = N_d, p_0(x) = \frac{n_i^2}{N_d}$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	بهشتی 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

چگالی فضایی شارژ



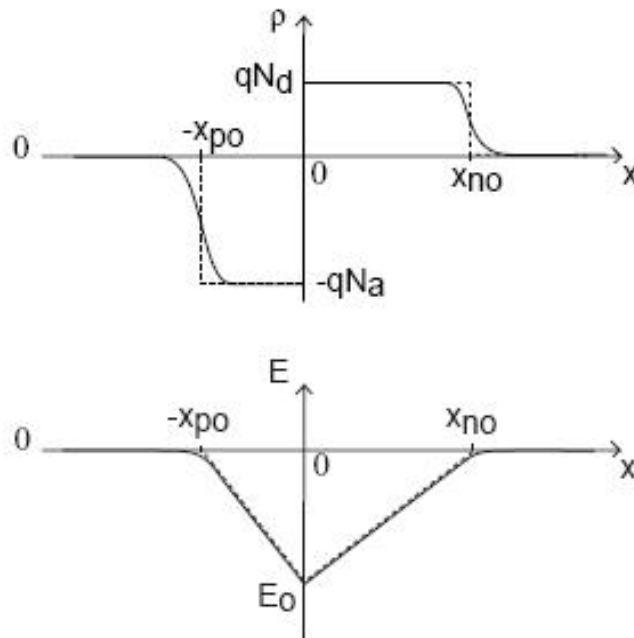
$$\begin{aligned}
 \rho(x) &= 0 & x < -x_{po} \\
 &= -qN_a & -x_{po} < x < 0 \\
 &= qN_d & 0 < x < x_{no} \\
 &= 0 & x_{no} < x
 \end{aligned}$$

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

● میدان الکتریکی

از معادله گاوس انتگرال بگیرید:

$$E(x_2) - E(x_1) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_{x_1}^{x_2} \rho(x) dx$$





● $x < -x_{po}$ $E(x) = 0$

● $-x_{po} < x < 0$ $E(x) - E(-x_{po}) = \frac{1}{\epsilon_s} \int_{-x_{po}}^x -qN_a dx$
 $= \frac{-qN_a}{\epsilon_s} x \Big|_{-x_{po}}^x = \frac{-qN_a}{\epsilon_s} (x + x_{po})$

● $0 < x < x_{no}$ $E(x) = \frac{qN_d}{\epsilon_s} (x - x_{no})$

● $x_{no} < x$ $E(x) = 0$

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

● پتانسیل الکترواستاتیک

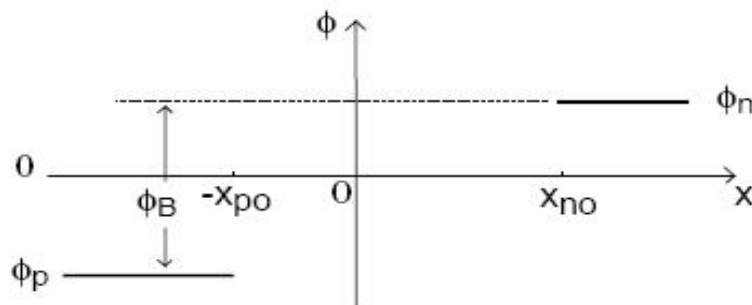
(با $\phi = 0$ در $n_o = p_o = n_i$):

$$\phi = -\frac{kT}{q} \ln \frac{p_o}{n_i} \quad \phi = \frac{kT}{q} \ln \frac{n_o}{n_i}$$

در QNR، n_o و p_o معلوم هستند \Leftarrow ϕ را می توان تعیین کرد:

$$\phi_p = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i} \Leftarrow p_o = N_a \text{ نوع } p \text{ در QNR}$$



$$\phi_n = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_d}{n_i} \Leftarrow n_o = N_d \text{ نوع } n \text{ در QNR}$$



پتانسیل درون ساخته:

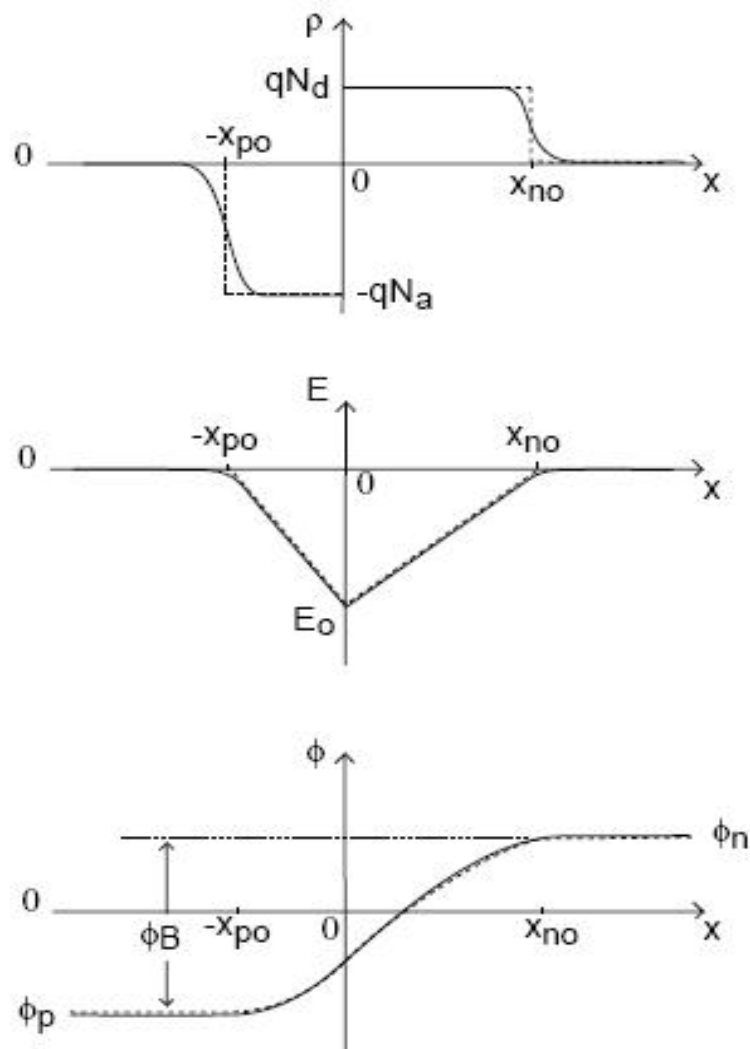
$$\phi_B = \phi_n - \phi_p = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$


بیان عمومی: تخمین تخلیه استفاده نشد.

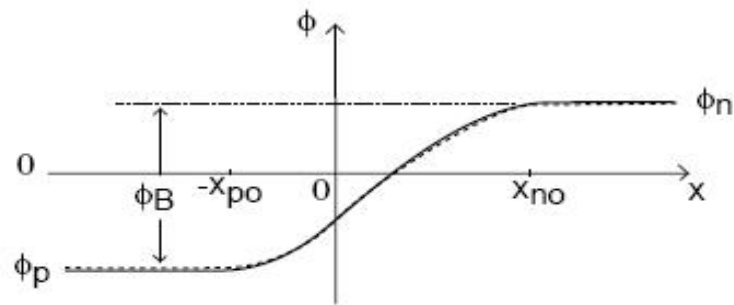
کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	 عنوان درس: ادوات و مدارهای میکرو الکترونیک	 دوره های آزاد رایانه ای SBU-MIT OCW Joint Project
استاد مدرس MIT: پروفیسور جسوس دل آلامو استاد مترجم SBU: دکتر نامدار صنیعی		معاونت فناوری اطلاعات و ارتباطات پروژه مشترک دانشگاه شهید بهشتی و دانشگاه MIT

برای به دست آوردن $\phi(x)$ بین این دو، $E(x)$ را انتگرال بگیرید:

$$\phi(x_2) - \phi(x_1) = -\int_{x_1}^{x_2} E(x) dx$$





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



- $x < -x_{po}$ $\phi(x) = \phi_p$
- $-x_{po} < x < 0$ $\phi(x) = \phi(-x_{po}) - \int_{-x_{po}}^x -\frac{qN_a}{\epsilon_s}(x + x_{po})dx$
 $= \frac{qN_a}{2\epsilon_s}(x + x_{po})^2$
- $0 < x < x_{no}$ $\phi(x) = \phi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s}(x + x_{no})^2$
- $x_{no} < x$ $\phi(x) = \phi_n$

تقریباً انجام شده...

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

هنوز مقدار x_{no} و x_{po} مجهول است \Leftarrow دو معادله بیشتر نیاز داریم

۱- نیاز به شارژ خنثی کلی دارد:

$$qN_a x_{po} = qN_d x_{no}$$



۲- نیاز به $\phi(x)$ پیوسته در $x = 0$ دارد:

$$\phi_p + \frac{qN_a}{2\epsilon_s} x_{po}^2 = \phi_n - \frac{qN_d}{2\epsilon_s} x_{no}^2$$

دو معادله با دو مجهول. راه حل:

$$x_{no} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_B N_a}{q(N_a + N_d)N_d}} \quad x_{po} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_B N_d}{q(N_a + N_d)N_a}}$$

حالا مسئله کاملاً حل شده است.

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 دیگر:

عرض کل ناحیه شارژ فضایی:

$$X_{do} = X_{no} + X_{po} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s \phi_B (N_a + N_d)}{qN_a N_d}}$$

میدان در محل متالورژیک پیوند:

$$|E_o| = \sqrt{\frac{2q\phi_B N_a N_d}{\varepsilon_s (N_a + N_d)}}$$

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	پیوند 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

سه حالت:

● پیوند متقارن: $x_{po} = x_{no} \Leftarrow N_a = N_d$

● پیوند نامتقارن: $x_{po} \langle x_{no} \Leftarrow N_a \rangle N_d$

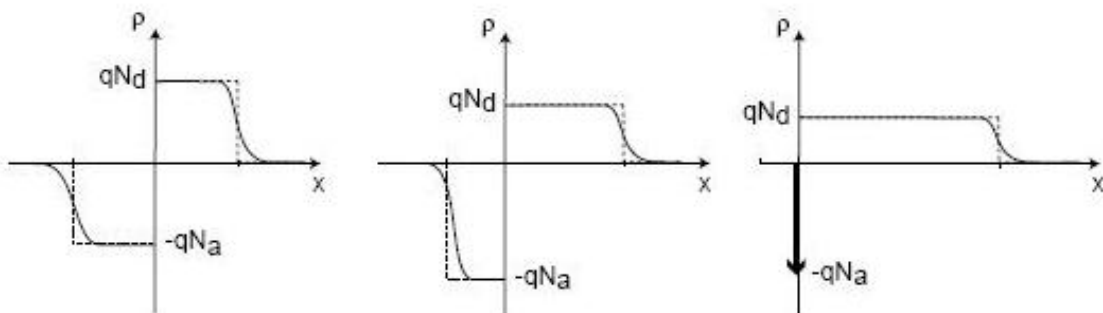
● پیوند شدیداً نامتقارن:



یعنی اتصال $p^+ n N_a \rangle \rangle N_d$:

$$x_{po} \langle \langle x_{no} \approx x_{do} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_s \phi_B}{qN_d}} \propto \frac{1}{\sqrt{N_d}}$$

$$|E_o| \approx \sqrt{\frac{2q\phi_B N_d}{\epsilon_s}} \propto \sqrt{N_d}$$

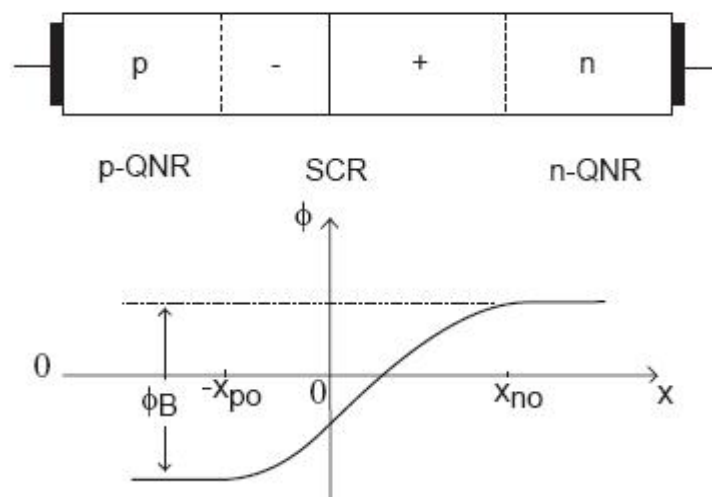
سمتی که میزان ناخالصی کم است الکترواستاتیک پیوند pn را کنترل می کند.



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

۴- پتانسیل اتصال ها

پتانسیل توزیع در تعادل حرارتی تا اینجا:




سؤال ۱: اگر یک ولت متر را به دو سر دیود وصل کنم، آیا ϕ_B را اندازه گیری می کنم؟

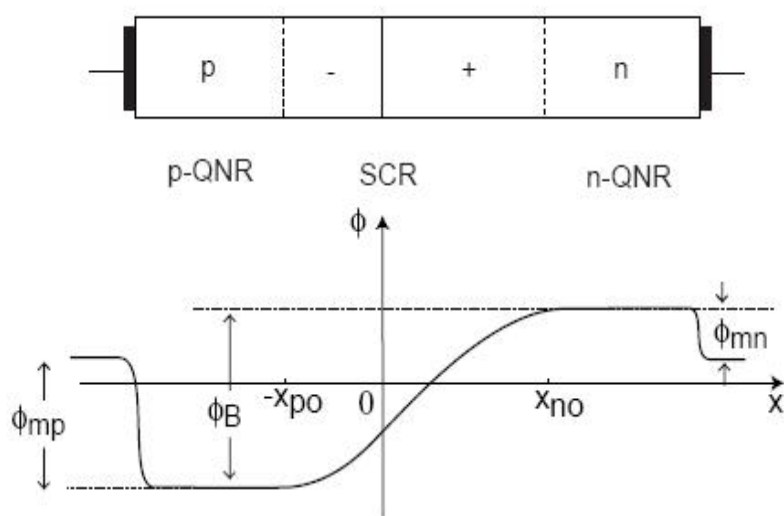
- بستگی دارد
 خیر
 بله

سؤال ۲: اگر ترمینال های دیود را اتصال کوتاه کنم، آیا جریان خارج از مدار جریان می یابد؟

- گاهی اوقات
 خیر
 بله

کد درس: ۶/۰۱۲ مقطع آموزشی: کارشناسی	بیتک 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

ما پتانسیل اتصال‌ها را در اتصال نیمه هادی به فلز را به حساب نیاورده‌ایم:





اتصالات نیمه هادی - فلز: پیوند مواد غیر مشابه

⇐ پتانسیل‌های درون ساخته: ϕ_{mn} و ϕ_{mp}

اختلاف پتانسیل در دو سر ساختار دیود باید صفر باشد ⇐ ϕ_B را نمی‌توان اندازه‌گیری کرد.

$$\phi_B = \phi_{mn} + \phi_{mp}$$

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

- الکترواستاتیک پیوند pn در تعادل
 - یک ناحیه فضایی شارژ
 - احاطه شده با دو ناحیه شبه خنثی
 - ← پتانسیل درون ساخته در دو سر پیوند p-n
- تراکم حاصل در ناحیه فضایی شارژ بسیار کوچکتر از میزان ناخالصی است ← تخمین تخلیه
- پتانسیل اتصال در پیوند نیمه هادی فلزی ← از محل اتصال تا محل اتصال دیگر، پتانسیلی در دو سر پیوند pn وجود ندارد.