



Solid State Physics

Chapter 5: Junctions

Lecturers:

- ❑ Dr. M. A. Mansouri Birjandi
- ❑ Hossein Teymoori

Dept. of Electrical and Computer Engineering
University of Sistan and Baluchestan (USB)

h.teymoori@pgs.usb.ac.ir
hn.teymoori@gmail.com

April, 2017

1396

فيزيك الکترونيک

مرجع:

فيزيك الکترونيک

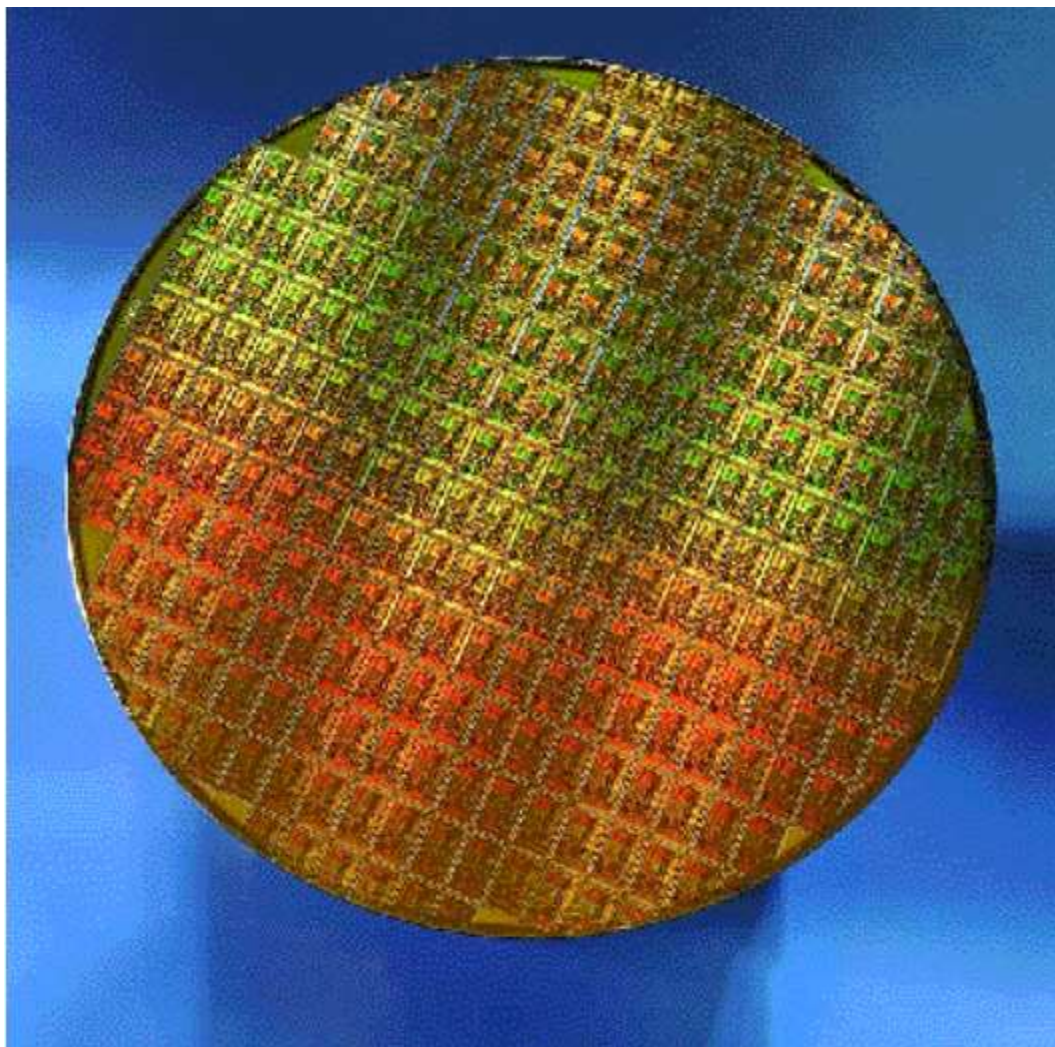
Ben G. Streetman

ترجمه: دکتر غلامحسن روئين تن

و مهندس سعيد صمدی

فصل ۵

پیوندها



رئوس مطالب

۵.۱ ساخت پیوندهای p-n

۵.۱.۱ پیوندهای رشد داده شده

۵.۱.۲ پیوندهای آلیاژی

۵.۱.۳ پیوندهای نفوذی

۵.۱.۴ کاشت یون

۵.۲ شرایط تعادل

۵.۲.۱ پتانسیل اتصال

۵.۲.۲ ترازهای فرمی در حالت تعادل

۵.۲.۳ بار فضا در محل پیوند

۵.۳ گرایش مستقیم و معکوس پیوند، شرایط پایدار

۵.۳.۱ توصیف کیفی عبور جریان از یک پیوند

۵.۳.۲ تزریق باربر

رئوس مطالب

۵.۳.۳ جریان باربرهای اقلیت و اکثریت

۵.۴ شکست گرایش معکوس

۵.۴.۱ شکست زنری

۵.۴.۲ شکست بهمنی

۵.۵ شرایط گذرا و ac

۵.۵.۱ تغییرات زمانی بارهای ذخیره شده

۵.۵.۲ حالت گذرای بازیابی معکوس

۵.۵.۳ ظرفیت پیوندهای p-n

۵.۶ انحرافهایی از نظریه ساده پیوند

۵.۶.۱ اثر پتانسیل سد روی تزریق باربرها

۵.۶.۲ باز ترکیب و تولید در ناحیه گذر

۵.۶.۳ تلفات اهمی

رئوس مطالب

۵.۶.۴ پیوندهای شیبدار

۵.۷ پیوندهای فلز - نیمه رسانا

۵.۷.۱ سدهای شاتکی

۵.۷.۲ اتصالات یکسوساز

۵.۷.۳ اتصالات اهمی

۵.۷.۴ سدهای شاتکی نمونه

۵.۸ پیوندهای ناهمگون

فصل ۵: پیوندها

مقدمه:

بیشتر قطعات نیمه رسانا دارای حداقل یک پیوند بین ماده نوع n و نوع p هستند. پیوندهای $p-n$ در انجام عملیاتی چون یکسوسازی، کلیدزنی و سایر اعمال الکترونیکی نقش اساسی دارند.

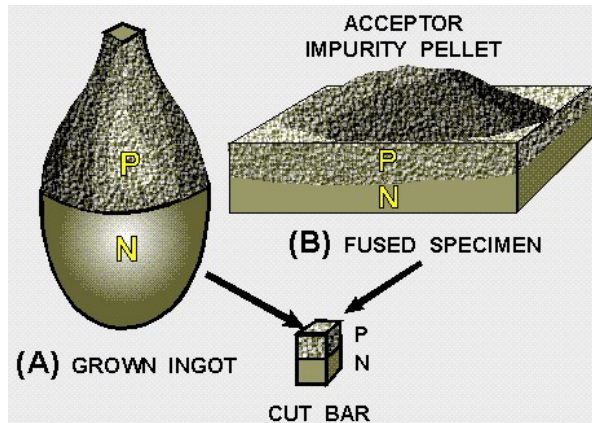
اهداف این فصل:

- ☐ بررسی حالت تعادل پیوند و عبور الکترونها و حفره ها از پیوندگاه تحت شرایط پایدار و گذرا.
- ☐ بررسی پیوندهای فلز-نیمه رسانا و پیوندهای ناهمگون بین نیمه رساناهای با شکاف نوار متفاوت.

روشهای ساخت پیوند p-n

۵.۱.۱ پیوندهای رشد یافته

در این روش، حین رشد بلور نوع ناخالصی در ماده مذاب بصورت ناگهانی عوض می شود.



بعنوان مثال:

بلور Si نوع n با:

$$N_d = 10^{14}$$

اتم بور (B) با:

$$N_a = 6 \times 10^{14}$$

تراکم کل پذیرنده ها:

$$N_a - N_d = 5 \times 10^{14}$$

این روش ابتدایی با روشهای انعطاف پذیرتری که در آنها، پیوند بعد از رشد بلور ایجاد می شود، جایگزین شده است. البته رشد رانشستی (اپیتاکسیال) پیوندهای p-n در این مورد استثناء است.

۵.۱.۲ پیوندهای آلیاژی

در این روش، یک فلز حاوی اتمهای ناخالصی، روی نیمه رسانائی با ناخالصی مخالف آلیاژ می شود.

بعنوان مثال، با حرارت دادن ژرمانیوم نوع n که قرص کوچکی از ایندیوم (In) روی آن قرار داده شده است، تا 160°C ، یک منطقه مذاب محلی کوچک تشکیل می شود، و از آن یک پیوند p-n روی بلور مادر رشد می یابد. ناحیه دوباره رشد یافته، دارای همان ساختار بلوری Ge مادر است، با این تفاوت که دارای تراکم زیادی از اتمهای In است و از نوع p می باشد. این روش مشابه فرآیند رونشینی فاز مایع (LPE) است با این تفاوت که بستر Ge نه تنها بعنوان دانه بلور برای رشد لایه عمل می کند، بلکه Ge لازم برای مذاب را نیز فراهم می کند.

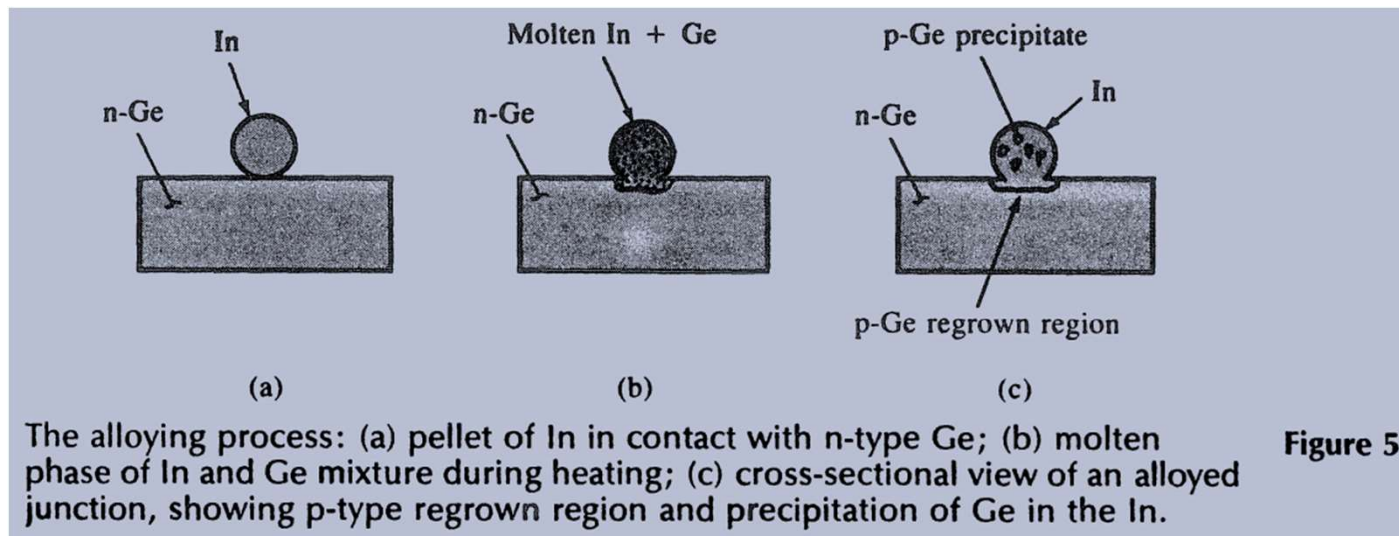


Figure 5-

۵.۱.۳ پیوندهای نفوذی

در روش نفوذ ناخالصی که در دهه ۱۹۶۰ جایگزین روش آلیاژی شد، از نقابهای (Mask) مناسب برای کنترل ابعاد هندسی پیوند استفاده می نمایند و امکان ساخت مدارات مجتمع را فراهم می سازد. کنترل پذیری، دقت و انعطاف پذیری این روش امکان ساخت هزاران قطعه با پیوند p-n را در یک تراشه سیلیسیومی با اتصالات داخلی مناسب را فراهم می نماید.

نفوذ نتیجه حرکت تصادفی اتمها بوده و ذرات در جهت کاهش شیب تراکم ناخالصی نفوذ می کنند. حرکت تصادفی اتمهای ناخالصی در یک جامد نسبتاً محدود است مگر اینکه دما بالا باشد. بنابراین این فرآیند در دماهای حدود 1000°C ، که اتمهای نیمه رسانا از جای خود در شبکه خارج شده و مکانهای خالی ایجاد می کنند، که می تواند توسط ناخالصیها پر شود، انجام می پذیرد.

بعنوان مثال اگر یک پولک سیلیسیوم نوع n در کوره ای با دمای 1000°C و در محیط گازی با ناخالصی زیاد بور (B) قرار گیرد بور در سطح نیمه رسانا شروع به نفوذ می کند. ضریب نفوذ بصورت تابعی از دما برای ناخالصیهای مختلف معلوم است. توزیع ناخالصی در نمونه را طی فرآیند نفوذ، با حل معادله نفوذ و استفاده از شرایط مرزی می توان محاسبه کرد. اگر تعداد اتمهای بور محدود باشند، یک توزیع گوسی خواهد بود. و چنانچه اتمهای بور (B) بطور پیوسته وارد نیمه رسانا شوند، توزیع بصورت تابع erfc خواهد بود.

پیوندهای نفوذی

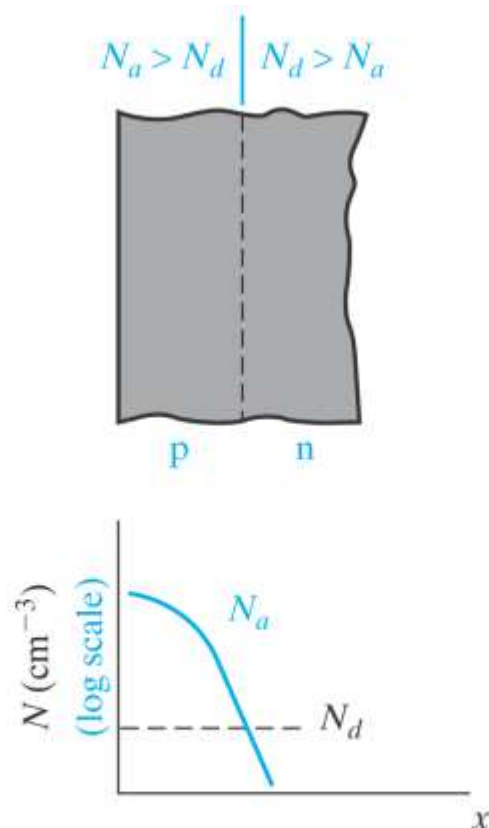


Figure 5.2

Impurity concentration profile for fabricating a p-n junction by diffusion.

□ عمق اتصال در زیر سطح را می توان به دقت از طریق زمان و دمای نفوذ کنترل کرد.

منحنی تراکم ناخالصی برای نفوذ:

فرآیند حرارتی و نمودار اعمال حرارت بر حسب زمان:

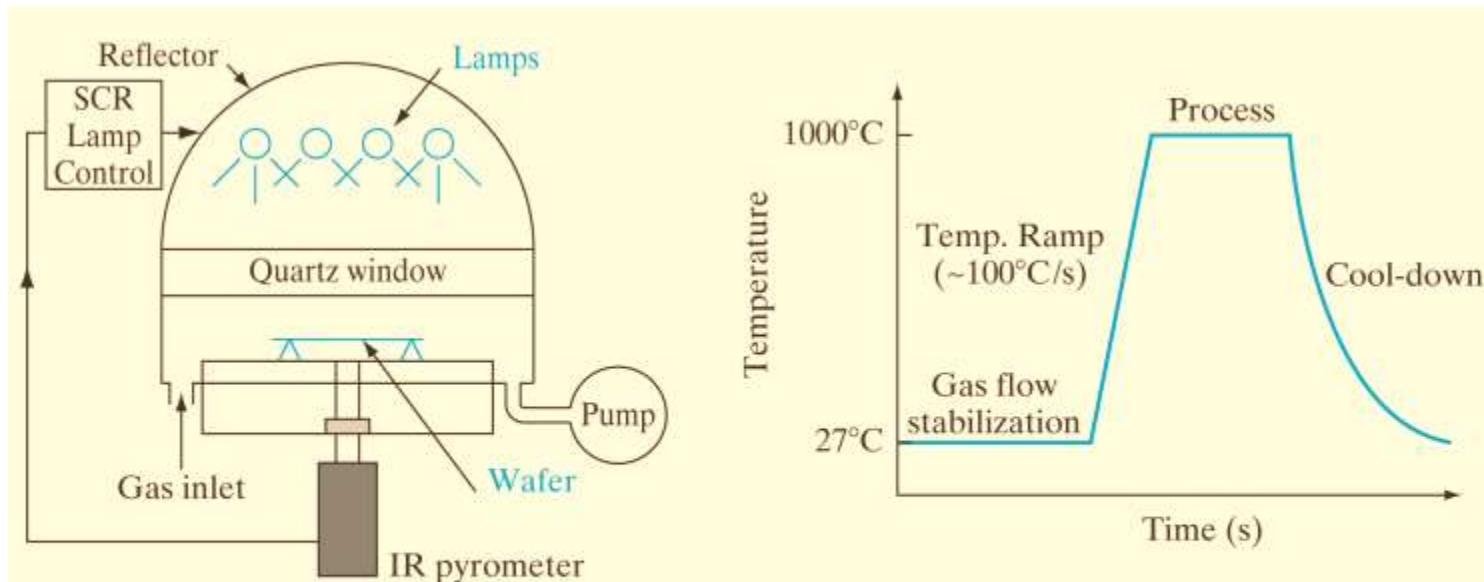


Figure 5.3

Schematic diagram of a rapid thermal processor and typical time-temperature profile.

یک نمونه کوره نفوذ

درجه تمیزی در مراحل مختلف نفوذ اهمیت فراوانی دارد. زیرا معمولاً تراکم ناخالصیها در حدود یک اتم در هر یک میلیون اتم Si و یا کمتر است.



(a)



(b)

Figure 5.1

(a) Silicon wafers being loaded into a furnace. For 8-inch and larger wafers, this type of horizontal loading is often replaced by a vertical furnace. (b) Vertical furnace for large Si wafers. The silica wafer holder is loaded with 8-inch Si wafers and moved into the furnace above for oxidation, diffusion, or deposition operations. (Photograph courtesy of Tokyo Electron Ltd.)

لوله سیلیکا، نگهدارنده نمونه ها و میله جابجا کننده و نهایتاً پولکهای Si قبل از نفوذ باید کاملاً تمیز شده و در HF (اسید فلوریدریک)، برای برداشتن هرگونه SiO_2 از سطح پولک، شسته شوند.

نفوذ انتخابی از طریق گشودن پنجره هایی در یک لایه از SiO_2 که روی سطح پولک رشد داده شده، صورت می گیرد.

HF هرگونه SiO_2 نقاب نشده را بر میدارد ولی به Si صدمه ای نمی زند. برای اکسید نمودن Si، پولکهای Si را در کوره ای حاوی گاز O_2 قرار داده تا لایه ای از SiO_2 روی سطح آن رشد یابد.

با برداشتن اکسید از روی پولک در نواحی مورد نظر، می توان عمل نفوذ را در این نواحی کنترل شده، انجام داد.

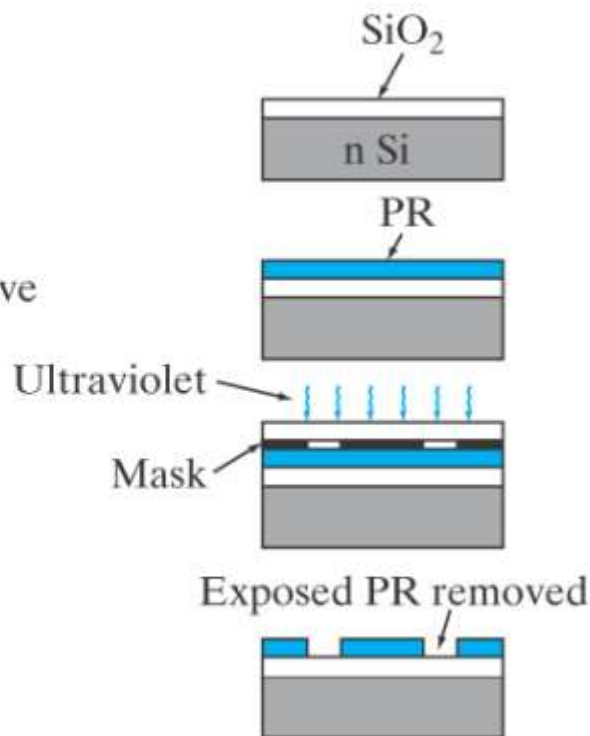
مراحل نفوذ انتخابی بصورت خلاصه به شرح زیر است (لیتوگرافی نوری یا Photolithography):

1. Oxidize the Si sample

2. Apply a layer of positive photoresist (PR)

3. Expose PR through mask A

4. Remove exposed PR



۱- اکسایش Si.

۲- ایجاد لایه فوتورزیست (PR).

۳- تاباندن نور فرابنفش به PR از طریق نقاب A.

۴- برداشتن مناطقی از PR که در معرض نور قرار گرفته اند.

ماسک نفوذ

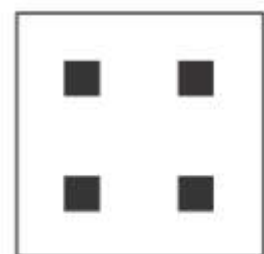
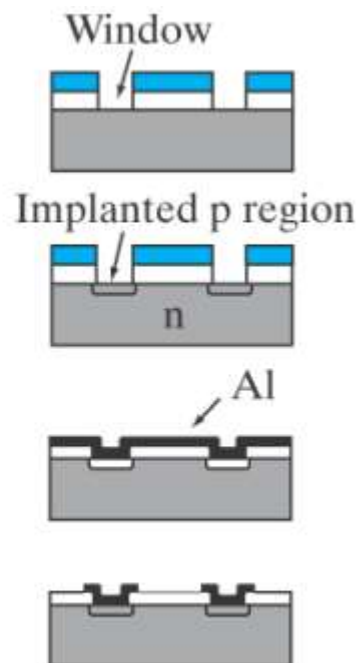


Mask A
(doping)

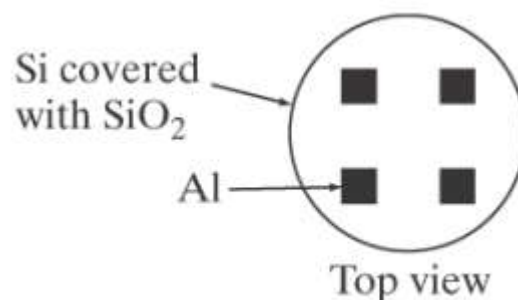
روشهای ساخت پیوند p-n

مراحل نفوذ انتخابی (ادامه):

5. Use RIE to remove SiO_2 in windows
6. Implant boron through windows in the PR and SiO_2 layers
7. Remove PR and sputter Al onto the surface
8. Using PR and mask B, repeat steps 2-4; etch away Al except in p-contact areas



Mask B
(metallization)



ماسک فلز کاری

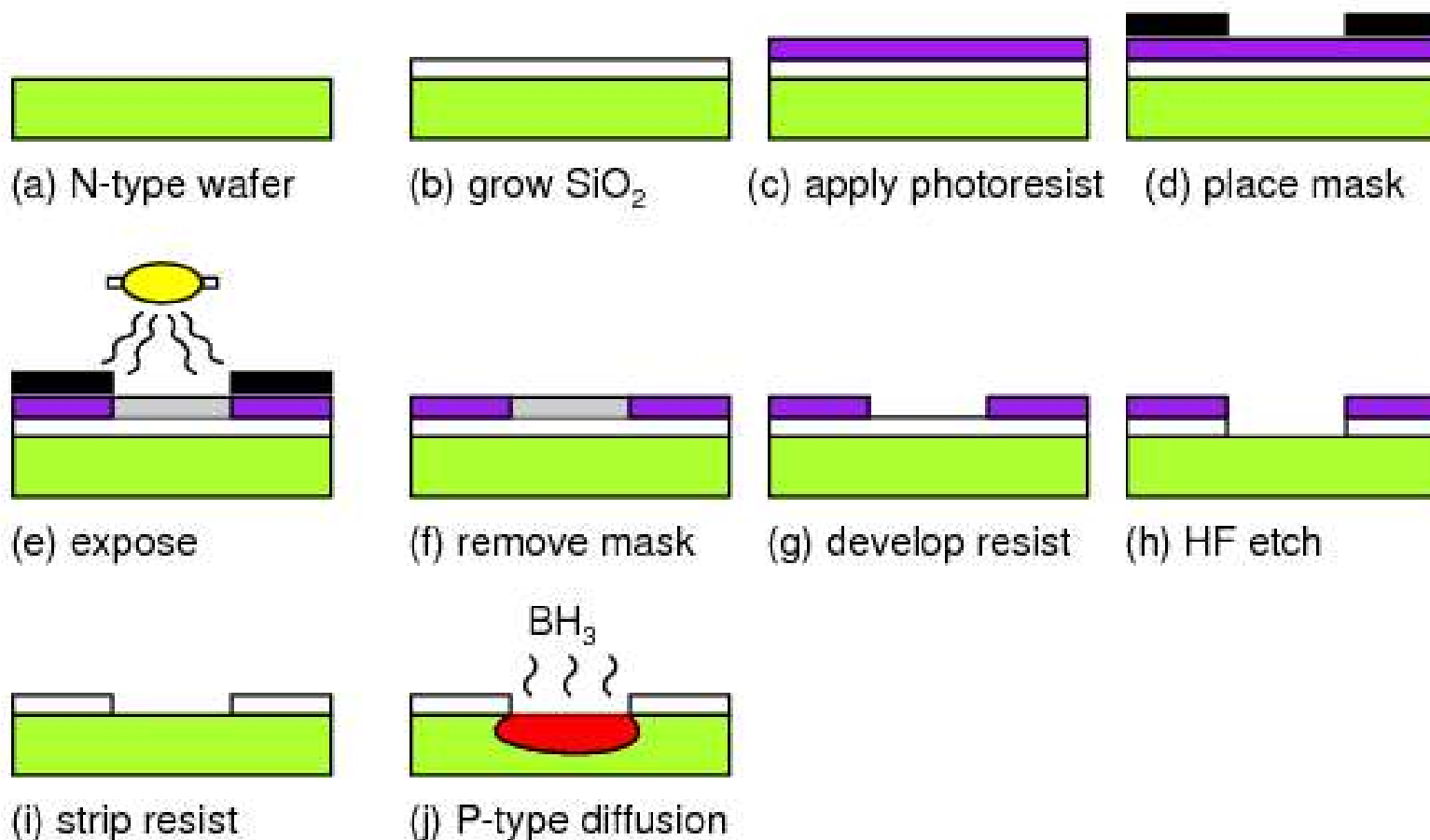
۵- استفاده از HF برای برداشتن SiO_2 در پنجره ها.

۶- نفوذ بور (B) از طریق پنجره های موجود در لایه SiO_2 .

۷- تبخیر Al بر روی سطح.

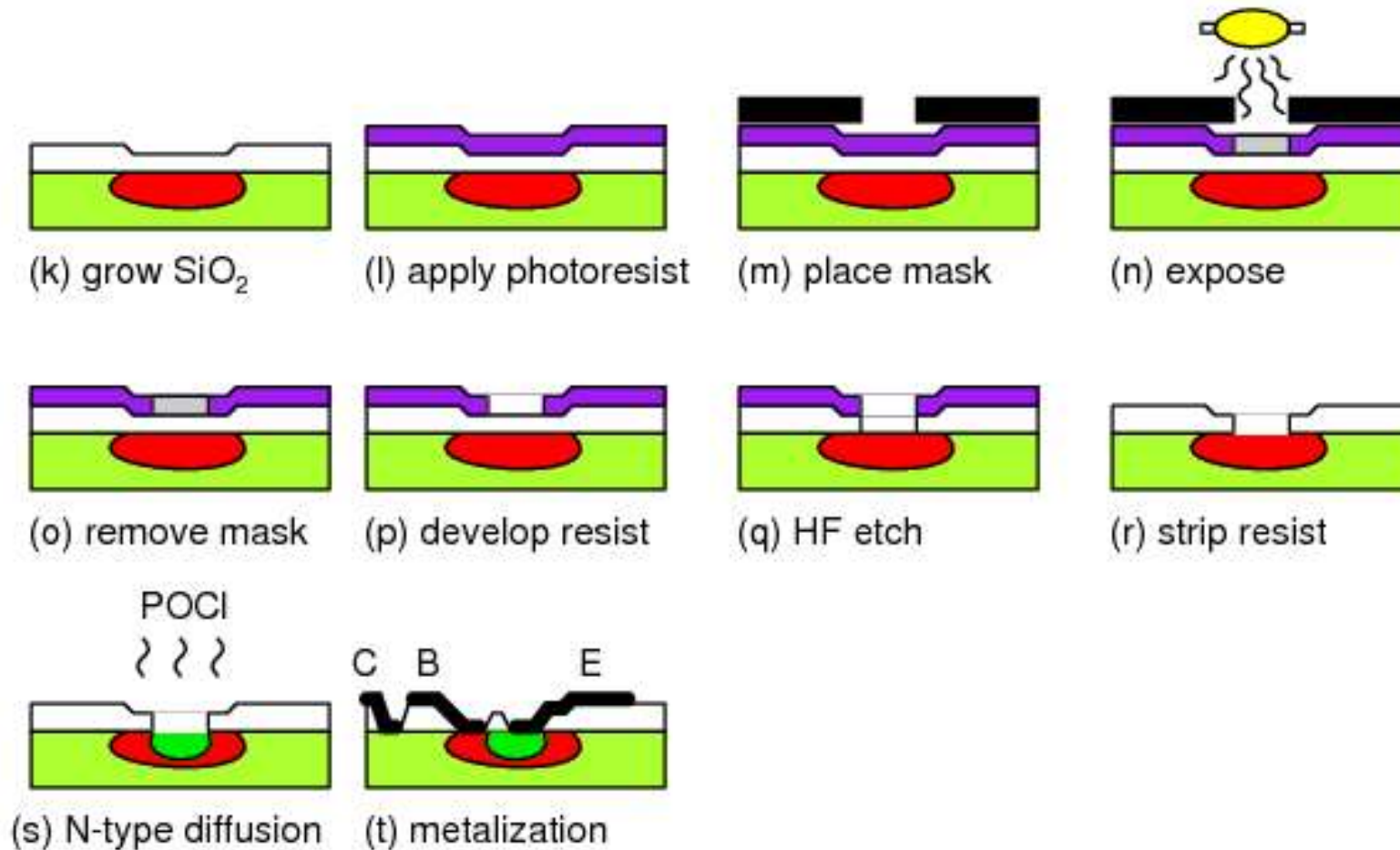
۸- با استفاده از PR و نقاب B، مراحل ۲ تا ۴ تکرار شده و AL به جز در نواحی با اتصال P برداشته می شود.

توجه: برای سادگی ۴ دیود در یک ویفر نشان داده شده است. و ضخامت نسبی اکسید، PR و Al بزرگتر از اندازه واقعی نشان داده شده است.



Manufacture of a silicon diode junction.

ساخت ترانزیستور BJT:



Manufacture of a bipolar junction transistor; continuation of Manufacture of a silicon diode junction.

پس از انجام مراحل فوق هر یک از قطعات با برش ویفر، جدا شده، در بسته بندیهایی مناسب قرار گرفته و اتصال سیمهای نازک (Bond Wire) از طریق دستگاههای بسیار دقیق سیم زن (bonder) انجام می شود.

سیمهای نازک طلا یا آلومینیوم به قطعه و از آنجا به پایه های بیرونی متصل می شوند.

۵.۱.۴ کاشت یون (Ion Implantation):

جایگزین مناسبی برای نفوذ در دماهای بالا، کاشت مستقیم یونهای انرژی دار در داخل نیمه رساناست. در این روش پرتوی از یونهای ناخالصی با انرژی جنبشی چندین KeV تا چندین MeV شتاب میگیرد و سپس به سطح نیمه رسانا هدایت شده، وارد بلور شده و انرژی خود را با برخورد به شبکه از دست می دهند و سرانجام در یک عمق نفوذ متوسط موسوم به **برد کاشت** متوقف می گردند. (چند صد آنگستروم تا $1 \mu m$). در اکثر کاشتهای یونی، یک توزیع متقارن گوسی حول برد کاشت R_p بوجود می آید:

$$N(x) = \frac{\phi}{\sqrt{2\pi} \Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right]$$

ϕ : تعداد یونهای کاشته شده در یک سانتی متر مربع
 ΔR_p : پراکندگی، مبین نصف پهنای منحنی توزیع در فاصله نقاط $e^{-1/2}$ از قله شکل

کاشت یون (Ion Implantation):

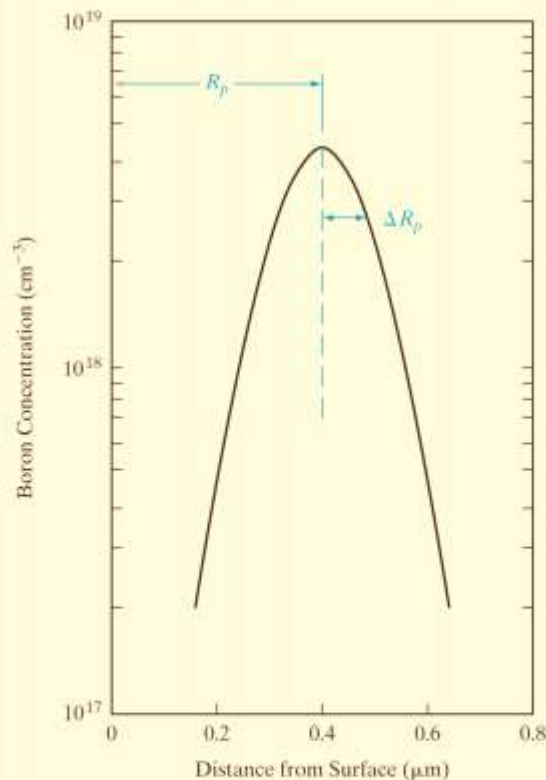
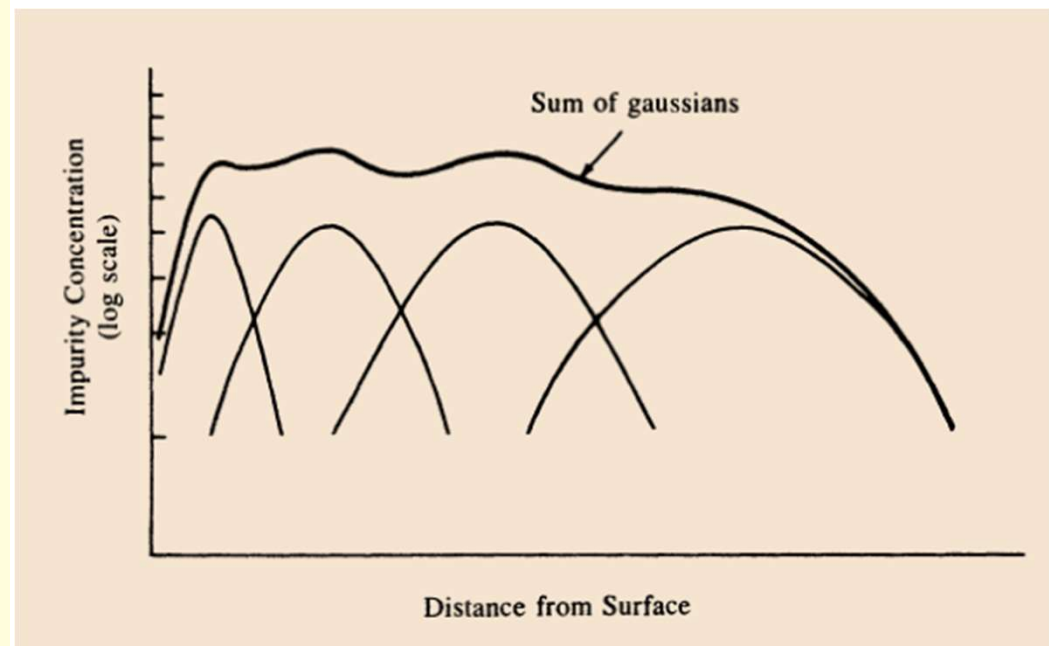


Figure 5.4

Distributions of implanted impurities: gaussian distribution of boron atoms about a projected range R_p (in this example, a dose of 10^{14} B atoms/cm² implanted at 140 keV).



با انجام کاشتهای متعدد در انرژیهای مختلف می توان توزیع مطلوب ناخالصی را بوجود آورد. (ناخالصی یکنواخت)

روشهای ساخت پیوند p-n

کاشت یون (Ion Implantation):

گاز حاوی ناخالصی در داخل منبع یونیزه شده و سپس توسط لوله های شتاب دهنده شتاب لازم را میگیرند. با عبور از یک جداکننده جرمی، فقط نمونه های یونی مورد نظر وارد لوله رانش شده و بر روی پولکی که در اتاقک هدف قرار دارد متمرکز شده و سطح پولک را بصورت الکترواستاتیکی مرور می کند، که باعث آرایش یکنواخت و منحصر بفرد ناخالصی روی سطح پولک می شود. در این روش نیز میتوان یونها را توسط لایه های فلز یا فوتورزیست متوقف کرد، بنابراین لیتوگرافی نوری میتواند برای تعریف الگوهای کاشت یونهای ناخالصی استفاده گردد.

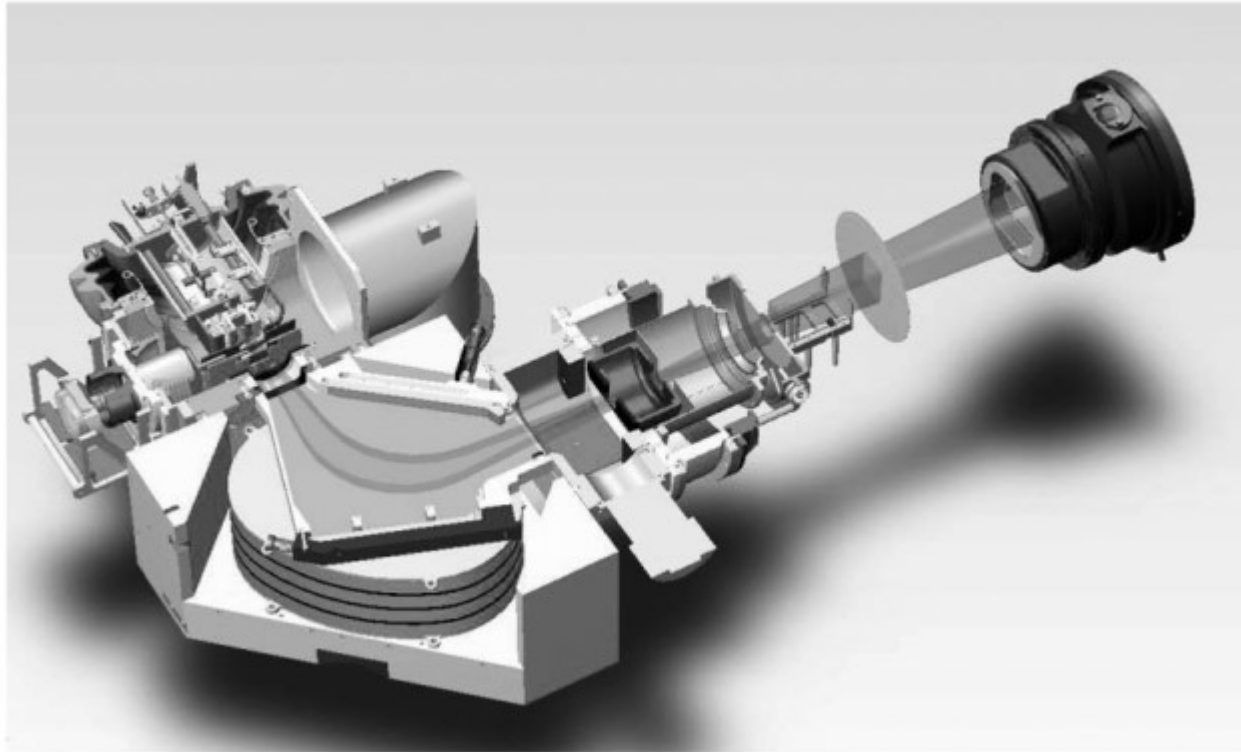
مزایای کاشت یونی:

- قابلیت انجام آن در دماهای نسبتاً پایین، در نتیجه لایه های ناخالصی را میتوان بدون صدمه زدن به نواحی نفوذ داده شده قبلی، کشت داد.
- لایه های ناخالصی بسیار کم عمق و با کیفیت میتوان ایجاد کرد.
- میتوان ناخالصیهایی را که به راحتی در نیمه رسانا نفوذ نمی کنند، با این روش کشت داد.
- کنترل دقیق تراکم ناخالصیها.

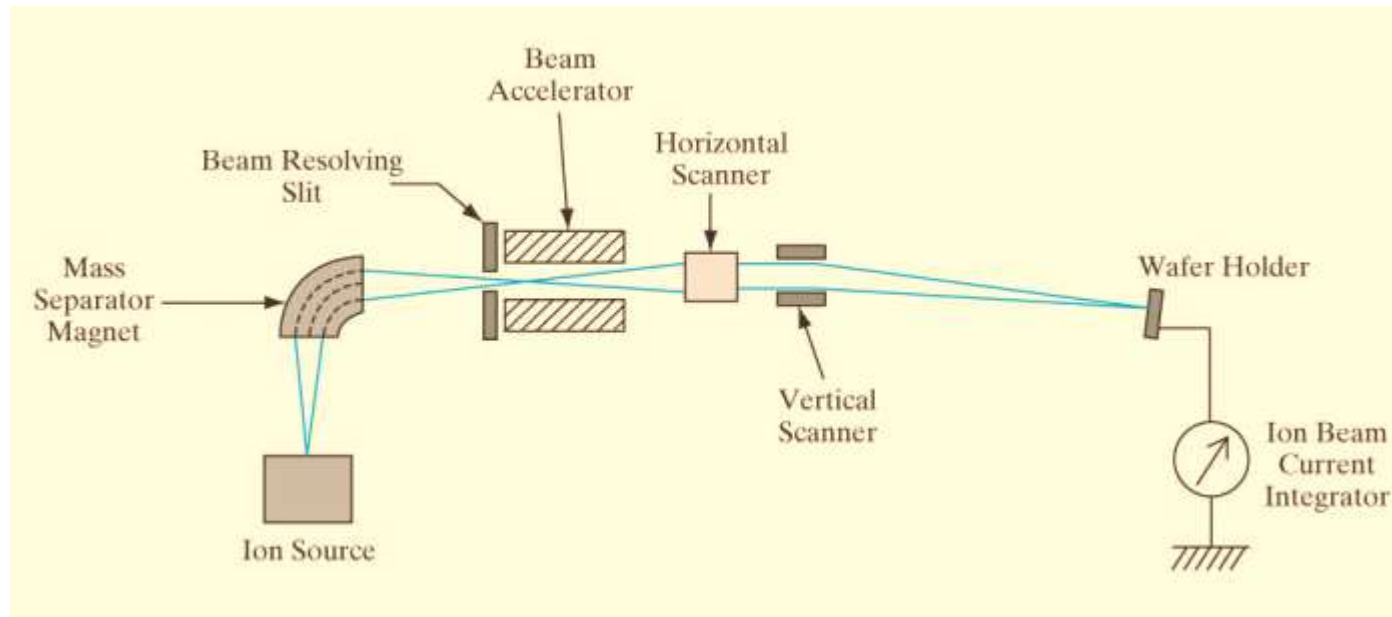
یک مشکل این روش، آسیب دیدن شبکه بر اثر برخورد یونها به اتمهای شبکه است، که البته میتوان با گرمادهی (Annealing) بلور به مقدار زیادی آنرا بر طرف کرد.

روشهای ساخت پیوند p-n

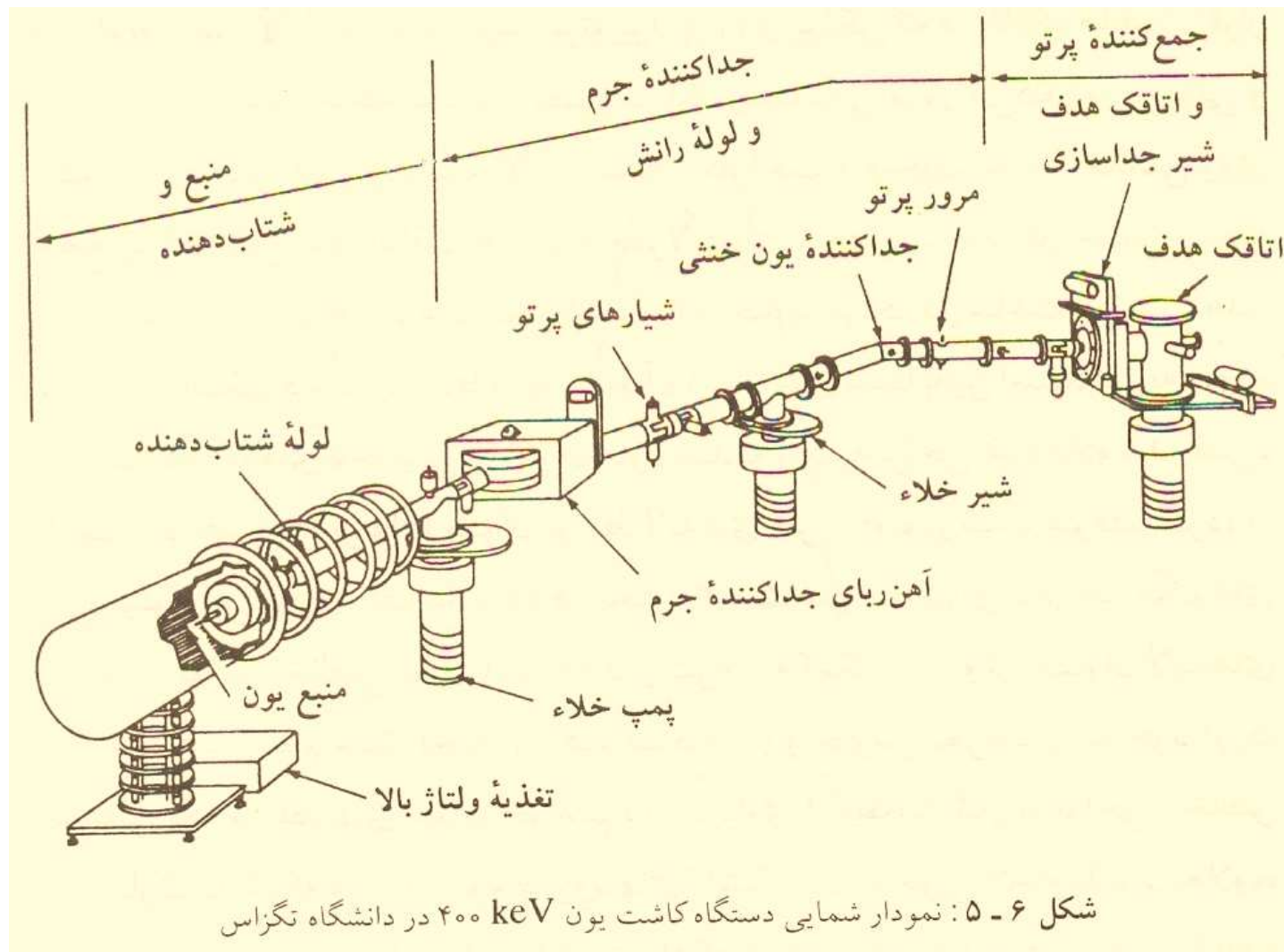
کاشت یون (Ion Implantation):



کاشت یون (Ion Implantation):



کاشت یون (Ion Implantation):



۵.۲ شرایط تعادل

مصالحه بین تشریح ریاضی و تحلیل کیفی

پیوند پله ای (Step Junction):
این نوع پیوند مدل بسیار خوبی برای پیوندهای آلیاژی و رنشتی است. در حالیکه پیوند نفوذی از نوع شیبدار است. البته با اصلاحات مناسب میتوان مدل ساده پیوند پله ای را به پیوند شیبدار تعمیم داد.

هدف: بررسی خواص پیوند پله ای در حالت تعادل (بدون برانگیختگی خارجی و نبود جریان معدل در قطعه)

۵.۲.۱ پتانسیل اتصال

برای درک شرایط تعادل در پیوند فرض می کنیم پیوند P-N از کنار هم قرار دادن نواحی جداگانه نیمه رساناهای نوع N و P تشکیل می شود. به محض اتصال دو ناحیه، بدلیل وجود شیب زیاد در تراکم باربرها در پیوندگاه، نفوذ باربرها آغاز می شود. بنابر این حفره ها از سمت P به طرف N و الکترونها از N به P نفوذ می کنند. اما بدلیل ایجاد یک میدان الکتریکی مخالف در محل پیوند، نفوذ باربرها دائمی نخواهد بود. از آنجا که میدان در جهت مخالف جریان نفوذی هر یک از باربرهاست، یک مولفه رانشی جریان از n به p و در خلاف جهت جریان نفوذی ایجاد می کند.

از آنجا که در شرایط تعادل معدل جریان صفر است پس:

$$J_p(\text{drift}) + J_p(\text{diff.}) = 0$$

$$J_n(\text{drift}) + J_n(\text{diff.}) = 0$$

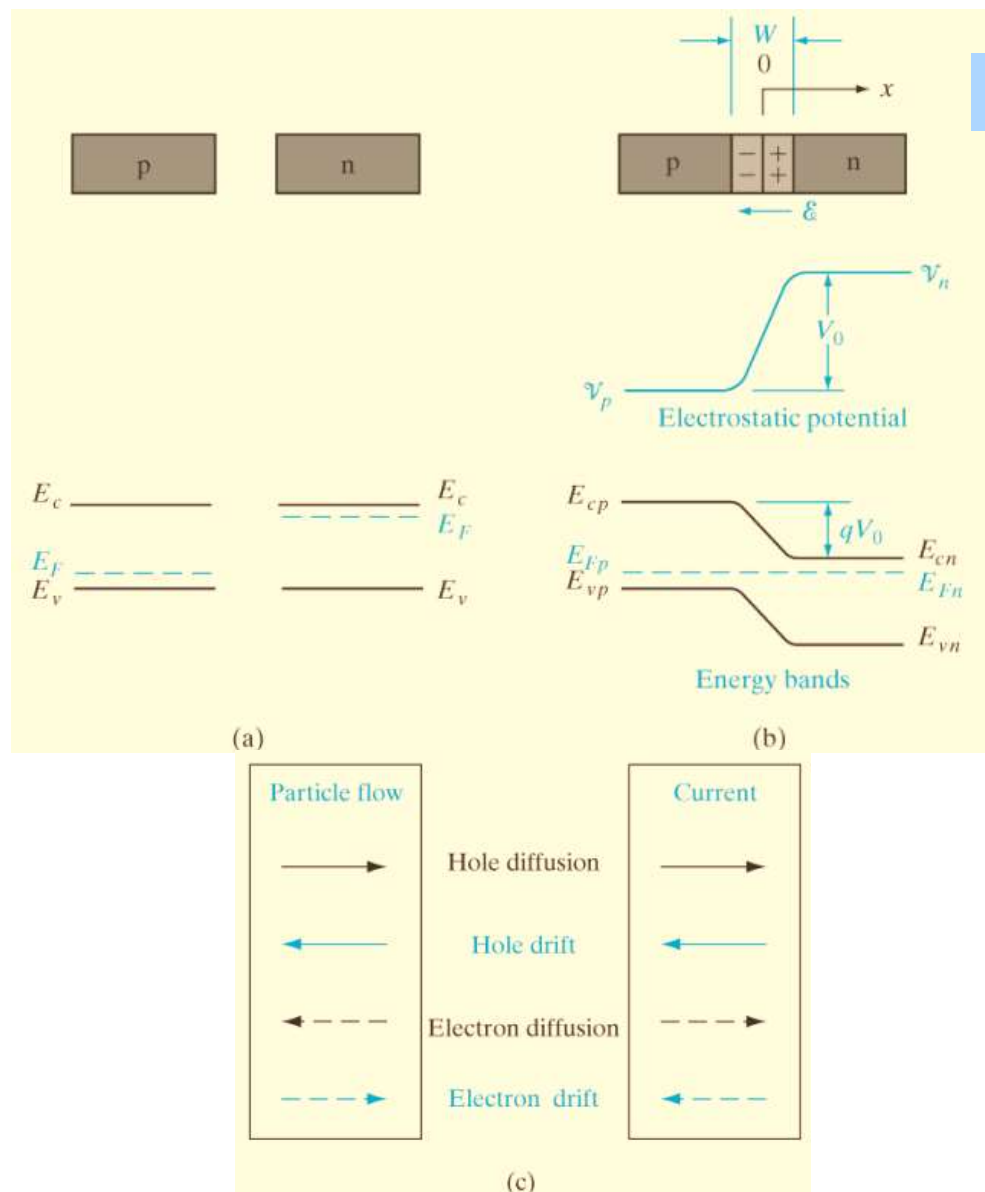
میدان الکتریکی E تا آن حد افزایش می یابد که جریان کل در حالت تعادل به صفر برسد. در حالت تعادل میدان الکتریکی در ناحیه ای به پهنای W حول پیوندگاه و اختلاف پتانسیل V_0 در طول W برقرار می شود.

$$\mathcal{E}(x) = -d\mathcal{V}(x)/dx$$

ناحیه W، ناحیه گذر (Transition Region) و اختلاف پتانسیل $V_0 = V_n - V_p$ پتانسیل اتصال نامیده می شود، که یک سد پتانسیل داخلی است و برای حفظ تعادل در پیوند لازم است و یک پتانسیل بیرونی قابل اندازه گیری نیست. پتانسیل اتصال باعث جدایی نوارهای انرژی سمت p و n می شود. مقدار این جدایی به اندازه لازم برای یکنواخت شدن تراز فرمی در سراسر قطعه است.

۵.۲.۱ پتانسیل اتصال

ویژگیهای یک پیوند P-N در حالت تعادل:



۵.۲.۱ پتانسیل اتصال

تعیین رابطه کمی بین V_0 و تراکم ناخالصیها در طرفین پیوندگاه:
از شرط تعادل در معادلات جریانهای نفوذی و رانشی داریم: (معادله را برای n ها هم میتوان نوشت)

$$J_p(x) = q \left[\underbrace{\mu_p p(x) \mathcal{E}(x)}_{\text{drift}} - \underbrace{D_p \frac{dp(x)}{dx}}_{\text{diffusion}} \right] = 0$$

و با ساده سازی معادله فوق:

$$\frac{\mu_p}{D_p} \mathcal{E}(x) = \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$

جهت x بطور اختیاری از p به n گرفته شده است. با توجه به رابطه انشتین برای $\frac{\mu_p}{D_p}$ داریم:

$$-\frac{q}{kT} \frac{d\mathcal{V}(x)}{dx} = \frac{1}{p(x)} \frac{dp(x)}{dx}$$

۵.۲.۱ پتانسیل اتصال

با انتگرالگیری از معادله فوق:

$$-\frac{q}{kT} \int_{V_p}^{V_n} dV = \int_{p_p}^{p_n} \frac{1}{p} dp$$

$$-\frac{q}{kT} (V_n - V_p) = \ln p_n - \ln p_p = \ln \frac{p_n}{p_p}$$

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{p_p}{p_n}$$

شکل مفید دیگری از معادله فوق، و با استفاده از شرط تعادل، $p_p n_p = n_i^2 = p_n n_n$ ، داریم:

$$\frac{p_p}{p_n} = \frac{n_n}{n_p} = e^{qV_0/kT}$$

اگر فرض کنیم، پیوند پله ای فوق از ماده ای با چگالی N_a پذیرنده در طرف p و چگالی N_d دهنده در طرف n تشکیل شده باشد، داریم: (با فرض یکسان بودن تراکم باربرهای اکثریت با تراکم ناخالصی)

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i^2/N_d} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$$

۵.۲.۱ پتانسیل اتصال

مثال ۱-۵: یک نمونه نوع n از Ge دارای $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ است. با آلیاژ کردن آن با آیندیم در دمای 160°C یک پیوند ساخته می شود. فرض کنید تراکم پذیرنده ها در ناحیه دوباره رشد یافته برابر با حلالیت حالت جامد در دمای رشد آلیاژی است.

الف- وضعیت ترازهای فرمی را در نواحی n و p و در 300°K محاسبه کنید.

ب- نمودار نوار انرژی را برای پیوند در حالت تعادل رسم کرده و از روی آن پتانسیل اتصال V_0 را تعیین کنید.

ج- نتایج قسمت ب را با V_0 محاسبه شده از معادله اسلاید قبل مقایسه کنید.

حل: از ضمیمه V: $N_a = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

الف: با فرض $p_p = N_a, n_n = N_d$

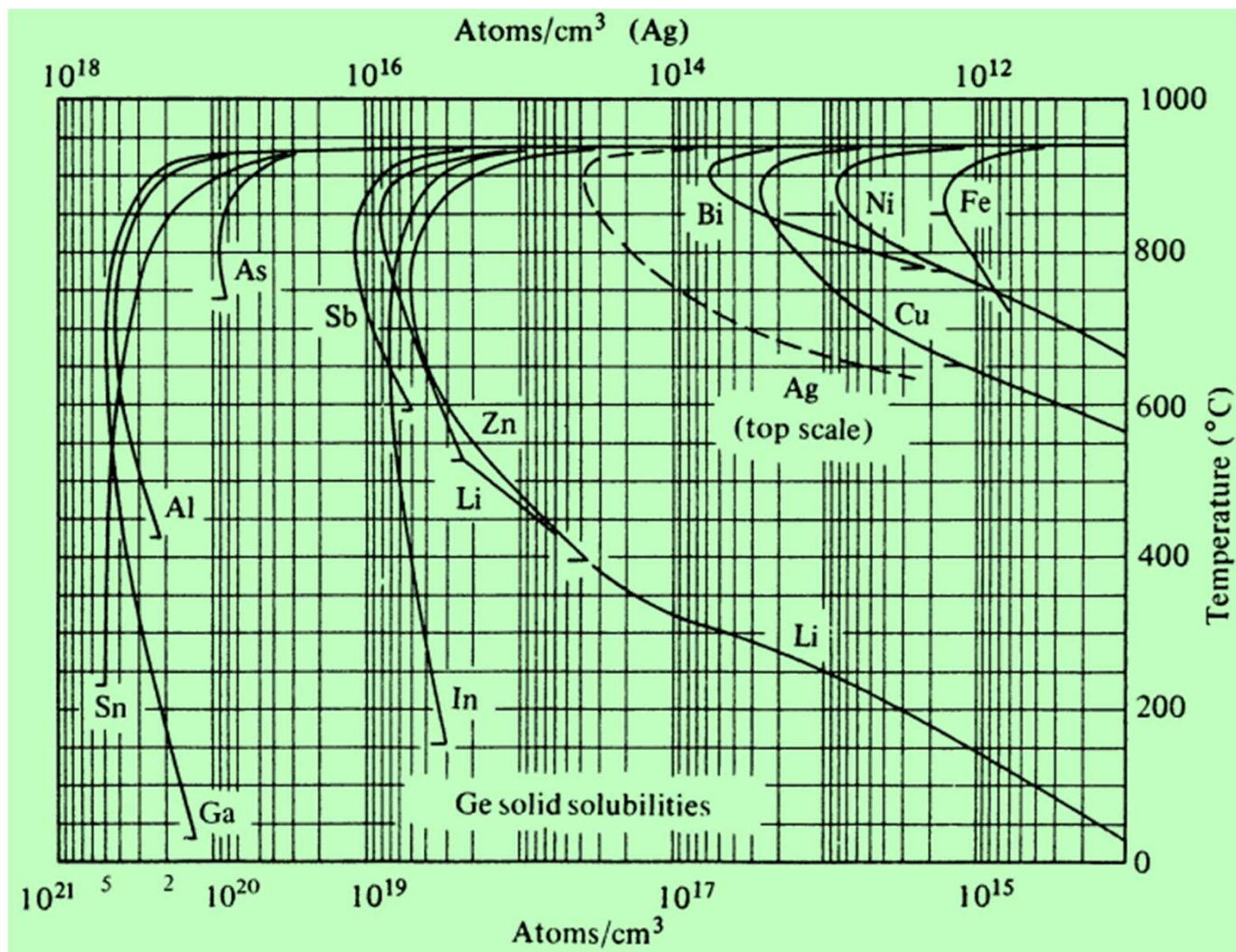
$$p_p = n_i e^{(E_i - E_{Fp})/kT}$$

Thus

$$E_{ip} - E_{Fp} = kT \ln \frac{p_p}{n_i} = 0.0259 \ln \frac{3 \times 10^{18}}{2.5 \times 10^{13}} = 0.303 \text{ eV}$$

Similarly,

$$E_{Fn} - E_{in} = 0.0259 \ln \frac{10^{16}}{2.5 \times 10^{13}} = 0.155 \text{ eV}$$



نمودار حلالیت حالت جامد Ge (قابلیت حل ناخالصی در Ge بر حسب دما)

(b)

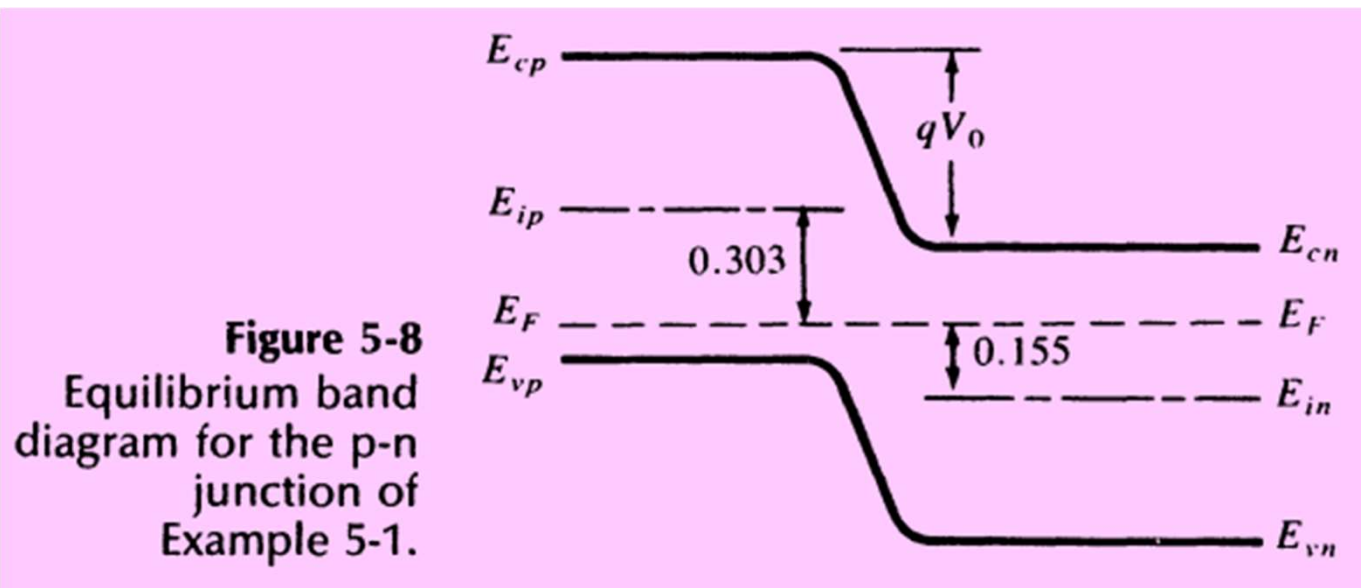
$$qV_0 = E_{cp} - E_{cn} = E_{ip} - E_{in}$$

$$V_0 = 0.303 + 0.155 = 0.458 \text{ V}$$

(c)

$$V_0 = 0.0259 \ln \frac{3 \times 10^{18} \times 10^{16}}{6.25 \times 10^{26}}$$

$$= 0.0259 \ln(4.8 \times 10^7) = 0.458 \text{ V}$$



۵.۲.۲ ترازهای فرمی در حالت تعادل

با توجه به نتایج بخش قبل بار دیگر اثبات می نماییم که: در حالت تراز فرمی باید در سراسر قطعه ثابت باشد.

$$\frac{p_p}{p_n} = e^{qV_0/kT} = \frac{N_v e^{-(E_{Fp} - E_{vp})/kT}}{N_v e^{-(E_{Fn} - E_{vn})/kT}}$$

$$e^{qV_0/kT} = e^{(E_{Fn} - E_{Fp})/kT} e^{(E_{vp} - E_{vn})/kT}$$

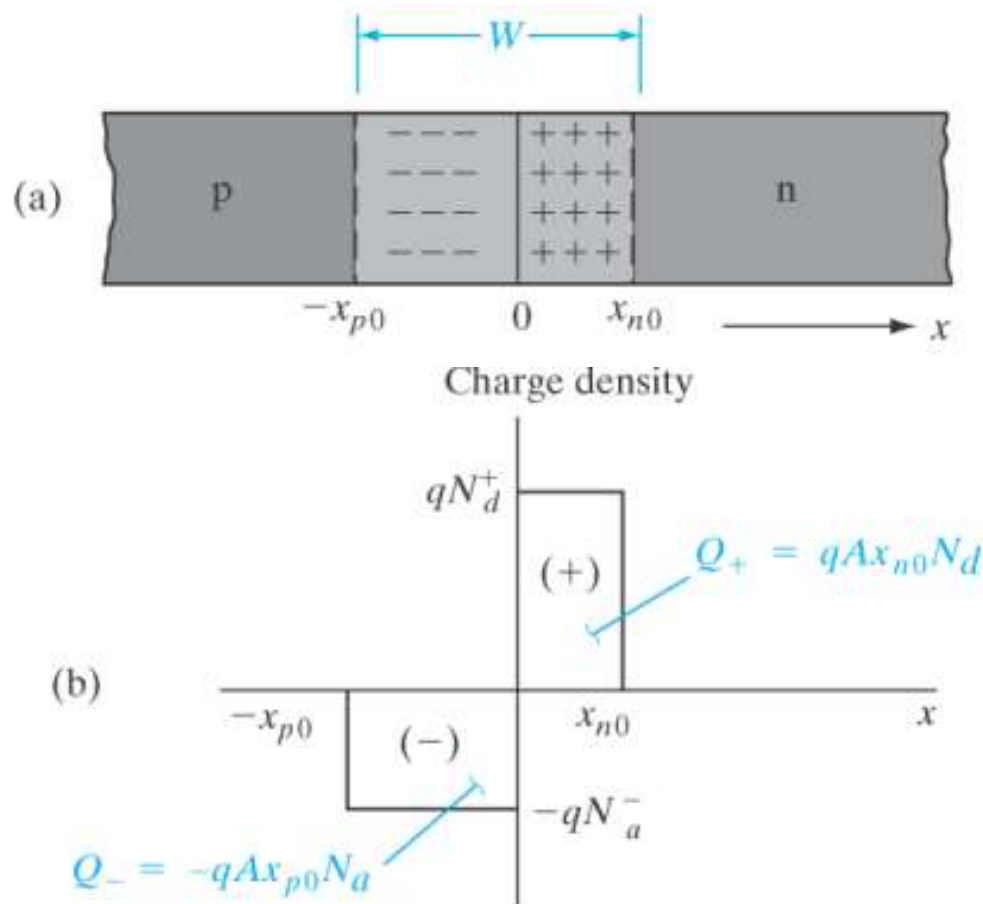
$$qV_0 = E_{vp} - E_{vn}$$

با توجه به شکل اسلاید ۲۹ نوارهای انرژی در طرفین پیوند به اندازه qV_0 از هم جدا شده اند، بنابر این اختلاف انرژی $E_{vp} - E_{vn}$ درست برابر qV_0 است. و معادله فوق از این حقیقت بدست آمده که ترازهای فرمی در طرفین پیوند در حالت تعادل با یکدیگر برابرند.

$$E_{Fn} - E_{Fp} = 0$$

وقتی ولتاژ بایاس به پیوند اعمال می شود، سد پتانسیل از مقدار پتانسیل اتصال بیشتر یا کمتر شده و ترازهای فرمی را به اندازه عدد ولتاژ اعمالی بر حسب الکترون ولت جابجا می نماید.

۵.۲.۳ بار فضا در محل پیوند



چگالی بار مثبت در طرف n: qN_d

چگالی بار منفی در طرف p: qN_a

با توجه به: $Q_+ = |Q_-|$ ناحیه گذر در طرفی که غلظت ناخالصی کمتری دارد، بیشتر گسترش می یابد.

$$qAx_{p0}N_a = qAx_{n0}N_d$$

۵.۲.۳ بار فضا در محل پیوند

محاسبه توزیع میدان الکتریکی در ناحیه گذر:

از قانون گوس داریم:

$$\frac{d\mathcal{E}(x)}{dx} = \frac{q}{\epsilon} (p - n + N_d^+ - N_a^-)$$

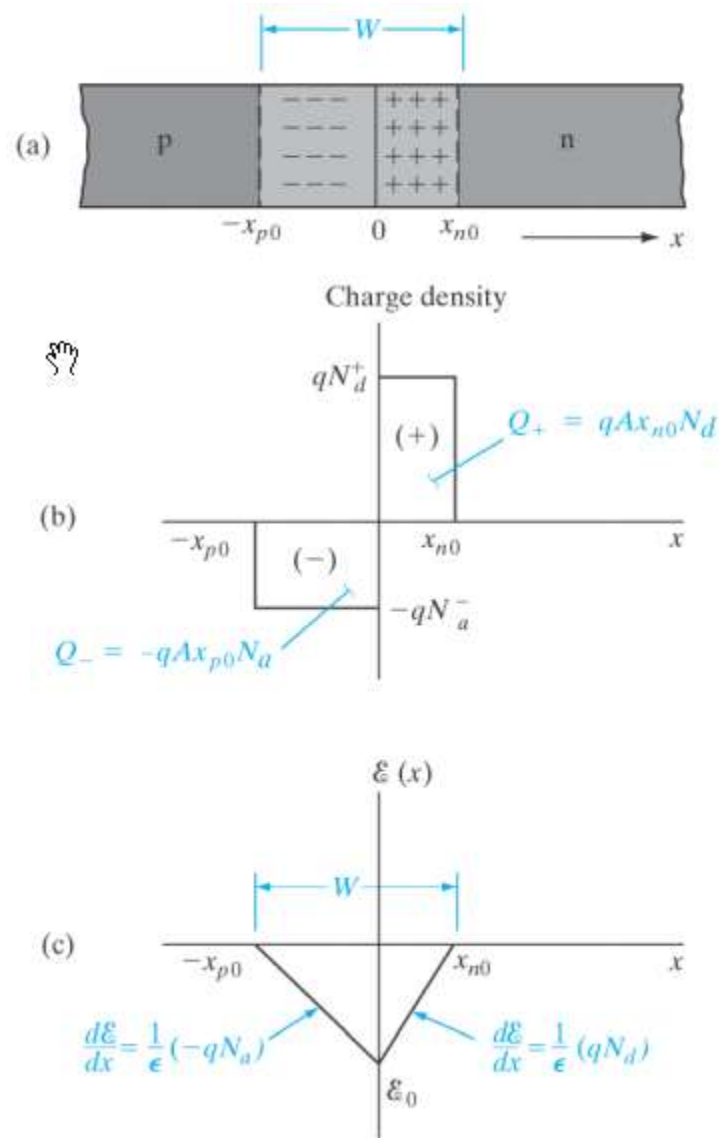
با صرفنظر از سهم بارهای n و p در ناحیه بار فضا و با فرض یونیزه شدن تمام ناخالصیها :

$$(N_d^+ = N_d, \text{ and } N_a^- = N_a)$$

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{q}{\epsilon} N_d, \quad 0 < x < x_{n0}$$

$$\frac{d\mathcal{E}}{dx} = -\frac{q}{\epsilon} N_a, \quad -x_{p0} < x < 0$$

از روابط مقابل مشخص می شود که میدان الکتریکی $\mathcal{E}(x)$ ، برحسب x ، در طرف n ، دارای شیب مثبت و در طرف p دارای شیب منفی است. و در $x = 0$ یعنی محل پیوند، دارای ماکزیمم مقدار $\mathcal{E}_0$ است و در سراسر W ، دارای مقدار منفی است.



۵.۲.۳ بار فضا در محل پیوند

محاسبه $\mathcal{E}_0$:

$$\int_{\mathcal{E}_0}^0 d\mathcal{E} = \frac{q}{\epsilon} N_d \int_0^{x_{n0}} dx, \quad 0 < x < x_{n0}$$

$$\int_0^{\mathcal{E}_0} d\mathcal{E} = -\frac{q}{\epsilon} N_a \int_{-x_{p0}}^0 dx, \quad -x_{p0} < x < 0$$

بنابراین:

$$\mathcal{E}_0 = -\frac{q}{\epsilon} N_d x_{n0} = -\frac{q}{\epsilon} N_a x_{p0}$$

ارتباط $\mathcal{E}_0$ و V_0 :

$$\mathcal{E}(x) = -\frac{dV(x)}{dx} \quad \text{or} \quad -V_0 = \int_{-x_{p0}}^{x_{n0}} \mathcal{E}(x) dx$$

بنابراین V_0 سطح زیر مثلث و برابر است با:

$$V_0 = -\frac{1}{2} \mathcal{E}_0 W = \frac{1}{2} \frac{q}{\epsilon} N_d x_{n0} W$$

۵.۲.۳ بار فضا در محل پیوند

با توجه به شرط تعادل بار:

$$x_{n0} N_d = x_{p0} N_a$$

$$W = x_{p0} + x_{n0}$$

$$x_{n0} = W N_a / (N_a + N_d)$$

پس:

$$V_0 = \frac{1}{2} \frac{q}{\epsilon} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} W^2$$

بنابراین:

$$W = \left[\frac{2\epsilon V_0 (N_a + N_d)}{q} \right]^{1/2} = \left[\frac{2\epsilon V_0}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2}$$

و یا:

$$W = \left[\frac{2\epsilon kT}{q^2} \left(\ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2}$$

پهنای گذر W متناسب با ریشه دوم اختلاف پتانسیل دو سر ناحیه گذر است.

۵.۲.۳ بار فضا در محل پیوند

محاسبه عمق نفوذ ناحیه گذر در نیمه هادی نوع n و p :

$$x_{p0} = \frac{WN_d}{N_a + N_d} = \frac{W}{1 + N_a/N_d} = \left\{ \frac{2\epsilon V_0}{q} \left[\frac{N_d}{N_a(N_a + N_d)} \right] \right\}^{1/2}$$

$$x_{n0} = \frac{WN_a}{N_a + N_d} = \frac{W}{1 + N_d/N_a} = \left\{ \frac{2\epsilon V_0}{q} \left[\frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)} \right] \right\}^{1/2}$$

طرف با ناخالصی کمتر به میزان بیشتری گسترش می یابد.

از رابطه W مشخص شد که پهنای گذر W متناسب با ریشه دوم اختلاف پتانسیل دو سر ناحیه گذر است. اگر ولتاژی از بیرون اعمال شود می تواند پتانسیل دو سر ناحیه گذر را برحسب موافقت یا مخالفت با میدان الکتریکی حالت تعادل، کاهش یا افزایش دهد که باعث کاهش یا افزایش پهنای ناحیه گذر می گردد.

۵.۲.۳ بار فضا در محل پیوند

مثال ۲-۵: از آلیاژ کردن آلومینیوم با یک نمونه Si نوع n (با $N_d = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$)، یک پیوند تیز با سطح مقطع دایره ای شکل و به قطر 20 mil بدست آمده است. فرض می کنیم تراکم پذیرنده ها در ناحیه آلیاژ دوباره رشد یافته برابر با $N_a = 4 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ باشد. V_0 ، x_{n0} ، x_{p0} و Q_+ را برای این پیوند در شرایط تعادل (300°K) محاسبه کنید. $\mathcal{E}(x)$ و چگالی بار را رسم کنید.

حل:

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2} = 0.0259 \ln \frac{4 \times 10^{34}}{2.25 \times 10^{20}}$$

$$= 0.0259 \ln(1.78 \times 10^{14}) = 0.85 \text{ V}$$

$$W = \left[\frac{2\epsilon V_0}{q} \left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d} \right) \right]^{1/2}$$

$$= \left[\frac{2(11.8 \times 8.85 \times 10^{-14})(0.85)}{1.6 \times 10^{-19}} (0.25 \times 10^{-18} + 10^{-16}) \right]^{1/2}$$

$$= 3.34 \times 10^{-5} \text{ cm} = 0.334 \mu\text{m}$$

۵.۲.۳ بار فضا در محل پیوند

$$x_{n0} = \frac{3.34 \times 10^{-5}}{1 + 0.0025} \approx 0.333 \mu\text{m}$$

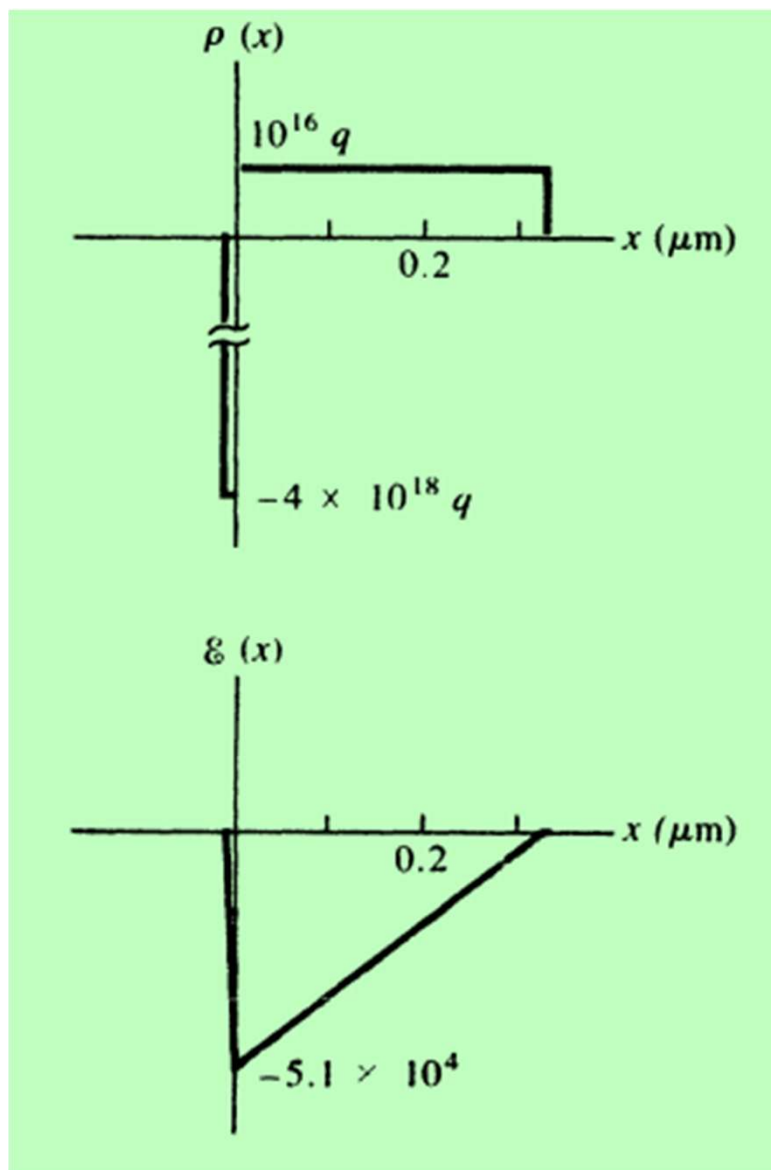
$$x_{p0} = \frac{3.34 \times 10^{-5}}{1 + 400} \approx 8.3 \times 10^{-8} \text{ cm} = 8.3 \text{ \AA}$$

Note that $x_{n0} \approx W$

$$A = \pi r^2 = \pi (2.54 \times 10^{-2})^2 = 2.03 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$$

$$\begin{aligned} Q_+ = -Q_- &= qAx_{n0}N_d = (1.6 \times 10^{-19})(2.03 \times 10^{-3})(3.33 \times 10^{-5})(10^{16}) \\ &= 1.08 \times 10^{-10} \text{ C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_0 &= \frac{-qN_dx_{n0}}{\epsilon} = \frac{-(1.6 \times 10^{-19})(10^{16})(3.33 \times 10^{-5})}{(11.8)(8.85 \times 10^{-14})} \\ &= -5.1 \times 10^4 \text{ V/cm} \end{aligned}$$



۵.۳ گرایش مستقیم و معکوس پیوندها، شرایط پایدار

دیود پیوند p-n برای:

- یکسوسازی (Rectification)
- خازن متغیر با ولتاژ (Varicap)
- سلول نوری (Photo-cell)
- گسیلنده نوری (LED) و.....

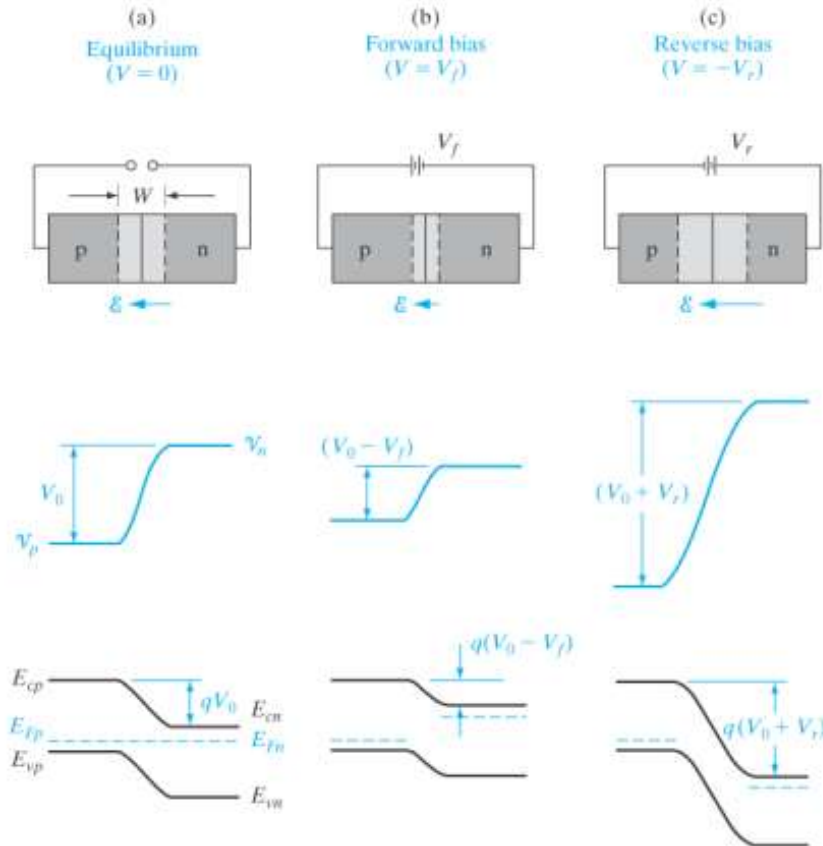
تشریح کیفی عبور جریان از یک پیوند:

در صورت اعمال یک ولتاژ بایاس به دوسر پیوند p-n، بخاطر اینکه در بیشتر قطعات پیوندی p-n، طول هر ناحیه نسبت به سطح مقطع آن کوچک است و میزان تراکم ناخالصی در حد متوسط تا خیلی زیاد است و بنابراین مقاومت نواحی خنثی کم است، افت ولتاژ در این نواحی کم بوده و می توان فرض کرد که ولتاژ اعمالی در دو سر ناحیه گذر ظاهر می شود.

ولتاژ بیرونی، سد پتانسیل و بنابراین میدان الکتریکی ناحیه گذر، مولفه های جریان در محل پیوند، میزان جدایی نوارهای انرژی و پهنای ناحیه تهی را تغییر می دهد.

بایاس مستقیم V_f ، باعث کاهش سد پتانسیل به مقدار $V_0 - V_f$ می گردد و میدان الکتریکی را نیز کاهش می دهد. همچنین بایاس معکوس V_r ، باعث افزایش سد پتانسیل به مقدار $V_0 + V_r$ می گردد و میدان الکتریکی را نیز افزایش می دهد.

۵.۳.۱ تشریح کیفی عبور جریان از یک پیوند



- (1) Hole diffusion
- (2) Hole drift
- (3) Electron diffusion
- (4) Electron drift

Particle flow	Current
(1) →	→
(2) ←	←
(3) ←	→
(4) →	←

۵.۳.۱ تشریح کیفی عبور جریان از یک پیوند

معادلات مربوط به W و عمق نفوذ را با جایگذاری $V_0 - V_f$ برای بایاس مستقیم و $V_0 + V_r$ می توان تصحیح کرد. در بایاس مستقیم، تراز فرمی در طرف n (E_{Fn}) به مقدار qV_f بالاتر از E_{Fp} خواهد بود. در بایاس معکوس، تراز فرمی در طرف p (E_{Fp}) به مقدار qV_r بالاتر از E_{Fn} خواهد بود.

جریان نفوذ، از حاملهای اکثریت که بر سد انرژی پتانسیل غلبه کرده تشکیل شده است. در گرایش مستقیم، بدلیل کاهش سد پتانسیل، تعداد بیشتری از الکترونها در نوار هدایت طرف n دارای انرژی کافی برای نفوذ از n به p خواهند بود و بطور مشابه برای حفره ها. بنابراین جریان نفوذ در گرایش مستقیم می تواند کاملاً بزرگ باشد. به دلیل عکس، جریان نفوذ در گرایش معکوس ناچیز است.

جریان رانشی، به ارتفاع سد بستگی ندارد و بنابراین مستقل از ولتاژ دو سر پیوند است. جریان رانشی ناشی از الکترونهای اقلیت سرگردان ناحیه p و حفره های اقلیت سرگردان ناحیه n است که وارد ناحیه گذر شده اند. و بدلیل اندک بودن این حاملها، جریان رانشی کوچک است. هر الکترون طرف p که به ناحیه گذر نفوذ کند به پایین تپه انرژی پتانسیل کشیده خواهد شد خواه تپه بزرگ باشد یا کوچک. و بطور مشابه برای جریان رانشی حفره هایی که از ناحیه n وارد ناحیه گذر شده اند.

جریان رانشی به سرعت کشیده شدن حاملها به پایین تپه انرژی بستگی ندارد بلکه به تعداد حاملها بستگی دارد. منبع تامین حاملهای اقلیت EHP هایی هستند که در اثر برانگیختگی گرمایی بوجود آمده اند، علاوه بر این می توانند به میزان زیاد توسط برانگیختگی نوری تولید شوند (دیود نوری).

۵.۳.۱ تشریح کیفی عبور جریان از یک پیوند

جریان کل:

ناشی از مولفه های نفوذی و رانشی است. جریان نفوذی الکترونها و حفره ها هر دو در جهت p به n (اگر چه جهت جاری شدن دو ذره خلاف یکدیگر است)، و جریانهای رانشی از n به p است.

کل جریان عبوری از پیوند در حالت تعادل صفر است، در گرایش معکوس برابر جریان تولیدی است و به سرعت تولید **EHP** بستگی دارد. در بایاس مستقیم، بیشتر ناشی از جریان نفوذی خواهد بود.

$$I = I(\text{diff.}) - |I(\text{gen.})| = 0 \quad \text{for } V = 0$$

خواهیم دید که گرایش مستقیم، احتمال نفوذ برابر از پیوندگاه را با ضریب $\exp(qV_f/kT)$ افزایش می دهد و جریان با این ضریب نسبت به جریان حالت تعادل افزایش می یابد. در گرایش معکوس نیز جریان نفوذی با همین ضریب و با در نظر گرفتن $V = -V_r$ کاهش می یابد. جریان نفوذی در حالت تعادل برابر $|I(\text{gen.})|$ است، پس:

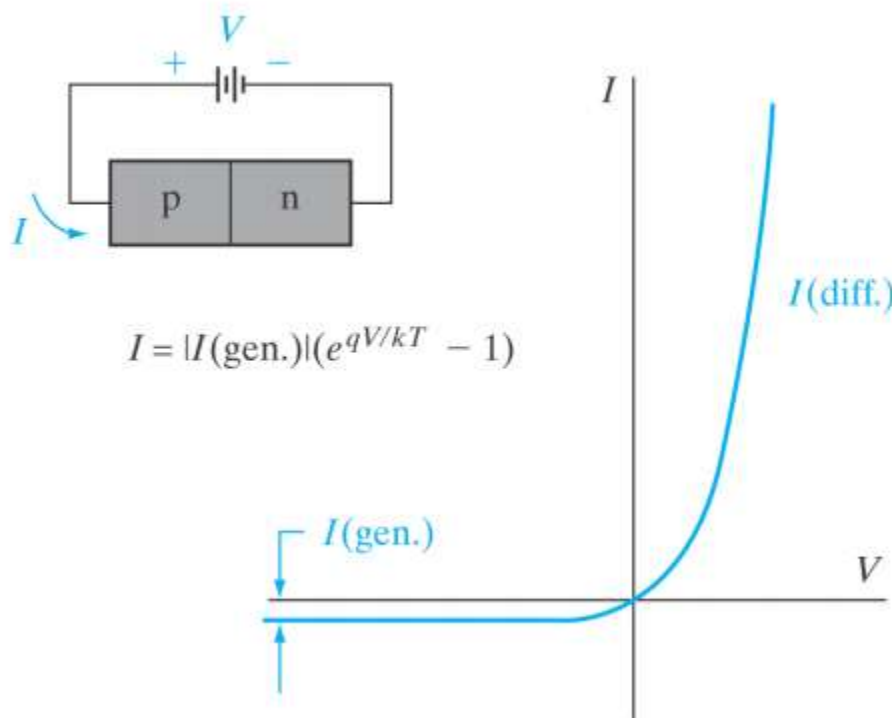
$$I(\text{driff.}) = |I(\text{gen.})| \exp(qV/kT)$$

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

و جریان کل:

که: $V = V_f$ or $V = V_r$ و بیشتر از چند kT/q باشد و $I_0 = |I(\text{gen.})|$

۵.۳.۱ تشریح کیفی عبور جریان از یک پیوند



بنابراین جریان بطور نمایی با گرانش مستقیم افزایش می یابد. وقتی V منفی است (گرانش معکوس) جمله نمایی به صفر نزدیک شده و جریان $-I_0$ است. این جریان تولیدی منفی، جریان اشباع معکوس نامیده می شود.

۵.۳.۲ تزریق باربرها

$$\frac{p_p}{p_n} = e^{qV_0/kT}$$

از مباحث مربوط به بخش ۵.۲.۱ (پتانسیل اتصال)، نسبت تراکم حفره ها در حالت تعادل:

$$\frac{p(-x_{p0})}{p(x_{n0})} = e^{q(V_0-V)/kT}$$

و با اعمال گرایش:

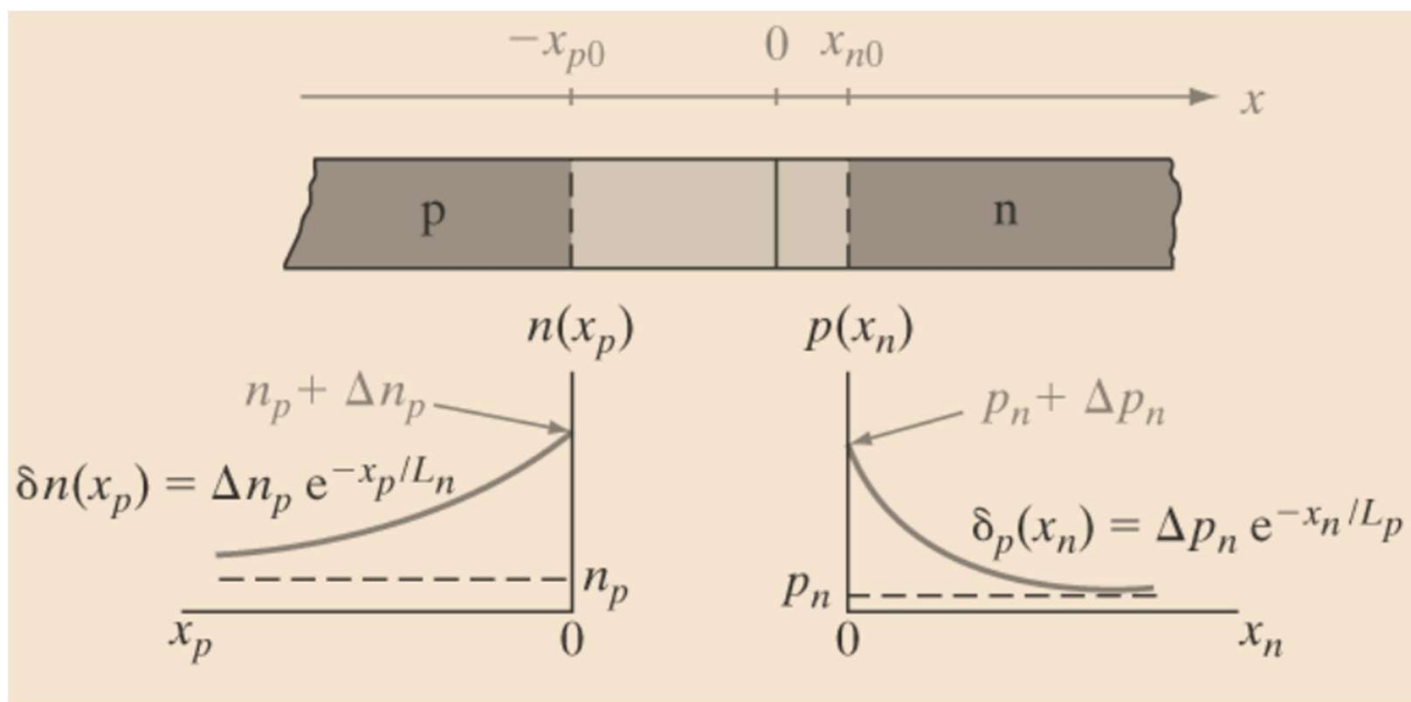
این معادله تراکم حالت پایدار حفره ها در طرفین ناحیه گذر را به ولتاژ گرایش مستقیم یا معکوس مرتبط می سازد. در حالت تزریق کم (Low Level Injection) میتوان از تغییر تراکم باربرهای اکثریت نسبت به حالت تعادل صرفنظر کرد. بنابراین نسبت دو معادله فوق:

$$\frac{p(x_{n0})}{p_n} = e^{qV/kT} \quad \text{taking } p(-x_{p0}) = p_p$$

بنابراین در گرایش مستقیم، تراکم حفره های باربر اقلیت در لبه ناحیه گذر در طرف n، نسبت به حالت تعادل افزایش قابل ملاحظه ای دارد. و در گرایش معکوس به کمتر از حالت تعادل می رسد.

۵.۳.۲ تزریق باربرها

تزریق باربرهای اقلیت در گرایش مستقیم:

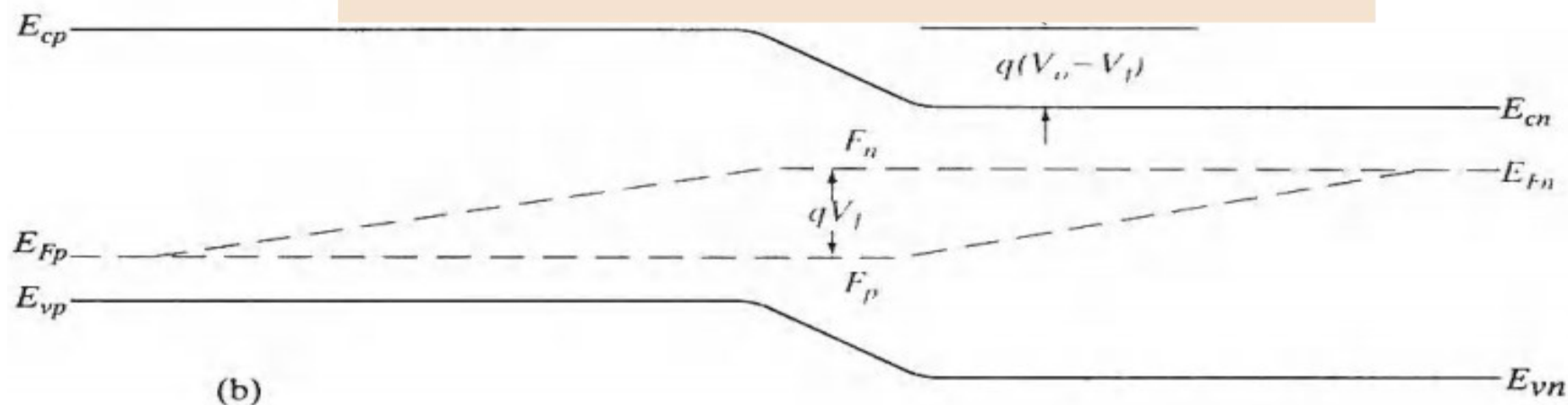
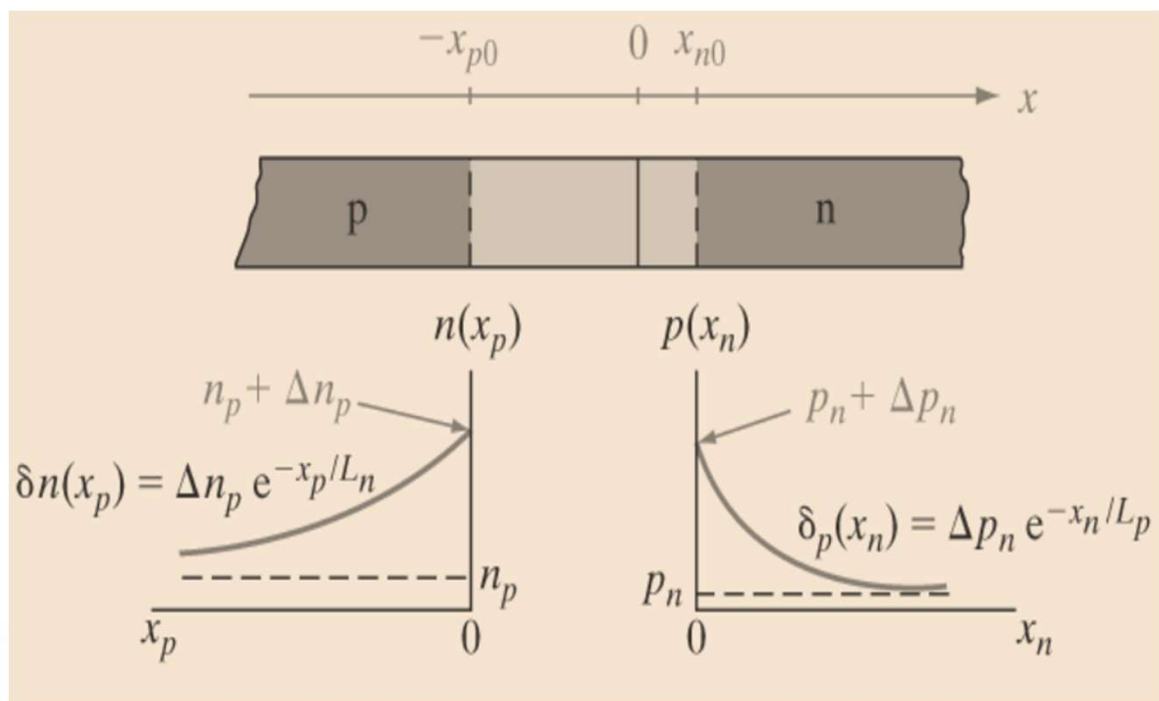


$$\Delta p_n = p(x_{n0}) - p_n = p_n (e^{qV/kT} - 1)$$

$$\Delta n_p = n(-x_{p0}) - n_p = n_p (e^{qV/kT} - 1)$$

تراکم حفره های اضافی در لبه ناحیه گذر:

تراکم الکترونهای اضافی در لبه ناحیه گذر:



۵.۳.۲ تزریق باربرها

توزیع باربرهای اضافی:

تزریق منجر شده به تراکم پایدار حفره های اضافی در x_{n0} یک توزیع از حفره های اضافی در ماده n بوجود می آورد، که با نفوذ عمیقتر آنها، با الکترونهای ماده n بازترکیب شده و توزیع حفره های اضافی حاصل از معادله نفوذ (فصل ۴) بدست می آید، که در صورت طویل بودن ناحیه n در مقایسه با طول نفوذ حفره ها، L_p ، یک توزیع نمایی خواهد بود. و بطور مشابه برای الکترونهای تزریق شده در ماده p :

$$\begin{aligned}\delta n(x_p) &= \Delta n_p e^{-x_p/L_n} = n_p (e^{qV/kT} - 1) e^{-x_p/L_n} \\ \delta p(x_n) &= \Delta p_n e^{-x_n/L_p} = p_n (e^{qV/kT} - 1) e^{-x_n/L_p}\end{aligned}$$

جریان نفوذ حفره در هر نقطه x_n :

$$I_p(x_n) = -qAD_p \frac{d\delta p(x_n)}{dx_n} = qA \frac{D_p}{L_p} \Delta p_n e^{-x_n/L_p} = qA \frac{D_p}{L_p} \delta p(x_n)$$

بنابراین، جریان نفوذ حفره ها در هر نقطه x متناسب با تراکم حفره های اضافی در آن نقطه است.

۵.۳.۲ تزریق باربرها

جریان نفوذ حفره در نقطه x_{n0} :

$$I_p(x_n = 0) = \frac{qAD_p}{L_p} \Delta p_n = \frac{qAD_p}{L_p} p_n (e^{qV/kT} - 1)$$

جریان نفوذ الکترون در نقطه x_{p0} :

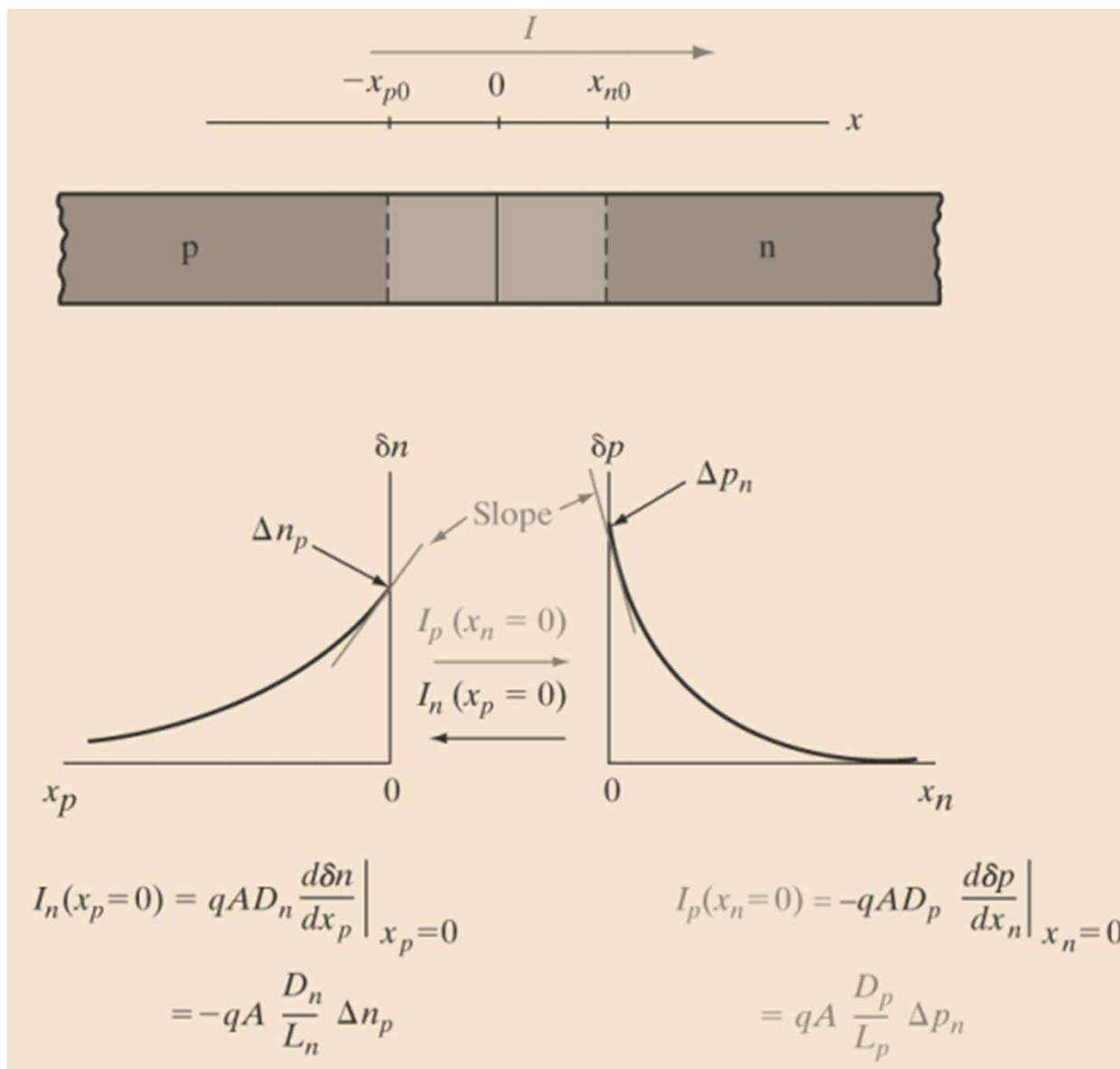
$$I_n(x_p = 0) = -\frac{qAD_n}{L_n} \Delta n_p = -\frac{qAD_n}{L_n} n_p (e^{qV/kT} - 1)$$

و جریان کل:

$$I = I_p(x_n = 0) - I_n(x_p = 0) = \frac{qAD_p}{L_p} \Delta p_n + \frac{qAD_n}{L_n} \Delta n_p$$

$$I = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) (e^{qV/kT} - 1) = I_0 (e^{qV/kT} - 1)$$

این معادله، معادله جریان دیود است. در استخراج این معادله منعی برای منفی بودن V وجود ندارد و در هر دو گرایش مستقیم و معکوس صادق است.



۵.۳.۲ تزریق باربرها

روش تقریب کنترل بار:

روش دیگر محاسبه جریان کل، در نظر گرفتن جریان تزریقی به عنوان منبع باربرها برای توزیع های اضافی است. برای مثال $I_p(x_n = 0)$ باید تعداد کافی حفره در هر ثانیه تولید کند تا توزیع نمایی حالت پایدار، $\delta P(x_n)$ ، ضمن باز ترکیب حفره ها حفظ شود.

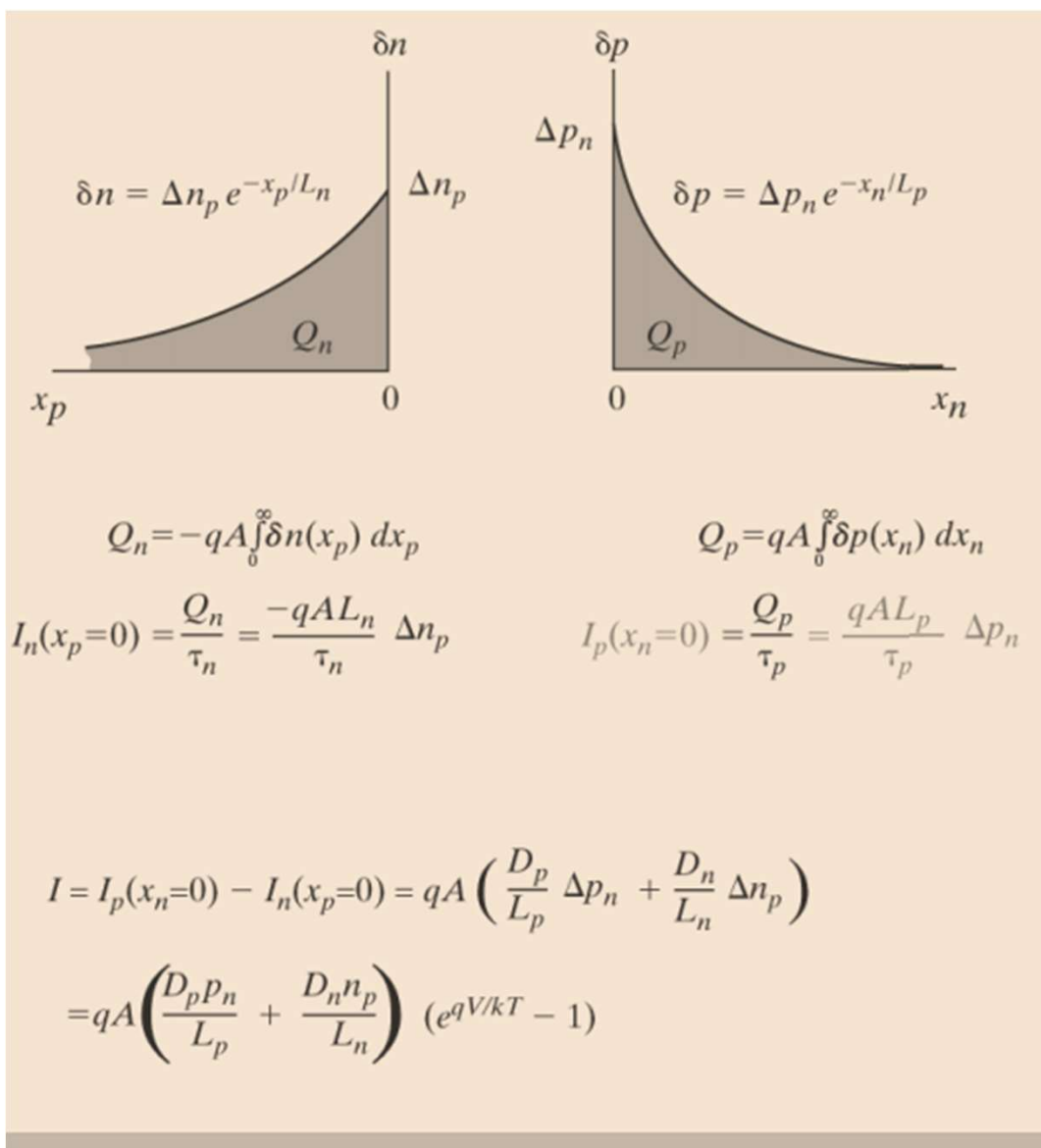
بار مثبت کل ذخیره شده در توزیع باربرهای اضافی:

$$Q_p = qA \int_0^{\infty} \delta p(x_n) dx_n = qA \Delta p_n \int_0^{\infty} e^{-x_n/L_p} dx_n = qAL_p \Delta p_n$$

τ_p : طول عمر متوسط یک حفره در ماده n
بطور متوسط تمام این توزیع بار باز ترکیب شده و باید هر τ_p ثانیه تجدید شود.

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

که همان رابطه روش قبلی است. برای الکترونها هم میتوان چنین رابطه ای بدست آورد و جریان کل را محاسبه کرد.



۵.۳.۲ تزریق باربرها

بنابراین جریان در محل پیوند p-n را می توانیم به دو روش محاسبه کنیم:
 الف) از شیب توزیع باربرهای اقلیت اضافی در دولبه ناحیه گذر.
 ب) از بار انباشته شده در هر یک از توزیعها در حالت پایدار.

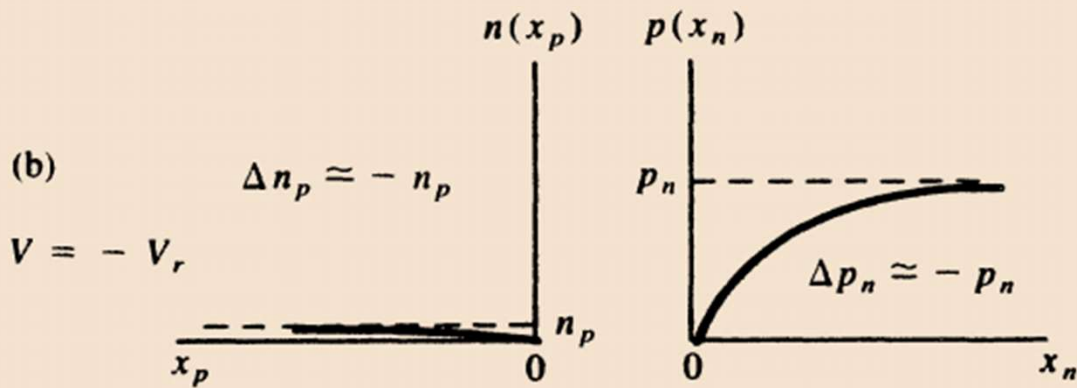
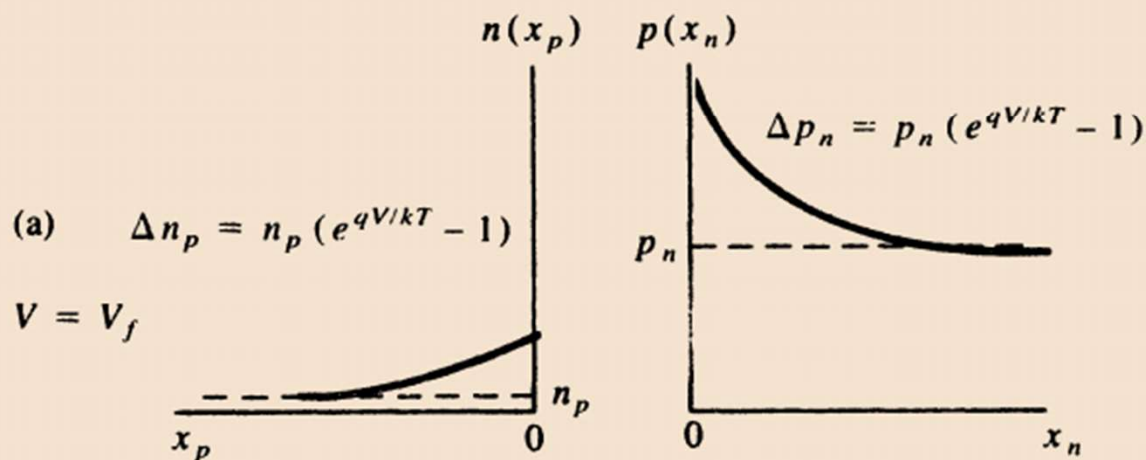
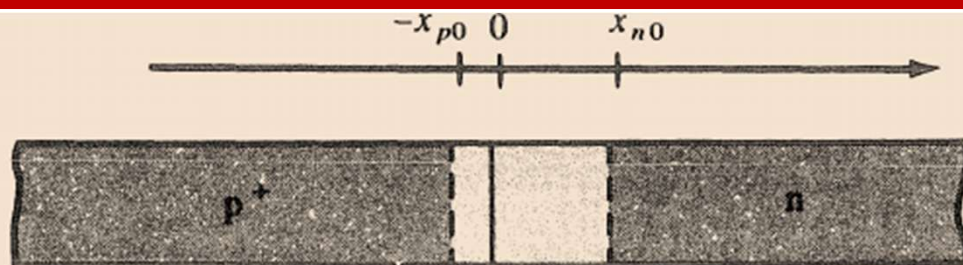
یک مفهوم معادله جریان دیود اینستکه جریان کل در پیوندگاه تحت تاثیر باربرهایی است که از ناحیه با ناخالصی شدیدتر به ناحیه با ناخالصی کمتر تزریق می شوند. برای مثال، اگر ماده p دارای ناخالصی بیشتری نسبت به ماده n باشد، تراکم باربرهای اقلیت طرف p (n_p) در مقایسه با تراکم باربرهای اقلیت طرف n (p_n) ناچیز است و میتوان معادله را فقط ناشی از تزریق حفره ها دانست. این ساختار یک پیوند p^+-n نامیده می شود. مشخصه دیگر ساختارهای p^+-n یا n^+-p اینست که ناحیه گذر بطور عمده به داخل ناحیه با ناخالصی سبک کشیده می شود. دارا بودن ناخالصی شدید در یک طرف پیوند برای بسیاری از قطعات عملی ویژگی مفیدی است که در بحث دیودهای سوئیچینگ و ترانزیستورها بررسی خواهد شد.
 به عنوان مثال یک نمونه Si با $N_d = 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ که بعنوان بستر برای یک پیوند کاشته شده یا نفوذ داده شده با ناخالصی نوع p از 10^{19} cm^{-3} تعداد n_p ، 10^5 برابر کمتر از p_n است.

$$I = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) (e^{qV/kT} - 1) = I_0 (e^{qV/kT} - 1)$$

بنابراین جریان بطور نمایی با گرانش مستقیم افزایش می یابد. وقتی V منفی است (گرانش معکوس) جمله نمایی به صفر نزدیک شده و جریان $-I_0$ است. این جریان تولیدی منفی، جریان اشباع معکوس نامیده می شود.

۵.۳.۲ تزریق باربرها

توزیعهای حالت گرایش
مستقیم و معکوس
پیوند $p^+ - n$:



Properties

$$N_a|_p \gg N_d|_n$$

$$p_p \gg n_n$$

$$n_p \ll p_n$$

$$\Delta n_p \ll \Delta p_n$$

$$x_{p0} \ll x_{n0}$$

$$Q_n \ll Q_p$$

$$I \approx I_p(x_n = 0) = qA \frac{D_p}{L_p} p_n (e^{qV/kT} - 1)$$

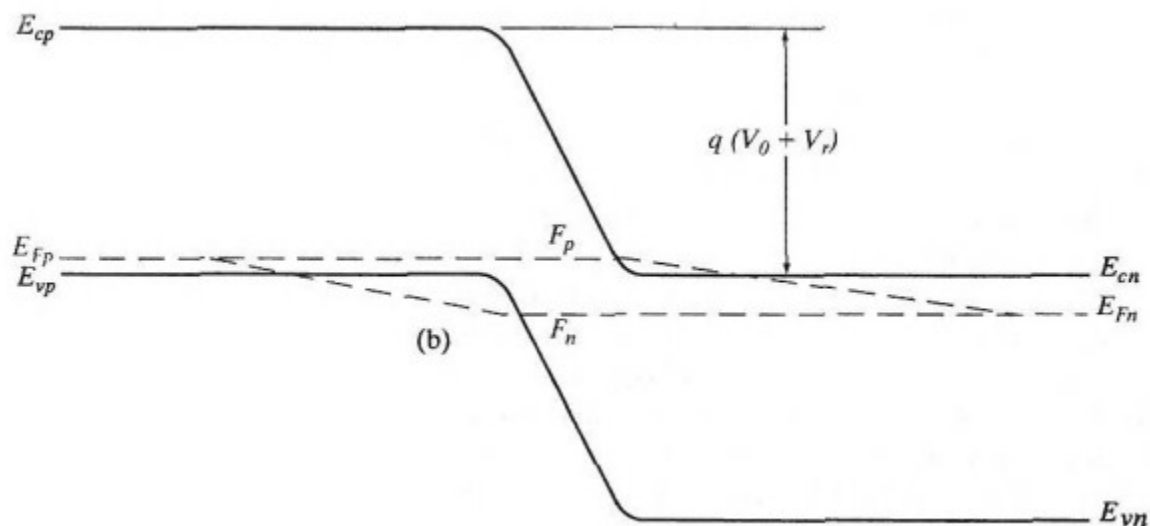
۵.۳.۲ تزریق باربرها

در گرایش معکوس داریم:

$$\Delta p_n = p_n (e^{q(-V_r)/kT} - 1) \approx -p_n \quad \text{for } V_r \gg kT/q$$

and similarly $\Delta n_p \approx -n_p$.

بنابر این در گرایش معکوس با بیش از چند دهه ولت، تراکم باربرهای اقلیت در هر یک از لبه های ناحیه گذر با نزدیک شدن تراکم اضافی به منفی مقدار تراکم حالت تعادل، اساساً صفر می شود.



۵.۳.۳ جریان باربرهای اقلیت و اکثریت

جریان باربرهای اقلیت و اکثریت پیوند pn

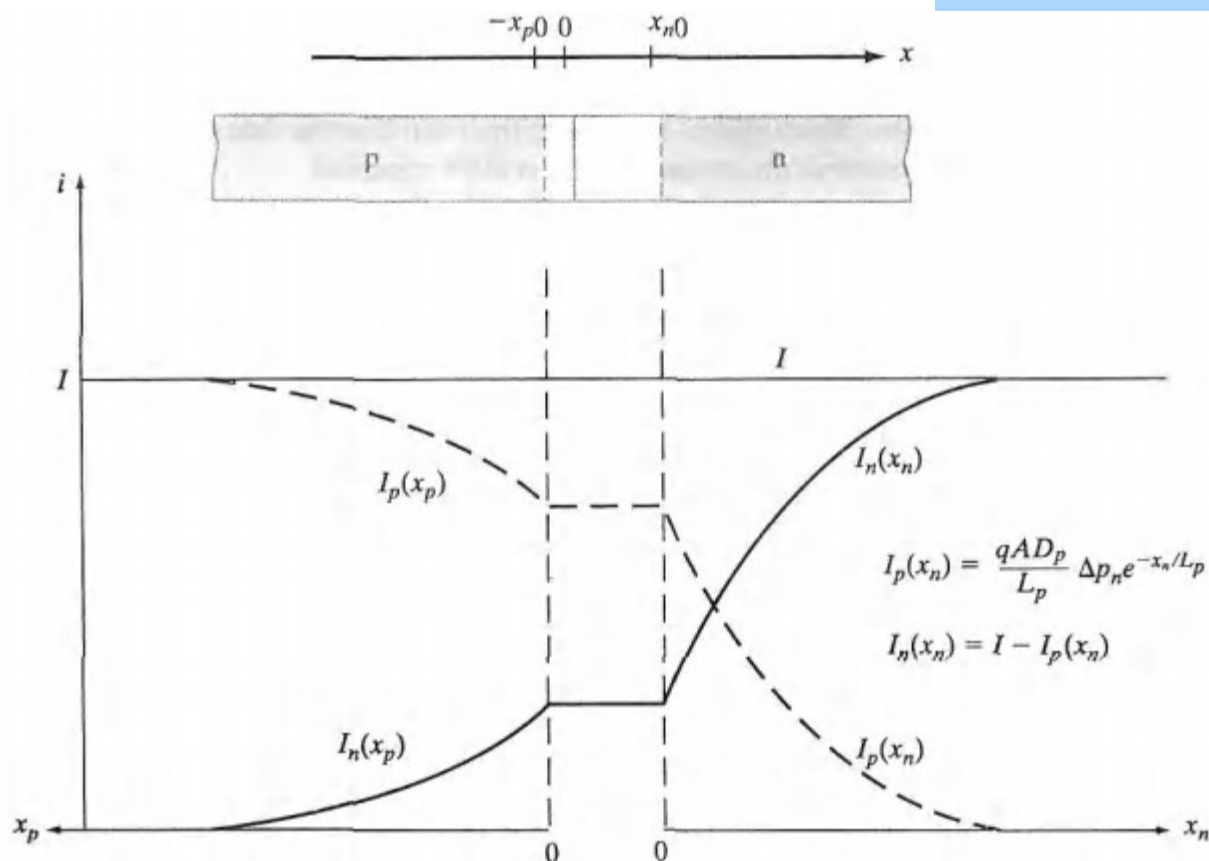


Figure 5-17

Electron and hole components of current in a forward-biased p-n junction. In this example, we have a higher injected minority hole current on the n-side than electron current on the p side because we have a lower n doping than p doping.

۵.۳.۳ جریان باربرهای اقلیت و اکثریت

جریان باربرهای اقلیت و اکثریت پیوند p^+n

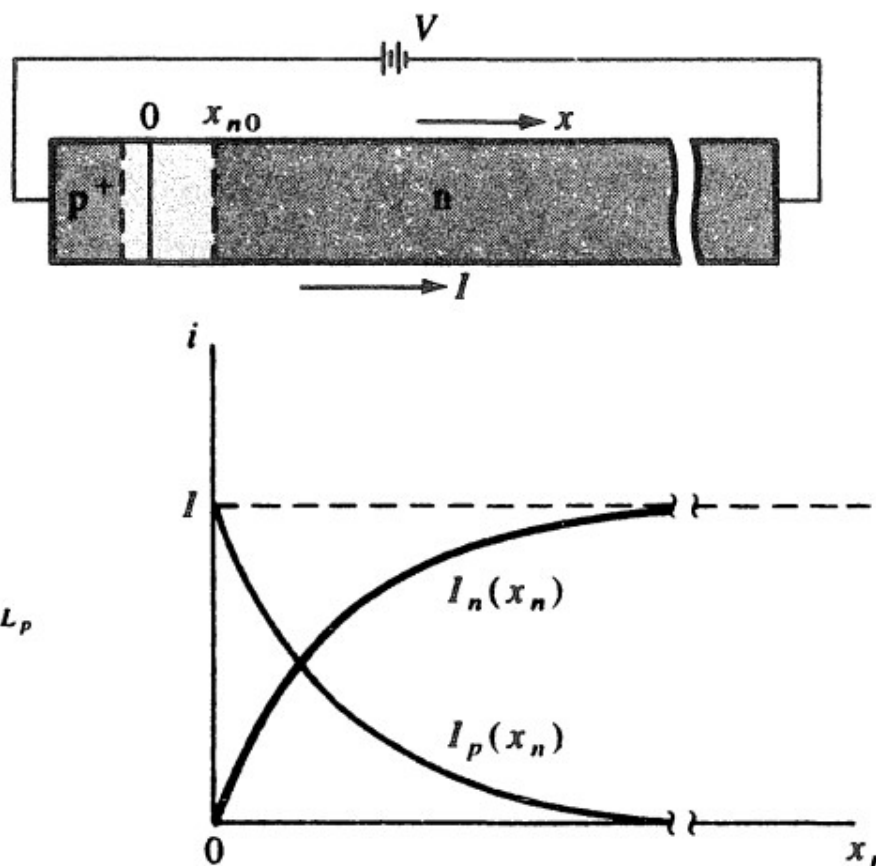


Figure 5-15
Electron and hole components of current in the n region of a forward-biased p^+n junction. In a p-n junction, electrons would also be injected across the junction, from n to p.

$$I_p(x_n) = \frac{qAD_p}{L_p} \Delta p_n e^{-x_n/L_p}$$

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

مثال ۱-

EXAMPLE 5-4 Find an expression for the electron current in the n-type material of a forward-biased p-n junction.

SOLUTION The total current is

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

The hole current on the n side is

$$I_p(x_n) = qA \frac{D_p}{L_p} p_n e^{-x_n/L_p} (e^{qV/kT} - 1)$$

Thus the electron current in the n material is

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

۵.۳.۳ جریان باربرهای اقلیت و اکثریت

مثال ۲-

An abrupt Si p-n junction ($A = 10^{-4} \text{ cm}^2$) has the following properties at 300 K:

EXAMPLE 5-4

<i>p</i> side	<i>n</i> side
$N_a = 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$N_d = 10^{15}$
$\tau_n = 0.1 \text{ } \mu\text{s}$	$\tau_p = 10 \text{ } \mu\text{s}$
$\mu_p = 200 \text{ cm}^2/\text{V-s}$	$\mu_n = 1300$
$\mu_n = 700$	$\mu_p = 450$

The junction is forward biased by 0.5 V. What is the forward current? What is the current at a reverse bias of -0.5 V ?

SOLUTION

$$I = qA \left(\frac{D_p}{L_p} p_n + \frac{D_n}{L_n} n_p \right) (e^{qV/kT} - 1) = I_0 (e^{qV/kT} - 1)$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{15}} = 2.25 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{17}} = 2.25 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

For minority carriers,

$$D_p = \frac{kT}{q} \mu_p = 0.0259 \times 450 = 11.66 \text{ cm}^2/\text{s on the n side}$$

$$D_n = \frac{kT}{q} \mu_n = 0.0259 \times 700 = 18.13 \text{ cm}^2/\text{s on the p side}$$

۵.۳.۳ جریان باربرهای اقلیت و اکثریت

ادامه مثال 2-

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p} = \sqrt{11.66 \times 10 \times 10^{-6}} = 1.08 \times 10^{-2} \text{ cm}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{18.13 \times 0.1 \times 10^{-6}} = 1.35 \times 10^{-3} \text{ cm}$$

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

$$= 1.6 \times 10^{-19} \times 0.0001 \left(\frac{11.66}{0.0108} 2.25 \times 10^5 + \frac{18.13}{0.00135} 2.25 \times 10^3 \right)$$

$$= 4.370 \times 10^{-15} \text{ A}$$

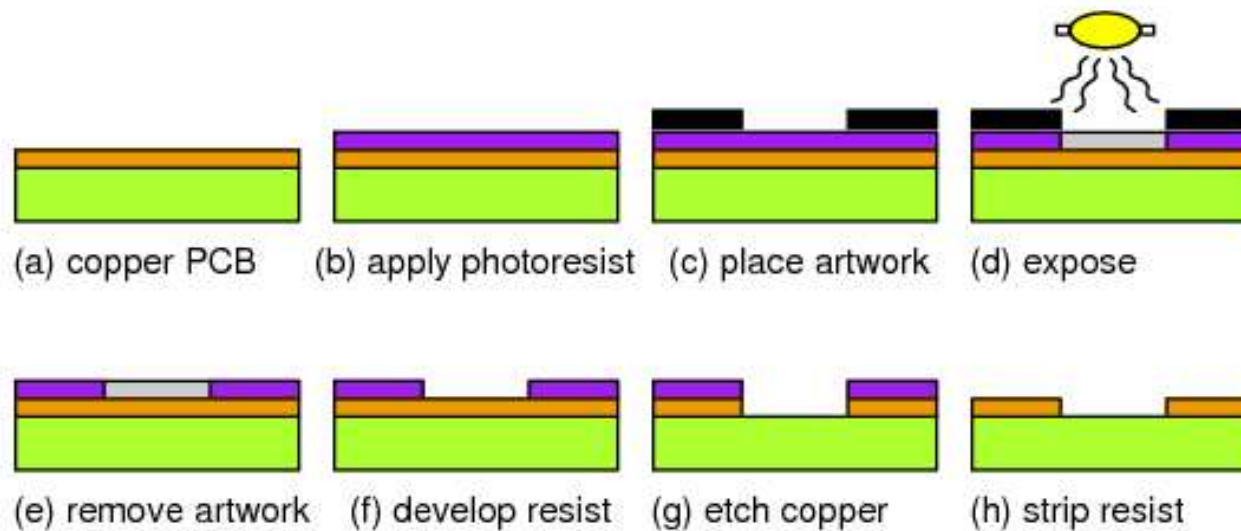
$$I = I_0 (e^{0.5/0.0259} - 1) \approx \mathbf{1.058 \times 10^{-6} \text{ A}}$$
 in forward bias.

$$I = -I_0 = \mathbf{-4.37 \times 10^{-15} \text{ A}}$$
 in reverse bias.

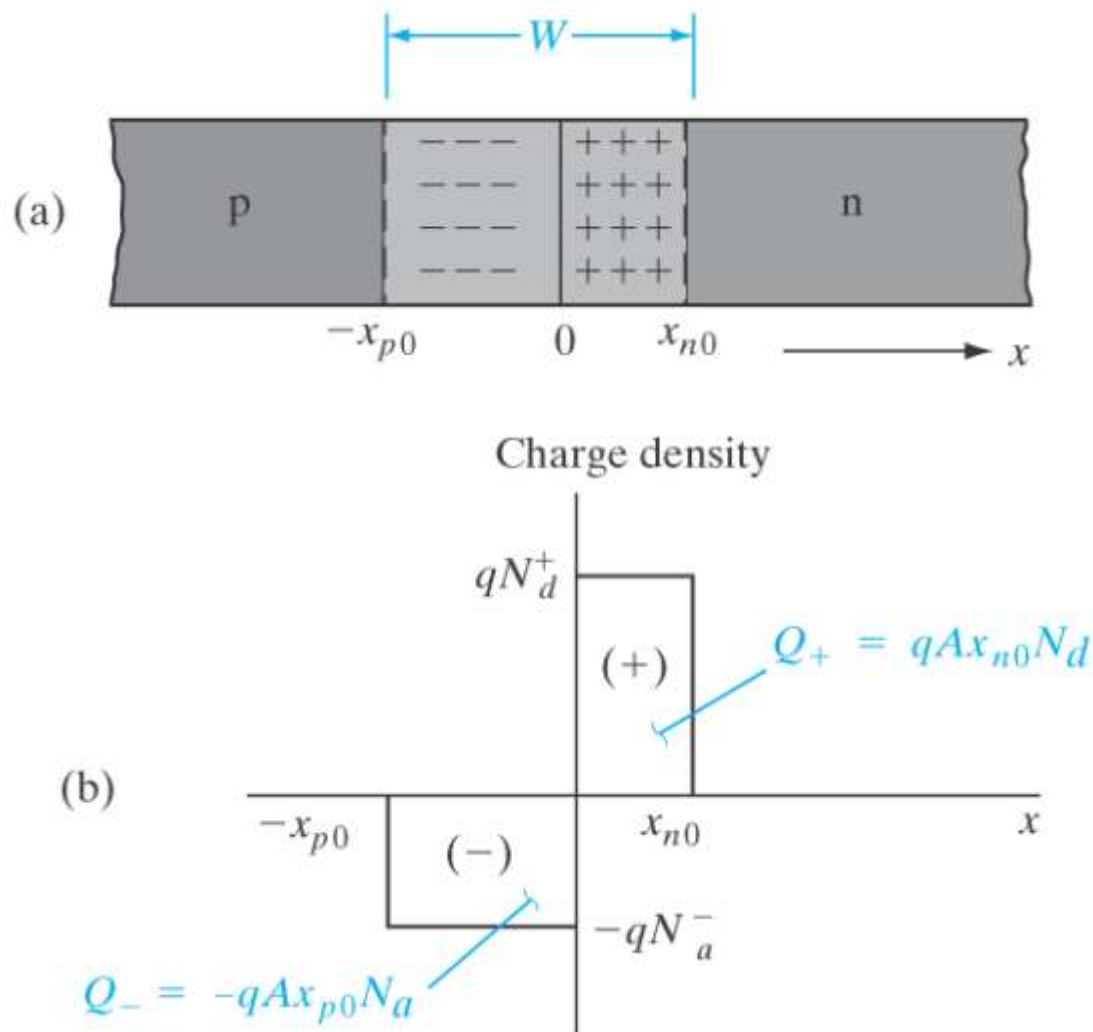
۵.۴ شکست گرایش معکوس



فوتولیتوگرافی در طراحی PCB:

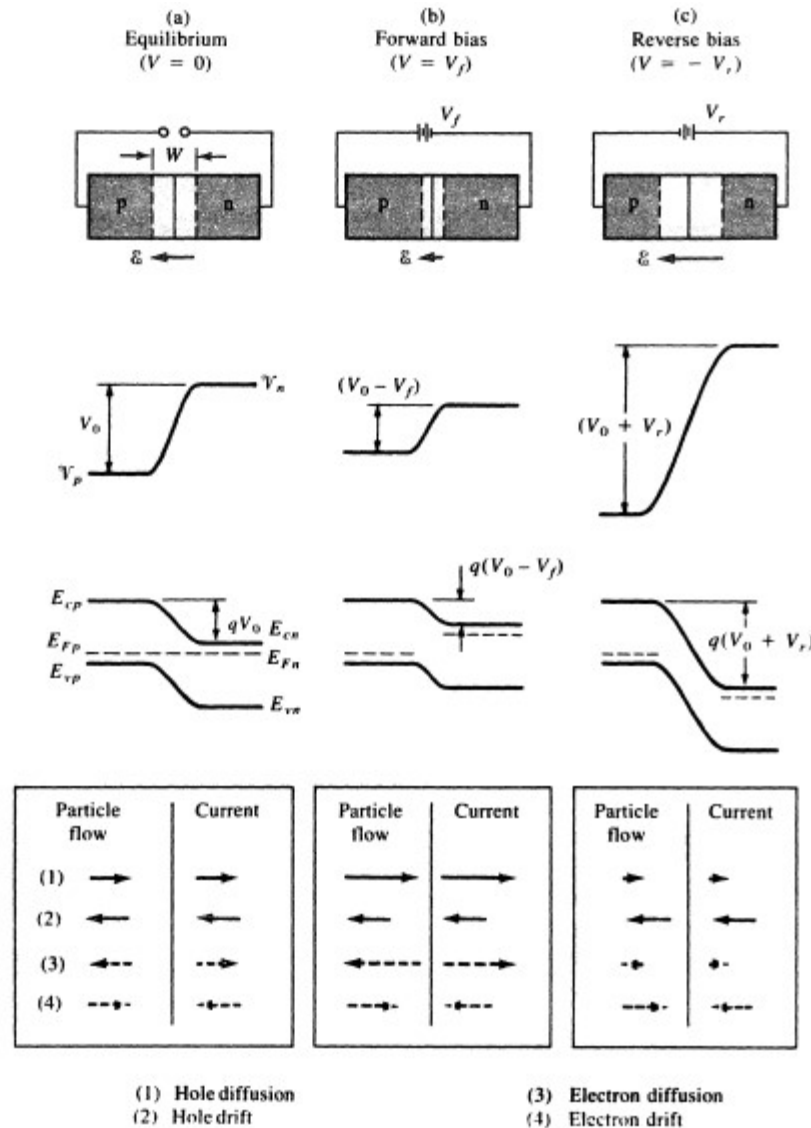


Processing of copper printed circuit boards is similar to the photo lithographic steps of semiconductor processing.



۵.۳ گرایش مستقیم و معکوس پیوندها، شرایط پایدار

Figure 5-10
Effects of a bias at a p-n junction; transition region width and electric field, electrostatic potential, energy band diagram, and particle flow and current directions within W for (a) equilibrium, (b) forward bias, and (c) reverse bias.



۵.۳ گرایش مستقیم و معکوس پیوندها، شرایط پایدار

