جزوه درس فیزیک الکترونیک

دکتر کردرستمی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد یوشهر

پاییز ۱۳۹۰

فیزیک الکترونیک — بنام خدا — جلسه اول — ۱۳۹۰/۷/۱۴

1

Solid state Electronic Devices

کتاب: فیزیک الکترونیک — استریت من

فهرست مطالب

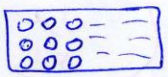
- نیمه هادی ها
- doping
- محاسبه چگالی حامل ها
- پیوند P-N (دیود)
- ترانزیستور BJT و MOSFET
- optoelectronics

شبکه کریستالی (crystal lattice):

جامدات از نظر شبکه اتمی به سه دسته تقسیم می شوند:

① شبکه کریستالی crystalline lattice
② جامدات بی شکل amorphous solids
③ جامدات چند کریستالی Polycrystalline solids

کریستالی: اتم ها در کنار هم از نظم تکرار شونده ای برخوردارند.



بی شکل: اتم ها هیچ نظمی ندارند

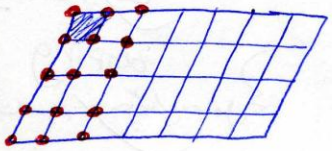
چند کریستالی: اتم ها در حوزه های مختلف دارای نظم های کریستالی متفاوتی هستند.

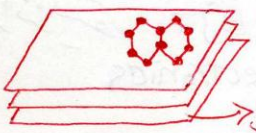
نیمه هادی ها دارای شبکه کریستالی هستند.

سلول واحد (unit cell):

از کنار هم قرار دادن سلول واحد می‌توان کل شبکه کریستالی را ایجاد نمود.

مثال: شبکه کریستالی دوبعدی





معمولاً کوچکترین سلول واحد را در نظر گرفته و آن را سلول اولیه (premitive cell) می‌نامیم

شبکه های مکعبی (cubic lattice):

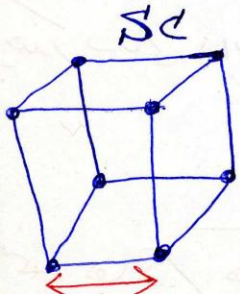
سلول واحد آن مکعبی است.

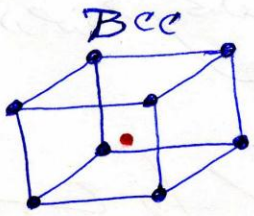
سلول واحد مکعبی:

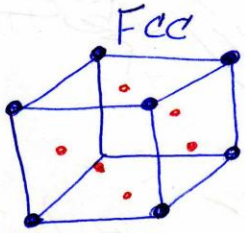
(۱) (Sc) Simple Cubic

(۲) (BCC) Body centered cubic

(۳) (FCC) Face centred Cubic







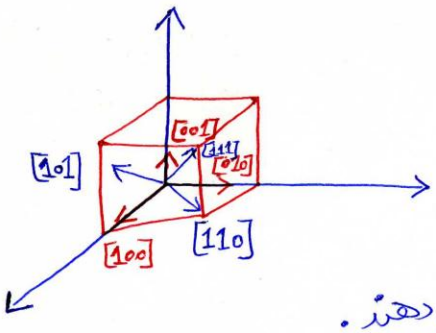
نزدیکترین همسایگی Nearest neighbor distance :

کوچکترین فاصله بین دو اتم از سلول واحد را نزدیکترین همسایگی می نامند.

طول ضلع سلول واحد را ثابت شبکه (lattice constant) می گویند. (a)

شبکه	نزدیکترین همسایگی
SC	a
Bcc	$\frac{\sqrt{3}a}{2}$
FCC	$\frac{\sqrt{2}a}{2}$

جهت های کریستالی :



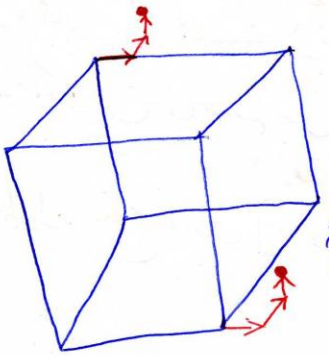
جهت های کریستالی [100] و [010] و [001] مشابه هستند و آنها را با <100> نشان می دهند.

$$\left.\begin{matrix}[110]\\[011]\\[101]\end{matrix}\right\} \langle 110\rangle$$

شبکه الماسی : Diamond lattice

Si و Ge دارای شبکه کریستالی الماسی هستند.

شبکه الماسی را می توان به صورت یک شبکه FCC در نظر گرفت که با از هر اتم آن یک اتم دیگر در فاصله $\frac{\hat{a}x}{4}+\frac{\hat{a}y}{4}+\frac{\hat{a}z}{4}$ از آن قرار گرفته است.



به این ترتیب ۴ اتم دیگر علاوه بر اتم‌های FCC درون مکعب قرار می‌گیرند. یعنی سلول واحد این‌چنین FCC است که ۴ اتم دیگر درون آن قرار دارند.

در نیم‌هادی‌های مرکب مثل GaAs اتم‌های Ga جای اتم‌های FCC قرار دارند و چهار اتم داخلی اتم‌های As است.

فیزیک الکترونیک — بنام خدا — جلسه دوم — ۹۰/۷/۲۱ (3)

Steve Jobs

روش تهیه Si :

Si در طبیعت به صورت SiO_2 وجود دارد.

$SiO_2 \rightarrow Si \rightarrow Si$

Si ↓ MGS — Si ↓ EGS

(Metallurgical Grade Si)

دارای ناخالصی های فلزات

EGS → Electronic Grade Si

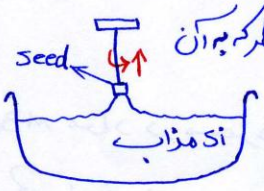
دارای خلوص مناسب برای کاربری الکترونیکی

EGS تک کریستالی نیست و بصورت چند کریستالی است.

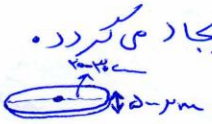
روش زخوالسکی (Czochralski)

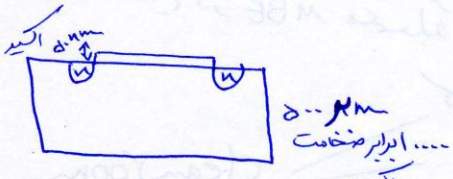
برای تبدیل EGS به سیلیکن تک کریستالی از این روش استفاده می‌شود.

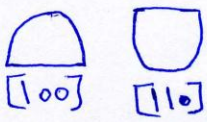
با نزدیک کردن قطعه Si تک کریستالی با جهت کریستالی مورد نظر که به آن seed می‌گویند به Si مذاب به آهستگی مولکول های Si مذاب به seed چسبیده و جامد می‌شوند. به این ترتیب و در مدت زمان کشش Si با همان جهت کریستالی seed به بیرون می‌آید.



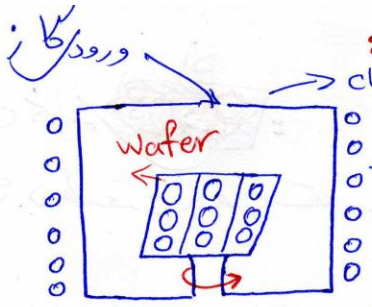
با برش دادن شمش Si تک کریستال بصورت صفحات دایره‌ای خیلی نازک، ویفر (Wafer) ایجاد می‌گردد.







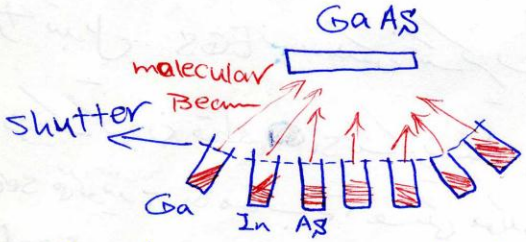
لایه نشانی حالت بخار : Vapor-phase-Epitaxy



ماده مورد نظر برای لایه نشانی بصورت گاز وارد Chamber می شود. به دلیل دمای بالای داخل Chamber در سطح ویفر واکنش شیمیایی رخ داده و لایه مورد نظر روی سطح ویفر ایجاد می گردد.

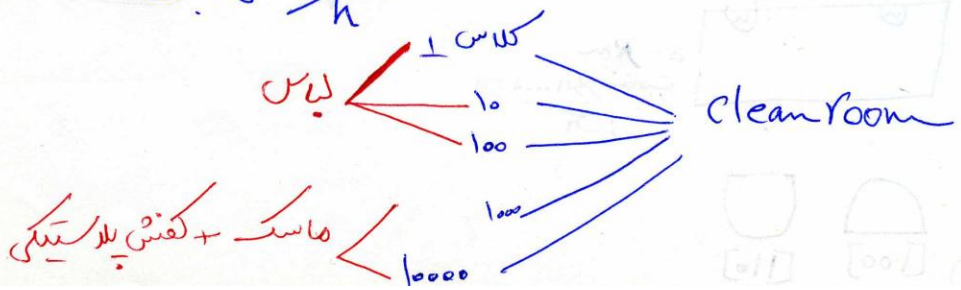
لایه نشانی پرتو مولکولی (MBE) : Molecular Beam Epitaxy

MBE قادر به ایجاد لایه های نازک تر در دماهای پایین تر در مقایسه با VPE می باشد.



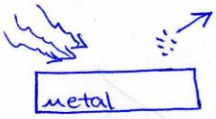
در MBE مواد در مخزن هایی قرار دارند که حرارت داده می شوند و به صورت گاز در می آیند. دریچه ای در این مخازن (shutter) می تواند بسیار دقیق مقدار خیلی کمی از یک گاز را آزاد کند تا روی ویفر تشکیل لایه دهد.

سرعت رشد لایه در MBE معمولاً کمتر از $\frac{1\mu m}{h}$ می باشد

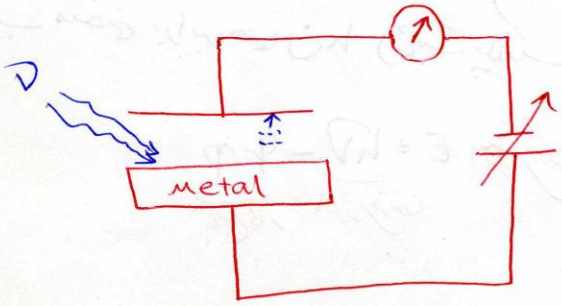


مقدمه ای بر کوانتوم : Quantum

The photoelectric effect اثر فوتوالکتریک



با تابیدن موج الکترومغناطیس از فرکانس های خاصی از سطح فلز الکترون خارج می شود



انرژی الکترونی که در پتانسیل B متوقف می شود برابر است با $E = qV$ (ev)

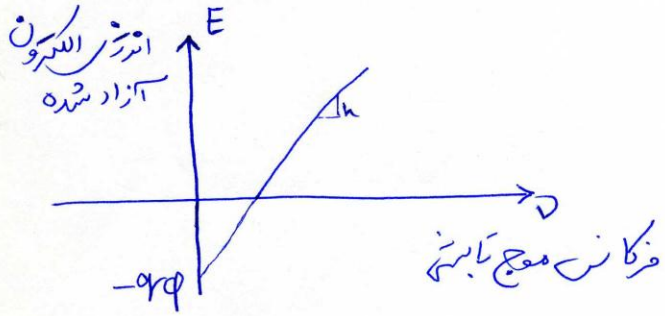
$q = 1,6 \times 10^{-19}\ C$

$1ev = 1,6 \times 10^{-19}\ J$

ایستیشین با تغییر ولتاژ اعمالی جریان را به صفر رساند به این ترتیب انرژی الکترونها را به دست آورد.

V_0 پتانسیلی است که جریان در آن صفر می شود.

$E = qV$



تراز خلاء میزان انرژی است که اگر الکترون به آن انرژی دهیم، می تواند از سطح ماده بیرون بپرد و آزاد شود.

Vacuum level تراز خلاء

الکترونهای لایه ظرفیت در فلز

حداقل انرژی لازم برای کنده شدن الکترون ها از فلز را تابع کار می گویند.

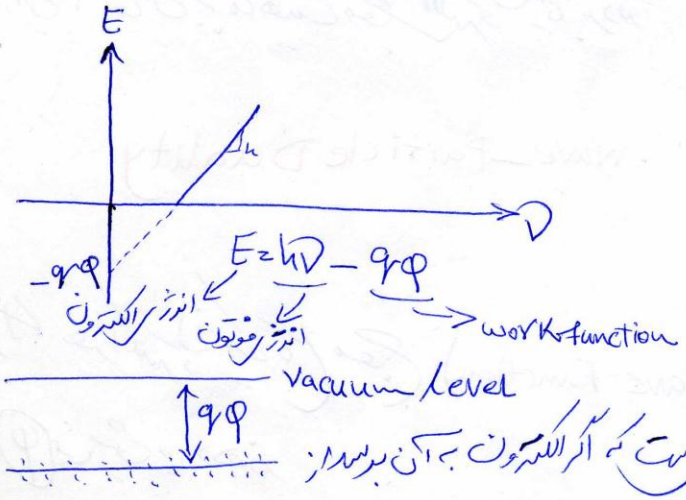
تابع کار $\varphi[V]$ یا $\varphi[eV]$

اینیشتین مشاهده کرد در فرکانس های پایین الکترون ها آزاد نمی شوند.
ولی از فرکانسی به بعد با افزایش ν انرژی الکترون های آزاد شده افزایش می یابد
شیب منحنی برابر همان h (ثابت پلانک) به دست می آید.

$h = 6/63 \times 10^{-34}\ J/s$

$E = h\nu - \varphi$ انرژی الکترون — انرژی فوتون — تابع کار

کوانتم

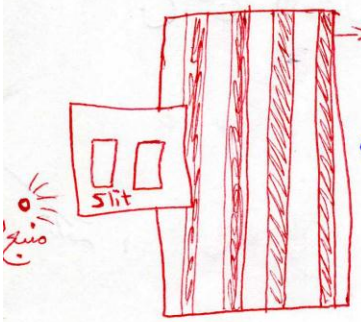


تراز خلاء میزان انرژی است که اگر الکترون به آن برسد از ماده جدا می‌شود

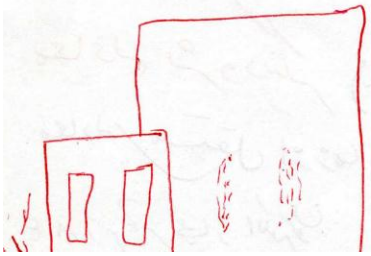
بنابراین ایده‌ی ماهیت کوانتمی نور مطرح گردید و گفته شد که می‌توان نور را بصورت انرژی‌های جدا جدا فوتون در نظر گرفت.

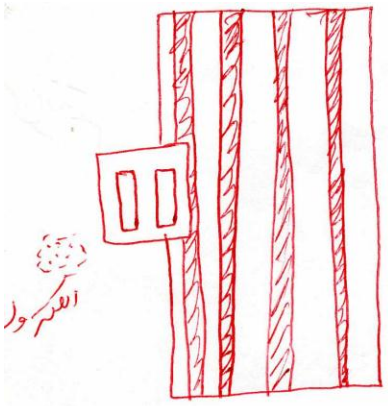
$E = h\nu$ انرژی فوتون
h ثابت پلانک
ν فرکانس موج الکترومغناطیسی

آزمایش two-slit Experiment
شکاف-دوز



ماهیت موجی نور و تداخل دو موج روی صفحه‌ی آشکارساز ما این پدیده را توجیه می‌کند.





ازاین آزمایش به ماهیت موجی الکترون پی بردند

Wave_Particle Duality

برای هر الکترون یک تابع موج (Wave Function) در نظر می‌گیرند و آن را معمولاً با ψ نمایش می‌دهند

احتمال یافتن یک الکترون با تابع موج $\psi(x,y,z)$ در حجم $dxdydz$ از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\int_{z_1}^{z_2}\int_{y_1}^{y_2}\int_{x_1}^{x_2} \psi\psi^*(x,y,z)\, dx\, dy\, dz$$

مثلاً تابع موج الکترون آزاد یک بعدی در خلأ بصورت زیر است:

$$\psi(x) = Ae^{ikx}$$

نکته:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi\psi^*\, dxdydz = 1$$

معادله شرودینگر (Schrödinger Equation)

معادله مستقل از زمان شرودینگر بصورت زیر می‌باشد:

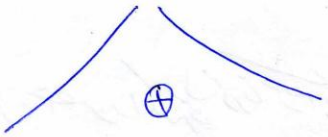
$$-\frac{\hbar}{2m}\nabla^2\psi + V\psi = E\psi$$

E انرژی مجاز الکترون

V پتانسیل سیستم

$$k = \frac{h}{p}$$

$$\nabla^2 = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$$



$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}$ معادله‌ی شرودینگر تابع موج الکترون را در یک سیستم با پتانسیل مشخص به ما می‌دهد. همچنین انرژی مجاز الکترون نیز از آن به دست می‌آید.

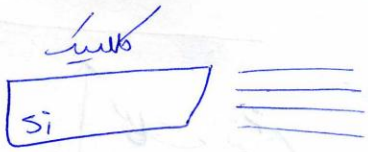
ورودی معادله‌ی شرودینگر پتانسیل سیستم است.

منظور از انرژی مجاز این است که الکترون در سیستم چه انرژی‌هایی می‌تواند داشته باشد. برخلاف دنیای کلاسیک که انرژی‌ها پیوسته هستند، در کوانتم انرژی‌ها گسسته هستند.

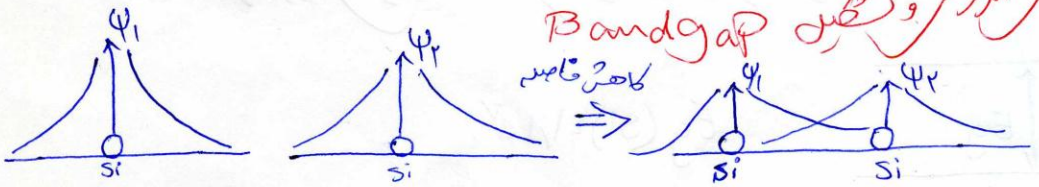
خطوط انرژی مجاز: E_1, E_2, E_3

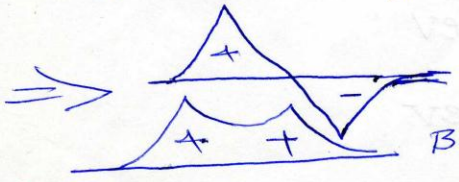
Confinement

کلاسیک



باندهای انرژی و تشکیل Bandgap





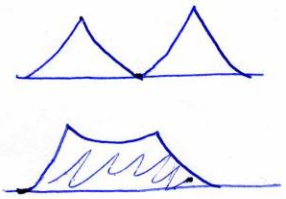
Anti bonding energy level

Bonding energy level

Bond پیوند

Band نوار

Bound محدود کردن

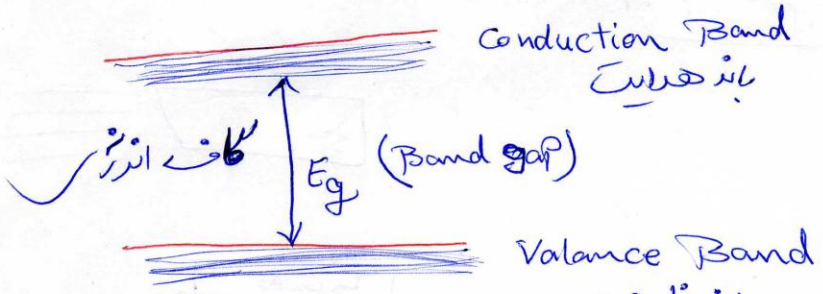
$|\psi|^2 \Rightarrow$ 

احتمال حضور الکترون در ناحیه بین دو اتم با انرژی Bonding بیشتر است.

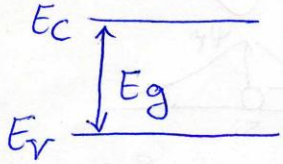
در واقع تراز Bonding (پیوند) همان انرژی الکترون هایی است که به اشتراک گذاشته شده در پیوند کووالانسی می باشد.

در یک نمونه سیلیسیم تعداد خیلی زیادی پیوند Si-Si وجود دارد.

هر دو اتم Si که پیوند ایجاد می کنند الکترون های پیوند دو انرژی خواهند داشت اما این انرژی ها برای همه پیوند ها یکسان نیست و اندکی متفاوت است بنابراین می توان گفت که الکترون ها در کل ماده Si حالت دو باند (نوار) انرژی مجاز می باشند.



ناحیه ممنوعه از نظر انرژی بین باند هدایت و ظرفیت را Bandgap می گویند.

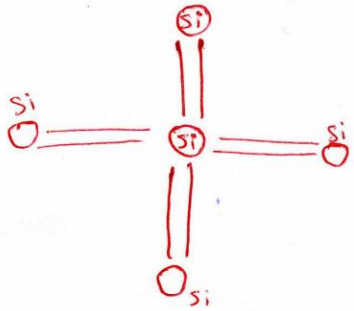


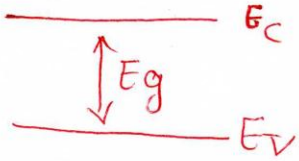
$E_g(Si) = 1,1 eV$

$E_g(Ge) = 0,78 eV$

$E_g(GAAs) = 1,43 eV$

مدل اتمی و مدل انرژی





E_g حداقل انرژی لازم است که اگر به الکترون داده شود از پیوند آزاد شده و می‌تواند در کل جابجا شود.

انرژی الکترون در پیوند E_V می‌باشد.

الکترون آزاد شده از پیوند از نظر انرژی از E_V به E_C منتقل شده است.

در صفر کلوین، الکترون‌ها هیچ انرژی برای آزاد شدن از پیوند ندارند.

از آنجا که برای هدایت الکتریکی به جابجایی الکترون‌ها در ماده نیاز است.

در صفر کلوین هیچ الکترون آزادی نداریم نتیجه می‌گیریم در $0^\circ K$ ماده Si مانند یک عایق عمل می‌کند.

در این حالت باند ظرفیت پر از الکترون است و باند هدایت کاملاً خالی است.

با افزایش دما تعدادی از الکترون‌ها می‌توانند انرژی بدست آورده (thermal energy) و به E_g غلبه کنند و آزاد شوند (از E_V به E_C منتقل شوند) و در هدایت شرکت کنند.

در نتیجه در دماهای بالاتر مقاومت Si کاهش می‌یابد.

مقایسه E_g در نارسانا و نیمرسانا و فلز

عایق — E_C

$E_g = 10eV$

نیمه‌رسانا

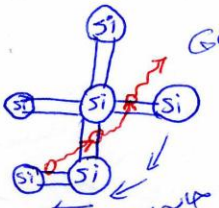
$E_g = 1.1eV$

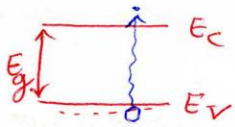
فلز

$E_g = 0$

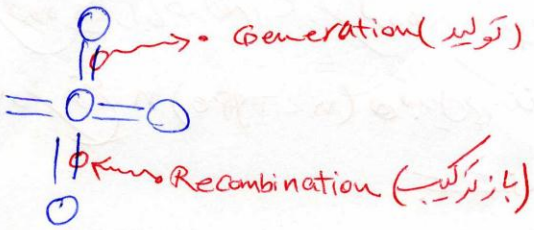
$E_C E_V$

مفهوم حفره (hole)





با آزاد شدن هر الکترون، یک پیوند ناقص می‌گردد.
جای خالی الکترون در پیوند را حفره می‌نامیم و آنرا مانند ذره‌ای با بار $+q$ در نظر می‌گیریم.
انتقال الکترون بین پیوندهای مجاور عامل جابجایی حفره است.
با آزاد شدن هر الکترون نیز یک حفره ایجاد می‌گردد.
الکترون آزاد می‌تواند با حفره ترکیب شود و یک پیوند کامل ایجاد کند. در این فرآیند هر دو الکترون آزاد و حفره از بین می‌روند.



EHP = Electron — Hole Pair زوج الکترون_حفره

بنابراین در یک نیمه‌هادی خالص (ذاتی) (Intrinsic)، تعداد الکترون‌ها و حفره‌ها در واحد حجم با هم برابر است.

$n = p = n_i$

تعداد الکترون‌های آزاد در واحد حجم (کنترل) n حاملی (غلظت) الکترون‌ها
تعداد حفره‌ها ..... p ..... حفره‌ها

charge carrier: حامل

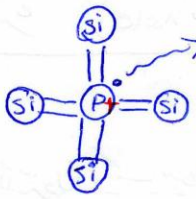
n_i حاملی هادی‌های ذاتی (به E_g و دما بستگی دارد)
n_i تعداد حفره‌ها (الکترون‌ها) در واحد حجم در نیمه‌هادی خالص

تعداد اتم‌های سیلیسیم در واحد حجم $= 10^{22}\ cm^{-3}$

$$n_i(Si)\Big|_{T=300^\circ K} = 1.5 \times 10^{10}\ cm^{-3}$$

از آنجا که هدایت نیمه‌هادی‌ها به چگالی الکترون‌ها و حفره‌ها بستگی دارد و در دماهای اتاق در Si، این تعداد در مقایسه با چگالی اتم‌ها اندک است، هدایت Si در $T=300^\circ K$ مناسبی ندارد.

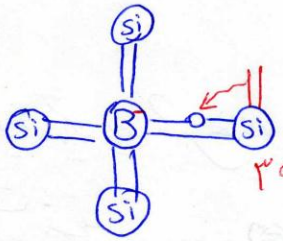
افزودن ناخالصی - نیمه‌رسانای (Doping)



اتم‌های گروه ۵ مثل P، As، Sb می‌توانند با قرار گرفتن به جای نقص آرایش آنیمون یک اتم Si چهار الکترون لایه ظرفیت خود را در پیوند شرکت دهند اما الکترون پنجم لایه ظرفیت آنها برای حرکت و یا بدست آوردن انرژی کمی می‌تواند آزاد شود. یعنی می‌توان ادعا نمود به ازای هر اتم ناخالصی گروه ۵ یک الکترون آزاد به نیمه‌هادی اضافه می‌شود.

اتم‌های گروه ۵ را ناخالصی گروه n می‌گویند و اضافه کردن آنها نیمه‌رسانای ذاتی را به نیمه‌هادی نوع n (n-Type) تبدیل می‌کنند.

n-Type Impurity = Donor بخشنده



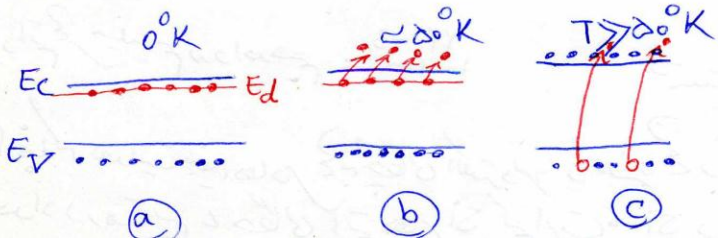
اتم‌های گروه ۳ مثل B، Al، In، Ga می‌توانند یک حفره به شبکه اتمی اضافه نمایند

یک حفره = هر اتم ناخالصی گروه ۳

P-Type Impurity = acceptor پذیرنده

اتم ناخالصی نوع n با آزاد کردن الکترون خود به یون ⊕ تبدیل می‌شود و اتم ناخالصی نوع P با جابجایی حفره (دریافت الکترون) به یون ⊖ تبدیل می‌شود.

مدل انرژی doping:



(9)

(a

$0^\circ K$ — الکترون‌های اتم‌های ناخالصی در تقید هسته اتم خود هستند (E_d)

الکترون‌های پیوندی در تقید پیوند هستند (E_v)

هیچ الکترون آزادی وجود ندارد.

$n > P$

b) حتی در دماهای پایین حدود $50^\circ K$ الکترون‌های ناخالصی آزاد می‌شوند. (E_c تا E_d)

c) در دماهای بالاتر الکترون‌های پیوندی نیز می‌توانند آزاد شوند. (از E_c تا E_v بروند)

چگالی الکترون‌های آزاد؟

N_D تعداد اتم‌های ناخالصی نوع n در واحد حجم

N_A ..... p .....

a) $n = 0$ b) $n = N_D$ c) $n > n_D$

$N_D \gg n_i \Rightarrow n \simeq N_D$

$T = 0^\circ K$ $T < 50^\circ K$ $T \gg 50^\circ K$

E_c E_d E_v

نیمه‌رسانای نوع P

$P > n$

a) هیچ الکترون آزادی وجود ندارد امّا اندکی مجاز جدیدی نزدیک E_v ایجاد شده که خالی است.

b) به تعداد اتم‌های ناخالصی در E_v حفره ایجاد می‌شود (الکترون‌ها حفره‌های اتم‌های ناخالصی را پر می‌کنند.

c) در دماهای بالاتر علاوه بر اتم‌های ناخالصی، حفره‌های ذاتی si نیز بوجود می‌آیند.

چگالی حفره‌های آزاد:

a) $P = 0$

$n = P = n_i$

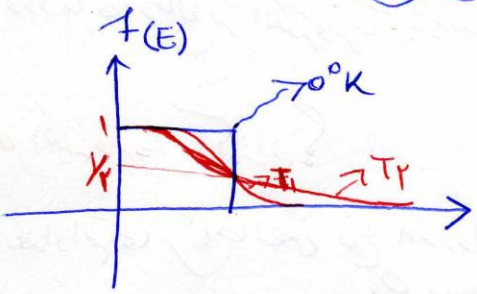
b) $P = N_A$

c) $P > N_A$ if $n_A \gg n_i \Rightarrow P = N_A$

Fermi Distribution Function تابع توزیع فرمی

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_F)/KT}}$$

تابع توزیع فرمی احتمال اشغال تراز انرژی E را در دمای T نشان می‌دهد.
با این ترکیب می‌توان توزیع الکترون‌ها روی انرژی‌های مختلف را بدست آورد.



E_F = انرژی فرمی (تراز فرمی)

احتمال اشغال E_F برابر $1/2$ است. $F(E_F) = 1/2$

$T = 0°K$ $\quad F(E)\big|_{E<E_f} = 1$

$F(E)\big|_{E>E_f} = 0$

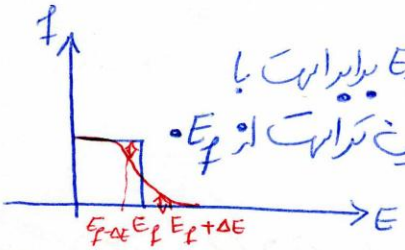
$F(E)$ = احتمال وجود الکترون در انرژی E

$1 - F(E)$ = احتمال خالی بودن انرژی E
(احتمال وجود حفره در انرژی E)

ادامه‌ی تابع توزیع فرمی:

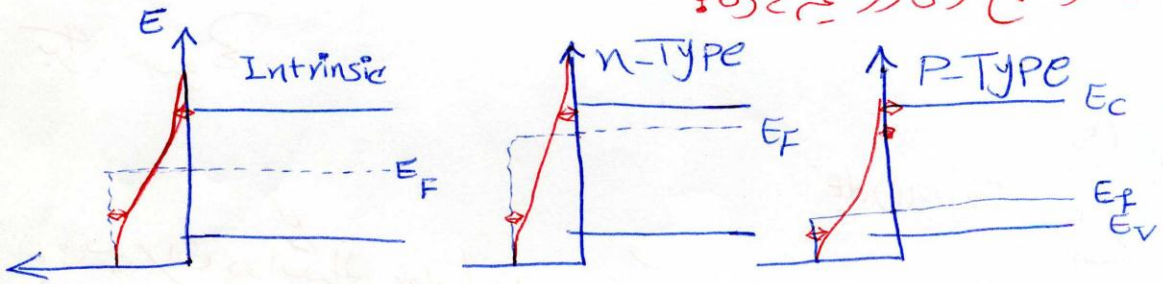
نکته: تابع توزیع فرمی نسبت به تراز فرمی متقارن است.

$$f(E_f+\Delta E) = 1 - f(E_f-\Delta E)$$



احتمال اشغال تراز انرژی به اندازه‌ی ΔE بالاتر از E_f برابر است با احتمال خالی بودن تراز انرژی به اندازه‌ی ΔE پایین‌تر از E_f.

استفاده از تابع فرمی در نیمه‌رسانا:

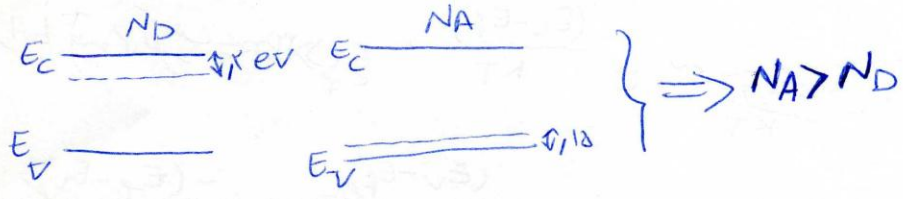


احتمال وجود الکترون در باند هدایت
=
احتمال وجود حفره در باند ظرفیت

هرچه doping نوع n افزایش یابد، فاصله E_C-E_F کمتر می‌شود.

هرچه doping نوع p افزایش یابد، E_f-E_V کمتر می‌شود.

سوال ۹:



محاسبه n و p

چگالی الکترون‌ها باند هدایت در حالت تعادل از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$n = \int_{E_C}^{\infty} \underbrace{F(E)}_{\text{تابع توزیع فرمی}} \underbrace{N(E)}_{\text{چگالی تراکم انرژی}} dE$$

Density of States (DOS)

$N(E)\,dE$: چگالی تراکم انرژی را در واحد حجم در محدوده انرژی dE را به ما می‌دهد

برای حفره‌ها:

$$P = \int_{-\infty}^{E_V} [1 - f(E)] N(E) dE$$

با محاسبه این دو انتگرال روابط زیر بدست می‌آید

$n = N_C F(E_C)$ در باند هدایت N_C

$P = N_V [1 - P(E_V)]$ در باند ظرفیت N_V

} Effective DOS

تقریب تابع توزیع فرمی:

$$f(E_C) = \frac{1}{1 + e^{\frac{(E_C - E_f)}{KT}}} \simeq e^{-\frac{(E_C - E_f)}{KT}}$$

شرایط قبولی تقریب $E_C - E_f \gg 3KT$

$$1 - f(E_V) = 1 - \frac{1}{1 + e^{\frac{(E_V - E_f)}{KT}}} = \frac{e^{(E_V - E_f)/KT}}{1 + e^{(E_V - E_f)/KT}} \simeq e^{-(E_f - E_V)/KT}$$

شرط قبولی تقریب $E_f - E_V \gg 3KT$

$KT = 0.0259\,eV \approx 26\,meV$

$\frac{KT}{q} = 0.0259\,V \simeq 26\,mV$

$n = n_c e^{-(E_c - E_f)/KT}$

$P = n_v e^{-(E_f - E_v)/KT}$

سوال: رابطه‌ای برای n_i بدست آورید.

حل:

ذرات هادر ذاتی داریم $\Leftarrow n = p = n_i$

بنابراین $\frac{E_g}{2} = E_f - E_v = E_c - E_f$

$n = n_i = n_c e^{-E_g/2KT}$

$P = n_i = n_v e^{-E_g/2KT}$

$P.n = n_i^2 = n_c n_v e^{-E_g/KT}$

$n_i = \sqrt{n_c n_v}\, e^{-E_g/2KT}$

n و P در n_i ضرب شده

$nP = n_i^2$

رابطه برای نیمه‌هادی ذاتی و هم غیرذاتی صادق است

روابط دیگر $\Leftarrow$

$n = n_i e^{(E_f - E_i)/KT}$

$P = n_i e^{(E_i - E_f)/KT}$

در نیمه‌رسانای ذاتی (همیشه وسط E_g در نظر می‌گیریم.

سوال:

n-Type

E_f

E_i

$n > P$

P-Type

E_i

E_f

$P > n$

خاصیت E_i و E_f معیاری از چگونگی حامل‌هاست.

مثال: یک نمونه Si با غلظت 10^{17} اتم dope AS شده است. چگالی حفره ها در حالت تعادل در دمای $300^{\circ}K$ چقدر است؟

حل: نمونه از نوع n است.

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

$N_D \gg n_i \Rightarrow n \simeq N_D$

$N_D = 10^{17} cm^{-3} \gg n_i = 1.5 \times 10^{10} cm^{-3}$

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

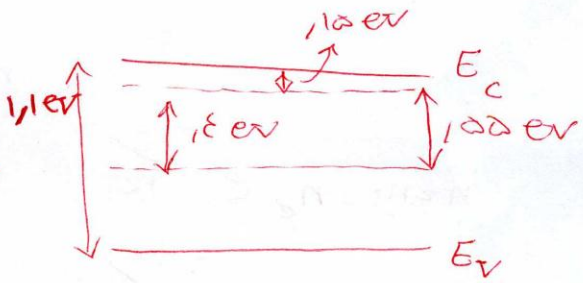
$np = n_i^2 \qquad 10^{17} p = 2.25 \times 10^{20} \Rightarrow p = 2.25 \times 10^{3}$

Bands را رسم کنید.

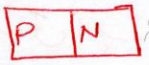
$p = n_i e^{(E_i - E_f)/KT}$

$E_i - E_f = KT \ln\left(\frac{p}{n_i}\right)$

$E_i - E_f = 26 mev \ln\left(\frac{2.25 \times 10^{3}}{1.5 \times 10^{10}}\right) = 0.4 ev$



مثال: در یک دیود میزان ناخالصی ناحیه n برابر $10^{18} cm^{-3}$ و ناحیه p برابر $10^{14} cm^{-3}$ می باشد. چگالی الکترون ها و حفره ها را در تعادل حساب کنید. مقادیر N_C و N_V را حساب کنید.



P_TYPE: $N_A = 10^{14} cm^{-3} \gg n_i \Rightarrow p \simeq 10^{14} cm^{-3}$

$n = \frac{n_i^2}{p} = \frac{(1.5 \times 10^{10})^2}{10^{14}} = 2.25 \times 10^{6}$

$E_f - E_i = KT \ln \frac{n}{n_i} = 0.026 \ln\left(\frac{2.25 \times 10^{6}}{1.5 \times 10^{10}}\right) = -0.236$

$E_c - E_f = 0.89 ev$

$p = N_V e^{-(E_f - E_V)/KT} \qquad N_C = ?$

$10^{14} = N_V e^{\frac{-(0.21)}{0.026}} \Rightarrow N_V = 10^{14} e^{\frac{0.21}{0.026}} = 3027.44 \times 10^{14} = 3.02 \times 10^{19} cm^{-3}$

مثال:

میزان دوپینگ یک نوع n

$$n = n_i e^{(E_F - E_i)/KT}$$

$$E_F - E_i = \frac{11}{2} ev - 1.2 ev = 0.35 ev$$

$$n = (1.5 \times 10^{10} cm^{-3}) e^{\left(\frac{0.35}{0.026}\right)} \simeq 10^{14} cm^{-3}$$

بار الکتریکی:

طور کلی در نیمه‌هادی در حالت تعادل داریم:

$$p + N_D^+ = n + N_A^-$$

چگالی اتم‌های ناخالصی نوع n که یون مثبت تبدیل شده است.

چگالی اتم‌های ناخالصی نوع p که به یون منفی تبدیل شده است.

چگالی اتم‌های ناخالصی نوع n که به یون مثبت تبدیل شده است.

بنابراین کل نیمه‌هادی در از نظر بار الکتریکی خنثی می‌باشد. (در حال تعادل)

رسانایی و قابلیت تحرک: Conductivity and mobility

به علت جابجایی حامل‌های بار در نیمه‌هادی در وجود پتانسیل و برخوردهای مختلف در مسیر راه آنها

طور کلی می‌توان یک سرعت متوسط برای جابجایی حامل‌ها در میدان الکتریکی در نظر گرفت.

سرعت الکترون $\vec{V} = -\mu_n \vec{E}$ ← منفی به این خاطر است که الکترون در خلاف جهت میدان جابجا شده است

μ_n ← electron mobility

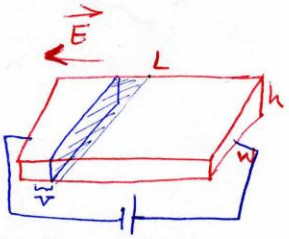
$$\mu_n(Si) = 1350 \frac{cm^2}{V.S}$$

سرعت حفره $\vec{V} = \mu_p \vec{E}$

μ_p = hole mobility $\mu_p(Si) = 480 \frac{cm^2}{V.S}$

محاسبه جریان ناشی از میدان الکتریکی:

یک نوع نیمه‌هادی در نوع n داریم

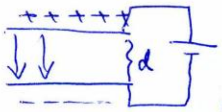


تعریف جریان: مقدار بار عبوری از سطح مقطع نیمه‌هادی در واحد زمان.

واحد زمان $\Delta t = 1S$

سرعت الکترون $V = -\mu_n E$

$\Delta x = V \cdot \Delta t = V$



$E = \frac{V}{d}$

n چگالی الکترون در واحد حجم

تعداد الکترون‌ها در حجم‌های شور خورده $= n \underbrace{(h \cdot w \cdot V)}_{\text{سطح مقطع}}^{A}$

بار الکتریکی در حجم مشخص شده $= q \cdot n \cdot V \cdot A$

$\Rightarrow I = q n \mu_n E A$

چگالی جریان $J_n = \frac{I_n}{A} = q \mu_n n E$

رابطه کامل چگالی جریان با در نظر گرفتن حفره‌ها:

$$J = q(n\mu_n + p\mu_p)E$$

$J = \sigma E$

$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$

σ = conductivity رسانایی ویژه

$\rho = \frac{1}{\sigma}$ = Resistivity مقاومت ویژه

$R = \rho \frac{L}{A} \Rightarrow R = \frac{L}{\sigma A}$

(13)

مثال: مقاومت ویژه سیلیسیم ذاتی در دمای اتاق:

ذاتی $n = p = n_i$

$$\sigma = q n_i (\mu_n + \mu_p)$$

$$\sigma = 1.4 \times 10^{-19} (1350 + 480) \times 1.5 \times 10^{10} = 4.29 \times 10^{-6} \left[\Omega^{-1}.cm^{-1}\right]$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 2.28 \times 10^{5}\ \Omega.cm$$

مقاومت ویژه Si نوع n با $N_D = 10^{17} cm^{-3}$ چقدر است؟

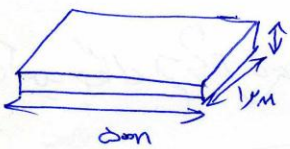
$$N_D \gg N_i \Rightarrow n \simeq N_D = 10^{17} cm^{-3}$$

$$p = \frac{n_i^2}{n} = \frac{2.25 \times 10^{20}}{10^{17}} = 2.25 \times 10^{3}\ cm^{-3}$$

$$\sigma = q(\mu_n n + \mu_p p) = 1.4 \times 10^{-19} \left(10^{17} \times 1350 + \frac{2.25 \times 10^{3}}{10^{17}} \times 480\right)$$

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = 4.4 \times 10^{-4}\ \Omega.cm$$

برای قطعه Si زیر مقاومت را حساب کنید.



$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{2.28 \times 10^{5} \times (50 \times 10^{-2})}{(3 \times 10^{-7})(1 \times 10^{-4})} = 3.8 \times 10^{10}\ \Omega$$

$$R = \frac{\rho L}{A} = \frac{4.4 \times 10^{-4} \times (50 \times 10^{-2})}{(3 \times 10^{-7})(1 \times 10^{-4})} = 744\ \Omega$$

مکانیزم جریان:

جریان: Drift (رانشی یا هدایتی)

Diffusion (نفوذی یا انتشاری)

جریان Drift : جریان ناشی از حرکت حامل ها تحت تاثیر میدان الکتریکی

چگالی جریان Drift $J = \sigma E = q(\mu_n n + \mu_p p)\vec{E}$

جریان diffusion :

جریان ناشی از جابجایی حامل ها از نقاط پرتراکم به کم تراکم

چگالی ناخالصی غیر یکنواخت باعث ایجاد جریان diffusion می شود.

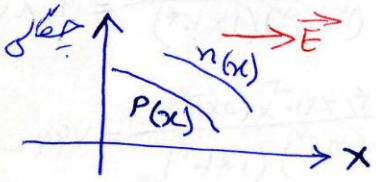
$$J_n = q D_n \frac{dn}{dx} - q D_p \frac{dp}{dx}$$

D_n و D_p = ضرایب نفوذپذیری الکترون ها و حفره ها

$$D_n(Si) = 35 \left[\frac{cm^2}{s}\right]$$

$$D_p(Si) = 12.5 \left[\frac{cm^2}{s}\right]$$

مثال: فرض کنید چگالی اتم های ناخالصی در یک نیمه هادی مانند زیر باشد. جدول را کامل کنید



		Electrons	Holes
Drift	Direction	←	→
	Current	→	→
Deffusion	Direction	→	→
	Current	←	→

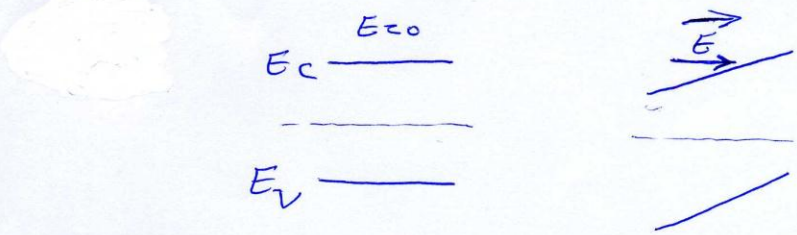
Direction جهت جابجایی خود حامل

Current جهت جریان ناشی از حامل ها

جهت جریان ناشی از جابجایی الکترون ها، خلاف جهت جابجایی آنهاست

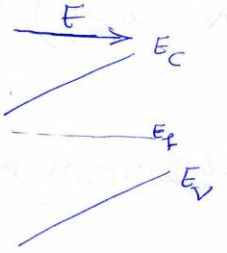
Band gap در میدان الکتریکی :

... باند هدایت و باند ظرفیت در میدان الکتریکی شیب پیدا می کنند



فیزیک الکترونیک

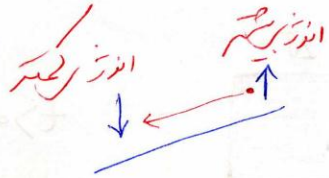
تأثیر میدان الکتریکی بر Bandgap



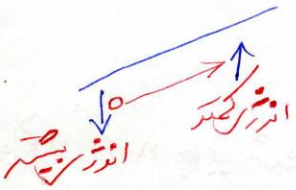
دلیل: همچنین حوزه

۱) همیشه در میدان الکتریکی به سمت انرژی پایین‌تر می‌روند.

۲) فاصله $E_c - E_f$ در محل تجمع الکترون‌ها کمتر می‌شود.



← electrons



← holes

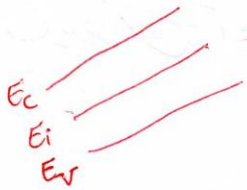
رابطه بین اندازه میدان الکتریکی و شیب توزیع انرژی:

میدان الکتریکی $E_x = -\frac{dV}{dx}$ $\quad (E = -\nabla V)$

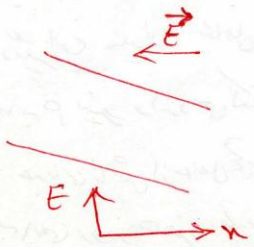
$\frac{\partial}{\partial x}\hat{a}_x + \frac{\partial}{\partial y}\hat{a}_y + \frac{\partial}{\partial z}\hat{a}_z$

پتانسیل ↑ $(-q)V = E_i$ → انرژی پتانسیل

شیب E_c، E_i و E_v برابر است



$\Rightarrow$ میدان $E = \frac{1}{q}\frac{dE_i}{dx}$

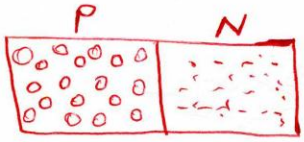


میدان قوی ⇐ شیب بیشتر

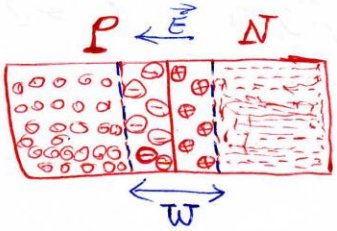
میدان مثبت ⇐ شیب مثبت

میدان منفی ⇐ شیب منفی

دیود (پیوند P-N)



$t=0$ نواحی N و P از نظر بار الکتریکی خنثی هستند



$t>0$

به علت یکنواخت نبودن چگالی حامل ها در نزدیکی مرز بر اثر دیفیوژن الکترون ها از نزدیک مرز از ناحیه N به ناحیه P جابجا شده و باعث می شود قسمتی از ناحیه N در نزدیکی مرز از الکترون تهی شود و باعث شود یون های مثبت ناخالصی ظاهر شوند.

حفره ها از P-n جابجا شده و در نزدیکی مرز یونهای منفی ظاهر می کنند.

ناحیه مشخص شده با عرض W را ناحیه تهی یا کنار یا تخلیه می نامند (Depletion Region)

تقریب کم (Deplation Approximation): در ناحیه تخلیه تقریبا هیچ الکترون و حفره ای وجود ندارد.

مقاومت ناحیه تخلیه خیلی بیشتر از بدنه های خنثی می باشد.

R_1 R_2 R_3

$R_2 \gg R_1, R_3$

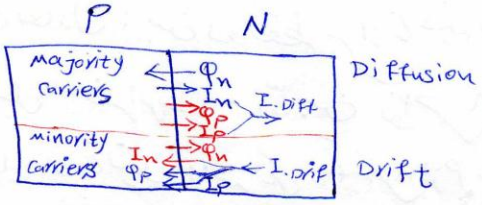
بین یونهای مثبت و منفی یک میدان الکتریکی در جهت N به P بوجود می آید.

این میدان با جابجایی حامل ها در اثر دیفیوژن مخالفت می کند.

به عبارت دیگر این میدان عامل ایجاد جریان Drift است و به الکترونها در جهت P به N و حفره در جهت N به P نیرو وارد می کند.

به این ترتیب جریانی ناشی از حامل های اقلیت در خلاف جهت جریان Diffusion ایجاد می شود. یعنی الکترون ها از ناحیه P به N می روند و حفره ها از ناحیه N به P می روند.

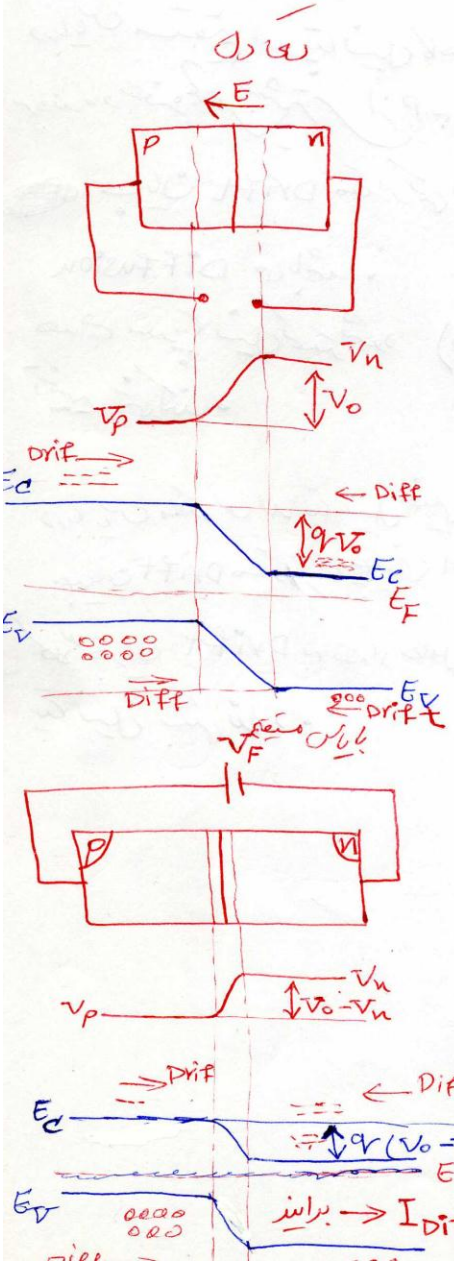
در حالت تعادل $\Rightarrow$ $I_{Diff} + I_{Dri} = 0$



φ = جهت پایین

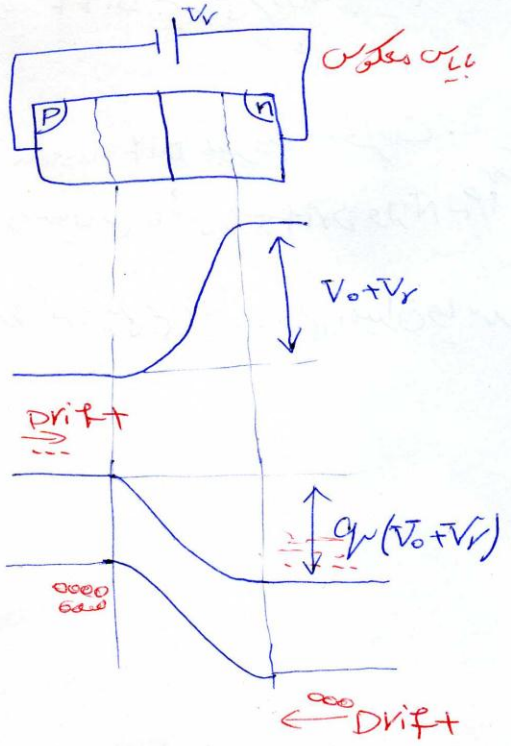
I = جهت چپ

پتانسیل الکتریکی و دیاگرام انرژی:



در بین الکترون‌های ناحیه n اختلاف پتانسیل وجود ندارد.

در بین n و p اختلاف پتانسیل وجود دارد.



interconect اتصالات در IC

در حالت تعادل: بین دو نقطه ای از ناحیه N یا P هیچ میدانی وجود ندارد در نتیجه اختلاف پتانسیل صفر است. اما بین نواحی N و P به علت وجود میدان اختلاف پتانسیل وجود دارد و پتانسیل الکتریکی ناحیه N از P بیشتر است.

انرژی پتانسیل در دو ناحیه به اندازه 0.7V تفاوت دارد یعنی الکترون برای جابجایی از N به P باید از سد انرژی پتانسیلی برابر 0.7V عبور نماید.

در بایس مستقیم سد پتانسیل کاهش می یابد. الکترون های بیشتری می توانند از N به P (Diffusion) بروند. و حفره های بیشتری از P به N جریان ناشی از این جابجایی ها از P به N است.

جریان Drift مقدار کمی است است و تغییر نمی کند. جریان کل ناشی از پدیده Diffusion می باشد.

هرچه سد پتانسیل کمتر شود (Vp بیشتر شود) جریان Diff بیشتر می گردد اما جریان Drift تغییر نمی کند.

در بایس معکوس سد پتانسیل خیلی بزرگ است و جریان Diffusion تقریباً صفر است. جریان Drift مقدار ناچیزی است (بدون تغییر) و جریان کل ناشی از Drift و از N به P کلاً جریان Drift به تعداد حامل های اقلیت بستگی دارد که خیلی کم هستند ولی به میدان و اسد پتانسیل بستگی ندارد.

ادامه‌ی پیوند P-N

V_0 را پتانسیل داخلی یا پتانسیل اتصال می‌نامند.

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

مثال: در یک پیوند (P-N)، $N_a = 10^{17}\,cm^{-3}$ و $N_D = 10^{14}\,cm^{-3}$ • مطلوبست:

الف) دیاگرام انرژی؟

ب) پتانسیل داخلی

در ناحیه P:

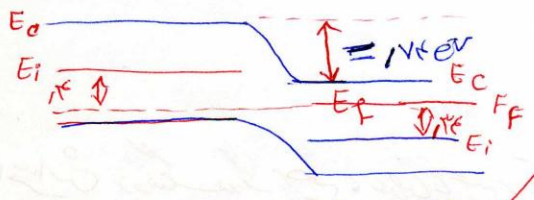
$$P = n_i e^{(E_i - E_f)/KT}$$

$$E_i - E_f = KT \ln \frac{P}{n_i} = 0.026\,eV \ln \frac{10^{17}\,cm^{-3}}{1.5\times10^{10}} = 0.46\,eV$$

در ناحیه n:

$$n = n_i e^{(E_f - E_i)/KT}$$

$$E_f - E_i = KT \ln \frac{n}{n_i} \Rightarrow 0.026 \ln \frac{10^{14}}{1.5\times10^{10}} = 0.34\,eV$$



$$qV_0 = 0.34\,eV + 1.4\,eV = 1.74\,eV$$

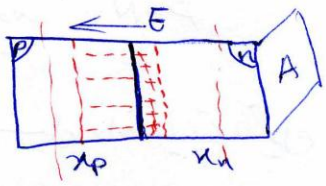
$$V_0 = \frac{1.74\,eV}{q} = 1.74\,V$$

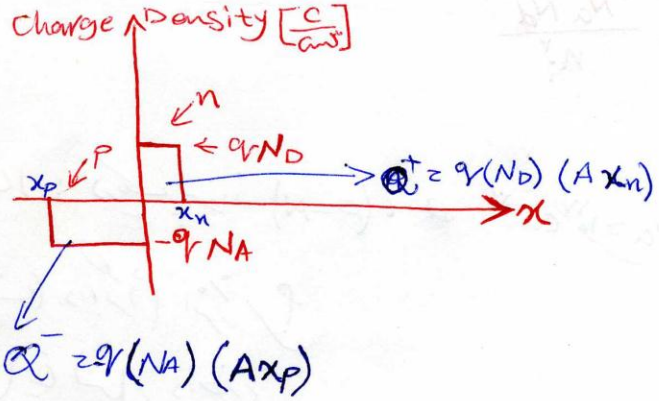
روش دوم محاسبه:

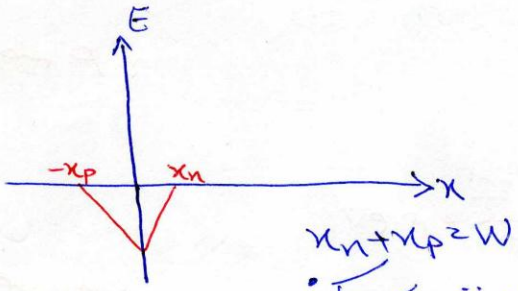
$$V_0 = \frac{1.026\,eV}{e} \ln \frac{10^{23}}{2.25\times10^{20}}$$

$$V_0 = 1.026 \ln \frac{10^{13}}{2.25} \simeq 1.7\,V$$

با دانستن میدان الکتریکی :







$x_n + x_p = W$ عرض ناحیه تخلیه

جهت میدان خلاف جهت x است پس میدان را منفی رسم می‌کنیم.

ماکزیمم میدان الکتریکی در مرز پیوند P-N وجود دارد.

کل سیستم از نظر بار الکتریکی خنثی است. یعنی

$$Q^+ = Q^-$$

$$qN_d A x_n = qN_a A x_p$$

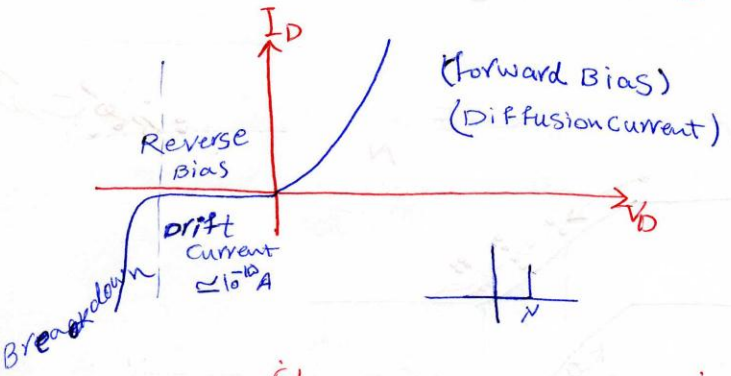
$$N_d x_p = N_a x_p$$

با افزایش دوپینگ یک ناحیه، عرض ناحیه تخلیه آن کاهش می‌یابد.

هرچه میزان ناخالصی کمتر باشد، ناحیه تخلیه بیشتر نفوذ می‌کند تا برابر بودن بار الکتریکی برقرار بماند.

در شکل قبل $N_d > N_a$.

مشخصه جریان ـ ولتاژ دیود :



در ولتاژ حدود پتانسیل داخلی پیوند P-N تغییرات جریان نسبت به ولتاژ خیلی زیاد است، می‌توان گفت ولتاژ دو سر دیود تقریباً ثابت می‌ماند.

رابطه جریان دیود در بایاس مستقیم و معکوس (تا قبل از شکست)

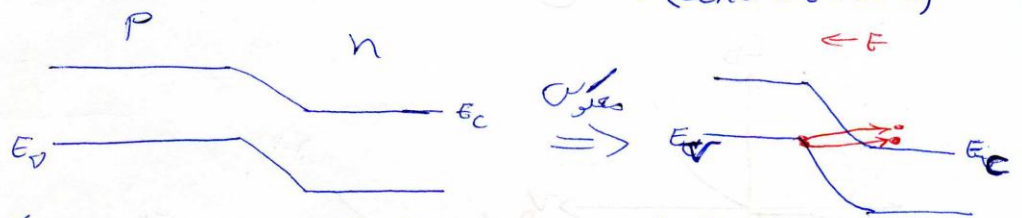
$$I_D = I_0\left(e^{\frac{qV_0}{KT}}-1\right)$$

$$\begin{cases} V_D>0 \Rightarrow I_D \simeq I_0 e^{\frac{qV_0}{KT}} \\ V_D<0 \Rightarrow I_D \simeq -I_0 \end{cases}$$

(Reverse saturation current)
(leakage current)

شکست :

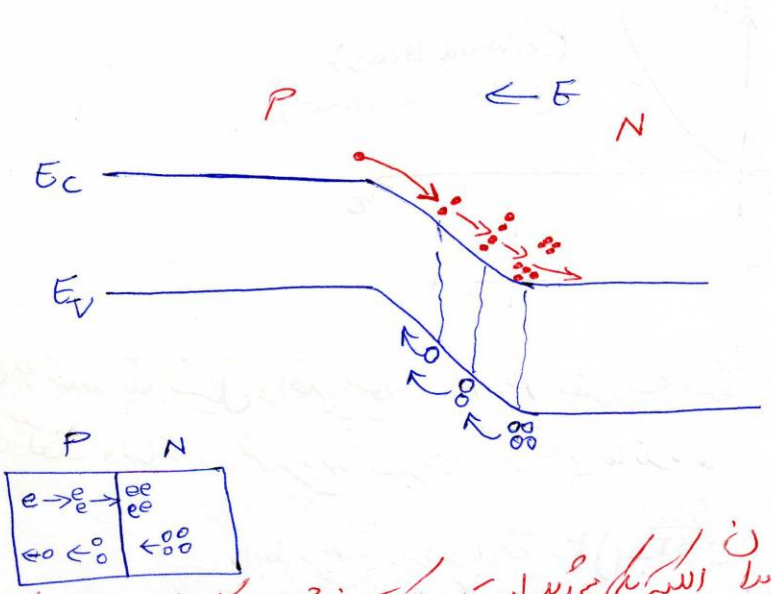
شکست زنر (Zener Breakdown) :



در بایاس معکوس با افزایش بایاس ظرفیت ناحیه P در رابطه با انرژی باند هدایت ناحیه N کم می‌شود. به این ترتیب الکترون‌ها می‌توانند بدون بدست آوردن انرژی لازم برای غلبه بر E_g از باند ظرفیت به باند هدایت تونل بزنند. با افزایش بایاس معکوس میزان این تونل زنی افزایش یافته و چون جهت جریان از N به P است باعث افزایش جریان معکوس دیود می‌شود.

بنابراین اساس پدیده زنر کوانتوم است.
Quantum mechanical tunneling

۲) شکست بهمنی:

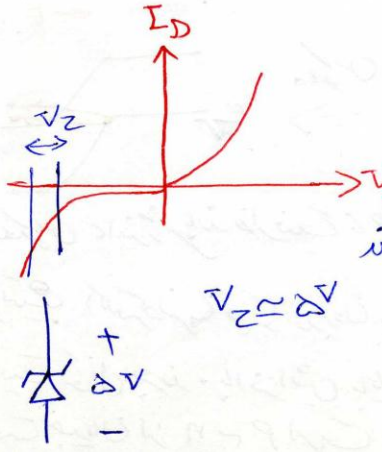


در پایاس معکوس زیاد، میدان الکتریکی شدید است و الکترون شتاب گرفته می‌تواند الکترون‌ها را آزاد نماید.

الکترون‌های آزاد شده به نوبه خود الکترون‌های دیگری آزاد می‌سازند. بدین ترتیب بهمن افزایش روبه رشدی می‌یابد و جریان زیاد می‌شود.

(با آزاد شدن هر الکترون، یک حفره نیز بوجود می‌آید.)

معمولاً پدیده زنر قبل از شکست بهمنی رخ می‌دهد.



دیود زنر در ناحیه شکست کار می‌کند

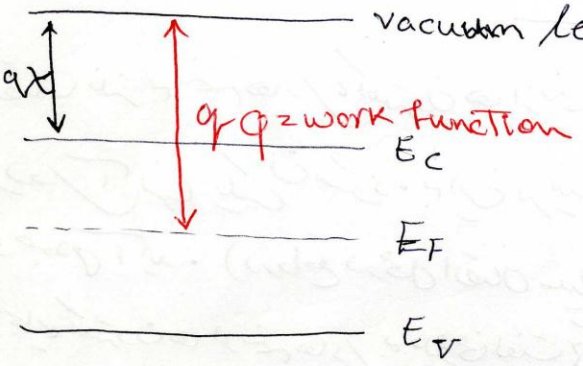
ولتاژ آن حدوداً ثابت است $V_Z \simeq \Delta V$

(19)

اتصال فلز-نیم‌هادی :

work function = مقدار انرژی (لازم) که اگر الکترون این انرژی را بدست آورد می‌تواند از ماده خارج شود.

فاصله‌ی انرژی بین تراز خلاء و تراز فرمی در نیم‌هادی

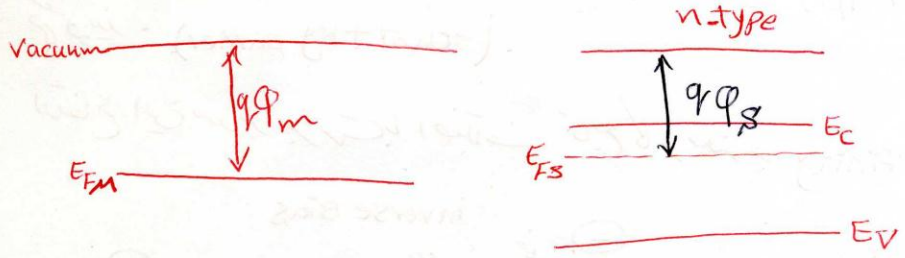


electron Affinity = فاصله‌ی بین باندهدایت و تراز خلاء در نیم‌هادی :

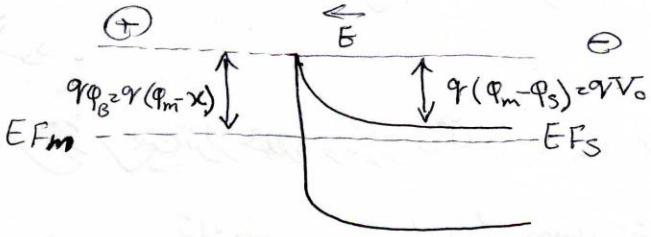
$q\chi$ می‌شود

ابتدا حالتی در نظر می‌گیریم که فلز و نیم‌هادی بهم متصل نشده‌اند.

برای حالتی می‌خواهیم بحث کنیم که تابع کار در فلز بزرگتر از تابع کار در نیم‌هادی باشد. $(\varphi_m > \varphi_s)$



اکنون حالتی را در نظر می‌گیریم که فلز به نیم‌هادی متصل شده (Metallic contact):



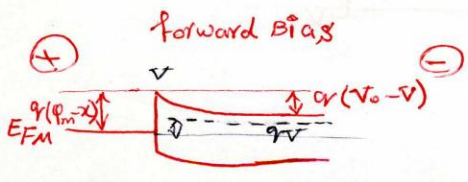
با اتصال فلز به نیم‌هادی، الکترون‌ها از نیم‌هادی به فلز جابجا می‌شوند تا اینکه تراز فرمی هر دو آنها یکسان شود. به این ترتیب یک سد انرژی پتانسیل سر راه الکترون‌ها به وجود می‌آید. (در واقع در محل اتصال میدان الکتریکی در جهت نیم‌هادی به فلز به وجود می‌آید که با جابجایی الکترون‌ها از نیم‌هادی به فلز مخالفت می‌کند).

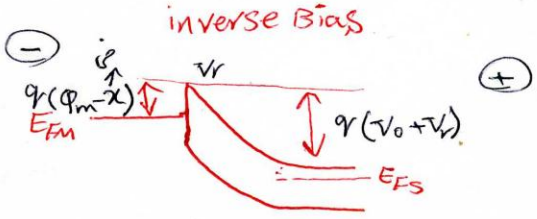
می‌توان با اعمال ولتاژ مانند شکل، ارتفاع این سد را کاهش داد تا جابجایی الکترون‌ها باعث ایجاد جریان شود. اعمال ولتاژ معکوس باعث کاهش جریان می‌شود.

دیودی که به این شکل از اتصال فلز به نیم‌هادی ساخته شود را دیود شاتکی (Schottky) می‌نامند.

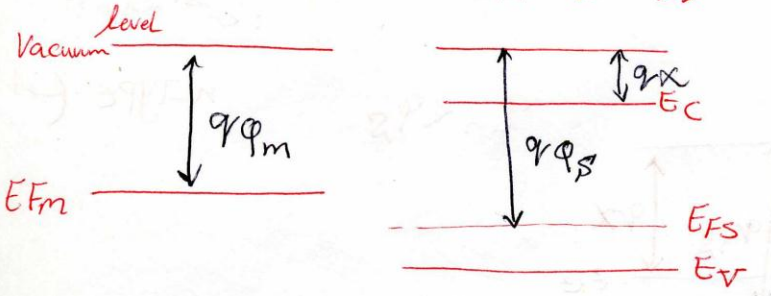
فاصله بین تراز فرمی در فلز تا لبه‌ی کف نوار هدایت ($q\varphi_B$) را سد شاتکی (Schottky barrier) می‌گویند.

ارتفاع این سد برابر است با اختلاف تابع کار فلز و affinity نیم‌هادی.

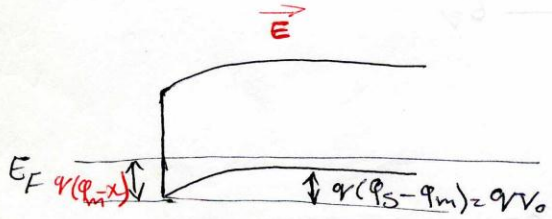




برخی نیمه‌هادی P-Type با شرایط $\varphi_m < \varphi_s$

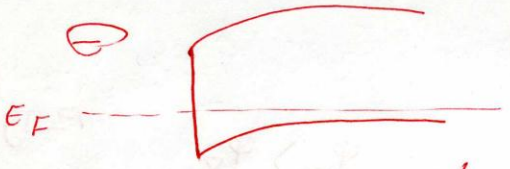


قبل از اتصال



بعد از اتصال

forward bias



با اتصال فلز و نیمه‌هادی، حفره‌ها از نیمه‌هادی به فلز جابجا می‌شوند تا تراز‌های فرمی یکسان شوند

در محل اتصال میدان الکتریکی بوجود می‌آید که با این جابجایی مخالفت می‌کند. با اعمال بایاس مستقیم مانند شکل مقاومت در مقابل حفره کاهش یافته و جریان افزایش می‌یابد. با اعمال بایاس معکوس جریان ناچیز می‌شود.

در دو حالت بررسی شده، در محل اتصال سد شاتکی بوجود می‌آید و اصطلاحاً این اتصال فلز به نیمه‌هادی را Schottky contact می‌گویند

$\varphi_m > \varphi_s$ n-Type

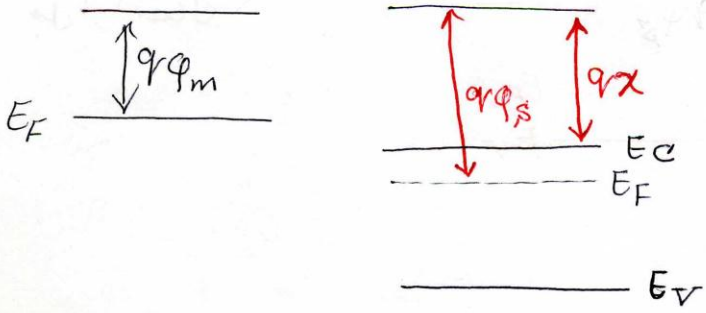
$\varphi_m < \varphi_s$ P-Type

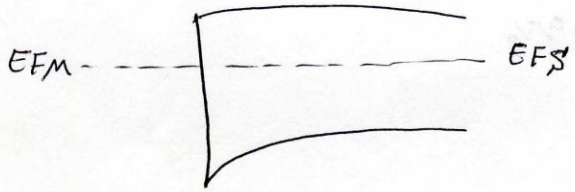
اگر رابطه φ_m و φ_s در شرط حالت بالا برعکس شود، اتصالی بوجود می‌آید که سد راه حامل‌ها برای ایجاد کنندهٔ جریان سدی وجود ندارد. این اتصالات را اهمی (ohmic contact) می‌گویند.

اتصال اهمی :

n-Type (

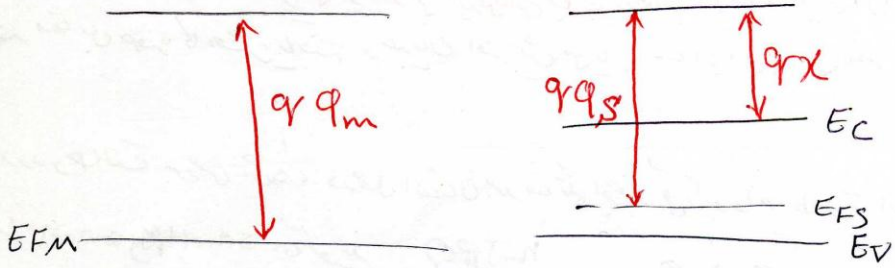
$\varphi_m < \varphi_s$

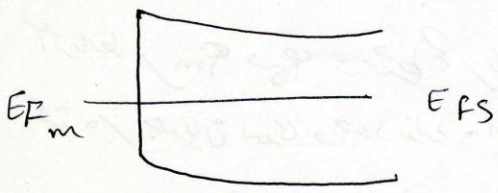




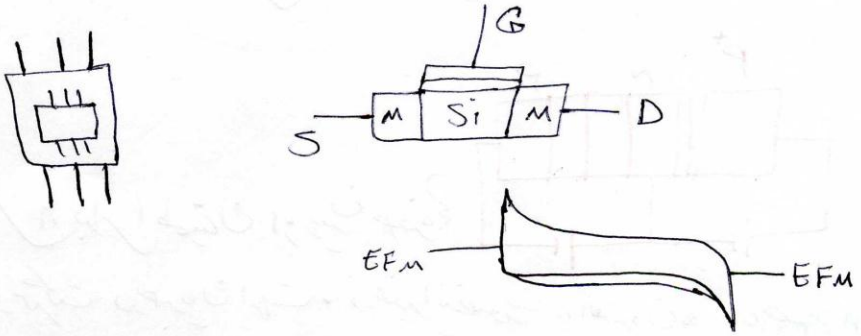
P-Typ

$\varphi_m > \varphi_s$

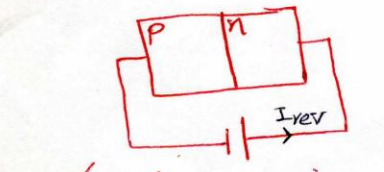




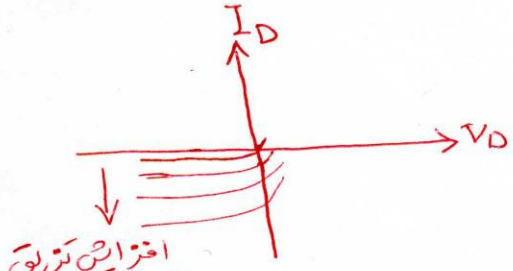
در حالت الف برای هم تراز شدن تراز E_F فلز، الکترون باید از فلز به نیم هادی جابجا شود و سد انرژی مقابل آن ناچیز است و با پتانسیل کمی از بین می رود.
در حالت ب هفره از فلز به نیم هادی جابجا می شود و سد انرژی مقابل آن ناچیز است.
این اتصالات خاصیت یکسو کنندگی ندارند و آنها را اتصالات اهمی می نامند.



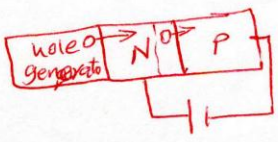
Bipolar junction Transistor (ترانزیستور دوقطبی پیوندی)

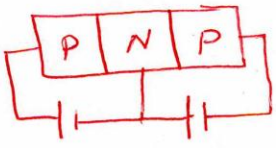


پیوند P-N در بایاس معکوس

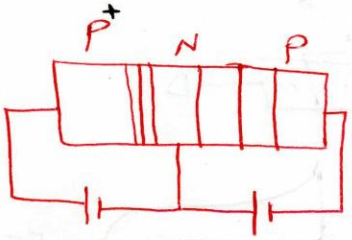


افزایش تزریق الکترون و حفره



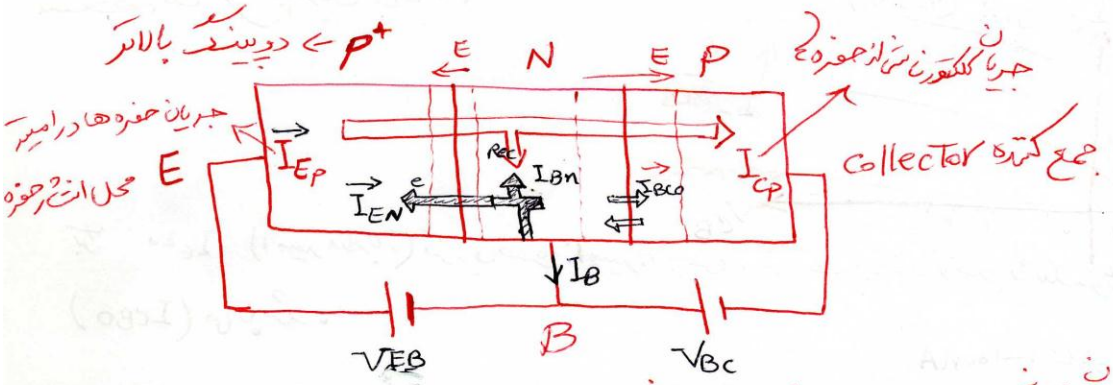


در پیوند P-N بایاس مستقیم حفره ها در اثر Diffusion از P به n جابجا می‌شوند در نتیجه این پیوند P-N در بایاس مستقیم می‌تواند تزریق حفره به ناحیه n انجام دهد.
برای اینکه حفره ها بیشتر تزریق شود و حتی به میدان الکتریکی پیوند P-N در بایاس معکوس وارد شوند، معمولاً طراحی به صورت زیر است:



عرض کمتر ناحیه n برای اطمینان از رسیدن حفره‌ها به میدان E و حرکت در جریان است. در غیر اینصورت با الکترون های ناحیه n ترکیب شده از بین می‌روند. doping اضافی ناحیه P^+ برای تزریق بیشتر حفره است.

(22)



I_{EP}: جریان ناشی از جابجایی حفره ها در اثر diffusion در پیوند P-N بایاس مستقیم در جهت $P \subseteq N$.

I_{EN}: جریان ناشی از جابجایی الکترون ها در اثر diffusion از ناحیه N به P در پیوند EB که بایاس مستقیم است.

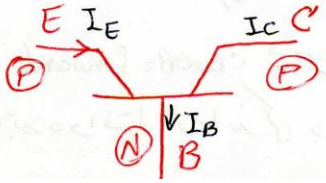
جهت جریان الکترون مخالف جهت جابجایی (از P به N) می باشد.

Rec = Recombination (بازترکیب): قسمتی از حفره های تزریقی امیتر در حین عبور از بیس با الکترون های زیاد ناحیه بیس بازترکیب می شوند. به این ترتیب تعدادی از حفره های تزریقی امیتر از بین رفته و همچنین با از بین رفتن تعدادی از الکترون های ناحیه N این ناحیه خنثی بودن حفره را از دست می دهد و برای حفظ خنثی بودن از مدار خارجی الکترون می کشد.

I_{Bn} = جریان ناشی از الکترون های ورودی به بیس از مدار خارجی برای حفظ تعادل بحگال الکترون ها در بیس جهت جریان به سمت خارج بیس است.

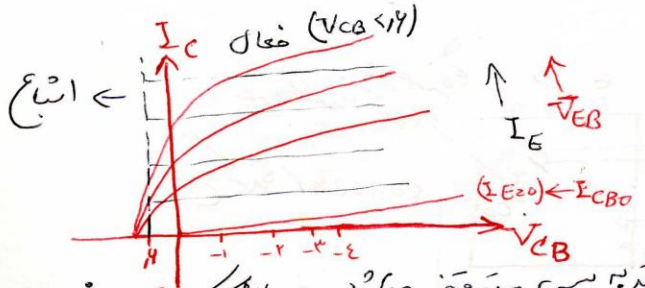
I_{CP} = جریان ناشی از حفره های رسیده به کلکتور از امیتر.

I_{BCO} = جریان اشباع معکوس پیوند BC در بایاس معکوس.



با کوچک کردن عرض بیس می‌توان با ترکیب حفره‌ها در بیس را کاهش داد.

مشخصه‌های جریان ولتاژ:



برای $I_{E=0}$ (امیتر مدار باز) تزریق حفره از امیتر به بیس متوقف می‌گردد و جریان کلکتور پیوند CB (I_{CBO}) می‌باشد.

$I_{CBO} \simeq 1-100nA$

if $V_{EB} < V_\gamma$ قطع

if EB پیوند $\xrightarrow[forward]{مستقیم}$ و CB $\xrightarrow[Reverse]{وارون}$ فعال

روی محور افقی به ازای $V_{CB}<0$ پیوند BC در بایاس معکوس است ⇐ فعال

اما به ازای $V_{CB}>0$ بایاس مستقیم است ⇐ اشباع

با افزایش I_E (افزایش V_{BE}) به علت افزایش تزریق حفره، I_C زیاد می‌شود.

به ازای یک مقدار ثابت I_E، جریان I_C کاملاً ثابت نبوده و با افزایش $|V_{CB}|$ کمی افزایش می‌یابد.

با افزایش ولتاژ معکوس V_{CB}، پیوند BC در بایاس معکوس بزرگتری قرار می‌گیرد و عرض ناحیه تخلیه پیوند CB بزرگتر می‌شود و بیشتر در بیس گسترش می‌یابد. به این ترتیب عرض بیس کاهش یافته و میزان باز ترکیب در آن کم شده و تعداد بیشتری از حفره‌های تزریقی امیتر به کلکتور می‌رسند. این پدیده مدولاسیون عرض بیس (Base width modulation) یا پدیده اثر ارلی (Early Effect) نامیده می‌شود که باعث ایجاد شیب در منحنی ($I_C - V_{CB}$) شده است.

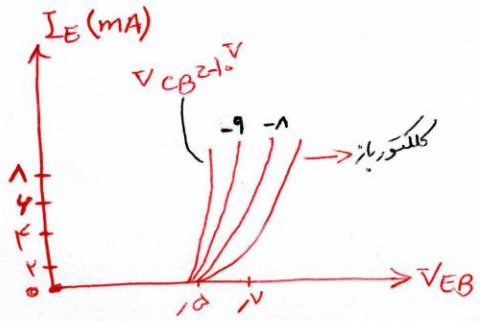
($V_{CB}>0$) ناحیه اشباع در ناحیه اشباع جریان کلکتور به شدت تحت تأثیر V_{CB} بوده و افزایش اندکی در V_{CB}، کاهش قابل ملاحظه‌ای در I_C ایجاد می‌کند.

به دو دلیل :

پیوند CB بایاس مستقیم است)

) میدان الکتریکی ضعیف شده (عرض ناحیه تخلیه کوچکتر می‌شود) (این میدان عامل جذب حفره‌های تزریقی
میتر به سمت کلکتور است) .

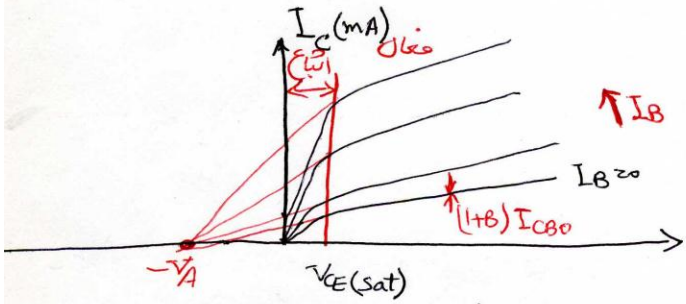
) جریان مستقیم پیوند CB (در جهت P به N) در خلاف جهت جریان ناشی از امیتر است و آن را
خنثی می‌کند.



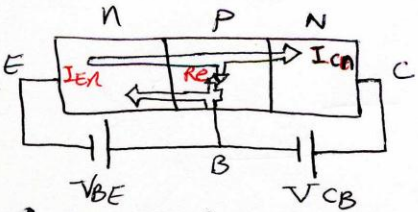
با افزایش V_{EB} بعد از مقدار آستانه آن $V_{EB(ON)} \approx 0.5$ تا 0.7 V جریان افزایش می‌یابد .
به ازای $V_{EB} < 0.5$ V جریان امیتر تقریباً صفر است .

با افزایش ولتاژ معکوس $|V_{CB}|$ (به ازای یک مقدار معین V_{EB}) جریان I_E افزایش می‌یابد .
این افزایش از اثر اول است.

برای npn



- با افزایش I_B جریان کلکتور زیاد می‌شود .
- با افزایش V_{CE} به دلیل معکوس ولاسیون عرض بین جریان شیب پیدا می‌کند.



در حالت اشباع هر دو پیوند بایاس مستقیم هستند .

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

به ازای یک V_{BE} ثابت وقتی $V_{CE} < V_{CE(sat)}$ می‌شود یعنی V_{BC} مثبت‌تر شده است و این یعنی پیوند
یعنی پیوند CB بایاس معکوس کمتری دارد و جریان کاهش می‌یابد .

۱۳۹۵/۱۰/۱

(24)

led : (light Emitting Diode)

مقدمه نیمه هادی های مستقیم و غیر مستقیم :

از الکترونیک معمولاً انرژی باندها، هدایت و ظرفیت را بر حسب بردار موج رسم می کنند. بردار موج حال ثابت انتشار موج صفحه ای (تابع موج) متناسب با الکترون می باشد.

مثلاً برای الکترون آزاد تابع موج بصورت زیر است :

$$\varphi_{(x)} = V(K_x) e^{iK_x x}$$

ثابت انتشار K_x

مقدار متوسط اندازه حرکت الکترون در شبکه کریستالی بصورت زیر است :

$$\langle P_x \rangle = \hbar K_x$$

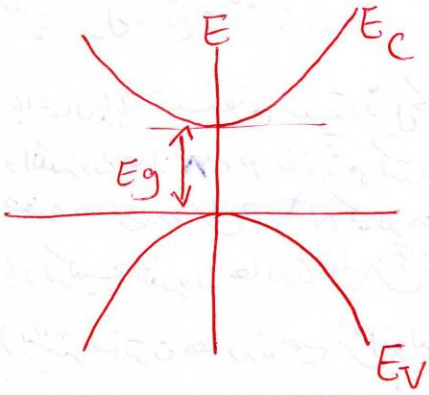
$\langle P_x \rangle$ مقدار متوسط الکترون در جهت x

momentom

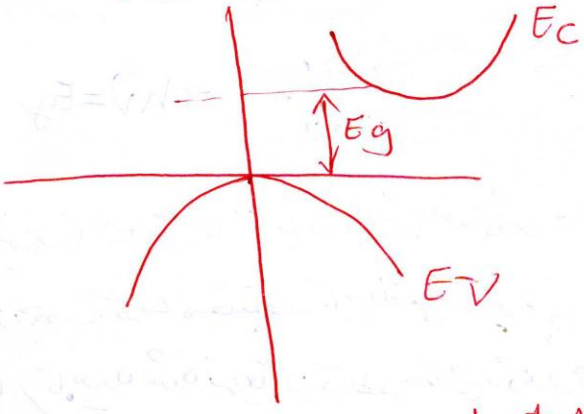
$\frac{h}{2\pi}$

ثابت انتشار

بنابراین منحنی E-K در واقع انرژی الکترون را بر حسب momentom می دهد (با تقریبی به اندازه ی یک ضریب)



Direct semiconductor

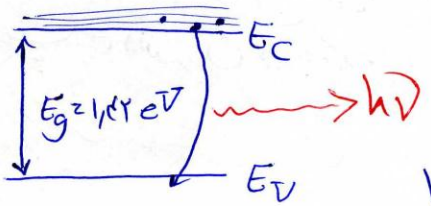


Indirect semiconductor

در نیمه هادی مستقیم، باز ترکیب الکترون معمولاً با تولید فوتون همراه است در حالیکه در نیمه هادی غیرمستقیم الکترون انرژی خود را به صورت گرما به شبکه منتقل می کند.

سیلیسیم غیرمستقیم است.

گالیم آرسنایاد GaAs مستقیم است.

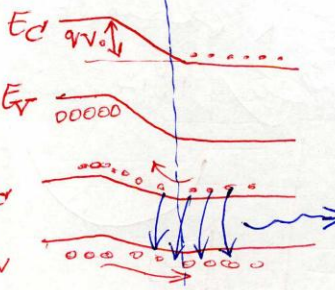


$$h\nu = E_g \Rightarrow \nu \simeq \frac{E_g}{h}$$

LED در واقع یک پیوند P-N است که از یک نیمه هادی مستقیم ساخته شده است.

led ها معمولاً به صورت $P-N^+$ ساخته می شوند.

چون doping در ناحیه P کمتر است پس عرض ناحیه تخلیه بیشتر در P گسترش می یابد.



qV_0 پتانسیل داخلی در تعادل است.

سد پتانسیل مانع از نفوذ الکترون ها از N^+ به P است.

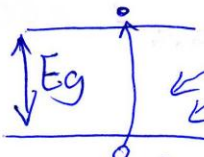
با اعمال بایاس مستقیم سد پتانسیل کاهش می یابد و الکترون ها از N^+ به P نفوذ می کنند (diffusion) حفره ها هم از P به N^+ نفوذ می کنند.

باز ترکیب الکترون ها در ناحیه تخلیه و همچنین در ناحیه خنثی P باعث تابش نور می شود.

(بیشتر فوتون ها در ناحیه P تولید می شوند) و در جهت های مختلف تابیده می شوند.

ساختار led باید بگونه ای باشد که فوتون های تابیده شده سریعاً از قطعه خارج شوند و خود جذب نیمه هادی نشوند. برای این منظور بهتر است ناحیه P باریکتر باشد یا از ساختار Heterostructure استفاده شود.

فرآیند جذب



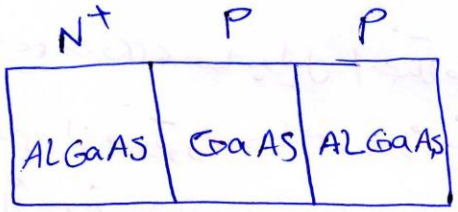
در فرآیند جذب فوتون ها انرژی hν خود را به شبکه داده و الکترون ها می‌توانند آزاد می‌کند و خود از بین می‌رود (جذب می‌شود).

ساختار Hetro structure :

در اطراف ناحیه‌ی تولید فوتون از نیمه‌هادی با Eg بزرگتر استفاده می‌شود.

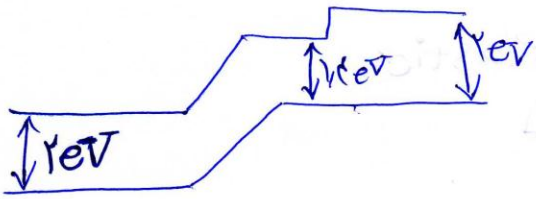
شرط جذب $h\nu \geq E_g$

بنابراین ترتیب در سایر نواحی $h\nu < E_g$ است و جذب کاهش می‌یابد.



$E_g(AlGaAs) > E_g(GaAs)$

$2eV > 1.4eV$

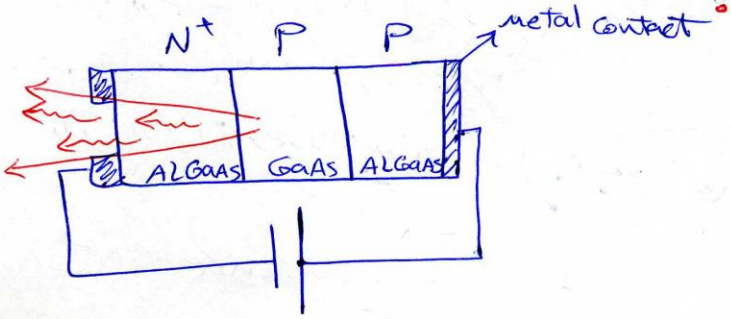


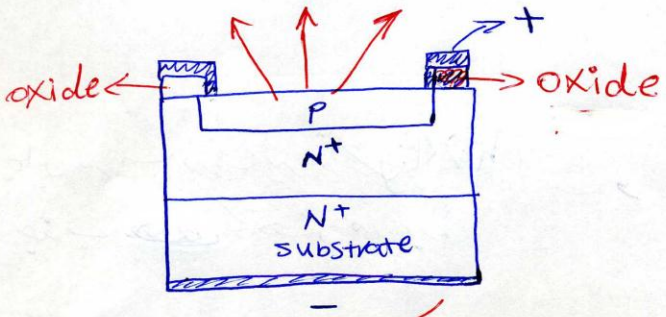
حالت تعادل

حسب $h\nu \simeq 1.4 < 2$

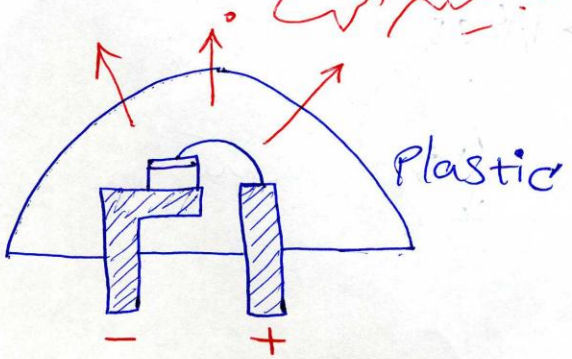
به این ترتیب فوتون‌های تولید شده در GaAs، شرایط جذب را در نواحی کناری ندارند ($h\nu < 2eV$) در نتیجه در نواحی کناری جذب نمی‌شوند.

ساختار واقعی led :



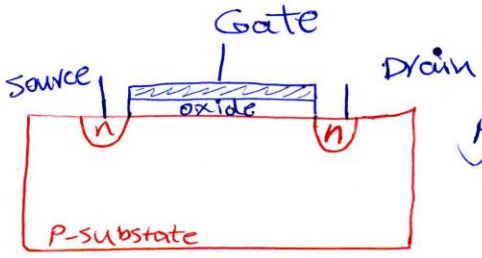


در مرز نیمه هادی ها بدلیل اختلاف ضریب شکست، انعکاس کلی رخ می دهد
و قسمتی از فوتون ها به درون نیمه برمی گردند.
معمولاً پیوند P-N را توسط ماده پلاستیکی شفاف به صورت کپسول درمی آورند
که ضریب شکست آن از هوا بیشتر است



: MOSFET

(metal-oxide-semiconductor field effect transistor)



با اعمال ولتاژ به گیت، الکترون‌های زیر لایه P زیر اکسید جمع می‌شوند و یک کانال نوع N تشکیل می‌شود.

اگر $V_G > V_{Th}$ باشد کانال نوع N تشکیل می‌شود. در این حالت با اعمال ولتاژ در این می‌توان به ماسفت جریان ایجاد کرد.

(N-channel MOSFET)