۳۳ الف - ب (ii) - ۳۴ - ۴۹ - ۵۱

Subject : ۱ - ۵ - ۷ - ۱۳ - ۱۹ - ۲۱ - الف ج - هـ ج ۲۳ - ۲۷ - ۲۹

Year. Month.

فیزیک الکترونیک

سرفصل مطالب: * مقدمه و مفاهیم * تئوری باندهای انرژی و فیزیک نیمه هادی ها

* پیوند P-N * ترانزیستورهای پیوندی دوقطبی (BJT)

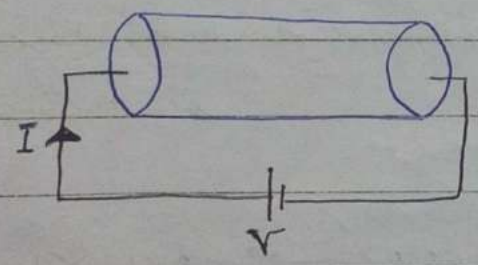
* پیوند فلز و نیمه هادی * ترانزیستورهای اثر میدان

مرجع: فیزیک الکترونیک نوشته B. Streetman مترجم دکتر روئین تن

ارزیابی: - کوئیزها: ۱۵٪

میان ترم: ۳۰٪ پایان ترم: ۵۵٪

* مقدمه و مفاهیم: مفهوم مقاومت مخصوص (ρ)



$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{L}{A}$$

ρ مقاومت ویژه یک قطعه با واحد Ω.cm نشان داده می شود

فلزها رسانای خوب هستند و ρ پایینی دارند

از نظر مقاومت مخصوص در مقابل عبور جریان الکتریکی مواد را به سه دسته تقسیم می کنیم

۱) رسانا یا هادی (Conductor) $\rho < 10^{-2}\ \Omega.cm$

فلزات در همین دسته قرار می گیرند

۲) عایق ها یا نارسانا (insulator) $\rho > 10^{5}\ \Omega.cm$

Subject :
Year. Month.

۳) نیم رسانا یا نیمه هادی (Semi Conductor)

این دسته از مواد هدایت قابل کنترلی دارند و با تغییر شرایط محیطی مانند دما یا تابش نور و یا وارد کردن ناخالصی در ساختار آن ها میزان رسانش آن ها تغییر می کند

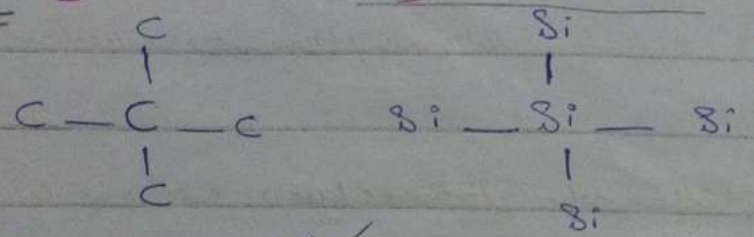
* انواع پیوندها در جامدات: ۱) پیوند یونی: در اثر تعامل یک اتم دهنده الکترون و تعامل اتم دیگر

در این دست قابل الکترون این نوع پیوند ایجاد می شود مانند پیوند بین کلر و سدیم در NaCl

۲) پیوند فلزی: در فلزات الکترون های لایه آخر وابستگی بسیار کمی به هسته دارند و با حرکتی از تبدیل هسته رها می شوند در نتیجه در ساختار فلزات الکترون ها در فاصله بین اتمی در حالت حرکت می کنند و در هدایت و رسانش فلز نقش ایفا می کنند در حالی که یون های فلزی در جای خود ثابت هستند

یون ها اتم هایی هستند که یک یا چند الکترون بگیرند و یا از دست بدهند مانند Na^+ و Cl^-

۳) پیوند کووالانسی: در این پیوند الکترون ها تحت تأثیر هسته قرار دارند و تنها بین اتم ها به اشتراک گذاشته می شوند



کربن و سیلیسیم که گروه ۱۴ جدول تناوبی قرار دارند که با به اشتراک گذاشتن الکترون ها خود با هم می توانند به خواصیت خود پایدار کردن

* انواع آرایش ها اتمی در جامدات:

Subject :
Year. Month.

۱) جامدات بی‌شکل: (Amorph) در این نوع آرایش هیچ نظمی بین قسمت‌های مختلف جامد وجود ندارد مانند (ژله)

۲) جامدات بلوری: در این نوع از جامدات ساختار ماده در همه جا یکسان است و هیچ بخشی از جامد را نمی‌توان پیدا کرد که با بقیه آن ساختار متفاوت باشد مانند الماس

۳) جامدات چندبلوری: در این دسته از جامدات ساختار ماده از چند بلور تشکیل شده است یعنی هر بخش از ماده نظم مشخصی دارد ولی قسمت‌های مختلف نسبت به هم نا منظم قرار گرفته‌اند مانند برادیت

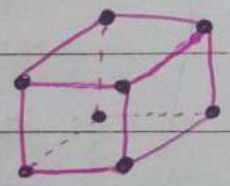
* سلول واحد (unit cell): اشکال مهم

در شبکه فضایی حد فاصل بین یک مفهوم ریاضی و انتزاعی بی‌نظم بی‌نهایت در سه بعد

* در بلور حد فاصل ایم مفهوم فیزیکی یک شبکه‌ی محدود با بلورهای سیم مثل الماس

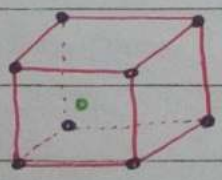
سلول واحد کوچک‌ترین ساختار یک جامد بلوری که از کنار هم قرار گرفتن آن در ۳ بعد کل ساختار بلور بدست می‌آید ساده‌ترین نوع این سلول‌های واحد سلول‌های مکعبی هستند

انواع سلول‌های واحد: ۱) مکعبی ساده: (Simple cubic) (Sc)



در این نوع سلول واحد هر سلول $\boxed{8 \times \frac{1}{8} = 1}$ اتم اختصاص دارد

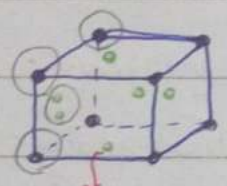
۲) مکعبی مرکز پر (Body centered cubic) (Bcc)



Subject :
Year. Month.

در این نوع سلول واحد هر سلول یک اتم بیشتر از مکعبی ساده خواهد داشت $\boxed{8\times\frac{1}{8}+1=2}$

۳) مکعبی مرکز وجوه پر (Face centerd cubic)
FCC

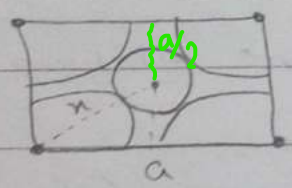


هر اتم در مجاورت با اتم‌ها در وجه کناری در اشتراک

برای سلول واحد این ساختار $\boxed{8\times\frac{1}{8}+6\times\frac{1}{2}=4}$ اتم می‌توان در نظر گرفت

در اندازه‌ی a ثابت شبکه‌ی کریستالی فاصله بین دو تا اتم در رأس مکعب‌ها کریستالی مهم نیست اما در مرکز مکعب و یا مرکز جهات وجود داشته باشند مفهوم ثابت شبکه فاصله‌ی دو اتم در دو رأس مکعب است

★ با فرض مماس بودن اتم‌ها چند درصد از فضای یک شبکه ماده با ساختار FCC توسط اتم‌ها اشغال می‌شود؟ هر اتم را به صورت ایده‌آل می‌توانیم یک کره در نظر بگیریم که با هم مماس باشند



$$r=\sqrt{\frac{a^2}{4}+\frac{a^2}{4}}=\frac{a\sqrt{2}}{2}$$

شعاع هر کره (اتم) $=\frac{a\sqrt{2}}{4}$ حجم هر اتم $=\frac{4}{3}\pi r^3=\frac{4}{3}\pi\left(\frac{a\sqrt{2}}{4}\right)^3$

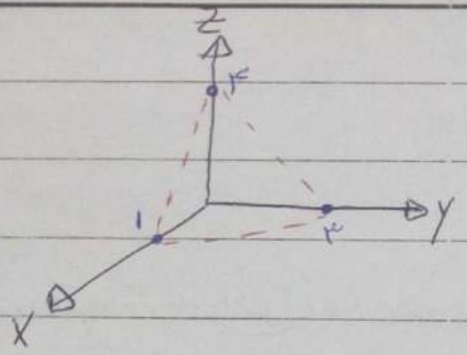
فضای از هر سلول واحد که توسط اتم‌ها اشغال می‌شود برابر است با $4\times\frac{4}{3}\pi\left(\frac{a\sqrt{2}}{4}\right)^3$

حجم سلول واحد $=a^3$

درصد اشغال فضا توسط اتم‌ها در ساختار FCC $=\frac{4\left(\frac{4}{3}\right)\pi\left(\frac{a\sqrt{2}}{4}\right)^3}{a^3}\times100\%$

$=74\%$

Subject :
Year. Month.



* مفهوم صفحات در شبکه های بلوری:

از سه نقطه در فضا فقط یک صفحه می گذرد

صفحه برای ما مهم است که نزدیک به مبدأ و نزدیک تر باشد

اگر نقاط دیگری را در نظر بگیریم صفحات آن موازی این صفحه می شود

$x=1$

$y=3$

$z=4$

$(1, 3, 4) \xrightarrow[\text{می کنیم}]{\text{ابتدا عکس}} (1, 1/3, 1/4) \xrightarrow[\text{می کنیم}]{\text{ک.م.م}} \times 12 \; (12, 4, 3)$

اندیس میلر

در هر شبکه ای با ساختار بلوری می توان صفحات خاصی را نسبت داد. این صفحات با اندیس میلر یا شاخص میلر مشخص می شوند برای تعیین این شاخص به صورت زیر عمل می کنیم

① محل برخورد اتم های یک ساختار بلوری با محورهای مختصات مشخص می کنیم (بین این مقادیر نزدیک ترین نقاط به مبدأ مختصات انتخاب می شود)

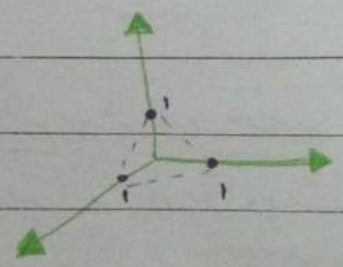
② هر یک از اعداد به دست آمده را برعکس می کنیم

③ کسرهای به دست آمده را مخرج مشترک (ک.م.م) آن ها ضرب می کنیم

④ سه عدد حاصل را کنار هم درون پرانتز می نویسیم

⑤ اگر محل برخورد با یکی از محورها در قسمت منفی باشد در هر سه عدد متناظر با آن محور در شاخص میلر یک خط می کشیم

★ شاخص میلر هر یک از ساختارهای که محل برخورد اتم های آن ها با محورهای مختصات به صورت زیر می باشد را تعیین کنید؟

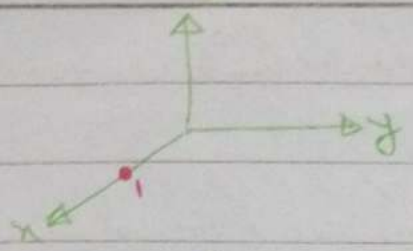


۱ ۱ ۱

۱ ۱ ۱

(۱ ۱ ۱)

Subject :
Year. Month. 2

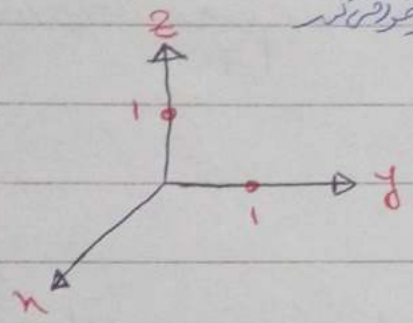


1 ∞ ∞

1 0 0

(1 0 0)

محل برخورد اتم‌ها به گونه‌ای است که در صفحه مقطع با x برخورد داشته باشد زمانی که با یک صفحه برخورد دارد و محورهای y و z برخورد ندارد پس در بی‌نهایت با y و z برخورد می‌کند



∞ 1 1

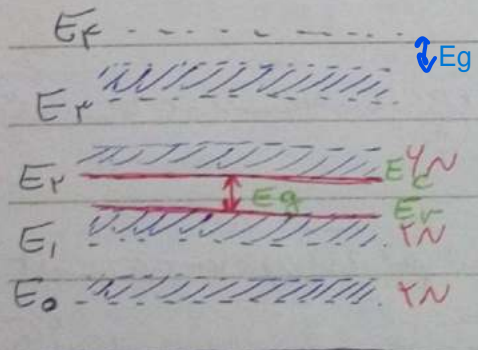
0 1 1

(0 1 1)

اگر یکی از نقاط مادر مبدأ قرار داشته باشد مقطع تش می‌شو ∞ ∞ ∞ پس این مختصات متقابل نقطه است پس برای تعیین اندیس میلر این نقطه مادر نظر نمی‌گیریم ولی در صورت دیگر می‌گیریم که چنین نقطه‌ای داریم

a ثابت شبکه است که این شکل دهنده این است که محل قرارگیری اتم‌ها نسبت به هم شکل می‌دهند
(1 2 3 4)

فصل دوم:



نوار انرژی در ماده یک سری نوارهای انرژی‌ای نزدیک سری نوار انرژی که مجموع است که به آن‌ها شکاف انرژی گویند

مرز هسته

عدد اتمی یک ماده ۴ است این ۴ تا پروتون در هسته و ۴ تا الکترون آزاد

• • • • • •

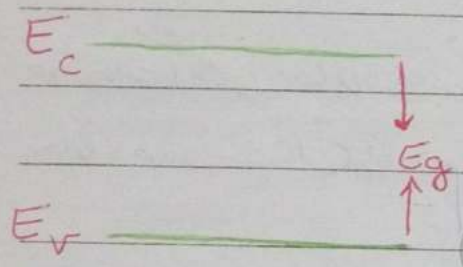
$1S^2$ $2S^2$

در نوار لیتیم نوار ظرفیت نوار هدایت . آخرین نواری که در آن الکترون قرار می‌گیرد نوار هدایت است و آن که پر شده نوار ظرفیت است فاصله بین این‌ها شکاف انرژی وجود دارد

Subject :
Year. Month.

آن نواری که ممکن است خالی باشد یا بخشی پر باشد نوار هدایت گویند

valance Band نوار ظرفیت Conduction Band نوار هدایت



شکاف انرژی هر ماده یک ثابت Eg آن همنوع یا شکاف خاص است

کم ترین سطح نوار هدایت E_c و بیشترین سطح نوار ظرفیت E_v

در فلزات Eg کوچک است چون رسانا هستند اگر مقدار انرژی کمی به Ev برجهیم چون Eg

کمی بالا می تواند حرکت کند به Ec برود ولی اگر بدنظر تر بگیرد دمای کلوین برای اکثر فلزات

نوار مضروب یا مقدار صفر بعد یا مقدار خیلی کوچک بالا رود و نوارها هم پوشانی دارند

Eg = شکاف انرژی = Band gap

در عایق ها و نیمه رسانا ها شکاف انرژی Eg بزرگ است فلز انرژی زیادی باید به الکترون های نوار ظرفیت

برجهیم تا بتوانند به نوار رسانش بروند انرژی یا گاپ پر است یا گاپ خالی

که برجهیم مدنظر است

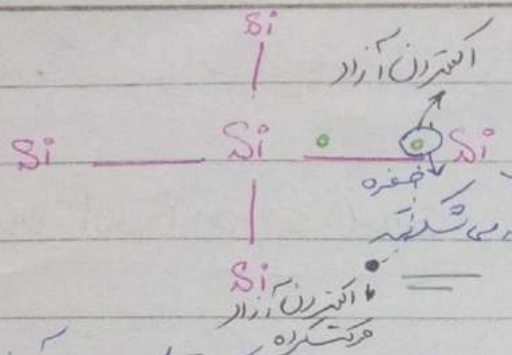
نیمه رسانا ها چون شکاف انرژی خیلی کمتری نسبت به عایق ها دارند با گرم کردن می توانیم

رسانش ایجاد کنیم سیلیکون معروف ترین نیمه رسانا است (Si)

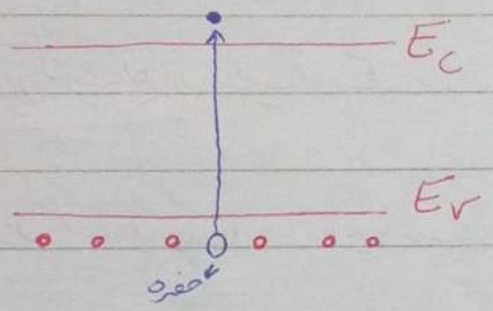
مصرف بیشتر کیفی هر لیتری دارند نوار ظرفیت پر و نوار هدایت خالی دارند

SINA

Subject :
Year. Month.



سیلیکون دارای پیوند کووالانسی است در صفر کلوین هیچ
الکترون آزادی در ساختار وجود ندارد، افزایش انرژی
حرارتی رگ ها دادن پیوندهای کووالانسی چون الکترون ها هسته می شکنند
جای خالی الکترون ها را حفره می نامند الکترون های آزاد می توانند در ساختار حرکت کنند و نبود آن
ها را با حفره نشان می دهیم



e e e o e e e
e e o e e e e
e o e e e e e
o e e e e e e

هم زمان الکترون در نوار انرژی بالاتر
جای خالی که در نوار ظرفیت باقی می ماند می تواند
باعث ایجاد جریان باشد چون هر چه
e ها به سمت راست حرکت می کنند o حفره ها به
سمت چپ تردید می شوند جابجایی حفره
نیمه رسانا می تواند با افزایش تعداد نقش تغییر کند

حفره ای که در اثر جا شدن الکترون در جهت مخالف می گوییم جفت الکترون حفره
در نوار ظرفیت از نوار هدایت بر روی الکترون

Electron Hole Pair (EHP)

در فرآیندی که ما EHP تولید می کنیم می گوییم تولید یا

Genretion

اگر الکترون با حفره باز گردد حفره را پر کند EHP از بین برده می شود

Recombination

Subject :
Year. Month.

جرم بار الکتریکی حفره کمتر است در جرم قدر می‌گوییم بار الکتریکی مادر برابر بار الکتریکی الکترون ولی با علامت مثبت بعد می‌بینیم که جرم الکترون بر روی حفره‌ها در نظر گرفتیم

حرکت حفره از حرکت الکترون آهسته‌تر است چون حفره بستگی زمانی به حرکت الکترون دارد چون حرکت حفره وابسته به حرکت الکترون و سرعت حرکت حفره کمتر از سرعت حرکت الکترون است پس نتیجه می‌گیریم چون بار الکتریکی یکسان دارند پس جرم حفره بیشتر از الکترون است

μ_n تابع حرکت الکترون μ_p تابع حرکت حفره $\boxed{\mu_n > \mu_p}$

نیمه‌هادی ذاتی (intrinsic semiconductor)

در صورتی که در ساختار یک نیمه‌هادی خالص تنها اتم‌های هم (0) اماده وجود داشته باشد و هیچ گونه نقص ساختاری نداشته باشیم در این نیمه‌هادی ذاتی می‌گوییم

در نیمه‌هادی ذاتی الکترون آزاد وجود دارد و لازم است هدایت غالب نوار ظرفیت پر است

هر چه کرما را افزایش دهیم از حالت عایقی خارج می‌شود الکترون بیشتری آزاد می‌شود حفره بیشتری جا می‌گذارد

در نیمه‌هادی ذاتی n افزایش دهانیون‌های بیشتری شکسته شده جفت الکترون حفره‌های بیشتری ایجاد می‌شود

h^+ e^-

تعداد حامل‌های ذاتی متناسب با این نوع نیمه‌هادی را با $\boxed{n_i}$ نمایش می‌دهند

intrinsic (ذاتی)

$\boxed{n_i = n = p}$

n: تعداد الکترون‌ها ✓

p: تعداد حفره‌ها ✓

چون کرما الکترون به وجود می‌آورد همان لحظه حفره هم به وجود می‌آید

Subject :
Year. Month.

نیمه‌هادی در صفر کلوین مثل عایق است

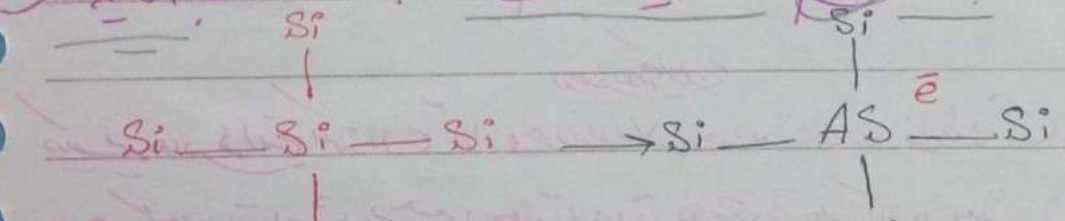
* نیمه‌هادی غیرذاتی:

در ساختار یک نیمه‌هادی (مانند Si) می‌توان با وارد کردن اتم‌های ناخالصی حامل‌های اضافی ایجاد کرد. این فرآیند آلایش نامیده می‌شود و رایج‌ترین راه برای افزایش رسانایی نیمه‌هادی‌هاست

اگر ما تغییر بدهیم تمام خواص الکتریکی مقاومت و ... تغییر می‌کند پس از آلایش استفاده می‌کنیم پس یک سری مدارهای شبیه صورت می‌گیرد

بسته به نوع ناخالصی که می‌توان وارد شبکه بلور نیمه‌هادی کرد دو نوع فرآیند آلایش قابل تصور است

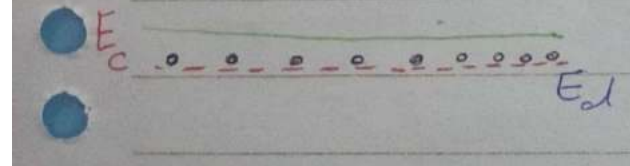
1) اگر ناخالصی از گروه پنجم جدول تناوبی باشد (مانند فسفر، آرسنیک) وارد ساختار نیمه‌هادی مانند سیلیکون شود در ازای هر اتم ناخالصی یک الکترون آزاد در ساختار شبکه‌ی نیمه‌هادی اضافه می‌شود



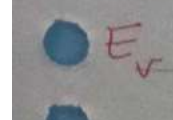
در ازای هر اتم As یک الکترون آزاد با بار منفی وارد شبکه‌ی نیمه‌هادی سیلیکون می‌شود چون خود متناظر با آن وجود دارد پس یک الکترون داریم

در این نوع ناخالصی دهنده یا $\boxed{\text{Donor}}$ گفته می‌شود و تعداد اتم‌های ناخالصی دهنده با N_D نشان می‌دهند

وقتی ناخالصی دهنده وارد ساختار نیمه‌هادی می‌شود یک تراز انرژی در شکاف انرژی Si در بالا شکل زیر ایجاد می‌شود



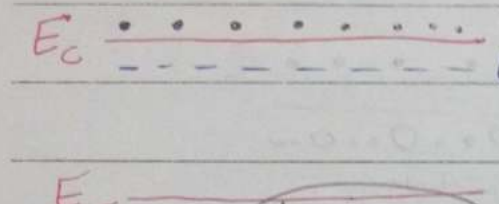
یکی از پیوندهای Si تغییر کرده و می‌ماند هنوز همان Si است شکاف انرژی آن تغییر نکرده است وقتی ناخالصی دهنده داریم این E_d در صفر درجه کلوین پر از الکترون است



در صفر درجه کلوین

Subject :
Year. Month.

زمانی که در صفر درجه کلوین هستیم همانا اتراپش می‌دهیم ابتدا اتم‌های ناخالصی در لایه هدایت می‌روند
و بعد الکترون‌های نوار ظرفیت چون الکترون‌ها موجود در E_d فاصله‌ی کمتری تا لبه‌ی لایه هدایت
تا الکترون‌های موجود در نوار ظرفیت



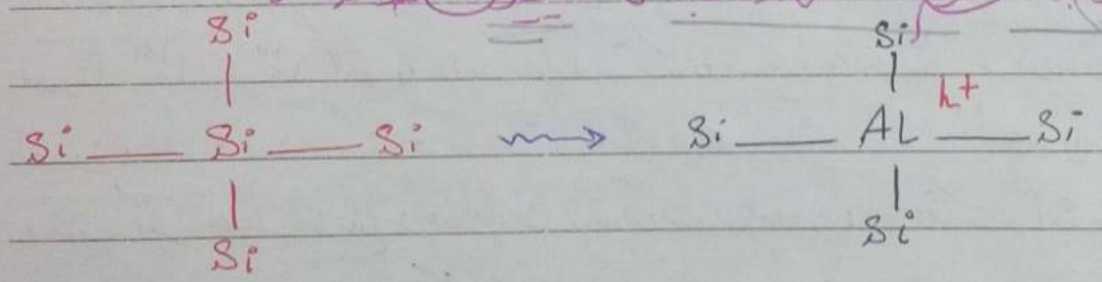
الکترون‌ها را می‌دهیم

اتراپش‌ها:

رها شدن الکترون اتم ناخالصی در اثر اتراپش‌ها یونیزاسیون گفته می‌شود که در اثر آن
یک الکترون آزاد و یک اتم ناخالصی As^+ به وجود می‌آید

یعنی اتمی داریم که چون یک الکترون از دست داده است As^+ شده است چون یون است
نمی‌تواند حرکت کند و با حفره متفاوت است

۲) اگر از اتم‌های عناصر گروه ۳ جدول تناوبی مانند بور، آلومینیوم، گالیوم (Ga، AL، B) به عنوان ناخالصی استفاده
کنیم یک حفره به ازای هر اتم ناخالصی وارد شبکه‌ی سیلیکون ظاهر شد

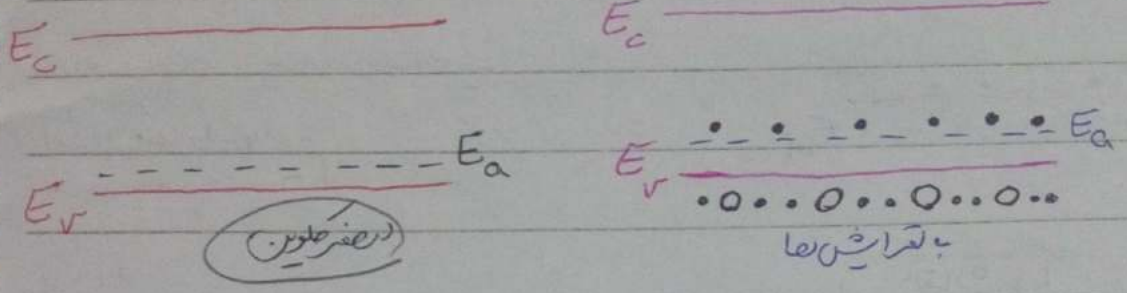


AL یک اتم سه ظرفیتی است چون ۳ تا الکترون داریم پس یک الکترون حفره اضافی برای
آن در نظر می‌گیریم پس به اتمی AL ما h^+ داریم

به این نوع ناخالصی گیرنده یا Acceptor گفته می‌شود و تعداد اتم‌های ناخالصی گیرنده را با
N_A نمایش می‌دهند

Subject :
Year. Month.

با اضافه شدن ناخالصی گیرنده در ساختار نیمه‌هادی Si یک تراز انرژی در شکاف انرژی Si به شکل زیر ایجاد می‌شود



در این حالت حفره‌هایی که باقی می‌ماند در رسانش شرکت کنند چون در این حالت الکترون‌ها از E_a به E_v می‌روند پس حفره‌های باقی مانده در رسانش شرکت کنند

E_a و E_c یک سطح انرژی فرضی هستند در رسانش نقشی ندارند

زمانی که ما در دمای اتاق یا ۳۰۰ درجه کلوین قرار داریم

مستقل از نوع ناخالصی افزوده شده به شبکه‌ی Si همواره تعداد حامل‌های (الکترون یا حفره) تعداد حامل آزاد شبکه‌ی ماده در دمای اتاق $T=300K$ وابسته به اتم‌های ناخالصی است معمولاً 10^{15} تا 10^{17} اتم ناخالصی افزوده شبکه‌ی سیلیکون می‌شود در دمای اتاق تعداد الکترون‌های حفره‌هایی که به صورت ذاتی به وجود آمده از $1.5\times10^{10}\ cm^{-3}$ می‌باشد

در نتیجه اگر ناخالصی از نوع دهنده باشد تعداد الکترون‌های آزاد شبکه‌ی Si برابر با تعداد اتم‌های ناخالصی (N_D) و اگر ناخالصی از نوع گیرنده باشد تعداد حفره‌های ساختار نیمه‌هادی برابر با تعداد اتم‌های ناخالصی (N_A) خواهد بود

مثلاً $N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$ $N_A = 5\times10^{17}\ cm^{-3}$

اشکال مهم

(پس معمولاً N_A و N_D در مقدار بسیار کوچکتر از 10^{15} تا 10^{17} پس نقش N_A و N_D حذف می‌شود)

در نیمه‌هادی ناخالص شده با اتم دهنده الکترون‌ها حامل اکثریت حفره‌ها حامل اقلیت هستند

Subject :
Year. Month.

در این شرایط به این نوع نیمه هادی، نیمه هادی نوع n گفته می شود

در نیمه هادی ناخالص شده با اتم های گیرنده اکثریت (حفره ها) حامل اکثریت و اکثریت حامل اقلیت خواهند بود در این نوع نیمه هادی نوع P می گوییم

در نیمه هادی نوع n: $n_0 = N_D$ تعداد الکترون ها $\quad P_0 << n_0$

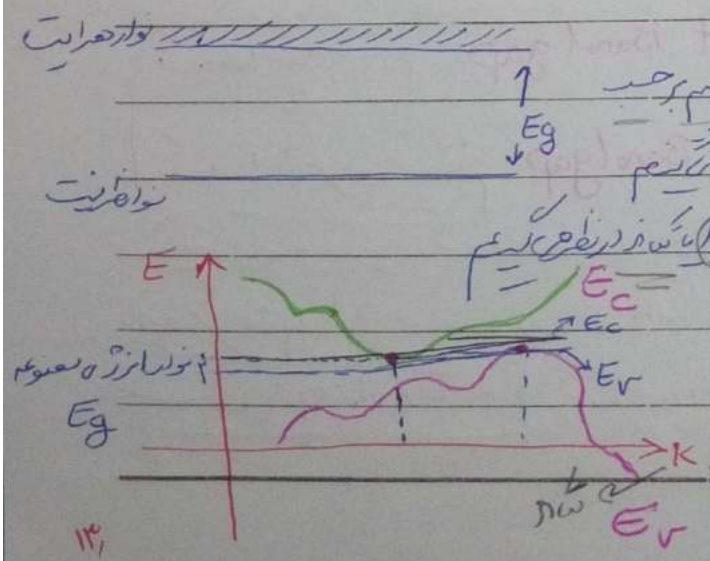
در نیمه هادی نوع P: $P_0 = N_A$ تعداد حفره ها $\quad n_0 << P_0$

از بین رفتن حفره یعنی به حالت تعادل رسیده است

* جرم مؤثر (Effective Mass)

در اثر حرکت حامل بار در ساختار شبکه ماده نیروهای جاذبه و دافعه از اطراف به آن وارد می شود در نتیجه سرعت حرکت آن نسبت به حرکت در خلاء آزاد تغییر می کند این تغییر سرعت را با تغییر جرم نسبت می دهیم و می گوییم جرم حامل تغییر کرده است

برای بدست آوردن مقدار جرم مؤثر لازم است نگاهی دقیق تر به وضعیت نوارهای انرژی نیمه هادی بیندازیم



$P = mv$

همین ضرب جرم در سرعت می شود تکانه و برای این که ذره بتوانیم برحسب جرم است نه برحسب سرعت پس از تکانه استفاده می کنیم

تا جرم در محور عمودی با E در نظر می گیریم و محور افقی را با K تکانه در نظر می گیریم

به دلیل تغییرات K مخصوص ها ثابت نیست انحنا دارند

منحنی انرژی حامل ها برحسب تکانه (E-K)

Subject: انرژی را هم قسم گوییم
Year. — Month.

☆ آن‌هایی که تغییرات انرژی با تغییرات مقدار k هم‌راستا نیم‌هادی شکاف

اگر حامل در نوار ظرفیت باشد ستش بالا k پس بالاترین سطح انرژی

اگر حامل در نوار هدایت باشد ستش پایین k پایین سطح انرژی ما می‌توانیم هر یک حامل یا یک اکسیتون

می‌توانیم نسبت دهیم - نیم‌هادی شکاف انرژی غیرمستقیم

k برای نوار انرژی متفاوت است

در یک شبکه k همواره ثابت نیست چون k متغیر زمان است یک حامل می‌تواند گذشت

زمان در جاهای مختلف قرار بگیرد

تغییرات تکانه در صورت تغییرات گرمایی

☆ اما یک دسته از نوار k هایی هم می‌افتند max و min وقتی حامل انرژی از دست می‌دهد

k تغییر نمی‌کند با تغییرات شبکه در صورت نور پرتو می‌شود - در این گونه مواد

GAAS نیم‌هادی ترکیبی

برای لیزر استفاده می‌شود - نیم‌هادی مستقیم

نیم‌هادی با نوار انرژی مستقیم

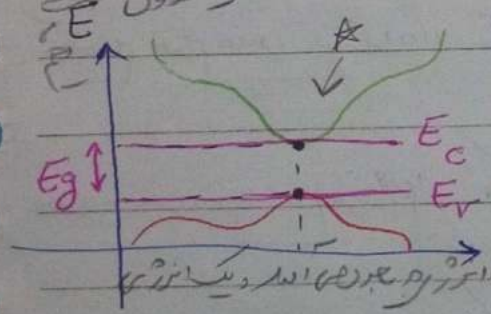
$$E_g = hf = h\frac{c}{\lambda}$$

h ثابت پلانک، c سرعت نور، λ طول موج

طول موج رنگی را می‌دهد سه هفت سبز زرد

عدم تغییرات تکانه یعنی عدم تلفات گرمایی

انرژی که کوانتوم می‌گیرد



یک حامل می‌خواهد نوارهای انرژی را بپرد از نوار ظرفیت برود به نوار هدایت

باید انرژی از دست بدهد و از دست دادن انرژی جفت‌شان با تغییرات تکانه

صورت می‌گیرد و تغییرات تکانه هم جای تغییرات مکانی که خود یک k انرژی را جابه‌جا می‌کند و یک انرژی

آزاد می‌کند

توضیح شکل پیوست بین

شکاف انرژی مستقیم Direct Band gap

شکاف انرژی غیرمستقیم indirect Band gap

سیلیکون با فرایند شکاف انرژی) بزرگی دارد

رابطه‌ی جرم مؤثر به صورت زیر به دست می‌آید m^*

مشتق دوم میزان تقعر منحنی را به ما می‌دهد

$$m^* = \frac{\hbar^2}{\frac{\partial^2 E}{\partial k^2}}$$

h کراس

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

ثابت پلانک

Subject :
Year. Month. شنبه

هرچه قدر تقعر منحنی $\frac{\partial^2 E}{\partial k^2}$ در نقاط مینیمم و ماکسیمم آن کمتر باشد مفهوم کسر بزرگتری شود پس جرم مؤثر کاهش می‌یابد؟ بیشتر باشد

* تابع توزیع دیراک: (Fermi-Dirac Function) خوانده شود

تابع دستیابی به مجاز

این تابع احتمال پیدا کردن هر حامل در دمای T درجه کلوین با احتمال سطح انرژی E را می‌دهد

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

k ثابت بولتزمن، T دما (برحسب کلوین)

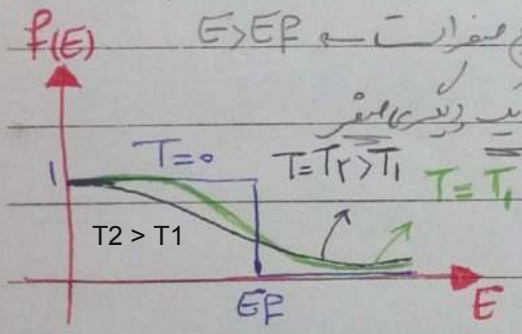
$$\boxed{k = 1.38\times10^{-23}\ J/K}$$ ژول بر درجه کلوین

E_F سطح انرژی فرمی نامیده می‌شود و معادل انرژی است که احتمال قرار گرفتن حامل در این سطح انرژی $1/2$ است

$$f(E) = \frac{1}{1+e^{\frac{E-E_F}{kT}}} = \frac{1}{1+e^{\frac{E_F-E_F}{kT}}} = \frac{1}{1+e^{0}} = \frac{1}{1+1} = 1/2$$

تابع فرمی دیراک به صورت زیر رسم می‌شود اگر $T=0$ مخرج صفر است ← $E>E_F$

(a را صفر کلوین در نظر می‌گیریم ← در حالت جامد بعید است یک درجه دیگری صفر)



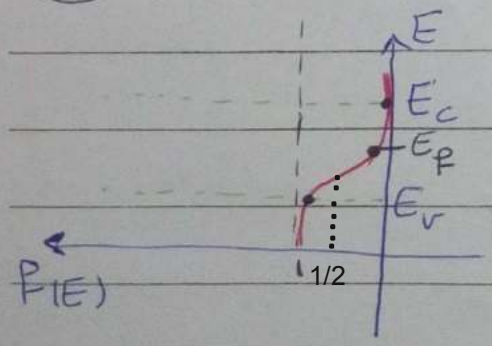
اگر E بزرگتر باشد از E_F $f(E) = e^{+\infty} = 0$

اگر E کوچکتر باشد از E_F مقدار $E-E_F$ منفی می‌شود

$e^{-\infty} = \frac{1}{e^{\infty}}$ توان یک عدد منفی

$f(E)$ در شکل پس برای سه دمای مختلف T_0 و T_1 و T_2 رسم شده است که برای این سه دما داریم

$T_2 > T_1 > T_{=0}$

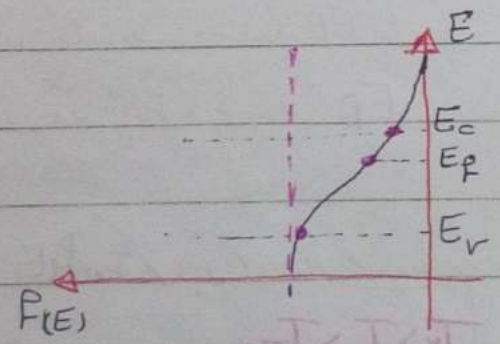


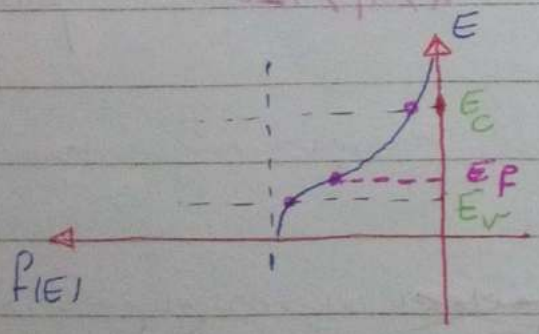
نقطه 90 درجه شکل بالا چرا هاشم

می‌خواهیم تابع فرمی دیراک را

Subject :
Year. Month.

F(E) احتمال وجود الکترون را به ما می‌دهد، 1-F(E) احتمال بودن حفره‌ها را به ما می‌دهد





Subject :
Year. Month.

نوارهای انرژی نیمه هادی ناخالص شده با عناصر گروه پنجم، عناصر گروه سوم، نیمه هادی ذاتی و چگونه

نیمه هادی نوع n — نیمه هادی نوع p — E_F

E_c — E_F — E_v — E_c — E_F — E_v

ذاتی — E_c — $E_F = E_i$ → ذاتی — E_v

محاسبه تراکم حامل ها: برای محاسبه تراکم چگالی الکترون در نوار رسانش می توان نوشت

$$n_0 = \int_{E_c}^{\infty} f(E)\, N(E)\, dE$$

احتمال اشغال یک سطح انرژی خاص — تعداد حالت های در دسترس — کمی تولانس در سطح E وجود داشته باشد

که بیان رابطه N(E) چگالی حالت های است که الکترون می تواند از آن هدایت اشغال کند

از این صفر حالت تبادل نشان می دهد

$f(E)$ از E_c به بالا به سرعت افت می کند به همین دلیل با تقریب خوبی رابطه قبلی به شکل زیر ساده تر می شود

$$\boxed{n_0 = N_c\, f(E_c)}$$ → احتمال حضور الکترون ها در نوار هدایت

$$n_0 = N_c \frac{1}{1+e^{\frac{E_c - E_F}{KT}}}$$

اگر حضور الکترون ها نشود می شود همان های اتمی

حال اگر اون مقدار q یک بار e اضافه کنیم

$$\frac{KT}{q} = 26\,mV \longrightarrow KT = 26\,meV$$

کم می شود meV الکترون ولت

SINA

Subject :
Year. Month.

هم چنین داریم $E_C - E_F > KT$ (چند برابر) و همین دلیل می‌توان رابطه قبل را با فرم ساده‌تر کرد

تعداد حامل‌های الکترون در نیم‌هادی

$$n_0 = N_C e^{-\frac{(E_C - E_F)}{KT}}$$ ★✓

E_F سطح فرمی که وابسته به افزایش ناخالصی است تعداد حامل‌های اکثریت و اقلیت تغییر می‌کند

جرم موثر الکترون

چگالی حالت‌های الکترون N_C از رابطه زیر به دست می‌آید

$$N_C = 2\left(\frac{2\pi m_n^* KT}{h^2}\right)^{3/2}$$

ثابت پلانک

در این رابطه m_n^* جرم موثر الکترون است

به روش مشابه می‌توان تراکم حفره‌ها را در نوار ظرفیت به دست آورد

چگالی حالت

$$P_0 = N_V (1 - f(E_V))$$

تعداد حفره‌ها در حالت تعادل

برای حفره‌ها همواره $1-f$ را به دست می‌آوریم

$$P_0 = N_V \left[1 - \frac{1}{1+e^{\frac{E_V - E_F}{KT}}}\right]$$

$$= N_V \left(\frac{e^{\frac{E_V - E_F}{KT}}}{1+e^{\frac{E_V - E_F}{KT}}}\right) \rightsquigarrow P_0 = N_V e^{\frac{(E_V - E_F)}{KT}}$$ ★★

در این حالت جمله نمایی موجود در مخرج در مقابل یک جزئی کوچک است چون $e^{-\infty}$ می‌شود صفر پس

لذا آن صرف نظر می‌کنیم

$$e^{-\infty} = 0$$

چگالی حالت‌های نوار ظرفیت نیز از رابطه مقابل محاسبه می‌شود

$$N_V = 2\left(\frac{2\pi m_p^* KT}{h^2}\right)^{3/2}$$

Subject :
Year. Month.

هرچه مقدار E_F به E_c نزدیکتر باشد به طبع مقدار E_v بیشتر می‌شود

E_F اگر به E_v نزدیک شود تراکم حفره‌ها زیاد می‌شود و تراکم الکترون‌ها کم‌تر است.

اگر نیمه‌هادی ذاتی باشد آن‌گاه E_F در وسط قرار دارد

نکته: اگر در رابطه ★ و ★★ برای یک نیمه‌هادی مستقل از ذاتی یا غیرذاتی بودن نیمه‌هادی است.

★ وضعیت ذاتی بودن نیمه‌هادی سطح انرژی E_F در وسط شکاف انرژی قرار می‌گیرد

در این حالت E_F را با E_i نشان می‌دهیم

(ذاتی) intrinsic

$$n_0 = N_c e^{-\frac{(E_c - E_i)}{KT}}$$

$$\rightarrow \boxed{n_0 p_0 = n_i^2}$$

$$P_0 = N_v e^{\frac{E_v - E_i}{KT}}$$

این تنها حالتی است که می‌تواند دو عبارت برابر باشد

N_v از N_c بزرگ‌تر است چون جرم مؤثر حفره بیشتر از الکترون است

نکته: مستقل از این که نوع و مقدار ناخالصی نیمه‌هادی به صورتی که شرایط تعادل برقرار باشد حاصل ضرب $n_0 p_0$ مقدار ثابتی است

دمای ثابت

$$n_0 p_0 = N_c e^{-\frac{(E_c - E_F)}{KT}} \times N_v e^{\frac{E_v - E_F}{KT}} = N_c N_v e^{-\frac{(E_c - E_v)}{KT}}$$

$$= \boxed{N_c N_v e^{-E_g/KT}} = n_i^2$$

E_F ها با هم می‌روند

SINA

Subject :
Year. Month.

هرچه Eg کوچکتر شود عایق تر می شود حاصل ضرب حامل ها کمتر می شود حرکت و رسانایی کمتر

پس در حالت کلی $\boxed{n_0 p_0 = n_i^2}$

در حالت ذاتی $n_0 = p_0$ است و با E_i همیشه در نیم هادی ذاتی دقیقاً وسط قرار می گیرد

در صورتی که ناخالصی دهنده در نیم هادی اضافه شود نیم هادی n_{type} در نظر گرفته می شود

گروه پنجم

چون E_F به E_c نزدیکتر است وقتی ناخالصی اضافه می کنیم یک گرما دیگری چیزی ناخالصی دهنده های محیط موثر است

چون غالب است بر اثر گرما هر چه ناخالصی آید در نیم هادی جوان مقدار هم الکترون آزاد داریم

$\boxed{n_0 = N_D}$ الکترون های اکثریت

$p_0 = \frac{n_i^2}{N_D}$ → حفره های اقلیت

اگر ناخالصی گیرنده در نیم هادی افزوده شود نیم هادی p_{type} خواهد بود داریم

$\boxed{p_0 = N_A}$ → حفره های اکثریت

$\boxed{n_0 = \frac{n_i^2}{N_A}}$ → الکترون های اقلیت

برای سادگی محاسبه چگالی الکترون e^- حفره h^+ روابط زیر غیر قابل استفاده هستند

$$\boxed{n_0 = n_i e^{\frac{E_F - E_i}{KT}}} \qquad \boxed{p_0 = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{KT}}}$$

* با فرض نیم هادی سیلیکن در دمای اتاق اگر ناخالصی نفوذ با چگالی $N_D = 10^{17} cm^{-3}$ بر آن اضافه شده باشد چگالی حامل های اکثریت و اقلیت و نیز مقدار حرکت از صفحه انرژی فرمی را

Subject :
Year. Month.

$n_i = 1.5 \times 10^{10}\ cm^{-3}$ $E_g = 1.12\ eV$ تعیین کنید؟

حامل اکثریت الکترون - ناخالصی دهنده

حامل اقلیت حفره‌ها - E_F نزدیک به E_c حامل اکثریت $n_0 = N_D = 10^{17}\ cm^{-3}$

$$\text{حامل اقلیت}\ p_0 = \frac{n_i^2}{N_D} = \frac{n_i^2}{n_0} = \frac{(1.5\times10^{10})^2}{10^{17}} = 2250$$

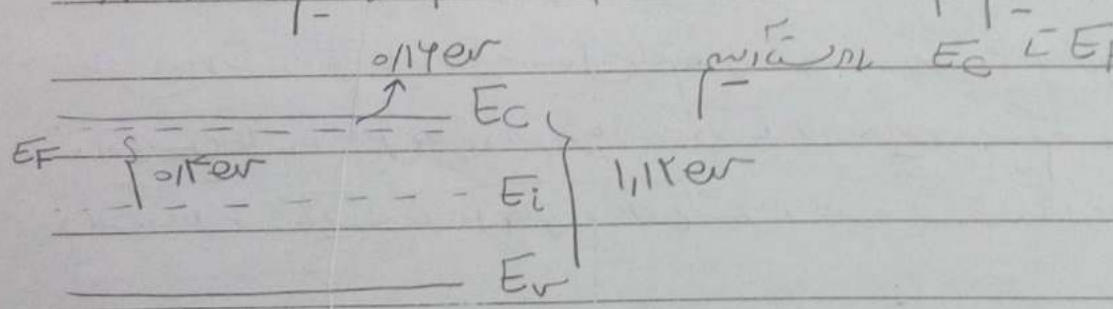
فاصله E_F و E_c چقدر است با توجه به اطلاعات صورت مسئله و داده‌های N_c و N_v داده بود از روابط زیر استفاده می‌کنیم و می

$$n_0 = n_i\, e^{\frac{E_F - E_i}{KT}} \rightsquigarrow 10^{17} = 1.5\times10^{10} \times e^{\frac{E_F - E_i}{0.026}}$$

$$E_F - E_i = 0.026\, Ln\left(\frac{10^{17}}{1.5\times10^{10}}\right) \rightsquigarrow E_F - E_i = 0.4\ eV$$

ابتدا باید 1.12 را دو تقسیم کنیم 0.56eV آن‌گاه فاصله $E_F - E_i$ را بدست آمده 0.4 شده

پس فاصله E_F تا E_c را بدست آوریم



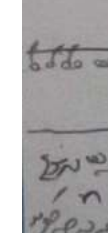
وابستگی چگالی حامل‌ها: نیمه‌رسانای نوع n

در صورتی که چگالی نیمه‌رسانای خالص باشد ابتدا الکترون‌هایی که انرژی کمتری

احتیاج دارند که به نوار هدایت برسند ابتدا الکترون‌هایی که در E_F قرار دارند هستند که مربوط

به اتم‌های ناخالصی هستند زیرا رها شوند اتم خنثی الکترون از دست می‌دهد و یون

می‌شود As^+ و P^+ و در دمای پایین



نیمه‌رسانای n صعود چگالی حامل‌ها

متراکم این الکترون‌ها 10^{16} و 10^{17} و $10^{18}\ cm^{-3}$ است. که الکترون آزاد در ساختار شبکه

رها می‌شود ناخالصی دهنده است که تعداد الکترون‌های آزاد تأثیر می‌گذارد

SINA

Subject :
Year. Month.

اتراشیش ها یک سری بر اثر شکسته شدن پیوندهای بدست می آید اتراشیش پیدا می کند
که از نوار ظرفیت می رود به نوار هدایت

تعداد آن ها از تعداد اکتریون های ناخالصی کمتر است. در تعداد NA زیاد می شود
آن تعداد های بالایی بهم که باعث صورت اثر ناخالصی از بین می رود

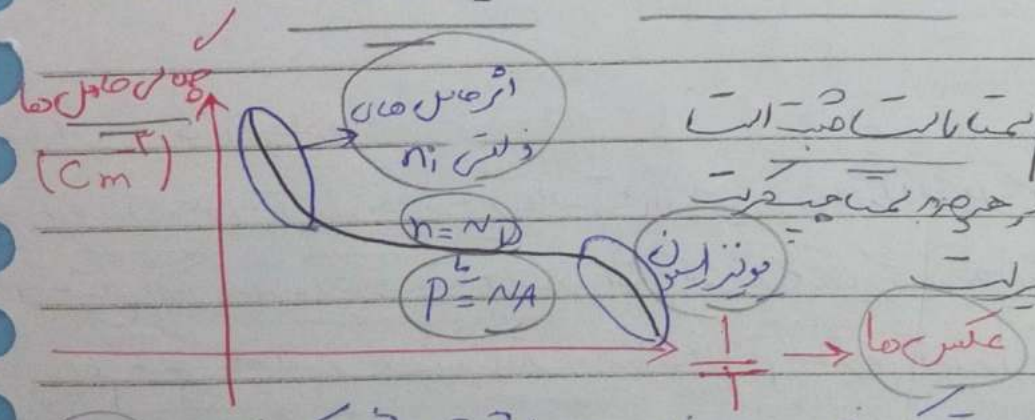
رابطه تعداد حامل های ذاتی به شکل زیر می باشد

$$n_i^2 = N_c N_v e^{-E_g/KT} = 4\left(\frac{2\pi m_n^* KT}{h^2}\right)^{3/2}\left(\frac{2\pi m_p^* KT}{h^2}\right)^{3/2}$$

$$e^{-E_g/KT} \rightsquigarrow n_i = 2\left(\frac{2\pi m_n^* KT}{h^2}\right)^{3/4}\left(\frac{2\pi m_p^* KT}{h^2}\right)^{3/4}$$

اثر دما به صورت افزاینده است .
هم در جمله نمایی و هم عبارات بالا

$e^{-E_g/KT}$ تغییرات غذایی خودشان با بیشتر شان می دهند تا تغییرات توانی
به حالت کمی اتراشیش ها بر مبنای اتراشیش n_i یعنی اتراشیش حامل های ذاتی
به صورتی که ناخالصی در ساختار شبکه نیمه هادی افزوده شده باشد در دماهای پایین حامل
های ایجاد شده توسط یونیزاسیون اتم های ناخالصی نقش غالب را خواهند داشت
با اتراشیش ها تعداد حامل های ذاتی زیاد می شود تا در دماهایی برسیم که تعداد حامل های
ذاتی قابل مقایسه با حامل های ناخالصی شده و حتی بیشتر از آن ها شود



زمانی که $\frac{1}{T}$ دارای بیشترین مقدار است مثبت است
ابتدا تعریف می شود هر چه دما بیشتر است
کمیت متغیر در حال تغییر است

در صفحه بعد این حالت که نمودار نمایی خالص داشته باشد که نمودار نمایی دما
بین یونیزاسیون تا اثر حامل های ذاتی n_i باشد

① جلسه آخر

Subject :
Year. Month.

* پایش حامل ها در اثر میدان الکتریکی: (drift)

اگر به الکترون میدان الکتریکی اعمال نکنیم آنگاه الکترون همان حرکت کاتوره ای خود را انجام می دهد

الکترون در خلاف جهت میدان حرکت می کند حفره ها در جهت میدان حرکت می کنند

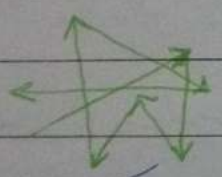
اگر یک نیم هادی نیمه رسانا را با یک خط تیغه ای پیمایش ؟؟؟ خیر چون مدار شامل تعداد اتم هاست
اتم ها با پیوند ها جنبش بلندبرد در موقعیت جابجایی مختصری بلند پس الکترون با این ها برخورد می کند

در حالت کلی برخورد ها صورت می گیرد الکترون حرکت برآیند را در جهت میدان انجام می دهد

سرعت حرکت کاهش می یابد نسبت به حالتی که همان الکترون (در خلاء) حرکت می کند

تمایل به حرکت بسته به میدان ناخالصی دارد ... است

حرکت حامل های با دلیل ختار شبکه نیمه هادی بدون اعمال میدان خارجی بصورت تصادفی
است، هیچ جهت برآیند خاصی را نمی توان برای آن متصور شد



در صورتی که میدان اعمال شود در هر حامل (الکترون یا حفره) نیروی وارد می شود
و آن را در جهت خاصی حرکت خواهد داد. اما این حرکت مشابه حرکت حامل در (الکترون)
در فضای آزاد به صورت خط تیغه ای نیست. دلیل آن وجود اتم های ماده سیلیکن، اتم
های ناخالصی و جنبش های اتمی است که باعث انحراف حرکت حامل می شود

یعنی حرکت کاتوره ای

* زمان توسط حامل بوجود دهنده حامل با شبکه ماده (یا زمان آزاد میانگین) با τ نشان داده

SINA

Subject :
Year. Month.

می‌شود

بطوریکه سیگنال جریان ناخالصی شفن و همان سیستم جریان بر حرکت دهنده زمان متوسط بین آن‌ها متفاوت خواهد بود

با توجه به مقدار $\bar{t}$ و هم چنین جرم مؤثر حامل پارامتری به عنوان جریان تحرک‌پذیری یا قابلیت حرکت برای حامل تعریف می‌شود که آن را با μ نشان می‌دهیم

μ (mobility)

برای الکترون μ_n و برای حفره μ_p در نظر گرفته می‌شود

$$\boxed{\mu_n = \frac{q\bar{t}}{m_n^*}} \qquad \boxed{\mu_p = \frac{q\bar{t}}{m_p^*}}$$

جریان ناخالصی یکسان همان برابر μ_n با درجه بیشتر از μ_p باشد چون جرم مؤثر الکترون کمتر از حفره است و

در شرایط یکسان قابلیت حرکت الکترون بیشتر از حفره است برای مثال در همان اتاق در یک نیمه‌هادی زنیتی $\mu_n = 1350 \frac{cm^2}{V-S}$ و $\mu_p = 450$ می‌باشد

ثانیه ← ولت

جریان رسانایی (σ) کل حرکت‌های بار یک الکترون بود nq می‌شود که بار

تعداد الکترون‌ها — بار الکتریکی

با توجه به مقدار سوبلیته حامل می‌توان جریان رسانایی نیمه‌هادی را تعیین کرد

$\boxed{\sigma = pq\mu_p}$ → برای حفره

$\sigma = nq\mu_n$ → برای الکترون

SINA

Subject:
Year. Month.

$J = \sigma E$ به صورت اعمال میدان الکتریکی در نیمه‌هایی چگالی جریان ایجاد شده برابر آن خواهد بود.

$J_n = \sigma_n \bar{E} = nq\mu_n \bar{E}$ → چون E جهت سرعت

$J_p = \sigma_p \bar{E} = pq\mu_p \bar{E}$

در حالت کلی چون هم حفره داریم و هم الکترون پس چگالی جریان کل در یک نیمه‌هادی نابجا زیر به دست می‌آید

تعداد الکترون — تعداد حفره

$J_{drift} = J = J_n + J_p = nq\mu_n \bar{E} + pq\mu_p \bar{E}$ → میدان خارجی

تعداد الکترون و حفره‌ها باید سر میدان ناخالصی تعیین می‌شود چون حفره‌ها در جهت میدان و الکترون‌ها در خلاف جهت میدان حرکت می‌کنند. برای الکترون عکس جهت آن در نظر می‌گیریم

این نابجا برای نیمه‌هادی ذاتی در نظر گرفته می‌شود و حتی اگر نیمه‌هادی ناخالص شده باشد یکی از این دو جمله غالب خواهد بود

برای نیمه‌هادی نوع n → $J = nq\mu_n E$ → $\sigma = nq\mu_n$

برای نیمه‌هادی نوع p → $J = pq\mu_p E$ → $\sigma = pq\mu_p$

* رسانندگی و مقاومت ویژه:

مقاومت ویژه هر ماده با رسانندگی آن به صورت زیر به هم مرتبط می‌شوند

$$\rho = \frac{1}{\sigma}$$

$$\rho = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p}$$

در حالتی که ماده ناخالص شده باشه یکی از دوجمله مخرج حذف میشه .

Subject :
Year. Month.

مقاومت یک قطعه سیلیکون به طول L و سطح مقطع A از رابطه $R=\rho\frac{L}{A}$ تعیین می‌شود
پس مقاومت سیلیکون بایستی به چگالی ناخالصی آن از رابطه

$$R=\frac{L}{(nq\mu_n+pq\mu_p)A}$$

بدست می‌آید

✓ ★ از یک قطعه نیمه‌هادی n_{12} استوانه‌ای شکل به طول 10cm و سطح مقطع $0.5cm^2$ تحت ولتاژ 2 ولت جریان 1mA عبور کند. الف) چگالی حامل‌های اکثریت را تعیین این نیمه‌هادی بدست آورید ب) چه نوع ناخالصی چه مقدار از آن به این نیمه‌هادی اضافه شود تا تحت ولتاژ قبلی جریان 0.5mA از آن عبور کند؟

$n_i=1.5\times10^{10}\ cm^{-3}$

$\mu_n=900\ \frac{cm^2}{V\text{-}sec}$ $\mu_p=400\ \frac{cm^2}{V\text{-}sec}$ عددی این که داده می‌شود $\frac{cm^2}{V\text{-}s}$ است پس نگران نیستیم cm^2 و m با تبدیل کنیم خودشان با هم می‌رسیم

الف) $R=\frac{V}{I}=\frac{2V}{1mA}=2k\Omega$ $\rho=R\frac{A}{L}=2k\Omega\times\frac{0.5}{10}=100$

$\rho=100\ (\Omega\text{-}cm)$ $\sigma=\frac{1}{\rho}=nq\mu_n=10^{-2}$ $n=\frac{10^{-2}}{q\mu_n}=\frac{10^{-2}}{1.6\times10^{-19}\times900}$

چون نیمه رسانا نوع n پس : n >> p به همین خاطر
از این رابطه استفاده کردی .

$n=6.94\times10^{14}\ cm^{-3}$ $n=N_D$ $P_n=\frac{n_i^2}{N_D}=\frac{(1.5\times10^{10})^2}{6.94\times10^{14}}=$

$P_n=3.2\times10^{2}\ cm^{-3}$

ب) با اضافه کردن ناخالصی p که عکس n است * تا وقتی برابر بیشتر p برابر بیشتر σ نصف شود یعنی n نصف شود یعنی نصف کردن حامل اکثریت یا نصف کردن اتم‌های ناخالصی که وارد شده بود

$R=\frac{V}{I}=\frac{2}{0.5}=4k\Omega$ $\rho=R\frac{A}{L}=4000\times\frac{0.5}{10}=200\ \Omega.cm$

$\sigma=\frac{1}{\rho}=\frac{1}{200}\Rightarrow pq\mu_p=\frac{1}{200}$

p را بدست آورده و اختلاف آن با n در نظر می‌گیریم

SINA

دوشنبه ۱۳/۱

Subject :
Year. Month.

(۱)

فیزیک ۱۱۴

* خنثی بودن بار فضایی: در هسته‌ی یک نیمه‌هادی از نظر الکتریکی در استاتیکی در حالت تعادل شرایط خنثی بودن برقرار است یعنی مجموع بارهای مثبت (حفره‌ها و یون‌های مثبت که همان ناخالصی نوع گیرنده یونیزه شده باشند تبدیل شوند به بار مثبت) برابر با مجموع بارهای منفی (الکترون‌ها و یون‌های منفی که همان ناخالصی نوع دهنده یونیزه شده باشند تبدیل شوند به بار منفی) می‌باشد

GA, AL

علامت + و - که بالای عبارت قرار داریم یعنی یونیزه است

$$\boxed{P_0 + N_d^+ = n_0 + N_a^-}$$

تعداد یون‌های دهنده الکترون — تعداد یون‌های گیرنده الکترون

در شرایطی که نیمه‌هادی یا یکی از دو نوع ناخالصی دهنده یا گیرنده ناخالصی شده باشد می‌توان از تعداد الکترون‌ها یا حفره‌ها صرف نظر کرد یعنی

$$\begin{cases} n_0 = N_d^+ - N_a^- \\ P_0 = N_a^- - N_d^+ \end{cases}$$

از -Na میتونی صرف نظر کنی

از -nd میتونی صرف نظر کنی

* اثرهای ناخالصی‌ها بر حرکت حامل‌ها:

فرض می‌کنیم در دمای پایین که جنبش انرژی کم است ناخالصی دهنده اتم‌های منفرد در ساختار نیمه‌هادی بوده یونیزه شده که تبدیل شده به P^+ اگر الکترون تزریق یکی از P^+ نزدیک به صفر در بین آن‌ها برقرار می‌شود پس سرعت حرکت حامل در صورت اضافه کردن ناخالصی کم می‌شود زمانی که دما بالا می‌رود هرچه دما افزایش پیدا کند جنبش مولکولی بیشتر می‌شود احتمال برخورد الکترون با اتم‌های اطرافش بیشتر می‌شود که تأثیر می‌گذارد بر سرعت

در دماهای پایین بر عکس است چون ناخالصی در شبکه نیمه‌هادی سرعت حرکت حامل را استخوش تغییر می‌شود هرچه تعداد دما پایین‌تر باشد تأثیر اتم‌های یونیزه شده ناخالصی بر حرکت حامل بیشتر است - خود حامل با سرعت کم‌تری حرکت می‌کند چون - پایین احتمال بیشتری پیدا می‌کند توسط اتم‌های یونیزه شده - این پدیده را اثر ناخالصی یا (Impurity Scattering)

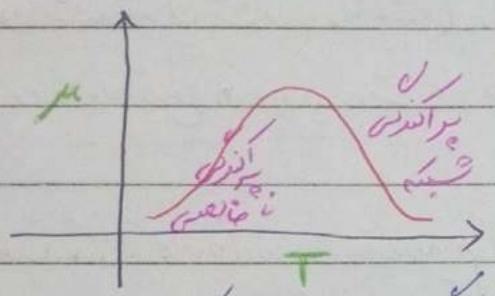
μ_I

SINA

Subject :
Year. Month.

* جلسه‌ی سه‌شنبه ۲ تا ۱۲ (۹۵/۱/۳۱)
میان‌ترم سه‌شنبه ۲ تا ۱۲ (۹۵/۲/۷)

با افزایش دما به تدریج اثر پراکندگی برلین بوردر با اتم‌های شبکه‌ی سیلیکن غالب می‌شود که به آن پراکندگی شبکه (Lattice Scattering) گفته می‌شود. به صورت کلی تأثیر پراکندگی‌ها بر μ (یا امپدانس) به شکل زیر قابل بیان است



یک دمای بهینه برای μ وجود دارد

اگر اثر هر یک از مکانیزم‌های پراکندگی را به صورت مجزا در نظر بگیریم می‌توان مقدار کلی μ را از رابطه‌ی زیر تعیین کرد

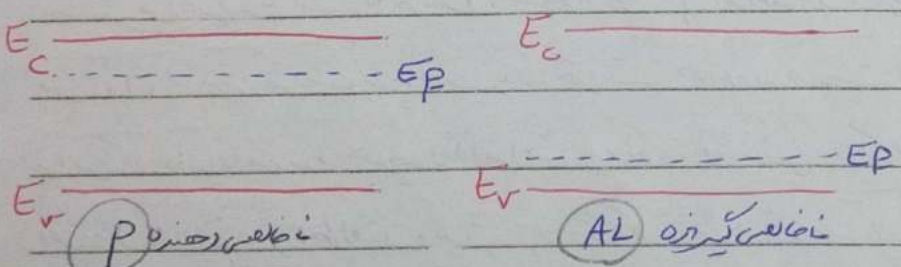
$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_1} + \frac{1}{\mu_2} + \cdots \checkmark \qquad 1/\mu = 1/\mu_I + 1/\mu_L + \cdots \checkmark$$

* تغییر پارامترهای ترازمندی در حالت تعادل:

ترازمندی در اثر احتمال حضور الکترون‌ها است سه تراز مهم می‌گوییم

E_F تنظیم است بین E_C و E_V برای این که ناخالصی دهنده است یا گیرنده

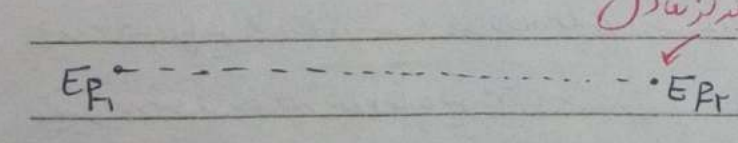
یک قطعه سیلیکن خالص زمانی که ناخالصی ندارد به صورت ذاتی $E_F = E_i$ نشان می‌دهند که ما قرار داریم



E_F در دو سمت پیوسته است

دمای آن صفر باشد

بعد از اتصال دو نیمه‌هادی به هم دیگر



این حالت پیش می‌آید

E_F ها به هم می‌رسند، E_F ثابت می‌شود

تا به حال مباحثی که مطرح شد برای یک قطعه نیمه‌هادی خالص بود برای تولید می‌گرفت اما در ادامه

در سر اتصال بین دو نیم هادی متفاوت (جنس تغییر می‌کند) با شرایط متفاوت یا اتصال فلز نیمه‌هادی سد پتانسیل شکل می‌گیرد

نکته این که باید در توجه داشت که بعد از برقراری تمام این اتصال‌ها ایجاد تعادل هیچ گونه ناپیوستگی یا شیب در تراز انرژی فرمی E_F وجود نخواهد داشت

$$\frac{dE_F}{dx} = 0$$

شرط تعادل

زمانی که دو نیم هادی با هم کنار هم قرار می‌گیرند جریان وجود دارد ولی زمانی که به هم وصل می‌شوند جریان صفر می‌شود چون E_F ها به هم می‌رسند

فصل سوم: حامل‌های اضافی در نیمه‌هادی‌ها

حامل ایجاد جریان در یک نیمه‌هادی سیال الکتریکی می‌گوییم که جریان drift را نشان می‌دهند

تعداد مولکول‌های عنصر در هوا، تعداد مولکول‌های جوهر در لیوان آب به اختلاف تراکم مولکول‌ها با هم دیگر می‌شود تعرض

جریانی که از طریق تعرض به وجود می‌آید به دلیل اختلاف تراکم است

دلیل فعل اثر عوامل خارجی مانند نور می‌آید حامل‌های اضافی در نیمه‌هادی‌ها از ترکیب الکترون حفره، نداریم تعرض حامل‌های اضافی در شبکه نیمه‌هادی بوده بررسی مقدار می‌گیرد

* جذب نور توسط نیمه‌هادی: یک روش مهم برای اندازه‌گیری باز گیری یا شکاف انرژی در نیمه‌هادی جذب نور توسط نیمه‌هادی صورت می‌گیرد

از فرکانس‌های پایین شروع می‌کنیم تا بالا زمانی با افزایش فرکانس نور توسط نیمه‌هادی جذب می‌شود زمانی که انرژی نور تابیده شده از شکاف انرژی بیشتر می‌باشد. جایی که جذب اتفاق می‌افتد انرژی همان E_g است. محل بین شفاف بودن و کدر بودن نیمه‌هادی E_g می‌گوییم

Subject :
Year. Month.

اگر تعداد افزایش در سوار حرکت است و یک های خالی در نوار ظرفیت به وجود می‌آید

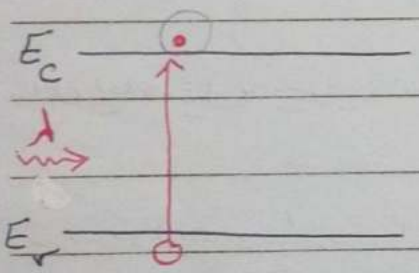
برای هر فوتون یک زوج الکترون - حفره خواهیم داشت

یک روش هم برای اندازه‌گیری شکاف انرژی نیمه‌هادی تابش فوتون طول موج‌های مختلف بر آن و بررسی جذب یا عدم جذب طول موج تابیده شده است

در شرایطی فوتون‌ها نیمه‌هادی جذب می‌شوند اگر $hF > E_g$ در این حالت یک زوج الکترون - حفره که در آن حامل افزایش می‌کنند در شبکه نیمه‌هادی ایجاد می‌شود

به شکل زیر برای فوتون داریم

فوتون $\rightarrow e^-$ ، $\rightarrow h^+$



چون فوتون جذب می‌شود پس یک زوج الکترون - حفره در نیمه‌هادی افزایش می‌شود

برای طول موج‌های کوچک چون انرژی لازم برای جدا کردن الکترون و ایجاد حفره با انرژی زیاد می‌شود

فوتون‌های شکسته شده انرژی‌های مانند فوتون ... می‌توانند به صورت جرم نیز داشته باشند

بازترکیب و طول عمر حامل‌ها: حامل‌هایی که در اثر تابش فوتون به صورت افزایش در شبکه یک نیمه‌هادی به وجود می‌آیند رسانایی نیمه‌هادی را تغییر می‌دهند این تغییر به صورت تدریجی از بین می‌رود و الکترون حفره‌های به وجود آمده بازترکیب می‌شوند. فرض می‌کنیم تغییرات حامل‌ها برای الکترون‌ها در نظر گرفته شود

از صفر کلوین تولید الکترون حفره داریم

$$\frac{dn(t)}{dt} = \alpha_r n_i^2 - \alpha_r n(t)\, p(t)$$

نرخ تولید حرارتی — نرخ بازترکیب h^+, e^-

ضریب بازترکیب

recombination

Subject :
Year. Month.

حال فرض کنیم در لحظه $t=0$ تعداد Δn الکترون و Δp حفره در اثر تابش نور به شبکه نیمه‌هادی افزوده شود

تراکم لحظه‌ای الکترون‌ها و حفره‌ها را نیز با $\delta n(t)$ و $\delta p(t)$ نمایش می‌دهیم

زمانی که حالت پایدار تا با نیم تعادل با انرژی در هر دو تعداد حامل‌های الکترون n_0 تنها نیست

$$\frac{d(n_0+\delta n(t))}{dt} = \alpha_r n_i^2 - \alpha_r (n_0+\delta n(t))(p_0+\delta p(t))$$

$$= \cancel{\alpha_r n_i^2} - \cancel{\alpha_r \underbrace{n_0 p_0}_{n_i^2}} - \alpha_r n_0 \delta p(t) - \alpha_r p_0 \delta n(t) - \alpha_r \delta n(t) \delta p(t)$$

$\delta n(t)$

با جایگذاری $\delta n(t)$

اهمیت ★

نکته $n_i^2 = n_0 p_0$ نقطه‌ی حالت تعادل این رابطه برقرار است

$\delta n(t) = \delta p(t)$ چون جفت‌شدن انجام می‌شود چون در یک لحظه صورت می‌گیرد

$$★ = -\alpha_r[(n_0+p_0)\delta n(t) + \delta^2 n(t)]$$

نرخ تغییرات الکترون و حفره خیلی کمتر از حامل‌های اکثریت است. n_0 و p_0 ناخالصی اولیه تولید می‌کند

با در نظر گرفتن تزریق سطح پایین (Low Level Injection) می‌توان از جمله $\delta^2 n(t)$ صرف نظر کرد.

یکی از اینها قابل صرف نظر در حالت غیر دائمی

$$\frac{d\delta(n(t))}{dt} = -\alpha_r(n_0+p_0)\delta n(t)$$

چون n_0 یک عدد ثابت است در سمت چپ تساوی

زمانی از آن مشتق می‌گیریم صفر می‌شود

اگر نیمه‌هادی غیر ذاتی باشد و ناخالصی داشته باشد (Si و GaAs) همواره یکی از دو جمله n_0 یا p_0 بزرگ می‌شود مثلاً در نوع P خواهیم داشت $\boxed{p_0 \gg n_0}$ و داریم

SINA

Subject :
Year. Month.

$$\boxed{\frac{d\,\delta n(t)}{dt} = -\alpha_r P_0\, \delta n(t)}$$

پاسخ این معادله به صورت زیر است

$$\boxed{\delta n(t) = \Delta n\, e^{-\alpha_r P_0 t}} = \Delta n\, e^{-t/\tau_n}$$

در این حالت ضریب ثابت با Δn مقداری دهیم چون فرض کردیم در تعادل دهیم و هم چنین تعداد حامل های اکثریت است که بر اثر تابش نور معادل شبکه تاره شده است

τ_n طول عمر متوسط حامل های اقلیت است چون ما نیمه هادی با نوع p در نظر گرفتیم پس n ها حامل های اقلیت حساب می شوند

$$\boxed{\tau_n = \frac{1}{\alpha_r P_0}}$$

ثابت بازترکیب

به صورت مشابه برای نیمه هادی نوع n داریم

$$\boxed{\tau_p = \frac{1}{\alpha_r n_0}}$$

★ فرض کنید یک شبکه نیمه هادی از نوع GaAs با تعداد حامل های ذاتی حدود $10^6\ cm^{-3}$ باشد باشیم ناخالصی این نوع نیمه هادی از نوع دهنده Donor برابر با $10^{10}\ cm^{-3}$ می باشد اگر در لحظه ی $t=0$ 10^9 زوج الکترون حفره بر cm^{-3} در اثر عامل خارجی به وجود آید تعداد حامل های اکثریت - حفره در لحظه پس از اعمال تغییر چقدر است؟ کدام یک از حامل های اقلیت یا اکثریت تاثیر بیشتری از این تحریک خارجی خواهد پذیرفت؟

$N_D \rightarrow n_0 = 10^{10}\ cm^{-3}$ $\quad P_0 = 10^2\ cm^{-3}$ $\quad \Delta n = \Delta P = 10^9\ cm^{-3}$

n و P تعداد الکترون و حفره ها است بعد از اعمال خارجی

$10^9(10+1) = 10^9 \times 11$

$\boxed{n = n_0 + \Delta n} = 10^{10} + 10^9 = 1.1 \times 10^{10}$ $\quad \boxed{P = P_0 + \Delta P} = 10^2 + 10^9$

تغییرات حفره ها از تغییرات الکترون ها بیشتر است

جریان رسانش وابسته به تعداد حامل های اکثریت است

$J_n = nq\mu_n E$

$J_P = Pq\mu_P E$

$$P_0 = \frac{n_i^2}{N_D = n_0} = \frac{(10^6)^2}{10^{10}} = 10^2\ cm^{-3}$$

Subject :
Year. Month.

* تنوز حامل ها : جریان توسط پاسخ (تنوز) تولید می شود

عامل پاسخ به چگالی حامل ها وابسته است هرچه تعداد حامل ها بیشتر آن گاه جریان بیشتر است

عامل تنوز وابسته به شیب حامل هاست یا نوع تغییرات یا شیب

مثال هایی از فرآیند تنوز مانند پخش شدن عطر، تنوز جوهر در آب که ابتدا خیلی سریع و بعد به مرور زمان کند می شود

جریان در یک نیمه هادی تابع دو فرآیند است، به وجود آمدن دلیل عامل پاسخ در اثر میدان الکتریکی که در بخش های قبلی بررسی شد و دوم عامل تنوز در اثر متفاوت بودن تراکم حامل ها از نقطه ای به نقطه دیگر.

پاسخ جهت حرکت الکترون ها یکی بود

اما تنوز جهت حرکت الکترون ها عکس یکدیگر است

مثال مشابه برای فرآیند تنوز حرکت مولکول های جوهر در لیوان آب

یا حرکت مولکول های عطر در فضای اتاق هنگام باز کردن سر آن می باشد

تنوز حامل ها در یک نیمه هادی متناسب با شیب n و p است. بیان می کنیم

$$J_n \propto \frac{dn(x)}{dx}$$ در اثر تنوز

$$J_p \propto \frac{dp(x)}{dx}$$ در اثر تنوز

برای تنوز حامل ها در یک شبکه نیمه هادی ضرایب تنوز D_n و D_p تعریف می شود که به جریان متناسب تولید ایجاد شده بستگی است.

رابطه کلی چگالی جریان الکترون ها و حفره ها در یک نیمه هادی به صورت زیر نوشته می شود:

$$J_n(diff) = q D_n \frac{dn(x)}{dx}$$

بار الکترون — ضریب تنوز الکترون

Diffusion از D

$$J_p(diff) = -q D_p \frac{dp(x)}{dx}$$

Subject :
Year. Month.

رابطه کلی جریان در یک نیمه‌هادی (در نظر گرفتن هر دو عامل رانش و نفوذ) در یک نیمه‌هادی

رابطه چگالی جریان الکترون به صورت زیر به دست می‌آید

$$J_n = n(x)\, q\, \mu_n E + q D_n \frac{dn(x)}{dx}$$

$$J_p(x) = p(x)\, q\, \mu_p E - q D_p \frac{dp(x)}{dx}$$

و چگالی جریان کلی یک نیمه‌هادی مجموع دو جریان بالا خواهد بود

$$J(x) = J_n(x) + J_p(x)$$

حامل‌های اقلیت در جریان تنوعی می‌توانند تأثیر داشته باشند چون با نوع تغییرات و تراکم سروکار داریم چون ممکن است آن حامل‌های کم تراکم با تأثیری از بقیه داشته باشند

فرض کنید حالت تعادل داشته باشیم $n_0 p_0 = n_i^2$

در یک نیمه‌هادی یک تراکم بالا از حفره‌ها در اثر تغذیه پخش می‌شوند در شبکه نیمه‌هادی چه عاملی باعث می‌شود سرعت کم می‌شود و بلافاصله حالت تعادل می‌رسد زمانی که چگالی در یک همچیزمان باشد - در حالت تعادل J_n و J_p مقدار صفر دارند یعنی جهت میدان بود

تعادل زمانی است که تحریک خارجی میدان (بود) تغییرات ها) جریان داشته باشد وجود ترانزیستور - در حالت عدم تعادل کاهش کند که در حاضر وجود میدان است که حامل‌های کسر اختلاف پتانسیل در دو سر آن

در حالت تعادل چگالی جریان الکترون‌ها و حفره‌ها برابر صفر است

$$J_p = 0 \rightarrow p q \mu_p E = q D_p \frac{dp}{dx} \rightarrow E = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{dp(x)}{p(x)\, dx}$$

$$p(x) = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}$$

p را در رابطه بالا جایگذاری می‌کنیم

Subject :
Year. Month.

$$E = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{n_i \cancel{e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}} \left[\frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx}\right]}{kT \cdot n_i \cdot \cancel{e^{\frac{E_i - E_F}{kT}}}}$$

$$\rightarrow E = \frac{D_p}{\mu_p} \cdot \frac{1}{kT} \left[\frac{dE_i}{dx} - \frac{dE_F}{dx}\right]$$

سطح انرژی فرمی در حالت تعادل سطح پیوسته است پس $\boxed{\frac{dE_F}{dx} = 0}$

$$E = \frac{D_p}{\mu_p} \cdot \frac{1}{kT} \cdot \frac{dE_i}{dx} \quad (1)$$

بطوری که $\frac{dE_i}{dx}$ را بدست آوریم:

$E = -\nabla v$ ✓

$$E(x) = -\frac{dv(x)}{dx} = -\frac{d}{dx}\left[-\frac{E_i}{q}\right] \quad \boxed{E = -q v}$$ ✓

$$E(x) = \frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \longrightarrow \frac{dE_i}{dx} = q\,E(x) \;\bigstar$$

با جایگذاری رابطه ★ در رابطه (1) خواهیم داشت

$$\cancel{E(x)} = \frac{D_p}{\mu_p} \frac{1}{kT} \cdot q\,\cancel{E(x)}$$

ضریب نفوذ

$$\Longrightarrow \boxed{\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}}$$ ✓

رابطه انیشتین

ضریب تحرک حفره

$$\boxed{\frac{kT}{q} = 26\,mV}$$

$$\boxed{\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{q}}$$ ✓

SINA

Subject :
Year. Month.

★ فرض کنید که غلظت نیمه هادی با رابطه $N_d = N_0 e^{-ax}$ ناخالصی شده است مطلوب است:

الف) محاسبه $E(x)$ (با فرض شرایط تعادل)

ناخالصی دهنده N_d

ب) مقدار E با فرض $a = 1\ 1/\mu m$

$$1/10^{-6} = x/10^{-2} \Rightarrow x = \frac{10^{-2}}{10^{-6}} = 10^{4}\ a = 1(\mu m)^{-1}$$

رسانش ناخالصی داده یعنی ما تعداد اکثریت ها را داریم

$$J_n = q\,n(x)\cdot\mu_n\cdot E(x) + q\,D_n\frac{dn(x)}{dx} = 0$$

رسانش — نفوذی — چگالی جریان

پس خود N_d همان $n(x)$ را می دهد

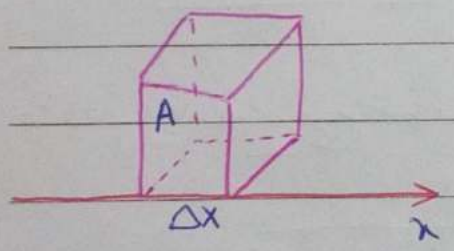
در حالت تعادل یعنی ما بین جامد داریم شود یعنی جریان صفر است

$$E(x) = \frac{-D_n}{\mu_n}\cdot\frac{\frac{dn(x)}{dx}}{n(x)}$$

$$E(x) = \frac{-KT}{q}\cdot\frac{(-a)N_0 e^{-ax}}{N_0 e^{-ax}} = \frac{KT}{q}\cdot a$$

$$\Rightarrow E = \frac{KT}{q}\cdot a = 26\times10^{-3}\times1\times10^{+4} = 2.6\times10^{2}\ V/cm$$

طول لایه ناخالصی در cm است



* معادله پیوستگی:

یک بخش از نیمه هادی را به شکل مکعب مستطیل در نظر می گیریم، سطح مقطع A و طول ΔX که حجم آن می شود $A\Delta X$

$$\boxed{\frac{\partial p(x)}{\partial t}}$$

بر حسب زمان بارها چگونه تغییر می کند.

چون در جهت X فقط در نظر می گیریم یک جریان از سطح وارد می شود و مقدار از سطح A خارج می شود احتمال این است که مقدار از حجم ها با هم ترکیب شوند

$$J_p(x)$$
$$J_p(x+\Delta x)$$

چگالی جریان می شود مقدار بار در کل حجم

آهنگ تغییرات چگالی جریان در یک $1/q$ متر در حجم آنگاه می شود آهنگ تغییر بار

Subject: اختلاف جریان دو طرف ماده
Year. Month.

در متوسط بار ترکیب لزوماً کم می‌شود

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q} \cdot \frac{A\left(J_p(x) - J_p(x+\Delta x)\right)}{A\,\Delta x} - \frac{\delta p}{\tau_p}$$

Δx مقدار کمی جهت نرخ به دست آید

تولید حامل‌های جانبی

حال اگر بخواهیم آهنگ بازترکیب را بنویسیم مانند بازترکیب τ_p (زمان) را به دست می‌آوریم که طول عمر آن می‌نامیم و یک مقدار است که مقدار بازترکیب می‌شود δp را تعداد

$$\boxed{p = p_0 + \delta p}$$

به طبع p شامل یک مقدار ثابت و یک δp است که p_0 تغییر نمی‌کند

$$\boxed{\frac{\partial \delta p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \cdot \frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{\delta p}{\tau_p}}$$

مهم

مشتق‌پذیر است

پس $\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial \delta p}{\partial t}$

چگالی جریان یعنی جریان در واحد مساحت تقسیم شده پس برای به دست آوردن جریان باید A را در $J_p(x) - J_p(x+\Delta x)$ ضرب کنیم

نرخ بازترکیب حفره‌ها − تغییر تراکم حفره‌ها در حجم $A\cdot\Delta x$ در واحد زمان = نرخ تغییر مقدار حفره‌ها ☆

به طور مشابه معادله پیوستگی برای الکترون‌ها می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{\delta n}{\tau_n}$$

$$\boxed{n = n_0 + \delta n}$$

$$\boxed{\frac{\partial \delta n}{\partial t} = \frac{1}{q} \cdot \frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{\delta n}{\tau_n}}$$

اختلاف جهت چگالی جریان حفره‌ها و الکترون‌ها ولی جهت دیگر برای هر دو یکسان است

جهت اول برای الکترون (−) می‌زنیم

حال فرض کنید در چگالی جریان حامل‌ها تولید نقص عمده باشد باشد و انتشار ناچیز باشد

در این حالت معادلات پیوستگی به صورت زیر تغییر می‌کند

$$\boxed{J_n = q D_n \frac{\partial n}{\partial x}} \longrightarrow \frac{\partial \delta n}{\partial t} = D_n \cdot \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{\delta n}{\tau_n}$$

$$J_p = -q D_p \frac{\partial p}{\partial x} \longrightarrow \boxed{\frac{\partial \delta p}{\partial t} = D_p \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{\delta p}{\tau_p}}$$

کاربرد این روابط هنگامی است که برای مثال یک پالس از الکترون ها یا حفره ها در نیمه رسانا در اثر تغذیه جابجا می شود و در طول آن باز ترکیب شوند. رابطه توزیع زمانی و مکانی حامل ها $n(x,t)$ و یا $p(x,t)$ با حل معادلات قبلی بدست می آید

در بسیاری از حالت ها توزیع حامل ها در اثر تغذیه بصورت پله ای می دهد یعنی تغییرات آن ها برحسب زمان صفر است. در این صورت معادله پیوستگی ساده خواهد شد:

$$D_n \cdot \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - \frac{\delta n}{\tau_n} = 0 \rightsquigarrow \boxed{\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} = \frac{\delta n}{D_n \cdot \tau_n}}$$

$$\star\ D_p \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} - \frac{\delta p}{\tau_p} = 0 \rightsquigarrow \boxed{\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{\delta p}{D_p \cdot \tau_p}}$$

صورت کلی آن را صورت دو نمایی که یکی مثبت و دیگری صورتی منفی دارد می نویسیم چون معادله دیفرانسیل

جواب معادله پیوستگی برای حفره ها به شکل زیر است:

$$\boxed{\frac{\partial^2 \delta p}{\partial x^2} = \frac{\delta p}{D_p \cdot \tau_p}} \leftarrow \text{پس} \boxed{p = p_0 + \delta p} \quad \star \text{پس می توانیم بگوییم}$$

$$\delta p(x) = C_1 e^{\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot \tau_p}}} + C_2 e^{-\frac{x}{\sqrt{D_p \cdot \tau_p}}}$$

$\sqrt{D_p \cdot \tau_p}$ را طول دیفیوژن گر یا طول نفوذ می گوییم شود $D_p \cdot \tau_p$. حال برای بدست آوردن C_1, C_2 باید شرایط مرزی را بدست آوریم. هرچه سافت بیشتری را طی کند تعداد حامل ها کم تر می شود پس در حرکت یک فاصله زیاد هم باز ترکیب شوند در تراکم آن ها صفر شود

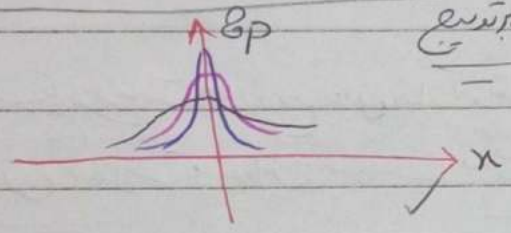
Subject :
Year. Month.

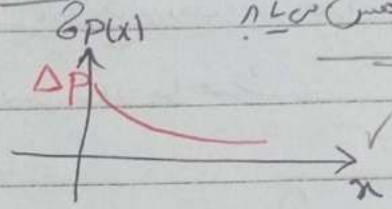
در $X=\infty$ مقدار δp برابر صفر است پس $\boxed{C_1=0}$ است

با فرض $\boxed{\delta p=\Delta p}$ در $\boxed{x=0}$ می‌توان ثابت تعیین کرد پس $\delta p(x)$ به صورت زیر به دست می‌آید

$$\boxed{\delta p(x)=\Delta p\cdot e^{\frac{-x}{\sqrt{D_p\cdot\tau_p}}}}$$

معادله δp در حالت ایده‌آل همان تابع نمایی است که به تدریج مقدار آن کاهش می‌یابد





$\sqrt{D_p\cdot\tau_p}$ نزمین مکان است چون $\delta p(x)$ نزمکان و Δp هم همین طور پس e را نما هم باید یک مقدار ثابت باشد که خارج آن هم نزمین مکان x باشد

$\boxed{\sqrt{D_p\cdot\tau_p}}$ طول نفوذ نامیده می‌شود و نشان دهنده مسافتی است که مقدار δp به $1/e$ مقدار اولیه خود می‌رسد

اگر ما در عبارت (*) به جای $X=\sqrt{D_p\cdot\tau_p}$ آن گاه می‌شود e^{-1} یا $1/e$ پس

$$\boxed{\delta p(x)=\frac{\Delta p}{e}}$$

می‌توان نشان داد که طول نفوذ مسافتی بین دو نقطه است که قبل از باز ترکیب شدن طی می‌کند آن را با L_p نشان می‌دهند

$\boxed{L_p=\sqrt{D_p\cdot\tau_p}}$ مطابق با $\boxed{L_n=\sqrt{D_n\cdot\tau_n}}$

$$\boxed{\delta p(x)=\Delta p\, e^{\frac{-x}{L_p}}}$$

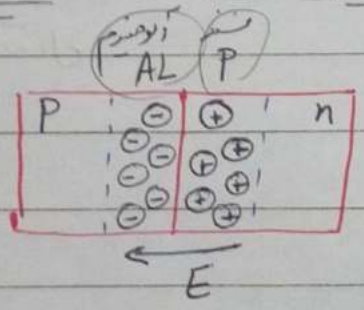
فصل چهارم:

* **اتصال p-n:** اتم‌های نیمه‌هادی شامل (پروتون‌ها)، ترانزیستورها و ... شامل اتصال یک یا چند نیمه‌هادی می‌باشد که به کمک آن‌ها کاربردهایی مانند یکسوسازی، تقویت کننده و ... ایجاد می‌شود. این ساده‌ترین ساختار شامل اتصال دو نیمه‌هادی نوع n و p می‌باشد بررسی خواهد شد

نیمه‌هادی نوع p	نیمه‌هادی نوع n

پس از اتصال این دو نیمه‌هادی و ایجاد پیوند p-n آزادند تا توسط الکترون حفره باعث جابجایی حفره‌ها از سمت چپ اتصال به سمت راست و جابجایی الکترون‌ها از سمت راست به سمت چپ اتصال خواهد شد

در این صورت زمانی که الکترون و حفره‌ها براثر تغییر حرکت می‌کنند یون‌های مثبت و منفی از خود جا می‌گذارند که چون یون‌ها ثابت از میدان الکتریکی جدید آینده هر چه زمان بگذرد میدان قوی‌تر می‌شود و تغییر ضعیف می‌شود میدان ایجاد جریان باشی می‌کند ولی ما ابتدا جریان تغییر داشتیم



ثابت بودن زمانی است که تعادل برقرار شد پس جریان صفر می‌شود

در اثر جدید میدان دامنه یک اختلاف پتانسیل دامنه ایجاد می‌شود در این ناحیه، ناحیه تخلیه می‌گوییم پس ناحیه‌ای است که از بار آزاد تخلیه شده است ولی در خارج این نقطه چون بار مثبت و منفی داریم

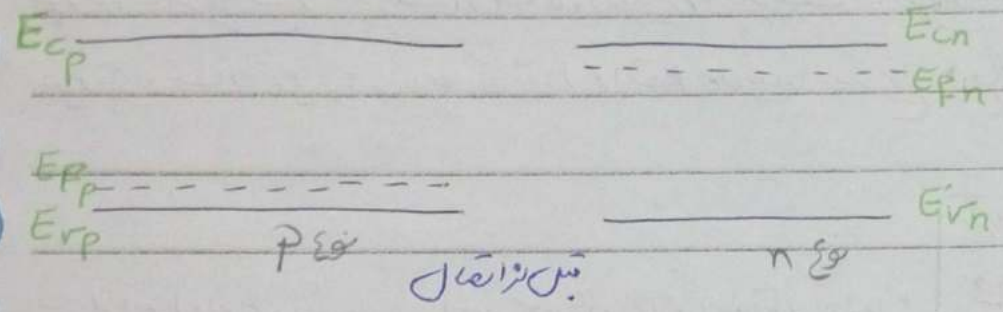
پس از ایجاد یون‌های مثبت و منفی میدان الکتریکی ایجاد شده از سمت یون‌های مثبت به سمت یون‌های منفی جهت حرکت بیشتر حامل‌ها را براثر تغییر می‌کند پس از مدتی بین مؤلفه‌های جریان باشی و تغییر متعادل ایجاد می‌شود نکته‌ای که باید به آن دقت کنیم این است که خارج از این ناحیه میدان الکتریکی صفر است در این ناحیه که در آن نقطه‌ای که جهت دقیق داریم حامل بار آزاد در آن جدا شده ناحیه تهی یا تخلیه می‌گوییم

$J_n(\text{تغییر}) + J_n(\text{باشی}) = 0$

Subject :
Year. Month.

$$\boxed{J_p(\text{تفوری}) + J_p(\text{پایشی}) = 0}$$

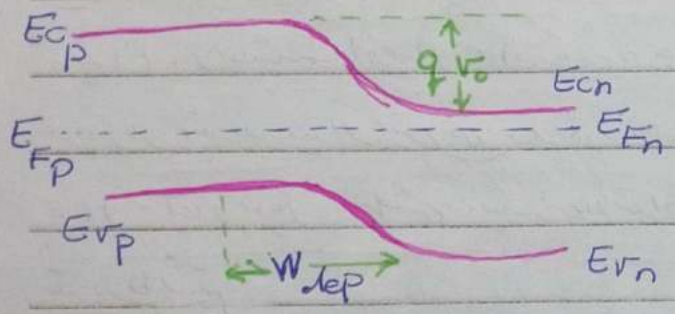
حال نوارهای انرژی نیمه‌هادی‌های نوع n و نوع p را قبل و بعد از اتصال بررسی می‌کنیم



شرطی که مورد نظر در این است که بعد از اتصال باید E_F ها یک سطح تراز یکسان (پیوسته) باشند

پس از برقراری اتصال p-n باید سطوح انرژی پیوسته برقرار شود و با هم برابر شوند (تراز) داشته باشیم $\boxed{\frac{dE_F}{dx} = 0}$

پس بعد از اتصال



چون ماده یکسان است پس E_g ها برابر و الکترونیکی است پس اختلاف بین E_{cp} و E_{vp} با اختلاف E_{cn} و E_{vn} با هم برابر هستند

هر جا میدان هست پس اختلاف پتانسیل هم هست برای تبدیل و تبادل انرژی

اختلاف سطح انرژی در سمت اتصال p-n این شرایط برابر $\boxed{qV_0}$ خواهد بود که V_0 پتانسیل اتصال p-n است

W_{dep} (عرض ناحیه تخلیه) نشان می‌دهند در نوارهای انرژی طوری است که در آن سطوح E_v و E_c خمیده هستند و انحنا دارند

V_0 یک ولتاژ داخلی است نمی‌توانیم آن را با ولت‌متر اندازه‌گیری کرد از نمودار.

برای محاسبه آن از رابطه زیر استفاده می‌کنیم

$$V_0 = \frac{KT}{q} \ln \frac{P_p}{P_n}$$

P_p → تعداد حفره‌های نوع p

Subject :
Year. Month.

پس بنابراین به اوسیس ها نوع ناخالصی (p,n) باشد نشان می دهند P_n نشان دهنده تعداد حفره ها در ناخالصی نوع n است

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

$$P_0 = \frac{n_i^2}{N_D}$$

$$P_0 = N_A$$

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

تمرین:

با استفاده از رابطه جریان های رانشی و نفوذی در حالت تعادل نشان دهید $V_0 = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n_i^2}$ با استفاده از رابطه کل مجموع جریان رانشی و نفوذی و یا بعد انبساطش می توانیم ثابت کنیم؟

با فرض یک اتصال p-n با مشخصات زیر مطلوب است رسم نمودارهای انرژی بند اتصال و محاسبه V_0؟

$N_a = 10^{16}\ cm^{-3}$ (p-Si)

$N_d = 10^{16}\ cm^{-3}$ (n-Si)

$n_i = 1.5 \times 10^{10}\ cm^{-3}$ at $T = 300\ K$

$\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14}\ F/cm$

$\varepsilon_r = 11.7$

در این نوع ما نامه ی بی دوشکی نداریم

چون ناخالصی بر پایه Si است می شود ۱۱/۷

این رابطه برای جریان های اکثریت نوشته شده پس $P_0 = N_a$

for p

$$P_0 = n_i e^{\frac{E_i - E_{Fp}}{KT}}$$

$$\rightarrow 10^{16} = 1.5 \times 10^{10} e^{\frac{E_i - E_{Fp}}{26 \times 10^{-3}}} \rightarrow E_i - E_{Fp} = 26 \times 10^{-3} \ln \frac{10^{16}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.34\ eV$$

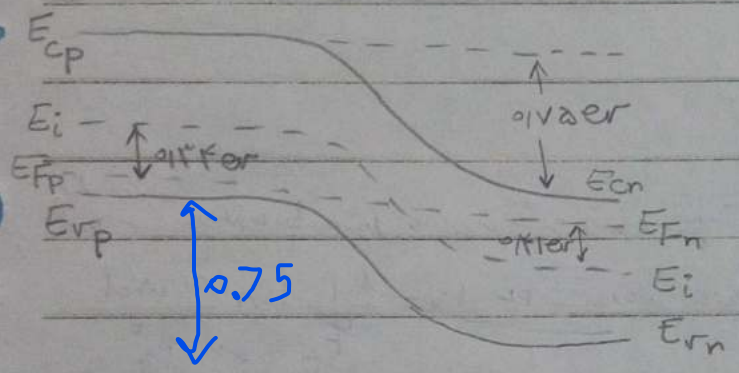
$$KT/q = 26\ mV \rightarrow KT = 26\ meV$$

Subject :
Year. Month.

$n_0 = n_i e^{\frac{E_{Fn}-E_i}{KT}}$ در طرف دیگر اتصال نیمه‌هادی ناخالصی عوض می‌شود

for n

$\rightarrow 10^{17} = 1.5\times10^{10}\, e^{\frac{E_{Fn}-E_i}{26\times10^{-3}}}$ $\quad E_{Fn}-E_i = 26\times10^{-3}\, Ln\left(\frac{10^{17}}{1.5\times10^{10}}\right) = 0.42\,ev$



$E_g(Si) = 1.12\,ev$

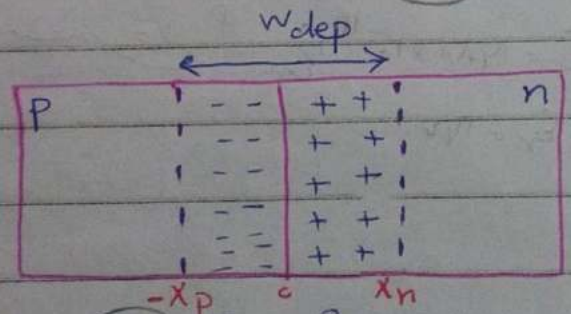
$\frac{1.12}{2} = 0.56$

$0.56 - 0.42 =$

$V_0 = \frac{KT}{q} Ln\left(\frac{N_a.N_d}{n_i^2}\right) = 26\times10^{-3}\, Ln\left(\frac{10^{16}\times10^{17}}{(1.5\times10^{10})^2}\right) = 0.75$

در ناحیه تخلیه هیچ بار آزادی فراهم نیست آزادی بر آن وارد شود تحت میدان اگر حفره باشد در جهت میدان و اگر الکترون باشد در خلاف جهت میدان حرکت کند در ناحیه تخلیه فقط یون‌ها یا بارهای ثابت وجود دارند

* بارها در محل پیوند: وضعیت بارهای آزاد و مقید در محل پیوند p-n به صورت زیر است



در تراکم محل پیوند p-n در ناحیه تخلیه هیچ بار آزادی فراهم نیست به صورتی که الکترون یا حفره‌ای در این ناحیه نیست توسط میدان الکتریکی این ناحیه به سمت خارج کشیده می‌شوند تمامی بارهای این ناحیه یون‌های مثبت و منفی مقید هستند بدلیل سببی توزیع میدان و هم چنین توزیع پتانسیل در این ناحیه از رابطه زیر استفاده می‌کنیم

$$\boxed{\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\varepsilon}}$$

ρ → چگالی بار

ε → ضریب گذردهی محیط

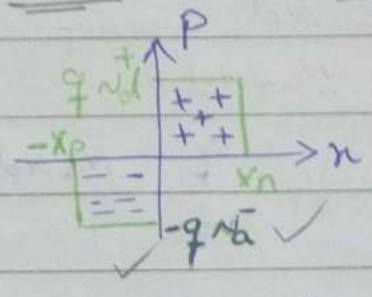
(رابطه سوم معادلات ماکسول)

Subject :
Year. Month.

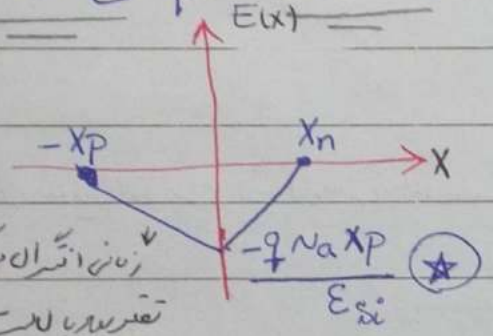
چگالی بار ناحیه p به صورت زیر نوشته می‌شود

ناحیه تخلیه در سمت تاریکی در نیمه‌هادی نوع n دارای بار مثبت و نوع p

$$\rho(x) = \begin{cases} q N_d^+ & 0 < x < x_n \\ -q N_a^- & -x_p < x < 0 \end{cases}$$



برای بدست آوردن توزیع میدان در ناحیه تخلیه از رابطه بین انتگرال گیری می‌کنیم و توزیع میدان به شکل زیر بدست می‌آید



زمانی انتگرال می‌گیریم تقریباً بالا است چون از یک متری بلیم کوتاه می‌کنیم

(1) حداکثر میدان بعد $x = 0$ اتفاق می‌افتد (محل اتصال)

(2) هم $q N_d^+ x_n = -q N_a^- x_p$

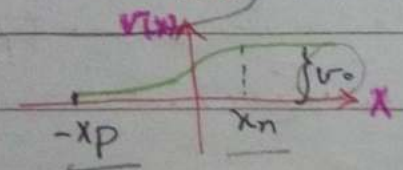
$$\boxed{N_a x_p = N_d \cdot x_n}$$

چون ناحیه تخلیه سمت n از p N_d خیلی کمتر است با طرف دیگر برابر می‌شود تنها حالتی که $N_a = N_d$ شود در آن صورت $x_p = x_n$ می‌شود

تمرین: توزیع میدان $E(x)$ را در طول ناحیه تخلیه بدست آورده و نشان دهید حداکثر میدان در محل پیوند ایجاد می‌شود و اندازه میدان

با استفاده از توزیع میدان بدست آمده می‌توان توزیع پتانسیل ناحیه تخلیه را نیز تعیین کرد

$$\boxed{E(x) = -\frac{dV(x)}{dx}} \rightarrow V(x) = -\int E(x)\,dx$$



Subject :
Year. Month.

با توجه به روابط بدست آمده می توان نوشت

$$V_0 = \frac{1}{2}\,\frac{q N_a x_p}{\varepsilon_{Si}}\,(x_n + x_p)$$

$$\boxed{x_p = \frac{N_d}{N_a + N_d}\cdot W_{dep}}$$

$$V_0 = \frac{1}{2}\,\frac{q}{\varepsilon_{Si}}\,\frac{N_a N_d}{N_a + N_d}\cdot W_{dep}^2$$

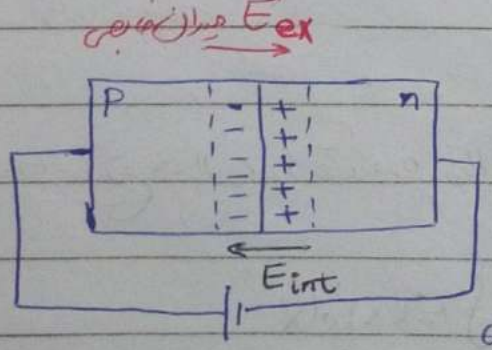
$$\boxed{W_{dep} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}}{q}\left(\frac{1}{N_a} + \frac{1}{N_d}\right)\cdot V_0}}$$

★ با فرض مقادیر داده شده در مثال قبلی مطلوب است محاسبه W_{dep} و x_n و x_p ؟

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2\times 11.7\times 8.85\times 10^{-14}}{1.6\times 10^{-19}}\left(\frac{1}{10^{16}} + \frac{1}{10^{17}}\right)(0.75)} = 3.26\times 10^{-5}\ cm = 0.326\ \mu m$$

$$x_p = \frac{N_d}{N_a + N_d}\cdot W_{dep} = \frac{10^{17}}{10^{16} + 10^{17}}\cdot 0.326 = 0.296\ \mu m$$

$$\Rightarrow x_n = 0.326 - 0.296 = 0.03\ \mu m \qquad x_n = W_{dep} - x_p$$



★ بایاس مستقیم یکسو کننده پیوند (p-n)

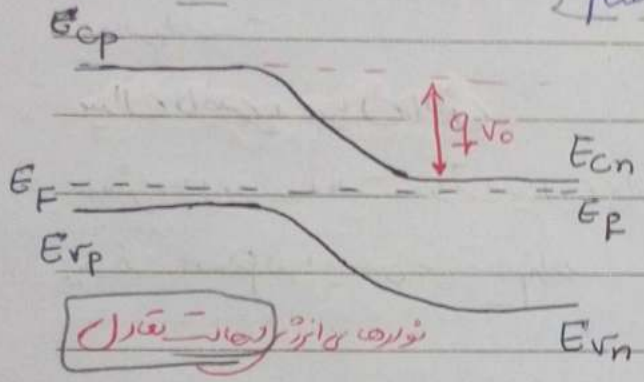
به دو سر اتصال p-n پتانسیل V اعمال می شود
حال بررسی می کنیم شرایطی که مثبت باشد (بایاس مستقیم) پس یک ولتاژ مثبت به p می رسیم و یک ولتاژ منفی به n می رسیم
پس حفره ها و الکترون ها دفع می شوند پس به میدان داخلی که در خلاف جهت همدیگر پس میدان داخلی

Subject :
Year. Month.

تضعیف می‌شود پس میدان کم شود و ولتاژ ناحیه تخلیه کم می‌شود پس عرض ناحیه تخلیه کم می‌شود

در صورت مثبت بودن V_0 میدان خارجی اعمال شده در خلاف جهت میدان داخلی پیوند است در نتیجه مغلوب تضعیف آن خواهد شد تضعیف میدان داخلی کمتر شدن عرض ناحیه تخلیه (W_{dep}) را پی دارد

قبل از بررسی رفتار ترازهای جامد ها حالت تعادل (عدم) نوارهای انرژی اتصال پایه در اعمال ولتاژ خارجی رسم می‌کنیم.



V_0 ولتاژ داخلی دو سر ناحیه تخلیه است

در جایی که ناحیه تخلیه است ما افت پتانسیل داریم

در جایی که جامد آزاد است ما افت پتانسیل نداریم

$$\rho = \frac{1}{nq\mu_n + pq\mu_p} \qquad R = \rho\frac{L}{A} \qquad V = RI$$

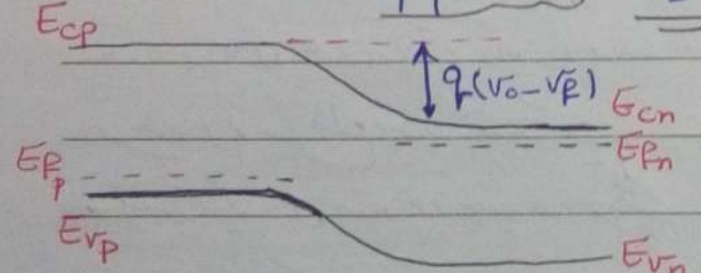
n و p تعداد حامل ها

در جایی که ناخالصی زیاد است

مقاومت کم است و افت پتانسیل کمتر است

پس جایی که ناخالصی زیاد است ما افت پتانسیل صرف نظر می‌کنیم

چون میدان داخلی در جهت عکس یکدیگر پس پتانسیل آن ها از هم کم می‌شود



V_f (Forward)

افت پتانسیل در دیود از حدی بیشتر نمی‌شود

انرژی نوارهای انرژی کمتر می‌شود و اندازه $q(V_0-V_f)$ دیگر عدم تعادل در سطح فرمی ایجاد

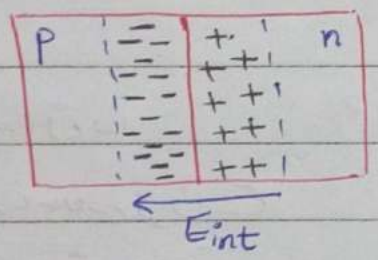
Subject :
Year. Month.

جریان می‌کند، عرض ناحیه تخلیه کم می‌شود

وقتی سطح فرمی با هم برابر نیستند می‌توانند حامل‌ها جابه‌جا شوند

در بایاس مستقیم به دلیل تضعیف میدان داخلی امکان تونل زدن بیشتر حامل‌ها از سمت p (برای حفره‌ها) و از سمت n به p (برای الکترون‌ها) بیشتر می‌شود این تونل زدن وابسته به ولتاژ اعمالی است

نامتقارن بودن اکثریت در اثر میدان به دلیل اندک بودن تعداد حامل‌های اقلیت تأثیری بر جریان پیوند p-n در بایاس مستقیم ندارد



در بایاس معکوس پتانسیل مثبت به n و پتانسیل منفی به p وصل می‌شود - با میدان داخلی هم جهت می‌شود میدان خارجی پس باعث تقویت می‌شود پس عرض ناحیه تخلیه زیاد است بایاس معکوس از جهت تئوری بیشتر است - میدان داخلی قوی‌تر شود زیادی هم در مقابل تونل بوده قوی‌تر شود پس تونل در ایجاد جریان نقش ندارد فقط میدان نقش دارد

(در بایاس معکوس چون سد در مقابل تونل قوی‌تر می‌شود پس تونل در ایجاد جریان تأثیری ندارد) مهم

علاوه بر حامل‌های ذاتی (الکترون و حفره‌هایی که در اثر گرما در ناحیه تخلیه ایجاد می‌شوند) برای هر حامل یک طول تونل تعریف کردیم

مسافتی که یک حامل می‌تواند از نواحی به جای دیگر حرکت تا بازترکیب شود - حامل‌های اقلیت در سمت n و p اگر از طول تونل شان به ناحیه تخلیه نزدیک‌تر باشند حتماً در ناحیه n حامل اقلیت p است

* طول تونل؟

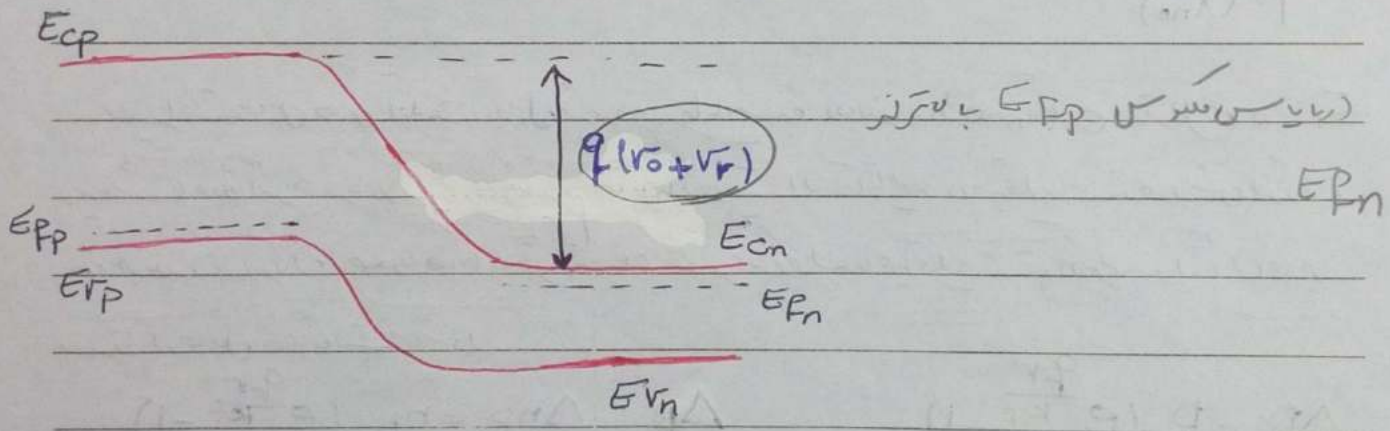
SINA

Subject :
Year. Month.

در بایاس معکوس ولتاژ خارجی میدان خارجی ایجاد می‌کند که هم جهت با میدان داخلی ناحیه تخلیه است قوی‌تر شدن میدان باعث افزایش عرض ناحیه تخلیه می‌شود در این شرایط میدان در مقابل تزریق حامل‌ها بسیار زیاد می‌شود در نتیجه جریان تونلی در شرایط بایاس معکوس بسیار ناچیز است تنها حالتی که باعث ایجاد جریان در بایاس معکوس می‌شود یا نشت حامل‌های اقلیت است این حامل‌های اقلیت می‌توانند در اثر شکست پیوندهای نیمه‌هادی در اثر گرما به وجود آیند و یا حامل‌های اقلیت نیمه‌هادی‌های n و p خارج از ناحیه تخلیه باشند که خیلی نزدیک به ناحیه تخلیه قرار داشته باشند

نشت یا تونل زنی مهم است ولی جایی که در تونل زنی شکست بهمن نوع بررسی مهم است

نوارهای انرژی اتصال p-n پس از اعمال ولتاژ خارجی در بایاس معکوس به شکل زیر خواهد بود



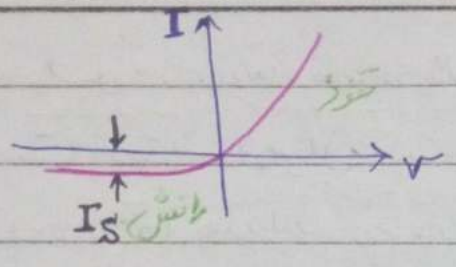
همان طور که دیده می‌شود انحنای نوارهای انرژی پس از اعمال پتانسیل معکوس بیشتر خواهد شد

تغییرات جریان در بایاس مستقیم به صورت $e^{\frac{qV}{kT}}$ با ولتاژ نسبت مستقیم دارد تغییرات ولتاژ در شدت کسر جریان اثر ندارد است در حالیکه در بایاس معکوس وابسته بودن جریان به ولتاژ بسیار ضعیف است رابطه ولتاژ جریان در اتصال p-n به صورت کلی زیر است:

$$I = I_S\left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1\right)$$

n عددی بین ۱ تا ۲ بستگی به جنس نیمه‌هادی مثلاً Si یا GaAs

Subject :
Year. Month.



تونل زنی در بایاس سیم

بایاس سه بایاس معکوس

حال می خواهیم مقدار V_0 را بدست آوریم در این سفارش ابتدا

تغییرات حامل ها در طول پیوند بر حسب ولتاژ اعمالی

بررسی می کنیم

$$\frac{P_p}{P_n} = e^{\frac{qV_0}{kT}}$$ (حالت تعادل)

از سه p, n نوع خالص را نشان می دهد

P_n تعداد حفره ها در ناخالصی نوع n

$$\frac{P_p}{P_n} = e^{\frac{q(V_0-V)}{kT}}$$ (حالت بایاس تعادل)

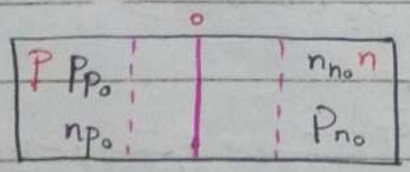
همانطور که دیدیم چون بایاس مستقیم چند ولت V_0 کم می کند ولی در بایاس معکوس چون خود V مقدار است

چند ولت بر V_0 کم نمی شود به آن اضافه می شود

$$\frac{P(-X_{p0})}{P(X_{n0})} = e^{\frac{q(V_0-V)}{kT}}$$

تغییرات حامل های اقلیت در طول ناحیه های با استفاده از شرایط مرزی می توان به صورت زیر نوشت مثلاً اگر حفره در p در نظر بگیریم حامل اکثریت است تا لبه ناحیه تخلیه سمت خودش کمتر آن حامل بدست مقدار آن حفره ها کاهش می یابد تا زمانی که لبه ناحیه تخلیه سمت n برسد لذا آن حامل بدست تعداد حامل ها ثابت می شود

$$\Delta P_n = P_{n0}\left(e^{\frac{qV}{kT}}-1\right) \qquad \Delta n_p = n_{p0}\left(e^{\frac{qV}{kT}}-1\right)$$



$$P_{n0} = \frac{n_i^2}{N_D}$$

ΔP_n و Δn_p وابسته به ولتاژ هستند

پس وابسته هستند به حامل های ذاتی

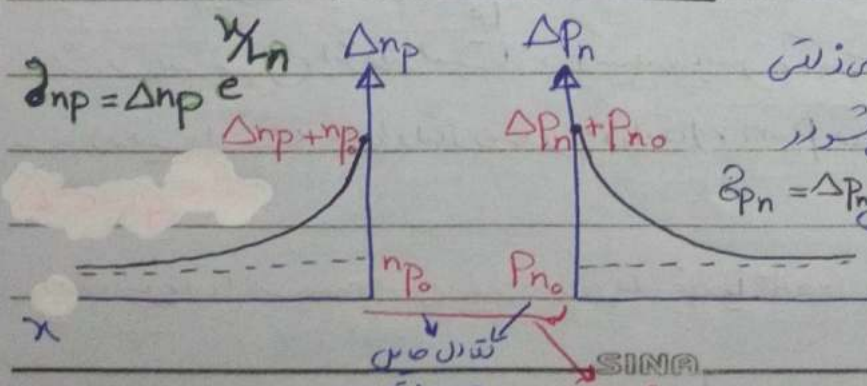
پس از بین می روند و با ترکیب می شوند

$$\delta_{np} = \Delta n_p e^{-x/L_n}$$

$$\delta_{pn} = \Delta P_n e^{-x/L_p}$$

بسته به طول نفوذ آن هم طول تونل

تونل کمتر باشد زودتر از بین می رود



Subject :
Year. Month.

$$P(X_{n0}) = \underbrace{P_0 e^{qV_0/k}} \cdot e^{-qV/kT}$$

$$\delta n_p = \underbrace{\Delta n_p}_{\text{در لبه ناحیه تخلیه}} e^{x/L_n} = n_{p0}\left(e^{qV/kT} - 1\right) e^{x/L_n}$$

δn_p تابع x

برای δn_p و δp_n می‌توان نوشت

$$\delta p_n = \Delta p_n e^{-x/L_p} = p_{n0}\left(e^{qV/kT} - 1\right) e^{-x/L_p}$$

اندازه پیوند نسبت به L_p و L_n خیلی بزرگتر باشد

اندازه نیم‌هادی سمت n باید خیلی بزرگتر از L_n باشد

حال مؤلفه جریان تزریقی حامل در این حامل‌های اقلیت را محاسبه می‌کنیم

برای حامل‌های اقلیت غالب جریان ناشی را صرف نظر می‌کنیم

$$I_p = -qAD_p \frac{d\delta p_n}{dx} = \frac{qAD_p}{L_p} \underbrace{p_{n0}\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)}_{\Delta p_n} e^{-x/L_p}$$

$$= \frac{qAD_p}{L_p} \Delta p_n e^{-x/L_p}$$

بطور مشابه می‌توان با بطور زیر برای جریان الکترون‌ها بدست آورد.

$$I_n = \frac{qAD_n}{L_n} \Delta n_p e^{x_n/L_n}$$

حال فرض می‌کنیم جریان الکترون‌ها در محل پیوند یعنی $x=0$ و طرف مقابل جاری شود

SINA

Subject :
Year. Month.

در این حالت در هر دو ناحیه جریان وابسته به بار الکترون ها و حفره ها $X_n = X_p = 0$ در نظر گرفته می‌شود نتیجه

$$I_{\text{کل}} = I_n + I_p = qA\left(\frac{D_p}{L_p}\Delta P_n + \frac{D_n}{L_n}\Delta n_p\right)$$

$$= \underbrace{qA\left(\frac{D_p}{L_p}P_n + \frac{D_n}{L_n}n_p\right)}_{I_S}\left(e^{qV/KT} - 1\right) = I_S\left(e^{qV/KT} - 1\right)$$

$$\frac{P_p}{P_n} = e^{qV_0/KT} \quad (1) \qquad \frac{P_p(-X_p)}{P_n(X_n)} = e^{q(V_0 - V)/KT} \quad (2)$$

$$\frac{(1)}{(2)} \rightarrow \frac{\cancel{P_p} \cdot P_n(X_n)}{P_n \cdot \cancel{P_p(-X_p)}} = e^{qV/KT} \rightsquigarrow \frac{P_n(X_n)}{P_n} = e^{qV/KT}$$

$$\Delta P_n = P_n(X_n) - P_n = P_n\left(e^{qV/KT} - 1\right)$$

اعمال ولتاژ یک نوع تحریک خارجی است پس حامل های اقلیت تغییر بیشتری دارند
پس حفره ها در ناحیه n نوع p که حامل اکثریت اند تغییر چندانی نمی‌کند
ولی حفره ها در نوع n که حامل اقلیت هستند که نسبت به حالت تعادل خود به اندازه $e^{qV/KT}$
تغییر می‌کند پس P_p با $P_p(-X_p)$ عوض نمی‌شود چون P_p در حالت تعادل و $P_p(-X_p)$ بعد از
اعمال یک عامل خارجی است بنابراین برابر هستند تقریباً
حامل های اکثریت در اثر اعمال تحریک خارجی نوار میدان، تغییر چندانی نمی‌کند

جریان اشباع مکوس به تعداد حامل های اقلیت حرارتی مرتبط است

Subject :
Year. Month.

هر جا الکترون حفره‌ای کنار هم باشند احتمال بازترکیب حامل‌های بین یون‌ها یک پیوند برقرار می‌شود

اگر از اثر بازترکیب در ناحیه تخلیه صرف نظر نکنیم رابطه‌ی جریان - ولتاژ دیود به صورت زیر خواهد بود

$$I = I_S\left(e^{\frac{qV}{nKT}} - 1\right)$$

تولید و بازترکیب همواره کنار هم می‌آیند

تولید توسط انرژی صورت می‌گیرد. پس در حالت تئوری اگر نور وجود داشته باشد

به این دلیل از اثر نور نقد می‌کنیم که در حالت عملی که ما در آزمایشگاه هستیم اگر نور به دیود تابانده می‌توانیم تشخیص دهیم n یا p آن چه است در واقع با تاباندن نور جریان I_S را داریم ولی دیگر رابطه‌ی از V اعمال نیست. چون بر اثر تاباندن نور محیط یک تعداد الکترون حفره آزاد می‌شود زمانی که انرژی نور $hf > E_g$ باشد

در محاسبه‌ی جریان دیود با استفاده از رابطه‌ی قبلی از اثر نور به عنوان یک متغیر خارجی نیز صرف نظر شده است. اعمال نور در صورتی که شرط بیشتر بودن انرژی آن از شکاف انرژی E_g برقرار باشد به افزایش جریان کمک می‌کند

پس در این حالت n باید کوچکتر باشد تا دو طرف که تولید و کل عبارت را بیشتر کند ولی در بازترکیب n بزرگتر می‌شود کل عبارت را کمتر می‌کند

در بایاس مستقیم جریان به شدت وابسته به ولتاژ است

در بایاس معکوس جریان برابر $-I_S$ می‌شود و وابسته به ولتاژ نیست از جایی به بعد چه چه شکست رخ نمی‌دهد - در این حالت جریان خیلی زیاد می‌شود در جهت عکس

یعنی اتفاق افتادن شکست

Subject :
Year. Month.

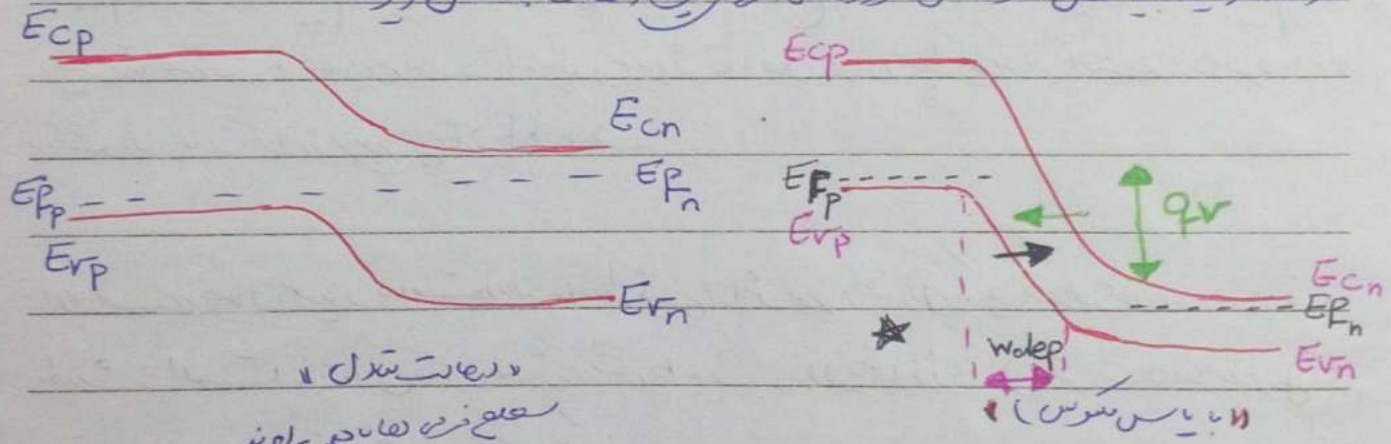
* شکست در بایاس معکوس: افزایش یابد

در بایاس معکوس یک اتصال p-n نمی‌توان ولتاژ را به هر حد دلخواه بسته به ساختار دیود p-n و میزان ناخالصی دو سمت در ولتاژهای پایین (در حدود چند ولت) و یا ولتاژهای بالا (چند ده ولت) جریان بطور ناگهانی افزایش پیدا می‌کند رابطه I-V قبلی دیگر در مورد اتصال صدق نخواهد کرد

معمولاً شکست در ولتاژهای پایین در اثر پدیده شکست زنری رخ می‌دهد حالی که شکست در ولتاژهای بالا تابع پدیده شکست بهمنی است

حال یک اتصال p-n با ناخالصی بالا (10^{18}) تا (10^{17}) را در نظر بگیرید

در شرایط بایاس معکوس نوارهای انرژی این اتصال به شکل زیر است



در بایاس معکوس $\frac{dE_F}{dx}$ دیگر صفر نمی‌شود و سطوح فرمی دیگر پیوسته نیستند

وقتی فرمی‌ها در حالت عدم تعادل از هم جدا می‌شوند که یک سطوح شبه فرمی داریم که در پیوستگی برقرار است ولی شیب آن دیگر صفر نیست ما تنها یک منحنی هستیم

(V) ولتاژ اعمال است $E_{Fn} - E_{Fp} = qV$

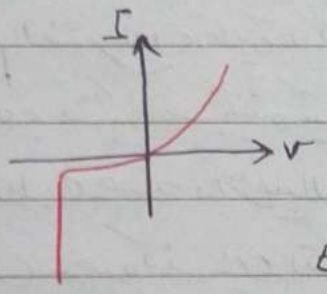
Subject :
Year. Month.

در حالت بایاس مکوس در یک سری جا ها E_c و E_v با هم یکی می‌شوند (مقابل هم قرار می‌گیرند) و اندازه‌ی شکاف انرژی بین آن ها نامحدود است پس با یک اعمال خارجی می‌توانند حفره و الکترون ها جابجا شوند و حرکت الکترون و حفره ها ایجاد جریان می‌کند

اگر اثر عامل خارجی ایجاد شود که باعث افتادن ناحیه تخلیه - ناحیه تخلیه جایی است که نوارهای انرژی انعطاف‌پذیر - جریان زیاد در بایاس مکوس بینهایت شکست

زمانی که ما خارجی زیاد می‌کنیم سطح E_v الکترون ها و سطح E_c حفره های زیادی تولید می‌گیرند

و چون خارجی زیاد و جریان زیاد عامل ایجاد شکست می‌شود



در این شرایط با توجه به وضعیت نوارهای انرژی بعد از اعمال ولتاژ مکوس در قسمت هایی از منطقه نوارهای انرژی E_c و E_v مقابل هم قرار می‌گیرند - اعمال ولتاژ مکوس انرژی لازم را به حامل ها می‌دهد تا از مانع سدی که در مقابل خود می‌بیند تونل بزند (تونل زنی حامل ها) این جابجایی حامل ها که باعث به وجود آمدن جریان زیادی می‌شود با نام پدیده شکست زنری در اتصال p-n شناخته می‌شود

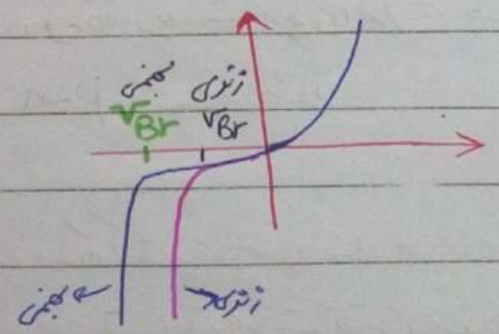
زمانی که الکترون و حفره ها خواهند برخورد ملش شان بلوره در صفحه ۵۴ قسمت ★ حرکت کنند باید در صورت انتقال حرکت کنند یعنی مطابع انرژی آن ها فرق نکند - چون در حرکت عمودی ما با جابجایی یک مطلع به مطلع دیگر داشتیم ولی در این حالت چون جابجایی انتقال بدهیم حفره و الکترون ها نباید در ناحیه تخلیه قرار بگیرند زیرا باید سد را بشکنند یا تونل کنند

حال اگر دیودی را در نظر بگیریم که ما خارجی آن زیاد نباشد (حدود 10^{14} تا 10^{15}) آن گاه دیگر پدیده تونل

Subject : دوشنبه آینده کوئیز از اول p-n تا آخر این جلسه
Year. Month.

زدن به وجود می‌آید - در این حالت هر چه ولتاژ بایاس را زیاد می‌کنیم که عرض ناحیه تهی بزرگتر می‌شود - میدان داخلی بزرگتر می‌شود - پس حامل اقلیت در ناحیه تخلیه دارد عبور می‌کند و تحت تأثیر میدان قرار گیرد و انرژی آن بیشتر می‌شود - در اثر برخورد با اتم‌های Si یک زوج الکترون حفره به وجود می‌آید - حفره‌ها در جهت میدان و الکترون‌ها در خلاف جهت میدان حرکت کنند این حرکت تا عبور از پیوند ها یک پدیده شکست بهمنی به وجود آورد باید ولتاژهای بالا بحث شود

در صورتی که ناخالصی اتصال p-n زیاد نباشد (حدود 10^{15} تا 10^{16} cm^{-3}) با اعمال ولتاژ معکوس اتصال تونل زدن حامل‌ها کم می‌شود در این شرایط هر چه قدر ولتاژ معکوس را بزرگ تر کنیم انرژی حامل‌هایی که در ناحیه تخلیه حرکت می‌کنند بیشتر می‌شود در اثر برخورد یک الکترون با حفره به شبکه سیلیکون یک پیوند شکسته شده و زوج الکترون - حفره آزاد می‌شود این زوج الکترون - حفره در اثر میدان شتاب می‌گیرند و حرکت می‌توانند از یک پیوند با شکسته دیگر تولید زوج الکترون - حفره کنند این افزایش تولید الکترون - حفره‌ها به صورت تصاعدی شبیه پدیده بهمن است در نتیجه شکست اولیه در این شرایط با شکست بهمنی می‌نامند که معمولاً در ولتاژهای بالا رخ می‌دهد



V_{Br} (Break down)

حالت زنری زودتر رخ می‌دهد

هر دیود p-n در واقع یک خازن است و مانند یک خازن عمل می‌کند که فاصله بین دو صفحه خازن می‌شود W_{dep}

Subject
Date

ظرفیت خازنی در اتصال p-n:

یک اتصال p-n دو نوع ظرفیت خازنی شبیه به شکل یکی ظرفیت پیوندی ناشی از ناحیه تخلیه و دیگری ظرفیت نفوذی ناشی از تجمع بار در بایاس مستقیم

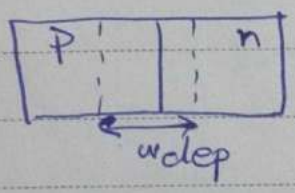
ظرفیت پیوندی ناشی از ناحیه تخلیه از رابطه $C=\varepsilon A/d$ به دست می‌آید در این رابطه d عرض ناحیه تخلیه است

$$C=\varepsilon A/d=\varepsilon_{Si}\frac{A}{w_{dep}}$$

عرض ناحیه تخلیه وابسته به ولتاژ اعمالی به دیود و بایاس آن می‌باشد

$$w_{dep}=\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{q}\left(\frac{1}{N_A}+\frac{1}{N_D}\right)(V_0-V_a)} \qquad C=\frac{\varepsilon A}{d}\ ,\ X_C=\frac{1}{jC\omega}$$

در رابطه بالا V_a ولتاژ اعمالی به اتصال p-n است. اگر بایاس مستقیم باشد V_a مثبت در غیر این صورت منفی. خازن پیوندی (C_j) یک خازن متغیر با ولتاژ است یک نمونه از کاربرد این نوع خازن در ساختمان varactor است که به عنوان خازن های متغیر با ولتاژ عمل می‌کند (ورکتورها)



★ با فرض یک اتصال p-n با مشخصات زیر مطلوب است محاسبه تغییر خازن پیوندی برای

$N_A=10^{17}\ cm^{-3}$ $\quad N_D=5\times10^{16}\ cm^{-3}$ $\quad \varepsilon_0=8.85\times10^{-14}\ F/cm$

$\varepsilon_r=11.7$ $\quad (T=300^\circ K)$ $\quad n_i=1.5\times10^{10}\ cm^{-3}$ $\quad$ بایاس مستقیم $V_a=0.5$

$V_a=-3V$ حالت تعادل

چون V_a مثبت بود بایاس مستقیم است

GOLF

Subject
Date

$$\boxed{V_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a N_D}{n_i^2}\right)} = 26\times10^{-3}\times \ln\left(\frac{10^{17}\times 5\times10^{16}}{2.25\times10^{20}}\right) \rightarrow V_0 = 0.79\,V$$

در بایاس سیستم $V_a = 0.5\,V$ $\rightarrow w_{dep} = \sqrt{\frac{2\times 8.85\times10^{-19}\times 11.7}{1.6\times10^{-19}}\left(\frac{1}{10^{17}} + \frac{1}{5\times10^{16}}\right)}$

$\sqrt{(0.79-0.5)} = 7.6\times10^{-6}\,cm$ ایلیه

ریاست $w_{dep} = \left[\frac{2\times 8.85\times10^{-19}\times 11.7}{1.6\times10^{-19}}\left(\frac{1}{10^{17}} + \frac{1}{5\times10^{16}}\right)(0.79)\right]^{1/2}$

$= 1.2\times10^{-5}\,cm$ بایاس معکوس $V_a = -3\,V$

$w_{dep} = \left[\frac{2\times 11.7\times 8.85\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}}\left(\frac{1}{10^{17}} + \frac{1}{5\times10^{16}}\right)(0.79+3)\right]^{1/2} = 0.27\,\mu m$

ظرفیت خازن پیوند در بایاس $3V$ است برابر است با $C_{j1} = \frac{8.85\times10^{-14}\times 11.7}{7.6\times10^{-6}} = 13.62\times10^{-8}\,F$

(A مساحت سطح)

$C_{j2} = 86.2\times10^{-9}\,F$ $\qquad C_{j3} = 38.25\times10^{-9}\,F$

همان طور که دیده می‌شود مقدار خازن پیوند در بایاس معکوس کوچکترین مقدار است با توجه به این که در تحلیل AC امپدانس خازن اهمیت دارد بیشترین مقدار امپدانس در بایاس معکوس دیده می‌شود و در مقدار آن در بایاس سیستم می‌توان صرف نظر کرد

خازن در اثر اتصال p-n خازن ذخیره بار (C_s) نامیده می‌شود که در اثر خود بایاس سیستم شکل می‌دهد مقدار این خازن از رابطه $\boxed{C_s = \frac{q}{kT} I\tau}$ به دست می‌آید که در این رابطه I جریان سیستم و τ متوسط طول عمر حامل‌های است

تمرین: با شروع از رابطه $Q = I\tau$ نشان دهید $C_s = \frac{q}{kT} I\tau$

راهنمایی: $C = \frac{dQ}{dV}$

GOLF

Subject
Date

پیوند فلز نیمه‌رسانا: ما پیوند p-n که برای کاربردهای یکسوسازی استفاده می‌شود می‌توان از اتصال فلز و نیمه‌هادی برای رسیدن به این منظور بهره گرفت. بسیاری از کاربردها این اتصال دلیل داشتن سرعت بالاتر نسبت به اتصال p-n انتخاب بهتر است. بسته به نوع فلز و نیمه‌هادی این اتصال ۲ حالت یکسوسازی را همزمان خواهد داشت

در ابتدا اتصال فلز و نیمه‌هادی با وضعیت یکسوسازی بررسی می‌کنیم:

در این حالت در سطح تابع کار فلز و تابع کار نیمه‌هادی تعریف می‌شود

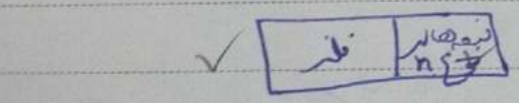
حداقل انرژی لازم برای این که یک الکترون از تراز فرمی فلز به سطح انرژی خلأ برود یا تابع کار فلز می‌نامند

که آن را با $q\phi_m$ (metal) نشان می‌دهند بطور مشابه میزان انرژی لازم برای جابجایی الکترون از سطح انرژی فرمی نیمه‌هادی به سطح انرژی خلأ را تابع کار نیمه‌هادی می‌نامند که آن را با $q\phi_s$ تابع کار فلز ثابت

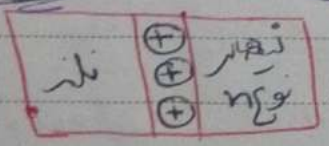
الکترون‌ها ناخالصی در لبه سطح فرمی و خلأ ثابت می‌باشد ولی در نیمه‌هادی بستگی به ناخالصی دارد

با آن‌چه در اتصال p-n بیان شد تراز فرمی نیمه‌هادی p و n در مورد نوارهای انرژی رخ می‌دهد در مورد اتصال فلز و نیمه‌هادی اتفاق می‌افتد

در این جا فرض می‌کنیم $\phi_m > \phi_s$



هر چه تابع کار بزرگتر باشد فرمی اش کوچکتر می‌شود در این حالت پس از اتصال الکترون‌ها از نیمه‌هادی نوع n به فلز می‌روند و تراز در محل تماس که ناحیه تخلیه در نیمه‌هادی ایجاد می‌گردد تا مایی که سطح فرمی در فلز و نیمه‌هادی در یک سطح یکسان شود

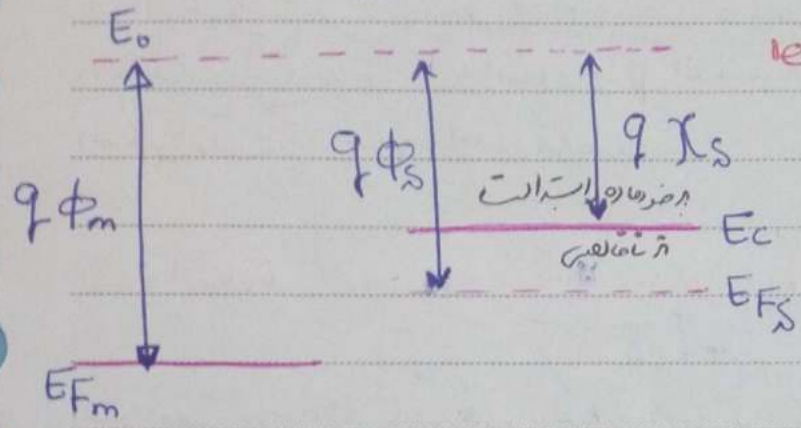


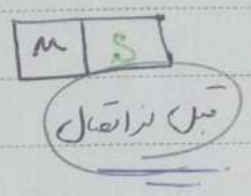
خصلت نوارهای انرژی فلز و نیمه‌هادی قبل و بعد از اتصال به شکل زیر می‌باشد

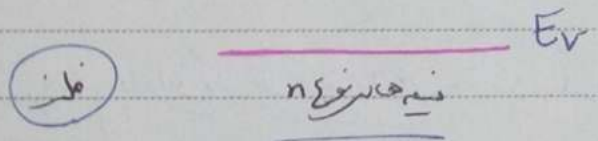
GOLF

Subject
Date

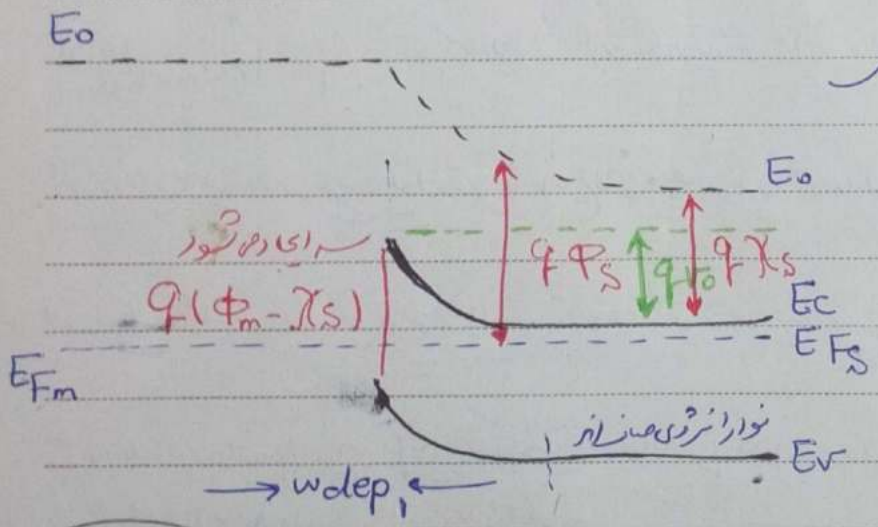
$q\chi_s$ = چقدر انرژی لازم است تا الکترون از هسته و نوع ماده وابسته است از نیمه‌هادی

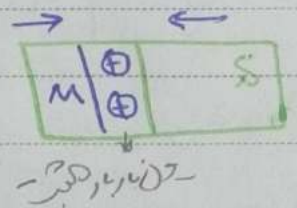






اختلاف هم جنس از سطح انرژی





پتانسیل اتصال $\boxed{V_0 = \phi_m - \phi_s}$

اگر جایی از فلز و نیمه‌هادی یک سد وجود داشته و از آن
سمت نیز یک سد مقابل حامل‌ها از نیمه‌هادی به فلز نیز وجود دارد

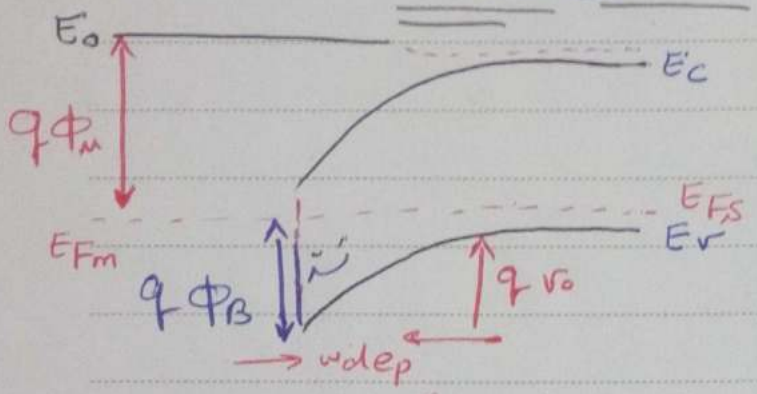
V_0 اتصال $= \phi_m - \phi_s$ ارتفاع سد شاتکی $\phi_B = \phi_m - \chi_s$

سرعت بالا ← اگر اتصال خاصیت یکسوسازی
برقرار باشد

GOLF

Subject
Date

برای این که در نیمه هادی نوع p و فلز سطح فرمی نیمه هادی باید زیر سطح فرمی فلز باشد



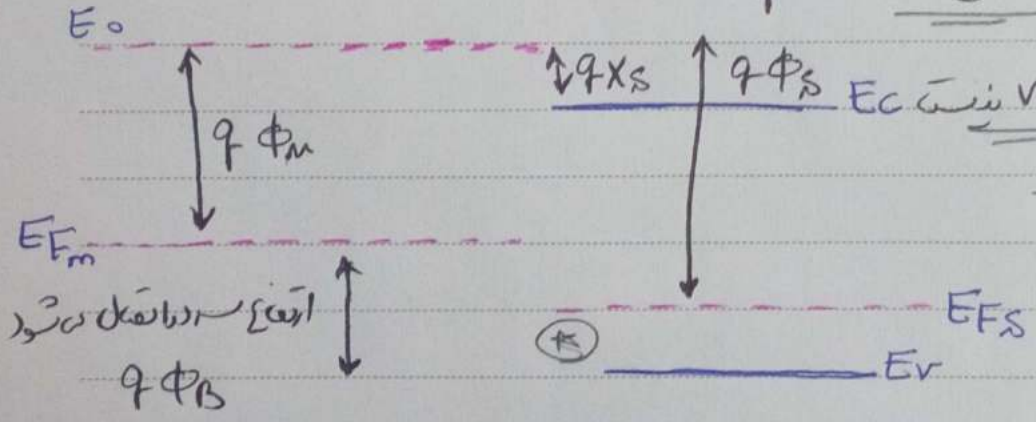
حفره های نیمه هادی به فلز برفته
در نتیجه ناخالصی acceptor
یونیزه می شوند و تبدیل می شوند
و ناحیه تخلیه ایجاد می شود

$$\phi_B = \chi_s + \frac{E_g}{q} - \phi_m$$

ارتفاع سد شاتکی

$q\chi_s$ ← پتانسیل الکترون

E_g/q : ارتفاع سد نوع p و نوع n جمع می شوند



سد چون تابع ولتاژ V_0 نیست
ارتفاع آن تغییر نمی کند

$$w = Vq \rightarrow V = \frac{w}{q}$$

Subject

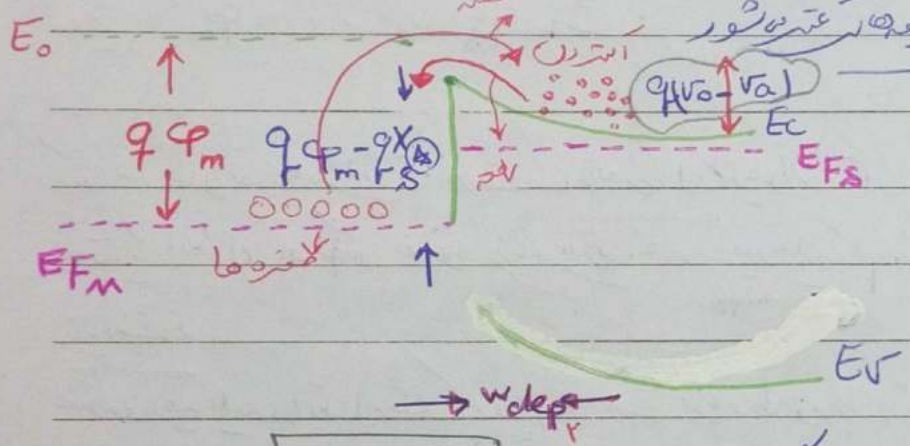
Date

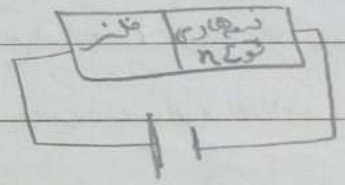
GOLF

* بایاس اتصال فلز نیمه‌هادی (اتصال شاتکی):

شبیه اتصال p-n می‌توان از اتصال شاتکی به عنوان یکسوکننده استفاده کرد. در این جزوه‌های انرژی این اتصال با بررسی شرایط بایاس مستقیم و معکوس بررسی می‌کنیم. دیود شاتکی فرض شده برای اتصال فلز نیمه‌هادی نوع n می‌باشد.

در بایاس بستم ولتاژ مثبت به فلز به ولتاژ منفی به نیمه‌هادی اعمال می‌شود. سطح انرژی در نیمه‌هادی بالا می‌آید و عرض ناحیه تخلیه در نیمه‌هادی کمتر می‌شود.





$\boxed{E = -qV}$ هر جا ولتاژ مثبت باشد سطح انرژی ماده بالا می‌آید یا پایین‌تر

$\Delta E = -q\Delta V$ یا عرض ناحیه تخلیه کوچکتر می‌شود

اگر ولتاژ باشد V_0 اگر انرژی باشد qV_0 می‌شود

جاهایی که نوار انرژی اینجا بلند می‌شود عرض ناحیه تخلیه

* ارتفاع نسبت به شکل جلسه قبل تغییر نمی‌کند چون پارامترهای آن به ولتاژ بستگی ندارد

افتادن سطح انرژی بین فلز و نیمه‌هادی

حامل‌ها سختی می‌توانند رد شوند (حامل اقلیت)

مانند یک سد عمل می‌کند برای حرکت حامل‌ها از فلز به نیمه‌هادی - حامل‌ها نمی‌توانند بروند به نیمه‌هادی

بستگی به ولتاژ دارد - در بایاس بستم حرکت از نیمه‌هادی به فلز چون سد ارتفاع کم است راحت الکترون‌ها حرکت می‌کنند

نیمه‌هادی نوع n حامل اکثریت آن الکترون است در بایاس بستم خود را راحت‌تر می‌رساند به فلز

تابع یک نوع حامل است (حامل اکثریت است).

در بایاس معکوس در اتصال p-n حامل اقلیت می‌شد

Subject :
Year. Month.

مزایای اتصال فلز و نیمه‌هادی: سرعت کار در عمل سوئیچینگ کار بر در فرکانس‌های بالا بیشتر

چون تابع کار در تعیین تأثیر سد های اهمیت است ← مشابه اتصال p-n

معمولاً فلزهای با تابع کار بالا در ساخت استفاده می‌شود - در ساخت بستر نیمه‌هادی است و در آن فلزها با تبخیر می‌کنند - ابتدا تمام ترانزیستورها را می‌سازیم بعد اتصال فلزی را رسم و سیم کشی می‌کنیم

باید φ_m ها بزرگتر از φ_s باشند

یکی از مزایای نیمه‌هادی است که تعداد ناخالصی آن زیاد است - در واقع در اتصال فلز و نیمه‌هادی مانند یک اتصال p-n که خروجی زیادی بدهد. عرض ناحیه تخلیه کم می‌شود زمانی که میزان ناخالصی که N_D زیاد شود.

عرض ناحیه تخلیه در اتصال شاتکی در این حالت از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$W_{dep} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_r}{q}\cdot\frac{1}{N_D}(V_0 - V_a)}$$

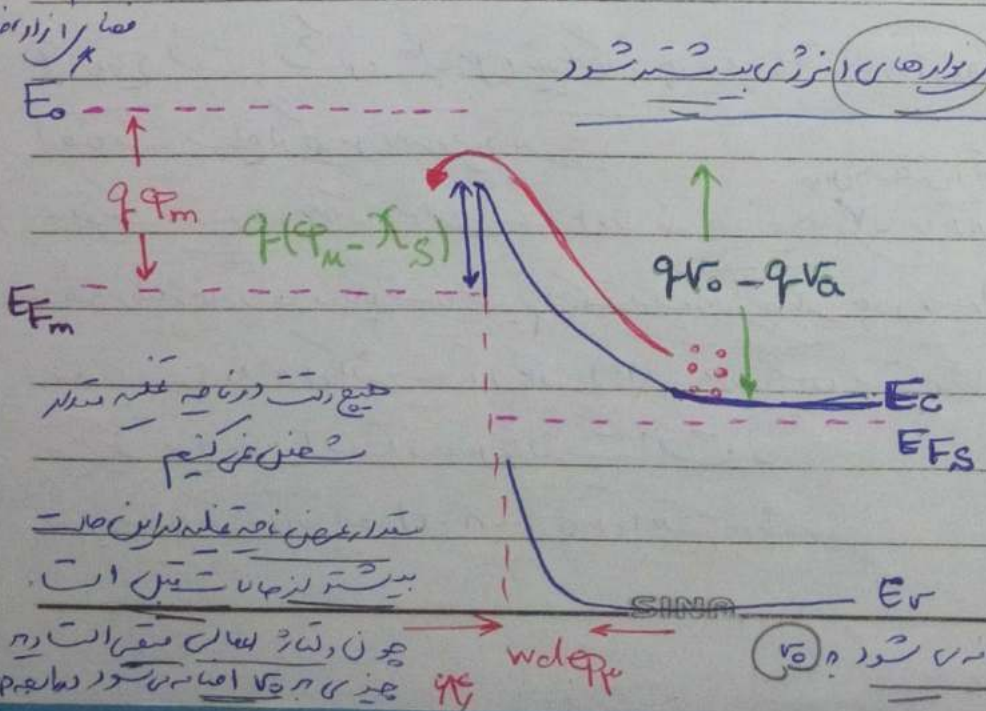
که در این رابطه V_a ولتاژ اعمال شده به اتصال می‌باشد (ولتاژ بایاس)

q ← حاصل الکترونیک

N_D ← نوع n

حال بایاس مکوس را بررسی می‌کنیم: ولتاژ مثبت به نیمه‌هادی و ولتاژ منفی به فلز اعمال می‌شود

مانند اتصال p-n: اغلب نوارهای انرژی بیشتر شود



جریان تابع جابجایی حامل‌های اکثریت از فلز به نیمه‌هادی می‌لغزد

تغییر بایاس در سیم و مکوس در عمل است

V_a می‌آید در بایاس مکوس اما بر چیزی اضافه می‌شود به V_0

هیچ ولتاژ در ناحیه تخلیه مقدار ثابتی نمی‌کنیم

مقدار عرض ناحیه تخلیه در این حالت بیشتر از حالت قبل است.

چون ولتاژ اعمالی متغیر است در چیزی به V_0 اضافه می‌شود در رابطه W_{dep}

$w_{dep_3} > w_{dep_1} > w_{dep_2}$ اگر w_{dep_1} مربوط به حالت تعادل تراز هم آن گاه

جابجایی حامل ها از نیمه هادی بیشتر انجام می شود چون سد بزرگی جلوی خودش می بیند

جابجایی حامل ها از نیمه هادی تابع سدی است که ارتفاع آن هم عوض شده است

رابطه جریان و ولتاژ اتصال شاتکی شبیه اتصال p-n است

$$I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1\right)$$

$1 < n < 2$

اما رابطه جریان اشباع معکوس متفاوت با اتصال p-n است

$$I_0 = AB T^2 e^{-\frac{q\phi_B}{kT}}$$

$q\phi_B$ ارتفاع سد است. سد شاتکی که در تمام بایاس ها مقدار آن ثابت است تابع نوع فلز و نیمه هادی است. کاهش با نوع بایاس ندارد

در این رابطه A سطح مقطع اتصال، ϕ_B ارتفاع سد شاتکی و B ثابت ریچاردسون

$$B = \frac{4\pi q m_e^* k^2}{h^3}$$

m_e^* جرم مؤثر حامل است (نوع n است)

k ثابت بولتزمن - h ثابت پلانک

هرچه ϕ_B بیشتر شود چون یک عدد نمایی به توان منفی رسیده پس I_0 کوچکتر می شود

* اتصال اهمی: برای این که شفاف مقاومت ما صفر است.

فلزهایی که از مقاومت آمدن بیرون با اتصال اهمی جرم حاصل شده فلز

تعیین از اتصال ها نیاز به شفاف اهمی یا خطی داریم

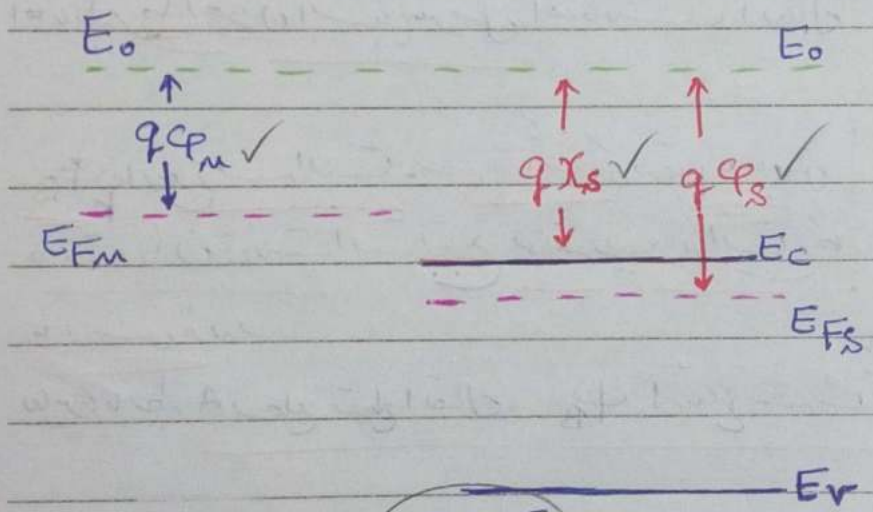
در بسیاری از کاربردهای ساخت قطعات نیمه هادی نیاز به اتصال های اهمی با شفاف I-V

Subject :
Year. Month.

خطی ولیم بری رسیدن به شفه خطی در اتصال فلز و نیمه‌هادی باید سعی انتخاب φ_m و φ_s دقت کنیم تا سد شاتکی ایجاد نشود

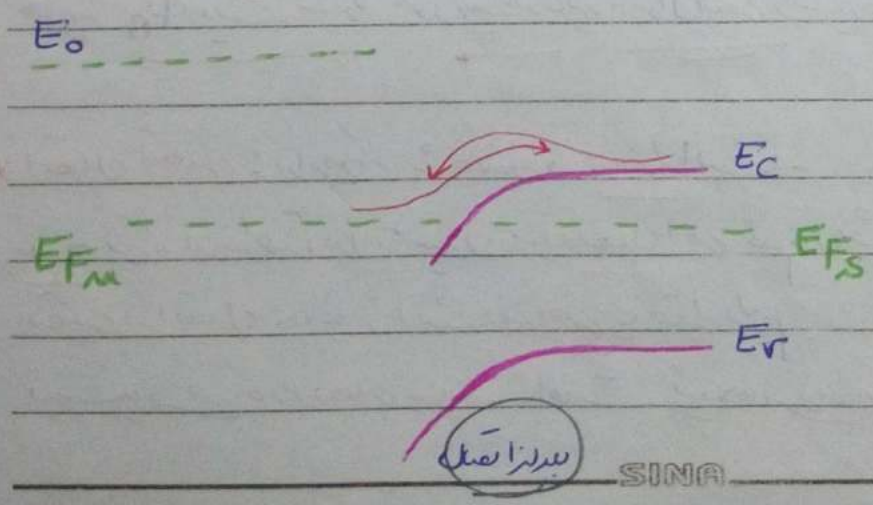
اگر اتصال فلز و نیمه‌هادی نوع n داشته باشیم باید $\boxed{\varphi_m < \varphi_s}$ باشد. اگر اتصال فلز و نیمه‌هادی نوع p باشد $\boxed{\varphi_m > \varphi_s}$.

نوارهای انرژی اتصال فلز و نیمه‌هادی نوع n با $\boxed{\varphi_m < \varphi_s}$ قبل و بعد از اتصال به شکل زیر است



قبل از اتصال

زمانی که دو اتصال با بر قرار می‌کنیم باید سطوح فرمی به هم متصل شوند $\frac{dE_F}{dx}=0$. به حالت تعادل رسیده است سطوح فرمی هم‌سطح می‌شوند



از هر دو طرف مانع‌هایی می‌باشند

حرکت کند سری متابل خود

نمی‌بیند سرباره خود

فقط یک تداخل می‌بیند

بعد از اتصال

تمرین: نمودارهای انرژی اتصال نلر و نیمه‌هادی نوع P را بررسی کنید. اتصال اهمی رسم کنید؟

Subject :
Year. Month.

SINA

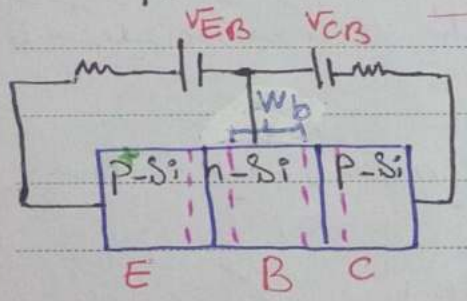
* ترانزیستورهای پیوندی دوقطبی: (BJT)

ترانزیستور پیوندی دوقطبی یا Bipolar Junction Transistor

کاربردهای الکترونیکی بخاطر تنوع بسیار پرکاربرد بوده و هست دوقطبی بودن این ترانزیستور بدلیل وابسته بودن به عکس آن به حرکت حامل الکترون حفره است

در ادامه خواهیم دید ترانزیستورهای اثر میدان تنها تابع حرکت حامل های اکثریت هستند به همین دلیل به آن ها یک قطبی گفته می شود

همان طور که تا به حال با انواع این ترانزیستورها آشنا شده اید BJT ها به دو دسته npn و pnp تقسیم می شوند در این جا ساختار یک ترانزیستور pnp را مورد بررسی قرار می دهیم



یک ترانزیستور BJT از پیوند p-n تشکیل می شود

امیتر یعنی پخش کننده، کلکتور یعنی جمع کننده
Emitter
Collector

همیشه بیس با یک نوع قرار می دهیم یا p یا n در دو سمت امیتر و کلکتور هم هستند یا p یا n که تفاوت n یا p بودن آن ها با هم متفاوت است

امیتر نقش حفره ها را پخش می کند به سمت کلکتور و کلکتور باید آن ها را جمع کند
حفره

پیوند p-n با بایاس مستقیم دیکوپل شود. برای این که بیشترین میزان کمیس کردن را داشته باشیم باید پیوند امیتر-بیس بایاس مستقیم شود

بیشترین میزان تونل زنی صورت می گیرد

Subject
Date

از بیس به امیتر حرکت الکترون ها صورت می گیرد یک راه اف شدن ناخالصی است به امیتر است
که باعث می شود منبع حفره ها در امیتر باشد و الکترون ها تاثیر گذار باشند
در واقع ما حفره با چاپ کار داریم C_{ne}^{3} نه با اجزا

(+) که بالای P می گذاریم یعنی ناخالصی تعداد عددی خیلی بیشتری از P خالی دارد

$p^{+}-n-p$

توزیع تعداد زیادی حفره و تعداد کمی الکترون - حفره در بیس جزء اقلیت است و فرآیند بازترکیب
صورت می گیرد - بازترکیب ما با کاهش داریم - برای کاهش بازترکیب باید طول ناحیه را کوچک
کنیم - متوسط مسافتی که یک حامل قبل از بازترکیب طی می کند L_p

بازترکیب جزء اتفاقی می افتد که الکترون آزاد داشته باشیم پس چون در بیس ۲ تا بیش
از ناحیه خالیه وجود دارد آن مانع طول بیس کم می کنیم

$W_b < L_p$

پیوند C-B باید بایاس معکوس باید صورت بگیرد

توسط میدان قوی که در ناحیه خالیه است پر می شود حامل ها به سمت کلکتور

چون حامل اقلیت بیس کرده کلکتور جمع کند اما بخشی از این حامل ها از بین می روند

تعداد الکترون از بیس به E تا تعداد زیادی که باعث از دست رفتن حامل های شوند

حفره هایی که در اثر پراکندگی با الکترون ها بازترکیب می شوند در بیس

تعداد حفره هایی که امیتر در بیس می دهد

$$\eta = \frac{I_{Ep}}{I_{Ep} + I_{En}}$$

(۱) η بازدهی تزریق حامل از امیتر - بازدهی تزریق حامل از امیتر

I_{En} خیلی کوچکتر از I_{Ep} است - I_{En} تعداد الکترون هایی که از بیس به امیتر می روند

GOLF

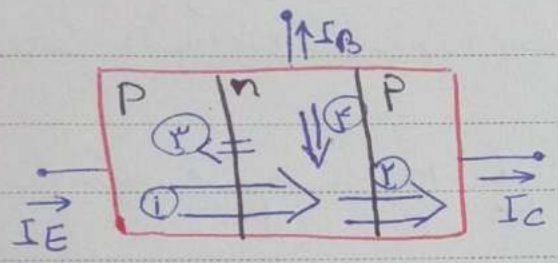
هم β و هم η به دلیل I_{En} و دلیل دیگر نمی‌تواند اتفاق شود

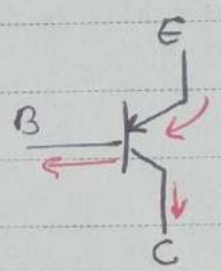
$$\boxed{\beta = \frac{I_C}{I_{Ep}}}$$

ضریب انتقال جریان پیس

$$\boxed{\alpha = \beta\eta}$$

α ضریب انتقال جریان





(۴) بازترکیب حفره‌ها در بیس

(۱) حفره‌هایی که از امیتر به بیس حرکت کرده‌اند

(۲) حفره‌هایی که توانستند خودشان را به کلکتور برسانند

(۳) الکترون‌هایی که از بیس به امیتر تزریق شده‌اند

جهت جریان الکترون همیشه در جهت عکس حرکت آن‌هاست پس I_B به سمت بالا می‌شود.

I_B مجموع (۳) و (۴) است

$$\alpha = \beta\eta = \frac{I_C}{I_{Ep}+I_{En}} \qquad \beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{\beta\eta}{1-\beta\eta} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$$

بهره جریان یا ضریب تقویت جریان (تراتزیستور) با β نمایش می‌دهند

پیوند B-E باید بایاس مستقیم شود تا حامل‌های اکثریت E بتوانند به سمت C

و پیوند B-E همیشه باید بایاس مستقیم شود. اگر بایاس C-B معکوس باشد جمع کردن کلکتور رو خوب صدا می‌کند

اگر بایاس C-B را مستقیم کنیم آن میدان ضعیف می‌شود اثرش کم می‌شود. قابل

حامل اقلیت بیس

Subject
Date

حرکت حفره‌ها از سمت E به B بوده و پاکندی کند

تجمع حامل‌های تزریق شده در بیس و بازترکیب زیاد می‌شود چون جریان I_B زیاد می‌شود و I_C کم می‌شود

β در حالت اشباع عبور است - جریان بیس زیاد می‌شود بخاطر تجمع و بازترکیب و I_C کم می‌شود

هر ناحیه‌ی کاری هستیم باشند سه اشباع

نیت ناحیه کلکتر بیس تجمع حامل‌هایی پیش می‌آید که ملزم به حرکت عکس آنند

ترانزیستور BJT متقارن نیست نمی‌توان جای پایه‌ها را عوض کرد اگر جای E و C کلکتور عوض کنیم آن‌گاه می‌بینیم که در C مثلاً 10^{16} حامل در B 10^{15} و در E 10^{18} هاست حامل اثر E با C عوض کنیم تعداد حامل کم می‌شود زیادی که به سمت B حرکت کند فرآیند بازترکیب صورت می‌گیرد چون P با P^+ متفاوت است از لحاظ تعداد ناخالصی

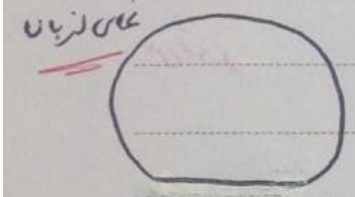
منبع ایجاد جریان در کلکتور، اهمیت است چون باید بیس بکند باید بیشترین تعداد حامل‌ها را داشته باشد

GOLF

Subject
Date

* ساخت ترانزیستورهای پیوندی دوقطبی:

اکثر مدارهای مجتمع امروزی در بستر Si ساخته می‌شوند. معمولاً جهت استفاده‌های تحقیقاتی و آزمایشگاهی Si به صورت ویفرهای (wafer) ایجاد می‌شود که یک راه‌کار خود دلیل تولید



مگر در نتیجه این ویفرها ۴ یا ۶ اینچ و ضخامت آن‌ها حدود 500 μm است جهت کریستال هم است

برش ایجاد شده روی ویفر نشان دهنده جهت و امتداد کریستالی Si مورد نظر است

حال مراحل مختلف ساخت ترانزیستورهای BJT را روی این بستر پیاده می‌کنیم بستر (Substrate)

اولین گام ایجاد اکسید روی سطح سیلیکن می‌باشد این اکسید اولین عایق بوده و نقش بسیار مهمی را در مراحل بعدی فرآیند ساخت ایفا می‌کند

ما می‌خواهیم یک لایه عایق روی Si ایجاد شود پس بهتر است از اکسیدآن استفاده کنیم چون هم از جنس خود Si است و هم این که عایق می‌شود پس

$Si \longrightarrow SiO_2$

سیلیکن — عایق

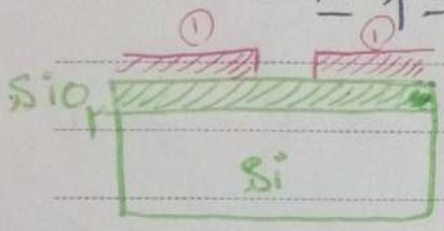
این کار را انجام می‌دهیم چون با یک بخش کار داریم و نمی‌خواهیم قسمت باقیمانده را تغییر دهیم

برای اکسیداسیون سطح باید دمای محیط بین 1000 تا 1100 درجه سانتیگراد باشد تا با سرعت قابل قبولی اکسید شدن بدهیم

Subject
Date

برای مثال برای داشتن ضخامت 500 nm اکسید بار Si در دمای نزدیک حدود ۶ ساعت در دمای

۱۱۰۰ درجه قرار دادیم پس از فرآیند اکسیداسیون به ساختار زیر خواهیم رسید



هرچه ضخامت اکسید بیشتر باشد زمان آن هم بیشتر می‌شود

گاهی اوقات عایق‌ها جریان نشتی ایجاد می‌کنند - ضخامت اکسید از حداقل جریان نشتی

بیشتر باشد. کل سطح ویفر را عایق کردیم پس حال باید یک بخش از اکسید را باید جدا کنیم

باید جدا شدن بخشی از اکسید را حذف کنیم پس باید یک اسید در آن اضافه کنیم پس HF در آن اضافه می‌کنیم

HF قوی‌ترین اسید موجود در چون اکسید قوی داریم باید از آن استفاده کنیم

(1) البته اما در یک مرحله‌ای باید اکسید یک پنجره ایجاد کند که بخش‌های شود خورده از آن در مقابل HF

مقاومت می‌کند بخش‌های شود خورده با حل می‌شوند در HF

برای این که بخشی از سطح اکسید انتخاب شد تا با استفاده از آن جنس اکسید (HF) حذف شود

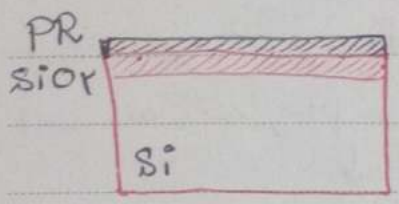
و کمان استوری در تمام مشخص شده سیلیکن نزاحم شود باید پنجره‌ای بر سطح اکسید

توسط ماده مقاوم در برابر HF ایجاد شود - در این حالت نقش زیست (photo_resist) یا نور مقاوم

گفته می‌شود PR

GOLF

Subject
Date

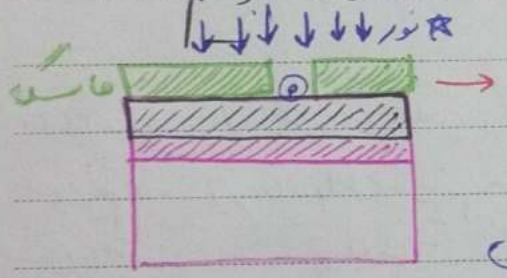


در این حالت هنوز HF را استفاده نکردیم. چون دقت کار ما mm یا nm است

PR اگر در آن نور بخورد دیگر ویژگی های شیمیایی آن عوض می شود

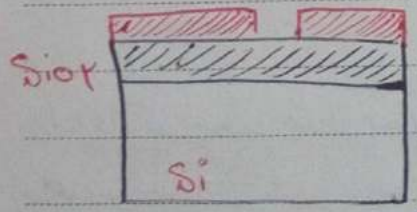
فوتورزیست: مثبت: نور بخش پخته شده مقاوم
منفی: نور بخش نخورده مقاوم

PR فوتورزیست این ویژگی را دارد که در صورت تابش یا عدم تابش نور بر آن تغییر ماهیت داده و میزان انحلال آن در حلال فوتورزیست تغییر می کند این ویژگی PR در ما امکان انتخاب می دهد تا به صورت استفاده از ماسک Mask انتخاب انجام دهد
توان بخشی از PR که سطح Si زیر آن مجدد استفاده می شود مد نظر است برسیم



توان زیر سیم
دهش UV می تابانیم

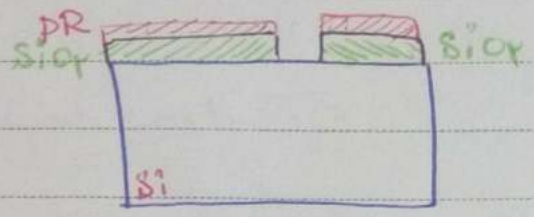
بخشی از PR در اثر ماسک قرار نداشت تغییر نکرده در حلال PR آن سالم بین و بر روی ماسک که سایه تابش های نور نخورده هم چنان در مقابل حلال مقاوم است
پس کنار گذاشتن ماسک خود Si باید حتما فوتورزیست قرار می دهند



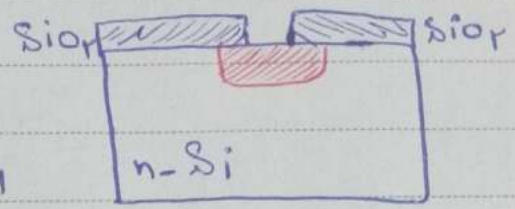
نور می تابانیم نورنقطه در آن بخش ⊙ می خورد و پس HF بسته به میزان غلظت سرعت خوردگی مشخصی برای اکسید دارد با توجه به خاصیت اکسید و غلظت اسید زمان تراشیدن خوردگی HF را محاسبه می کند و سپس خوردگی اسید قرار می دهند در صورت عدم رعایت این نکته پدیده Under cut رخ می دهد زیرا اتفاق می افتد. زیر PR خورده می شود

GOLF

Subject
Date



دو مرحله بعد برای برداشتن PR از مدل شخصی استفاده می‌شود و PR هم برداشته می‌شود



اسیدها بدون پلاستیک مانعی خوردن شیشه‌ها می‌خورند

در این حالت گالیوم و بور Si مالز نوع n باشد. دولت ایلیم نفوذ نوع p در جسم

Ga B AL

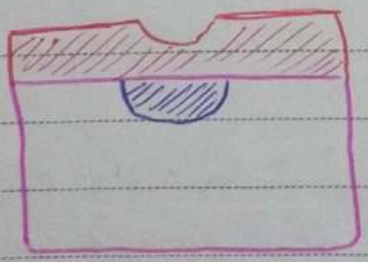
آلومینیوم بور

پس حال آن ما با B ناخالص می‌کنیم با استفاده کوره‌هایی که اتم‌های B به صورت گازی در آن قرار دارند در دمای ۱۰۰۰ غلظت مشخص تبدیل بور در n-Si دارد می‌شود و نفوذ آن به صورت تزریقی و اختلاط است. عمق نفوذ هم به دما، زمان و غلظت گاز بستگی دارد

آن چیزی که از دول بعد دارد کلکتور است چون ویفرها ناخالصی می‌دهند مدل ما اسمی می‌کنیم بیس یا بدل بفرستیم. بیس میزان ناخالصی و عرض آن چقدر باشد در آن سه پارامتر مقدار دارد و غلظت بستگی دارد

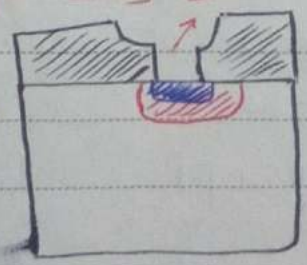
n-Si سه کلکتور B بور اضافه شده سه بیس

برای تولید اهمیت بالا در تمام مراحل قبل ناخالصی کردیم - جاهایی که اکسید بوده ضخامت بیشتری پیدا می‌کند نسبت به آن جایی که اکسید نبوده



برای ایجاد یک پنجره جدید با تمام مراحل قبل عمل می‌کنیم

در این حالت برای دیدن اهمیت باید بازکنیم



→ در این حالت کوره باید کار کرده باشد نسبت با حالت قبل فرآیند تعدادی که عمق نفوذ p خیلی کمتر از p است چون اهمیت در دول بیس

B

بور

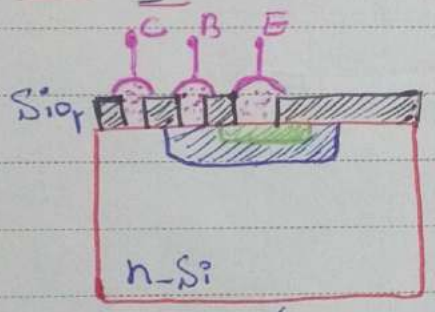
Subject
Date

هفته آینده کوئیز داریم دوشنبه

عرض کلکتور اهمیت مهم نیست - فقط عرض بیس مهم است - ولی اهمیت تعداد ناخالصی مهم است

فاصله بین آبی و قرمز می‌شود عرض بیس

پس یک ترانزیستور n-p-n داریم. حال باید اکسید ماخذ کنیم و هم چنین نیاز به یک سکه جدید داریم که توسط آن بتوانیم سه اتصال با سه Contact برقرار کنیم که از بین راحت‌تر



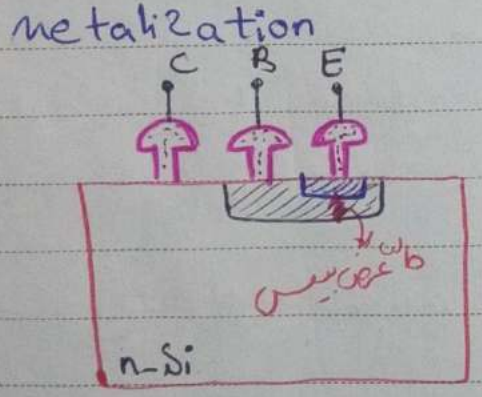
فرض کنیم باید به هر ناحیه دسترسی داشته باشیم

در آخرین گام فلزی می‌زاریم برای دسترسی به C, B, E

اتصال فلز با هر نیمه‌هادی تبدیل می‌شود به لحیم و شاتکی است شاتکی تبدیل به دیود می‌شود

در این جا هر سه تا اتصال فلز نیمه‌هادی باید اهمی باشند چون اگر شاتکی باشد دیود تولید می‌شود

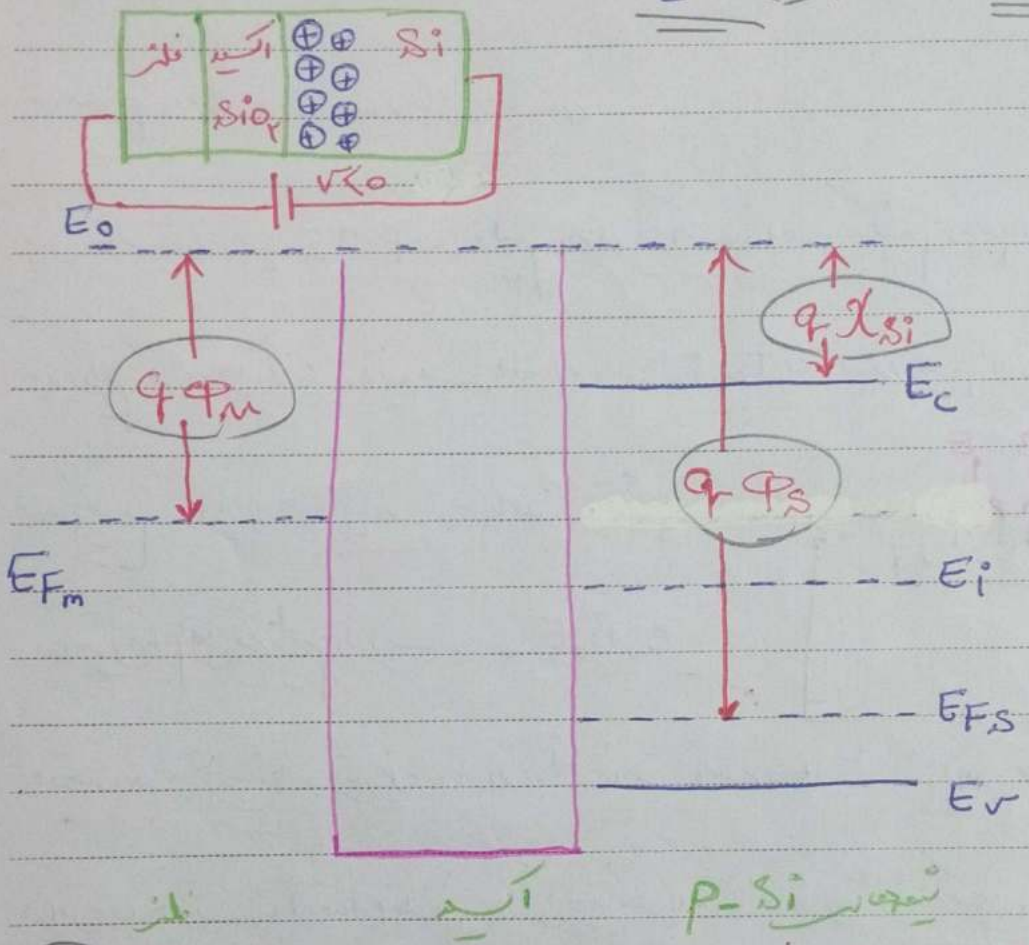
و دیگه ترانزیستور تولید نمی‌شد پس نود کلاً آن حذف است



β اگر زیاد شود VA تاثیر می‌دهد آن گاه ۲۵ هم تغییر می‌کند

Subject
Date

* اتصال فلز - اکسید - نیمه‌هادی: هیچ جابجایی بار بین فلز و نیمه‌هادی صورت نمی‌گیرد چون یک لایه عایق ترکیب دارد به نام SiO_2 اکسید



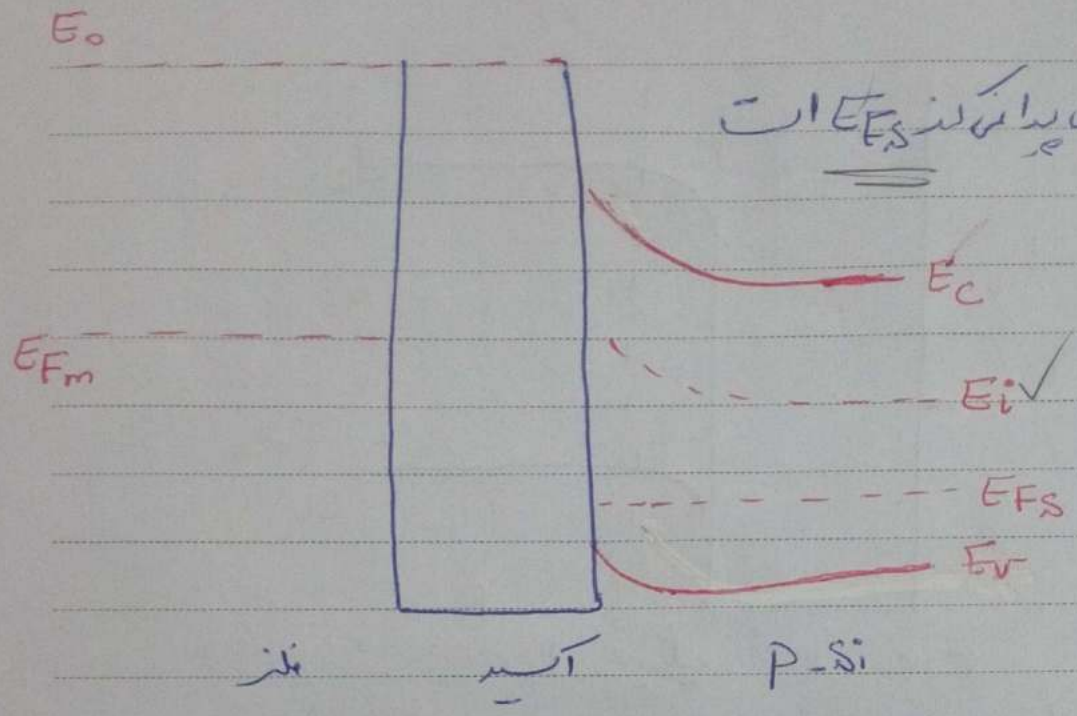
SiO_2 شکاف انرژی زیادی دارد نسبت به نیمه‌هادی‌ها - پس سطح هیچ نوری E_c و E_v مشخص می‌کنیم - در دو طرف اکسید حامل‌ها تجمع پیدا می‌کنند - پس از اتصال سه ماده به یکدیگر حامل‌هایی که تمایل داشتن از فلز به نیمه‌هادی و از نیمه‌هادی به فلز بروند توسط دیواره‌ی اکسید پخش تجمع می‌شوند که این تجمع وابسته به ولتاژ اعمال شده است

بسته به نوع ولتاژ اعمال شده و مقدار آن سه وضعیت رخ می‌دهد

الف) انباشتگی (Accumalation)

بعد از اتصال ولتاژ منفی به فلز اعمال کنیم - حامل‌های اکثریت نوع P که همان حفره‌ها هستند به جهت فلز می‌شوند و پشت شبه اکسید تجمع پیدا می‌کنند (حامل‌ها اکثریت) ولتاژ منفی که می‌دهیم سطح انرژی می‌رود بالا - با رفتن سطح انرژی فرمی پایین آمدن سطح انرژی نیمه‌هادی

Subject
Date



تنها چیزی که تغییر پیدا می‌کند E_{FS} است

هرچه فرمی تر به E_V باشد یعنی p آن قوی‌تر است

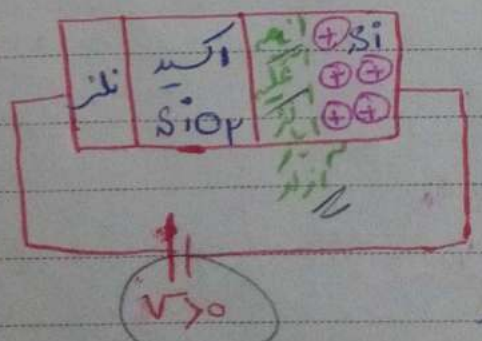
$$P = n_i e^{\frac{E_i - E_F}{KT}}$$

در محل تماس می‌تواند چگال‌تر شود. اکسید مثل یک مانع عمل می‌کند

هرچه $E_i - E_F$ بیشتر باشد یعنی بزرگ‌تر پس p بیشتر است

ـ) تخلیه (Depletion) اگر به تدریج ولتاژ را مثبت کنیم. ولتاژ غیر مثبت - پس حامل‌های مثبت نوع p از محل تماس اکسید دور می‌شوند در محل تماس اکسید و نیمه‌هادی یک ناحیه تخلیه به وجود می‌آید تخلیه از حامل‌های اکثریت همان حفره‌ها در نوع p

تخلیه از بار آزاد: نوع p حفره نوع n الکترون



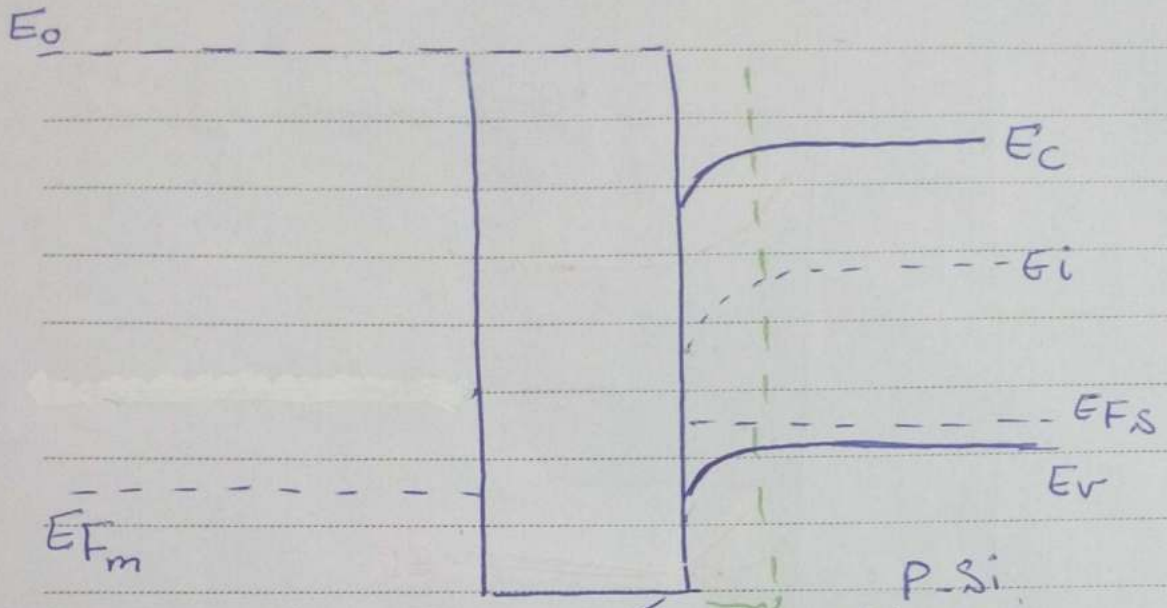
برای این که جذب حامل‌های اقلیت صورت بگیرد باید ولتاژ مثبت خیلی بزرگی دهیم

ولتاژ مثبت کوچک فقط ناحیه تخلیه ایجاد می‌کند

$$n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$$

حامل‌های اقلیت در نوع p

Subject
Date



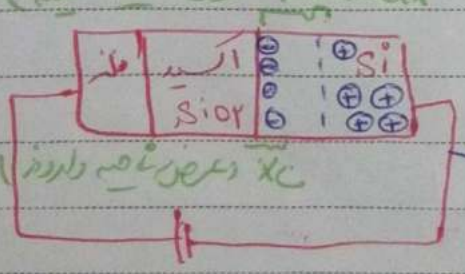
فلز — اکسید — ناحیه تخلیه — نیمه‌هادی نوع P — $V>0$

مصرف نزدیک فلز به سطح نزدیک نیمه‌هادی - انحنا به سمت بالا است

نوارهای انرژی تا جایی که انحنا داشته باشند می‌توانند تغییر کنند ولی اگر جذب شوند اگر مثل حالت قبل از اتصال و هیچ جابجایی ملموسی صورت نمی‌گیرد

ولتاژ بزرگ مثبت باعث شکسته شدن پیوندهای Si می‌شود باعث شود که بارهای متحرک جذب دیواره اکسید شده و این ناحیه را وارونگی می‌نامند

ج) وارونگی (Inversion) ولتاژ خیلی مثبت شود ($V \gg 0$) - عرض ناحیه تخلیه به حداکثر مقدار خود می‌رسد - پیوندهای Si-Si شکسته جفت الکترون و حفره ایجاد می‌شود - حفره‌ها دفع می‌شوند الکترون‌ها جذب می‌شوند بیشتر دیواره اکسید تجمع پیدا می‌کنند



نوع حاملی که تجمع پیدا کرده عکس نوع نیمه‌هادی است پس آن را وارونگی می‌نامند

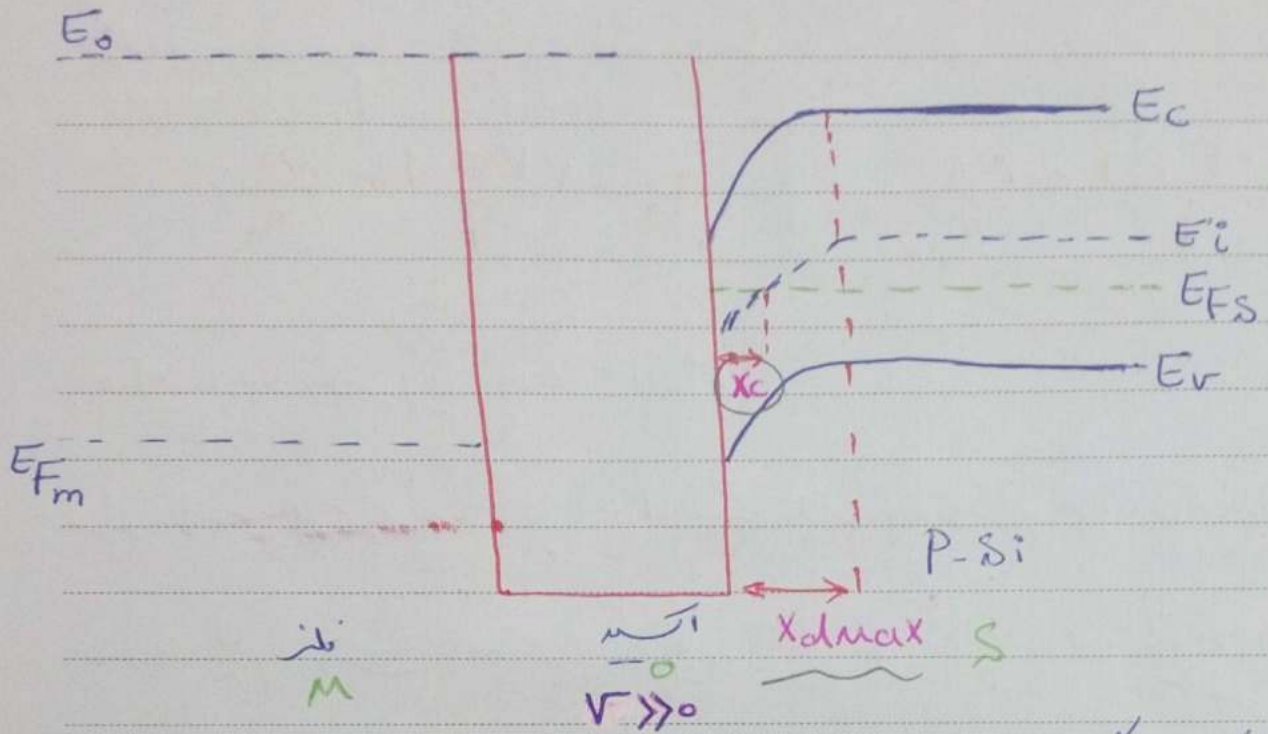
X_C خیلی کوچک‌تر از X_{dmax} است

$V \gg 0$

وقتی فرمی به بالای E_i یعنی نیمه‌هادی نوع (n) شده $V \gg 0$ انحنا بیشتر است می‌شود

GOLF

Subject
Date



زمانی که ولتاژ منفی مناسب می‌دهیم همان قدر که نیمه‌هادی P بوده به حالت n می‌شود

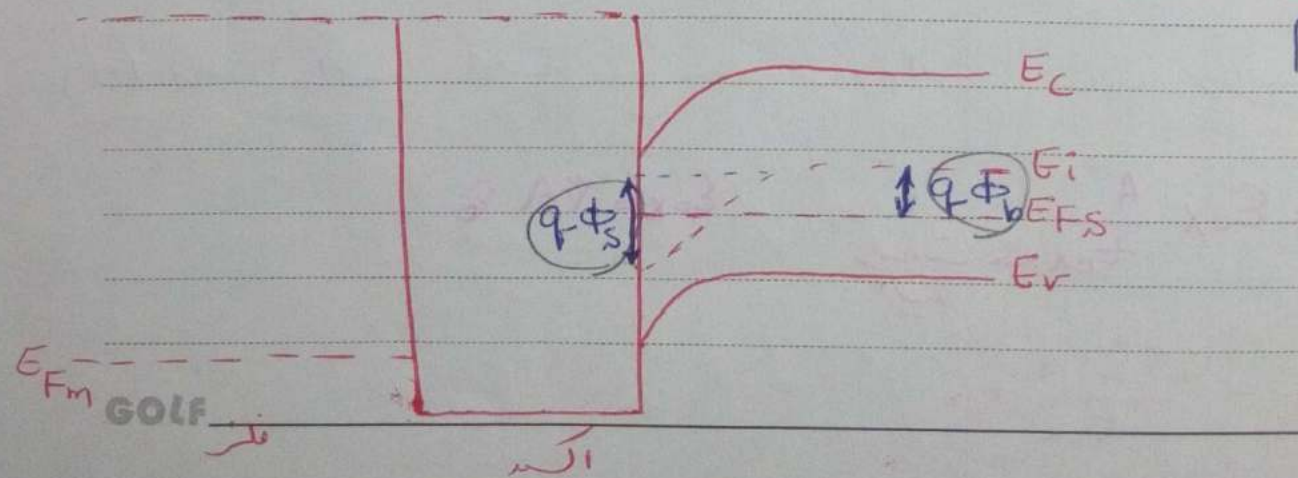
همان اندازه نیمه‌هادی به حالت n که در حالت قبل P بوده است

برای این که به حد مناسب از تجمع از الکترون‌ها برسیم باید چگالی الکترون‌های تجمع یافته

پشت اکسید به اندازه‌ی تجمع حفره‌های ناحیه باک (bulk) بود - ناحیه‌ای که دور از انتقال

وضعیت قبل از انتقال باشد) برسد این شرایط وارونگی قوی (Strong Inversion)

می‌گوییم



Subject
Date

در دارونگی قوی داریم که $\phi_s = 2\phi_b$

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

bulk

$$\phi_s = 2\frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}$$

n_i یک عدد بزرگ تقریبی یک عدد مثبت است

سرعت رسیدن به دارونگی نسبت به انباشتگی و تخلیه بسیار کندتر است چون حامل های اقلیت

سرکار داریم برای شکسته شدن پیوندهای Si-Si برای آزاد شدن یک الکترون همزمان

وصل شدن حامل های اقلیت پشت اکسید زمان بسیار بیشتری نیاز دارد تا نواحی انباشتگی

و تخلیه نیاز داریم. برای ایجاد نواحی انباشتگی و تخلیه به دلیل نقش داشتن حامل های اکثریت

زمان بسیار کمتری صرف می شود

اتصال فلز - اکسید - نیمه هادی نقش خازن هم دارد

* خازن اتصال MOS ناحیه انباشتگی خازن تابع ضخامت

$d(t)$ ضخامت اکسید - A سطح مقطع که همه جا یکسان است - ε باید برای اکسید باشد)

$$\boxed{C = \varepsilon_{ox} \frac{A}{t_{ox}}}$$

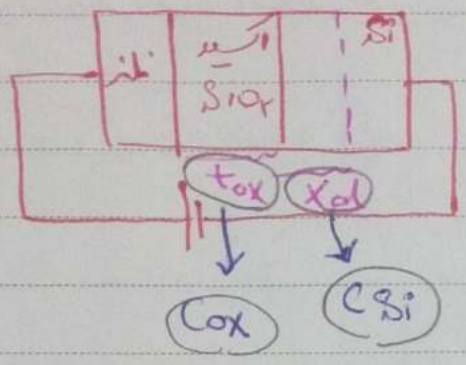
t_{ox} → ضخامت اکسید

$$\varepsilon_{ox} = 3.9\,\varepsilon_0$$

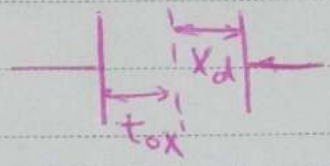
$$\boxed{C = \frac{3.9\,\varepsilon_0 A}{t_{ox}}}$$

GOLF

Subject
Date



۲ خازن سری با عدد ۲ مقاومت موازی هستند در اثر یک گیرنده خنثی می‌کنند تا مقدار جداسازی آنها کوچکتر شود



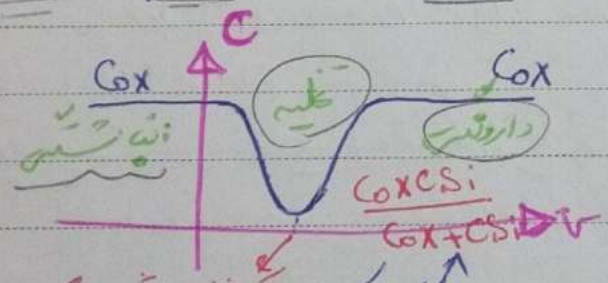
در آستانه وارونگی بیشترین مقدار خازن C_{Si} را داریم چون X_d max شده است

$$C_{Si} = \varepsilon_{Si} \frac{A}{d}$$

زمانی که X_d حداکثر باشد بیشترین میدان به خاطر ناحیه تخلیه داریم

$$C_{dep} = C_{ox} \text{ سری با } C_{Si} = \frac{C_{ox} C_{Si}}{C_{ox} + C_{Si}}$$

ولتاژ مثبت متوقف می‌کنیم سه پیوندها شکسته سه زوج الکترون حفره برای می‌شود سه الکترون ها تجمع می‌شوند پس خازن فقط خازن C_{ox} است زیرا در ناحیه تخلیه بار داریم و بار جمع نشده



حداکثر ناحیه تخلیه (آستانه وارونگی)

ترشی)

فرق انباشتگی و وارونگی در جا جریان منفی است اما مقدارشان عوض نمی‌شود

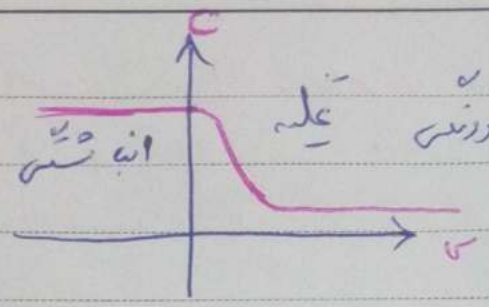
انباشتگی تخلیه سریع اتفاق می‌افتد چون به حامل های اکثریت سرعت زیاد دارد

وارونگی با حامل های اقلیت سرعت زیاد

پس در وارونگی هم انباشتگی تخلیه هستیم هنوز در سرعت های بالا - فرکانس های بالا

GOLF

Subject
Date



جدول تغییر ظرفیت دی‌الکتریک اکسید در ناحیه تخلیه هستیم چون
متناظر آن فرکانس های بالا

تغییرات CMOS برحسب ولتاژ

تمرین: منحنی نوارهای انرژی اتصال فلز - اکسید - نیمه‌هادی نوع p را برای سه ناحیه انباشتگی - تخلیه - وارونگی

* ولتاژ Flat-Band: باند مسطح

ولتاژی که اعمال می‌شود که نوارهای انرژی مسطح شوند

ولتاژی که در فلز اعمال می‌شود و در اثر آن سطوح انرژی صاف و مسطح خواهند بود را ولتاژ Flat Band می‌گویند

این حالت بین ناحیه انباشتگی تخلیه رخ می‌دهد مقدار این ولتاژ هم باید در اندازه‌ی اختلاف توابع کار فلز و نیمه‌هادی باشد تا انرژی‌ها جدا از یکدیگر داریم

$$V_{FB} = \varphi_M - \varphi_S$$

• نیمه‌هادی نوع p $\boxed{\varphi_M < \varphi_S}$ است

نیمه‌هادی نوع n $\boxed{\varphi_M > \varphi_S}$ است

برای دو نوع نیمه‌هادی مختلف

$V_{FB} < 0$ (p-Si) ✓

$V_{FB} > 0$ (n-Si) ✓

MOS را با p-Si می‌سازیم

GOLF

Subject
Date

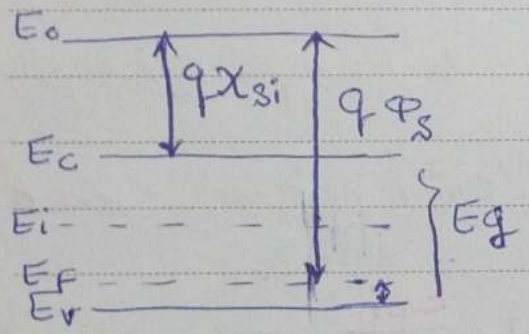
★ با فرض اطلاعات زیر مطلوبست محاسبه‌ی ولتاژ V_{FB} یک اتصال MOS با p-Si:

$p = 10^{15}\ cm^{-3}$ $\quad N_V = 3.08 \times 10^{19}\ cm^{-3}$ $\quad \varphi_{AL} = 4.1\ eV$

$\chi_{Si} = 4\ eV$ $\quad E_g = 1.12\ eV$

$$V_{FB} = \varphi_M - \varphi_S = \varphi_{AL} - \varphi_{Si} = \varphi_{AL} - \left(\chi_{Si} + \frac{E_g}{q} - \frac{E_F - E_V}{q}\right)$$

(A)



$$p = N_V e^{-\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right)}$$

$$10^{15} = 3.08 \times 10^{19}\ e^{-\left(\frac{E_F - E_V}{kT}\right)}$$

$$E_F - E_V = 0.269\ eV$$

اگر نوع n باشد بخش (A) تبدیل می‌شود به:

$$\left(\chi_{Si} + \frac{E_C - E_F}{q}\right)$$

تقسیم بر q نمی‌کنیم چون $E_g = 1.12\ eV$ اگر در واحد ولت است حتما تقسیم آن بر الکترون می‌شود ولت

$$V_{FB} = 4.1 - (4 + 1.12 - 0.269) = -0.7517$$

* برای محاسبه حداکثر عرض ناحیه تخلیه و هم‌چنین ضخامت ناحیه‌ی دلپذیر از روابط زیر استفاده می‌کنیم

وقتی ولتاژی اعمال می‌کنیم صرف شکستن پیوند ها شود

$X_d(max)$ ⟹ عمق ناحیه تخلیه

p-Si

$$X_d(max) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}\phi_S}{qN_A}}$$

ϕ_S حداکثر انحنای نوارهای انرژی

$$= \sqrt{\frac{4\varepsilon_{Si}\phi_b}{qN_A}}$$

اگر شود n-Si آن‌گاه N_A می‌شود N_D

GOLF

Subject
Date

ضریب گذردهی Si

$X_C = V_T \cdot \frac{\varepsilon_{Si}}{Q'_{SC}}$ ضخامت ناحیه دلپذیر $V_T = 26mV$

$Q'_{SC} = q N_A X_d = \sqrt{2\varepsilon_{Si}\phi_s q N_A} = \sqrt{4\varepsilon_{Si}\phi_b q N_A}$

بار واحد حجم ناحیه تخلیه — چگالی بار — تقریب

SC ← Space charge چون ناحیه تخلیه بار آزاد ندارد - ناحیه تخلیه که بار آزاد ندارد فقط یون هستند از بار فضایی استفاده می‌کنیم

بحث بر روی واحد حجم بیان می‌شود

★ با فرض نیمه‌هادی نوع n با $N_D = 10^{16} cm^{-3}$ مقادیر X_C و $X_{d(max)}$ را بدست آورید؟

$n_i = 1.5 \times 10^{10} cm^{-3}$ $X_C = V_T \cdot \frac{\varepsilon_{Si}}{Q'_{SC}}$

$Q'_{SC} = \sqrt{4\varepsilon_{Si}\phi_b q N_D}$ $\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_D}{n_i} = 26mV \times$

$\ln \frac{10^{16}}{1.5 \times 10^{10}} = 0.348V$ $\phi'_{SC} = \sqrt{4 \times 11.7 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 0.348 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16}}$

$\sqrt{\times 10^{16}} = 4.8 \times 10^{-8}$

$X_C = 26 \times 10^{-3} \times \frac{11.7 \times 8.85 \times 10^{-14}}{4.8 \times 10^{-8}} = 5.6 \times 10^{-7} cm$

تمام ابعاد باید cm باشند اگر m بود تبدیل می‌کنیم

$X_d(max) = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{Si}\phi_b}{q N_D}} = \sqrt{\frac{4 \times 11.7 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 0.348}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16}}} = 2 \times 10^{-5} cm$

ضخامت ناحیه دلپذیر خیلی کمتر از ضخامت ناحیه تخلیه است و در مقدار اعداد بدست آمده مشهود است

Subject
Date

* محاسبه ولتاژ آستانه (threshold voltage):

ولتاژ آستانه برابر است با ولتاژ لازم برای رسیدن از شرایط FB به ولوتگی که این مقدار برابر است با مجموع ولتاژهای FB بر ناحیه تخلیه + تخلیه بار ولوتگی

با توجه به این توضیح داریم:

$$V_{tn} = V_{FB} + V_{ox} + \phi_s = (\varphi_m - \varphi_s) + \frac{Q'_{sc}}{C'_{ox}} + 2\phi_b$$

$V_{tn} > 0$ ، V_{ox}: دو سر اکسید ، $(\varphi_m - \varphi_s) < 0$ ، $Q'_{sc} > 0$ ، $2\phi_b > 0$

نوع n ماسفت nMOS ، V_{FB}: منفی ، ϕ_s: ولتاژ مثبت با ناحیه ی ولوتگی ، Q'_{sc}: ناحیه تخلیه صفحه

نوع n ماسفت به p-Si

nMOS ← V_{tn} مثبت است - ولتاژ ترشولد n-MOS مثبت است

$q = CV$

p نوع ماسفت: $V_{tp} = V_{FB} - V_{ox} - \phi_s = (\varphi_m - \varphi_s)$

$V_{tp} < 0$ ، $(\varphi_m - \varphi_s) > 0$ ، منفی است

$-\frac{Q'_{sc}}{C'_{ox}} - \phi_s$ ، $\frac{Q'_{sc}}{C'_{ox}} < 0$ ، $\phi_s < 0$

شرایط را برای ما داشته باشیم که بتوانیم از آن جریان بکشیم

ولتاژ ترشولد

* با فرض مقادیر زیر مطلوبست محاسبه ی ولتاژ آستانه V_{tn} ؟

$T = 300K$ ، $t_{ox} = 500 Å$ ، $E_g = 1.12 eV$

$N_A = 4 \times 10^{15} cm^{-3}$ ، $\varphi_m = 4.1 V$ ، $\chi_{Si} = 4.05 V$

$N_V = 3.08 \times 10^{19} cm^{-3}$ ، $\varepsilon_{ox} = 3.9 \varepsilon_0$

$C = \varepsilon A/d$ زمانی که در واحد سطح مطرح می شود $C = \varepsilon/d$ و d باید برحسب cm بیان شود

GOLF

Subject
Date

$V_{tn} = V_{FB} + V_{ox} + \phi_s$ $\qquad V_{FB} = \varphi_m - \varphi_s = \varphi_m - (\chi_{Si}$

$+ \frac{E_g}{q} - \frac{E_F - E_V}{q})$ $\qquad E_F - E_V = kT \ln \frac{N_V}{P} = 26\times10^{-3}$ (ev)

$\ln \frac{3.08\times10^{-19}}{4\times10^{5}} = 0.23\,ev$ $\qquad V_{FB} = 4.1 - (4.05 + 1.12 - 0.23)$

$= -0.84\,V$ $\qquad V_{ox} = \frac{Q'_{sc}}{C'_{ox}} = \frac{\sqrt{4qN_A\varepsilon_{Si}\phi_b}}{\frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}}}$

$V_{ox} = \frac{\sqrt{4\times1.6\times10^{-19}\times4\times10^{15}\times11.7\times8.85\times10^{-14}}}{\frac{3.9\times8.85\times10^{-14}}{500\times10^{-8}}} = 0.42\,V$

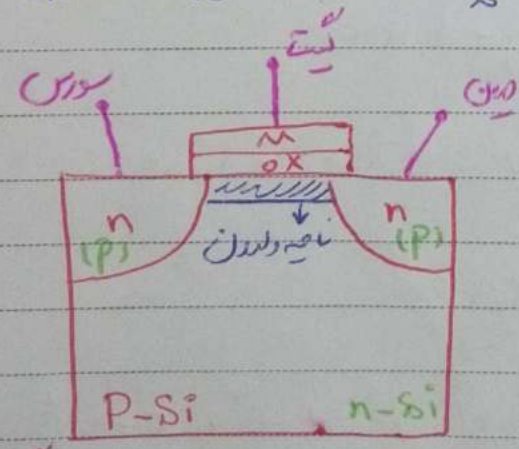
$\phi_b = \frac{kT}{q}\ln\frac{N_A}{n_i} = 26\times10^{-3}\ln\frac{4\times10^{15}}{1.5\times10^{10}} = 0.324$

t_{ox} باید تبدیل به cm شود $10^{-10}A^{\circ} \rightarrow 10^{-8}cm$

$\phi_s = 2\phi_b = 2(0.324) = 0.648\,V$

$V_{tn} = V_{FB} + V_{ox} + \phi_s = 0.648 + 0.42 - 0.84 = 0.22\,V$

ساختار MOSFET:



ناحیه دلدلن همون ناحیه‌ی کانال است

عرض کانال W

طول کانال L

با P-Si به nmos می‌سازند

ناحیه اشباع در ترایود (خطی) به مدار بستگی هستند VDS کم در نظر گرفته شود سوئیچینگ

تمام کاربردهای S مدار در ناحیه دلدلنگی اتفاق می‌افتد

GOLF