دانشگاه الزهرا (س)
دانشکده علوم پایه

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته فیزیک

عنوان

هدایت الکتریکی سیلیکان متخلخل بر پایه مستقل

استاد راهنما
آقای دکتر رضا ثابت داریانی

دانشجو
زهرا سادات حسینی

تیر ماه ۱۳۸۸

تشکر و قدردانی:

خدا را سپاس می گویم که مرا شوق آموختن داد.

اکنون که این پروژه به پایان رسیده است بر خود لازم می دانم کـه از زحمـات اسـتاد ارجمنـد جناب آقای دکتر ثابت داریانی که در مدت زمان انجام این پروژه بـا راهنمـایی هـای خـود مـرا یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم.

از جناب آقای صفری و سرکار خانم نیک خصال که در پیشبرد ایـن پـروژه مـرا یـاری نمودنـد تشکرکرده و همچنین از همکاری دوست عزیزم خانم رحمانی سپاسگذاری می نمایم.

چکیده

به دلیل خواص متنوع و قابل توجه سیلیکان متخلخل، این ماده در زمینه های بسیاری از جمله الکترونیک، میکرو الکترونیک، اپتیک و ساخت انواع حسگرها کاربرد فراوانی دارد.

در این پایان نامه تصمیم بر این است که سیلیکان متخلخل ساخته شود و هدایت الکتریکی آن بررسی گردد. برای ساخت سیلیکان متخلخل می خواهیم از روش الکتروشیمیایی استفاده کنیم. در نظر داریم ویفر های سیلیکان نوع p که بدون پولیش هستند را به کار ببریم و در محلول الکترولیت به جای اتانول از دی متیل فرمامید (DMF) استفاده کنیم. برای ساخت، چگالی های جریان و مدت زمان های متفاوتی به کار می بریم و نمونه های متفاوتی می سازیم. سپس با استفاده از تصاویر SEM ساختار و ریخت شناسی آنها را بررسی خواهیم کرد. ضخامت و درصد تخلخل نمونه های حاصله را با استفاده از روش وزن سنجی و به کمک تصاویر SEM اندازه گیری می کنیم.

به منظور مطالعهٔ هدایت الکتریکی سیلیکان متخلخل اتصالاتی در هر نمونه ایجاد می کنیم و آن را در مدار مورد نظر قرار می دهیم و منحنی I-V آن را در بازهٔ دمایی ۳۰۰-۲۰۰ کلوین اندازه گیری می کنیم.

در مرحلهٔ بعد، پس از ساخت سیلیکان متخلخل لایهٔ متخلخل به وجود آمده را از زیر لایه جدا می کنیم تا سیلیکان متخلخل بر پایهٔ مستقل (Free-Standing Porous Silicon) حاصل شود. سپس اتصالاتی بر روی نمونه ایجاد کرده و در مدار قرار می دهیم تا جریان گذرنده بر حسب ولتاژ اعمال شده را اندازه گیری نماییم. با استفاده از داده های به دست آمده به بررسی هدایت الکتریکی DC سیلیکان متخلخل می پردازیم و آن را با داده های مقالات دیگران مقایسه می کنیم.

فهرست

فصل ۱ مروری بر خواص فیزیکی نیمرسانا

۱-۱ مواد نیمرسانا ۲

۱-۱-۱ پیوند وساختار بلوری Si ۲

۱-۲ نوارهای انرژی ۴

۱-۲-۱ نیمرساناهای مستقیم و غیرمستقیم ۶

۱-۳ تراکم حاملهای آزاد در نیمرساناها ۸

۱-۳-۱ نیمرساناهای ذاتی و غیر ذاتی ۱۱

۱-۴ خواص اپتیکی ۱۳

۱-۴-۱ فرآیند جذب اساسی ۱۴

۱-۴-۲ فوتو رسانش ۱۵

۱-۴-۳ لومینسانس ۱۵

فصل ۲ هدایت الکتریکی، پیوندگاه ها مکانیزم های هدایت الکتریکی

۲-۱ رسانش ۱۷

۲-۱-۱ رسانندگی الکتریکی فلزات ۱۷

۲-۱-۲ رسانندگی نیمرسانا ۲۱

۲-۱-۳ اثر دما در تراکم حاملهای بار نیمرسانا ۲۴

۲-۲ پخش ۲۶

۲-۲-۱ جریان پخش در نیمرسانا ۲۶

۲-۳ پیوندگاه p-n ۲۷

۲-۳-۱ حالت تعادل گرمایی ۲۸
۲-۳-۲ مشخصه جریان-ولتاژ ۲۹
۲-۴ پیوندگاههای فلز-نیمرسانا ۳۳
۲-۴-۱ اتصال سد شوتکی ۳۳
۲-۴-۲ اتصال اهمی ۳۷
۲-۵ تونل زنی ۴۰
۲-۵-۱ نظریهٔ کلی تونل زنی مکانیک کوانتومی از طریق سدهای پتانسیل ۴۰
۲-۵-۲ ضریب عبور ۴۴
۲-۵-۳ تصحیح نیروی تصویری ۴۶
۲-۶ مقاومت ویژه تونلی و چگالی جریان ۴۷
۲-۷ تونل زنی از طریق دام‌ها ۵۰
۲-۸ گسیل شاتکی ۵۲
۲-۹ اثر پول – فرنکل ۵۸

فصل ۳ سیلیکان متخلخل و مروری بر هدایت الکتریکی آن

مقدمه
۳-۱ روش شیمیایی ۶۴
۳-۲ روش آندیزاسیون الکتروشیمیایی ۶۴
۳-۲-۱ پتانسیل ۶۶
۳-۲-۲ سلول ۶۶

۳-۲-۳ الکترولیت ۶۷
۳-۳ مکانیزم انحلال ۶۸
۳-۳-۱ شکل گیری منفذ ۷۰
۳-۳-۲ شکل منفذ ۷۱
۳-۳-۳ اندازهٔ منفذ ۷۱
۳-۴ اثر شرایط آندیزاسیون ۷۳
۳-۵ ریخت شناسی لایه های سیلیکان متخلخل ۷۵
۳-۶ ساخت سیلیکان متخلخل بر پایه مستقل ۷۶
۳-۷ محدودیت کوانتومی ۷۸
۳-۸ هدایت الکتریکی در سیلیکان متخلخل ۷۸
۳-۹ نظم گیری نواری در فصل های مشترک فلز/PS و PS/Si ۸۱
۳-۱۰ ترابرد الکترون ۸۴

فصل ۴ کار های عملی انجام شده

۴-۱ ساخت سیلیکان متخلخل ۹۳
۴-۲ ریخت شناسی نمونه ها ۹۶
۴-۲-۱ تعیین تخلخل و ضخامت ۱۰۳
۴-۳ مشخصه I-V و بررسی هدایت الکتریکی نمونه های سیلیکان متخلخل ۱۰۵
۴-۴ مشخصه I-V و بررسی هدایت الکتریکی سیلیکان متخلخل بر پایه مستقل ۱۱۶

نتایج و پیشنهادات ۱۲۵

فهرست مراجع ۱۲۷

فصل اول

مروری بر خواص فیزیکی نیمرسانا

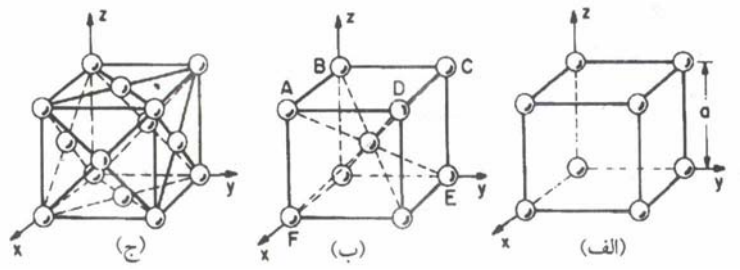
۱-۱ مواد نیمرسانا

مواد جامد در سه دسته:نارساناها(عایق)، نیمرساناها(نیمه هادی) و رساناها(هادی) گروه بندی می شوند. رسانندگی یک نیمرسانا به طور کلی نسبت به دما، روشنایی، میدان مغناطیسی، ومقدار دقیق ناخالصی اتمها حساسیت دارد. این حساسیت در رسانندگی، نیمرسانا را به یکی از مهمترین مواد برای کاربردهای الکترونیکی تبدیل می کند. نیمرساناها شامل تعدادبسیاری از مواد با خواص فیزیکی و شیمیایی متفاوتند. این مواد در گروههایی که رفتارهای مشابهی دارند طبقه بندی میشوند. این طبقه بندی بر اساس موقعیت آنها در جدول تناوبی عناصر است. معروفترین طبقه، نیمرساناهای گروه چهارم هستند که شامل عناصر. C(الماس)، Si، Ge و α-Sn (قلع خاکستری) میباشند. از میان این عناصر، سیلیکان به علت کاربرد های گسترده در میکرو الکترونیک، فراوانی در پوسته زمین و غیر سمی بودن بیشتر موردتوجه قرار گرفته است و به مقدار خیلی زیاد مورد مطالعه واقع شده است؛ تکنولوژی سیلیکان تاکنون در بین تمام تکنولوژی های نیمرسانایی پیشرفته ترین میباشد. بنابراین در اینجا به بررسی این ماده میپردازیم [۱و۲].

۱-۱-۱ پیوند وساختار بلوری Si

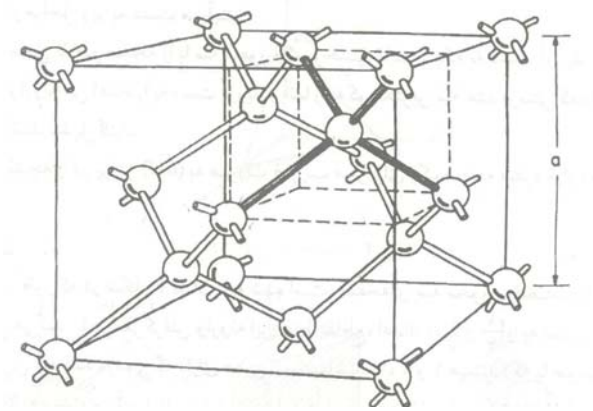
ماده نیمرسانای مورد مطالعه، تک بلور میباشد که در آن اتم ها به طریق سه بعدی دوره ای آرایش یافته اند. آرایش دورهای اتم ها در بلور شبکه نامیده میشود. در بلور یک اتم هرگز دور از یک مکان ثابت، منفرد سرگردان نمی باشد. ارتعاشات گرمایی مربوط به این اتم حول این مکان متمرکز می شود. برای یک نیمرسانای معین، یک یاخته واحد وجود دارد که نماینده تمام شبکه است؛ با تکرار یاخته واحد میتوان تمام شبکه را ایجاد نمود.

شکل(۱-۱) بعضی از یاخته های واحد بلور- مکعبی را نشان میدهد. نیمرساناهای عنصری از نمونه های منفرد اتمها تشکیل می شوند؛ سیلیکان و ژرمانیوم، دارای یک ساختار شبکه الماسی نظیر آنچه در شکل (۱-۲) نموده شده میباشند.



شکل ۱-۱ سه یاخته واحد بلور مکعبی الف) مکعب ساده ب) مکعب بدنه مرکز دار ج) مکعب رخ مرکز دار

این ساختار نیز به خانواده بلور مکعبی تعلق دارد و میتوان آن را به صورت دو زیر شبکه رخ مرکز دار (fcc) که در یکدیگر نفوذ کرده اند، مشاهده نمود، بدین طریق که یک زیر شبکه به اندازه یک چهارم فاصله در راستای قطر مکعب نسبت به زیر شبکه دیگر جابجا شده است. تمام اتم ها در شبکه الماسی یکسان هستند، و هر اتم در شبکه الماسی با چهار نزدیکترین همسایه که با فاصله مساوی در گوشه های یک چهار وجهی قرار دارند، احاطه شده است [۱].

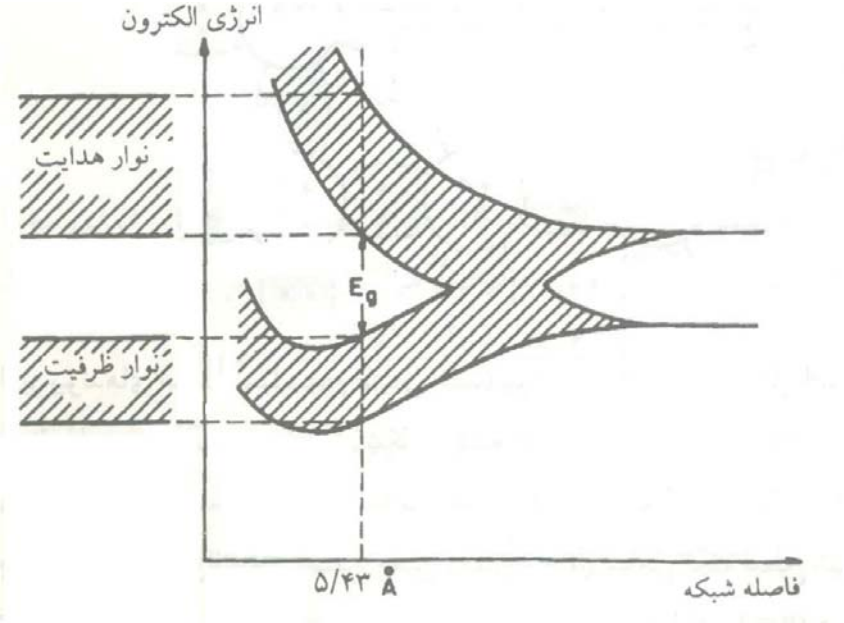


شکل ۱-۲ شبکه الماسی [۱]

هر اتم در مدار خارجی دارای چهار الکترون است، و هر اتم این الکترونهای ظرفیت را با چهار همسایه اش به اشتراک می گذارد. این اشتراک گذاری الکترونها به پیوند کووالانس مشهور است، هرجفت الکترون یک پیوند کووالانس تشکیل می دهند. پیوند کووالانس بین اتم های یک نوع عنصر و یا بین اتم های عنصر های متفاوت که دارای پیکر بندی یکسانی در پوسته خارجی هستند اتفاق می افتد، هر الکترون با هر هسته، مقدار زمان مساوی صرف می کند. مع ذالک، هر دو الکترون بیشتر وقت خود را در فاصله میان دو هسته صرف می کنند. نیروی جاذبه هر دو هسته بر الکترون ها، دو اتم را به یکدیگر میچسباند [۱].

۱-۲ نوارهای انرژی

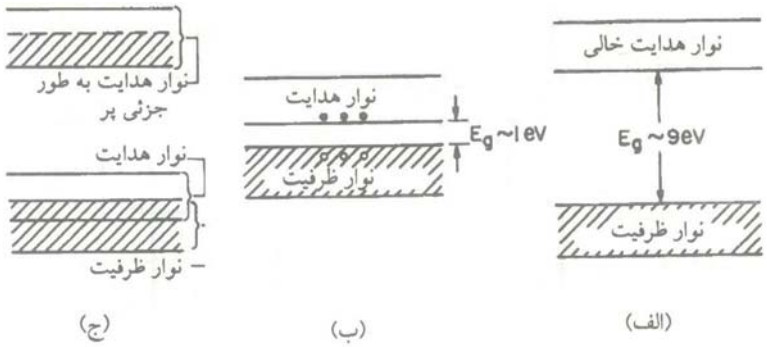
برای یک اتم منفرد، الکترونهای اتم فقط میتوانند دارای ترازهای انرژی مجزا باشند. وقتی N اتم را برای تشکیل بلور به هم نزدیک میکنیم، تراز انرژی تبهگن N-تایی به خاطر برهمکنش اتمی به N تراز اما با فواصل خیلی نزدیک تقسیم می شود. این امر به تراز انرژی اساساً پیوسته منجر میشود. شکل (۳-۱) نمودار ترسیمی تشکیل بلور شبکه الماسی از اتم های مجزای سیلیکان میباشد. هر اتم مجزا دارای سطوح انرژی مجزای خود میباشد(دو ترازی که در منتهی الیه راست نمودار نشان داده شده اند). ضمن کاهش فواصل بین اتمی، هر تراز انرژی تبهگن برای تشکیل نوار تقسیم میشود. وقتی فاصله بین اتمها به فواصل بین اتمی در حال تعادل شبکه الماسی (با ثابت شبکه $\mathring{A}$ ۵/۴۳ برای سیلیکان) نزدیک میشود، این نوار مجدداً به دو نوار تقسیم میشود. این نوارها توسط ناحیه ای با انرزی های خاص که الکترونهای جامدات نمی توانند دارای آن انرژی ها باشند از یکدیگر جدا می شوند. این ناحیه شکاف غدغن، یا گاف نواری Eg نامیده می شود. نوار بالاتر نوار رسانش نامیده میشود، در حالیکه نوار پایینی نوار ظرفیت نامیده میشود.



شکل۱-۳ تشکیل نوار های انرژی وقتی که، بلور شبکه الماسی با نزدیک کردن اتم های مجزای سیلیکان تشکیل می شود [۱].

شکل (۱-۴) نمودارهای نوار انرژی سه دسته جامدهای نارسانا، نیمرسانا، و رسانا را نشان میدهد. در عایقها (شکل ۱-۴-الف) تعداد حالتها در نوار پایینی درست به اندازه ای است که میتواند الکترونهای ظرفیت عرضه شده توسط اتم ها را در خود جای دهد. نوار ظرفیت کاملاً پر شده است و نوار رسانش خالی است. نیمرسانا به جامدی اطلاق می گردد که در آن بالاترین نوار انرژی اشغال شده نوار ظرفیت است که در دمای صفر کلوین کاملاً پر است ولی شکاف بالای نوار (Eg) کوچک است به طوریکه در دمای اتاق الکترون ها می توانند به طور حرارتی از نوار ظرفیت به به نوار رسانش برانگیخته شوند (شکل ۱-۴-ب).

در فلزات نظیر شکل۰(۱-۴-ج) نوار رسانش فقط به طور جزئی توسط الکترونها پر شده است؛ به همین ترتیب، نمودار نوار انرژی برای یک فلز را میتوان به صورت دو نوار در نظر گرفت که روی هم افتاده اند، به طوریکه گاف ممنوع وجود ندارد.



شکل۱-۴ نمایش طرح وار نوار های انرژی الف) نارسانا ب) نیمرسانا ج) رسانا [۱].

از اصول مکانیک کوانتوم میدانیم که نمیتوان هیچ تکانهٔ خالصی به الکترونهای یک نوار کاملاً پر نسبت داد. بنابراین یک نوار کاملاً پر، در شارش جریان شرکت نمیکند. بر حسب نمودار نوار انرژی، انرژی اضافه شده به جامد، به طور گرمایی یا توسط یک میدان الکتریکی اعمال شدهٔ خارجی، باید آنقدر انرژی به الکترونهای نوار ظرفیت پر بدهد تا آنها بتوانند به نوار رسانش بپرند و در تولید شارش جریان شرکت کنند. وقتی Eg زیاد باشد، احتمال چنین گذاری بسیار کم است، نظیر مورد یک عایق که در آن $Eg > 5eV$.

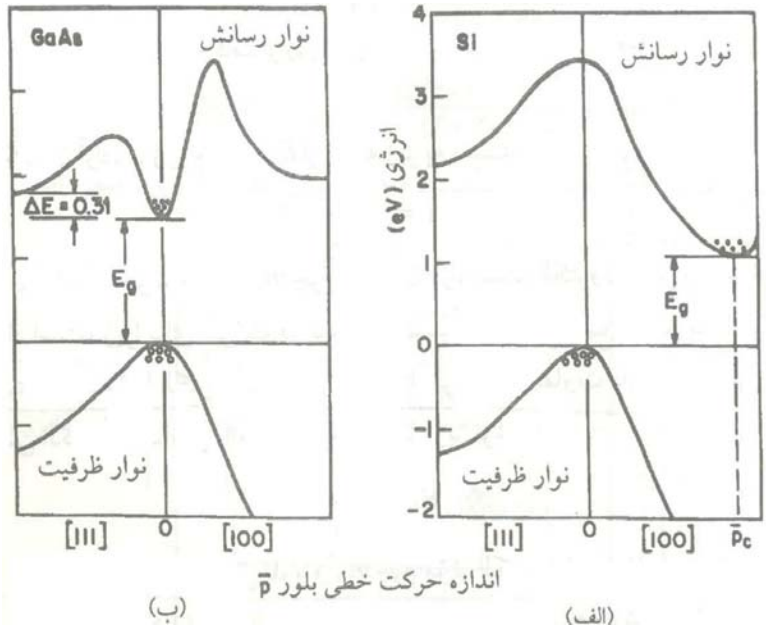
در یک نیمرسانا گاف ممنوع انرژی Eg خیلی زیاد نیست ، مثلاً در دمای اتاق و در فشار معمولی جو اندازه گاف نواری برای سیلیکان۱/۱۲eV میباشد.گاف نواری در دمای 0K برای سیلیکان به ۱/۱۷eV میرسد.تغییر گاف نواری Si با دما را میتوان به صورت زیر بیان نمود:

$$E_g = 1.17 - \frac{(4.73\times10^{-4})T^2}{(T+636)} \qquad (۱-۱)$$

این امر باعث میشود که پیوند الکترونهای ظرفیت چندان محکم نباشد. در دمای اتاق برخی از الکترونهای نوار ظرفیت ممکن است انرژی گرمایی کافی دریافت کنند تا بر گاف ممنوع غالب آمده و به نوار رسانش برسند. برای هر گذار موفق یک الکترون ظرفیت به نوار رسانش یک حفره در نوار رسانش ایجاد میشود که تحت یک میدان الکتریکی خارجی هر دو در رسانش شرکت میکنند[۱و۴].

۱-۲-۱ نیمرساناى مستقیم و غیرمستقیم

در نیمرساناها با گاف مستقیم مانند گالیوم آرسنید، انتهای نوار رسانش مستقیماً بالای قلهٔ نوار ظرفیت قرار میگیرد. الکترونهای نزدیک قلهٔ نوار ظرفیت قادرند گذاری به حالتهای نزدیک انتهای نوار رسانش انجام دهند این عمل بدون تغییری در اندازه $\overline{P}$ انجام میگیرد (شکل ۱-۵الف).



شکل۱-۵ ساختارهای نواری انرژی Si و GaAs. دایره ها (o) بر حفره های نوار ظرفیت اشاره می کنند و نقطه ها (•) به الکترونهای نوار رسانش دلالت دارند [۱]

نیمرساناهای گاف غیرمستقیم نیز وجود دارند که در آنها انتهای نوار رسانش در مبدا قرار نمیگیرد. Si در این گروه قرار میگیرد، که برای آن بیشینهٔ نوار ظرفیت در $\overline{P}=0$ روی میدهد؛ اگرچه کمینه در نوار رسانش در راستای [۱۰۰] در $\overline{P}=\overline{P}_c$ روی میدهد. مطابق شکل (۱-۵-ب) در این حالت الکترون نمیتواند با یک گذار مستقیم از قله نوار ظرفیت به انتهای نوار رسانش برود زیرا در گذار تغییر اندازه حرکت بلور لازم میباشد. بنابراین وقتی الکترونی در سیلیکان گذاری از نوار ظرفیت به نواررسانش انجام می دهد، نه فقط تغییر انرژی بلکه تغییر در

اندازه حرکت بلور لازم میباشد. برای یک الکترون آزاد، انرژی جنبشی ε از رابطهٔ زیر به دست می آید:

$$\varepsilon = \frac{p^2}{2m_\circ} \qquad (۲-۱)$$

که در آن p اندازه حرکت ذره و $m_\circ$ جرم الکترون آزاد است. الکترون در نوار رسانش شبیه به الکترون آزاد است، زیرا برا ی حرکت در نیمرسانا نسبتاً آزاد است. مع ذالک، بخاطر پتانسیل دوره ای هسته، جرم موثر الکترون رسانش با جرم الکترون آزاد تفاوت دارد. رابطه انرژی-اندازه حرکت خطی الکترون رسانش را میتوان به صورت زیر نوشت:

$$\varepsilon = \frac{\overline{P}^2}{2m_e} \qquad (۳-۱)$$

که در آن $\overline{P}$ اندازه حرکت خطی بلور و m_e جرم موثر الکترون است اندازه حرکت خطی بلور شبیه به اندازه حرکت ذره است. این جرم موثر معرف ماهیت مکانیک کوانتومی حرکت الکترونها یا حفره ها در نیمرساناهاست. همانطور که با معادلهٔ (۱-۳) بیان شد روابط انرژی-اندازه حرکت در نزدیکی کمینه نوار رسانش یا نزدیک بیشینهٔ نوار ظرفیت به صورت سهمی هستند. از رابطه معلوم $\varepsilon - \overline{P}$ میتوان جرم موثر را از مشتق دوم ε نسبت به $\overline{P}$ به دست آورد.

$$m_e = \left[\frac{d^2\varepsilon}{d\overline{P}^2}\right]^{-1} \qquad (۴-۱)$$

بنابراین هر قدر سهمی باریکتر باشد، جرم موثر کوچکتر است. جرم موثر الکترون در سیلیکان به راستای بلوری بستگی دارد.

۱-۳ تراکم حاملهای آزاد در نیمرساناها

به منظور تعیین رفتار الکتریکی یک نیمرسانا، لازم است از تعداد الکترونها و حفره های قابل استفاد برای رسانش جریان مطلع باشیم. ابتدا چگالی الکترون را در نوار رسانش بررسی میکنیم و سپس نتیجه را به طور مشابه به حفره ها در نوار ظرفیت بسط میدهیم. برانگیختگی دمایی

مداوم در دماهای محدود، منجر به برانگیزش الکترونها از نوار ظرفیت به نوار رسانش میشود و همان تعداد حفره در نوار ظرفیت به جای میگذارد. برای به دست آوردن چگالی الکترونها ابتدا چگالی الکترونی را وقتی انرژی به اندازه $d\varepsilon$ نمو کند تعیین میکنیم. این چگالی $n(\varepsilon)$ از حاصلضرب چگالی حالات انرژی مجاز در واحد حجم $N(\varepsilon)$ و احتمال اشغال آن تراز انرژی $f(\varepsilon)$ به دست می آید. $f(\varepsilon)$ تابع توزیع فرمی-دیراک میباشد و احتمال آنرا میدهد که تراز انرژی ε توسط یک الکترون اشغال شود.

$$f(\varepsilon)=\frac{1}{e^{(\varepsilon-\varepsilon_F)/KT}+1} \qquad (۵-۱)$$

که در آن K ثابت بولتزمن است، T دمای مطلق بر حسب کلوین است و ε_F تراز فرمی میباشد. انرژی فرمی بنا به تعریف عبارتست از انرژی حالتی که احتمال اشغال آن توسط یک الکترون دقیقاً $\frac{1}{2}$ میباشد تابع توزیع فرمی را برای انرژی. هایی که$3KT$ بالا یا پایین سطح فرمی هستند می توان به طور تقریب با عبارات ساده تر زیر بیان نمود:

$$f(E)\simeq e^{-(\varepsilon-\varepsilon_F)/KT} \qquad (\varepsilon-\varepsilon_F)>3kT \text{ به } (۶-۱ \text{ الف})$$

$$f(E)\simeq 1-e^{-(\varepsilon-\varepsilon_F)/KT} \qquad (\varepsilon-\varepsilon_F)<-3kT \text{ به ازای } (۶-۱ \text{ ب})$$

برای اکثر قطعات نیمرسانا معادلهٔ (۱-۷-الف) تقریب خوبی برای $f(\varepsilon)$است. معادلهٔ (۱-۷-ب) را میتوان به صورت احتمال اشغال یک حالت انرژی ε توسط یک حفره در نظر گرفت. احتمال اینکه یک تراز توسط الکترون اشغال نشده باشد، عبارت است از

$$1-f(\varepsilon)=\frac{1}{1+e^{(\varepsilon_F-\varepsilon)/KT}} \qquad (۷-۱)$$

از آنجا که یک تراز اشغال نشده توسط الکترون در نوار ظرفیت به معنای این است که تراز توسط یک حفره اشغال شده است، معادلهٔ (۱-۷) برای یافتن چگالی حفره ها در نوار ظرفیت

مفید است. چگالی الکترونها در نوار رسانش همانطور که گفته شد با انتگرال گیری حاصلضرب چگالی حالتها و احتمال اشغال حاصل میشود:

$$n = \int_{E_c}^{\infty} f(\varepsilon)N(\varepsilon)d\varepsilon \qquad (۸-۱)$$

که در آن $N(\varepsilon)d\varepsilon$ چگالی حالتها در محدوده انرژی $d\varepsilon$ است. چگالی حالتهای قابل دسترس در نوار رسانش از رابطه

$$N(\varepsilon) = \frac{4\pi}{h^3}(2m_e)^{3/2}(\varepsilon - \varepsilon_c)^{1/2} \qquad (۹-۱)$$

و حالتهای انرژی مجاز در نوار ظرفیت از رابطهٔ

$$N(\varepsilon) = \frac{4\pi}{h^3}(2m_h)^{3/2}(\varepsilon_v - \varepsilon)^{1/2} \qquad (۱۰-۱)$$

به دست می آیند. در این روابط h ثابت پلانک، ε_c انرژی لبه نوار رسانش و ε_v انرژی لبه نوار ظرفیت است.

با قرار دان معادلات (۱-۶-الف) و (۱-۹) در معادلهٔ (۱-۸) و انتگرال گیری، چگالی الکترون در نوار رسانش به صورت زیر به دست می آید:

$$n = N_c \exp[-\frac{(\varepsilon_c - \varepsilon_F)}{KT}] \qquad (۱۱-۱)$$

$$N_c = 2(\frac{2\pi m_e KT}{h^2})^{3/2}$$

کمیت N_c چگالی موثر حالتها در نوار رسانش نامیده می شود. به همین ترتیب چگالی حفره ها در نوار ظرفیت عبارت است از:

$$p = \int_{-\infty}^{\varepsilon_v} [1 - f(\varepsilon)]N(\varepsilon)d\varepsilon \qquad (۱۲-۱)$$

با قرار دادن معادلات (۱-۶- الف) و (۱-۱۰) در معادلهٔ (۱-۱۲) و انتگرال گیری نتیجه می شود:

$$p = N_v \exp[\frac{-(\varepsilon_F - \varepsilon_v)}{KT}] \qquad (۱۳-۱)$$

$$N_v = 2(\frac{2\pi m_h KT}{h^2})^{3/2}$$

کمیت N_v چگالی موثر حالتها در نوار ظرفیت نامیده می شود.

حاصلضرب np در یک نیمرسانا در یک دمای معلوم و تحت تعادل گرمایی، مقدار ثابتی است. تعادل گرمایی به صورت وضعیت حالت پایا در یک دمای معلوم، بدون نیروهای خارجی با برانگیختگی، تعریف می شود. حاصلضرب np تنها به چگالی حالتهای انرژی مجاز و انرژی گاف ممنوع بستگی دارد، لیکن از چگالی ناخالصی یا مکان تراز فرمی مستقل است [۱و۴].

۱-۳-۱ نیمرساناهای ذاتی و غیر ذاتی

در نیمرسانای ذاتی، چگالی الکترون دقیقاً با چگالی حفره برابر است، در نتیجه

$$n = p = n_i \qquad (۱۴-۱)$$

که n_i چگالی حامل ذاتی است. بنابراین به دست می آوریم:

$$np = n_i^2$$

این قانون اثر جرم است، که برای هر دو نوع نیمرساناهای ذاتی و غیر ذاتی تحت تعادل گرمایی صادق است. در نیمرسانای غیرذاتی، افزایش یک نوع از حاملها، به کاهش تعداد نوع دیگر، از طریق بازترکیب می انجامد به طوریکه حاصلضرب تعداد هر دو نوع حامل در یک دمای معلوم، ثابت باقی می ماند. تراز فرمی در نیمرسانای ذاتی که با ε_i مشخص می شود، را میتوان با مساوی قرار دادن معادلات (۱-۱۱) و (۱-۱۳) و با قرار دادن $\varepsilon_F = \varepsilon_i$، به دست آورد

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2}(\varepsilon_c + \varepsilon_v) + \frac{3}{4} kT \ln \frac{m_h}{m_e} \qquad (۱۵-۱)$$

در دمای اتاق، جمله دوم خیلی کوچکتر از گاف نواری است. از این رو، تراز فرمی ذاتی ε_i، یعنی تراز فرمی نیمرسانای ذاتی، بطور کلی خیلی نزدیک به وسط گاف نواری قرار می گیرد.

انحراف ناچیز از وسط گاف به علت اختلاف جرمهای موثر الکترون و حفره معمولاً قابل چشم پوشی است. همچنین، میتوان در معادلات (۱-۱۱) و (۱-۱۳) قرار داد: $\varepsilon_F = \varepsilon_i$ و آنها را در معادله (۱-۱۴) جایگزین کرد. نتیجه عبارتست از:

$$n_i = N_c \exp[\frac{-(\varepsilon_c - \varepsilon_i)}{KT}] = N_v \exp[\frac{-(\varepsilon_i - \varepsilon_v)}{KT}] \qquad (۱-۱۶)$$

با استفاده از این رابطه، می توان معادلات (۱-۱۱) و (۱-۱۳) را به صورت زیر بازنویسی کرد

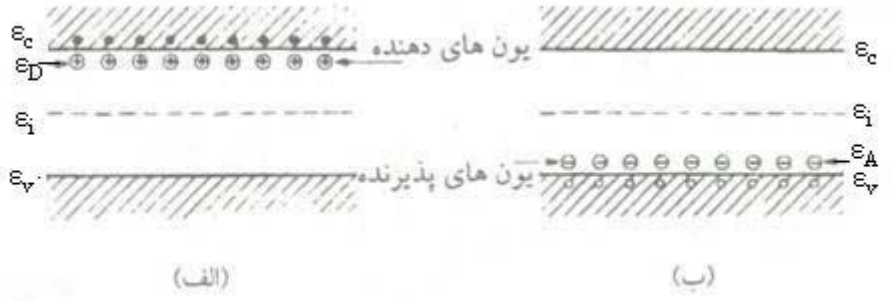
$$n = n_i \exp[\frac{(\varepsilon_F - \varepsilon_i)}{KT}] \qquad (۱-۱۷)$$

$$p = n_i \exp[\frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_F)}{KT}] \qquad (۱-۱۸)$$

در معادلات (۱-۱۷) و (۱-۱۸) ، تراکم الکترون و حفره را بر حسب تراکم ذاتی n_i و انرژی وسط گاف ε_i بیان کرده ایم. این معادلات برای هر دو نوع نیمرساناهای ذاتی و غیر ذاتی صادق اند [۴].

وجود مقدار کم و کنترل شده ناخالصیهای معین می تواند بر خواص الکتریکی نیمرساناها تاثیر چشمگیری بگذارد و این موضوع اثر به سزایی در پیشرفت قطعات نیمرسانا داشته است. وقتی نیمرسانا با ناخالصی افزایش می یابد، نیمرسانا غیر ذاتی می شود و سطوح انرژی ناخالصی مطرح می شوند. اگر در نیمرسانای چهار ظرفیتی یک اتم ناخالصی پنج ظرفیتی وارد کنیم، تعداد الکترونها برای تشکیل چهار پیوند کووالانسی با تمام همسایگانش کافی است، لیکن الکترون پنجم نسبتاً آزاد باقی می ماند. پنجمین الکترون یک الکترون رسانش می شود که به نوار رسانش داده می شود. حتی در دماهای کاملاً پایین هر اتم پنج ظرفیتی می تواند با فعال سازی گرمایی، یک الکترون به نوار رسانش بدهد. بنابراین با اینکه در دمای اتاق در نیمرسانای خالص برانگیختگی حاملها از نوار ظرفیت به نوار رسانش بسیار کم است، تمام ناخالصیهای پنج ظرفیتی در این دما یونیده خواهند بود و الکترون پنجم آنها می تواند در شارش جریان شرکت

کند. این اتمها را ناخالصیهای بخشنده می نامند. تراز انرژی الکترون پنجم معمولاً درست زیر نوار رسانش قرار میگیرد (شکل۱-۶ الف).



شکل۱-۶ نمایش طرحی نوار انرژی نیمرساناس غیر ذاتی با الف) یون های دهنده ب) یون های پذیرنده [۱].

وضعیت مشابهی برای ناخالصیهای سه ظرفیتی ایجاد میگردد. این ناخالصیها برای کامل شدن پیوندشان با اتم چهار ظرفیتی همسایه، یک الکترون کم دارند. این الکترون ها را با انرژی کوچکی از اتم همسایه قرض می گیرند، و به این ترتیب حفره ای در نوار ظرفیت به جا می ماند. بنابراین، با وجود اتم سه ظرفیتی اتم میزبان به آسانی یونیده می شود و رسانش حفره ای در دمای اتاق (و یا زیر آن) صورت می گیرد. این ناخالصیها ناخالصیهای پذیرنده نامیده می شوند و تراز انرژی آنها اندکی بالاتر از بالای نوار ظرفیت قرار میگیرد (شکل ۱-۶ ب). نیمرساناهایی را که اتم های بخشنده در آنها غالب اند مواد نوع n (زیرا حاملهای بار منفی اند) و نیمرسانایی را که در آنها اتمهای پذیرنده غالب اند نمونه های نوع p می نامند. (در این نمونه ها حاملهای بار، حفره ها، مثبت اند) [۳].

۱-۴ خواص اپتیکی

خواص اپتیکی به خواص شبکه ای و خواص الکترونی تقسیم می شود. خواص الکترونی، همان طور که از نام آن بر می آید، به فرآیندهایی مربوط می شود که شامل حالت های