

سیلیسیوم

۱-۱- مواد نیم رسانا

جریان الکتریکی در فلز از حرکت بارهای منفی (الکترونها) و در نیم رساناها از حرکت بارهای منفی (الکترونها) و بارهای مثبت (حفره ها) ناشی می شود. مواد نیم رسانا اعم از سیلیسیوم و ژرمانیوم می توانند بوسیله اتم های ناخالص چنان آلائیده شوند که جریان الکتریکی عمدتاً از الکترونها یا حفره ها شود. نیم رساناها گروهی از مواد هستند که رسانایی الکتریکی آنها بین فلزات و عایق ها قرار دارد. بلور کامل و خالص اغلب نیمه رساناها در صفر مطلق عایق است. ویژگیهای متخصه نیم رساناها این است که رسانایی آنها با تغییر دما، برانگیزش نوری و میزان ناخالص به نحو قابل ملاحظه ای تغییر می کند. این قابلیت تغییر خواص الکتریکی، مواد نیمه رسانا را انتخاب مناسبی برای تحقیق در زمینه قطعات الکترونیکی ساخته است. نیم رساناها رساناهای الکترونیکی هستند که مقاومت ویژه آنها در دمای اطاق عموماً در گستره 10^{-2} تا $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$ واقع است. این گستره در بین مقادیر مقاومت ویژه رساناهای خوب $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ و عایقها 10^{14}

$10^2 \Omega \cdot \text{cm}$ تا $10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$ قرار دارد [۱] و [۲]

مقاومت ویژه نیم رساناها می تواند قویاً به دما وابسته باشد، وسایلی از قبیل، ترانزیستورها، یکسوسازها، مدوله کننده ها، آشکارسازها، ترمیستورها و فوتوسلها

براساس ویژگیهای نیم رساناها کار می کنند. رسانندگی یک نیم رساناها بطور کلی نسبت به دما، روشنایی، میدان مغناطیسی، مقدار دقیق ناخالصی اتم ها حساسیت دارد. مطالعه مواد نیم رسانا در اوایل قرن نوزدهم شروع شده در طول سالها نیم رساناهای فراوانی مورد مطالعه قرار گرفته اند.

جدول ۱ قسمتی از جدول تناوبی مربوط به نیمه رساناها را نشان می دهد. نیم رساناهای عنصری یعنی آنهایی که از نمونه های منفرد اتم ها تشکیل می شوند، نظیر سیلیسیوم (Si) و ژرمانیوم (Ge) را می توان در ستون IV پیدا نمود. مع ذلک، نیم رساناهای مرکب بیشماری از دو یا تعداد بیشتری عنصر تشکیل می گردند. برای مثال گالیوم آرسنید (GaAs) یک ترکیب III-V است که ترکیبی از گالیوم از ستون III و آرسنیک (As) از ستون V می باشد. در جدول ۲ لیست بعضی از نیم رساناهای عنصری و مرکب ارائه شده است. [۱]

جهت خرید فایل word به سایت www.kandoo.cn.com مراجعه کنید
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۰۵۱۱ تماس حاصل نمایید

جدول ۱- قسمتی از جدول تناوبی مربوط به نیم رسانه ها

دوره	ستون II	ستون III	IV	V	VI
۲		B	C	N	
		بور	کربن	نیتروژن	
۳	Mg	Al	Si	P	S
	منیزیم	آلومینیوم	سیلیسیوم	فسفر	گوگرد
۴	Zn	Ga	Ge	As	Se
	روی	گالیوم	ژرمانیوم	آرسنید	سلنیم
۵	Cd	In	Sn	Sb	Te
	کادمیوم	ایندیم	قلع	آنتیموان	تلوریم
۶	Hg		Pb		
	جیوه		سرب		

جدول ۲- نیمه رسانای عنصری و مرکب

عنصر	IV-IV ترکیب	III-V ترکیب	II-VI ترکیب	IV-VI ترکیب
Si	Sic	AlAs	CdS	PbS
Ge		AlSb	CdSe	PbTe
		B-N	CdTe	
		GaAs	ZnS	
		GaP	ZnSe	
		GaSb	ZnTe	
		In-As		
		In-P		
		In-Sb		

نیم رساناهای بسیار خاص از خود رسانندگی ذاتی نشان می دهند که از رسانندگی ناخالصی در نمونه های با خلوص کمتر متمایز است.

در گستره دمای ذاتی ویژگیهای الکتریکی نیم رسانا در اثر ناخالصی های بلور اساساً تغییر نمی کند. یک طرح نواری الکترونی که به رسانندگی ذاتی منجر می شود.

شکل ۱-۱- طرح نواری برای رسانندگی ذاتی در نیم رسانا. در صفر کلون رسانندگی صفر

است، زیرا تمام حالت های نوار ظرفیت پر و تمام حالت های نوار رسانش خالی اند. با افزایش دما الکترونها بطور گرمایی از نوار ظرفیت به نوار رسانش برانگیخته و در آنها متحرک می شوند.

نوار رسانش در صفر مطلق خالی است و به اندازه گاف انرژی E_g از نوار ظرفیت فاصله دارد. گاف نواری اختلاف انرژی بین پائین ترین نقطه نوار رسانش و بالاترین نقطه نوار ظرفیت است. پائین ترین نقطه نوار رسانش را لبه نوار رسانش می نامند. بالاترین نقطه در نوار ظرفیت به لبه نوار ظرفیت موسوم است.

با افزایش دما، الکترونها به گونه گرمایی از نوار ظرفیت به نوار رسانش برانگیخته می شوند (شکل ۱-۲). هم الکترونها نوار رسانش و هم اربیتالهای خالی یا حفره های به جا مانده در نوار ظرفیت، در رسانندگی الکتریکی شرکت می کنند. [۲]

(ب) سیلیسیوم، در شرایط ذاتی تراکم حفره ها با تراکم الکترونها برابر است. در یک دمای مفروض تراکم ذاتی

در Ge بیشتر از Si است، زیرا گاف انرژی ذر (0.7eV) باریکتر از (1.12eV) Si است.

۱-۲- سیلیسیوم

در اوایل دهه ۱۹۵۰ ژرمانیوم مهمترین ماده نیمه رسانا بود مع ذلک ثابت شد که ژرمانیوم برای بسیاری از کاربردها مناسب نمی باشد. زیرا قطعات ژرمانیوم حتی در دماهایی که بطور معتدل بالا می روند نشت جریان بالایی را نشان می دهند به علاوه اکسید ژرمانیوم در آب قابل حل است و برای ساخت قطعات مناسب نیست، از اوایل دهه ۱۹۶۰ به بعد سیلیسیوم به یک جانشین عملی تبدیل شده است و اینک واقعاً ژرمانیوم را به عنوان یک ماده برای ساخت نیمه هادی از میدان خارج کرده است.

دلیل عمده استفاده از سیلیسیوم این است که قطعات سیلیسیومی جریان نشت کمتری را نشان می دهند و اکسید سیلیسیوم با کیفیت بالا را می توان به طور گرمایی رشد داد و از طرف دیگر قطعات سیلیسیوم اصلاح شده خیلی ارزانتر از مواد نیم رسانای دیگر هستند. سیلیسیوم به شکل سیلیکا و سیلیکاتها ۲۵٪ پوسته زمین را تشکیل می دهد، و سیلیسیوم بعد از اکسیژن از نظر فراوانی دومین ماده است و در حال حاضر، سیلیسیوم یکی از آن عناصر جدول تناوبی است که به مقدار خیلی زیاد مورد مطالعه واقع شده است، و تکنولوژی سیلیسیوم تا کنون در بین تمام تکنولوژیهای نیم رسانایی پیشرفته ترین می باشد.

بسیاری از نیم رساناهای مرکب دارای خواص الکتریکی و اپتیکی هستند که سیلیسیوم فاقد آن هاست. این نیم رساناها بویژه گالیوم آرسنید بطور عمده برای کاربردهای موج ریز و نوری مورد استفاده قرار می گیرند. اگرچه ما آنقدر که درباره تکنولوژی سیلیسیوم می دانیم درباره تکنولوژی نیم رساناهای مرکب نمی دانیم، بخشی از تکنولوژی نیم رساناهای مرکب بخاطر پیشرفت در تکنولوژی سیلیسیوم رشد کرده است.

۱-۳- ساختار بلوی سیلیسیوم

در یک بلور اتمها به طریق سه بعدی دوره ای آرایش یافته اند. آرایش دوره ای اتمها در بلور شبکه نامیده می شود. در بلو، 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 نیم رسانای معین یک یاخته واحد وجود دارد که نماینده تمام شبکه است، با تکرار یاخته واحد در سرتاسر بلور، می توان تمام شبکه را ایجاد نمود. سیلیسیوم دارای یک ساختار شبکه الماسی با ثابت شبکه $A \frac{5}{43}$ آنگستروم می باشد. (شکل ۱-۳) این ساختار متعلق به خانواده بلور مکعبی هست و می توان آن را به صورت دو زیر شبکه مکعبی fcc که در یکدیگر نفوذ کرده اند، مشاهده نمود.

بدین طریق که یک زیر شبکه به اندازه یک چهارم فاصله در راستای قطر مکعب (یعنی تغییر مکانی به اندازه $\frac{a\sqrt{3}}{4}$) نسبت به زیر شبکه دیگر جابجا شده است.

تمام اتمها 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. (به کره های متصل شده با خط سیاه در شکل ۱-۳ الف مراجعه شود). به زبان برداری شبکه الماسی یک شبکه مکعبی مرکز وجهی fcc با یک پایه دو اتمی در نقاط $(\frac{a}{4}(\hat{X}, \hat{Y}, \hat{Z}), 0)$ و یا به شکل دو شبکه fcc که در امتداد قطر در هم جابجا شده اند.

سلول بسیط شبکه fcc با بردارهای بسیط:

$$\vec{a}_1 = \frac{a}{2}(\hat{Y} + \hat{Z}), \vec{a}_2 = \frac{a}{2}(\hat{X} + \hat{Z}), \vec{a}_3 = \frac{a}{2}(\hat{X} + \hat{Y}) \quad (1-1)$$

معین می شود. شبکه وارون fcc با ثابت شبکه a یک شبکه مکعبی مرکز حجمی bcc با ثابت شبکه $\frac{4\pi}{a}$ با بردارهای بسیط:

$$\vec{b}_1 = \frac{4\pi}{a} \times \frac{1}{2}(\vec{y} + \vec{z} - \vec{x}), \vec{b}_2 = \frac{4\pi}{a} \times \frac{1}{2}(\vec{x} - \vec{y} + \vec{z}), \vec{b}_3 = \frac{4\pi}{a} \times \frac{1}{2}(\vec{x} + \vec{y} - \vec{z}) \quad (1-2)$$

می باشند. [۲]

۱-۴- پیوندهای ظرفیت

هر اتم در شبکه الماسی با چهار نزدیکترین همسایه مجاور احاطه می شود. شکل ۴-۱ (الف) پیکربندی چهار وجهی شبکه الماسی را نشان می دهد. نمودار پیوند دو بعدی ساده شده برای چهار وجهی در شکل ۴-۱ (ب) نشان داده شده است هر اتم در مدار خارجی دارای چهار الکترون است و هر اتم این الکترونهای ظرفیت را با چهار همسایه اش به اشتراک می گذارد و این اشتراک گذاری الکترونها به پیوند کووالانس

مشهور است، هر جفت الکترون یک پیوند کووالانت تشکیل می دهند. پیوند کووالانس بین اتمها یک نوع عنصر و یا بین اتمهای عناصر متفاوت که دارای پیکربندی یکسانی در پوسته خارجی هستند اتفاق می افتد، هر الکترون با هر هسته، مقدار زمان مساوی صرف می کنند. مع ذلک، هر دو الکترون بیشتر وقت خود را در فاصله میان دو هسته صرف می کنند. نیروی جاذبه هر دو دسته بر الکترونها، دو اتم را به یکدیگر می چسباند.

در دماهای پائین، الکترونها در شبکه چهار وجهی مربوط به خودشان محدود می شوند در نتیجه برای رسانش مناسب نیستند. در دماهای بالاتر، ارتعاشات گرمایی ممکن است پیوندهای کووالان را بشکنند. وقتی پیوندی شکسته می شود، یک الکترون آزاد می شود که می تواند در جریان رسانش شرکت کند شکل ۱-۵ (الف) موقعیت را وقتای که یک الکترون ظرفیت بر یک الکترون آزاد تبدیل می شود، نشان می دهد. در پیوند کووالان کمبود یک الکترون ایجاد می شود. این کمبود می تواند با یکی از الکترونها همسایه پر شود که منجر به سوق کمبود مثلاً از A به محل B در شکل ۱-۵ (ب) می شود. بنابراین می توانیم این کمبود را به صورت یک ذره شبیه الکترون در نظر بگیریم. این ذره غیر واقعی را حفره می گویند. این ذره حامل بار مثبت است و زیر نفوذ میدان الکتریکی اعمال شده در راستای مخالف حرکت الکترون حرکت می کند مفهوم حفره شبیه به حباب در مایع است اگرچه در واقع این مایع است که حرکت می کند اما آسانتر است که درباره حرکت حباب در راستای مخالف صحبت کنیم. [۱]

۱-۵- نوارهای انرژی

تئوری نوار انرژی براساس مدل کرونیک پنی و مدل‌های مفصل‌تر همچون مدل بستگی قوی و یا حل معادله شرودینگر نشان می‌دهند که انرژی‌هایی که الکترون‌ها در جامد اختیار می‌کنند در نوارهای مجازی قرار می‌گیرند که این نوارها به وسیله ناحیه انرژی ممنوع از هم فاصله دارند. برای یک اتم منفرد مثلاً یک اتم منفرد سیلیکون الکترون‌های اتم فقط می‌توانند دارای ترازهای انرژی مجزا باشند:

$$E_n = -\frac{z^2 m_0 e^2}{zh^2} \frac{1}{n^2} \quad (1-3)$$

که در آن m_0 جرم الکترون آزاد- e بار الکترون- h ثابت پلانک و n یک عدد درست مثبت و عدد کوانتومی اصلی است. انرژی‌های مجزا برای تراز پایه $n=1$ برابر $13/6\text{ev}$ - و برای اولین تراز تحریک $n=2$ برای $3/4\text{ev}$ - و همین‌طور الی آخر می‌باشند.

برای دو اتم یکسان، وقتی از همدیگر خیلی دور هستند ترازهای انرژی مجزا برای یک عدد کوانتومی اصلی معین (مثلاً $n=1$) شامل یک سطح تبهگن دوگانه می‌باشد. یعنی هر اتم دارای انرژی یکسان (مثلاً $13/6\text{ev}$ - به ازای $n=1$) هستند. در این حالت توابع موج الکترون‌های دو اتم با اربیتال‌های اتمی مجزای ψ_1 , ψ_2 بیان می‌شوند ضمن آنکه دو اتم به یکدیگر نزدیک می‌شوند، تراز تبهگن دوگانه در اثر برهمکنش بین اتمها به دو تراز تقسیم خواهد شد و توابع موج همپوشانی خواهند داشت و انرژی پتانسیل سیستم دو اتمی فوق به فاز نسبی دو تابع بستگی دارد که در فاز موافق $\psi_1 + \psi_2$ و در فاز مخالف به صورت $\psi_1 - \psi_2$ خواهد بود [۳].

وقتی N اتم را برای تشکیل بلور بهم نزدیک می کنیم، ترازهای انرژی تبهگن N تایی به خاطر برهمکنش اتمی به N تراز اما با فواصل خیلی نزدیک تقسیم می شود. با توجه به تعداد زیاد اتمها در بلور 10^{22} atm/cm^3 اختلاف انرژی نزدیک به هم از مرتبه 10^{-20} eV می باشد که در اکثر موارد عملی گروه ترازها را به عنوان نوار انرژی و در داخل هر نوار توزیع انرژی را به صورت پیوسته در نظر می گیرند [۴].

در یک ماده نیم رسانا تعداد الکترونها به اندازه ای است که تعدادی نوار مجاز را کاملاً پر کرده و بین آخرین نوار مجاز پر شده و اولین نوار مجاز (خالی) بعدی فاصله E_g وجود دارد. E_g در نیمه هادیها کمتر از حدود 4 eV و در عایقها بیشتر از 4 eV می باشد. آخرین نوار اشغال شده را نوار ظرفیت و نوار اشغال نشده (خالی) بعدی را نوار رسانش می گویند.

به ازای هر الکترونی که از نوار ظرفیت به نوار رسانش گذار می کند یک جای خالی (حفره) در نوار ظرفیت ایجاد می شود. الکترون تحریک شده و حفره ایجاد شده هر دو می توانند به عنوان حامل بار عمل کرده و در افزایش هدایت الکتریکی نیمه هادی سهیم باشند:

$$\sigma = ne\mu_e + Pe\mu_h \quad (1-4)$$

دراین معادله P, n به ترتیب چگالی الکترون و حفره، μ_e تحرک الکترون و μ_h تحرک حفره، و σ رسانندگی است.

حفره ها و الکترون های تولید شده اگرچه می توانند در تمام حجم بلور آزادانه حرکت کنند ولی تا زمانی که باز ترکیب نشده اند، و چون تحت تاثیر پتانسیل تناوبی فلزهای اتمی باردار قرار دارند حرکت آنها مشابه حرکت یک الکترون آزاد در خلاء نمی باشد. روش جالبی که برای حل این مشکل وجود دارد این است که به جای حل معادله شرودینگر با استفاده از تابع اتمهای شبکه که منجر به محاسبات مفصل و پیچیده می شود، متداول است که از تمامی اثرات اتمهای شبکه بر روی یک الکترون (و یا حفره) آزاد صرف نظر شده و تمامی این اثرات را بر روی کمیت جرم ذره تصحیح می کنند، در اینصورت می توان تمام فرمول های ساده مربوط به حرکت یک ذره باردار در خلاء را برای حرکت یک الکترون در جامد نیز مورد استفاده قرار داد، به شرطی که به جای جرم گرانشی ذره m ، یک جرم تصحیح شده (جرم موثر m_e یا m_h) را جایگزین نمود. با این ساده سازی رابطه تکانه- انرژی یک الکترون در بلور از رابطه:

$$E_k = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{h^2 k^2}{2m_e} \quad (1-5)$$

بدست می آید که در آن m_e جرم موثر الکترون، E_k انرژی جنبشی و P تکانه بلور است. برای حفره ها رابطه مشابهی داریم. انرژی شکاف ممنوعه از رابطه زیر بدست می آید:

$$E_g = E_c - E_v \quad (1-6)$$

که در آن E_c کمینه انرژی نوار هدایت و E_v بیشینه انرژی نوار ظرفیت می باشد. شکل ۱-۶ نمودار ترسیمی تشکیل بلور شبکه الماسی از اتمهای مجزای سیلیسیوم را نمایش

می دهد. هر اتم مجزا دارای سطوح انرژی مجزای خود می باشد (دو ترازوی که در منتهی الیه راست نمودار نشان داده شده اند). همانگونه که فواصل بین اتمی کاهش می یابد، هر تراز تبهگن انرژی برای تشکیل نوار تقسیم می شود.

وقتی فاصله بین اتمها به فواصل بین اتمی در حال تعادل شبکه الماسی (با ثابت شبکه $5/43A$ برای شبکه سلسیوم) نزدیک می شود، این نوار مجدداً به دو نوار تقسیم می شود. این نوارها توسط ناحیه ای یا انرژیهای خاصی که الکترونها جامدات نمی توانند دارای آن انرژیها باشند، از یکدیگر جدا می شوند. این ناحیه شکاف ممنوع یا گاف نواری E_g است. نوار بالاتر، نوار رسانش نامیده می شود، در حالی که نوار پایینی مطابق آنچه که در قسمت آخر سمت چپ شکل ۶-۱ نشان داده شده است، نوار ظرفیت نامیده می شود [۱].

۱-۶- نیم رساناهای گاف مستقیم و غیرمستقیم

مرسوم است که دو گروه اصلی نیم رساناها را که دارای گافهای مستقیم و غیرمستقیم هستند را از هم متمایز کنیم. وقتی در فضای P کمینه نوار رسانش منطبق با بیشینه نوار ظرفیت گردد. نیم رسانا را نیم رسانای گاف مستقیم می گویند در این مورد $InSb$ ، Cds ، $GaAs$ و بسیاری دیگر از ترکیبات III-V یا II-VI که ناشی از ترکیب عناصر گروههای سه و پنج یا دو و شش جدول تناوبی عناصر را نام برد. از طرف دیگر وقتی کمینه نوار رسانایی در فضای P منطبق با بیشینه نوار ظرفیت نباشد دارای نیم رسانای گاف

غیرمستقیم هستیم. عناصر نیم رسانای Si و Ge مثالهای مهمی از نیم رسانای غیرمستقیم هستند [۵].

شکل ۱-۷ نمودارهای نوار انرژی را برای سیلیسیوم و گالیوم آرسنید نشان می دهد که در آن انرژی برحسب اندازه حرکت بلوری برای دو راستای بلور رسم شده است. توجه داریم که میان پائین ترین نوار رسانش و بالای نوار ظرفیت گاف نواری E_g وجود دارد.

برای سیلیسیوم شکل ۱-۷ (الف)، بیشینه در نوار ظرفیت در $\bar{P} = 0$ روی می دهد، اگرچه کمینه نوار رسانش در راستای $[100]$ در $\bar{P} = \bar{P}_c$ روی می دهد. این موقعیت اختلاف عمده بین اندازه حرکت ذره و اندازه حرکت بلوری را نشان می دهد. وقتی انرژی جنبشی صفر است، اندازه حرکت ذره ای برای الکترون آزاد صفر می شود.

مع ذلک، یک الکترون در کمینه نوار رسانش (با انرژی جنبشی صفر) می تواند دارای اندازه حرکت بلوری غیر صفر باشد (یعنی همانطور که در شکل ۱-۷ (الف) نشان داده شد. $(\bar{P} = \bar{P}_c)$ بنابراین وقتی الکترونی در سیلیسیوم گذاری از نوار ظرفیت به نوار رسانش انجام می دهد، نه فقط تغییر انرژی بزرگتر از E_g ، بلکه تغییری در اندازه حرکت بلوری نیز لازم می باشد برای گالیوم آرسنید، شکل ۱-۷ (ب) بیشینه در نوار ظرفیت و کمینه در نوار رسانش در اندازه حرکت بلوری یکسان $(\bar{P} = 0)$ روی می دهد. بدین ترتیب الکترونی که از نوار ظرفیت به نوار رسانش گذار می کند. این عمل را می تواند بدون تغییری در اندازه \bar{P} انجام دهد.

گالیوم آرسنید نیم رسانای مستقیم نامیده می شود، زیرا گذار از نوار ظرفیت به نوار رسانش احتیاجی به تغییر اندازه حرکت بلوری الکترون ندارد.

سیلیکون نیم رسانای غیرمستقیم نامیده می شود، زیرا در گذار تغییر اندازه حرکت بلور لازم می باشد. این اختلاف بین ساختارهای نوار مستقیم و غیرمستقیم برای دیودهای تابنده نور ولیزرهای نیم رسانا خیلی مهم است. این ابزارها برای ایجاد فوتون کافی به نیم رسانای مستقیم نیاز دارند.

در ضمن همانطور که با معادله ۵-۱ بیان شد روابط انرژی-اندازه حرکت در نزدیک کمینه نوار رسانش یانزدیک بیشینه نوار ظرفیت به صورت سهمی است. از رابطه معلوم

$E - \bar{P}$ مشخص می تواند جرم موثر را از مشتق دوم E به \bar{P} بدست آورد:

$$m_e = \left[\frac{d^2 E}{d\bar{P}^2} \right]^{-1} \quad (1-7)$$

بنابراین هر قدر سهمی باریکتر باشد، جرم موثر کوچکتر است. مثلاً برای گالیوم-آرسنید، با سهمی نوار رسانش خیلی باریک جرم موثر $0.07m_0$ است. m_0 جرم الکترون آزاد) در صورتیکه برای سیلیسیوم با سهمی نوار رسانش پهن تر، جرم موثر الکترون $0.19m_0$ می باشد (جرم موثر در بلور سیلیسیوم به راستای بلور بستگی دارد، مقدار $0.19m_0$ برای موثر عمود بر راستای $[100]$ می باشد). [۱]

۱-۷- فرآیندهای تولید و بازترکیب

هر الکترونی که بتواند بطریقی مقدار انرژی لازم برای گذار از نوار ظرفیت به نوار رسانش را کسب کند، از نوار ظرفیت به نوار رسانش گذار خواهد نمود، گذار الکترون به سمت بالا، یک حفره بجای می گذارد، بطوریکه یک زوج الکترون- حفره تولید می شود. این فرایند تولید حامل نامیده می شود که در شکل ۱-۸ با G_{th} نمایش داده شده است. عوامل موثر در فرآیند تولید حامل عبارتند از:

دما- نور و میدان الکتریکی

وقتی الکترونی از نوار رسانش به نوار ظرفیت می رود یک زوج الکترون حفره نابود می شود این فرآیند معکوس، باز ترکیب است که در شکل ۸-۱ با R_{th} نمایش داده شده است. هرگاه در حالت تعادل گرمایی اختلالی ایجاد شود (یعنی $P_n \neq n_i^2$) که چگالی الکترون و P چگالی حفره ها و n_i چگالی ذاتی حاملها است) فرآیندهایی برای بازگرداندن دستگاه به حالت تعادل یعنی $P_n = n_i^2$ بوجود می آیند. در حالت تزریق حاملهای افزونی، ساز و کاری که تعادل را باز می گرداند بازترکیب حاملهای اقلیت تزریق شده با حاملهای اکثریت است انرژی آزاد شده ای که از فرآیند بازترکیب نتیجه می شود، می تواند به صورت فوتون تابش گردد یا به صورت گرما به شبکه داده شود. وقتی فوتون گسیل می شود، فرآیند باز ترکیب تابشی نامیده می شود، در غیر اینصورت بازترکیب غیر تابشی گفته می شود. پدیده های بازترکیب را می توان به صورت روندهای مستقیم و غیرمستقیم دسته بندی کرد. بازترکیب مستقیم را باز ترکیب نوار به

نوار نیز می گویند، که معمولاً در نیم رساناهای گاف نواری مستقیم نظیر گالیوم آرسنید غالب است، در حالی که باز ترکیب غیرمستقیم از طریق مراکز بازترکیب گاف نواری در نیم رساناهای گاف نواری غیرمستقیم نظیر سیلیسیوم غالب است [۲].

آهنگ تولید و بازترکیب در شرایط تعادل گرمایی باید مساوی باشند، به عبارتی تراکم های حامل ثابت بمانند و شرط $P_n = n_i^2$ برقرار بماند. هنگامیکه به طریقی حاملهای آزاد اضافی را به نیم رسانا وارد کنیم شرط تعادل را بهم زده ایم این فرایند تزریق حامل همانگونه که اشاره گردید به کمک وسایل نوری یا الکتریکی انجام می شود. تزریق نوری به این معنی است که یک فوتون نور فرودی که انرژی آن حداقل مساوی یا بزرگتر از انرژی نوار ممنوع E_g است، توسط یک الکترون واقع در نوار ظرفیت جذب شود، الکترون به نوار رسانش برانگیخته می شود و یک حفره در نوار ظرفیت آفریده می شود. آهنگ تولید زوجهای الکترون حفره توسط نور در شکل ۸-۱ با G_{th} نمایش داده شده است.

۸-۱- دهندهها و پذیرندهها

وقتی نیم رسانا با ناخالصی آلایش می یابد، نیم رسانا غیر ذاتی می شود و سطوح انرژی ناخالصی مطرح می شوند. شکل ۹-۱ (الف) بطور ترسیمی نشان می دهد که یک اتم سیلیسیوم با یک اتم آرسنیک دارای پنج الکترون ظرفیت تعویض شده است. اتم آرسنیک با چهار اتم سیلیسیوم مجاورش پیوند کووالان تشکیل می دهد. پنجمین

الکترون، یک الکترون رسانش می شود که به نوار رسانش داده می شود، بخاطر افزایش حامل بار منفی سیلیسیوم به نوع n تبدیل می شود و اتم آرسنیک «دهنده» نامیده می شود. به طور مشابه، شکل ۹-۱ (ب) نشان می دهد که وقتی یک اتم بر با سه الکترون ظرفیت جانشین اتم سیلیسیوم می شود، به الکترون اضافی «پذیرفته» می شود تا چهار پیوند کووالان در اطراف بر تشکیل شود و حفره بار دار مثبت در نوار ظرفیت ایجاد می شود این نیم رسانای نوع P است و بر یک «پذیرنده» می باشد. انرژی یونش E_D برای دهنده از رابطه زیر بدست می آید:

$$E_D = \left[\frac{\epsilon_0}{\epsilon_s} \right]^2 \left[\frac{m_e}{m_0} \right] E_H$$

شکل ۹-۱- تصاویر طرحی پیوند برای (الف) Si نوع n با دهنده آرسنیک (ب) Si نوع P

با پذیرنده بر

$$\epsilon_s \text{ گذردهی نیم رسانا و } E_H = -\frac{m_0 q^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2} \text{ ترازهای انرژی اتم هیدروژن}$$

متروی می باشد (برای محاسبه ترازهای انرژی ناخالصی، ساده ترین روش عبارت از این بود که از مدل اتم هیدروژن استفاده کنیم و با تعویض m_0 با جرم موثر الکترون m_e و تعویض ϵ_0 با گذردهی نیم رسانا ϵ_s به معادله ۸-۱ برسیم) جرم الکترون آزاد، q بار الکترون، ϵ_0 ضریب گذردهی فضای آزاد، h ثابت پلانک و n یک عدد درست مثبت به نام عدد کوانتومی اصلی است.

انرژی یونش برای دهنده ها (با اندازه گیری از لبه نوار رسانش) همانگونه که از معادله ۸-۱ محاسبه شده است برای سیلیسیوم 0.025eV و برای گالیوم آرسنید 0.007eV می باشد. محاسبه اتم هیدروژن برای تراز یونش پذیرنده ها شبیه به محاسبه مربوط به دهنده ها است. نوار ظرفیت غیر پر را مانند نوار پر باضافه یک حفره واقع در میدان نیروی مرکزی باردار منفی در نظر می گیریم. انرژی یونش محاسبه شده (اندازه گیری از لبه نوار ظرفیت) هم برای سیلیسیوم و هم برای گالیوم آرسنید 0.05eV می باشد.

رابطه ۸-۱ که براساس بکارگیری از مدل هیدروژن ساده بنا گردیده نمی تواند جزئیات انرژی یونش، بویژه برای ترازهای ناخالصی عمیق در نیم رساناها (یعنی با انرژی یونش $3KT \leq$) را بیان کند. مع ذلک، مقادیر محاسبه شده، مرتبه درست اندازه انرژی های یونش واقعی را برای ترازهای ناخالص سطحی پیشگویی می کند. شکل ۱-۱۰، انرژی های یونش اندازه گیری شده را برای ناخالصی های مختلف در سیلیسیوم و گالیوم آرسنید نشان می دهد. توجه داریم که ممکن است برای یک اتم منفرد ترازهای زیادی داشته باشیم، مثلاً اکسیژن دارای دو تراز پذیرنده در گاف نواری غیرمجاز است [۱].

برای دهنده های سطحی در سیلیسیوم و گالیوم آرسنید معمولاً انرژی گرمایی کافی به منظور تأمین انرژی E_D برای یونی کردن تمام ناخالص های دهنده در دمای اتاق وجود دارد و بدین ترتیب تعداد مساوی الکترون در نوار رسانش تهیه می شود. این وضعیت

یونش کامل گفته می شود. در وضعیت یونش کامل، می توانیم چگالی الکترون را به صورت زیر بنویسیم:

$$n = N_D \quad 1-9$$

شکل ۱-۱۰ انرژی های یونش اندازه گیری شده برای ناخالصی های مختلف در Si و Ge [۱] ترازهای زیر مرکز گاف از بالای نوار ظرفیت اندازه گیری می شوند و ترازها پذیرنده هستند مگر آنکه تراز دهنده باشد که یا D مشخص شده است. ترازهای بالای مرکز گاف از پائین نوار رسانش اندازه گیری می شوند و تراز دهنده ها هستند مگر آنکه با A مشخص شده باشند که پذیرنده هستند.

که در آن N_D تراکم دهنده است. شکل ۱-۱۱ (الف) یونش کاملی را توضیح می دهد که در آن تراز دهنده E_D نسبت به انتهای پایینی نوار رسانش اندازه گیری شده است و تراکم الکترونها (که متحرک هستند) و یونهای دهنده که (غیر متحرک هستند) با تراکم برابر نشان داده شده اند. رابطه ۱-۱۰ تراز فرمی E_f (سطح فرمی، انرژی است که احتمال اشغال آن توسط یک الکترون دقیقاً $\frac{1}{2}$ است) را بر حسب N_c چگالی مؤثر حالتها در نوار رسانش (چگالی حالتها مجاز در واحد حجم چگالی حالات نامیده می شود) و تراکم دهنده ها N_D نشان می دهد.

$$E_c - E_f = KTLn\left[\frac{N_c}{N_D}\right] \quad 1-10$$

k ثابت بولتزمن و T دمای مطلق برحسب درجه کلرین است به طور مشابه . مطابق

آنچه که در شکل ۱-۱۱ (ب) نشان داده شده است اگر برای پذیرنده های سطحی یونش

کامل باشد تراکم حفره ها برابر است با :

$$P = N_A \quad 1-11$$

که در آن N_A تراکم پذیرنده ها است. تراز فرمی از رابطه ۱-۱۲ بدست می آید:

$$E_f - E_v = KTLn\left[\frac{N_v}{N_A}\right] \quad 1-12$$

N_v چگالی مؤثر حالتها در نوار ظرفیت است.

از معادله ۱-۱۰ آشکار است که هر قدر تراکم دهنده ها بزرگتر باشد . اختلاف انرژی

$E_c - E_f$ کوچکتر می شود. یعنی تراز فرمی به پائین نوار رسانش نزدیکتر می شود. به

طور مشابه ، برای تراکمهای بیشتر پذیرنده ، تراز فرمی به بالای نوار ظرفیت نزدیکتر می

شود.

۹-۱ تغییر انرژی شکاف نواری بر حسب دما

انرژی شکاف نواری E_g مهمترین عامل در بررسی ویژگیهای یک ماده نیم رسانا است.

در دمای اتاق و در فشار معمولی جو، اندازه های گاف نواری برای سیلیسیوم $1/12\text{ev}$ و

برای گالیوم آرسنید $1/42\text{ev}$ می باشد.

انرژی گاف ممنوع به دما بستگی دارد، با کاهش دما یک انقباض (فشرده گی) در ثابت

شبکه اعمال می شود که نتیجه آن در افزایش گاف نواری است گاف نواری در دمای

o°k برای سیلیسیوم به 1/17ev و برای گالیوم آرسنید به 1/52ev می رسد. تغییر گاف

نواری با دما را می توان به صورت زیر بیان نمود. [۱]

$$E_g(T) = 1/17 - \frac{(4/73 \times 10^4)T^2}{(T + 636)} \quad \text{برای Si}$$

$$E_g(T) = 1/52 - \frac{(5/4 \times 10^4)T^2}{(T + 204)} \quad \text{برای GaAs}$$

ضریب دمایی $\frac{dE_g}{dT}$ برای سیلیسیوم و گالیوم آرسنید منفی است (یعنی گاف انرژی با

افزایش دما کاهش می یابد).

جهت خرید فایل word به سایت www.kandoocn.com مراجعه کنید
یا با شماره های ۰۹۳۶۶۰۲۷۴۱۷ و ۰۹۳۶۶۴۰۶۸۵۷ و ۰۶۶۴۱۲۶۰-۵۱۱ تماس حاصل نمایید

Filename: Document1
Directory:
Template: C:\Documents and Settings\hadi tahaghoghi\Application
Data\Microsoft\Templates\Normal.dotm
Title: :
Subject:
Author: qq
Keywords:
Comments:
Creation Date: 3/28/2012 5:38:00 PM
Change Number: 1
Last Saved On:
Last Saved By: hadi tahaghoghi
Total Editing Time: 0 Minutes
Last Printed On: 3/28/2012 5:39:00 PM
As of Last Complete Printing
Number of Pages: 21
Number of Words: 3,333 (approx.)
Number of Characters: 19,003 (approx.)