محمد اعرابیان

جزوه درس الکترونیک کاربردی

جلسه دوم

برای جزئیات بیشتر **اسکن کنید**

نسخه ۱.۱ | تهیه شده در بهمن ۱۴۰۰

تمامی حقوق این جزوه برای **محمد اعرابیان** محفوظ است.

باند انرژی در اجسام

الکترون‌های لایه ظرفیت در فعل و انفعالات شیمیایی و ترکیبات اجسام با یکدیگر نقش دارند.

* اگر اتم الکترون دریافت کند، تبدیل به یون منفی می‌شود و الکترون دریافت شده به لایه آخر اضافه خواهد شد.

* اگر اتم الکترون آزاد کند، تبدیل به یون مثبت می‌شود و الکترون از لایه آخر آزاد می‌شود.

برای آزاد شدن الکترون و برقراری جریان باید به الکترون های لایه آخر انرژی داده شود.

* انرژی لازم برای آزاد سازی الکترون های آزاد یک رسانا خیلی ناچیز است.

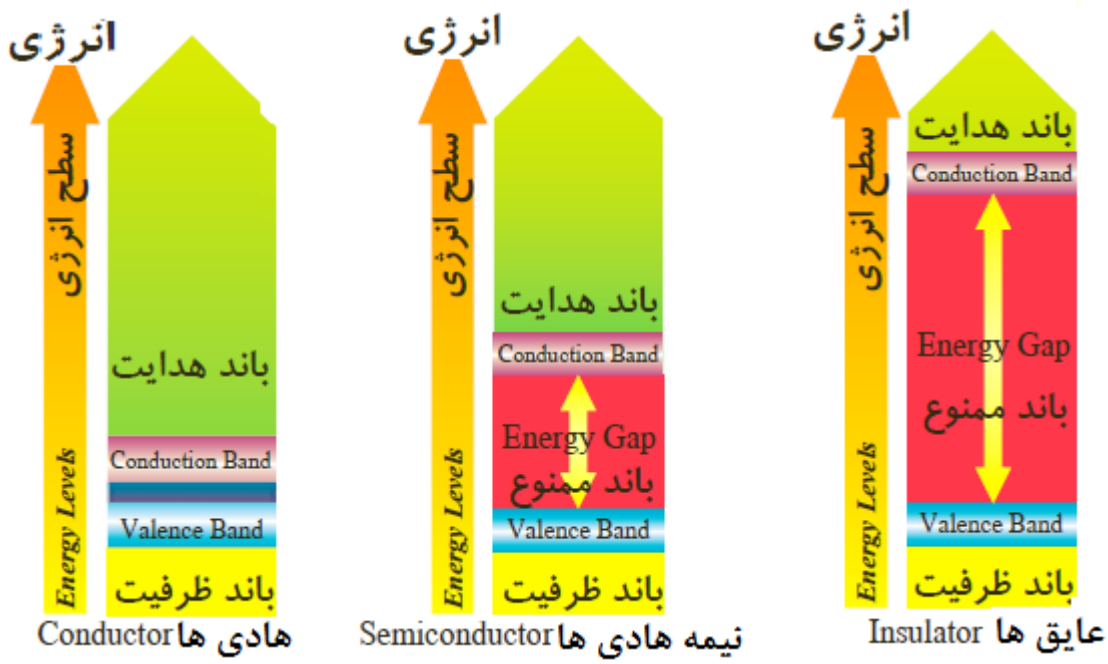
* انرژی لازم برای آزاد سازی الکترون ظرفیتی عایق ها خیلی زیاد است.

سطوح انرژی در اجسام

الف- باند ظرفیت: در این باند الکترون‌های لایه آخر با تحریك انرژی خارجی از هسته جدا می‌شوند.

ب- باند ممنوع: این باند نشان دهنده مقدار انرژی لازم برای آزادسازی الکترون های ظرفیتی است.

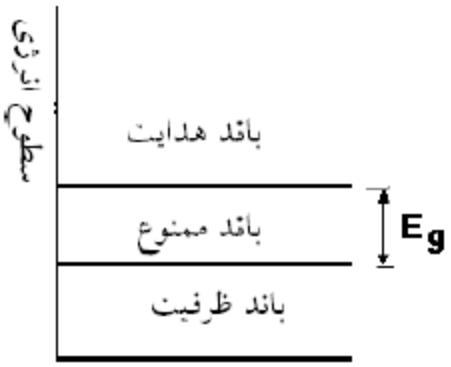
ج- باند هدایت: در این باند الکترون های آزاد می‌توانند به راحتی با تحریک میدان الکتریکی خارجی در داخل اجسام، شروع به حرکت کنند.



هادی ها　　نیمه هادی ها　　عایق ها

همان طورکه مشاهده می‌شود، شکاف انرژی یا باند ممنوع (Energy Gap) برای عایق ها بسیار زیاد و برای نیمه هادی ها کمتر از عایق ها است. برای اجسام هادی، اصولا شکاف انرژی وجود ندارد و باند هدایت و باند ظرفیت دارای هم پوشی (Over Lap) هستند. لذا در هادی ها با کمترین انرژی الکترون‌های لایه‌ی ظرفیت می‌توانند به الکترون آزاد تبدیل شوند و در برقراری جریان الکتریکی مشارکت نمایند.

E_g : مقدار انرژی که یك الکترون نیاز دارد که از تراز ظرفیت به تراز هدایت رود یعنی همان عرض باند ممنوع از نظر سطح انرژی را طی کند.



این انرژی برحسب الکترون ولت سنجیده می شود.

$$1eV = 1.6 \times 10^{-19} j$$

برای محاسبه Eg داریم:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

α و β : پارامتر های ثابت

$E_g(0)$: مقدار انرژی که از تراز باند ظرفیت به باند هدایت برود برای دمای صفر مطلق

ژرمانیوم (Ge) ، سیلیسیم (Si) و گالیم آرسنید (GaAs)

	Germanium	Silicon	GaAs
$E_g(0)$ (eV)	0.7437	1.166	1.519
α (meV/K)	0.477	0.473	0.541
β (K)	235	636	204

دردمای صفر مطلق تمام الکترون‌های ظرفیت در نیمه هادی، در مدار ظرفیت قرار دارند.

با افزایش دما (مثلاً دمای اتاق)، تعداد قابل توجهی الکترون انرژی کافی کسب نموده و از باند ممنوع (شکاف انرژی) عبور نموده و به باند هدایت می رسند.

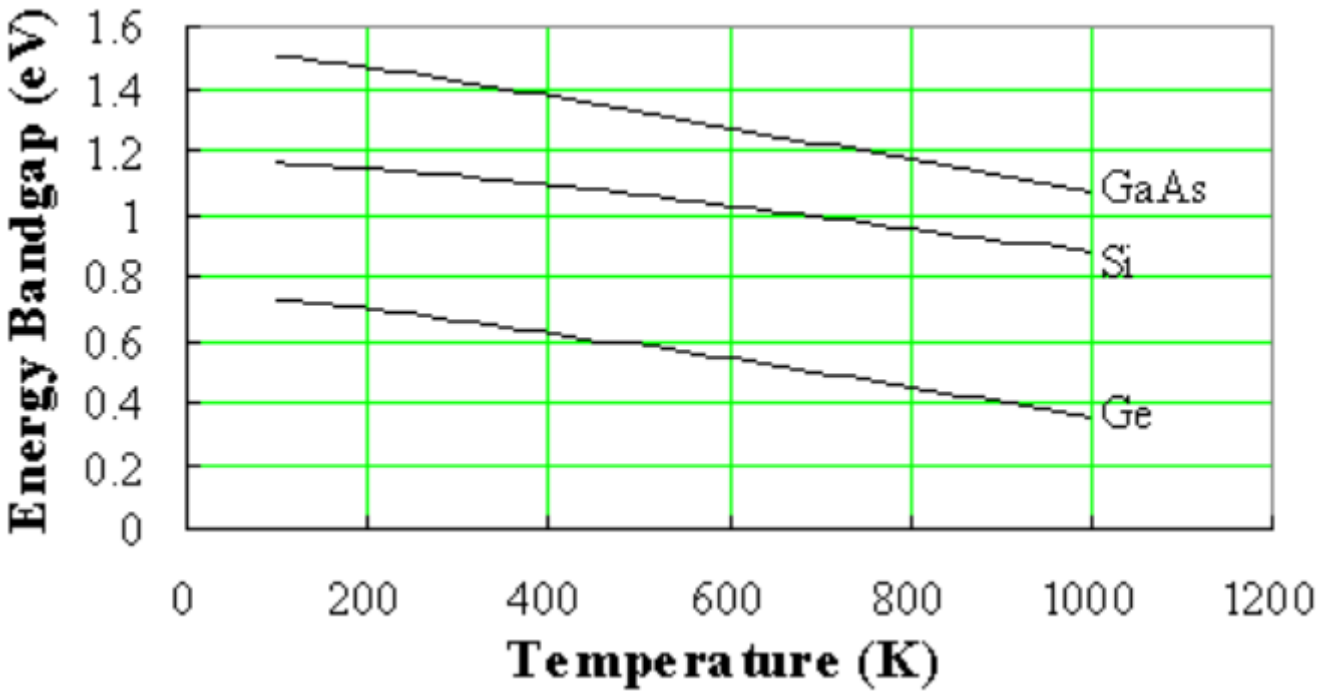
مثال: پهنای باند ژرمانیوم (Ge) ، سیلیسیم (Si) و گالیم آرسنید $(GaAs)$ را در ۳۰۰ ، ٤۰۰ ، ٥۰۰ و ٦۰۰ K محاسبه کنید؟

برای سیلیسیم

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T+\beta} = 1.166 - \frac{0.473 \times 300^2}{300+636} = 1.12eV$$

به طور مشابه ، می توان باند انرژی برای ژرمانیوم و گالیم آرسنید و همچنین در دماهای مختلف را یافت ،

	Germanium	Silicon	Gallium Arsenide
$T = 300$ K	0.66 eV	1.12 eV	1.42 eV
$T = 400$ K	0.62 eV	1.09 eV	1.38 eV
$T = 500$ K	0.58 eV	1.06 eV	1.33 eV
$T = 600$ K	0.54 eV	1.03 eV	1.28 eV



توجه: شکاف انرژی بین باند هدایت و باند ظرفیت برای عایق حدود ۵ الکترون ولت یا بیشتر است.

نکته مهم: اگر ناخالصی های معینی به مواد نیمه هادی خالص افزوده یا دمای کارآن افزایش یابد باعث کاهش انرژی باند ممنوع شده و نیمه هادی به هادی تبدیل می‌شود.

Semiconductor Band Gaps

Material	Energy gap (eV)	
	0K	300K
Si	1.17	1.11
Ge	0.74	0.66
InSb	0.23	0.17
InAs	0.43	0.36
InP	1.42	1.27
GaP	2.32	2.25
GaAs	1.52	1.43
GaSb	0.81	0.68
CdSe	1.84	1.74
CdTe	1.61	1.44
ZnO	3.44	3.2
ZnS	3.91	3.6

Data from Kittel, C., Introduction to Solid State Physics, 6th Ed., New York:John Wiley, 1986, p. 185.

نیمه هادی‌ها و انواع آن‌ها

خصوصیات نیمه هادی‌ها

از نظر هدایت الکتریکی بهتر از عایق‌ها و ضعیف‌تر از هادی‌ها هستند.

عرض باند ممنوع در نیمه هادی‌ها بیشتر از هادی‌ها و کمتر از عایق‌ها است.

نیمه هادی‌ها در دمای صفر مطلق (۲۷۳- درجه‌ی سانتی‌گراد) عایق است.

با دریافت انرژی کمی از خارج، هادی می‌شوند.

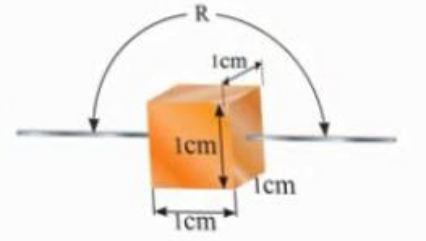
مقاومت مخصوص نیمه هادی‌ها بیشتر از هادی‌ها است

چند نمونه نیمه هادی با علامت شیمیایی و عدد اتمی در جدول زیر نشان داده شده است.

نام عنصر	علامت شیمیایی	عدد اتمی
کربن	C	6
سیلیسیم	Si	14
ژرمانیوم	Ge	32
توریم	Tm	90
زیرکونیم	Zr	40
هافنیوم	Hf	72

برای مقایسه‌ی گروه نیمه هادی ها با اجسام هادی و عایق، که قبلاً نیز به آن اشاره شد، از مقاومت مخصوص آن ها استفاده می شود. مقاومت مخصوص به وسیله‌ی قطعه‌ای از ماده به طول یك سانتی متر و سطح مقطع یك سانتی متر مربع، نشان داده می شود. مقاومت مخصوص را با ρ نمایش می‌دهند. واحد ρ اهم سانتی متر است.

$$\rho = \frac{RA}{L} = \frac{\Omega . cm^2}{cm} = \Omega . cm$$



مقاومت مخصوص مواد مختلف در دمای $۳۰۰^{\circ}K$

هادی	نیمه‌هادی		عایق
مس	ژرمانیم	سیلیسیم	میکا
$\rho = 1.18 \times 10^{-6} \Omega.cm$	$\rho = 50\ \Omega.cm$	$\rho = 50 \times 10^{3} \Omega.cm$	$\rho = 10^{12} \Omega.cm$

تبدیل دما

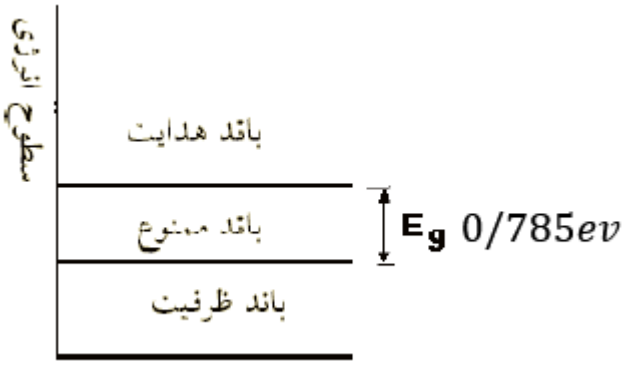
[°C] = [K] – ۲۷۳،۱۵

[K] = [°C] + ۲۷۳،۱۵

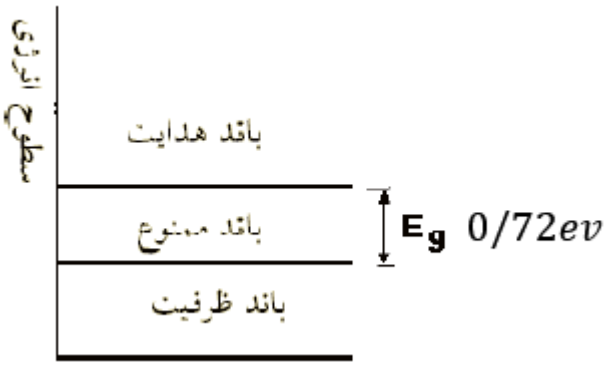
باندهای انرژی نیمه هادی ها

نیمه هادی‌های ژرمانیم وسیلیسیم، به علت کاربردشان در ساخت قطعات الکترونیکی، نسبت به بقیه از اهمیت زیادتری برخوردارند. در اینجا فقط باند های انرژی ژرمانیم و سیلیسیم را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

شکل زیر باندهای انرژی ژرمانیم را در دو درجه صفر و $۳۰۰^{\circ}K$ نشان می دهد. انرژی لازم برای عبور الکترون از منطقه ممنوعه در اتم ژرمانیم حدود ۰/۷ الکترون ولت می‌باشد.

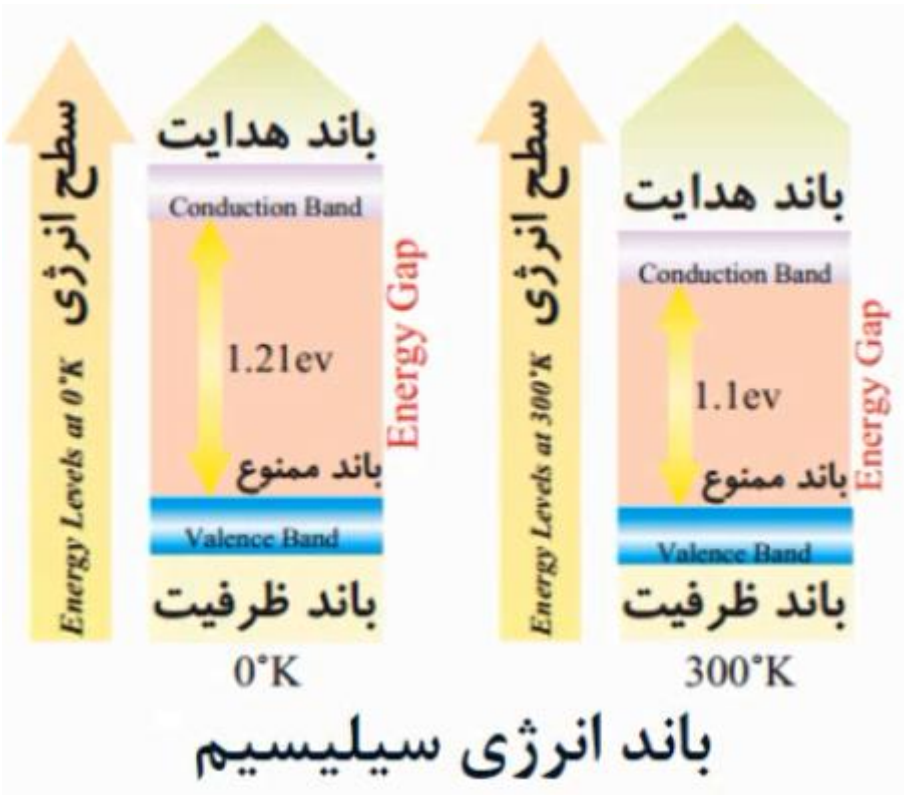


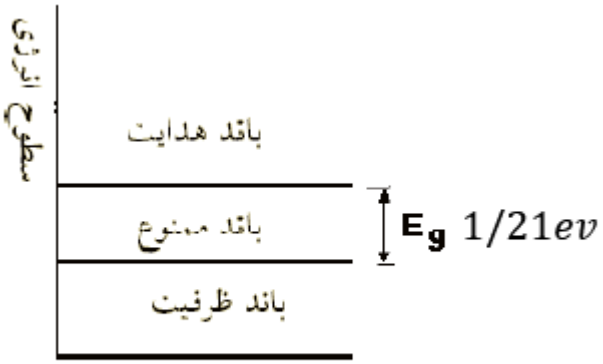
صفر درجه کلوین



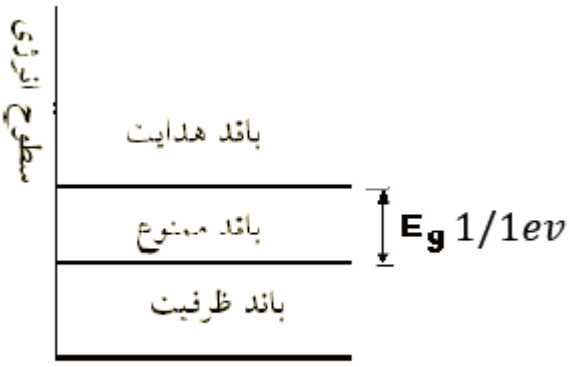
۳۰۰ درجه کلوین

شکل زیر باندهای انرژی سیلیسیم را در دو درجه‌ی حرارت صفر و $۳۰۰°K$ نشان می‌دهد. انرژی لازم برای عبور الکترون از منطقه ممنوعه در اتم سیلیسیم حدود ۱/۲ الکترون ولت می‌باشد. $1/21ev$, $1/1ev$





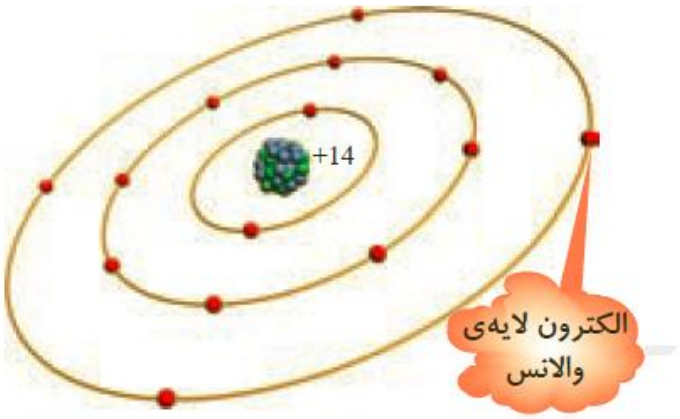
صفر درجه کلوین



300 درجه کلوین

ساختمان اتمی ژرمانیم و سیلیسیم

ژرمانیم دارای عدد اتمی ۳۲ می‌باشد. الکترون‌های لایه‌های آن به ترتیب عبارتند K=2 ، L=8 ، M=8 ، N=4 و سیلیسیم دارای عدد اتمی ۱۴ می‌باشد و الکترون‌های آن به صورت شکل زیر می‌باشند.

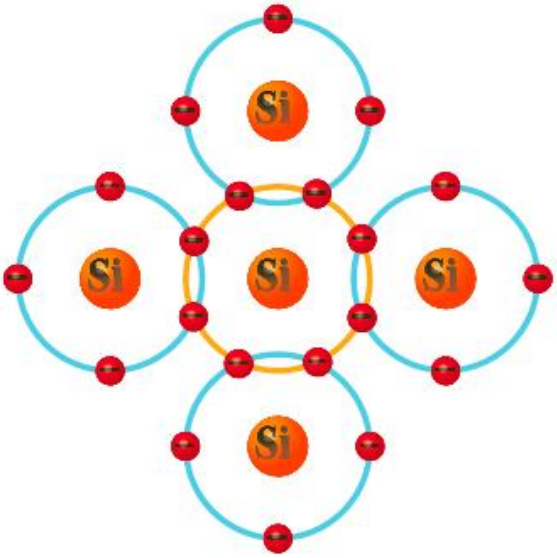


نمای اتمی سیلیسیم

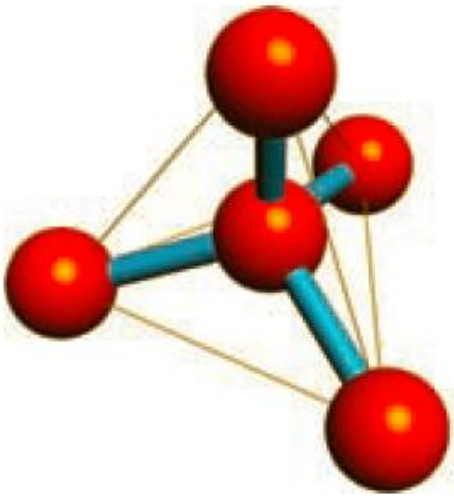
نمای اتمی ژرمانیم

ساختمان کریستال ژرمانیم و سیلیسیم

اتم های نیمه هادی ژرمانیم و سیلیسیم به صورت یک بلور(کریستال) سه بعدی می‌باشند، که با کنار هم قرار گرفتن بلورها، شبکه کریستالی آن‌ها پدید می‌اید. اتم ژرمانیم دارای ۳۲ الکترون و اتم سیلیسیم دارای ۱۴ الکترون می باشند. تعداد الکترون‌های مدار آخر هر دوی آن‌ها ٤ است. لذا مدار آن‌ها کامل نبوده می‌توانند تعدادی الکترون بگیرند. الکترون ها یا حتی اتم ها همیشه به سمتی حرکت می‌کنند که پایداری بیشتری بدست بیاورند که یکی از راه ها افزایش تقارن است، پس به همین دلیل اتم های سیلیسیم به صورت اتم های سیلیسیم مجزا وجود ندارند، و بیشتر با بلور (کریستال) سیلیسیم یافت می‌شوند

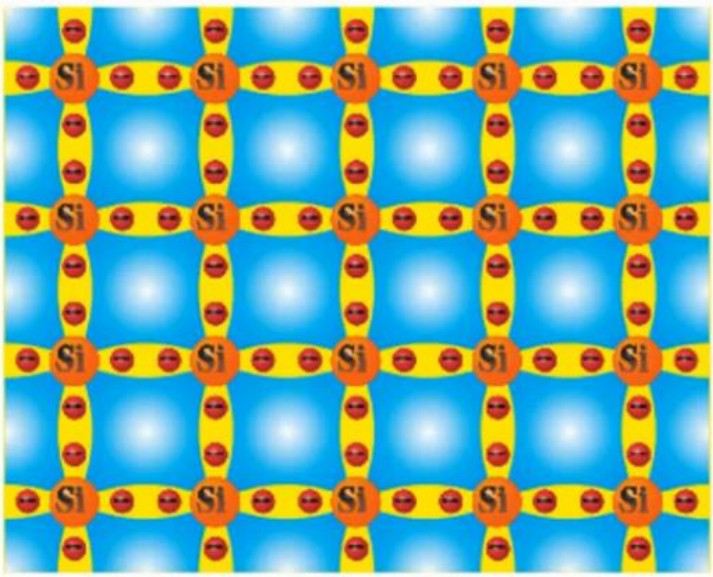


پیوند ۵ اتم سیلیسیم



ساختمان تک کیریستالی ژرمانیم

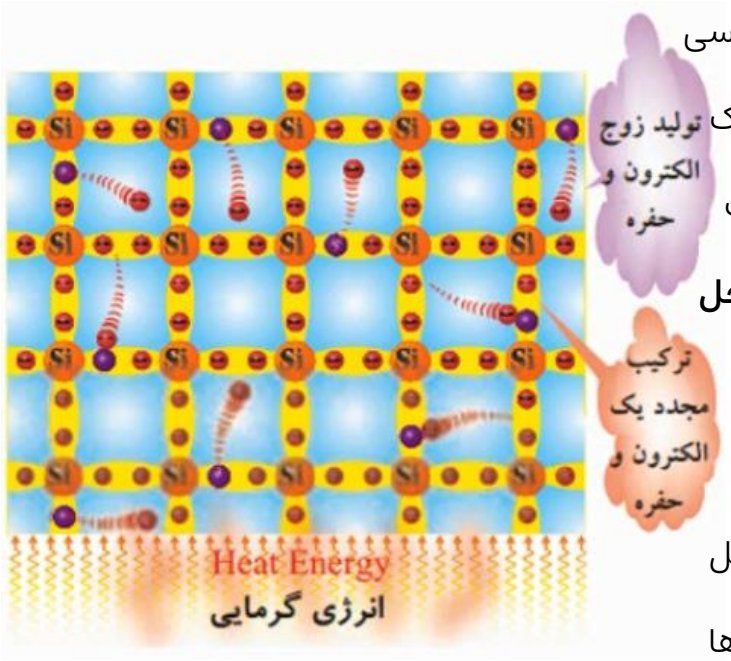
اتم سیلیسیم در لایه ظرفیت چهار تا الکترون دارد، برای کامل شدن لایه ظرفیت و هم متقارن شدن آن ، اتم سیلیسیم می‌تواند چهار تا الکترون از دست بدهد یا چهار الکترون دریافت کند. برای از دست دادن و دریافت چهار الکترون به نیروی (انرژی) زیادی احتیاج است که در واقعیت ممکن نیست، اتفاقی که در عمل افتد. اتم سیلیسیم با اتم های مجاور تشکیل یک پیوند کووالانسی می‌دهد، به عبارت دیگر چهار تا الکترون ظرفیتی می آیند با اتم های مجاور تشکیل پیوند کووالانسی بر قرار می‌کنند، در این صورت لایه ظرفیت تکمیل می‌شود و به همین صورت اتم های سیلیسیم تبدیل به یک شبکه کریستالی به صورت زیر می‌شود.



شبکه کریستالی سیلیسیم

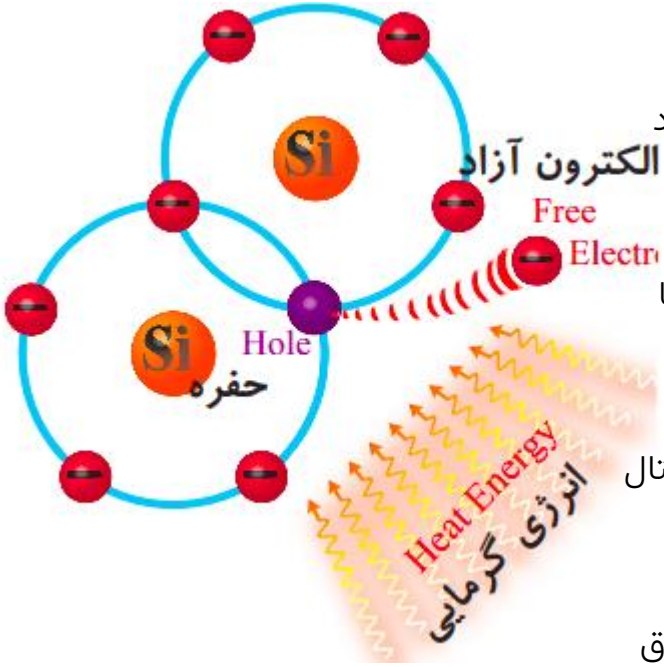
در مورد هدایت شبکه کریستالی سیلیسیم بحث کنید؟

حفره و الکترون



وقتی در اثر انرژی خارجی (مثلا گرما) پیوند کووالانسی شکسته می‌شود، یک الکترون اتم اصلی خود را ترک می‌کند آنچه که بر جای می‌ماند یک اتم با بار مثبت است که آماده پذیرش یک الکترون را دارد. **این محل خالی یک حفره** نامیده می‌شود. این حفره میتواند توسط الکترونی که از اتم دیگری جدا شده پرشود. اینکار باعث می‌شود تا حفره در محل دیگری تشکیل شود. بدین ترتیب با جابجا شدن الکترونها، حفره ها هم جابجا خواهند شد.یک حفره به منزله یک بار مثبت می‌باشد، زیرا می‌تواند الکترونی را که از دست داده است، دوباره بگیرد. الکترون های آزاد به طور نامنظم در درون کریستال در حال حرکت هستند. هدایت اجسام توسط الکترون های آزاد تعیین می‌شود. به عبارتی هر چه الکترون های آزاد بیشتر باشد، هدایت آن جسم بیشتر است.

مثال اتم مس با دادن انرژی خیلی کمی که در دما محیط ۲۵ درجه سلسیوس تولید شود، الکترون لایه ظرفیتش از قید هسته جدا شده و به الکترون آزاد تبدیل خواهد شد. در مس به دلیل وجود الکترون های آزاد زیاد هدایت بخوبی صورت می‌گیرد.



در یک شبکه کریستالی تعداد الکترون های آزاد و تعداد حفره ها با هم برابر است.

بعد از آزاد شدن الکترون و ایجاد حفره در این شبکه ها الکترون آزاد شده فورا توسط یک حفره جذب شده و از حالت آزاد بودن خارج می‌شود، پس به این دلیل کریستال سیلیسیم و ژرمانیوم در حالت عادی الکترون های آزاد کم و رسانایی پایین دارند، در نتیجه برقراری جریان اتفاق

نمی‌افتد. در صورت عدم وجود نیروی خارجی ترکیب حفره و الکترون بصورت نامنظم در شبکه کریستالی ادامه می‌یابد. حرکت الکترون و حرکت فرضی حفره در جهت عکس یکدیگر است

در یک نیمه هادی ذاتی، چگالی حفره ها و الکترون‌ها با هم برابر است.

$$np = n_i^2$$

n = چگالی الکترون ها

p = چگالی حفره ها

n_i = برابر تعداد الکترون ها بر واحد سانتی متر مکعب در نیمه هادی ذاتی است.

میانگین هندسی چگالی حفره ها و چگالی الکترون ها در هر لحظه با هم برابر است

$$n_i = 5.2 \times 10^{15} T^{(\frac{3}{2})} exp \frac{-E_g}{2kT} \ \ electrons/cm^3$$

k : ثابت بولتزمن $k = 1.38 \times 10^{-23} J/K$

E_g = انرژی باند ممنوعه

نیمه هادی نوع P و N

تعداد الکترون‌ها و حفره‌های ایجاد شده در نیمه هادی‌ها، بر اثر انرژی گرمایی، آن قدر کم اند که نمی‌توانند جریان زیادی را از خود عبوردهند (مقاومت اهمی آنها زیاد است). در ضمن يك كريستال نيمه هادی خالص، به صورت يك مقاومت اهمی معمولی عمل می‌کند. برای این که بتوانیم از يك نيمه هادی در کاربردهای ویژه‌ای (مثلا ساخت دیود، ترانزیستور و ...) استفاده نماییم، باید آن را ناخالص کنیم. برای ناخالص کردن کریستال نیمه‌هادی، عناصر با اتم های پنج یا سه ظرفیتی را به آن اضافه می‌کنیم. این عناصر را عناصر ناخالصی ظرفیت (Impurity) می‌نامند.

در یک نیمه هادی خالص تعداد حفره ها و الکترون‌ها برابر است. اما می توان با افزودن ناخالصی به نیمه هادی این برابری را تغییر داد.

نیمه هادی ناخالص که تعداد الکترون‌های آزاد آن بیشتر از حفره هایش باشد، نیمه‌هادی نوع $\boldsymbol{N}$ می‌نامند.

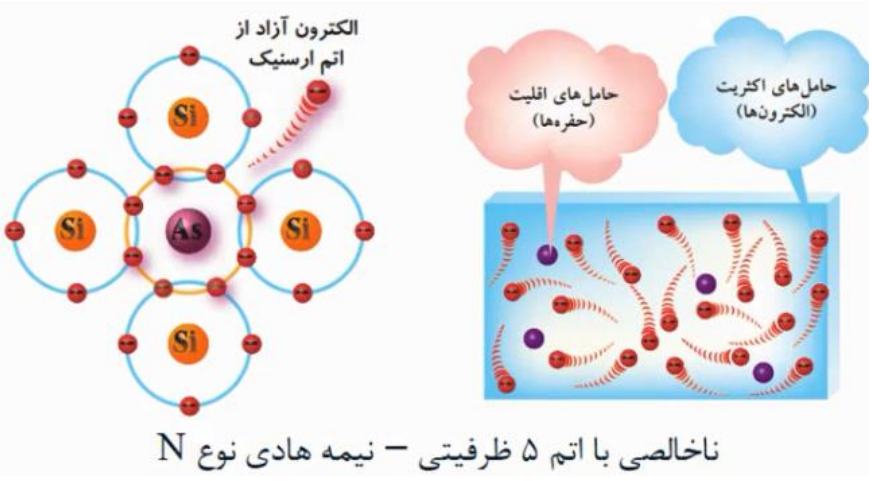
نیمه هادی ناخالص که تعداد حفره ها از الکترون های آزاد بیشتر باشد نیمه‌هادی نوع $\boldsymbol{P}$ می‌نامند.

نیمه هادی نوع negative (N)

اگر یک عنصر ۵ ظرفیتی مانند آرسنیک یا آنتیموان را به نیمه هادی سیلیسیم یا ژرمانیم اضافه کنیم، ٤ الکترون مدار آخر آرسنیک با چهار اتم مجاور نیمه هادی پیوند اشتراکی تشکیل داده و الکترون پنجم آن بصورت الکترون آزاد باقی می ماند. با تنظیم مقدار ناخالصی می توان تعداد الکترون‌های آزاد را کنترل نمود.

نیمه هادی که ناخالصی آن اتم ۵ ظرفیتی باشد نیمه هادی نوع N گویند

در نیمه هادی نوع N،الکترون‌ها حامل‌های اکثریت و حفره ها حامل‌های اقلیت هستند.

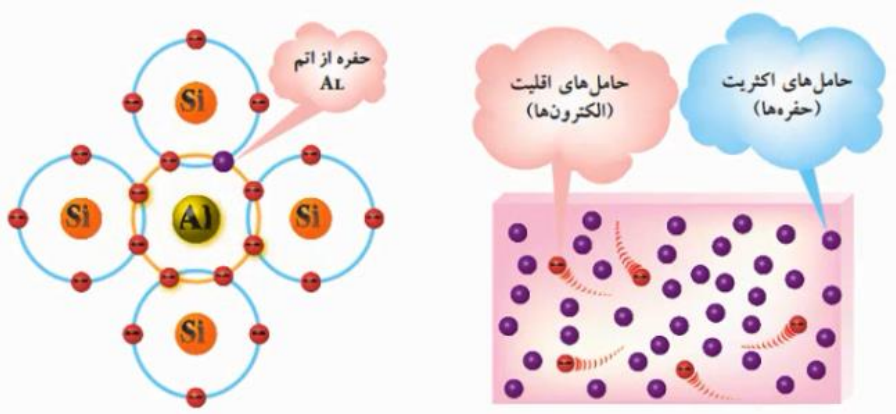


ناخالصی با اتم ۵ ظرفیتی – نیمه هادی نوع N

نیمه هادی نوع positive (P)

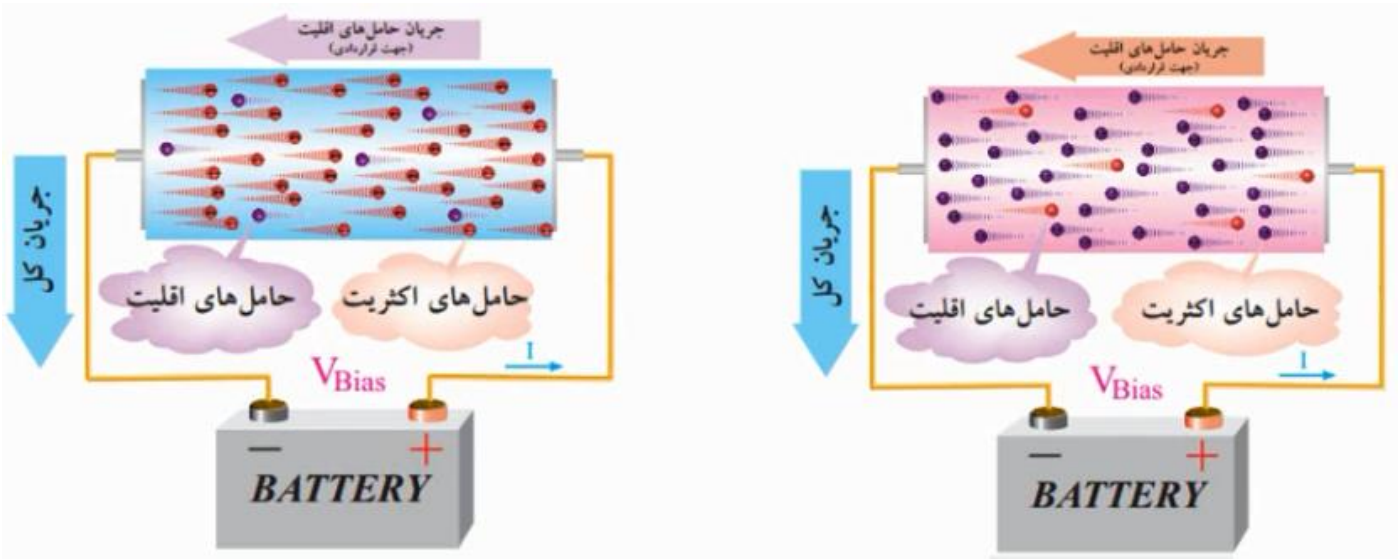
اگر یك عنصر۳ ظرفیتی مانند آلومینیوم ، گالیوم را به نیمه هادی سیلیسیم یا ژرمانیوم اضافه کنیم، ۳ الکترون مدار آخر آلومینیوم با سه اتم مجاور نیمه هادی پیوند اشتراکی داده و پیوند چهارم دارای کمبود الکترون است یا می‌توان گفت که یك حفره ایجاد شده است. در این نیمه هادی الکترون‌ها فقط در اثر شکسته شدن پیوندها بوجود می آیند.

در نیمه هادی نوع P، الکترون‌ها حامل های اقلیت و حفره ها حامل های اکثریت هستند.



ناخالصی با اتم ۳ ظرفیتی – نیمه هادی نوع P

با اتصال نیمه هادی ناخالص شده به باطری، جریان کل برابر مجموع جریان الکترون ها و حفره ها است.



با ناخالص سازی نیمه هادی ذاتی (کریستال سیلیسیم یا کریستال ژرمانیم)، چگالی حفره ها و الکترون ها تغییر خواهد کرد، که باعث تغییر رسانایی کریستال شود.

در صورتی که اتم پنج ظرفیتی به کریستال اضافه کنیم، چگالی الکترون ها افزایش پیدا می‌کند و در صورتی که اتم سه ظرفیتی به آن اضافه شود، چگالی حفره ها افزایش پیدا خواهد کرد و باعث کاهش مقاومت کریستال می‌شود و باعث عبور جریان الکتریکی بیشتر شود. (0 بیانگر تعادل حرارتی می‌باشد.)

$$n_{n0}p_{n0} = n_i^2$$

در صورتی که اتم پنج ظرفیتی به کریستال اضافه کنیم (نیمه هادی نوع $\boldsymbol{N}$):

$$n_{n0} \approx N_D$$

پس به صورت تقریبی ما چگالی حامل های اکثریت را با چگالی اتم های پنج ظرفیتی اضافه شده به کریستال را ثابت در نظر می‌گیریم.

و چگالی حفره ها :

$$p_{n0} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

در صورتی که ناخالصی اتم سه ظرفیتی باشد (نیمه هادی نوع $\boldsymbol{P}$)

$$p_{P0} \approx N_A$$

پس چگالی حامل های اکثریت تقریبا با چگالی اتم های سه ظرفیتی اضافه شده برابر می باشند

و چگالی الکترون ها:

$$n_{P0} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

پس ما توانسیتیم با اضافه کردن یک اتم پنج ظرفیتی و یا اتم سه ظرفیتی چگالی حفره ها و یا چگالی الکترون ها را تغییر دهیم و باعث افزایش جریان در نیمه هادی‌ها بشویم.

ناخالصی‌ها در نیمه هادی‌ها

جهت افزایش هدایت الکتریکی نیمه هادی‌ها، ناخالصی به آن اضافه می‌شود. نا خالصی می‌تواند الکترون و یا حفره باشد.

تعداد زوج الکترون ـ حفره در 25°C برای دو نیمه هادی سیلیسیم و ژرمانیوم

$$Si \rightarrow n_i = p_i = 1.5 \times 10^{10} \ / \ cm^3$$

$$Ge \rightarrow n_i = p_i = 2.5 \times 10^{13} \ / \ cm^3$$

نیمه هادی نوع N

با افزودن یک ناخالصی ۵ ظرفیتی (عنصری با ۵ الکترون در باند انتهایی) مانند آنتیمونی، آرسنیک و یا فسفر، الکترون آزاد اضافی تولید می گردد . بـه این ناخالصی، دهنده یا Donor می‌گویند. اگر عدد اتمی برابر $10^{23} / cm^3$ باشد، به ازاء هر 10^8 اتم یک ناخالصی وارد شود، خاصیت کلی نیمه هادی را تحت تاثیر قرار نخواهد داد.

اگر 10^{15} ناخالصی در هر cm^3 به آن اضافه شود، که در مقایسه با زوج الکترون و حفره اولیه (n_i, p_i) تقریبا 10^5 است، هدایت الکتریکی را افزایش می‌دهد. بدین ترتیب تعداد الکترون‌ها افزایش خواهد یافت ولی در عوض تعداد حفره‌ها بخاطر ترکیب با الکترون‌ها کاهش می‌یابد. در این نیمه هادی الکترون به عنوان ناقل اکثریت و حفره به عنوان ناقل اقلیت محسوب می‌شود. به این نیمه هادی، نیمه هادی نوع N می‌گویند.

$$\text{تعداد الکترون } n = N_D + n_i \simeq N_D \text{ ناخالصی افزوده}$$

$$n \times p = n_i^2 \Longrightarrow \text{تعداد حفره } p \simeq \frac{n_i^2}{N_D}$$

نیمه هادی نوع P

با افزودن یک ناخالصی ۳ ظرفیتی (عنصری که در باند آخرش ۳ الکترون دارد) مانند بور ـ آلومینیوم و یا گالیم ، کمبود یک الکترون بوجود می آید، که مفهوم آن تولید حفره اضافی آزاد می باشد. به این ناخالصی، گیرنده و یا Acceptor می‌گویند. در این نیمه هادی که حفره ها خیلی بیشتر از الکترون می‌باشند، حفره ناقل اکثریت و الکترون ناقل اقلیت می‌باشد و به آن نیمه هادی نوع P می‌گویند.

$$\text{تعداد الکترون } p = N_A + p_i \simeq N_A \text{ ناخالصی افزوده}$$

$$\text{تعداد الکترون } p \simeq \frac{n_i^2}{N_A}$$

TABLE 3.2 Summary of Important Equations for *pn*-Junction Operation

Quantity	Relationship	Values of Constants and Parameters (for Intrinsic *Si* at $T = 300$ K)
Carrier concentration in intrinsic silicon (/cm^3)	$n_i^2 = BT^3 e^{-E_G/kT}$	$B = 5.4 \times 10^{31}$/(K^{3}cm^6) $E_G = 1.12$ eV $k = 8.62 \times 10^{-5}$ eV/K $n_i = 1.5 \times 10^{10}$/cm^3
Diffusion current density (A/cm^2)	$J_p = -qD_p \frac{dp}{dx}$ $J_n = qD_n \frac{dn}{dx}$	$q = 1.60 \times 10^{-19}$ coulomb $D_p = 12$ cm^2/s $D_n = 34$ cm^2/s
Drift current density (A/cm^2)	$J_{drift} = q(p\mu_p + n\mu_n)E$	$\mu_p = 480$ cm^2/V·s $\mu_n = 1350$ cm^2/V·s
Resistivity (Ω·cm)	$\rho = 1/[q(p\mu_p + n\mu_n)]$	μ_p and μ_n decrease with the increase in doping concentration
Relationship between mobility and diffusivity	$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = V_T$	$V_T = kT/q$ $\simeq 25.8$ mV
Carrier concentration in *n*-type silicon (/cm^3)	$n_{n0} \simeq N_D$ $p_{n0} = n_i^2/N_D$	
Carrier concentration in *p*-type silicon (/cm^3)	$p_{p0} \simeq N_A$ $n_{p0} = n_i^2/N_A$	
Junction built-in voltage (V)	$V_0 = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right)$	
Width of depletion region (cm)	$\frac{x_n}{x_p} = \frac{N_A}{N_D}$ $W_{dep} = x_n + x_p$ $= \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D}\right)(V_0 + V_R)}$	$\varepsilon_s = 11.7\varepsilon_0$ $\varepsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14}$ F/cm
Charge stored in depletion layer (coulomb)	$q_J = q\frac{N_A N_D}{N_A + N_D} A W_{dep}$	
Depletion capacitance (F)	$C_j = \frac{\varepsilon_s A}{W_{dep}}$, $C_{j0} = \frac{\varepsilon_s A}{W_{dep}\|_{V_R=0}}$ $C_j = C_{j0}\Big/\left(1 + \frac{V_R}{V_0}\right)^m$ $C_j \simeq 2C_{j0}$ (for forward bias)	$m = \frac{1}{3}$ to $\frac{1}{2}$
Forward current (A)	$I = I_p + I_n$ $I_p = Aq n_i^2 \frac{D_p}{L_p N_D}(e^{V/V_T} - 1)$ $I_n = Aq n_i^2 \frac{D_n}{L_n N_A}(e^{V/V_T} - 1)$	
Saturation current (A)	$I_S = Aq n_i^2\left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A}\right)$	

پایان جلسه دوم

روزگار خوشی را برای شما آرزومندم.

محمد اعرابیان