برق تاسیسات

کارشناسی پیوسته

بخش اول (نیمه هادی ها)–۱ جلسه

نام استاد: رحیمی

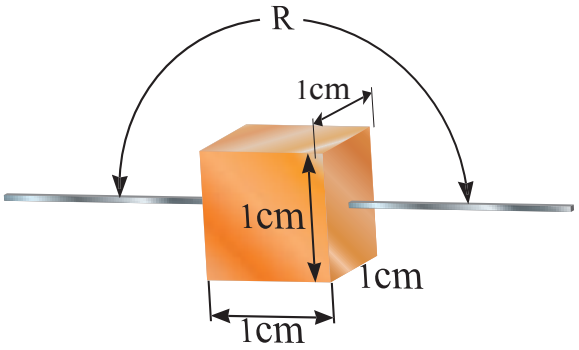
۲-۹ انواع نیمه هادی‌ها

هدایت الکتریکی نیمه هادی‌هـا از فلزّات کم‌تر ولی از عایق‌ها بیش‌تر اسـت. مدار آخـر نیمه هادی‌ها، دارای ۴ الکترون اسـت. جدول ۱-۲ چند نوع نیمه هادی را، که کاربرد بیش‌تری دارند، نشان می‌دهد.

جدول ۱-۲ انواع نیمه هادی‌ها

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 هادی‌ها با اجسام هادی و عایق، که قبلاً نیز به آن اشاره شد، از مقاومت مخصوص آن‌ها استفاده می‌شود. مقاومت مخصوص به وسیله‌ی قطعه‌ای از ماده به طول یک سانتی متر و سطح مقطع یک سانتی متر مربع، (مطابق شکل ۱۱-۲) نشان داده می‌شود. مقاومت مخصوص را با ρ نمایش می‌دهند. واحد ρ اهم سانتی متر است که از رابطه‌ی $p = \frac{RA}{L} = \frac{\Omega.cm^2}{cm} = \Omega.cm$ حاصل می‌شود.



شکل ۱۱-۲ نمایش یک اهم سانتی‌متر

اگر مقدار طول بر حسب متر و سطح مقطع بر حسب میلی متر مربع باشد مقاومت مخصوص بر حسب اهم میلی متر مربع بر متر $\left(\frac{\Omega mm^2}{m}\right)$ خواهد بود.

جدول ۲-۲ مقاومت مخصوص برای سه نوع مواد مختلف را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۲ مقاومت مخصوص مواد مختلف

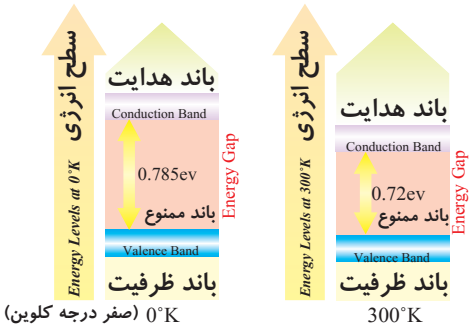
در دمای ۳۰۰°K

عایق	نیمه‌هادی		هادی
میکا	سیلیسیم	ژرمانیم	مس
$\rho = 10^{12}\Omega.cm$	$\rho = 50\times10^{3}\Omega.cm$	$\rho = 50\ \Omega.cm$	$\rho = 1.78\times10^{-6}\Omega.cm$

۲-۱۰ باندهای انرژی نیمه هادی‌ها

نیمه هادی‌های ژرمانیم (Germanium) و سیلیکن (Silicon) با توجه به کاربردشان در ساخت قطعات الکترونیکی، نسبت به بقیه از اهمیت زیادتری برخوردارند. در این جا فقط باندهای انرژی ژرمانیم و سیلیسیم را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

شکل ۱۲-۲ باندهای انرژی ژرمانیم را، در دو درجه‌ی حرارت صفر و ۳۰۰°K نشان می‌دهد.



شکل ۱۲-۲ باندهای انرژی اتم ژرمانیم

انرژی لازم برای عبور الکترون از منطقه‌ی ممنوعه در اتم ژرمانیم،حدود ۰/۷ الکترون ولت است.

شکل ۱۳-۲ باندهای انرژی سیلیسیم را در دو درجه‌ی حرارت صفر و ۳۰۰°K نشان می‌دهد.

شکل ۱۳-۲ باندهای انرژی اتم سیلیسیم

انرژی لازم جهت عبور الکترون از منطقه‌ی ممنوعه در اتم سیلیسیم حدود ۱/۲ الکترون ولت است.

۲-۱۱ ساختمان اتمی ژرمانیم و سیلیسیم

ژرمانیم دارای عدد اتمی ۳۲ است.الکترون‌های

لایه‌های آن به ترتیب عبارت‌اند از:

$K = ۲, L = ۸, M = ۱۸, N = ۴$ ، که تصویر آن‌ها را در شکل ۱۴-۲ مشاهده می‌کنید.

شکل ۱۴-۲ اتم ژرمانیم

این نیمه هادی، در سال ۱۸۸۶ توسط وینکلر (Winkler) کشف شد. ژرمانیم، دارای چگالی ۵/۳۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و در حرارت ۹۳۷/۴ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شود.

سیلیسیم، دارای عدد اتمی ۱۴ است و الکترون‌های لایه‌های آن به ترتیب عبارت‌اند از ۲-۸-۴، که نمای اتمی آن در شکل ۱۵-۲ نشان داده شده است.

شکل ۱۵-۲ اتم سیلیسیم

این نیمه هادی، در سال ۱۸۱۰ توسط گیلوساک (Gilosake) و تنارد (Tanard) کشف شد. سیلیسیم در حرارت ۱۴۱۰ درجه سانتی‌گراد ذوب می‌شود و دارای چگالی ۲/۳۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

معرفی سایت

به سیلیکن در فارسی سیلیسیم می‌گویند. برای کسب اطلاعات بیش‌تر می‌توانید به سایت:

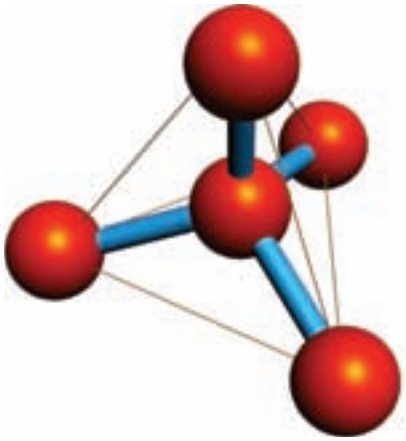
hemical Elements.com- Silicons (si)

http:// wikipedia.org/ wiki

مراجعه کنید.

۲-۱۲ ساختمان کریستالی ژرمانیم و سیلیسیم

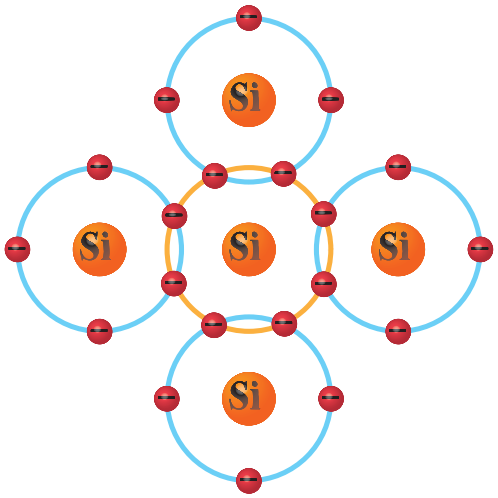
اتم‌های نیمه هادی ژرمانیم و سیلیسیم، به صورت یک بلور سه بُعدی (مطابق شکل ۱۶-۲) هستند، که با کنار هم قرار گرفتن بلورها، شبکه‌ی کریستالی آن‌ها پدید می‌آید.



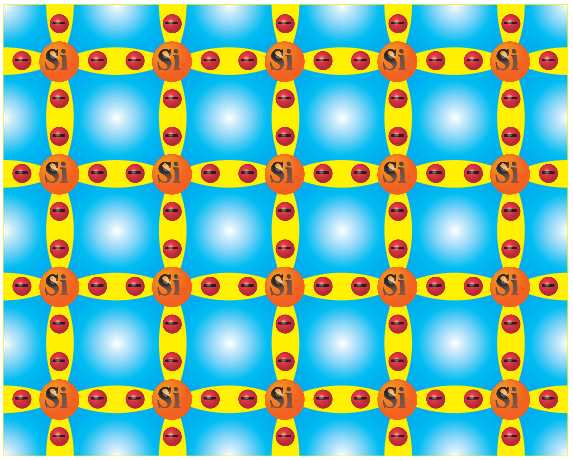
شکل ۱۶-۲ ساختمان تک کریستالی ژرمانیم

اتم ژرمانیم، ۳۲ الکترون و اتم سیلیسیم، ۱۴ الکترون دارد. در هر حال، تعداد الکترون‌های مدار آخر هر دوی

آن‌ها ۴ اســت. لذا مدار آن‌ها کامل[1] نیســت و می‌توانند تعدادی الکتــرون بگیرند. با کنار هم قرار گرفتن اتم‌های ژرمانیــم یــا سیلیســیم، الکترون‌های مدار آخــر خود را بــه اشــتراک می‌گذارند تا مدار آخرشــان کامل شــود. شــکل‌های ۲-۱۷ و ۲-۱۸ تعدادی از اتم‌های سیلیسیم را، که با هم پیوند اشــتراکی تشــکیل داده‌اند،نشان می‌دهند. مشابه آن‌ها در مورد ژرمانیم نیز صدق می‌کند.

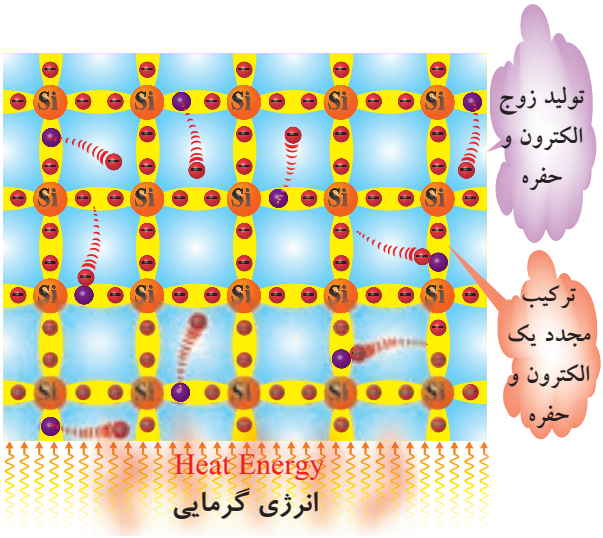


شکل ۲-۱۷ پیوند ۵ اتم سیلیسیم



شکل ۲-۱۸ پیوند اشتراکی در سیلیسیم

همــان طوری که در شــکل‌های ۲-۱۷ و ۲-۱۸ دیده می‌شود، هر اتم، چهار الکترون را از اتم‌های مجاور خود، به صورت اشتراکی دریافت نموده و مدار آخر خود را با هشت الکترون تکمیل کرده است. به این ترتیب، اتم‌های سیلیسیم و یا ژرمانیم شبکه‌ی کریستالی تشکیل می‌دهند، (شــبکه‌ی کریســتالی به معنی شــبکه منظم اســت). لذا کریستال سیلیســیم یا ژرمانیم یک عایق خوب محسوب می‌شــوند، زیرا فاقد الکتــرون آزادند. یادآور می‌شــود در درجه‌ی حــرارت معمولی، به ســبب انرژی حرارتی، تعدادی از پیوندهای اشتراکی شکسته می‌شود و سیلیسیم و یا ژرمانیم دارای الکترون آزاد می‌گردند. شــکل ۲-۱۹ الکترون‌های آزاد شــده توســط انــرژی حرارتی و جای خالی الکترون (حفره = Hole) را در کریستال "SI" نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۹ الکترون‌های آزاد شده و جای خالی آن‌ها

بــا بالا رفتــن درجه‌ی حــرارت، انــرژی گرمایی در الکترون‌هــای آخرین مدار جذب می‌شــود و آن‌ها را به ارتعاش در می‌آورد. با ازدیاد درجه‌ی حرارت، ارتعاشات زیاد می‌شــود تا جایی که پیوند می‌شکند و الکترون آزاد

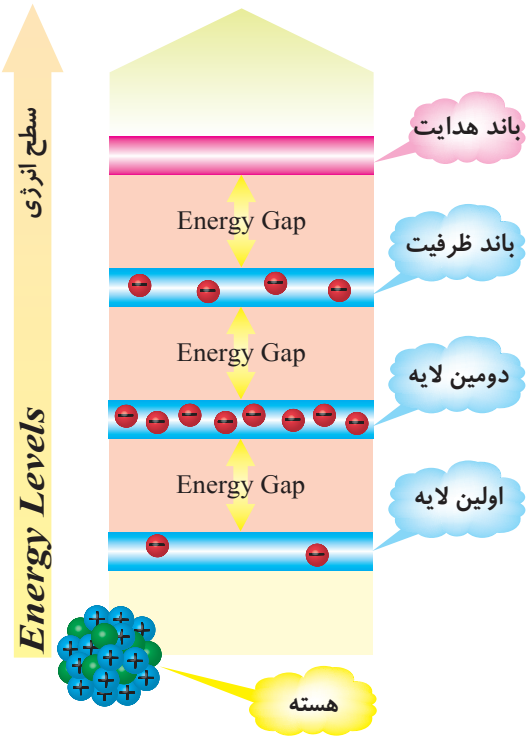
۱- مدار کامل به مداری گفته می‌شود که تعداد الکترون‌های آن مدار به ۸ یا حد نصاب مدار برسد.

می‌گردد. هر چه درجه‌ی حرارت بالاتر رود، تعداد بیش‌تری از پیوندها می‌شکنند و جریان در مدار افزایش می‌یابد.

الکترونی که از شکسته شدن پیوند، آزاد می‌شود و به هیچ اتمی وابسته نیست الکترون آزاد نام دارد.

۲-۱۳ هدایت الکتریکی در سیلیسیم و ژرمانیم خالص

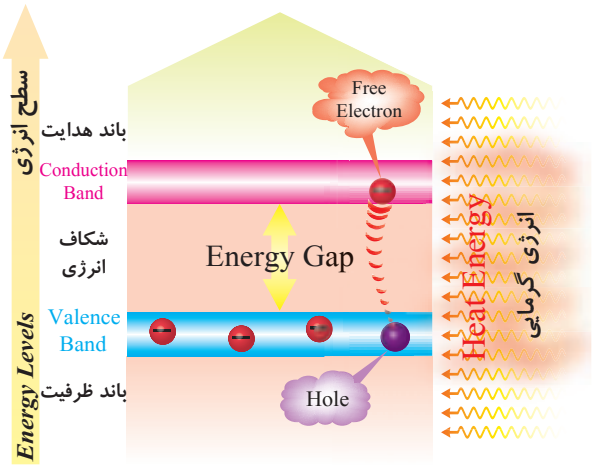
یک قطعه‌ی کریستال نیمه هادی سیلیسیم یا ژرمانیم تا چه حد می‌تواند جریان الکتریکی را از خود عبور دهد؟ برای پاسخ به این سؤال به الکترون‌های لایه‌های اتم سیلیسیم در شکل ۲۰-۲ توجه کنید.



شکل ۲۰-۲ الکترون‌های اتم سیلیسیم

الکترون ها در باندهای انرژی تعریف شده قرار دارند و در باند هدایت هیچ الکترون آزادی وجود ندارد. این شرایط در درجه‌ی حرارت صفر مطلق (۲۷۳- درجه‌ی سانتی‌گراد) رخ می‌دهد. در این دما تمام الکترون‌ها شدیداً به اتم‌های کریستال متّصل‌اند و هیچ گونه انرژی خارجی از جمله گرما وجود ندارد تا پیوندها را بشکند و الکترون آزاد تولید کند. بنابراین، در صفر درجه‌ی مطلق، ژرمانیم و سیلیسیم، عایق به شمار می‌آیند.

اگر به کریستال انرژی داده شود مثلاً کریستال در دمای محیط ($۲۷^{\circ}C = ۳۰۰^{\circ}K$) قرار گیرد، انرژی گرمایی محیط الکترون‌ها را (مطابق شکل ۲۱-۲) به باند هدایت انتقال می‌دهد و آن را به الکترون آزاد تبدیل می‌کند. این الکترون‌های آزاد، هدایت الکتریکی را در نیمه هادی بالا می‌برند. این هدایت را هدایت ذاتی کریستال می‌نامند. هدایت ذاتی فقط در اثر حرارت ایجاد می‌شود.



شکل ۲۱-۲ انتقال الکترون به باند هدایت

هدایت ذاتی الکتریکی ژرمانیم از سیلیسیم بیش‌تر است، زیرا در یک درجه‌ی حرارت معین، پهنای باند ممنوع در کریستال ژرمانیم، از سیلیسیم کم‌تر است. لذا اگر به کریستال حرارت دهیم در کریستال ژرمانیم پیوندهای بیش‌تری نسبت به سیلیسیم شکسته می‌شود و جریان بیش‌تری را می‌تواند درمدار جاری کند. بنابراین

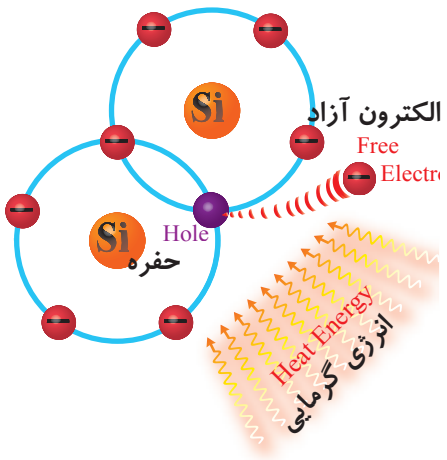
لازم است نکته زیر را دقیقاً به خاطر بسپارید:

در یک درجه حرارت معین، تعداد الکترون‌های آزاد در کریستال ژرمانیم از تعداد الکترون‌های آزاد در کریستال سیلیسیم بیش‌تر است.

۲-۱۴ تئوری حفره‌ها

همان طوری که گفته شد، در اثر انرژی خارجی (مثلاً گرما) پیوندها شکسته می‌شود و در نتیجه الکترون از اتم خود جدا می‌شود. بدین ترتیب در اتم نیمه هادی، کمبود الکترون حاصل می‌شود. جای خالی الکترون در اتم را حفره می‌نامند.

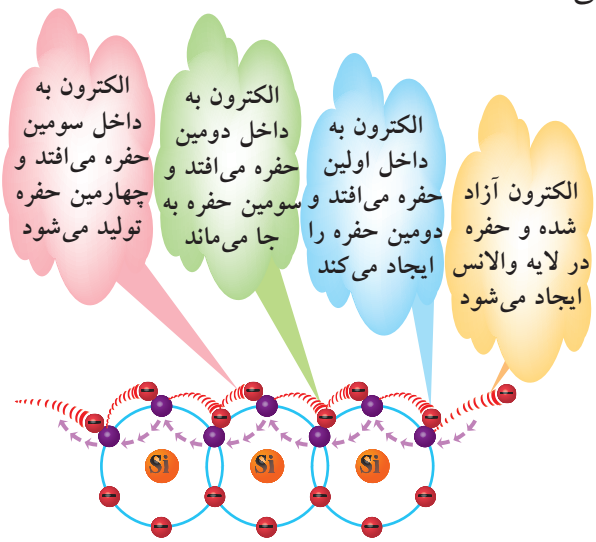
یک حفره به منزله‌ی یک بار مثبت است، زیرا می‌تواند الکترونی را که از دست داده دوباره پس بگیرد. در یک کریستال ژرمانیم یا سیلیسیم خالص، تعداد الکترون‌های آزاد و حفره‌ها با هم برابرند. الکترون های آزاد به طور نامنظّم، درون کریستال در حال حرکت‌اند. شکل ۲-۲۲ یک الکترون آزاد و یک حفره را که بر اثر شکسته شدن پیوند، در یک کریستال نیمه هادی به وجود آمده‌اند، نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۲ نمایش حفره و الکترون آزاد

۲-۱۵ حرکت الکترون‌ها و حفره‌ها داخل کریستال نیمه هادی

بعد از شکستن پیوندها و ایجاد الکترون‌ها و حفره‌ها، الکترون‌ها مرتب جذب حفره‌ها می‌شوند و از حالت آزاد بودن خارج می‌گردند. بنابراین هنگامی که الکترون‌ها در داخل کریستال نیمه هادی حرکت می‌کنند، وقتی از کنار حفره که بار مثبت دارد می‌گذرند جذب حفره می‌شوند. در شرایط معمولی، یعنی در صورت وجود انرژی گرمایی، شکست پیوندها ادامه می‌یابد. حرکت فرضی حفره‌ها عکس جهت حرکت الکترون‌هاست. البته حفره‌ها حرکت نمی‌کنند و همان طور که گفته شد، حفره‌ها فقط جای خالی الکترون‌ها هستند. شکل ۲-۲۳ تصویری از جهت حرکت الکترون‌ها و حفره‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۳ حرکت الکترون و حرکت فرضی حفره در جهت عکس یکدیگر است

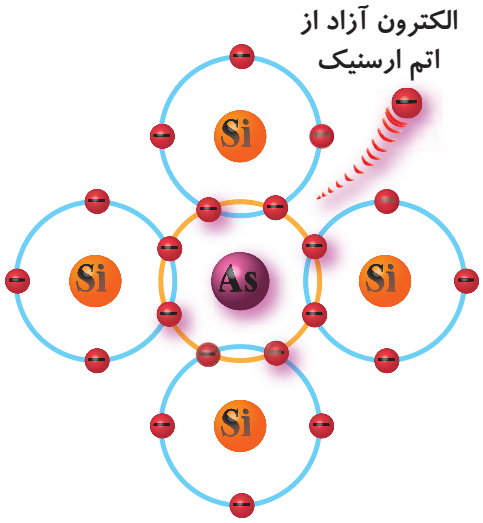
هنگامی که نیروی خارجی اعمال نمی‌شود حرکت الکترون‌ها و جذب شدن آن‌ها توسّط حفره‌ها، به طور نامنظم در کریستال ادامه دارد.

۲-۱۶ نیمه هادی نوع N و P

تعداد الکترون‌ها و حفره‌های ایجاد شده در نیمه هادی‌ها، بر اثر انرژی گرمایی، آن قدر کم‌اند که نمی‌توانند جریان زیادی را از خود عبور دهند (مقاومت اهمی آن‌ها زیاد است). در ضمن یک کریستال نیمه هادی خالص، به صورت یک مقاومت اهمی معمولی عمل می‌کند. برای این که بتوانیم از یک نیمه هادی در کابردهای ویژه‌ای (مثلاً ساخت دیود، ترانزیستور و ...) استفاده نماییم، باید آن را ناخالص کنیم. برای ناخالص کردن کریستال نیمه هادی، عناصر با اتم‌های پنج یا سه ظرفیّتی را به آن می‌افزاییم. این عناصر را عناصر ناخالصی (Impurity) می‌نامند.

۲-۱۶-۱ ناخالص کردن کریستال نیمه هادی با اتم پنج ظرفیّتی:

اگر یک جسم پنج ظرفیّتی مانند آرسنیک یا آنتیموان را به سیلیسیم یا ژرمانیم بیفزاییم، چهار الکترون مدار آخر آرسنیک با چهار اتم مجاور سیلیسیم یا ژرمانیم تشکیل پیوند اشتراکی می‌دهد و الکترون پنجم آن، به صورت الکترون آزاد باقی می‌ماند. (شکل ۲-۲۴)

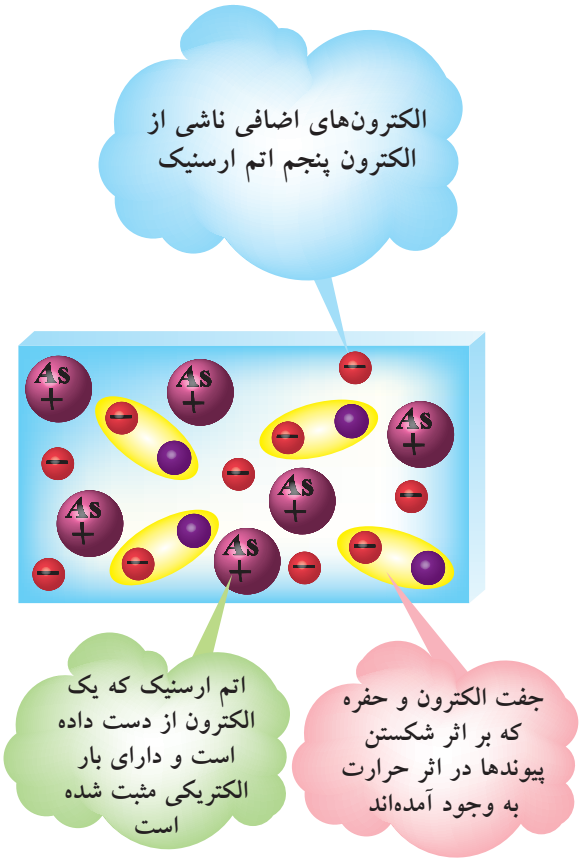


شکل ۲-۲۴ ناخالص کردن با اتم ۵ ظرفیتی

بنابراین، هر اتم آرسنیک، یک الکترون اضافی تولید می‌کند، بدون این که حفره‌ای ایجاد شده باشد. لذا می‌توان با تنظیم مقدار ناخالصی، تعداد الکترون‌های آزاد را کنترل نمود. در این نیمه هادی ناخالص شده، تعداد الکترون‌های آزاد به مراتب از حفره‌ها بیش‌ترند و حفره‌ها فقط بر اثر شکستن پیوندها به وجود می‌آیند.

نیمه هادی‌هایی که ناخالصی آن از اتم‌های پنج ظرفیّتی باشد، نیمه هادی نوع منفی یا N (Negative) نام دارد. علامت N، به دلیل وجود بار منفی ناشی از وجود الکترون‌های آزاد، انتخاب شده است.

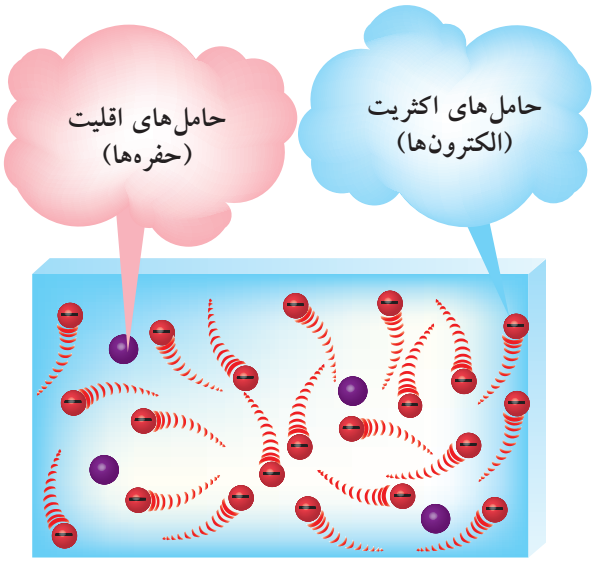
به طور خلاصه و ساده، نیمه هادی نوع N را می‌توان مانند شکل ۲-۲۵ نشان داد.



شکل ۲-۲۵ نیمه هادی نوع N

در این نیمه هادی (نوع N)، تعداد الکترون‌ها از تعداد حفره‌ها بسیار بیش‌تر است؛ و الکترون‌ها عمل هدایت جریان را نیز انجام می‌دهند. به الکترون‌ها حامل‌های اکثریت و به حفره‌ها حامل‌های اقلیت می‌گویند. یادآوری می‌شود که تعداد حامل‌های اکثریت، حدود یک میلیون برابر تعداد حامل‌های اقلیت است.

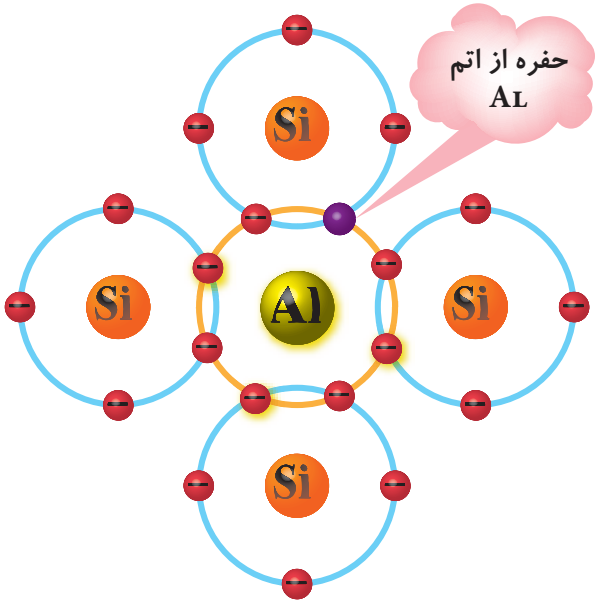
شکل ۲-۲۶ مقایسه‌ی حامل‌های اکثریت در مقابل حامل‌های اقلیت را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۲۶ مقایسه‌ی حامل‌های اکثریت (الکترون‌ها) در مقابل حامل‌های اقلیت (حفره‌ها) در کریستال N

۲-۱۶-۲ ناخالص کردن کریستال نیمه هادی

با اتم سه ظرفیتی: اگر یک عنصر سه ظرفیّتی، مانند آلومینیوم یا گالیم را به سیلیسیم یا ژرمانیم خالص اضافه کنیم سه الکترون مدار آخر آلومینیوم با سه الکترون سه اتم سیلیسیم یا ژرمانیم مجاور، پیوند اشتراکی تشکیل می‌دهند و پیوند چهارم در شرایط کمبود الکترون باقی می‌ماند. به این ترتیب می‌توان گفت که یک حفره ایجاد شده است. (شکل ۲-۲۷)



شکل ۲-۲۷ ناخالص کردن با اتم سه ظرفیتی

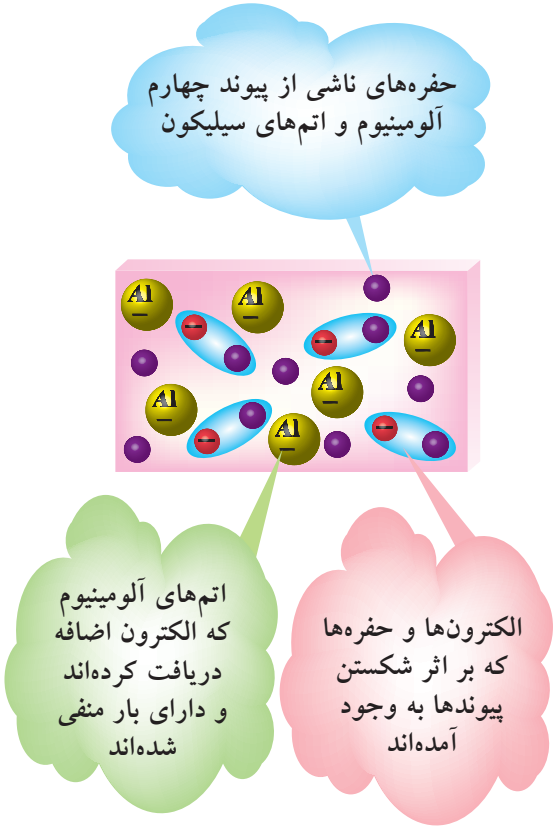
هر اتم سه ظرفیتی، باعث ایجاد یک حفره می‌شود؛ بدون این که الکترون آزاد ایجاد شده باشد. در این نیمه هادی ناخالص شده، الکترون‌ها فقط در اثر شکسته شدن پیوندها به وجود می‌آیند.

تعداد حفره‌های ایجاد شده توسط ناخالصی سه ظرفیتی را می‌توانیم با تغییر درصد ترکیب ناخالصی، به هر مقدار که بخواهیم، به وجود آوریم.

نیمه هادی‌هایی که ناخالصی آن‌ها از اتم‌های سه ظرفیتی باشد نوع مثبت یا P (Positive) نام دارد.

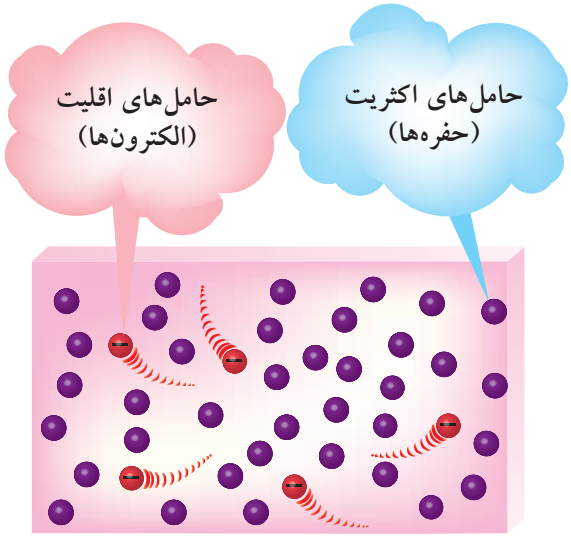
علامت P به دلیل وجود بارهای مثبت حفره‌ها انتخاب شده است.

به طور ساده و خلاصه می‌توان نیمه هادی نوع P را به صورت شکل ۲-۲۸ نشان داد.



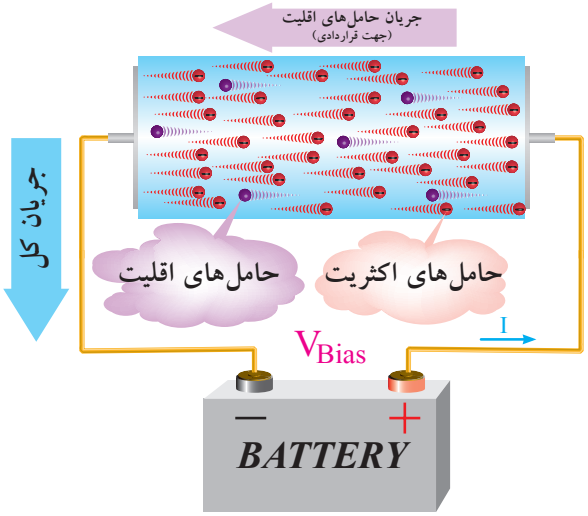
شکل ۲-۲۸ نیمه هادی نوع P

حفره‌ها در این نیمه هادی حامل‌های اکثریت و الکترون‌ها حامل‌های اقلیت نامیده می‌شوند. (شکل ۲-۲۹)

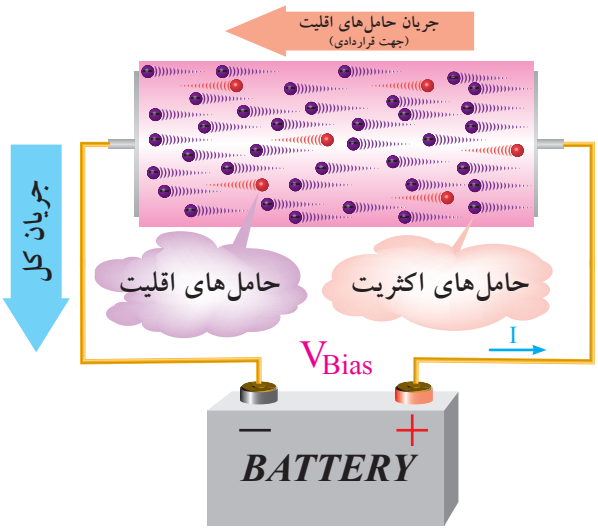


شکل ۲-۲۹ مقایسه حامل‌های اکثریت (حفره‌ها) در مقابل حامل‌های اقلیت (الکترون‌ها) در کریستال P

اگر کریستال‌ها به باتری اتصال داده شوند. جریان‌های ناشی از حامل‌های اقلیّت (حفره‌ها) و حامل‌های اکثریت (الکترون‌ها) عملاً در کریستال نوع N با هم جمع می‌شوند و جریان کل را تشکیل می‌دهند. این موضوع برای کریستال نوع P نیز صدق می‌کند. (شکل ۲-۳۰ الف وب)



شکل ۲-۳۰- الف جریان در کریستال نوع N



شکل ۲-۳۰- ب جریان در کریستال نوع P

نیروی تازه: وقتی اجازه می‌دهم فکری خوب در ذهن و اندیشه‌ام جای بگیرد، نیروی تازه‌ای می‌یابم.

لازم است یادآوری شود که مقدار ناخالصی بسیار کم است (حدود تقریبی یک اتم ناخالصی در مقابل 10^7 اتم ژرمانیم یا سیلیسیم). باز هم به طور تقریب می‌توان گفت که این مقدار ناخالصی، مقاومت نیمه هادی را حدود ۱۶ برابر کم می‌کند. اگر به 10^7 اتم ژرمانیم یا سیلیسیم تعداد دو اتم ناخالصی اضافه شود، مقاومت نیمه هادی حدود ۱۶۰ برابر کم‌تر خواهد شد به عبارت دیگر، هدایت آن ۱۶۰ برابر افزایش می‌یابد.

۲-۱۷ دلایل استفاده‌ی بیش‌تر از نیمه هادی سیلیسیم در مقایسه با ژرمانیم

در حال حاضر در کلیه‌ی موارد، به جز چند مورد خاص (مثلاً در دیودهای آشکارساز)، از نیمه هادی سیلیسیم استفاده می‌شود، زیرا:

- سیلیسیم به مقدار زیاد و به صورت سیلیس (SiO_2) در طبیعت یافت می‌شود.
- خالص کردن سیلیسیم به مراتب ساده‌تر از ژرمانیم است.
- تکنولوژی ساخت دیود، ترانزیستور و مدارات مجتمع (IC) با سیلیسیم ساده‌تر است.
- تحمل درجه‌ی حرارت سیلیسیم از ژرمانیم بیش‌تر است.
- باند ممنوعه‌ی سیلیسیم پهن‌تر است، لذا جریان ناشی از هدایت ذاتی سیلیسیم کم‌تر است.
- چگالی جریان Si از Ge بیش‌تر است، چگالی جریان برای سیلیسیم در حدود ۲۰۰ آمپر بر میلی متر مربع $(\frac{200A}{mm^2})$ و برای ژرمانیم در حدود ۱۵۰ آمپر بر میلی متر مربع $(\frac{150A}{mm^2})$ است.

از این رو، امروزه تقریباً بیش از ۹۰ درصد قطعات نیمه هادی، از سیلیسیم ساخته می‌شود.

۲-۱۸ الگوی پرسش

۲-۱۸-۱ مقاومت مخصوص را تعریف کنید.

۲-۱۸-۲ باندهای انرژی ژرمانیم و سیلیسیم را توضیح دهید.

۲-۱۸-۳ ساختمان اتمی ژرمانیم و سیلیسیم را تشریح کنید.

۲-۱۸-۴ ساختمان کریستالی ژرمانیم و چگونگی اتصال اتم‌ها را تشریح کنید.

۲-۱۸-۵ الکترون آزاد را تعریف کنید.

۲-۱۸-۶ تئوری حفره‌ها را توضیح دهید.

۲-۱۸-۷ چگونگی حرکت حفره و الکترون را مقایسه کنید.

۲-۱۸-۸ چگونگی تشکیل نیمه هادی نوع P را شرح دهید.

۲-۱۸-۹ چگونگی تشکیل نیمه هادی نوع N را شرح دهید.

۲-۱۸-۱۰ مزیت استفاده‌ی نیمه هادی سیلیسیم نسبت به ژرمانیم راتوضیح دهید.