

## فصل: مبانی نانوالکترونیک و فیزیک حالت جامد

### بخش ۲: مواد نیمه رسانا، انواع و ویژگی‌ها

نویسنده: محمد فرهادپور

#### مقدمه:

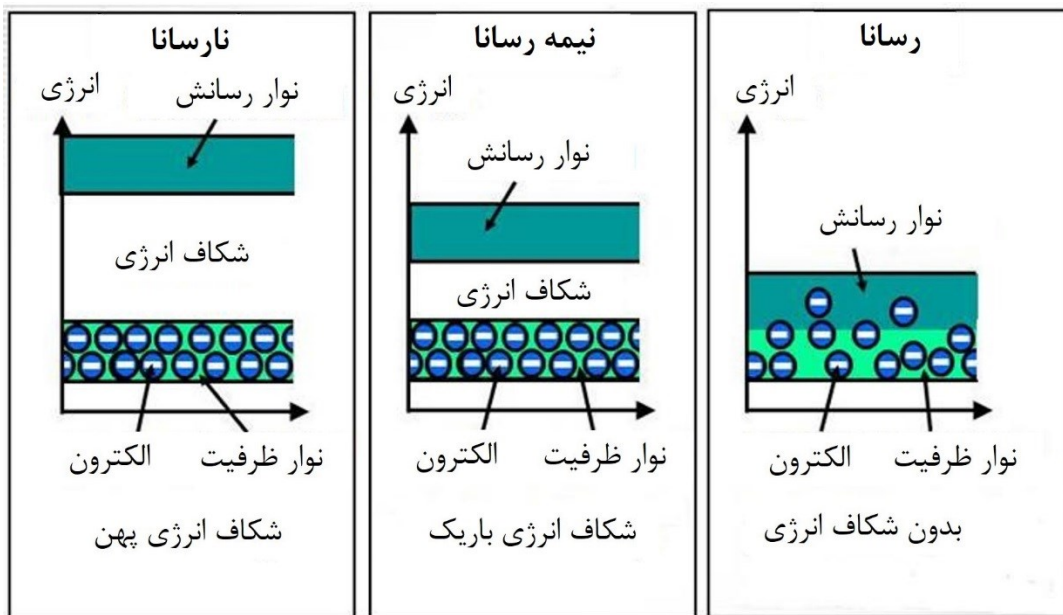
همان‌طور که در بخش قبل گفتیم، مواد از نظر قابلیت رسانایی الکتریکی به سه دسته‌ی رسانا، نیمه رسانا و نارسا تقسیم می‌شوند. برای توجیه پدیده رسانایی الکتریکی در جامدات، از نظریه نواری، که مبتنی بر فیزیک کوانتوم است، استفاده کردیم. در این بخش با توجه به اهمیت و کاربرد مواد نیمه رسانا، به بررسی بیشتر ویژگی‌های ساختاری آنها می‌پردازیم.

#### ۱- برخی ویژگی‌های نیمه رساناها

یکی از ویژگی‌های جالب مواد نیمه‌رسانا، که آنها را از مواد رسانا متمایز می‌کند و باعث کاربرد گسترده آنها برای ساخت دیودها و ترانزیستورها و غیره می‌شود، چگونگی تغییر مقاومت ویژه الکتریکی آنها با تغییرات دما و آرایش آنها است. همان‌طور که می‌دانیم افزایش دما موجب افزایش مقاومت ویژه الکتریکی مواد رسانا می‌شود. علت این پدیده نیز افزایش تعداد و شدت برخورد الکترون‌های آزاد با اتم‌های در حال نوسان در جسم رسانا است. با افزایش دما، جنبش ذرات تشکیل‌دهنده‌ی جسم بیشتر می‌شود و بنابراین تعداد و شدت برخورد الکترون‌های آزاد با اتم‌های جسم افزایش می‌یابد. یعنی الکترون‌ها که حاملان بار الکتریکی در جسم جامد رسانا هستند، برای انتقال بار الکتریکی با موانع بیشتری برخورد می‌کنند و در نتیجه رسانایی الکتریکی جسم کاهش می‌یابد.

آزمایش نشان می‌دهد، برخلاف رسانا، در نیمه رسانا افزایش دما موجب کاهش مقاومت ویژه الکتریکی نیمه‌رسانا می‌شود. توجیه این پدیده در نیمه‌رسانا تنها با استفاده از نظریه‌ی نواری امکان‌پذیر است. در تصویر ۱ ساختار نواری یک نیمه‌رسانا نشان داده شده است. همان‌گونه که در تصویر می‌بینیم در دماهای پایین نوار ظرفیت نیمه‌رسانا کاملاً پر از الکترون و نوار رسانش کاملاً خالی از الکترون است. از این رو نه نوار ظرفیت در رسانش نقشی دارد (چون نوار کاملاً پر است و هیچ الکترونی امکان گذار درون نوار را ندارد) و نه در

نوار رسانش الکترونی هست تا موجب رسانایی الکتریکی شود. بنابراین در دماهای پایین، نیمه رسانا مشابه نارسانا رفتار می‌کند. با افزایش دما، تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت به نوار رسانش گذار می‌کنند. بدین ترتیب هم الکترون‌هایی که در نوار رسانش قرار می‌گیرند، موجب رسانایی الکتریکی می‌شوند و هم تعدادی تراز خالی در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود. از این رو امکان گذار برای الکترون‌های نوار ظرفیت نیز (در همان نوار) فراهم می‌شود. به بیان دیگر، در این حالت هم نوار رسانش در رسانایی الکتریکی نقش دارد و هم نوار ظرفیت. به همین ترتیب با افزایش دما هم تعداد الکترون‌های نوار رسانش بیشتر می‌شود و هم ترازهای خالی نوار ظرفیت افزایش می‌یابد. این مسئله سبب افزایش رسانایی الکتریکی نیمه‌رسانا می‌شود. اما مسئله به همین جا ختم نمی‌شود.



شکل ۱: ساختار نواری یک جسم رسانا، نیمه‌رسانا و نارسانا

آزمایش‌های گوناگون نشان می‌دهد که مقدار جریان الکتریکی در نیمه رسانا بیشتر از آن است که فقط با عبور الکترون‌ها ایجاد شده باشد. این پدیده ایده‌ی وجود ذرات دیگری را به عنوان حامل بار الکتریکی مطرح می‌کند. به عبارت دیگر ما تا کنون فقط الکترون‌ها را به عنوان حاملان بار الکتریکی در نظر می‌گرفتیم، اما آزمایش‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد ذراتی با بار مثبت و هم‌جرم الکترون نیز در رسانایی الکتریکی نیمه‌رساناها نقش دارند. این اتفاق با استفاده از نظریه‌ی نواری این چنین توجیه می‌شود؛ در نیمه‌رسانا علاوه بر الکترون‌هایی که در نوار

رسانش قرار می‌گیرند و در رسانایی الکتریکی نقش دارند، جای خالی ایجاد شده در نوار ظرفیت نیز (که به دلیل گذار الکترون‌ها به نوار رسانش تشکیل شده)، موجب رسانایی الکتریکی می‌شود. با گذار الکترون از نوار ظرفیت به نوار رسانش، تعدادی جای خالی الکترون در نوار ظرفیت ایجاد می‌شود. جای خالی الکترون در نوار ظرفیت را حفره می‌گوییم.

## ۲- چگونگی رسانندگی حفره‌ها:

با ایجاد این جاهای خالی در نوار ظرفیت که در اثر گذار الکترون از نوار ظرفیت به رسانش رخ می‌دهد، الکترون‌های این نوار هم می‌توانند گذار انجام دهند و از تراز انرژی پایین‌تر به تراز انرژی بالاتر بروند. این مسئله موجب رسانایی الکتریکی می‌شود. به این صورت که گذار الکترون از تراز اولیه خود به تراز خالی، مشابه آن است که بگوییم حفره از تراز بالاتر به تراز اولیه الکترون گذار کرده است. بنابراین به جای آن که بگوییم الکترون درون نوار ظرفیت گذار کرده است، می‌گوییم حفره تراز خود را تغییر داده است. در واقع زیاد بودن تعداد الکترون‌ها، بررسی گذار آنها را دشوار می‌کند؛ اما چون تعداد حفره‌ها کم است، در نظر گرفتن آنها ساده‌تر است. نکته دیگری که باید به آن اشاره کرد، نحوه تعیین بار حفره‌های نوار ظرفیت است. از آنجاییکه حفره‌ها، برخلاف الکترون‌ها، از تراز بالاتر به تراز پایین‌تر گذار می‌کنند؛ قرارداد می‌کنیم که بار آنها را مثبت در نظر بگیریم.

پس در نیمه‌رسانا دو نوع حامل بار الکتریکی داریم؛ یکی الکترون‌های نوار رسانش و دیگری حفره‌های نوار ظرفیت.

## ۳- آرایش نیمه‌رسانا

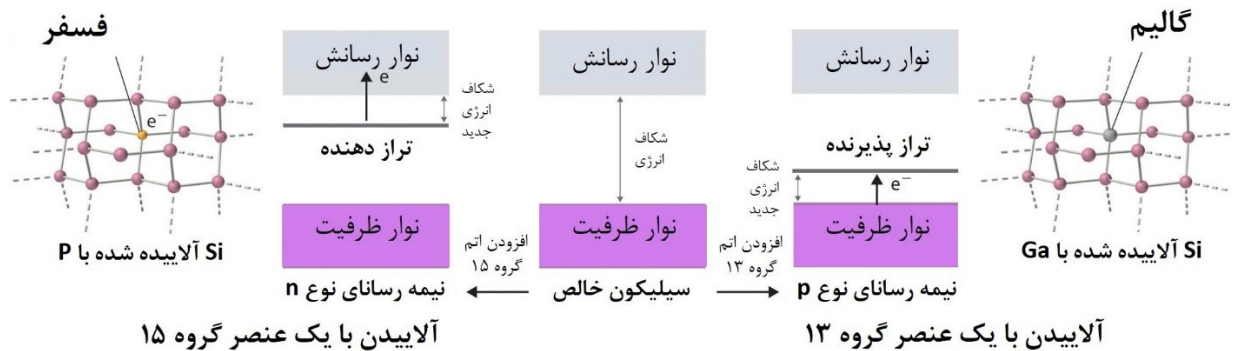
نیمه‌رسانایی را که ناخالصی نداشته باشد، نیمه‌رسانای ذاتی می‌گوییم. در نیمه‌رسانای ذاتی تعداد الکترون‌های موجود در نوار رسانش با تعداد حفره‌های موجود در نوار ظرفیت با هم برابرند.

همان‌طور که متوجه شدیم با افزایش دما می‌توان تعداد حاملان بار الکتریکی و در نتیجه رسانایی الکتریکی را در مواد نیمه‌رسانا افزایش داد. علاوه بر افزایش دما، با اضافه کردن مقادیر کمی ناخالصی به ماده‌ی نیمه‌رسانا نیز می‌توان تعداد حاملان بار الکتریکی را به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش داد. منظور از ناخالصی، اتم‌های

غیرهم جنس با اتم‌های نیمه‌رسانا است. به عمل اضافه کردن ناخالصی به نیمه‌رسانا، "آلایش نیمه‌رسانا" می‌گوییم و نیمه‌رسانایی را که به آن اتم‌های ناخالصی اضافه شده است، نیمه‌رسانای غیرذاتی می‌نامند. با افزودن ناخالصی به نیمه‌رسانا، مقاومت ویژه‌ی الکتریکی آن کاهش می‌یابد و در نتیجه رسانایی الکتریکی نیمه‌رسانا به صورت قابل توجهی بیشتر می‌شود.

آلایش نیمه‌رسانا به دو روش مختلف انجام می‌شود. یک روش آن است که اتم ناخالصی یک الکترون ظرفیت بیشتر از اتم‌های نیمه‌رسانای ذاتی داشته باشد و روش دیگر آن است که اتم ناخالصی یک الکترون ظرفیت کم‌تر از اتم‌های نیمه‌رسانای ذاتی داشته باشد. به عنوان مثال دو نیمه‌رسانای معروف که در بسیاری از قطعات الکترونیکی استفاده می‌شوند، عناصر سیلیسیوم (Si) و ژرمانیوم (Ge) هستند که هر دو چهار الکترون ظرفیت دارند. با اضافه کردن مقادیری ناخالصی از جنس فسفر (P) یا آرسنیک (As) که دارای پنج الکترون ظرفیت هستند به سیلیسیوم یا ژرمانیوم، نیمه‌رسانا را به روش اول آلایش کرده‌ایم. همچنین با افزودن مقادیری ناخالصی از جنس بور (B) یا گالیم (Ga) که دارای سه الکترون ظرفیت هستند به سیلیسیوم یا ژرمانیوم، نیمه‌رسانا را به روش دوم آلایش کرده‌ایم.

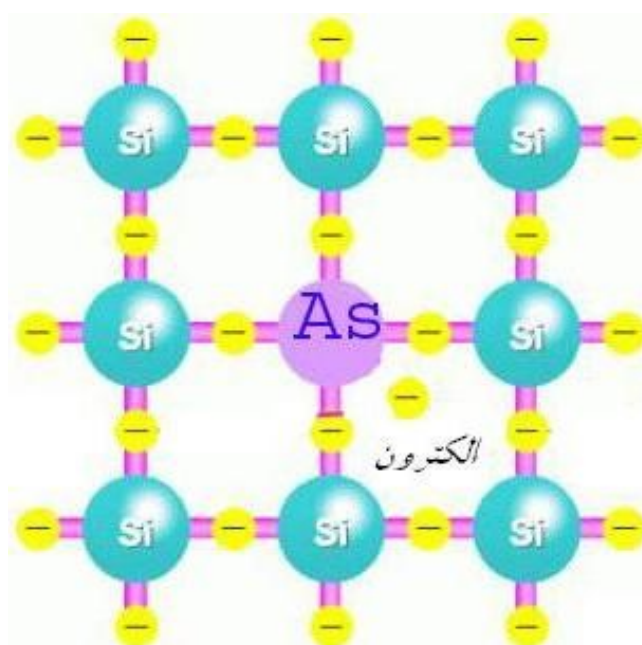
نیمه‌رسانایی را که به روش اول آلایش می‌شود، یعنی اتم ناخالصی یک الکترون ظرفیت بیشتر از اتم نیمه‌رسانا داشته باشد، نیمه‌رسانای نوع n می‌گوییم و نیمه‌رسانایی را که به روش دوم آلایش می‌شود، یعنی اتم ناخالصی یک الکترون ظرفیت کم‌تر از اتم نیمه‌رسانا داشته باشد، نیمه‌رسانای نوع p می‌گوییم.



شکل ۲: آلایش نیمه‌رسانای سیلیکون

## الف) نیمه‌رسانای نوع n

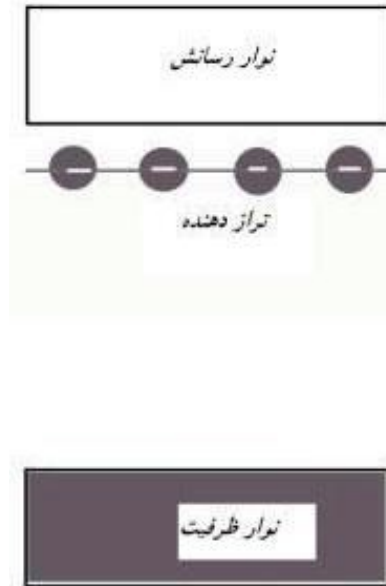
با افزودن مقادیر کمی ناخالصی از جنس یک اتم پنج ظرفیتی مانند آرسنیک به نیمه‌رسانای سیلیسیوم که دارای چهار الکترون ظرفیت هست، نیمه‌رسانای نوع n تشکیل می‌شود. همان‌گونه که در تصویر ۳ مشاهده می‌کنیم، چهار تا از الکترون‌های ظرفیت اتم آرسنیک با اتم‌های سیلیسیوم همسایه پیوند تشکیل می‌دهند و در واقع این چهار الکترون به جای الکترون‌های اتم سیلیسیوم، نوار ظرفیت را پر می‌کنند.



شکل ۳: آرایش سیلیسیوم با آرسنیک

با ورود ناخالصی به نیمه‌رسانا، ساختار نواری نیز تغییر می‌کند و یک تراز انرژی به نام "تراز دهنده" در فاصله‌ی بسیار کمی، زیر نوار رسانش تشکیل می‌شود که الکترون پنجم اتم آرسنیک در آن قرار می‌گیرد (تصویر ۴). چون فاصله‌ی این تراز از نوار رسانش بسیار کم است، الکترون‌های موجود در آن با جذب مقدار کمی انرژی وارد نوار رسانش می‌شوند و در رسانایی الکتریکی شرکت می‌کنند. اتم‌های ناخالصی را که یک الکترون اضافی به نوار رسانش می‌دهند، "ناخالصی دهنده" می‌نامیم. همان‌طور که متوجه شدیم در این نوع نیمه‌رسانا حاملان بار

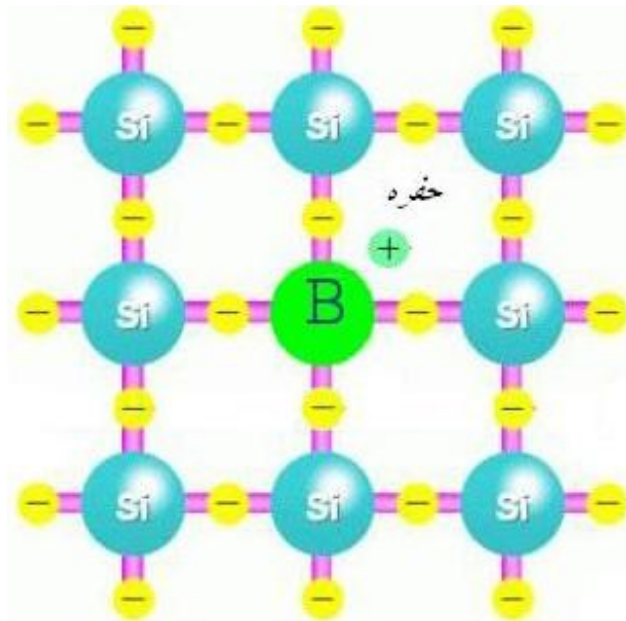
الکتريکی بیشتر از نوع الکترون‌های نوار رسانش هستند و از آن‌جا که الکترون‌ها دارای بار الکتريکی منفی (negative) هستند، این نوع نیمه‌رسانا را نیمه‌رسانای نوع n می‌نامیم.



شکل ۴: ساختار نواری سیلیسیوم آلايش شده با ارسنيک

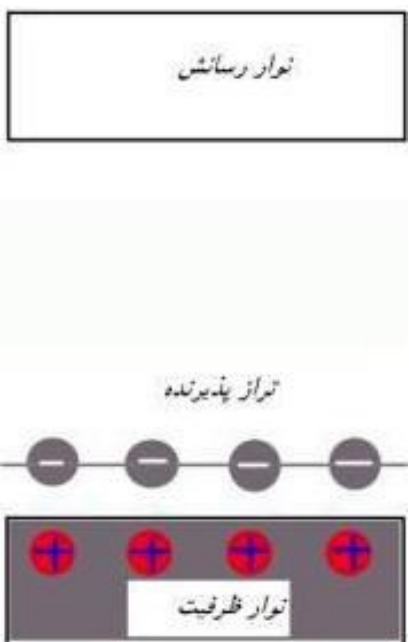
ب) نیمه‌رسانای نوع p

اگر به نیمه‌رسانایی از جنس سیلیسیوم مقادیر کمی ناخالصی از یک اتم سه ظرفیتی مانند بور اضافه کنیم، مطابق آنچه در تصویر ۵ مشاهده می‌کنیم، سه الکترون اتم بور با اتم‌های سیلیسیوم همسایه پیوند تشکیل می‌دهند. برای تکمیل شدن پیوند، الکترون‌های موجود در نوار ظرفیت نیمه‌رسانا، جای یک الکترون ناقص را پر می‌کنند تا پیوند کامل شود. بدین ترتیب یک حفره‌ی اضافی در نوار ظرفیت نیمه‌رسانا تشکیل می‌شود.



شکل ۵: آرایش سیلیسیوم با بور

در این نوع آرایش، برخلاف نوع قبل، تراز انرژی به نام "تراز پذیرنده" در فاصله کمی بالای نوار ظرفیت نیمه‌رسانا تشکیل می‌شود؛ به گونه‌ای که الکترون‌ها با جذب مقدار کمی انرژی و به منظور کامل کردن پیوند اتمی، به این تراز گذار می‌کنند و موجب تشکیل حفره‌های اضافی در نوار ظرفیت نیمه‌رسانا می‌شوند. این نوع اتم‌های ناخالصی را که یک الکترون اضافی از نوار ظرفیت می‌گیرند، "ناخالصی پذیرنده" می‌نامیم. از آنجاییکه حاملان بار الکتریکی در این نوع نیمه‌رسانا بیشتر از نوع حفره‌های نوار ظرفیت و با بار الکتریکی مثبت (positive) هستند، این نوع نیمه‌رسانا را نیمه‌رسانای نوع p می‌نامیم.



شکل ۶: ساختار نواری سیلیسیوم آرایش شده با بور

به منظور درک بیشتر اهمیت آرایش نیمه‌رسانا و تاثیر آن بر میزان رسانایی الکتریکی نیمه‌رسانا یک مثال ذکر می‌کنیم. در هر سانتی‌متر مکعب از نیمه‌رسانای ذاتی سیلیسیوم تقریباً  $10^{10}$  حامل بار الکتریکی وجود دارد. با افزودن تعداد  $10^{15}$  ناخالصی از جنس اتم آنتیموان (Sb) که یک اتم پنج ظرفیتی است، نیمه رسانای نوع n تشکیل می‌شود. با این روش مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نیمه‌رسانا از  $10^5 * 2$  اهم سانتی‌متر به  $5$  اهم سانتی‌متر کاهش می‌یابد. به بیان دیگر با افزودن مقادیری ناخالصی به نیمه‌رسانا، مقاومت ویژه‌ی نیمه‌رسانای غیرذاتی تشکیل شده به اندازه‌ی  $10^4 * 4$  برابر کاهش می‌یابد، که مقدار قابل ملاحظه‌ای است.

منابع:

مجموعه مقالات سایت باشگاه نانو