

فصل: مبانی نانوالکترونیک و فیزیک حالت جامد

بخش ۱: فیزیک حالت جامد را بشناسیم

نویسنده: محمد فرهاد پور

مقدمه

مشاهده‌ی پدیده‌های جدید در اوایل قرن بیستم میلادی و عدم توجیه این پدیده‌ها با قوانین فیزیک آن روز، موجب شد تا دانشمندان برخی نظریه‌های مرسوم فیزیک را دوباره بررسی کنند. نتیجه‌ی این اتفاقات، ظهور دو نظریه‌ی مهم و بنیادی در فیزیک به نام نظریه‌ی نسبیت و نظریه‌ی کوانتوم است.

یکی از این مشاهدات، پدیده‌ی رسانایی الکتریکی در جامدات بود. دانشمندان می‌توانستند بخش‌هایی از این پدیده را با استفاده از نظریه‌های فیزیک کلاسیک توجیه کنند؛ اما آزمایش‌های جدید، آنها را با وقایعی روبرو کرد که با قوانین قبلی قابل پیش‌بینی و توجیه نبودند.

حالت جامد یکی از شاخه‌های فیزیک است که درباره چگونگی تشکیل مواد با در نظر گرفتن تمام عوامل قرارگرفتن اتم‌ها و خواص فیزیکی فلزات و نافلزها بحث می‌کند و اجسام را به چهار دسته رسانا، نیمه رسانا، نارسانا و ابررسانا تقسیم می‌کند. این تقسیم‌بندی بر اساس میزان مقاومت مواد در عبور جریان الکتریکی از خود صورت می‌پذیرد. به جز ابررساناها که ساز و کار متفاوتی در هدایت الکترون‌ها دارند ساختار رساناها، نیمه رساناها و نارساناها در ادامه بررسی می‌شوند.

۱- تقسیم‌بندی مواد بر اساس مقاومت ویژه آنها:

همانطور که می‌دانیم اتم از دو بخش اصلی به نام هسته و ابر الکترونی پیرامون هسته تشکیل شده است. الکترون‌ها اطراف هسته در حال حرکت‌اند و توسط نیروی جاذبه‌ی الکتروستاتیکی که بین هسته و الکترون‌ها موجود است، در قید جاذبه‌ی هسته‌ی اتم قرار دارند. **حال اگر الکترون یا الکترون‌هایی در اتم موجود باشند که بتوانند خود را از قید جاذبه‌ی الکتروستاتیکی هسته رها کنند و آزادانه حرکت کنند، الکترون‌های آزاد نامیده**

می‌شوند. از آنجاییکه الکترون‌ها دارای بار الکتریکی منفی هستند، با حرکت خود موجب انتقال بار الکتریکی می‌شوند. از این رو مواد جامدی را که دارای الکترون آزاد هستند، رسانا یا هادی الکتریکی می‌گوییم، چرا که الکترون‌ها می‌توانند درون آنها جابه‌جا شوند. از سویی دیگر اگر هیچ الکترونی در اتم نتواند خود را از قید جاذبه‌ی الکتروستاتیکی هسته‌ی اتم رها کند، دیگر عاملی برای انتقال بار الکتریکی وجود ندارد و آن ماده، نارسانا یا عایق الکتریکی نامیده می‌شود.

مقاومت ویژه‌ی الکتریکی به بیان ساده یعنی میزان مقاومت مقدار معینی از یک ماده‌ی خاص در مقابل رسانایی الکتریکی. مقاومت ویژه‌ی الکتریکی در مواد گوناگون متفاوت است و مشاهده می‌شود مقاومت ویژه پاره‌ای از رساناها مانند نقره و مس کم و دارای مرتبه بزرگی منفی هشت هستند و مقاومت الکتریکی یک نارسانا مانند تفلون بسیار زیادتر و دارای مرتبه بزرگی چهارده است، درحالی‌که مواد نیمه رسانایی مانند سیلیسیوم و ژرمانیوم دارای مرتبه بزرگی منفی یک هستند که نه مشابه رساناها می‌باشند و نه نارساناها. (مرتبه بزرگی به مقدار توان ده فارغ از ضرب آن گفته می‌شود) در جدول ۱ مقاومت ویژه‌ی الکتریکی برخی مواد در دمای اتاق (۲۷ درجه‌ی سانتیگراد) داده شده است.

جدول ۱: مقاومت ویژه‌ی الکتریکی چند ماده در دمای اتاق بر حسب اهم متر

نام ماده	مقاومت ویژه ی الکتریکی (اهم متر)
نقره	$1.6 * 10^{-8}$
مس	$1.7 * 10^{-8}$
الومینیوم	$2.8 * 10^{-8}$
آهن	$10 * 10^{-8}$
ژرمانیوم	$4.6 * 10^{-1}$
سیلیسیوم	100 - 1000
شیشه	$10^{10} - 10^{14}$
تفلون	10^{14}

همه‌ی آنچه تاکنون گفته شد مطابق آن چیزی است که در فیزیک کلاسیک بیان می‌شود. همان طور که می‌بینیم فیزیک کلاسیک می‌تواند تفاوت بین رسانا و نارسانا را با بیانی ساده و به خوبی مشخص کند؛ اما آیا

می‌داند که چرا رسانایی الکتریکی در رساناهای گوناگون متفاوت است؟ چرا الماس و گرافیت که هر دو از عنصر کربن تشکیل شده‌اند، یکی نارسانا و دیگری رسانا است؟ چرا مقاومت ویژه‌ی الکتریکی رساناها با افزایش دما بیشتر می‌شود، اما مقاومت ویژه‌ی الکتریکی نیمه‌رساناها با افزایش دما، کم‌تر می‌شود؟ و ... این‌ها چند نمونه از پدیده‌هایی است که در فیزیک کلاسیک بدون پاسخ می‌ماند. پس نیاز به نظریه‌ای جدید برای توجیه این موارد است. یک نظریه‌ی جدید!

۲- کلیت نظریه‌ی نواری:

همان‌طور که می‌دانیم الکترون‌ها در مدارهای معینی که هر یک انرژی ویژه‌ای دارند، در اطراف هسته‌ی اتم حرکت می‌کنند. این مقدار انرژی را تراز انرژی آن مدار می‌گوییم. به هر یک از این مدارها و تراز انرژی وابسته به آن، یک حالت کوانتومی برای الکترون‌های آن اتم گفته می‌شود.

در یک اتم الکترون‌ها ابتدا ترازهای پایین‌تر انرژی را پر می‌کنند. به بیان دیگر حالت‌های کوانتومی در هر اتم از تراز پایین به بالا توسط الکترون‌های آن اتم اشغال می‌شود. (این ماجرا مشابه آن است که شما درون یک کاسه تعدادی تیله بریزید، واضح است که تیله‌هایی که ابتدا می‌ریزید در ته کاسه قرار می‌گیرند و تیله‌های بعدی به تدریج روی تیله‌های پایینی می‌ایستند).

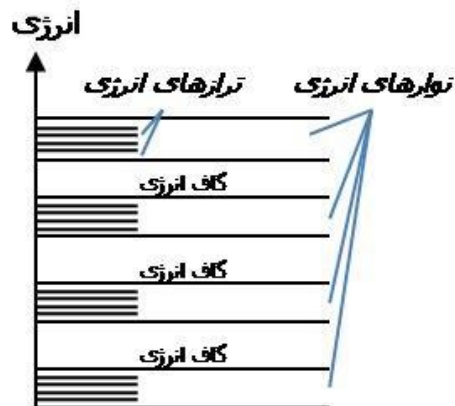
هنگامیکه همه‌ی الکترون‌ها به ترتیب ترازهای انرژی را از پایین به بالا پر می‌کنند، می‌گوییم اتم در حالت پایه‌ی خود قرار دارد. از طرف دیگر، الکترون می‌تواند با جذب مقداری انرژی، تراز خود را ترک کند و به تراز بالاتری که خالی است برود که در این حالت می‌گوییم اتم برانگیخته شده است. مقدار این انرژی دقیقاً برابر مقدار اختلاف انرژی دو تراز است.

خُب، آنچه تاکنون بیان شد مربوط به یک اتم تنها بود. اما در اجسام جامد که متشکل از تعداد بسیار زیادی اتم است، ترازهای انرژی الکترون‌ها چگونه‌اند؟ پاسخ این پرسش همان چیزی است که به آن نظریه‌ی نواری می‌گوییم و مبتنی بر اصول مکانیک کوانتوم است.

در جسم جامد به جای یک اتم، با مجموعه‌ای از اتم‌های نزدیک به هم سر و کار داریم. بنابراین دیگر فقط با یک هسته (با بار مثبت) و تعدادی الکترون (با بار منفی) که اطراف هسته‌ی اتم حرکت می‌کند، روبرو نیستیم؛ بلکه

اکنون تعداد بسیار زیادی الکترون هستند که تحت تاثیر نیروهای حاصل از تمام هسته‌های مثبت قرار دارند. دانشمندان مدت‌های طولانی این مسئله‌ی بسیار پیچیده را بررسی کردند تا بالاخره نتایج زیر را بدست آورند: ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد، مانند ترازهای انرژی الکترون‌ها در یک اتم، مقدار انرژی ویژه‌ای دارند. ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد، مانند ترازهای انرژی الکترون‌ها در یک اتم، مقدارهایی گسسته‌اند. (یعنی ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد هر مقداری نمی‌تواند باشد و فقط مقادیر خاصی هست. بنابراین می‌گوییم این مقدار پیوسته نیست و گسسته است. به این نوع کمیت‌ها در مکانیک کوانتومی، کمیت کوانتیده گفته می‌شود).

هر تراز انرژی تنها توسط یک الکترون می‌تواند پر شود. (در بعضی کتاب‌ها می‌گویند هر تراز انرژی توسط دو الکترون با اسپین مخالف پر می‌شود. البته این دو، متناقض هم نیستند و فقط بیان‌ها در مورد تراز انرژی با یکدیگر متفاوت است!). و مهم‌تر از همه اینکه ترازهای انرژی الکترون‌ها در جسم جامد، نوارهای مشخصی را تشکیل می‌دهند. هر نوار انرژی شامل تعداد بسیار زیادی ترازهای گسسته است که از نظر مقدار انرژی بسیار به هم نزدیک‌اند. تفاوت انرژی برخی نوارها بسیار زیاد است. یعنی بین آخرین تراز انرژی نوار پایین با اولین تراز انرژی نوار بالا، اختلاف انرژی زیادی وجود دارد. در این فاصله هیچ تراز انرژی وجود ندارد، یعنی الکترون‌ها در این فاصله نمی‌توانند قرار بگیرند. این ناحیه را ناحیه‌ی ممنوع یا گاف انرژی می‌گوییم.



شکل ۱: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی

با توجه به این توضیحات، به نظر شما الکترون‌ها چگونه در جسم جامد توزیع می‌شوند؟ در جسم جامد الکترون‌ها به ترتیب از پایین‌ترین تراز انرژی در پایین‌ترین نوار توزیع می‌شوند. از آنجاییکه در هر تراز انرژی فقط یک الکترون می‌تواند قرار بگیرد، ترازهای انرژی به ترتیب توسط الکترون‌ها پر می‌شوند تا یک نوار انرژی کاملاً

پر شود. الکترون‌های بعدی در ترازهای انرژی نوار بالاتر قرار می‌گیرند و این ماجرا ادامه می‌یابد تا همه‌ی الکترون‌ها در ترازهای انرژی جا بگیرند. بدین ترتیب آخرین نوار انرژی یا کاملاً از الکترون پر است و یا نیمه‌پر است. واضح است نوارهای انرژی پایین‌تر همگی پر هستند و نوارهای انرژی بالاتر همگی خالی هستند. همان طور که بیان شد در یک اتم الکترون‌ها می‌توانند با جذب مقداری انرژی، که دقیقاً برابر اختلاف دو تراز انرژی است، از یک تراز انرژی پایین‌تر به تراز انرژی بالاتر بروند. در جسم جامد هم الکترون‌ها با جذب انرژی می‌توانند از تراز انرژی پایین‌تر به تراز انرژی بالاتر در همان نوار منتقل شوند. اما برای تغییر تراز انرژی از یک نوار به نوار بالاتر، انرژی بسیار زیادی لازم است که در شرایط معمولی، اتفاق نمی‌افتد. بنابراین گذار الکترون از یک تراز انرژی به تراز انرژی دیگر، تنها در صورتی انجام می‌شود که نوار نیمه‌پر باشد؛ چون الکترون‌ها فقط می‌توانند به ترازهای انرژی بالاتر در همان نوار گذار کنند و گذار از یک نوار به نوار بالاتر امکان‌پذیر نیست. از آنجاییکه الکترون‌های موجود در نوارهای پر، امکان گذار از یک تراز انرژی به تراز انرژی بالاتر را ندارند، بنابراین سهمی در رسانایی الکتریکی ندارند. به بیان دیگر تنها الکترون‌هایی که در نوارهای نیمه‌پر قرار دارند و امکان گذار از یک تراز انرژی به تراز انرژی بالاتری در همان نوار را دارند، در رسانایی الکتریکی جسم جامد نقش دارند. دقت کنید وقتی می‌گوییم الکترون از یک تراز انرژی به تراز انرژی بالاتری رفته، منظور افزایش سطح انرژی الکترون است، نه حرکت فیزیکی! (یعنی تلاش نکنید زیر میکروسکوپ دنبال ترازها و نوارهای انرژی بگردید!)

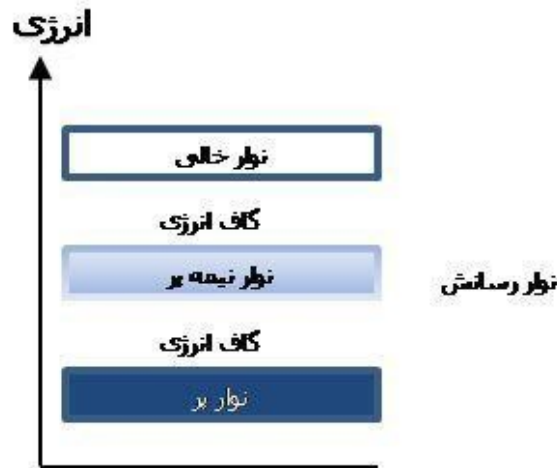
۳- رسانا، نارسانا و نیمه‌رسانا در نظریه‌ی نواری:

با توجه به توضیحات داده شده در مورد نظریه نواری و توجه به این نکته که الکترون‌های خارجی یا الکترون‌های لایه ظرفیت که پیوندهای بلوری را شکل می‌دهند، در نوارهایی قرار می‌گیرند که نوار ظرفیت نامیده می‌شود و در واقع بالاترین نوار انرژی پر است. همچنین به نوار بالای نوار ظرفیت که پایین‌ترین نوار خالی یا نیمه خالی است نوار رسانش گفته می‌شود. مواد مختلف از لحاظ پهنای نوار و پهنای نوار ممنوعه با هم متفاوت‌اند و به سه دسته زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف) ساختار نواری اجسام رسانا

اگر در ساختار نواری جسم جامد، نوار نیمه‌پر وجود داشته باشد، آن جسم رسانا است. زیرا الکترون‌های نوار نیمه‌پر به آسانی و تحت تاثیر اختلاف پتانسیل الکتریکی که دو سر رسانا اعمال می‌شود، می‌توانند تراز انرژی

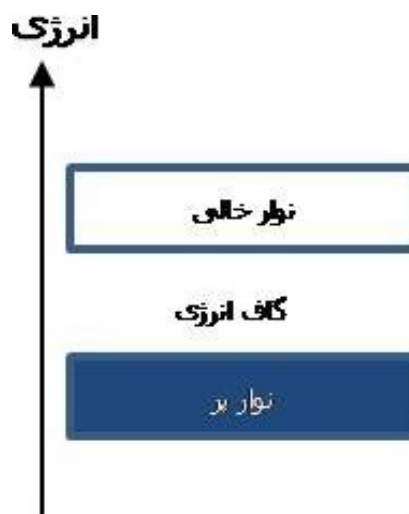
خود را تغییر دهند و در رسانایی الکتریکی شرکت کنند. این الکترون‌ها را الکترون‌های رسانش و نوار نیمه‌پر را نوار رسانش می‌گوییم. تعداد الکترون‌های نوار رسانش در یک رسانای فلزی بسیار زیاد است. پس مشخصه‌ی اصلی رساناها، وجود نوار نیمه‌پر در ساختار نواری آنها است (شکل ۲).



شکل ۲: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم رسانا

(ب) ساختار نواری اجسام نارسانا

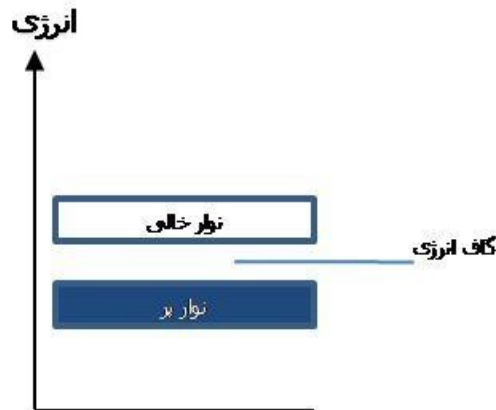
در ساختار نواری جامدات نارسانا، نوار نیمه‌پر وجود ندارد. گاف انرژی در جامدات نارسانا بسیار بزرگ است (در حدود ۵ الکترون ولت) و بنابراین هیچ الکترونی نمی‌تواند از نوار پر به نوار خالی گذار کرده و موجب رسانایی الکتریکی شود. در این مواد رسانایی الکتریکی انجام نمی‌شود.



شکل ۳: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم نارسانا

پ) ساختار نواری اجسام نیمه‌رسانا

در ساختار نواری جامدات نیمه‌رسانا، همانند نارسانا، نوار نیمه‌پر وجود ندارد. اما گاف انرژی در نیمه‌رساناها بسیار کمتر از نارساناها است (در حدود ۱ الکترون ولت). در نیمه‌رسانا، بالاترین نوار پر را نوار ظرفیت و پایین‌ترین نوار خالی را نوار رسانش می‌گوییم. کوچک بودن گاف انرژی در جامدات نیمه‌رسانا موجب می‌شود که تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت حتی در دمای اتاق برانگیخته شده، به نوار رسانش بروند و در رسانایی الکتریکی شرکت کنند. با افزایش دما، الکترون‌های بیشتری امکان گذار از نوار ظرفیت به نوار رسانش می‌یابند و بنابراین رسانایی الکتریکی بیشتر می‌شود.



شکل ۴: نحوه قرارگیری ترازها، نوارها و گاف انرژی در یک جسم نیمه‌رسانا

منابع :

۱. مجموعه مقالات سایت باشگاه نانو
۲. فیزیک پیش دانشگاهی
۳. دانشنامه رشد