

دانشگاه پیام نور
پایان نامه
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته فیزیک حالت جامد

دانشکده علوم پایه
گروه علمی فیزیک

عنوان پایان نامه:

مطالعه‌ی خواص اپتیکی و الکترونی در نانوساختارهای نیمرسانا

استاد راهنما:

دکتر رضا خرداد

استاد مشاور:

دکتر عبدالرسول قرائتی

نگارش:

علی بلندپرواز

دی ماه ۱۳۸۹

تاریخ :
شماره :
پیوست :



دانشگاه پیام نور استان فارس
باسم تعالی

جمهوری اسلامی ایران
وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

صور تجلسه دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

جلسه دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد آقای علی بلند پرواز دانشجوی رشته فیزیک گرایش حالت جامد به شماره دانشجویی ۸۷۰۰۰۴۱۵۳ با عنوان:

" مطالعه خواص الکترونی و اپتیکی در نانو ساختارهای نیمه رسانا"

با حضور هیات داوران در روز جمعه مورخ ۱۳۸۹/۱۰/۱۰ ساعت ۱۰ صبح در محل ساختمان غدیر دانشگاه پیام نور شیراز برگزار شد و هیات داوران پس از بررسی، پایان نامه مذکور را شایسته نمره به عدد ۱۹/۰۰ به حروف بیست و نه با درجه عالی تشخیص داد.

ردیف	نام و نام خانوادگی	هیات داوران	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه	امضاء
۱	دکتر رضا خرداد	راهنما	استادیار	یاسوج	
۲	دکتر عبدالرسول قرآنی جهرمی	مشاور	دانشیار	پیام نور شیراز	
۳	دکتر ابراهیم صادقی	داور	استادیار	یاسوج	
۴	دکتر حسین توللی	نماینده تحصیلات تکمیلی	دانشیار	پیام نور شیراز	

شیراز - شهرک گلستان، بلوار دهخدا
قبل از نمایندگی بین المللی
تلفن: ۰۷۱۱-۶۲۲۲۲۴۰-۳
دورنگار: ۰۷۱۱-۶۲۲۲۲۴۹
صندوق پستی: ۷۱۹۵۵-۱۳۶۸
www.spnu.ac.ir
Email: admin@spnu.ac.ir

چکیده

مطالعه‌ی خواص اپتیکی و الکترونی در نانوساختارهای نیمرسانا

توسط: علی بلندپرواز

در این پایان‌نامه به بررسی خواص اپتیکی و الکترونی نانوساختارهای نیمرسانا در شرایط مختلف می‌پردازیم. در این بین از خواص اپتیکی، ضریب جذب اپتیکی و فرکانس جذب آستانه برای یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای، یک نقطه کوانتومی کروی ناهمسانگرد، یک جعبه کوانتومی و یک حلقه کوانتومی در حضور میدان مغناطیسی خارجی به طور تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. از خواص الکترونی نیز، پذیرفتاری مغناطیسی را برای یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای و جعبه کوانتومی محاسبه می‌کنیم. در این بین تغییرات انرژی بر حسب میدان مغناطیسی اعمال شده را نیز برای یک نقطه کوانتومی کروی همسانگرد و یک حلقه کوانتومی مورد بررسی قرار می‌دهیم.

در تمامی سیستم‌های مورد بررسی، قبل از هر چیز ابتدا باید توابع موج و طیف‌های انرژی را به دست آوریم. به دلیل اینکه حل تحلیلی معادله‌ی شرودینگر برای اغلب سیستم‌های مورد بررسی امکان پذیر نمی‌باشد، بنابراین از یک مجموعه از تبدیلات جهت ساده سازی هامیلتونی سیستم‌ها بهره گرفته شده است. در نهایت با توجه به توابع موج و طیف‌های انرژی به دست آمده، می‌توانیم ضریب جذب اپتیکی، فرکانس جذب آستانه و پذیرفتاری مغناطیسی را برای سیستم‌های مورد نظر به دست آوریم. در ضمن، نقطه کوانتومی مورد استفاده در تمامی موارد از جنس گالیوم‌آرسناید است.

در نقاط کوانتومی بررسی شده، می‌توان دید که افزایش میدان مغناطیسی سبب افزایش فرکانس جذب آستانه می‌شود. دلیل فیزیکی این رفتار آن است که افزایش میدان مغناطیسی باعث می‌شود شکافتگی ترازهای انرژی بیشتر گردد و فرکانس جذب آستانه افزایش یابد. در نقطه کوانتومی ناهمسانگرد برای میدان مغناطیسی قوی، فرکانس جذب آستانه بر حسب میدان مغناطیسی خطی می‌شود. ولی در حالت‌هایی که میدان مغناطیسی ضعیف باشد، فرکانس جذب آستانه بر حسب میدان مغناطیسی سهمی شکل می‌شود. این مطالب در مورد جعبه کوانتومی نیز صادق است، با این تفاوت که به علت همسانگردی، افزایش فرکانس جذب آستانه بر حسب میدان مغناطیسی اعمال شده، به ازای میدان‌های قوی و ضعیف خطی است.

برای خواص الکترونی نقاط کوانتومی بررسی شده نیز، در می‌یابیم که برای جعبه کوانتومی، افزایش طول جعبه سبب افزایش پذیرفتاری دیامغناطیسی شده و افزایش غلظت آلومنیوم در ترکیب گالیوم آرسناید سبب کاهش پذیرفتاری دیامغناطیسی می‌شود. در نقطه کوانتومی استوانه‌ای نیز به دست خواهیم آورد که افزایش ارتفاع و شعاع سطح مقطع استوانه هر دو سبب افزایش پذیرفتاری دیامغناطیسی می‌شود.

برای حلقه کوانتومی ناهمسانگرد در حضور میدان مغناطیسی مایل نیز در می‌یابیم که برای یک ناهمسانگردی ثابت، می‌توانیم شکافتگی ترازهای انرژی را با جهت میدان مغناطیسی کنترل کنیم. همچنین در می‌یابیم که در میدان مغناطیسی صفر، شکافتگی ترازهای انرژی فقط به میزان ناهمسانگردی بستگی دارد و با افزایش ناهمسانگردی، تبهگنی از بین می‌رود.

فهرست مطالب

فصل اول: نانوساختارهای نیمرسانا.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ بلورهای نیمرسانا.....	۲
۳-۱ فناوری نانو.....	۶
۴-۱ نقطه کوانتومی.....	۸
۱-۴-۱ کوانتیزه کردن طیف انرژی حامل‌های بار.....	۹
۲-۴-۱ محدودیت کوانتومی.....	۱۰
۵-۱ ابعاد نقطه کوانتومی و اندازه‌ی گاف نواری.....	۱۰
۶-۱ کاربرد نقاط کوانتومی.....	۱۱
۷-۱ قاعده‌ی طلایی فرمی.....	۱۲
۸-۱ مروری بر فصل‌های آینده.....	۱۳

فصل دوم: خواص اپتیکی نانوساختارهای نیمرسانا.....	۱۴
۱-۲ مقدمه.....	۱۵
۲-۲ توابع موج و ترازهای انرژی در یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای.....	۱۶
۳-۲ ضریب جذب خطی و فرکانس جذب آستانه.....	۲۳
۴-۲ نتایج و بحث.....	۲۵
۵-۲ ضریب جذب اپتیکی و فرکانس جذب آستانه در یک نقطه کوانتومی کروی ناهمسانگرد.....	۳۳
۶-۲ نتایج و بحث.....	۳۵
۴-۲ بررسی ضریب جذب اپتیکی و فرکانس جذب آستانه در یک جعبه کوانتومی.....	۴۱
۵-۲ نتایج و بحث.....	۴۳

فصل سوم: خواص الکترونی نانوساختارهای نیمرسانا.....	۴۷
۱-۳ مقدمه.....	۴۸
۲-۳ توابع موج و ویژه مقادیر انرژی برای یک جعبه کوانتومی با پتانسیل محدود.....	۴۸
۳-۳ پذیرفتاری مغناطیسی.....	۵۱

- ۴-۳ پذیرفتاری مغناطیسی در دیامغناطیس‌ها..... ۵۲
- ۵-۳ پذیرفتاری مغناطیسی برای یک جعبه کوانتومی با پتانسیل محدود در حالت پایه..... ۵۳
- ۶-۳ پذیرفتاری مغناطیسی برای یک جعبه کوانتومی با پتانسیل محدود در حالت برانگیخته..... ۶۵
- ۷-۳ پذیرفتاری مغناطیسی برای یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای در حالت پایه..... ۷۶
- ۸-۳ پذیرفتاری مغناطیسی برای یک نقطه کوانتومی استوانه‌ای در حالت برانگیخته..... ۸۳
- ۹-۳ تغییرات انرژی سیستم بر حسب میدان مغناطیسی در یک نقطه کوانتومی همسانگرد..... ۸۸

فصل چهارم: حلقه کوانتومی..... ۹۳

- ۱-۴ مقدمه..... ۹۴
- ۲-۴ ترازهای انرژی در یک حلقه کوانتومی..... ۹۵
- ۳-۴ نتایج عددی برای حلقه کوانتومی..... ۹۸
- ۴-۴ نتیجه گیری..... ۱۰۸

فصل پنجم: نتایج و پیشنهادات..... ۱۰۹

- ۱-۵ نتایج..... ۱۰۹
- ۲-۵ پیشنهادات..... ۱۱۲

فهرست منابع..... ۱۱۳

فهرست شکل‌ها و نمودارها

- شکل ۱-۱ جدول بلورهای نیمرسانا..... ۳
- شکل ۲-۱ ساختار نواری در نیمرساناها..... ۴
- شکل ۳-۱ تراکم حامل‌های بار بر حسب دما برای سیلیسیم و ژرمانیوم..... ۴
- شکل ۴-۱ پیوستگی ترازهای انرژی در نیمرساناهای معمولی..... ۹
- شکل ۵-۱ گسستگی ترازهای انرژی در نقطه کوانتومی..... ۱۰
- شکل ۱-۲ گاف مستقیم و جذب بیشتر..... ۲۴
- شکل ۲-۲ گاف غیرمستقیم و نفوذ بیشتر..... ۲۴
- شکل ۳-۲ فرکانس جذب آستانه W بر حسب میدان مغناطیسی اعمال شده..... ۳۰
- شکل ۴-۲ فرکانس جذب آستانه W بر حسب شعاع استوانه..... ۳۱
- شکل ۵-۲ فرکانس جذب آستانه W بر حسب ارتفاع استوانه..... ۳۲
- شکل ۶-۲ فرکانس جذب آستانه بر حسب میدان مغناطیسی برای یک نقطه کوانتومی
- کروی ناهمسانگرد..... ۳۹
- شکل ۷-۲ فرکانس جذب آستانه بر حسب میدان مغناطیسی در میدان‌های ضعیف برای یک نقطه کوانتومی کروی ناهمسانگرد..... ۴۰
- شکل ۸-۲ فرکانس جذب آستانه بر حسب میدان مغناطیسی برای جعبه کوانتومی..... ۴۶
- شکل ۱-۳ نمودار معادله‌ی (۱۹-۳) بر حسب E_{1x} ۵۷
- شکل ۲-۳ جواب معادله‌ی (۱۹-۳) به ازای $f(E_{1x}) = 0$ ۵۷
- شکل ۳-۳ پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب طول جعبه در $x = 0.20$ برای حالت پایه..... ۶۰
- شکل ۴-۳ نمودار معادله‌ی (۱۹-۳) بر حسب E_{1x} ۶۱
- شکل ۵-۳ جواب معادله‌ی (۱۹-۳) به ازای $f(E_{1x}) = 0$ ۶۲
- شکل ۶-۳ پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب غلظت آلومنیوم در $L = 100 \text{ \AA}$ برای حالت پایه..... ۶۵
- شکل ۷-۳ نمودار معادله‌ی (۲۲-۳) بر حسب E_{2x} ۶۷
- شکل ۸-۳ جواب معادله‌ی (۲۲-۳) به ازای $f(E_{2x}) = 0$ ۶۸
- شکل ۹-۳ پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب طول جعبه در $x = 0.20$ برای حالت برانگیخته..... ۷۱
- شکل ۱۰-۳ نمودار معادله‌ی (۲۲-۳) بر حسب E_{2x} ۷۲
- شکل ۱۱-۳ جواب معادله‌ی (۲۲-۳) به ازای $f(E_{2x}) = 0$ ۷۲

- شکل ۳-۱۲ پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب غلظت آلومینیوم در $L=100A^\circ$ برای
 ۷۵.....حالت برانگیخته.....
- شکل ۳-۱۳ پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب ارتفاع استوانه در $\rho_0 = 10A^\circ$ برای حالت پایه.....
 ۸۰.....
- شکل ۳-۱۴ پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب شعاع استوانه در $L=100A^\circ$ برای حالت پایه.....
 ۸۲.....
- شکل ۳-۱۵ پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب ارتفاع استوانه در $\rho_0 = 10A^\circ$ برای حالت برانگیخته.....
 ۸۵.....
- شکل ۳-۱۶ پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب شعاع استوانه در $L=100A^\circ$ برای حالت برانگیخته.....
 ۸۸.....
- شکل ۳-۱۷ تغییرات انرژی بر حسب میدان مغناطیسی برای یک نقطه کوانتومی همسانگرد.....
 ۹۲.....
- شکل ۴-۱ ترازهای انرژی الکترون در یک حلقه کوانتومی ناهمسانگرد بر حسب تابعی از میدان
 مغناطیسی برای $\theta = 0^\circ$ به ازای $\omega_y = 2$
 ۹۹.....
- شکل ۴-۲ ترازهای انرژی الکترون در یک حلقه کوانتومی ناهمسانگرد بر حسب تابعی از میدان
 مغناطیسی برای $\theta = 0^\circ$ به ازای $\omega_y = 4$
 ۱۰۰.....
- شکل ۴-۳ ترازهای انرژی الکترون در یک حلقه کوانتومی ناهمسانگرد بر حسب تابعی از میدان
 مغناطیسی برای $\theta = 45^\circ$ به ازای $\omega_y = 2$
 ۱۰۲.....
- شکل ۴-۴ ترازهای انرژی الکترون در یک حلقه کوانتومی ناهمسانگرد بر حسب تابعی از میدان
 مغناطیسی برای $\theta = 45^\circ$ به ازای $\omega_y = 4$
 ۱۰۳.....
- شکل ۴-۵ ترازهای انرژی الکترون در یک حلقه کوانتومی ناهمسانگرد بر حسب تابعی از میدان
 مغناطیسی برای $\theta = 90^\circ$ به ازای $\omega_y = 2$
 ۱۰۴.....
- شکل ۴-۶ ترازهای انرژی الکترون در یک حلقه کوانتومی ناهمسانگرد بر حسب تابعی از میدان
 مغناطیسی برای $\theta = 90^\circ$ به ازای $\omega_y = 4$
 ۱۰۵.....
- شکل ۴-۷ ترازهای انرژی الکترون در یک حلقه کوانتومی بر حسب تابعی از جهت میدان مغناطیسی θ
 ۱۰۷.....

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱ انرژی گاف نواری..... ۵
- جدول ۱-۳ پذیرفتاری مغناطیسی در حالت پایه برای $x = 0.20$ ۶۰
- جدول ۲-۳ پذیرفتاری مغناطیسی در حالت پایه برای $L = 100 A^\circ$ ۶۴
- جدول ۳-۳ پذیرفتاری مغناطیسی در حالت برانگیخته برای $x = 0.20$ ۷۰
- جدول ۴-۳ پذیرفتاری مغناطیسی در حالت برانگیخته برای $L = 100 A^\circ$ ۷۵
- جدول ۵-۳ پذیرفتاری مغناطیسی در حالت پایه برای $\rho_0 = 10 A^\circ$ ۷۹
- جدول ۶-۳ پذیرفتاری مغناطیسی در حالت پایه برای $L = 100 A^\circ$ ۸۲
- جدول ۷-۳ پذیرفتاری مغناطیسی در حالت برانگیخته برای $\rho_0 = 10 A^\circ$ ۸۴
- جدول ۸-۳ پذیرفتاری مغناطیسی در حالت برانگیخته برای $L = 100 A^\circ$ ۸۷
- جدول ۱-۴ مقایسه‌ی اختلاف انرژی در میدان‌های مغناطیسی متفاوت با جهت‌های گوناگون..... ۱۰۶

فصل اول

نانوساختارهای نیمرسانا

۱-۱ مقدمه

همانگونه که می‌دانیم مطالعه خواص الکترونی و اپتیکی در نانوساختارهای نیمرسانا از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و توجه بسیاری از محققان را در چندین سال گذشته به خود جلب کرده است [۱-۳]. یک قسمت مهم از نانوساختارهای نیمرسانا به مطالعه‌ی نقطه کوانتومی اختصاص دارد و تا کنون مطالعات بسیاری بر روی خواص اپتیکی و الکترونی نقاط کوانتومی انجام شده است. نقاط کوانتومی یک دسته‌ی خاص از نیمرساناها با ابعادی بسیار کوچک می‌باشند که به همین دلیل رفتار آن‌ها با نیمرساناهای معمولی (کپه‌ای) متفاوت است. یکی از خصوصیات اپتیکی جالب در نقاط کوانتومی، مطالعه‌ی ضریب جذب و فرکانس جذب آستانه می‌باشد. از خصوصیات الکترونی مهم نیز می‌توان به پذیرفتاری مغناطیسی اشاره کرد. در این فصل قصد داریم تا ابتدا نیمرساناها را مورد مطالعه قرار دهیم. سپس به تعریف نانوساختارها بپردازیم و با توجه به آن‌ها خواص نقاط کوانتومی را بیان کنیم.

۲-۱ بلورهای نیمرسانا

برخی از عناصر جدول تناوبی مانند سیلیسیم و ژرمانیوم از خود خواص نیمرسانایی نشان می‌دهند. نیمرساناها رساناهای الکترونی هستند که عموماً مقاومت ویژه‌ی آن‌ها در دمای اتاق در هر سانتیمتر بین 10^{-2} تا 10^9 اهم است. این در حالی است که در دمای اتاق، مقاومت ویژه‌ی عایق‌ها در هر سانتیمتر بین 10^{14} تا 10^{22} اهم و مقاومت ویژه‌ی رساناهای خوب در هر سانتیمتر چیزی در حدود 10^{-6} اهم می‌باشد. بلورهای نیمرسانا از ترکیب برخی عناصر جدول تناوبی با هم نیز به وجود می‌آیند. از ترکیب عناصر سه‌ظرفیتی گروه III با عناصر پنج‌ظرفیتی گروه V جدول تناوبی، نیمرساناهایی موسوم به ترکیبات III-V (سه-پنج) ساخته می‌شوند. ترکیباتی مانند ایندیوم‌انتیمونید و گالیوم‌ارسنید از این دسته هستند. هرگاه عناصر دو‌ظرفیتی گروه II با عناصر شش‌ظرفیتی گروه VI ترکیب شوند، نیمرساناهایی موسوم به ترکیبات II-VI (دو-شش) به وجود می‌آیند. ترکیباتی مانند روی‌سولفید و کادیوم‌سولفید از این دسته هستند. و در نهایت ترکیب عناصر چهارظرفیتی گروه IV با عناصر شش‌ظرفیتی گروه VI، نیمرساناهایی موسوم به ترکیبات IV-VI (چهار-شش) را می‌سازد. البته در این بین، ترکیباتی از جمله سیلیسیم‌کربید (SiC) نیز یافت می‌شود که یک ترکیب IV-IV است [۴].

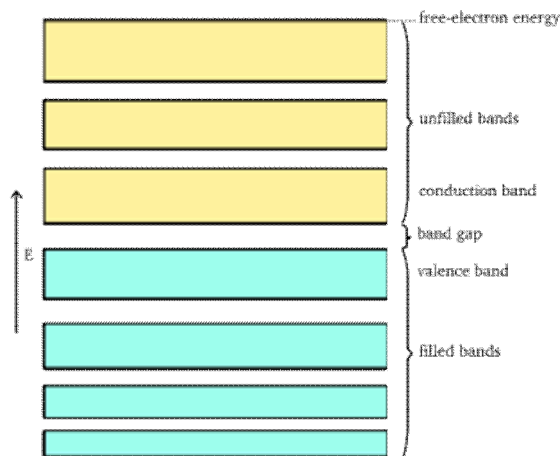
	III A	IV A	V A	VI A
	5 B Boro	6 C Carbonio	7 N Azoto	8 O Ossigeno
	13 Al Alluminio	14 Si Silicio	15 P Fosforo	16 S Zolfo
IIB	30 Zn Zinco	31 Ga Gallio	32 Ge Germanio	33 As Arsenico
	48 Cd Cadmio	49 In Indio	50 Sn Stagno	51 Sb Antimonio
	80 Hg Mercurio	81 Tl Titanio	82 Pb Piombo	83 Bi Bismuto
				84 Po Polonio

شکل ۱-۱ جدول بلورهای نیمرسانا

با توجه به مقاومت ویژه عناصر، میزان رسانندگی آنها یا به عبارتی تراکم حامل‌های بار در آنها نیز متفاوت است. نیمرساناها از نظر تراکم حامل‌های بار در بین رساناها و عایق‌ها جای می‌گیرند. در صفر مطلق، بلور کامل و خالص اغلب نیمرساناها عایق است. ولی این ویژگی‌های نیمرسانایی در اثر برخی عوامل از جمله برانگیختگی گرمایی، اعمال ولتاژ، جذب فوتون، ناخالصی‌ها، نواقص شبکه و یا انحراف از ترکیبات شیمیایی به وضوح آشکار می‌شوند. در ادامه، ساختار نواری نیمرساناها را مطالعه می‌کنیم و به توضیح گاف نواری می‌پردازیم.

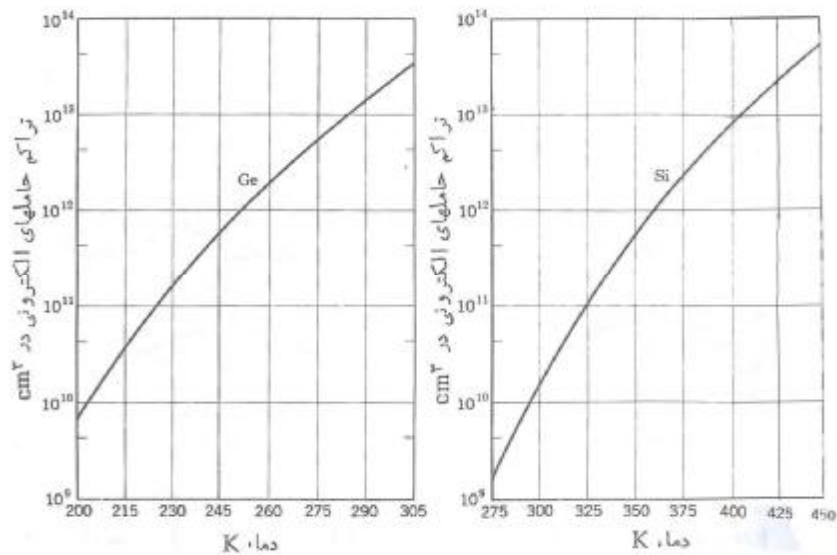
الف) ساختار نواری

در نیمرساناها، نوارهای پر شده توسط الکترون‌ها را نوارهای ظرفیت و نوارهای خالی از الکترون را نوارهای رسانش می‌نامند. نوارهای ظرفیت و رسانش، با فاصله‌ای از هم جدا شده‌اند که این فاصله‌ی خالی بین ترازهای رسانش و ظرفیت را گاف نواری یا نوار ممنوع می‌نامند. به عبارت دقیق‌تر، اختلاف انرژی بین پایین‌ترین نقطه‌ی نوار رسانش و بالاترین نقطه‌ی نوار ظرفیت را گاف نواری می‌گویند. پایین‌ترین نقطه‌ی نوار رسانش را لبه‌ی نوار رسانش و بالاترین نقطه‌ی نوار ظرفیت را لبه‌ی نوار ظرفیت می‌نامند.



شکل ۱-۲ ساختار نواری در نیمرساناها

عواملی مانند برانگیختگی گرمایی و جذب فوتون که قبلاً گفتیم، باعث ایجاد مشخصه‌های نیمرسانایی می‌شوند. با افزایش دما، الکترون‌ها انرژی بیشتری پیدا می‌کنند و اگر این افزایش دمایی به اندازه‌ای باشد که انرژی مورد نیاز الکترون‌ها را برای گذار از گاف نواری فراهم کند، آنگاه الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش برانگیخته می‌شوند. هم الکترون‌های نوار رسانش و هم اربیتال‌های خالی به جای مانده در نوار ظرفیت، در رسانندگی شرکت می‌کنند. در ادامه نمودار تراکم الکترونی برای سیلیسیم و ژرمانیوم رسم شده است.



شکل ۱-۳ تراکم حامل‌های بار بر حسب دما برای سیلیسیم و ژرمانیوم

همانطور که از شکل بالا دیده می‌شود، افزایش دما سبب بیشتر شدن تراکم حامل‌های بار شده و الکترون‌های بیشتری از نوار ظرفیت به نوار رسانش برانگیخته می‌شوند. لازم به ذکر است که در شرایط عادی، تراکم الکترون‌ها و اربیتال‌های خالی با هم برابر است. به ازای یک دمای مشخص، تراکم حامل‌های بار در ژرمانیوم بیشتر از سیلیسیم است. به دلیل اینکه گاف نواری در ژرمانیوم از گاف نواری در سیلیسیم باریک‌تر است، بنابراین الکترون‌ها برای گذار از نوار ظرفیت به نوار رسانش به انرژی کمتری نیاز دارند. در زیر انرژی گاف نواری برای برخی از بلورها نوشته شده است.

E_g (eV) 300°K	E_g (eV) 0°K	گاف	بلور	E_g (eV) 300°K	E_g (eV) 0°K	گاف	بلور
۱/۵۲	۱/۶۵	i	AlSb	۱/۱۴	۱/۱۷	i	Si
۰/۲۷	۰/۱۶۵	d	PbSe	۰/۶۷	۰/۷۴۴	i	Ge
۲/۴۲	۲/۵۸۲	d	CdS	۰/۱۸	۰/۲۴	d	InSb
۱/۷۴	۱/۸۴۰	d	CdSe	۰/۳۵	۰/۴۳	d	InAs
۳/۶	۳/۹۱	d	ZnS	۲/۳۶	۲/۳۲	i	GaP
۰/۱۸	۰/۳	d	SnTe	۱/۴۳	۱/۵۲	d	GaAs

جدول ۱-۱ انرژی گاف نواری (گاف مستقیم = d ؛ غیر مستقیم = i)

راه دیگری که باعث ایجاد مشخصه‌های نیم‌رسانایی می‌شود، جذب فوتون است. در این روش الکترون می‌تواند انرژی مورد نیاز خود برای گذار به نوار رسانش را از طریق جذب انرژی فوتون تأیید شده، به دست آورد. اگر انرژی فوتون فرودی برای عبور الکترون از گاف نواری کافی باشد، الکترون می‌تواند به نوار رسانش برانگیخته شود.

ب) گاف نواری

الکترون پس از تحریک توسط یکی از روش‌های گفته شده، به دو طریق می‌تواند از گاف نواری عبور کند و به نوار رسانش برود.

۱- جذب مستقیم (گاف مستقیم)

۲- جذب غیرمستقیم (گاف غیرمستقیم)

در جذب مستقیم، الکترون انرژی لازم برای عبور از گاف نواری را توسط فوتون جذب شده دریافت می‌کند و به دلیل اینکه پایین‌ترین نقطه‌ی نوار رسانش و بالاترین نقطه‌ی نوار ظرفیت به ازای یک مقدار بردار موج رخ می‌دهد، یعنی اینکه نوار الکترون و ارییتال خالی (حفره) دارای بردار موج یکسان هستند و با یکدیگر اختلافی ندارند، الکترون به صورت مستقیم به نوار رسانش می‌رود. اولین الکترون‌های برانگیخته شده، الکترون‌هایی هستند که در لبه‌ی نوار ظرفیت قرار گرفته‌اند و برای برانگیخته شدن آن‌ها تنها باید به انرژی گاف نواری غلبه کرد. الکترون‌های بعدی برای برانگیختگی و گذار به نوار رسانش، به انرژی بیشتری نیاز دارند.

در جذب غیرمستقیم، انرژی که الکترون توسط فوتون جذب شده کسب می‌کند، برای گذار مستقیم الکترون از گاف نواری و رسیدن به نوار رسانش کافی نیست. این مطلب بدین سبب است که ساختار نواری مربوط به الکترون‌ها و حفره‌ها به اندازه‌ی یک بردار موج قابل ملاحظه از یکدیگر فاصله دارند. در این حالت، الکترون پس از اینکه انرژی فوتون فرودی را جذب می‌کند نمی‌تواند به نوار رسانش برسد. این مطلب بدین سبب است که لبه‌ی نوار رسانش و لبه‌ی نوار ظرفیت هم راستا نیستند و دارای بردار موج متفاوت می‌باشند. بنابراین برای گذار الکترون به نوار رسانش به یک فوتون نیز نیازمندیم [۴].

۱-۳ فناوری نانو

فناوری نانو واژه‌ای است کلی که تمام فناوری‌هایی که در مقیاس نانو انجام می‌شود را در بر می‌گیرد. معمولاً منظور از مقیاس نانو ابعادی در حدود یک نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد (یک نانومتر یک میلیاردیم متر است). ریچارد فاینمن^۱ در سال ۱۹۵۹ طی یک سخنرانی با عنوان «فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد»، ایده‌ی فناوری نانو را مطرح ساخت. وی این نظریه را ارائه داد که در آینده‌ی نزدیک می‌توانیم مولکول‌ها و اتم‌ها را به صورت مستقیم دستکاری کنیم. البته در آن سال‌ها فناوری نانو را به این نام نمی‌شناختند. اولین بار در سال ۱۹۷۴ واژه‌ی فناوری نانو توسط نوریوتاینگوچی استاد دانشگاه علوم توکیو مطرح شد. وی این واژه را به تمام موادی که ابعاد آن‌ها در حد نانومتر باشد، اطلاق کرد. در سال ۱۹۸۶ این واژه توسط کی اریک درکسلر در کتابی تحت عنوان «موتور آفرینش: آغاز دوران فناوری نانو» مجدد تعریف شد [۵]. در ادامه‌ی بحث، به بررسی عناصر پایه در فناوری نانو و نانوذرات می‌پردازیم.

۱. Richard Feynman

الف) عناصر پایه در فناوری نانو

تفاوت اصلی فناوری نانو با فناوری‌های دیگر در مقیاس مواد و ساختارهایی است که در این فناوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. وقتی مواد در ابعادی به این کوچکی قرار می‌گیرند، خصوصیات ذاتی آنها از جمله رنگ، استحکام، مقاومت خوردگی و ... تغییر می‌یابد. تفاوت عمده‌ی مواد نانومقیاس با مواد دیگر وجود عناصر پایه در آنها است. عناصر پایه در حقیقت همان عناصر نانومقیاسی هستند که خواص آنها در حالت نانومقیاس با خواصشان در مقیاس بزرگتر فرق می‌کند.

اولین عنصر پایه، نانوذره است که ذراتی با ابعاد نانومتری می‌باشند و از مواد مختلفی تشکیل می‌شوند. مانند نانوذرات فلزی، سرامیکی و ...

دومین عنصر پایه، نانوکپسول است. نانوکپسول‌ها، کپسول‌هایی هستند که قطر نانومتری دارند و می‌توان مواد مورد نظر را درون آنها قرار داد و کپسوله کرد. مولکول‌هایی موسوم به فسفولیپیدها که یک سر آنها آبگریز و سر دیگر آنها آبدوست است، وقتی در محیط آبی قرار می‌گیرند، خود به خود کپسول‌هایی را تشکیل می‌دهند که قسمت‌های آبگریز مولکول در درون آنها واقع می‌شود و از تماس با آب محافظت می‌شود.

سومین عنصر پایه نانولوله است. نانولوله‌های کربنی اولین بار در سال ۱۹۹۱ کشف شدند که در حقیقت لوله‌هایی از گرافیت می‌باشند. این نانولوله‌ها دارای شکل‌ها و اندازه‌های مختلفی هستند و می‌توانند تک دیواره یا چند دیواره باشند [۶].

ب) نانوذرات

نانوذرات، ذراتی هستند که ابعاد آنها در حدود ۱ تا ۱۰۰ نانومتر می‌باشد. نانوذرات علاوه بر نوع فلزی، عایق و نیمه‌هادی، ترکیباتی نظیر ساختارهای هسته‌لایه^۲ را نیز در بر می‌گیرند. همچنین نانوکره‌ها، نانومیله‌ها و ... اشکالی از نانو ذرات به حساب می‌آیند. به علت کاربردهای فراوان از جمله کاربردهای بیودارویی، نانوذرات رایج‌ترین عناصر در فناوری نانو می‌باشند. از جمله کاربردهای نانوذرات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۷].

۱- مواد کامپوزیت

۲- کاتالیزور

۲. Core Shell

۳- افزودنی‌های سوخت و مواد منفجره

۴- پزشکی و داروسازی

۵- کامپوزیت‌های ساختاری

۶- ساینده‌ها

۷- بسته‌بندی

۸- روکش‌ها

۹- کاربرد نانوذرات در باتری‌ها و پیل‌های سوختی

۱۰- محافظت‌کننده‌ها

از متداول‌ترین نانوذرات می‌توان به نانو ذرات نیمه‌هادی (نقاط کوانتومی) اشاره کرد که در بخش بعدی به معرفی آن‌ها می‌پردازیم.

۱-۴ نقطه کوانتومی^۲

در چندین سال گذشته، تکنولوژی‌های پیشرفته در رشد نانو ساختارها، سبب تولید سیستمی صفر بعدی به نام نقطه کوانتومی شد که الکترون‌ها را در تمامی جهات محدود می‌کرد [۵]. نقاط کوانتومی یک دسته خاص از نیمرساناها با ابعادی بسیار کوچک می‌باشند. اغلب نقاط کوانتومی دارای پهنایی در حدود ۲ تا ۱۰ نانومتر یا حتی کمتر هستند به همین دلیل رفتار آن‌ها با نیمرساناهای معمولی متفاوت است. ویژگی جالب این سیستم‌ها، توانایی آن‌ها در کوانتیزه کردن طیف انرژی حامل‌های بار می‌باشد. امروزه مطالعه‌ی خواص اپتیکی نقاط کوانتومی اهمیت بسزایی در ساخت ابزارهای اپتوالکترونی دارد. تا کنون مطالعات بسیاری بر روی خواص اپتیکی نقاط کوانتومی انجام شده است. به عنوان مثال، ویژگی‌های اپتیکی نقاط کوانتومی اولین بار توسط افروس^۴ و همکارانش مورد مطالعه قرار گرفت. آن‌ها توانستند جذب خطی نور را در یک نقطه کوانتومی کروی با دیواره‌های نامحدود به طور نظری مورد بررسی قرار دهند [۸]. وانگ^۵ و همکارانش تغییرات ضریب شکست در یک چاه کوانتومی نیمه سهموی را به طور نظری مورد بررسی قرار دادند [۹].

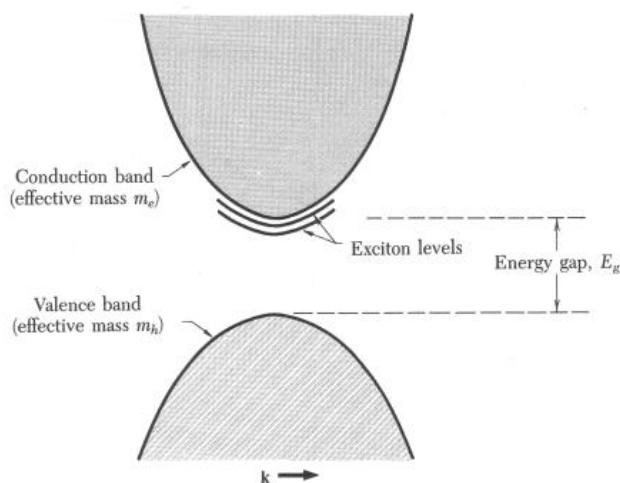
۳. Quantum Dot

۴. Efros

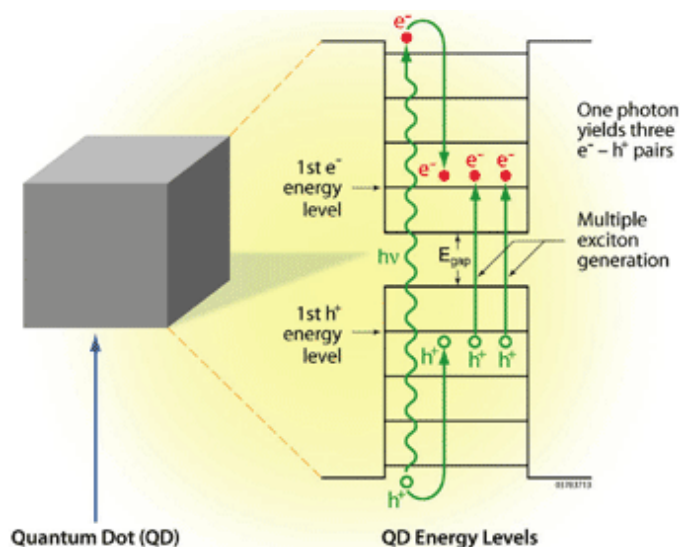
۵. Wang

۱-۴-۱ کوانتیزه کردن طیف انرژی حامل‌های بار

الکترون‌ها در مواد نیم‌رسانا که ابعادی خیلی بزرگتر از نقاط کوانتومی دارند، دارای یک طیف پیوسته انرژی می‌باشند. در این حجم، ترازهای انرژی خیلی به هم نزدیک هستند، آنقدر نزدیک که به صورت پیوسته توصیف می‌شوند و گویی که هیچ تفاوت انرژی بین آن‌ها نیست. ولی در نقاط کوانتومی به دلیل اینکه ابعاد نیم‌رسانا خیلی کوچک می‌شود، ترازهای انرژی دیگر به آن فاصله نیستند و فاصله‌ی زیادی بین آن‌ها وجود ندارد، بنابراین نمی‌توان آن‌ها را به صورت پیوسته بررسی کرد. ترازهای انرژی در نقاط کوانتومی به صورت مجزا قرار گرفته‌اند. به همین دلیل الکترون‌هایی که در این ترازها جای می‌گیرند نیز دارای انرژی مشخصی هستند، که این مطلب همان توانایی نقاط کوانتومی در کوانتیزه کردن طیف انرژی حامل‌های بار می‌باشد [۵].



شکل ۱-۴ پیوستگی ترازهای انرژی در نیم‌رساناهای معمولی



شکل ۱-۵ گسستگی ترازهای انرژی در نقطه کوانتومی

۱-۴-۲ محدودیت کوانتومی^۶

به میانگین فاصله جدایی بین الکترون و حفره، شعاع بور جفت الکترون-حفره گفته می‌شود. ابعاد نیمرساناهای معمولی خیلی بزرگتر از شعاع بور جفت الکترون-حفره است و جفت الکترون-حفره آزادی بیشتری دارد. ولی وقتی ابعاد نیمرسانا کوچک شود یعنی تقریباً به اندازه‌ی شعاع بور جفت الکترون-حفره شود، جفت الکترون-حفره در هر سه بعد محدود می‌گردد. این ویژگی محدود شدن جفت الکترون-حفره در هر سه بعد، یک محدودیت کوانتومی است و تحت این شرایط است که نیمرساناها در این حجم را نقطه کوانتومی می‌نامند. اگر جفت الکترون-حفره در دو بعد محدود شود و در یک بعد آزادانه بتواند انتشار یابد، آنگاه سیم کوانتومی خواهیم داشت و اگر در یک بعد محدود و در دو بعد آزادانه انتشار یابد چاه کوانتومی داریم [۵].

۱-۵ ابعاد نقطه کوانتومی و اندازه‌ی گاف نواری

هر چه ابعاد نیمرسانا کوچکتر شود گاف نواری بزرگتر می‌شود، پس گاف نواری در نقاط کوانتومی خیلی بزرگتر از نیمرساناهای معمولی است. به همین دلیل فرکانس تابش الکترومغناطیسی گسیل شده نیز خیلی بزرگتر است. با تغییر ابعاد نقطه کوانتومی، اندازه‌ی گاف نواری تغییر می‌کند و می‌توانیم انرژی گاف نواری را کنترل کنیم [۶]. به دلیل اینکه فرکانس تابش گسیل شده مستقیماً به انرژی گاف نواری بستگی دارد، می‌توانیم با توجه به نیاز با تغییر کوچکی در ابعاد نقطه کوانتومی، تابش‌هایی با

۶. Quantum Confinement

فرکانس متفاوت و دلخواه ایجاد کنیم. کاری که در نیمرساناهای معمولی فقط با تغییر ساختار بلوری و ترکیبات نیمرسانا امکان پذیر است.

۱-۶ کاربرد نقاط کوانتومی

از کاربردهای نقاط کوانتومی به موارد زیر می‌توان اشاره کرد [۶].

۱- سلول‌های خورشیدی

۲- ترانزیستورها

۳- لامپ مهتابی

۴- دیودهای نوری مثل LED^۷

۵- لیزرهای دارای طول موج‌های بسیار دقیق

۶- کامپیوترهای کوانتومی

نقاط کوانتومی در سلول‌های خورشیدی اهمیت زیادی دارند. به طور مثال سیلیکون یکی از مواد مهم در سلول‌های خورشیدی به شمار می‌رود. سیلیکون دارای گاف غیرمستقیم است و به همین دلیل نور را به خوبی جذب نمی‌کند. اما با این وجود، سلول‌های خورشیدی ساخته شده از سیلیکون، ضخامتی‌هایی در حدود ۱۰۰ میکرون دارند که به جذب فوتون کمک می‌کنند. علت این است که وقتی سیلیکون را با ابعاد بزرگ می‌سازند، گاف نواری آن کوچکتر می‌شود و نور را بهتر جذب می‌کند. سلول‌های خورشیدی که به صورت فیلم‌های نازک از ترکیبی مثل CdTe ساخته می‌شوند، ضخامتی بسیار کم (حتی کمتر از ۱ میکرون) دارند، اما با این وجود به علت اینکه CdTe دارای گاف مستقیم است، این سلول‌های خورشیدی در یک ناحیه‌ی باریک نور را به خوبی جذب می‌کنند. در ساخت سلول‌های خورشیدی، عاملی که از جذب نور مهم‌تر می‌باشد، این است که سلول خورشیدی ساخته شده بتواند نور جذب شده را به خوبی در خود نگه دارد. به این دلیل که در سطح سلول خورشیدی دما بسیار زیاد است، بنابراین سلول ساخته شده با هر اندازه گاف نواری، به راحتی می‌تواند جذب را انجام دهد. حال هر چه گاف نواری بزرگ یا غیرمستقیم باشد، نور جذب شده کمتر گسیل می‌شود. البته نقاط کوانتومی در بسیاری از زمینه‌های پژوهشی و علمی دیگر نیز کاربرد دارند.

۷. Light Emitting Diode