دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده علوم، گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته فوتونیک گرایش فیزیک

بهینه سازی بهره در لیزرهای چاه کوانتومی

نگارش:

ناصر زمانی

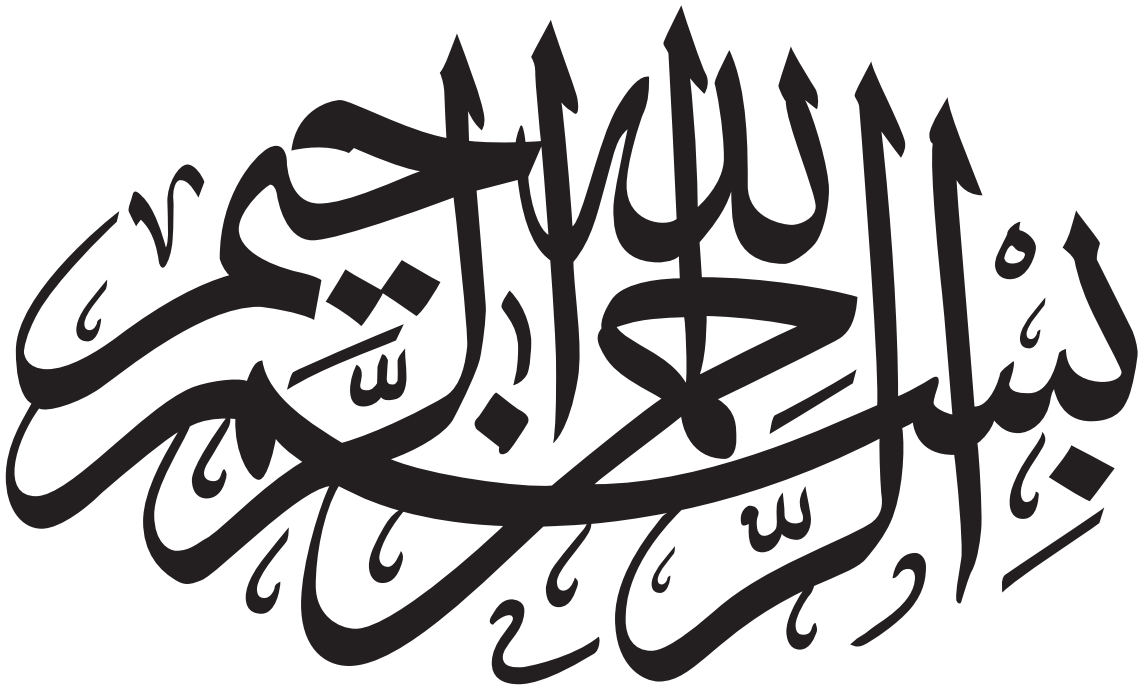
استاد راهنما:

دکتر علیرضا کشاورز

استاد مشاور:

دکتر فرزین امامی

بهمن ۱۳۹۱


بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

خدایی که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را،

معرفت را، عشق را

و به کسانی که عشق را در وجودم دمیدند:

پدری به استواری کوه

مادری به زلالی چشمه

و

...

سپاسگزاری

به مصداق حدیث شریفه "من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق" بسی شایسته است از استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر علیرضا کشاورز که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی‌های کار ساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم. اینجانب در مدت آشنایی با ایشان علاوه بر آموزه‌های بسیار زیاد علمی، روش جدیدی از تفکر خلاقانه همراه با اعتماد به نفس و جسارت علمی را فرا گرفتم. همچنین از جناب دکتر امامی که با راهنمایی‌ها و تشویق‌های دلسوزانه خود، راه را برای اجرا و انجام این پایان‌نامه فراهم نمودند، تقدیر و تشکر می‌نمایم.

(و یزکیهم و یعلمهم الکتاب و الحکمه).

معلما مقامت ز عرش برتر باد همیشه توسن اندیشه ات مظفر باد

به نکته های دلاویز و گفته های بلند صحیفه های سخن از تو علم پرور باد

همچنین از پدر و مادر عزیز، برادران و خواهران دلسوز و مهربانم که آرامش روحی و آسایش فکری فراهم نمودند تا با حمایت‌های همه جانبه در محیطی مطلوب، مراتب تحصیلی و نیز پایان نامه درسی را به نحو احسن به اتمام برسانم؛ سپاسگزاری می‌نمایم.

شکر خدا که هر چه طلب کردم از خدا بر منتهای همت خود کامران شدم

در پایان و نه کمتر از آغاز، تشکر می‌کنم از همه اساتید و دوستانی که از همراهی و یاری‌شان بهره‌مند شدم...

چکیده

بهینه سازی بهره در لیزرهای چاه کوانتومی

نگارش:

ناصر زمانی

یکی از کمیت‌های مهم نمایانگر تأثیر فرآیند بازترکیب الکترون - حفره بر شدت نور تابیده شده در ناحیه‌ی فعال لیزر، بهره است. ضریب بهره نوری برابر است با کسری از فوتون‌های تابش شده در ناحیه‌ی فعال به ازای واحد طول. بهره در لیزرهای چاه کوانتومی را به کمک قانون طلایی فرمی بدست می‌آید. با توجه به اینکه طیف بهره به شدت تحت تأثیر شکل هندسی چاه و عوامل خارجی همچون دما، فشار و اعمال میدان الکتریکی می‌باشد، در این تحقیق قصد داریم اثر همزمان دو یا چند پارامتر را بر بهره نوری بررسی نماییم و با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی یک ساختار از چاه‌های کوانتومی دوگانه را معرفی نماییم که در آن ضریب بهره نوری بهینه باشد. نتایج نشان می‌دهد که ضریب بهره نوری برای چگالی حامل $۵ \times ۱۰^{۱۸} cm^{-۳}$ برای ساختار بهینه برابر با $۳۵۵۰\ cm^{-۱}$ می‌باشد.

با توجه به این‌که عامل حبس‌شدگی در چاه‌های کوانتومی برجسته‌تر از نیمرساناهای حجمی می‌باشد. این ساختارها به عنوان یک کاندید خوب برای دستگاه‌های اپتوالکترونیکی محسوب می‌شود. بنابراین مطالعه خواص نوری و الکترونیکی این ساختارها بسیار مهم می‌باشند. با توجه به این‌که خواص نوری نیز همانند ضریب بهره نوری تحت تأثیر شکل هندسی چاه می‌باشد. در این تحقیق علاوه بر ضریب بهره نوری، ضریب جذب نوری را با استفاده از الگوریتم انبوه ذرات بهینه می‌نماییم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱: مقدمه **۱**

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ تاریخچه فناوری نانو ۲

۱-۳ اهمیت نانو فناوری ۴

۱-۴ کاربردهای نانو فناوری ۴

۱-۴-۱ نانو فناوری و صنعت الکترونیک ۵

۱-۵ مواد نیمرسانا ۵

۱-۶ خصوصیات بنیادی نیمرساناها ۶

۱-۶-۱ نوار انرژی وغلظت حامل‌ها ۶

۱-۶-۲ نیمرسانای ذاتی ۶

۱-۶-۳ نیمرسانای غیر ذاتی ۷

۱-۷ جذب نوری و باز ترکیب در نیمرساناها ۷

۱-۷-۱ جذب نوری ۷

۱-۷-۲ باز ترکیب در نیمرساناها ۸

۱-۷-۳ انواع اتصال نیمرساناها ۸

۱-۷-۴ چاه‌های کوانتومی ۹

۱-۷-۵ سیم‌های کوانتومی ۱۰
۱-۷-۶ نقاط کوانتومی ۱۰
۱-۸ لیزرهای چاه کوانتومی ۱۱

فصل ۲: روش‌های حل معادله‌ی شرودینگر و مطالعه خواص اپتیکی ۱۴
۲-۱ مقدمه ۱۵
۲-۲ حل تحلیلی معادله شرودینگر ۱۵
۲-۲-۱ پتانسیل چاه مربعی نامتناهی ۱۶
۲-۲-۲ چاه پتانسیل مربعی محدود و متقارن ۱۸
۲-۳ روش‌های حل عددی معادله شرودینگر ۲۲
۲-۳-۱ الگوریتم نومروف ۲۳
۲-۳-۲ روش تیراندازی ۲۵
۲-۴ خواص اپتیکی ۳۱
۲-۵ ضریب جذب و تغییرات ضریب شکست ۳۴
۲-۶ محاسبه خواص اپتیکی با جرم الکترون متغیر ۳۶
۲-۶-۱ روش تبدیل نقطه کانونی ۳۷
۲-۷ نتیجه گیری ۴۶

فصل ۳: الگوریتم‌های بهینه‌سازی ۴۷
۳-۱ مقدمه ۴۸
۳-۲ شرح مسئله بهینه‌سازی ۴۸
۳-۳ بردار طراحی ۴۹
۳-۴ سطح قید ۴۹
۳-۵ تابع هدف ۴۹
۳-۶ روش‌های بهینه‌سازی دقیق ۵۰
۳-۷ روش‌های غیر دقیق بهینه‌سازی دقیق ۵۰
۳-۸ روش‌های ابتکاری بر مبنای فرآیندهای طبیعی ۵۰
۳-۹ الگوریتم گروه ذرات ۵۱

فصل ۴: لیزرهای چاه کوانتومی **۵۶**

۴-۱ تاریخچه ۵۷

۴-۲ نیمرسانای حجمی ۵۸

۴-۲-۱ حالت‌های الکترونی ۵۸

۴-۲-۲ چگالی حالت ۵۹

۴-۲-۳ جمعیت باند هدایت ۶۳

۴-۲-۴ جمعیت باند هدایت برای نیمرسانای حجمی ۶۳

۴-۲-۵ چاه کوانتومی ۶۷

۴-۲-۶ تراز شبه فرمی ۶۹

۴-۳ لیزر چاه کوانتومی ۷۰

۴-۳-۱ عملکرد مشخصه‌ها ۷۱

۴-۳-۲ جریان آستانه ۷۳

۴-۳-۳ فاکتور حبس‌شدگی ۷۴

۴-۴ بهره در لیزرهای چاه کوانتومی ۷۵

۴-۴-۱ عناصر ماتریس نوری ۷۶

۴-۴-۲ عناصر ماتریس نوری در نیمرسانای حجمی ۷۶

۴-۴-۳ عناصر ماتریس نوری در چاه‌های کوانتومی ۷۷

۴-۴-۴ گذارهای نوری با استفاده از قانون طلایی فرمی ۸۰

۴-۴-۵ هامیلتونی برهم‌کنش بین الکترون و فوتون ۸۱

۴-۴-۶ آهنگ گذار ناشی از برهم‌کنش الکترون و فوتون ۸۳

۴-۴-۷ ضریب جذب نوری ۸۴

۴-۵ جذب بین باندی و بهره در چاه کوانتومی ۸۵

۴-۵-۱ المان‌های ماتریس نوری بین باندی در یک چاه کوانتومی ۸۶

۴-۵-۲ تعیین ترازهای شبه فرمی ۸۸

فصل ۵: بهینه سازی خواص اپتیکی و بهره در لیزرهای چاه کوانتومی با استفاده از روش الگوریتم گروه ذرات **۹۰**

۵-۱ مقدمه ۹۱
۵-۲ ساختار باندی ۹۲
۵-۳ بهره نوری ۹۴
۵-۳-۱ بهره نوری در لیزر چاه کوانتومی با پتانسیل تک‌گانه مستطیلی . . ۹۵
۵-۳-۲ بهره نوری در لیزر چاه کوانتومی با پتانسیل پاشل تلر اصلاح شده ۹۵
۵-۳-۳ بهره نوری در لیزر چاه کوانتومی با پتانسیل دوگانه مستطیلی . . . ۹۸
۵-۳-۴ بهره نوری در لیزر چاه کوانتومی با پتانسیل دوگانه نیمه سهموی . ۹۹
۵-۴ بهینه‌سازی ضریب بهره نوری ۱۰۲
۵-۴-۱ کاربرد الگوریتم گروه ذرات برای ضریب بهره نوری در چاه کوانتومی دوگانه ۱۰۴
۵-۵ بهینه‌سازی ضریب جذب نوری در چاه‌های کوانتومی دوگانه مستطیلی . ۱۰۸
۵-۶ نتیجه گیری ۱۱۳

فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادها **۱۱۴**

مراجع **۱۱۷**

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱: مقادیر ویژه انرژی برای حل تحلیلی و عددی معادله شرودینگر با پتانسیل پاشل تلر اصلاح شده ۳۰

جدول ۴-۱: المان‌های ماتریس اندازه حرکت در مدل سهموی ($|\hat{e}.\mathbf{p}_{cv}|^2 = |\hat{e}.\mathbf{M}|^2$) ۸۰

جدول ۵-۱: نتایج بدست آمده از الگوریتم گروه ذرات ۱۰۵

جدول ۵-۲: نتایج بدست آمده از الگوریتم گروه ذرات ۱۰۷

جدول ۵-۳: نتایج بدست آمده از الگوریتم گروه ذرات برای بهینه‌سازی ضریب جذب نوری ۱۱۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: نوار انرژی نیمرسانا ۶

شکل ۱-۲: مقایسه چگالی حالت‌های کوانتومی برای ساختارهای با ابعاد مختلف . ۱۱

شکل ۲-۱: چاه پتانسیل با ارتفاع دیوار بی‌نهایت ۱۷

شکل ۲-۲: توابع موج متناظر با سه انرژی اول درون چاه بی‌نهایت [۱۰] ۱۸

شکل ۲-۳: چاه پتانسیل با دیواره‌های متناهی [۱۰] ۱۹

شکل ۲-۴: نمودار برای پیدا کردن ویژه مقادیر انرژی [۱۰] ۲۱

شکل ۲-۵: محاسبه انرژی‌ها و توابع با روش عددی [۱۰] ۲۴

شکل ۲-۶: مشتق مرتبه اول یک تابع ۲۵

شکل ۲-۷: چاه پتانسیل پاشل تلر همراه با توابع موج درون آن ۳۱

شکل ۲-۸: تغییرات خطی، غیرخطی و کل ضریب جذب بر حسب انرژی فوتون ورودی ۴۱

شکل ۲-۹: تغییرات خطی، غیرخطی و کل ضریب شکست بر حسب انرژی فوتون ورودی ۴۱

شکل ۲-۱۰: تغییرات کل ضریب جذب بر حسب انرژی فوتون ورودی ۴۱

شکل ۲-۱۱: تغییرات کل ضریب جذب بر حسب انرژی فوتون ورودی ۴۲

شکل ۲-۱۲: مقایسه تغییرات کل ضریب شکست بر حسب انرژی فوتون ورودی برای جرم ثابت و متغیر ۴۲
شکل ۲-۱۳: مقایسه تغییرات کل ضریب جذب بر حسب انرژی فوتون ورودی برای جرم ثابت و متغیر ۴۳
شکل ۲-۱۴: مقایسه تغییرات کل ضریب شکست بر حسب انرژی فوتون ورودی برای جرم ثابت و متغیر ۴۴
شکل ۲-۱۵: مقایسه تغییرات کل ضریب جذب بر حسب انرژی فوتون ورودی برای جرم ثابت و متغیر ۴۵
شکل ۲-۱۶: مقایسه تغییرات کل ضریب شکست بر حسب انرژی فوتون ورودی برای جرم ثابت و متغیر ۴۵
شکل ۲-۱۷: مقایسه تغییرات کل ضریب جذب بر حسب انرژی فوتون ورودی برای جرم ثابت و متغیر ۴۵

شکل ۳-۱: نحوه تغییر مکان در الگوریتم گروه ذرات [۴۰] ۵۲
شکل ۳-۲: اساس کار الگوریتم گروه ذرات [۴۰] ۵۴
شکل ۳-۳: فلوچارت الگوریتم گروه ذرات ۵۵

شکل ۴-۱: اولین زیر باند قسمت رنگی از باند ظرفیت و باند هدایت در چاه کوانتومی [۴۵] ۶۸
شکل ۴-۲: جذب وگسیل الکترون [۴۸] ۸۳
شکل ۴-۳: ترازهای شبه فرمی و غلظت حامل‌ها ۸۹

شکل ۵-۱: ضریب بهره نوری برای سه چگالی حامل مختلف ۹۵
شکل ۵-۲: ضریب بهره نوری برای دماهای مختلف ۹۶
شکل ۵-۳: وابستگی چاه پتانسیل به فشار (خطوط پیوسته) و تابع موج (نقطه چین) ۹۷
شکل ۵-۴: ضریب بهره نوری برای چگالی حاملین مختلف ۹۸
شکل ۵-۵: ضریب بهره نوری برای دماهای مختلف ۹۸
شکل ۵-۶: ضریب بهره نوری برای چاه دوگانه ۹۹
شکل ۵-۷: نمایی از باند هدایت پتانسیل نیمه سهموی ۱۰۰

شکل ۵-۸: ضریب بهره نوری برای سه چگالی حامل مختلف ۱۰۱
شکل ۵-۹: وابستگی ضریب بهره نوری به پهنای مختلف چاه‌ها ۱۰۱
شکل ۵-۱۰: وابستگی ضریب بهره نوری به پهنای مختلف سد ۱۰۱
شکل ۵-۱۱: وابستگی ضریب بهره نوری به دما ۱۰۲
شکل ۵-۱۲: وابستگی ضریب بهره نوری به فشار ۱۰۲
شکل ۵-۱۳: ضریب بهره نوری بر حسب انرژی فرودی برای غلظت‌های متفاوت . ۱۰۳
شکل ۵-۱۴: ساختار بهینه از باند هدایت لیزر چاه کوانتومی دوگانه ۱۰۵
شکل ۵-۱۵: همگرایی الگوریتم برای پیدا نمودن بهینه ضریب بهره نوری ۱۰۵
شکل ۵-۱۶: ضریب بهره نوری برای ساختار بهینه ۱۰۶
شکل ۵-۱۷: وابستگی ضریب بهره نوری به دما ۱۰۶
شکل ۵-۱۸: وابستگی ضریب بهره نوری به فشار ۱۰۶
شکل ۵-۱۹: ساختار بهینه از باند هدایت لیزر چاه کوانتومی سه‌گانه ۱۰۷
شکل ۵-۲۰: ضریب بهره نوری برای ساختار بهینه ۱۰۷
شکل ۵-۲۱: نمایی از شکل چاه پتانسیل دوگانه ۱۰۹
شکل ۵-۲۲: نمودار همگرایی الگوریتم گروه ذرات ۱۱۱
شکل ۵-۲۳: ساختار بهینه از چاه کوانتومی دوگانه با تابع موج اول و دوم آن . . . ۱۱۱
شکل ۵-۲۴: تغییرات ضریب جذب بر حسب انرژی فوتون ۱۱۲
شکل ۵-۲۵: تغییرات ضریب شکست بر حسب انرژی فوتون ۱۱۲

فصل۱

مقدمه

۱-۱ مقدمه

در دهه اخیر، بررسی و تجزیه تحلیل پاسخ اپتیکی سامانه های نیمرسانای محصور شده در ابعاد نانو به عنوان یکی از حوزه‌های مطالعاتی مهم در عرصه پژوهش‌های نظری و تجربی دانش نانواپتیک جایگاه ممتازی را به خود اختصاص داده است. در این میان مطالعات نظری در این زمینه توانسته است شیوه‌ها و ابزارهای پژوهشی توانمندی را برای درک مبانی فیزیکی و طراحی و ساخت سامانه‌هایی همچون نانودیودهای نور افشان، نانو لیزرهای نیمرسانا، کلیدهای اپتیکی، ترانزیستورهای تک الکترونی، حافظه‌های اپتیکی و آشکارسازهای مادون قرمز فراهم آورد. عملکرد چنین سامانه‌هایی مبتنی بر اندرکنش تابش الکترومغناطیسی با حامل‌های بار در یک ساختار نیمرسانای محصور شده شبه دو بعدی موسوم به چاه کوانتومی است که در یک میکروکاواک جای گرفته است. در واقع، محصور شدگی حرکت حامل‌های بار در سامانه‌های بس ذره‌ای مزبور همراه با طبیعت کوانتومی تابش الکترومغناطیسی و جفت‌شدگی قوی حامل‌های بار موجب پدیداری برخی رفتار ها و خواص اپتیکی نظیر ضریب جذب و تغییرات ضریب شکست توجه می‌شود. لذا از این خواص می‌توان در طراحی نسل جدیدی از گسیلنده‌های نور، همچون گسیلنده‌های تک فوتونی و گسیلنده‌های نور غیر کلاسیک، بهره جست. پیش بینی می‌شود که چشمه‌های مزبور در آینده نزدیک تحولات شگرفی را در عرصه‌های متنوعی از فناوری‌های نوین، به ویژه فناوری انتقال اطلاعات و سامانه‌های ارتباطی پدید آورند.

۱-۲ تاریخچه فناوری نانو

فناوری نانو، واژه‌ای است کلی که به تمام فناوری‌های پیشرفته در عرصه کار با مقیاس نانو اطلاق می‌شود. معمولاً منظور از مقیاس نانو، ابعادی در حدود یک تا صد نانومتر می‌باشد (یک نانومتر یک میلیاردم متر می‌باشد). برای سنجش طول پیوندهای کربن- کربن، یا فاصله

میان دو اتم، بازه ۱۲ تا ۱۵ نانومتر بکار می‌رود؛ همچنین طول یک جفت DNA نزدیک به ۲ نانومتر است و از سوی دیگر کوچک‌ترین باکتری‌های سلول‌دار ۲۰۰ نانو متر است.

اولین جرقه فناوری نانو (البته در آن زمان هنوز به این نام شناخته شده نبود) در سال ۱۹۵۹ زده شد. در این سال ریچارد فاینمن$(Richard\,Feynman)$ طی یک سخنرانی با عنوان «فضای زیادی درسطوح پایین وجود دارد» ایده‌ی فناوری نانو را مطرح ساخت. وی در سخنرانی خود به بررسی شاخه‌ای از علم (یعنی اختراع ترانزیستور) که تا آن روز کار اندکی در آن زمینه انجام گرفته بود پرداخت، ولی امیدوار بود که می‌توان کارهای بیشتری در آن زمینه انجام داد. ریچارد فاینمن با اشاره به چگونگی چینش مولکول‌ها و اتم‌ها و فضای پیرامون آن‌ها، چشم انداز های علمی جدیدی را به تصویر کشاند. وی این نظریه را ارائه داد، که در آینده‌ای نزدیک می‌توانیم مولکول‌ها و اتم‌ها را به صورت مستقیم دستکاری کنیم و امکان استفاده از DNA در کامپیوترها و توانایی بالقوه ارگانیزم حیات در ساخت ماشین‌های کوچک که نه فقط برای ذخیره اطلاعات بلکه برای ساختن سخن به میان آورد و برنده جایزه نوبل ۱۹۶۵ شد.

واژه فناوری نانو اولین بار توسط نوریوتاینگوچی$(Norio\,Taniguchi)$ استاد دانشگاه علوم توکیو در سال ۱۹۷۴ بر زبان‌ها جاری شد. او این واژه را برای توصیف ساخت مواد (وسایل) دقیقی که تلورانس ابعادی آن‌ها در حد نانومتر می‌باشد، بکار می‌رود. در سال ۱۹۸۶ این واژه توسط کی اریک درکسر$(ki\,Eric\,Drexler)$ در کتابی تحت عنوان: «موتور آفرینش: آغاز دوران فناوری نانو» بازآفرینی و تعریف مجدد شد. وی این واژه را به شکل عمیق‌تری در رساله دکترای خود مورد بررسی قرار داد و بعدها آن را در کتابی تحت عنوان «نانو سامانه‌های ماشین‌های مولکولی، چگونگی ساخت و محاسبات آن‌ها» توسعه داد. از اهداف مهم فناوری نانو و شاید مهم‌ترین آن‌ها به وجود آوردن ساختارهایی از مواد است که در آنها آرایش مولکول‌ها از پیش طراحی شده باشد. در واقع فناوری نانو، فهم و بکارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم‌هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی، عمدتاً متأثر از غلبه خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک، از خود نشان می‌دهند. نانو فناوری یک دانش به شدت میان رشته‌ای است و به رشته‌هایی چون اپتوالکترونیک، پزشکی، دامپزشکی، زیست شناسی، فیزیک کاربردی، مهندسی مواد، ابزارهای نیمرسانا، مهندسی مکانیک، مهندسی برق و مهندسی شیمی مربوط می‌شود. یکی از رشته هایی که فناوری نانو در آن بسیار کاربرد دارد، اپتوالکترونیک می‌باشد. در بخش‌های بعد علم اپتوالکترونیک، چاه‌ها، سیم‌ها و نقاط کوانتومی

و کاربرد فناوری نانو در آن‌ها، توضیح داده می‌شود. ماده اصلی این نوع ساختارها، نیمرسانا با جنس‌های مختلف می‌باشند که دارای خواص الکترونیکی و اپتیکی خوبی هستند.

۱-۳ اهمیت نانو فناوری

امروزه علم و فناوری در بسیاری از زمینه ها تقریباً به مرز نهایی خود نزدیک می شود و شاید دیگر جوابگوی توقعات روزافزون بشر نباشد. اینجاست که نانوفناوری قابلیت‌های نهفته‌ی خود را یکی پس از دیگری به بشر عرضه نموده و به یکی از مهمترین و جذابترین زمینه‌های تحقیقاتی بشر در سال‌های اخیر تبدیل شده است. شاید به این جهت می‌توان با آن به بسیاری از رویاهای دیرین بشر دست یافت. آیا کسی تصور می کرد که روزی متخصصان نانوفناوری بتوانند ماشین‌های بسیار کوچکی را بسازند که در درون بدن در حال گشت و گذارند و به تعقیب باکتری ها و ویروس های بد و مضر می‌پردازند؟ و می‌توانند مشکلات ما را با کلسترول‌ها و چربی‌ها حل کنند؟ یا ماشین‌های کوچکی که لخته های خونی را می‌شکنند و موجب افزایش متوسط طول عمر می‌شوند؟

۱-۴ کاربردهای نانو فناوری

ماهیت فرا رشته ای علوم و فناوری، موجب تعریف کاربردهای بسیار زیادی در عرصه‌های مختلف علمی و صنعتی می‌گردد. کاربردهای نانوفناوری را از دو جنبه می‌توان بررسی نمود.

یک گروه، کاربردهایی هستند که در نتیجه تلاش‌ها و تحقیقات فراوان محققان و اندیشمندان بصورت گروهی و انفرادی در کشورهای مختلف بوقوع پیوسته و اکنون ما شاهد محصولات آن در حد آزمایشگاهی و بعضاً بصورت انبوه هستیم. گروه دوم کاربردهای بالقوه آن است که دانشمندان، تحقیقات گسترده‌ای را زیر نظر دولت‌ها با سرمایه‌گذاری هنگفت برای دستیابی به آن آغاز کرده‌اند و امیدوارند در آینده‌ای نزدیک بتوانند تصورات دهنی خود را به فعلیت برسانند. در زیر چند نمونه ازمواد نانو فناوری آورده شده است.

۱-۴-۱ نانو فناوری و صنعت الکترونیک

نانو فناوری نقطه همگرایی علوم مختلف در آینده است. در این میان یکی از پرکاربردترین شاخه‌های نانو فناوری ، صنعت الکترونیک می باشد. امروزه افزایش ظرفیت ذخیره داده، افزایش سرعت انتقال آن و کوچک کردن هر چه بیشتر وسایل الکترونیکی و به خصوص ترانزیستورها دارای اهمیت بسیاری است زیرا کوچک‌تر شدن ابعاد وسایل الکترونیکی علاوه بر افزایش سرعت پردازش، توان مصرفی را نیز کاهش می دهد و نانو الکترونیک می‌تواند در رسیدن به ابعاد هرچه کوچک‌تر راهگشا باشد.

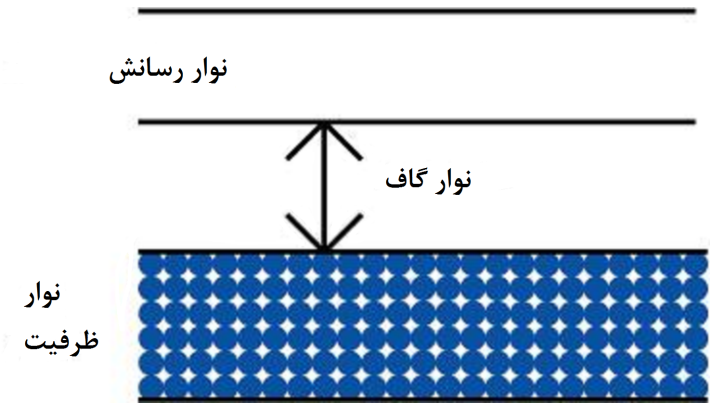
۱-۵ مواد نیمرسانا

مواد جامد به سه دسته: الف) رساناها ب) نیمرساناها ج) نارساناها تقسیم می‌شوند. نارساناها مثل شیشه و کوارتز مذاب دارای رسانندگی خیلی پایین در حدود $۱۰^{-۸} s/cm$ تا $۱۰^{-۱۸} s/cm$می‌باشند و رساناهایی نظیر آلومینیوم و نقره دارای رسانندگی بین رسانا و نارسانا هستند. رسانندگی یک نیمرسانا بطور کلی نسبت به دما، روشنایی، میدان مغناطیسی و مقدار دقیق ناخالص اتم‌ها حساسیت دارد. این حساسیت در رسانندگی، نیمرسانا را به یکی از مهمترین مواد برای کاربردهای الکترونیکی تبدیل می‌کند. مطالعه مواد نیمرسانا در اوایل قرن نوزدهم شروع شد. در این مطالعه و تحقیقات نیمرسانا را به دو دسته الف) نیمرسانای مرکب ب) نیمرسانای عنصری تقسیم کردند، که نیمرسانای عنصری یعنی آنهایی که از نمونه‌های منفرد اتم‌ها تشکیل می‌شوند. برای مثال Si ، ژرمانیوم Ga که در ستون IV قرار دارند. ولی نیمرسانای مرکب از دو یا تعداد بیشتری عنصر تشکیل شده است. برای مثال، گالیوم آرسنایدِ $GaAs$ یک ترکیب $\mathrm{III}-\mathrm{V}$ می‌باشند که ترکیبی از گالیوم ستون III و آرسنیک از ستون V می‌باشد. یکی از مهمترین مشخصات نیمرساناها که آنها را از فلزات و عایق ها متمایز می‌کند، گاف انرژی (E_g) است. این ویژگی تعیین کننده طول موجهایی از نور است که توسط نیمرسانا جذب یا گسیل می‌شوند. همانطور که می‌دانیم رساناها موادی هستند که جریان الکتریکی را در هر دمایی از خود عبور می‌دهند و در دمایی ثابت از قانون اهم پیروی می‌کنند و مقاومت الکتریکی این مواد با افزایش دما افزایش می‌یابد [۱].

۱-۶ خصوصیات بنیادی نیمرساناها

۱-۶-۱ نوار انرژی وغلظت حامل‌ها

الکترون‌های یک اتم منفرد، سطوح انرژی جدا از هم دارند. هنگامی که برای تشکیل ساختار بلوری به هم نزدیک می‌شوند، سطوح انرژی به صورت مجرا شکافته می‌شوند، اما سطوح نزدیک به‌هم به خاطر برهم کنش اتمی، دو نوار پیوسته‌ی انرژی را ایجاد می‌کنند. از میان دو نوار ایجاد شده نوار پایینی را نوار ظرفیت و نوار بالایی را نوار رسانش یا هدایت می‌نامند. بین



شکل ۱-۱: نوار انرژی نیمرسانا

این دو نوار یک فاصله انرژی به نام انرژی گاف E_g وجود دارد، الکترون‌ها در نوار هدایت و نوار ظرفیت، در شار جریان مشارکت می‌کنند. برخلاف نیمرساناها، در یک ماده عایق فاصله بین دو نوار به قدری زیاد است($E_g \geq 5eV$) که نوار هدایت حتی در دمای اتاق نیز خالی است. در یک رسانا، نوار هدایت یا به صورت ناقص از الکترون‌ها پرشده یا اینکه با نوار ظرفیت هم‌پوشانی کرده است که در نتیجه فاصله‌ای بین نوار وجود ندارد و مقاومت بسیار کم است.

۲-۶-۱ نیمرسانای ذاتی

هنگامی که الکترون‌ها و حفره‌های ایجاد شده توسط ناخالصی‌ها، خیلی کمتر از الکترون‌ها و حفره‌هایی باشند که در اثر حرارت ایجاد شده‌اند، این نیمرسانا را نیمرسانا ذاتی می‌نامند. تعداد الکترون‌های نوار هدایت در واحد حجم با n و تعداد حفره‌های نوار هدایت در واحد

حجم با p بیان می‌شوند که می‌توانند از چگالی حالت و تابع توزیع بدست آیند.

۱-۶-۳ نیمرسانای غیر ذاتی

هنگامی که الکترون‌ها و حفره‌هایی که توسط ناخالصی‌ها ایجاد می‌شوند قابل چشم پوشی نباشند، نیمرسانا غیر ذاتی نامیده می‌شود. غلظت حامل‌های Si را در نظر بگیرید، هنگامی که اتم‌های گروه ۵ (مانند فسفر) به عنوان ناخالصی در آن تزریق می‌شوند، اتم فسفر با ۴ اتم Si مجاورش پیوند برقرار می‌کند و الکترون پنجم پیوند بسیار ضعیفی با اتم فسفر دارد، بنابراین حتی در دمای اتاق نیز یونیزه می‌شود. در پی آن، این الکترون به‌صورت یک الکترون رسانش با بار منفی می‌باشد. در این مورد Siیک نیمرسانای نوع n بوده و اتم فسفر، دهنده‌ی الکترون نامیده می‌شود.

۱-۷ جذب نوری و باز ترکیب در نیمرساناها

۱-۷-۱ جذب نوری

انرژی یک فوتون معادل $h\nu$ است. که h ثابت پلانک و ν فرکانس نور می باشد. رابطه میان انرژی فوتون و طول موج به صورت زیر است:

$$\lambda(\mu m) = \frac{c}{\nu} = \frac{hc}{h\nu} = \frac{۱/۲۳۹۸}{h\nu(eV)}, \qquad (۱-۱)$$

که c سرعت نور در خلأ می‌باشد. طیف انرژی نورانی خورشید از ناحیه فرابنفش $(۰/۳\mu m)$تا ناحیه مادون قرمز $(۳\mu m)$می‌باشد. فرض کنید یک نیمرسانا توسط نور خورشید، نورتابی شود. هنگامی که انرژی فوتون کمتر از شکاف نوار نیمرسانا است، نور از نمونه عبور می‌کند یا به عبارت دیگر نور جذب نمونه نمی‌شود. زمانی که انرژی فوتون بیشتر از شکاف نوار است، الکترون‌ها از لایه ظرفیت به لایه هدایت برانگیخته می‌شوند و یک حفره را در یک لایه ظرفیت به جای می‌گذارند. به عبارت دیگر یک فوتون توسط نیمرسانا جذب می‌شود و یک جفت الکترون-حفره ایجاد می‌شود. این فرآیند انتقال ذاتی یا انتقال نوار به نوار نام دارد.