

صَلَاةُ الْإِسْلَامِ



شماره پایان نامه: ۹۳۲۶۸۱۹۴

دانشگاه شهید چمران اهواز

دانشکده علوم

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش اتمی و مولکولی

عنوان:

بررسی خواص الکترونی و نوری نقطه‌های کوانتومی هرمی-شکل

با اثرهای کرنش و لایه‌ی خیس

استاد راهنما:

دکتر محمد صبائیان

استاد مشاور:

دکتر منصور فرید

نگارنده:

محمد رضا شاهزاده

شهریور ماه ۱۳۹۳

تقدیم بہ

پدر و مادر بزرگوارم،

برادر عزیزم، ہمسر مہربانش و مہراد جان،

خواہر عزیزم،

و دوست و ہمراہ، ہمیشگی ام

پس از شکر و حمد خداوند متعال که به واسطه‌ی لطفش به این مرحله رسیدم، از زحمات بی‌دریغ پدر و مادرم و همراهی برادر بزرگوارم، همسر مهربانش، مهراد نازنین و خواهر عزیزم سپاسگزارم که همواره پشتیبان و مشوق بنده بوده‌اند. از همراهی دوست عزیزم، از راهنمایی‌های جناب آقای مهندس مسعود راثی و از لطف و دعای همیشگی بزرگان سپاسگزارم.

بر خود لازم می‌دانم که از زحمات بی‌شائبه‌ی استاد بزرگوارم، جناب آقای دکتر محمد صبائیان که از ابتدای دوره‌ی تحصیل بنده در دانشگاه شهید چمران اهواز، افتخار شاگردی ایشان را داشتم و موفقیت‌های بنده، حاصل تلاش، اعتماد، صبر و شکیبایی همیشگی ایشان بود تشکر کنم. پس از تقدیر بی‌پایان از جناب آقای دکتر محمد صبائیان به عنوان استاد راهنما، از ایشان به عنوان دوست و برادر دلسوزم سپاسگزارم که از هیچ کمکی برای پیشرفت بنده دریغ ننمودند. همچنین، از استاد مشاور گرامی، جناب آقای دکتر منصور فرید، از هیات محترم داوران جلسه‌ی دفاع، جناب آقای دکتر داوود افشار و جناب آقای دکتر یاسر حاجتی و نماینده‌ی محترم تحصیلات تکمیلی، جناب آقای دکتر جیب اله عصاره سپاسگزارم.

از یکایک اساتید محترم گروه فیزیک دانشگاه شهید چمران اهواز که در طول دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد، افتخار تلمذ در محضرشان را داشتم و از کارمندان محترم گروه فیزیک، سرکار خانم صادقی، سرکار خانم شهنی کرم، سرکار خانم شفیعی، سرکار خانم صفی-خانی و جناب آقای مزرعه سپاسگزارم.

سپاس ویژه از دوستان عزیزی که از ایشان بسیار آموختم: جناب آقای سید آزادی حسینی، جناب آقای حامد آموزگار، جناب آقای محسن بزرگمهریان، جناب آقای علی پارسا، جناب آقای مصطفی محمدرضایی، جناب آقای علیرضا معتضدیان، جناب آقای علی خالدی‌نسب، جناب آقای حمیدرضا رضایی، جناب آقای محمدرضا مفتخر، جناب آقای مهدی حیدری و سرکار خانم فاطمه صداقت جلیل‌آبادی، سرکار خانم نرگس عجم‌گرد و سرکار خانم مریم ریاحی.

در پایان از کلیه‌ی عزیزانی که مرا در رسیدن به این مرحله یاری رساندند سپاسگزارم.

محمدرضا شاهزاده

شهریور ماه ۱۳۹۳

فهرست مطالب

۱	فصل اول: مقدمه
۲	۱-۱ مقدمه
۵	۲-۱ روش‌های رشد نقطه‌های کوانتومی
۹	۳-۱ کاربردهای نقطه‌های کوانتومی
۹	۳-۱-۱ کاربرد نقطه‌های کوانتومی در سلول‌های خورشیدی
۱۱	۳-۱-۲ کاربرد نقطه‌های کوانتومی در لیزرها
۱۲	۳-۳-۱ کاربرد نقطه‌های کوانتومی در آشکارسازها
۱۲	۴-۱ مروری بر کارهای گذشته
۱۹	۵-۱ آنچه در این کار خواهد آمد
۲۳	فصل دوم: مبانی نیم‌رسانا
۲۴	۱-۲ مبانی نیم‌رساناها
۲۶	۲-۲ گذارهای بین نواری و بین زیرنواری
۲۸	۳-۲ امواج بلاخ
۳۲	۴-۲ مفهوم جرم موثر
۳۲	۵-۲ نقطه‌های کوانتومی
۳۴	۶-۲ چگالی حالت‌ها
۳۴	۱-۶-۲ چگالی حالت‌ها برای نیم‌رسانای حجیم
۳۵	۲-۶-۲ چگالی حالت‌ها برای چاه کوانتومی
۳۶	۳-۶-۲ چگالی حالت‌ها برای سیم کوانتومی

۳۶	..... ۲-۶-۴ چگالی حالت‌ها برای نقطه‌ی کوانتومی
۳۹	..... فصل سوم: فرمول‌بندی
۴۰	..... ۳-۱ فرمول‌بندی $k.p$
۴۷	..... ۳-۲ روش ماتریس چگالی برای محاسبه‌ی ویژگی‌های نوری
۵۳	..... ۳-۳ فرمول‌بندی کوانتومی زمان گذار خودبخودی
۵۵	..... فصل چهارم: نتایج
۵۷	..... ۴-۱ روند حل معادله‌ی شرودینگر و محاسبه‌ی ویژگی‌های نوری
۶۲	..... ۴-۲ نقطه‌های کوانتومی گنبدی-شکل: بررسی اثر ابعاد گنبد و ضخامت لایه‌ی خیس
۸۰	..... ۴-۳ نقطه‌های کوانتومی نیمه بیضی‌وار
۸۱	..... ۴-۳-۱ بررسی اثر تغییر ارتفاع بر ویژگی‌های نقطه‌های کوانتومی نیمه بیضی‌وار
۸۹	..... ۴-۳-۲ بررسی اثر تغییر طول قاعده بر ویژگی‌های نقطه‌های کوانتومی نیمه بیضی‌وار
	..... ۴-۳-۳ بررسی اثر میدان الکتریکی بر ویژگی‌های نقطه‌های کوانتومی نیمه بیضی‌وار (اثر استارک)
۱۰۰	.....
۱۱۲	..... ۴-۴ نقطه‌های کوانتومی هرمی-شکل
۱۱۳	..... ۴-۴-۱ بررسی ویژگی‌های الکترونی نقطه‌های کوانتومی هرمی-شکل
۱۲۸	..... ۴-۴-۲ بررسی ویژگی‌های نوری نقطه‌های کوانتومی هرمی-شکل
۱۴۵	..... نتیجه‌گیری
۱۵۱	..... پیشنهادات
۱۵۴	..... پیوست ۱
۱۶۰	..... پیوست ۲
۱۶۷	..... مراجع

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۲: شعاع اکسیتون بوهر برای چند ماده‌ی مختلف [۱] ۳۳
- جدول ۱-۴: مقادیر مورد استفاده جهت مدل‌سازی نقطه‌ی کوانتومی InAs/GaAs ۶۰

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نقطه‌های کوانتومی InAs/GaAs به همراه لایه‌ی خیس؛ برگرفته از مرجع [۱۷]..... ۳
- شکل ۲-۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نقطه‌ی کوانتومی InAs/GaAs به همراه لایه‌ی خیس در بستری از AlAs؛ برگرفته از مرجع [۱۸]..... ۴
- شکل ۳-۱: روش‌های متفاوت رشد ساختارهای کوانتومی؛ الهام گرفته از مرجع [۴۸]..... ۶
- شکل ۴-۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از نقطه‌های کوانتومی InP بر بستر GaAs به روش استرانسکی-کراستانوف؛ برگرفته از مرجع [۶۰]..... ۷
- شکل ۵-۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از نقطه‌ی کوانتومی InAs/GaAs؛ برگرفته از مرجع [۵۸]..... ۸
- شکل ۶-۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از نقطه‌ی کوانتومی هرمی-شکل؛ برگرفته از مرجع [۵۷]..... ۸
- شکل ۷-۱: رکورد بازده سلول‌های خورشیدی مختلف؛ برگرفته از مرجع [۸۶]..... ۱۰
- شکل ۱-۲: گذارهای فوتونی در مواد با گاف مستقیم و گاف غیرمستقیم؛ الهام گرفته از مرجع [۱۸۵]..... ۲۵
- شکل ۲-۲: نمای شماتیک گذار بین نواری..... ۲۷
- شکل ۳-۲: نمای شماتیک گذار بین زیرنواری..... ۲۸
- شکل ۴-۲: نمایش شماتیک یک پتانسیل تناوبی ناشی از یک بلور یک بعدی..... ۲۹
- شکل ۵-۲: نمودار پاشندگی برای یک ذره‌ی آزاد (الکترون)؛ الهام گرفته از مرجع [۱]..... ۳۰
- شکل ۶-۲: نمودار پاشندگی برای یک ذره در پتانسیل تناوبی یک بعدی. نمودار پاشندگی ذره‌ی آزاد (الکترون) با خط‌چین نمایش داده شده است؛ برگرفته از مرجع [۱]..... ۳۱
- شکل ۷-۲: چگالی حالت‌ها برای یک ذره‌ی کوانتومی در ساختار حجیم، چاه کوانتومی و سیم کوانتومی..... ۳۷
- شکل ۸-۲: چگالی حالت‌های الکترون در یک چاه کوانتومی، یک سیم کوانتومی و قدرت نوسان محاسبه شده برای نقطه‌ی کوانتومی GaAs با اندازه‌ی ۱۰ نانومتر؛ برگرفته از مرجع [۱۸۷]..... ۳۷

- شکل ۴-۱: نمای سه بعدی نقطه‌های کوانتومی. ۵۷
- شکل ۴-۲: نمای دو بعدی نقطه‌ی کوانتومی گنبدی-شکل. ۶۳
- شکل ۴-۳: توزیع سه بعدی توابع موج در حالت‌های S و P. ۶۴
- شکل ۴-۴: توزیع احتمال (الف) حالت S و (ب) حالت P برای نقطه‌ی کوانتومی گنبدی-شکل. ۶۵
- شکل ۴-۵: انرژی حالت پایه‌ی نقطه‌ی کوانتومی بر حسب شعاع گنبد به ازاء دو ضخامت لایه‌ی خیس ۰٫۵ و ۲ نانومتر. ۶۶
- شکل ۴-۶: انرژی اولین حالت برانگیخته بر حسب شعاع گنبد به ازاء دو ضخامت لایه‌ی خیس ۰٫۵ و ۲ نانومتر. ۶۷
- شکل ۴-۷: توزیع مکانی تابع موج الکترون در اولین حالت برانگیخته برای نقطه‌ی کوانتومی با ضخامت لایه‌ی خیس ۲ نانومتر و شعاع گنبد (الف) ۵ نانومتر و (ب) ۴ نانومتر. ۶۸
- شکل ۴-۸: انرژی گذار P-to-S بر حسب شعاع گنبد برای دو ضخامت لایه‌ی خیس ۰٫۵ و ۲ نانومتر. ۶۹
- شکل ۴-۹: فرکانس (سمت چپ) و طول موج (سمت راست) گذار P-to-S بر حسب شعاع گنبد برای دو ضخامت لایه‌ی خیس ۰٫۵ و ۲ نانومتر. ۷۰
- شکل ۴-۱۰: دو قطبی گذار الکترون بر حسب شعاع گنبد برای دو ضخامت لایه‌ی خیس ۰٫۵ و ۲ نانومتر. ۷۱
- شکل ۴-۱۱: قدرت نوسان گذار P-to-S بر حسب شعاع گنبد برای دو ضخامت لایه‌ی خیس ۰٫۵ و ۲ نانومتر. ۷۱
- شکل ۴-۱۲: احتمال حضور الکترون در درون گنبد در دو حالت S و P بر حسب شعاع در نقطه‌ی کوانتومی با لایه‌ی خیس با ضخامت ۲ نانومتر. ۷۲
- شکل ۴-۱۳: احتمال حضور الکترون درون بستر GaAs در دو حالت S و P بر حسب شعاع در نقطه‌ی کوانتومی با لایه‌ی خیس با ضخامت ۲ نانومتر. ۷۳
- شکل ۴-۱۴: بخش حقیقی پذیرفتاری مرتبه‌ی اول نقطه‌ی کوانتومی با چهار شعاع ۶، ۹، ۱۲ و ۱۶ نانومتر بر روی لایه‌ی خیس با ضخامت (الف) ۰٫۵ نانومتر و (ب) ۲ نانومتر. ۷۵

- شکل ۴-۱۵: بخش موهومی پذیرفتاری مرتبه‌ی اول نقطه‌های کوانتومی با چهار شعاع ۶، ۹، ۱۲، و ۱۶ نانومتر بر روی لایه‌ی خیس با ضخامت (الف) ۰٫۵ نانومتر و (ب) ۲ نانومتر. ۷۶
- شکل ۴-۱۶: بخش حقیقی پذیرفتاری مرتبه‌ی سوم نقطه‌های کوانتومی با چهار شعاع ۶، ۹، ۱۲ و ۱۶ نانومتر بر روی لایه‌ی خیس با ضخامت (الف) ۰٫۵ نانومتر و (ب) ۲ نانومتر. ۷۷
- شکل ۴-۱۷: بخش موهومی پذیرفتاری مرتبه‌ی سوم نقطه‌های کوانتومی با چهار شعاع ۶، ۹، ۱۲ و ۱۶ نانومتر بر روی لایه‌ی خیس با ضخامت (الف) ۰٫۵ نانومتر و (ب) ۲ نانومتر. ۷۸
- شکل ۴-۱۸: بخش حقیقی (الف) پذیرفتاری مرتبه‌ی اول و (ب) پذیرفتاری مرتبه‌ی سوم، برای نقطه‌ی کوانتومی با شعاع ۶ نانومتر بر روی لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵ نانومتر و ۲ نانومتر. ... ۷۹
- شکل ۴-۱۹: بخش موهومی (الف) پذیرفتاری مرتبه‌ی اول و (ب) پذیرفتاری مرتبه‌ی سوم، برای نقطه‌ی کوانتومی با شعاع ۶ نانومتر بر روی لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵ نانومتر و ۲ نانومتر. ... ۸۰
- شکل ۴-۲۰: نمای دوبعدی نقطه‌ی کوانتومی شبیه‌سازی شده با طول قاعده‌ی ثابت و ارتفاع متغیر. ۸۱
- شکل ۴-۲۱: محور عمودی سمت چپ- انرژی حالت پایه (S)، اولین حالت برانگیخته (P) و محور عمودی سمت راست- انرژی گذار P-to-S بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی. ۸۲
- شکل ۴-۲۲: فرکانس (سمت چپ) و طول موج (سمت راست) گذار P-to-S بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی. ۸۳
- شکل ۴-۲۳: چگالی احتمال الکترون در نقطه‌ی کوانتومی با افزایش ارتفاع، در حالت پایه و در اولین حالت برانگیخته. ۸۴
- شکل ۴-۲۴: احتمال حضور الکترون در درون نیمه بیضی‌وار بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی در دو حالت S و P. ۸۵
- شکل ۴-۲۵: محور عمودی سمت چپ- دوقطبی‌های گذار مربوط به گذار P-to-S و محور عمودی سمت راست- قدرت نوسان مرتبط با گذار P-to-S بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی. ۸۷
- شکل ۴-۲۶: (الف) بخش حقیقی و (ب) بخش موهومی پذیرفتاری مرتبه‌ی اول، (پ) بخش حقیقی و (ت) بخش موهومی پذیرفتاری مرتبه‌ی سوم برای چهار ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی. ۸۸
- شکل ۴-۲۷: زمان گذار خودبخودی P-to-S در نقطه‌ی کوانتومی بر حسب ارتفاع نیمه بیضی‌وار. ۸۹

- شکل ۴-۲۸: نمای دوبعدی نقطه‌ی کوانتومی شبیه‌سازی شده با طول قاعده‌ی متغیر و ارتفاع ثابت.
 ۹۰
- شکل ۴-۲۹: محور عمودی سمت چپ- انرژی حالت پایه (S)، اولین حالت برانگیخته (P) و محور عمودی سمت راست- انرژی گذار P-to-S بر حسب طول قاعده‌ی نقطه‌ی کوانتومی. ... ۹۱
- شکل ۴-۳۰: فرکانس (سمت چپ) و طول موج (سمت راست) گذار P-to-S بر حسب طول قاعده‌ی نقطه‌ی کوانتومی. ۹۲
- شکل ۴-۳۱: چگالی احتمال الکترون در نقطه‌ی کوانتومی با افزایش طول قاعده، در حالت پایه (S) و در اولین حالت برانگیخته (P). ۹۳
- شکل ۴-۳۲: احتمال حضور الکترون در درون نیمه بیضی‌وار بر حسب طول قاعده‌ی نقطه‌ی کوانتومی برای حالت پایه (S) و اولین حالت برانگیخته (P). ۹۴
- شکل ۴-۳۳: محور عمودی سمت چپ- دوقطبی‌های گذار مربوط به گذار P-to-S و محور عمودی سمت راست- قدرت نوسان مرتبط با گذار P-to-S بر حسب طول قاعده‌ی نقطه‌ی کوانتومی. ۹۶
- شکل ۴-۳۴: (الف) بخش حقیقی و (ب) بخش موهومی پذیرفتاری مرتبه‌ی اول، (پ) بخش حقیقی و (ت) بخش موهومی پذیرفتاری مرتبه‌ی سوم برای چهار طول قاعده‌ی نقطه‌ی کوانتومی. ۹۷
- شکل ۴-۳۵: عدد شایستگی بر حسب طول قاعده‌ی نقطه‌ی کوانتومی. ۹۸
- شکل ۴-۳۶: زمان گذار خودبخودی P-to-S در نقطه‌ی کوانتومی با تغییر طول قاعده نیمه بیضی‌وار. ۹۹
- شکل ۴-۳۷: نمای دو بعدی نقطه‌ی کوانتومی نیمه بیضی‌وار با ارتفاع ۵ نانومتر و طول قاعده‌ی ۲۰ نانومتر. ۱۰۰
- شکل ۴-۳۸: دیاگرام انرژی دو حالت S و P در نقطه‌ی کوانتومی در سه حالت (الف) بدون بایاس، (ب) با بایاس در جهت -z، و (پ) با بایاس در جهت +z. ۱۰۲
- شکل ۴-۳۹: محور عمودی سمت چپ- انرژی حالت پایه (S)، اولین حالت برانگیخته (P) و محور عمودی سمت راست- انرژی گذار P-to-S بر حسب ولتاژ بایاس. ۱۰۳

- شکل ۴-۴۰: دوقطبی گذار P-to-S بر حسب ولتاژ بایاس. ۱۰۴.....
- شکل ۴-۴۱: چگالی احتمال حضور الکترون حالت پایه و اولین حالت برانگیخته در نقطه‌ی کوانتومی برای سه ولتاژ بایاس صفر، $+0.8$ و -0.8 ولت. ۱۰۵.....
- شکل ۴-۴۲: (الف) بخش حقیقی و (ب) بخش موهومی پذیرفتاری مرتبه‌ی اول در نقطه‌ی کوانتومی به ازاء سه ولتاژ بایاس صفر، $+0.8$ و -0.8 ولت. ۱۰۶.....
- شکل ۴-۴۳: (الف) بخش حقیقی و (ب) بخش موهومی پذیرفتاری مرتبه‌ی سوم در نقطه‌ی کوانتومی به ازاء سه ولتاژ بایاس صفر، $+0.8$ و -0.8 ولت. ۱۰۷.....
- شکل ۴-۴۴: عدد شایستگی در نقطه‌ی کوانتومی بر حسب ولتاژ بایاس. ۱۰۸.....
- شکل ۴-۴۵: نمای دوبعدی نقطه‌ی کوانتومی شبیه سازی شده با طول قاعده‌ی متغیر و ارتفاع ثابت. ۱۰۹.....
- شکل ۴-۴۶: زمان گذار خوبخودی P-to-S بر حسب تغییر طول قاعده‌ی نقطه‌ی کوانتومی نیمه بیضی وار. ۱۱۰.....
- شکل ۴-۴۷: زمان گذار خودبخودی P-to-S برای نقطه‌ی کوانتومی نیمه بیضی وار با طول قاعده‌ی ثابت و ارتفاع متغیر. ۱۱۱.....
- شکل ۴-۴۸: اثر ولتاژ بایاس بر روی زمان گذار خودبخودی برای یک نقطه‌ی کوانتومی با ارتفاع ۴ نانومتر و طول قاعده‌ی ۲۰ نانومتر. ۱۱۲.....
- شکل ۴-۴۹: نمای سه بعدی نقطه‌ی کوانتومی هرمی-شکل InAs/GaAs. ۱۱۳.....
- شکل ۴-۵۰: نمای شماتیک نقطه‌های کوانتومی هرمی-شکل با طول قاعده‌ی ثابت ۱۴ نانومتر و ارتفاع متغیر. ۱۱۴.....
- شکل ۴-۵۱: انرژی حالت پایه بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی، برای نقطه‌ی کوانتومی بدون لایه‌ی خیس و با لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ نانومتر. ۱۱۵.....
- شکل ۴-۵۲: انرژی اولین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی، برای نقطه‌ی کوانتومی بدون لایه‌ی خیس و با لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ نانومتر. ۱۱۶.....
- شکل ۴-۵۳: انرژی سومین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی، برای نقطه‌ی کوانتومی با لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ نانومتر. ۱۱۷.....

- شکل ۴-۵۴: انرژی چهارمین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی، برای نقطه‌ی کوانتومی با لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ نانومتر. ۱۱۸.....
- شکل ۴-۵۵: انرژی پنجمین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی، برای نقطه‌ی کوانتومی با لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ نانومتر. ۱۱۹.....
- شکل ۴-۵۶: تابع موج (الف) و (ب) حالت پایه و (پ) و (ت) اولین حالت برانگیخته به ازاء دو ضخامت لایه‌ی خیس ۰٫۵ و ۲ نانومتر، برای نقطه‌ی کوانتومی با ارتفاع ۳ نانومتر. ۱۲۰.....
- شکل ۴-۵۷: انرژی گذار بین حالت پایه و اولین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی، برای نقطه‌ی کوانتومی با لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ نانومتر. ۱۲۱.....
- شکل ۴-۵۸: انرژی گذار بین حالت پایه و سومین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی، برای نقطه‌ی کوانتومی با لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ نانومتر. ۱۲۲.....
- شکل ۴-۵۹: انرژی گذار بین اولین حالت برانگیخته و سومین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی، برای نقطه‌ی کوانتومی با لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ نانومتر. ۱۲۲.....
- شکل ۴-۶۰: انرژی گذار بین اولین حالت برانگیخته و چهارمین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی، برای نقطه‌ی کوانتومی با لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ نانومتر. ۱۲۳.....
- شکل ۴-۶۱: انرژی گذار بین اولین حالت برانگیخته و پنجمین حالت برانگیخته بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی، برای نقطه‌ی کوانتومی با لایه‌ی خیس با ضخامت ۰٫۵، ۱، ۱٫۵ و ۲ نانومتر. ۱۲۴.....
- شکل ۴-۶۲: تغییرات نسبی انرژی حالت پایه بین نقطه‌ی کوانتومی با ارتفاع ۱ نانومتر و ۱۴ نانومتر، به ازاء تغییرات ضخامت لایه‌ی خیس. ۱۲۵.....
- شکل ۴-۶۳: تغییرات انرژی حالت‌های شبه پیوستار مرتبط با لایه‌ی خیس با تغییرات ارتفاع بر حسب چهار ضخامت لایه‌ی خیس. ۱۲۶.....
- شکل ۴-۶۴: دیاگرام انرژی شش تراز انرژی در نقطه‌ی کوانتومی. ۱۲۷.....
- شکل ۴-۶۵: توزیع سه بعدی توابع موج حالت پایه، حالت برانگیخته و حالت‌های شبه پیوستار. ۱۲۸.....
- شکل ۴-۶۶: تابع موج حالت پایه برای یک سیستم کوانتومی فرضی. ۱۲۹.....
- شکل ۴-۶۷: تابع موج حالت برانگیخته برای یک سیستم کوانتومی فرضی. ۱۲۹.....

شکل ۴-۶۸: حاصلضرب تابع موج حالت پایه در تابع موج حالت برانگیخته برای سیستم کوانتومی فرضی. ۱۳۰.....

شکل ۴-۶۹: (الف) شکل هندسی نقطه‌ی کوانتومی بررسی شده و (ب) دیاگرام انرژی به همراه قطبش گذارها. ۱۳۲.....

شکل ۴-۷۰: (الف) انرژی حالت S، حالت P و حالت WL و (ب) انرژی گذار متناظر با سه حالت، بر حسب تغییر ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی. ۱۳۴.....

شکل ۴-۷۱: دوقطبی گذار متناظر با سه گذار بررسی شده به ازاء تغییر ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی. ۱۳۶.....

شکل ۴-۷۲: قدرت نوسان متناظر با سه گذار بررسی شده بر حسب تغییر ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی. ۱۳۷.....

شکل ۴-۷۳: احتمال حضور الکترون در درون نقطه‌ی کوانتومی بر حسب تغییر ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی. ۱۳۸.....

شکل ۴-۷۴: توزیع مکانی تابع موج حالت پایه به ازاء ارتفاع‌های متفاوت. ۱۳۹.....

شکل ۴-۷۵: توزیع مکانی تابع موج اولین حالت برانگیخته به ازاء ارتفاع‌های متفاوت. ۱۴۰.....

شکل ۴-۷۶: توزیع مکانی تابع موج WL به ازاء ارتفاع‌های متفاوت. ۱۴۱.....

شکل ۴-۷۷: جذب خطی برای نقطه‌های کوانتومی با سه ارتفاع ۴، ۸ و ۱۰ نانومتر برای سه گذار. ۱۴۲.....

نام خانوادگی: شاهزاده		نام: محمدرضا	شماره‌ی دانشجویی: ۹۰۲۶۸۰۲
عنوان پایان‌نامه: بررسی خواص الکترونی و نوری نقطه‌های کوانتومی هرمی-شکل با اثرهای کرنش و لایه‌ی خیس			
استاد راهنما: دکتر محمد صبائیان			
استاد مشاور: دکتر منصور فرید			
درجه‌ی تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: فیزیک	گرایش: اتمی و مولکولی	
دانشگاه: شهید چمران اهواز	دانشکده: علوم	گروه: فیزیک	
تاریخ فارغ‌التحصیلی: ۹۳/۰۶/۲۳		تعداد صفحه: ۱۸۵	
کلیدواژه‌ها: نقطه‌ی کوانتومی، لایه‌ی خیس، پذیرفتاری، گذار بین زیرنوری، چگالی احتمال، قطبش.			
<p>نانوساختارهای نیم‌رسانا که به آن‌ها نقطه‌ی کوانتومی یا اتم‌های مصنوعی نیز گفته می‌شود، کاربردهای بسیاری در سامانه‌های مختلف از جمله لیزرها و آشکارسازهای نوری پیدا کرده‌اند که این کاربردها به دلیل ویژگی‌های وابسته به اندازه و قطبش آن‌ها است. در هنگام رشد ساختارهای نامتجانس خودسامان‌یافته مثل InAs/GaAs، نقطه‌های کوانتومی در شکل‌های مختلفی مثل هرم و نیمه‌بیضی‌وار رشد می‌کنند. به دلیل تفاوت ثابت شبکه بین مواد تشکیل‌دهنده‌ی این ساختارها، جزیره‌های سه بعدی بر روی یک لایه‌ی نازک دو بعدی به نام لایه‌ی خیس شکل می‌گیرند. به دلیل وجود لایه‌ی خیس و هندسه‌ی پیچیده‌ی نقطه‌های کوانتومی، امکان آرایه‌ی حل تحلیلی برای بررسی این نانوساختارها وجود ندارد. بنابراین، برای بررسی نقطه‌های کوانتومی با حداقل تقریب‌ها، از روش‌های عددی مثل روش المان محدود استفاده می‌شود. در این پایان‌نامه، ویژگی‌های الکترونی و نوری گذارهای بین زیرنوری نقطه‌های کوانتومی InAs/GaAs با در نظر گرفتن جفت‌شدگی با لایه‌ی خیس بررسی شدند. بدین منظور و برای به دست آوردن ویژگی‌های الکترونی، معادله‌ی شرودینگر تک نوار در تقریب جرم موثر حل شد. برای به دست آوردن ویژگی‌های نوری، روش ماتریس چگالی کوانتومی استفاده شد. کرنش موجود در این ساختارها به عنوان یک پتانسیل اضافه در پتانسیل محدودیت در نظر گرفته شد. برای بررسی مدل‌های واقع‌گرایانه، جفت‌شدگی بین نقطه‌ی کوانتومی و لایه‌ی خیس در نظر گرفته شد. به دلیل هندسه‌ی پیچیده‌ی نقطه‌های کوانتومی، محاسبات به شکل عددی و با روش المان محدود انجام شد. برای نقطه‌های کوانتومی گنبدی-شکل، نیمه‌بیضی‌وار و هرمی-شکل، ویژه‌مقادیر انرژی، توابع موج، فرکانس‌های گذار، قدرت نوسان، دوقطبی‌های گذار و ویژگی‌های خطی و غیرخطی نوری بر حسب اندازه و هندسه به طور جامع مورد بررسی قرار گرفتند. سه ویژه‌حالت S (به عنوان حالت پایه)، P (به عنوان حالت برانگیخته‌ی اول با تبهگنی دوگانه) و WL (به عنوان حالت شبه‌پیوستار) به همراه گذارهای بین آن‌ها (که معمولاً در محدوده‌ی تراهرتز طیف قرار می‌گیرد) مطالعه شدند. نتایج این کار نشان دادند که گرچه در برخی از پژوهش‌ها، به منظور سادگی در انجام محاسبات از وجود لایه‌ی خیس صرف‌نظر می‌شود، لایه‌ی خیس اثرات قابل توجهی بر ویژگی‌های الکترونی و نوری می‌گذارد. هم‌چنین، نشان داده شد که گذارهای P-to-S و WL-to-P دارای قطبش درون-صفحه‌ای هستند، در حالی‌که گذار WL-to-S دارای قطبش عمود بر صفحه است. در این کار، برای اولین بار، یک رقابت در شدت جذب و قدرت نوسان بین گذارهای WL-to-S و WL-to-P با تغییر اندازه‌ی نقطه‌های کوانتومی نشان داده شد. برای تمام اندازه‌های نقطه‌ی کوانتومی، نشان داده شد که گذار P-to-S دارای بیشترین جذب خطی بین گذارها است که این موضوع در توافق با پژوهش‌های تجربی است. علاوه بر این، نشان داده شد که برای یک نقطه‌ی کوانتومی نیمه‌بیضی‌وار تخت، ویژگی‌های نوری غیرخطی و به ویژه کمیت عدد شایستگی، به دلیل افزایش برهم‌نهی بین حالت‌های P و S افزایش پیدا می‌کنند. در پایان، اثر میدان الکتریکی (اثر استارک) بر روی ویژگی‌های نقطه‌های کوانتومی بررسی شد و نشان داده شد که این اثر می‌تواند به عنوان راهی برای بهبود ویژگی‌های نوری نقطه‌های کوانتومی استفاده شود.</p>			

فصل اول: مقدمه

۱-۱ مقدمه

در سال‌های اخیر، نشان داده شده است که "اندازه" یکی از کمیت‌های بسیار مهم در تعیین رفتار ساختارها است. برای دسته‌بندی انواع ساختارها، می‌توان از سه کمیت استفاده کرد: ثابت شبکه‌ی بلور (a_L)، شعاع اکسیتون بوهر^۱ (a_B^*) و طول موج متناظر با پایین‌ترین گذار نوری (λ). اگر اندازه‌ی بلور (a) قابل مقایسه با ثابت شبکه باشد (که این عدد در حدود ۱ نانومتر است)، یعنی $a \approx a_L$ ، چون در این حالت تعداد اتم‌های تشکیل‌دهنده‌ی ساختار بسیار کم و از مرتبه‌ی 10^1 - 10^2 است، کوچکترین جزئیات از قبیل تغییر در تعداد اتم‌ها یا نحوه‌ی توزیع آن‌ها، اثرات قابل توجهی بر ویژگی‌های ساختاری، الکترونی، نوری و مکانیکی بلور می‌گذارد. برای این ساختارها، تنها با استفاده از یک رهیافت کاملاً کوانتومی می‌توان رفتار ماده را توصیف کرد [۱]. در صورتی که $\lambda \ll a \ll a_L$ ، بلور را می‌توان مانند یک جعبه‌ی کوانتومی برای الکترون در نظر گرفت [۱]. در این حالت، تعداد اتم‌های نانوساختار از مرتبه‌ی 10^6 - 10^{12} است [۱]. در شرایطی که $a \approx a_B^*$ ، بلور نیم‌رسانا را نقطه‌ی کوانتومی می‌نامند. در نهایت، زمانی که ابعاد ساختار به مرتبه‌ی ۱۰۰ نانومتر برسد، تعداد اتم‌های تشکیل‌دهنده‌ی ساختار بیشتر از 10^6 خواهد بود که به آن‌ها ساختارهای حجیم^۲ گفته می‌شود [۱].

نانوساختارهای نیم‌رسانا که به آن‌ها نقطه‌های کوانتومی یا اتم‌های مصنوعی^۳ گفته می‌شود [۲]، به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد از جمله طیف وابسته به اندازه [۳، ۴] و قطبش^۴ [۵] کاربردهای فوق‌العاده‌ای در بسیار از شاخه‌های علوم و مهندسی یافته‌اند. از جمله این کاربردها می‌توان به پزشکی [۶]، منابع تک فوتونی [۷]، آشکارسازها [۸، ۹]، منابع تراهرتز [۵]، لیزرها [۱۰]، دیودهای نورگسیل [۱۱] و محاسبات کوانتومی [۱۲] اشاره کرد. به دلیل تعداد کم اتم‌های تشکیل‌دهنده‌ی نقطه‌های کوانتومی نسبت به مواد حجیم^۵، خصوصیات این نانوساختارها به شدت به اندازه، استوکیومتری و شکل (هندسه) وابسته است.

¹ Bohr Exciton Radius

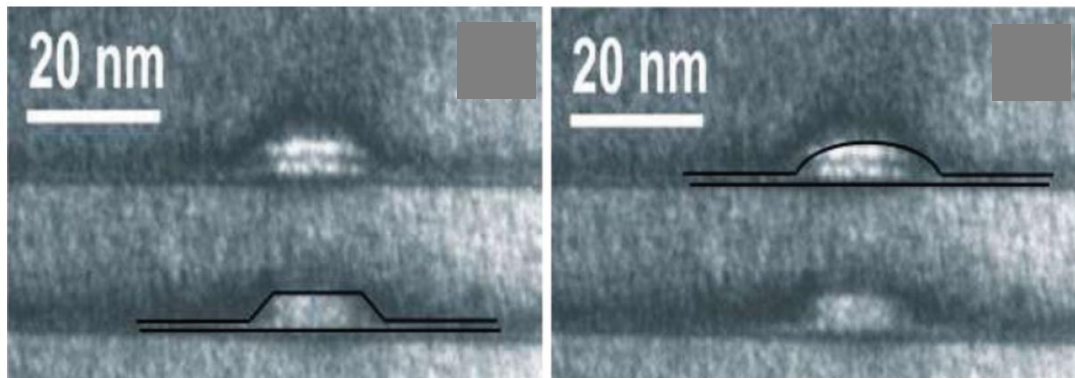
² Bulk

³ Artificial Atoms

⁴ Polarization Sensitive

⁵ Bulk

در نتیجه‌ی رشد ساختارهای نقطه‌ای کوانتومی نامتجانس^۱ با اختلاف ثابت شبکه‌ی محسوس بین ماده‌ی فعال و زیرلایه، نقطه‌های کوانتومی خودسامان یافته پدید می‌آیند [۱۳]. در روش رشد استرانسکی-کراستانوف^۲، بعد از این که ضخامت لایه‌ی ماده‌ی فعال که روی زیرلایه رشد داده شده است، به مقدار مشخصی رسید، در اثر کرنش^۳، ماده‌ی فعال به جزیره‌های سه بعدی نانومتری تبدیل می‌شود که بر روی یک لایه‌ی تخت و نازک باقی مانده به نام لایه‌ی خیس^۴، توزیع می‌شوند. ضخامت لایه‌ی خیس به نوع ماده‌ی فعال و زیرلایه و روش رشد بستگی دارد [۱۴, ۱۵]. به عنوان مثال، در نقطه‌های کوانتومی InAs/GaAs، ضخامت لایه‌ی خیس در حدود ۰/۵۶ نانومتر است که به یک اختلاف ثابت شبکه‌ی ۷ درصدی بین InAs و GaAs مربوط می‌شود [۱۶]. در شکل ۱-۱، تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) از نقطه‌ی کوانتومی InAs/GaAs به همراه لایه‌ی خیس نشان داده شده است. هم‌چنین، شکل ۱-۲ تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نقطه‌های کوانتومی InAs/GaAs به همراه لایه‌ی خیس در بستری از AlAs را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نقطه‌های کوانتومی InAs/GaAs به همراه لایه‌ی خیس؛ برگرفته از مرجع [۱۷].

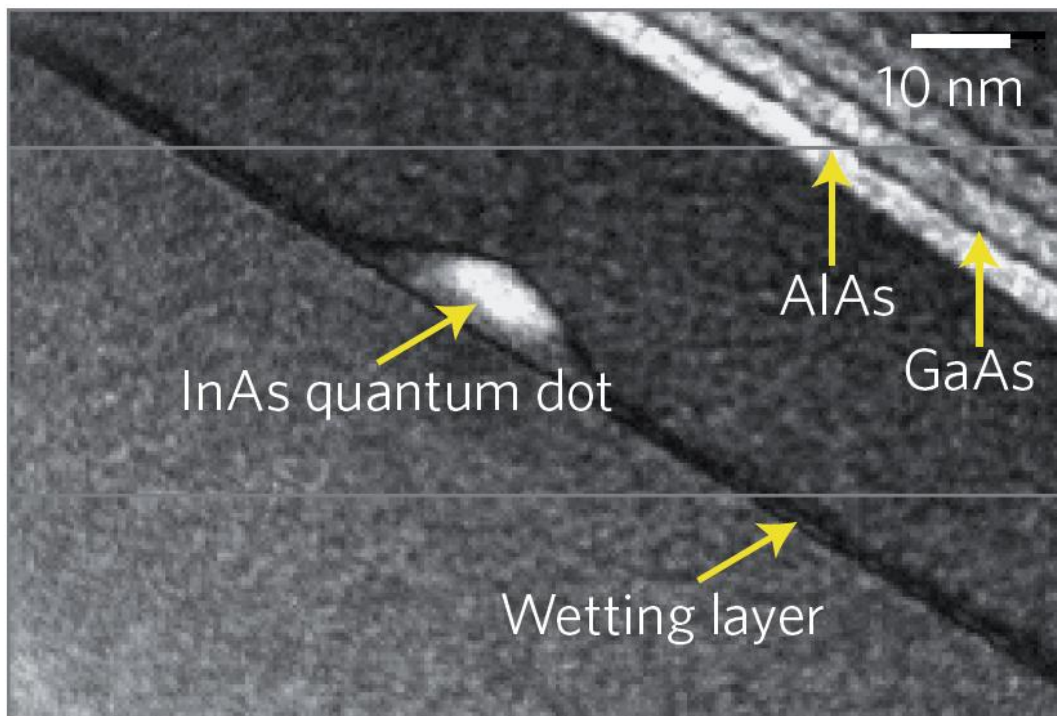
¹ Hetero-Structures

² Stranski-Krastanov

³ Strain

⁴ Wetting Layer

⁵ Transmission Electron Microscopy



شکل ۱-۲: تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری از نقطه‌ی کوانتومی InAs/GaAs به همراه لایه‌ی خیس در بستری از AlAs؛ برگرفته از مرجع [۱۸].

کرنش باقی مانده در نقطه‌های کوانتومی باعث جابجایی ویژه مقادیر انرژی و تغییر در توابع موج حامل‌های بار می‌شود. مولفه‌ی هیدروستاتیک^۱ کرنش باعث جابجایی لبه‌ی نوار رسانش و نوار ظرفیت و مولفه‌ی دو محوری^۲ آن باعث از بین رفتن تبه‌گنی نوار حفره‌ی سبک و سنگین می‌شود [۱۹، ۲۰].

با وجود این که تاکنون پژوهش‌های نظری بسیاری در زمینه‌ی نقطه‌های کوانتومی انجام شده است، ولی در بسیاری از آن‌ها اثر لایه‌ی خیس صرف نظر شده است [۲۱-۳۳]. دلیل این ساده‌سازی‌ها، جلوگیری از پیچیدگی در محاسبات بوده است. به همین دلیل، پژوهش‌های کمتری در زمینه‌ی بررسی اثر لایه‌ی خیس انجام شده است [۳۴]. با این وجود، پژوهش‌های تجربی

^۱ Hydrostatic

^۲ Bi-axial

نشان‌دهنده‌ی اثرات قابل توجه و غیرقابل اغماض لایه‌ی خیس بر روی خواص الکترونی و نوری نقطه‌های کوانتومی بوده‌اند [۳۴-۳۸].

پژوهش‌ها نشان داده‌اند که لایه‌ی خیس می‌تواند به عنوان یک منبع و کانال برای عبور حامل‌های بار به درون نقطه‌های کوانتومی [۳۶, ۳۹] و هم‌چنین انتقال آنها بین نقطه‌های کوانتومی مجاور در آنسامبلی از نقطه‌های کوانتومی عمل کند [۱۲]. هم‌چنین، لایه‌ی خیس بر روی خواص لیزرهای مبتنی بر نقطه‌های کوانتومی تاثیر می‌گذارد. نقطه‌ی کوانتومی و لایه‌ی خیس، یک سیستم جفت شده تشکیل می‌دهند که باعث محدود شدن پاسخ مدولاسیون^۱ می‌شود [۴۰]. علاوه بر این، لایه‌ی خیس بر روی مشخصات بهره-جریان در لیزرهای نقطه‌ی کوانتومی [۴۱] و جریان تاریک در آشکارسازهای نقطه‌ی کوانتومی اثر می‌گذارد [۳۸].

۲-۱ روش‌های رشد نقطه‌های کوانتومی

شیوه‌ی رشد نقطه‌های کوانتومی نامتجانس به شدت به اختلاف نسبی ثابت شبکه‌ی بین دو ماده وابسته است. در سیستم‌های غیرکرنشی یا با کرنش بسیار کم (مثل ساختارهای GaAs/Al(Ga)As)، رشد به صورت لایه‌های روی هم و دوبعدی انجام می‌شود. به این شیوه‌ی رشد، روش فرانک فن در مرو^۲ گفته می‌شود [۴۲]. اما در سیستم‌هایی که اختلاف نسبی ثابت شبکه از ۱/۸٪ بیشتر باشد، در ابتدا یک لایه‌ی دوبعدی به نام لایه‌ی خیس^۳ رشد می‌کند. سپس جزیره‌های سه‌بعدی بر روی لایه‌ی خیس شکل می‌گیرند [۴۳]. این روش رشد، روش استرانسکی-کراستانوف^۴ است [۴۴]. از جمله نقطه‌های کوانتومی که با روش استرانسکی-کراستانوف ساخته می‌شوند، می‌توان به نقطه‌های کوانتومی InAs/GaAs، با ثابت شبکه‌ی ۵/۶۵ آنگستروم برای GaAs و ۶/۰۵ آنگستروم برای InAs و اختلاف نسبی در حدود ۷٪ اشاره کرد [۱۸, ۴۵, ۴۶]. اما اگر اختلاف نسبی ثابت‌های شبکه از حدود ۱۲٪ بیشتر شود، بدون

^۱ Modulation Response

^۲ Frank-van der Merwe

^۳ Wetting Layer

^۴ Stranski-Krastanov