

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش حالت جامد

مطالعه خواص الکترونی و نوری نقطه کوانتومی بیضی‌گون و نیم

بیضی‌گون همراه با ناخالصی هیدروژنی با پتانسیل نامحدود

استاد راهنما:

دکتر قاسم رضایی

استاد مشاور:

دکتر ابراهیم صادقی

پژوهشگر:

جابر ابراهیمی نجف آبادی

مهرماه ۱۳۸۹

رساله‌ی حاضر، پژوهش‌های نگارنده در دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک  
گرایش ماده چگال است که در مهرماه سال ۱۳۸۹ در دانشکده‌ی علوم پایه دانشگاه  
یاسوج به راهنمایی جناب آقای دکتر قاسم رضایی و مشاوره‌ی جناب آقای دکتر  
ابراهیم صادقی از آن دفاع شده است و کلیه حقوق مادی و معنوی آن متعلق به  
دانشگاه یاسوج است.

تقدیم به

پدر و مادر دلسوز و فداکارم

## سپاسگزاری

اکنون که این رساله به پایان رسیده است بر خود فرض می‌دانم که از استاد ارجمند جناب آقای دکتر قاسم رضایی که هدایت این رساله را به عهده داشتند و با رهنمودهای ارزشمند خود من را در انجام این رساله یاری کردند تشکر نمایم. همچنین بر خود واجب می‌دانم که مراتب سپاسگزاری خویش را از تمامی اساتید بزرگوار بخش فیزیک دانشگاه یاسوج، که افتخار شاگردی ایشان را داشته‌ام، بیان نمایم. از اعضای محترم کمیته‌ی پایان نامه، آقایان دکتر قاسم رضایی، دکتر ابراهیم صادقی، دکتر عباس ظریفی، و نماینده محترم تحصیلات تکمیلی جناب آقای دکتر حسن آزادی و همچنین جناب آقای دکتر محمد جواد کریمی از دانشگاه صنعتی شیراز سپاسگزاری می‌نمایم. از تمامی اعضا محترم هیات علمی گروه فیزیک دانشگاه یاسوج کمال تشکر را دارم. در پایان از پدر و مادر فداکارم که همیشه مدیون آنها هستم، تشکر و سپاسگزاری می‌کنم.

نام : جابر

نام خانوادگی: ابراهیمی نجف‌آبادی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد

رشته و گرایش: فیزیک (ماده چگال)

استاد راهنما: دکتر قاسم رضایی

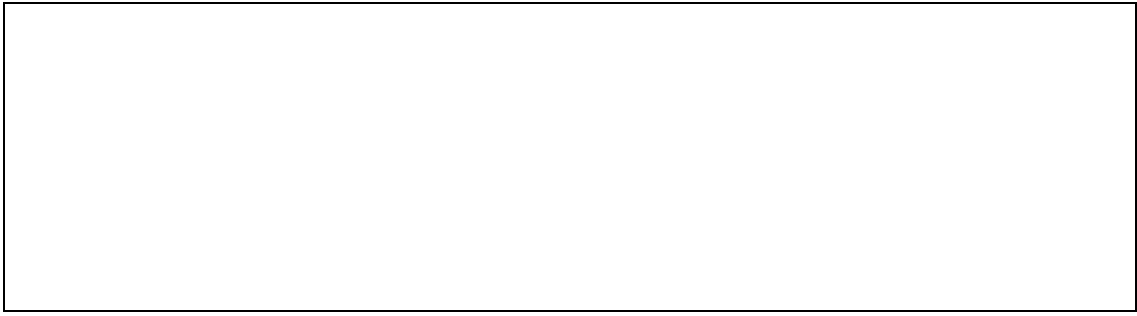
تاریخ دفاع: ۸۹/۷/۱۳

مطالعه خواص الکترونی و نوری نقطه کوانتومی بیضی‌گون و نیم بیضی‌گون همراه با ناخالصی

هیدروژنی با پتانسیل نامحدود

چکیده

نقطه کوانتومی یا ساختار شبه صفر بعدی، یکی از سیستم‌های کوانتومی نیم‌رسانا است که در آن حرکت حامل‌های بار در تمام راستاهای فضایی محدود می‌باشد. این محدودیت فضایی، سبب کوانتیدگی ترازهای انرژی الکترون‌ها در نوار رسانش شده، خصوصیات فیزیکی این سیستم‌های نیم‌رسانا را دگرگون می‌سازد. بررسی خواص الکترونی و اپتیکی نقطه‌های کوانتومی نه تنها از دیدگاه نظری بلکه به علت کاربرد وسیع آنها در ساخت لیزرهای نیم‌رسانا، قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی مورد توجه بوده است. در این رساله ما ابتدا با استفاده از سیستم مختصات کره‌وار کشیده و در تقریب جرم مؤثر، معادله شرودینگر را برای دو نوع نقطه کوانتومی، بیضی‌گون و نیم بیضی‌گون به صورت عددی محاسبه می‌نماییم. در ادامه تأثیر اعمال میدان الکتریکی را بر ترازها بررسی نموده‌ایم. نتایج بدست آمده این است که ترازهای انرژی نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون و بیضی‌گون به ابعاد و شکل نقطه وابسته است. همچنین وجود ناخالصی هیدروژنی انرژی ترازها را کاهش می‌دهد علاوه بر این میدان الکتریکی، اثر قابل ملاحظه‌ای بر ترازهای انرژی ناخالصی هیدروژنی داشت و باعث کاهش انرژی ترازها می‌شود. در ادامه با داشتن ویژه تابع‌های انرژی، و به کمک تحول زمانی ماتریس چگالی، تغییرات ضرایب جذب و شکست نوری ناشی از گذار بین زیر نوارهای نقطه کوانتومی را محاسبه نموده و وابستگی این ضرایب را به بزرگی میدان الکتریکی خارجی و ابعاد و شکل نقطه کوانتومی را مورد بررسی قرار داده‌ایم. نتایج نشان می‌دهد که میدان الکتریکی خارجی و همچنین ابعاد و شکل نقطه کوانتومی به صورت قابل ملاحظه‌ای این ضرایب را تغییر می‌دهند.



## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: پیش‌گفتار
۱-۱-۱	۱- مقدمه
۱-۲-۱	۲- مقدمه ای بر نانو تکنولوژی
۱-۲-۱-۱	۱- تاریخچه نانو
۲-۲-۱	۲- نانو تکنولوژی
۳-۱	۳- روش‌های تجربی تولید مواد در مقیاس نانویی
۴-۱	۴- مقدمه‌ای بر مواد نیم‌رسانا
۵-۱	۵- ساختارهای کوانتومی
۱-۵-۱	۱- چاه کوانتومی
۲-۵-۱	۲- سیم کوانتومی
۳-۵-۱	۳- نقاط کوانتومی
۶-۱	۶- معرفی فصول بعد
	فصل دوم: بررسی ساختار نیم رساناها و سیستم‌های کوانتومی محدود
۲-۱	۲- ساختار
۱-۱-۲	۱- ساختار بلورها
۲-۱-۲	۲- ساختارهای نیمه رسانای دارای پیوندهای با تقارن چهار وجهی
۲-۲	۲- نوارهای انرژی
۱-۲-۲	۱- عایق‌ها، نیمه‌رساناها و رساناها
۳-۲	۳- پتانسیل دوره‌ای و قضیه بلوخ
۴-۲	۴- تقریب جرم مؤثر
۵-۲	۵- چگالی حالت‌ها برای سیستم حجمی (کپه‌ای)
۶-۲	۶- ترازهای انرژی و چگالی حالات چاه کوانتومی
۷-۲	۷- ترازهای انرژی و چگالی حالات سیم کوانتومی
۸-۲	۸- ترازهای انرژی و چگالی حالات نقطه کوانتومی
۹-۲	۹- نتیجه‌گیری



## فهرست مطالب

صفحه

عنوان

### فصل سوم: بررسی ترازهای انرژی نقاط کوانتومی بیضی گون و نیم بیضی گون

۲۹	۳-۱ مقدمه.....
۲۹	۲-۳ دستگاه مختصات کره وار.....
۳۲	۱-۲-۳ دستگاه مختصات کره وار کشیده.....
۳۳	۲-۲-۳ دستگاه مختصات کره وار دو سر تخت.....
۳۳	۳-۳ توابع موج نرده‌ای کره‌وار در حالت کلی.....
۳۴	۴-۳ حل تحلیلی تابع موج.....
۳۴	۱-۴-۳ قسمت زاویه‌ای تابع موج.....
۳۸	۲-۴-۳ قسمت شعاعی تابع موج.....
۳۹	۵-۳ محاسبه ویژه مقادیر و ویژه توابع نقطه کوانتومی بیضی گون و نیم بیضی گون با نا خالصی هیدروژنی.....
۴۲	۶-۳ اعمال میدان الکتریکی خارجی.....
۴۲	۷-۳ محاسبات عددی و نتایج.....
۴۷	۸-۳ نتیجه گیری.....

### فصل چهارم : بررسی خواص نوری نقطه‌ی کوانتومی بیضی گون و نیم بیضی گون با پتانسیل نا محدود

۴۸	۱-۴ مقدمه.....
۴۸	۲-۴ پدیده‌های خطی و غیر خطی.....
۴۹	۱-۲-۴ تولید هماهنگ مرتبه دوم.....
۵۰	۲-۲-۴ تولید هماهنگ مرتبه سوم و اثر کر.....
۵۲	۳-۲-۴ تحول زمانی ماتریس چگالی و حل اختلالی آن.....
۵۴	۳-۴ محاسبه ضرایب جذب و شکست نوری.....
۵۴	۱-۳-۴ محاسبه پذیرفتاری خطی با استفاده از ماتریس چگالی.....
۵۵	۲-۳-۴ محاسبه پذیرفتاری غیر خطی مرتبه دوم با استفاده از ماتریس چگالی.....
۵۸	۳-۳-۴ محاسبه پذیرفتاری غیر خطی مرتبه سوم با استفاده از ماتریس چگالی.....
۶۴	۴-۴ محاسبه تغییرات ضرایب شکست و ضریب جذب نقطه کوانتومی.....
۶۵	۵-۴ محاسبات عددی و نتایج.....

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۹۳.....	۶-۴ نتیجه گیری
	فصل پنجم : نتیجه گیری
۹۴.....	نتیجه گیری
۹۷.....	مراجع

## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۳-۵-۱: توابع وابسته لژاندر و توابع لژاندر.....	۴۱

## فهرست نگاره‌ها

صفحه	عنوان
<b>فصل دوم</b>	
۹	نگاره ۱-۱-۲-۱ - ساختار بلوری دو بعدی مبتنی بر یک شبکه‌ی مستطیلی ساده
۹	نگاره ۲-۱-۱-۲ - سلول‌های واحد سه شبکه براوه مکعبی
۱۰	نگاره ۱-۲-۱-۲ - سلول‌های واحد ساختار الماسی
۱۱	نگاره ۱-۱-۲-۲ - طرح‌واره‌ی نواری ساده برای نارسانا، نیم‌رسانا و رسانا
۱۲	نگاره ۱-۲-۲-۲ - نمودار نوار ظرفیت و رسانش با گاف نواری مستقیم و غیرمستقیم
۱۳	نگاره ۲-۲-۲-۲ - نمایش ساختار نواری
۱۸	نگاره ۱-۵-۲ - نحوه‌ی تغییرات چگالی حالت‌های نیم رسانای کیه ای بر حسب انرژی
۲۰	نگاره ۱-۶-۲ - نمودار انرژی چاه کوانتومی
۲۱	نگاره ۲-۶-۲ - طرحی از زیر نوارهای چاه کوانتومی
۲۲	نگاره ۳-۶-۲ - نموداری از حالت‌ها در فضای $k$ برای چاه کوانتومی
	نگاره ۴-۶-۲ - چگالی حالت‌های دو بعدی برای چاه کوانتومی $GaAs$ با ضخامت
۲۲	بسیار کم و سد پتانسیل
۲۳	نگاره ۱-۷-۲ - سیم کوانتومی با سطح مقطع مستطیلی و سد پتانسیل بی‌نهایت
۲۵	نگاره ۲-۷-۲ - طرحی از سلول‌های واحد یک سیم کوانتومی در فضای $k$
۲۶	نگاره ۳-۷-۲ - چگالی حالت‌های سیم کوانتومی یک بعدی
۲۷	نگاره ۱-۸-۲ - نقطه‌ی کوانتومی با سطح مقطع مستطیلی و سد پتانسیل بی‌نهایت
۲۸	نگاره ۲-۸-۲ - چگالی حالت‌های یک نقطه کوانتومی
<b>فصل سوم</b>	
۳۱	نگاره ۱-۲-۳ - دستگاه مختصات کره وار کشیده
۳۳	نگاره ۲-۲-۳ - دستگاه مختصات کره وار دو سر تخت
	نگاره‌ی ۱-۷-۳ - تغییرات ترازهای انرژی نقطه کوانتومی بیضی‌گون با و بدون
۴۳	ناخالصی هیدروژنی $\chi$
	نگاره‌ی ۲-۷-۳ - تغییرات ترازهای انرژی نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با و بدون
۴۳	ناخالصی هیدروژنی $\chi$
	نگاره‌ی ۳-۷-۳ - تغییرات ترازهای انرژی نقطه کوانتومی بیضی‌گون با و بدون
۴۴	ناخالصی هیدروژنی بر حسب شعاع
	نگاره‌ی ۴-۷-۳ - تغییرات ترازهای انرژی نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با و بدون
۴۵	ناخالصی هیدروژنی بر حسب شعاع

## فهرست نگاره‌ها

صفحه	عنوان
۴۶	نگاره‌ی ۳-۷-۵- تغییرات ترازهای انرژی نقطه کوانتومی بیضی گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی بر حسب تغییرات میدان الکتریکی
۴۶	نگاره‌ی ۳-۷-۶- تغییرات ترازهای انرژی نقطه کوانتومی نیم بیضی گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی بر حسب تغییرات میدان الکتریکی
<b>فصل چهارم</b>	
۵۰	نگاره ۴-۲-۱- تولید هماهنگ دوم و نمودار ترازهای انرژی مربوط به آن
۵۰	نگاره ۴-۲-۱- تولید هماهنگ سوم و نمودار ترازهای انرژی مربوط به آن
۵۹	نگاره ۴-۳-۱- نمودارهای فاینمن برای فرایندهای غیر خطی مرتبه‌ی سوم
۶۶	نگاره‌ی ۴-۵-۱- مقایسه‌ی تغییرات ضرایب جذب نقطه کوانتومی بیضی گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی
۶۶	نگاره‌ی ۴-۵-۲- مقایسه‌ی تغییرات ضرایب جذب نقطه کوانتومی نیم بیضی گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی
۶۷	نگاره‌ی ۴-۵-۳- تغییرات ضرایب جذب نقطه کوانتومی بیضی گون با ناخالصی هیدروژنی برای $\chi = 2$
۶۸	نگاره‌ی ۴-۵-۴- تغییرات ضرایب جذب نقطه کوانتومی بیضی گون با ناخالصی هیدروژنی برای $\chi = 2$
۶۹	نگاره‌ی ۴-۵-۵- تغییرات ضرایب جذب نقطه کوانتومی بیضی گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی و مقادیر مختلف $\chi$
۶۹	نگاره‌ی ۴-۵-۶- تغییرات ضرایب جذب نقطه کوانتومی نیم بیضی گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی و مقادیر مختلف $\chi$
۷۰	نگاره‌ی ۴-۵-۷- مقایسه‌ی تغییرات ضرایب شکست نقطه کوانتومی بیضی گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی
۷۱	نگاره‌ی ۴-۵-۸- مقایسه‌ی تغییرات ضرایب شکست نقطه کوانتومی نیم بیضی گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی
۷۱	نگاره‌ی ۴-۵-۹- تغییرات ضرایب شکست نقطه کوانتومی بیضی گون با ناخالصی هیدروژنی برای $\chi = 2$
۷۲	نگاره‌ی ۴-۵-۱۰- تغییرات ضرایب شکست نقطه کوانتومی نیم بیضی گون با ناخالصی هیدروژنی برای $\chi = 2$
۷۳	نگاره‌ی ۴-۵-۱۱- تغییرات ضرایب شکست نقطه کوانتومی بیضی گون با ناخالصی هیدروژنی برای مقادیر مختلف $\chi$
۷۳	نگاره‌ی ۴-۵-۱۲- تغییرات ضرایب شکست نقطه کوانتومی نیم بیضی گون با ناخالصی هیدروژنی برای مقادیر مختلف $\chi$

## فهرست نگاره‌ها

عنوان	صفحه
نگاره‌ی ۴-۵-۱۳- مقایسه‌ی تغییرات ضرایب جذب نقطه کوانتومی بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با اعمال میدان الکتریکی	۷۴.....
نگاره‌ی ۴-۵-۱۴- تغییرات ضرایب جذب نقطه کوانتومی بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با اعمال میدان الکتریکی مختلف	۷۵.....
نگاره‌ی ۴-۵-۱۵- تغییرات ضرایب جذب نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با اعمال میدان الکتریکی مختلف	۷۶.....
نگاره‌ی ۴-۵-۱۶- مقایسه‌ی تغییرات ضرایب شکست نقطه کوانتومی بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با اعمال میدان الکتریکی	۷۶.....
نگاره‌ی ۴-۵-۱۷- تغییرات ضرایب شکست نقطه کوانتومی بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با اعمال میدان الکتریکی مختلف	۷۷.....
نگاره‌ی ۴-۵-۱۸- تغییرات ضرایب شکست نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با اعمال میدان الکتریکی مختلف	۷۸.....
نگاره‌ی ۴-۵-۱۹- مقایسه‌ی تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه دوم نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی	۷۹.....
نگاره‌ی ۴-۵-۲۰- تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه دوم نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با تغییرات شعاع	۸۰.....
نگاره‌ی ۴-۵-۲۱- تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه دوم نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف $\chi$	۸۱.....
نگاره‌ی ۴-۵-۲۲- تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه دوم نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با تغییرات میدان الکتریکی	۸۲.....
نگاره‌ی ۴-۵-۲۳- مقایسه‌ی تغییرات ضریب همسوسازی نوری نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی	۸۲.....
نگاره‌ی ۴-۵-۲۴- تغییرات ضریب ضریب همسوسازی نوری نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با تغییرات شعاع	۸۳.....
نگاره‌ی ۴-۵-۲۵- تغییرات ضریب همسوسازی نوری نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف $\chi$	۸۴.....
نگاره‌ی ۴-۵-۲۶- مقایسه‌ی تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه سوم نقطه کوانتومی بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی	۸۴.....
نگاره‌ی ۴-۵-۲۷- مقایسه‌ی تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه سوم نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی	۸۵.....

## فهرست نگاره‌ها

عنوان	صفحه
نگاره‌ی ۴-۵-۲۸- تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه سوم نقطه کوانتومی بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با تغییرات شعاع.....	۸۵
نگاره‌ی ۴-۵-۲۹- تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه سوم نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با تغییرات شعاع.....	۸۶
نگاره‌ی ۴-۵-۳۰- تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه سوم نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف $\chi$ .....	۸۷
نگاره‌ی ۴-۵-۳۱- تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه سوم نقطه کوانتومی بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با تغییرات میدان الکتریکی.....	۸۸
نگاره‌ی ۴-۵-۳۲- تغییرات ضریب تولید هماهنگ مرتبه سوم نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی با تغییرات میدان الکتریکی.....	۸۸
نگاره‌ی ۴-۵-۳۳- تغییرات عامل ساختار برای نقطه کوانتومی بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف $\chi$ .....	۸۹
نگاره‌ی ۴-۵-۳۴- تغییرات عامل ساختار برای نقطه کوانتومی بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف شعاع.....	۸۹
نگاره‌ی ۴-۵-۳۵- تغییرات عامل ساختار برای نقطه کوانتومی بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف $\chi$ .....	۹۰
نگاره‌ی ۴-۵-۳۶- تغییرات عامل ساختار برای نقطه کوانتومی بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف شعاع.....	۹۰
نگاره‌ی ۴-۵-۳۷- تغییرات عامل ساختار برای نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف شعاع.....	۹۱
نگاره‌ی ۴-۵-۳۸- تغییرات عامل ساختار برای نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف $\chi$ .....	۹۱
نگاره‌ی ۴-۵-۳۹- تغییرات عامل ساختار برای نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف شعاع.....	۹۲
نگاره‌ی ۴-۵-۴۰- تغییرات عامل ساختار برای نقطه کوانتومی نیم بیضی‌گون با و بدون ناخالصی هیدروژنی به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف $\chi$ .....	۹۲

## فصل اول

### پیش‌گفتار

#### ۱-۱ مقدمه

انسان همواره تمایل داشته است که در قلب ناشناخته‌ها به کاوش مشغول شود و به همین علت نیز توانسته تا در علوم مختلف به پیشرفت‌هایی نایل شود. این علاقه به سرزمین یا ملت خاصی محدود نمی‌شود. از اواخر قرن بیستم دامنه‌ی نفوذ و فعالیت بشر از مقیاس میکرون فراتر رفته و به سر حد نانومتر و آنگستروم رسیده است. پیدایش فناوری نانو انقلاب عظیمی در تمامی ابعاد زندگی بشری اعم از الکترونیک، پزشکی، صنایع نظامی و فضایی را به وجود آورد. فناوری نانو سفری است به دنیای اتم‌ها و ملکول‌ها به طوری که از یک سو آشنایی با روش‌های کوچک سازی و از سوی دیگر پی بردن به مکانیزم‌های جاری در قلمرو ۱۰۰۰-۱ نانو متر می‌باشد. آرزوی دیرینه نانو رسیدن به یک تکنولوژی است که در آن توانایی ساخت اتم به اتم ماده وجود داشته باشد [۱]. یکی از زمینه‌های این فناوری که موضوع پژوهش‌های بسیار وسیعی در قرن حاضر بوده، نیم‌رساناهای صفر بعدی<sup>۱</sup> یا نقاط کوانتومی<sup>۲</sup> می‌باشد. در این سیستم‌های کوانتومی به علت وجود محدودیت فضایی اعمال شده بر حرکت حامل‌های بار، چگالی حالت‌های الکترونی کاملاً گسسته شده و در نتیجه ویژگی‌های نوری این سیستم‌ها به صورت چشمگیری تغییر می‌دهد [۲]. بنابراین، از این سیستم‌ها به طور گسترده‌ای در ساخت قطعات اپتیکی و الکترونیکی استفاده می‌شود.

#### ۲-۱ مقدمه ای بر نانو

##### ۱-۲-۱ تاریخچه نانو

مشخص نیست که بشر از چه هنگام به مزیت استفاده از موادی با اندازه‌ای از مرتبه‌ی نانو پی برده است. مشهور است که در قرن چهارم میلادی، شیشه سازان رومی شیشه‌هایی می‌ساختند

---

<sup>1</sup> Zero Dimensional semiconductors

<sup>2</sup> Quantum Dots



که حاوی فلزاتی با اندازه ای از مرتبه ی نانو بوده است. اهمیت بالقوه ی خوشه‌ها به وسیله‌ی شیمیدان ایرلندی، رابرت بویل<sup>۱</sup>، در کتابی با عنوان «شیمیدان شکاک» که در سال ۱۶۶۱ انتشار یافت، مشخص شد. در سال ۱۸۵۷ مایکل فارادی<sup>۲</sup> در مقاله ای که در «مذاکرات فیلسوفانه‌ی انجمن سلطنتی» منتشر شد، تلاش کرد که چگونگی تأثیر ذرات فلز بر رنگ پنجره‌های کلیسا توضیح دهد. گوستاو مای<sup>۳</sup> نخستین کسی بود که وابستگی رنگ شیشه‌ها را به اندازه و نوع فلزات به کار رفته در آن توضیح داد. مقاله او در سال ۱۹۰۸ و در مجله‌ی آلمانی *Annalen der physik* منتشر شد. اگر چه فاینمن<sup>۴</sup> سخنرانی نظری‌اش را در سال ۱۹۶۰ ارائه کرد، فعالیت‌های تجربی روی ذرات ریز فلزی در دهه های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ وجود داشت. در آن زمان به این فعالیت‌ها «نانو فناوری» نمی گفتند و تعداد این آزمایشات هم انگشت شمار بود. با وجود این که اولیر<sup>۵</sup> اولین مشاهدات خود روی سیلیکون متخلخل را در سال ۱۹۶۵ گزارش داد، اما تا سال ۱۹۹۰، زمانی که اثر فلورسانس در دمای اتاق در این فلز مشاهده شد، توجهات به این موضوع جلب نشد. در اوایل دهه‌ی ۱۹۷۰، گروه‌هایی در آزمایشگاه‌های بل<sup>۶</sup> و ای بی<sup>۷</sup> ام اولین چاه‌های کوانتومی دو بعدی را ساختند. آنها با کمک روش‌های رشد لایه ی نازک که با چینش اتمی، یک لایه ی نیمه رسانا می ساخت، درست شده بودند. این کار سرآغاز به وجود آمدن نقطه‌ی کوانتومی بدون بعد بود که هم اکنون یکی از تکامل یافته‌ترین نانو فناوری‌ها با کاربردهای تجاری است [۳].

در هر حال، تا دهه‌ی ۱۹۸۰ که با ظهور روش‌های مناسب ساخت نانوساختارها افزایش قابل ملاحظه‌ای در فعالیت‌های تحقیقاتی رخ داد و پیشرفت‌های مهمی را در پی داشت، فعالیت‌های زیادی صورت نمی گرفت. در سال ۱۹۸۱ برای ساخت خوشه‌های فلزی روشی به وجود آمد که در آن با استفاده از یک لیزر کانونی پرتوان، فلزات تبخیر و تبدیل به پلاسمای داغ می شدند، در این روش دمش ناگهانی هلیوم، بخار را سرد می کند و موجب چگالش اتم‌های فلزی و تبدیل آنها به خوشه-هایی با اندازه های مختلف می شود. در سال ۱۹۸۵، این روش برای ساخت فولرین (C<sub>60</sub>) استفاده شد. در سال ۱۹۸۲، اکیموف<sup>۸</sup> و آموشنکو<sup>۹</sup>، دو دانشمند روسی نخستین مشاهده‌ی اثرات محدودیت کوانتومی<sup>۱۰</sup> را گزارش دادند. اگر چه فرضیه‌ی بلورهای فوتونی از لحاظ نظری در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ تدوین شد، اما نخستین بلور فوتونی سه بعدی دوره ای که دارای یک گاف نوری کامل بود، در سال ۱۹۹۰ به وسیله‌ی یابلونوویچ<sup>۱۱</sup> ساخته شد. مایکل روزک<sup>۱۲</sup> که بر روی توسعه‌ی ابزارهای نانو الکترومغناطیسی کار می کند، در مقاله‌ای که در سپتامبر ۲۰۰۱ در مجله ی علوم آمریکا به

<sup>1</sup> Robert Boyle

<sup>2</sup> Michael Farady

<sup>3</sup> Gustav Mie

<sup>4</sup> Richard Feynman

<sup>5</sup> Uhlir

<sup>6</sup> Bell

<sup>7</sup> Ibm

<sup>8</sup> Ekimov

<sup>9</sup> Oumshchenko

<sup>10</sup> Quantum Confinement

<sup>11</sup> Yablonovich

<sup>12</sup> Michal Roukes

چاپ رسید، به تعدادی دیگر از چالش‌های پیش روی این فناوری اشاره کرده است. یک چالش مهم، ارتباط بین دنیای نانو و دنیای بزرگ - مقیاس است. برای مثال، وقتی اندازه‌ی میله‌ی صلب کاهش می‌یابد، بسامد تشدید مغناطیسی آن زیاد می‌شود. در نظام نانو، بسامدها می‌توانند به بزرگی  $10^{11}$  هرتز و محدوده‌ی دامنه‌های ارتعاش از  $10^{-12}$  (پیکومتر) تا  $10^{-15}$  (فمتومتر) باشند [۴].

### ۱-۲-۲ نانو تکنولوژی

نانو تکنولوژی چنان نگرش به تکنولوژی را متحول ساخته که در صورت تحقق و رسیدن به مقصدی که ترسیم شده است، شاید بزرگترین جهش انسان برای صعود به قله‌های رفیع علم باشد. نانو فناوری، توانایی کار کردن در ابعاد اتمی، مولکولی و فراتر از مولکول در ابعاد ۱/ تا ۱۰۰ نانومتر است. ساخت و دخل و تصرف در چگونگی آرایش اتم‌ها یا مولکول‌ها و همچنین دستیابی به سیستم‌هایی با توانایی‌های جدید ناشی از ابعاد کوچک آن‌ها هدف نانو تکنولوژی است. نانو تکنولوژی یک رشته جدید نیست، بلکه رویکردی جدید در تمام رشته‌هاست. تفاوت اصلی فناوری نانو با فناوری‌های دیگر، در مقیاس مواد و ساختارهایی است که در این محدوده مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته تنها کوچک بودن اندازه مد نظر نیست، بلکه زمانی که اندازه مواد در این مقیاس قرار گیرد خصوصیات ذاتی آن‌ها از جمله رنگ، استحکام، مقاومت خوردگی و... تغییر می‌یابد. درحقیقت در مقیاس نانو، بنیادی‌ترین خواص مواد به گونه‌ای به اندازه بستگی دارد که در مقیاس‌های دیگر چنین نیست. سیستم‌های با ابعاد کم از یافته‌های ۲۰ سال اخیر در عرصه فیزیک حالت جامد محسوب می‌شوند. تکنیک‌های پیشرفته رشد نیم رساناها به ما اجازه می‌دهند که فضاهای کوانتومی محدود با تعداد کمی الکترون تشکیل دهیم. یک راه معمولی ساخت نقاط کوانتومی محدود کردن گاز الکترونی دو بعدی در یک رسانا می‌باشد. نانو فناوری را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد.

- ۱) نانو فناوری خشک که به بررسی نانو ساختارهای کربنی و عمده ساختارهای معدنی می‌پردازد.
- ۲) نانو فناوری مرطوب که بررسی اجزای سیستم‌های زیستی را در بر می‌گیرد.
- ۳) نانو فناوری محاسباتی که با استفاده از مدل‌های ریاضی به بررسی خواص و رفتار واحدهای ساختاری نانومتری می‌پردازد.

یکی از زمینه‌های این فناوری نیم رساناهای یک بعدی و صفر بعدی است که به علت کاربردهای فراوانشان در ساخت قطعات الکترونیکی و اپتیکی، موضوع پژوهش‌های بسیار وسیع در قرن حاضر شده است [۳].

### ۱-۳ روش‌های تجربی تولید مواد در مقیاس نانویی

تولید و بهینه‌سازی مواد بسیار ریز، اساس بسیاری از تحقیقات و فناوری‌های امروزی است، که در تهیه فرمولاسیون و تکنولوژی ساخت برای بالا بردن کیفیت نهایی محصولات صورت می‌پذیرد. علاوه بر اندازه، توزیع اندازه و شکل ذرات بسیار حائز اهمیت است. دستورالعمل‌های مختلفی در خصوص تولید ذرات بسیار ریز در شرایط تعلیق<sup>۱</sup> وجود دارد ولی در خصوص انتشار و تشریح دقیق فرآیند رسوب‌گیری و روش‌های افزایش مقیاس این فرآیندها در مقیاس تجاری محدودیت وجود دارد. برای تولید این نوع

<sup>1</sup> Colloidal

مواد بسیار ریز از پدیده‌های فیزیکی یا شیمیایی یا به طور همزمان از هر دو استفاده می‌شود. برای تولید یک ذره با اندازه مشخص دو فرآیند اساسی وجود دارد، درهم شکستن (بالا به پایین) و دیگری ساخته شدن (پایین به بالا). مراحل مختلف تولید ذرات بسیار ریز عبارت است از، مرحله هسته‌زایی اولیه<sup>۱</sup> و مرحله هسته زایی و رشد خود به خودی<sup>۲</sup>. در ادامه به طور خلاصه روش‌های مختلف تولید نانو ذرات را بیان می‌کنیم. به طور کلی این روش‌ها به دو گروه زیر تقسیم بندی می‌شوند.

الف- فاز گاز مثل آئرسول، سی وی دی (CVD)،...

ب- فاز مایع مثل میکرومولسیون، سل - ژل، هیدرولیز و هم رسوبی و...

توجه به این نکته مهم است که فرآیندهای مربوط به فاز گاز پرهزینه و استفاده از آنها منوط به داشتن آزمایشگاهی با امکانات ویژه می‌باشد [۵].

### ۱-۴ مقدمه ای بر مواد نیم رسانا

نیم رساناها گروهی از مواد هستند که رسانندگی الکتریکی آنها بین فلزات و عایق‌ها قرار دارد. یک عایق با گاف انرژی کوچک بین نوار ظرفیت و نوار رسانش، یک نیم‌رسانا خوانده می‌شود [۴]. یکی از ویژگی‌های مهم نیم رساناها این است که خواص الکتریکی آنها با تغییر اندازه، برانگیختگی نوری و میزان ناخالصی به نحو محسوسی تغییر می‌کند. به همین دلیل مواد نیم‌رسانا به عنوان یک انتخاب مناسب برای تحقیق در زمینه‌های قطعات الکترونیکی و اپتوالکترونیکی<sup>۳</sup> به شمار می‌رود. در دهه‌های اخیر پیشرفت در مواد نیم‌رسانا منجر به پیشرفت در وسایل الکترونیکی و اپتوالکترونیکی شده است. رسانندگی الکتریکی نیم رساناها مختلف است و با هر دو علامت مثبت و منفی و تابعی از مقدار ناخالصی، دما و باری که الکترون‌ها حمل می‌کنند می‌باشد [۶]. قابلیت کنترل رسانندگی الکتریکی نیم رساناها باعث کاربردهای منحصر به فردی از این مواد در وسایل الکترونیکی مانند ترانزیستورها و همچنین وسایل اپتوالکترونیکی برای تولید و آشکارسازی تابش الکترومغناطیس می‌شود. برای تعیین خواص قطعات الکترونیکی و یا اپتوالکترونیکی مانند دیودها، لیزرها و ترانزیستورها شناخت جزئیات دقیق ساختارهای نواری در مواد نیمه رسانا بسیار ضروری است. یکی از لازمه‌های کار در نیم رساناها مقایسه ساختارهای نواری در مقیاس حجم بزرگ با مقیاس نانویی می‌باشد. تمام تلاش‌ها بر روی شناسایی و بازسازی در ساختارهای نواری در نزدیک گاف انرژی<sup>۴</sup> است که این گاف، انرژی سطح بالانس<sup>۵</sup> یا ظرفیت را از نوار رسانش جدا می‌کند. بهینه سازی نیمه رساناهای گاف انرژی مستقیم و گاف غیر مستقیم و کاربردی کردن آنها یکی از روش‌های مطالعه روی نیمه‌رساناها است [۷-۸]. همچنان که می‌دانیم در یک نیم رسانای گاف مستقیم الکترون‌ها در پایین ترین نوار رسانش<sup>۶</sup> می‌توانند با حفره‌های در بالاترین نوار ظرفیت با گسیل یک فوتون باز ترکیب شوند ولی در نیم‌رساناهای با گاف غیرمستقیم این فرآیند برای پایستگی تکانه می‌بایست با گسیل و یا جذب فوتون صورت پذیرد. در حال حاضر تحقیقات زیادی بر

<sup>1</sup> Nucleation

<sup>2</sup> Spontaneous Nucleation

<sup>3</sup> Optoelectronic Devices

<sup>4</sup> Energy Band Gap

<sup>5</sup> Valance Band

<sup>6</sup> Conduction Band

اساس تولید مواد نیمه رسانا در مقیاس نانو انجام می پذیرد. برای تولید این مواد ریز ساختار، می توان با تغییر دادن ترکیبات در مقیاس لایه اتمی و تغییر در ساختار الکترونی، خواص الکترونی بهینه و حتی اپتوالکترونیکی را با تغییر در ساختار نواری بدست آورد. گاهی اوقات در مقیاس های بزرگ، تهیه و بهبود خواص نیمه رساناها تقریباً کاری غیر ممکن است. محدود کردن حرکت الکترون به ابعاد پایین تر، چگالی حالت ها را در نزدیکی لبه های نواری بسیار افزایش می دهد و مقدار انرژی الکترون را به طور قابل ملاحظه ای تغییر می دهد.

## ۱-۵ ساختارهای کوانتومی

در ساختارهایی با مقیاس نانو، حرکت الکترون ها در یک، دو و یا سه جهت در فضا محدود شده و در نتیجه ساختارهای کوانتومی به وجود می آیند. از آن جا که محدودیت حرکت در حد چند انگستروم باعث بروز خواص کوانتومی برای حامل ها می شود، به این ساختارها، ساختارهای کوانتومی می گویند. وقتی که حرکت تنها در یک جهت محدود شود، در حالی که حرکت در دو جهت دیگر آزاد است، یک چاه کوانتومی<sup>۱</sup> داریم. وقتی که محدودیت در دو بعد اعمال شود، با سیم کوانتومی<sup>۲</sup> مواجه شده و زمانی که حرکت در هر سه بعد محدود شود یک نقطه کوانتومی داریم، به عبارتی هر سه بعد یک نقطه کوانتومی در محدوده ی نانو می باشند. در ادامه این سیستم ها را بررسی می کنیم.

### ۱-۵-۱ چاه کوانتومی

یک لایه ی نیم رسانای بسیار نازک با گاف انرژی مشخص که بین دو نیم رسانای دیگر با گاف انرژی بزرگتر قرار گرفته شود، به طوری که در آن حرکت حامل های بار در یک راستا محدود و در دو راستای دیگر محدودیتی بر حرکت حامل های بار اعمال نشود، تشکیل چاه کوانتومی می دهد. این سیستم ها را ساختارهای شبه دو بعدی نیز می نامند. در چاه کوانتومی ضخامت نیم رسانای با گاف کوچکتر بایستی از مرتبه ی طول موج دو بروی<sup>۳</sup> حامل ها بوده و یا از پویس آزاد میانگین آنها بسیار کوچکتر باشد تا اثرات پیکر کوانتومی در این ساختار قابل ملاحظه شود.

### ۱-۵-۲ سیم کوانتومی

سیستم هایی که در آنها حرکت حامل های بار در دو راستا محدود شوند و تنها در راستای محور سیم آزادی حرکت داشته باشند، سیم های کوانتومی یا ساختارهای شبه یک بعدی می نامند. محدودیت دو بعدی اعمال شده در سیم های کوانتومی سبب کوانتیدگی بیشتر ترازهای انرژی و در نتیجه باعث تغییر توزیع چگالی حالت های آن در مقایسه با چاه کوانتومی می گردد.

نانوسیم ها انواع مختلفی دارند، از جمله نانوسیم های فلزی، نانوسیم های آلی و نانوسیم های نیمه هادی. کاربرد سیم های کوانتومی در لیزرهای سیم کوانتومی، وسایل مغناطیسی، سنسورهای شیمیایی و

<sup>1</sup> Quantum Well

<sup>2</sup> Quantum Wier

<sup>3</sup> Broglie Wavelength