

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان
دانشکده‌ی علوم
گروه فیزیک

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد
فیزیک گرایش اتمی و مولکولی (لیزر)

بررسی جذب خطی و غیرخطی نقاط کوانتومی استوانه‌ای گالیم
آرسنید با در نظر گرفتن برهم‌کنش اسپین - مدار

استاد راهنما:

دکتر حسن رنجبر عسکری

استاد مشاور:

محمد خانزاده

دانشجو:

طیبه رشیدی

اسفند ۱۳۹۱

تمامی حقوق مادی مترتب بر نتایج، مطالعات، ابتکارات و
نوآوری‌های حاصل از پژوهش موضوع این پایان نامه
متعلق به دانشگاه ولی عصر(عج)رفسنجان است.

سپاس‌گزاری:

به درگاه کبریاء و عظمت پروردگار سپاس و ستایش می‌گذارم که به مادرش معرفت و کلمه‌ی شکر آموخت. به روی مادرهای مینش و دانش بکشاود ما را به سوی معنی توحید و حقیقت اخلاص هدایت فرمود و نعمت دانش و مینش را از برکت اخلاص و توحید به ما ارزانی داشت.

الهی حمد و شتای بی‌پایان ما سرور اوست و این تویی که حمد و شتای ازلی و ابدی را سروراری. ما را در زیباترین اسلوب‌ها، به صورتی زیبا آفریدی و نعمت بی‌دریغ خویش را به ما ارزانی داشتی. این تویی که به انسان ناپخته قدرت عظمی بخشیده‌ای و موجودی ناتوان را بر توانا ترین موجودات خویش سیطره و سلطنت داده‌ای. درهای حاجات را از همه سمت به روی ما فروستی و در عوض از خزانه‌ی لایزال خویش درهای غنای ما گشودی. چگونه سپاس تو توانیم گفت؟ با کدام دست توانا و زبان گنگ از عهده‌ی شکر تو توانیم برآمد؟ هرگز، هرگز، دست‌های خسته و زبان‌های در مانده ما حق شکر تو را ادا نخواهد کرد و هرگز آن یاراد نفس ما نیست که به ستایش تو بر خیزیم و تو را آن چنان که شایسته‌ای بتائیم.

آن چنان سپاس و ستایش گوئیم که عمرمان در ادای سپاس و ستایشت به سر رسد تا از رضایت و عنایت هر چه بیش تر و بیش تر بهره‌مند گردیم.

سپاس صمیمانه دارم از استاد صبور و بزرگوارم جناب آقای دکتر حسن رنجبر عسکری که در کمال سعی صدر، با حسن خلق و فروتنی همواره راهنمای من در انجام این پایان نامه بوده است. از استاد فریخته و گرامی جناب آقای محمد خانداده که زحمت مشاوره‌ی این پایان نامه را به عهده داشته‌اند، کمال تشکر را دارم. سپاس صمیمانه دارم از خانواده‌ام که همواره در طول تحصیل متحمل زحمت بوده‌اند و وجودشان شادی، بخش و صفایشان مایه آرامش من است، پدر و مادر عزیزم که گرامی امید بخش و وجودشان بهترین پشتیبان است، خواهران و برادرانم که مایه دلگرمی من بوده‌اند و همسر مهربانم که امید بودن و بهترین تکیه‌گاهم است.

پروردگارا: توفیقم ده که هر لحظه شکر گزار و جو بگوی محبت ایشان باشم.

تقدیم بہ:

روان پاک برادرم شہید حسین رشیدی

چکیده

در این پژوهش ابتدا ضریب ژیرومغناطیسی نقطه‌ی کوانتومی استوانه‌ای گالیم آرسنید با پتانسیل سهموی، را در حضور میدان‌های خارجی و برهم‌کنش اسپین-مدار راشبا، بررسی کرده و در ادامه با استفاده از رهیافت ماتریس چگالی، ضرایب جذب خطی و غیرخطی، مورد مطالعه قرار می‌گیرند. با در نظر گرفتن تقریب جرم موثر و با استفاده از نظریه‌ی اختلال، معادله‌ی شرودینگر را برای نقطه کوانتومی حل کرده و ویژه‌مقادیر انرژی و ویژه حالت‌ها محاسبه می‌شوند، سپس با به دست آوردن اختلاف انرژی برای اسپین بالا و اسپین پایین، ضریب ژیرومغناطیسی محاسبه می‌شود. نتایج نشان می‌دهند با افزایش ابعاد نقطه‌ی کوانتومی، ضریب ژیرومغناطیسی به مقدار واقعی خودش در حالت توده‌ای نزدیک می‌شود. با محاسبه‌ی ضرایب جذب، مشاهده شد که کاهش ابعاد نقطه‌ی کوانتومی، باعث افزایش انرژی فوتون برای گذارهای داخل نواری، می‌شود، و با در نظر گرفتن برهم‌کنش اسپین-مدار، ضرایب جذب به طور ناچیزی تغییر می‌کنند.

واژگان کلیدی: نقاط کوانتومی استوانه‌ای گالیم آرسنید، برهم‌کنش اسپین-مدار، ضریب جذب

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۵	فصل دوم: نقاط کوانتومی و برهم‌کنش اسپین-مدار
۵	۱-۲ فیزیک نیم‌رساناها
۷	۲-۲ اکسایتون‌ها
۸	۳-۲ تقریب جرم موثر
۱۱	۴-۲ فیزیک نیم‌رساناهای کم‌بعدی
۱۱	۱-۴-۲ چاه کوانتومی
۱۱	۲-۴-۲ سیم کوانتومی
۱۱	۳-۴-۲ نقطه کوانتومی
۱۲	۵-۲ ویژگی‌های نقاط کوانتومی
۱۳	۶-۲ روش ساخت نقاط کوانتومی
۱۵	۷-۲ کاربرد نقاط کوانتومی
۱۵	۱-۷-۲ پزشکی
۱۶	۲-۷-۲ دیود نورانی
۱۶	۳-۷-۲ سلول خورشیدی
۱۷	۸-۲ خاصیت مغناطیسی مداری
۱۸	۹-۲ الکترون چرخان
۲۰	۱۰-۲ برهم‌کنش اسپین-مدار
۲۰	۱-۱۰-۲ برهم‌کنش اسپین-مدار در اتم‌ها
۲۲	۲-۱۰-۲ برهم‌کنش اسپین-مدار در نانوساختارها
۲۳	۱۱-۲ اسپینترونیک
۲۴	۱۲-۲ کامپیوترهای کوانتومی
۲۶	فصل سوم: ویژگی‌های اپتیکی خطی و غیرخطی
۲۶	۱-۳ مقدمه
۲۶	۲-۳ ویژگی‌های اپتیکی GaAs
۳۰	۳-۳ فرآیندهای پارامتریک و غیرپارامتریک
۳۱	۴-۳ برهم‌کنش نور با ماده
۳۲	۵-۳ نظریه‌ی اختلال
۳۵	۶-۳ روش ماتریس چگالی در مکانیک کوانتومی

فصل چهارم: بررسی ضریب ژیرومغناطیسی	۴۱
۱-۴ مقدمه	۴۱
۲-۴ تئوری	۴۲
۳-۴ محاسبه‌ی ضریب ژیرومغناطیسی	۴۵
۴-۴ محاسبات عددی و نتایج	۴۷
فصل پنجم: بررسی ضریب جذب خطی و غیر خطی	۵۰
۱-۵ مقدمه	۵۰
۲-۵ حل معادله‌ی شرودینگر	۵۰
۳-۵ اولین تراز داخلی نوار رسانش	۵۲
۴-۵ دومین تراز داخلی نوار رسانش	۵۳
۵-۵ سومین تراز داخلی نوار رسانش	۵۴
۶-۵ چهارمین تراز داخلی نوار رسانش	۵۴
۷-۵ محاسبه‌ی ضریب جذب	۵۵
۱-۷-۵ گذار از اولین تراز به دومین تراز نوار رسانش	۵۶
۲-۷-۵ گذار از اولین تراز به سومین تراز نوار رسانش	۵۷
۳-۷-۵ گذار از دومین تراز به سومین تراز نوار رسانش	۵۸
۴-۷-۵ گذار از اولین تراز به چهارمین تراز نوار رسانش	۵۸
۸-۵ محاسبات عددی و نتایج	۶۰
۱-۸-۵ بحث و بررسی ضرایب جذب از اولین تراز به دومین تراز نوار رسانش	۶۰
۲-۸-۵ بحث و بررسی ضرایب جذب از اولین تراز به سومین تراز نوار رسانش	۶۴
۳-۸-۵ بحث و بررسی ضرایب جذب از دومین تراز به سومین تراز نوار رسانش	۶۸
فصل ششم: نتیجه‌گیری	۷۷
منابع	۸۰

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل (۱-۲): نمایی توصیفی از تولید تشدید و غیرتشدید اکسایتون [۲۱].....	۷
شکل (۲-۲): وجود کمینه در $k = 0$ در مرکز منطقه بریلوئن [۲۲].....	۸
شکل (۳-۲): طرحی از نوارهای انرژی برای جرم‌های مؤثر متفاوت، (الف) نوار دارای جرم مؤثر مثبت کوچکی است، (ب) نوار دارای جرم مؤثر مثبت بزرگی است، و (ج) نوار دارای جرم مؤثر منفی است [۲۲].....	۱۰
شکل (۴-۲): افزایش گاف انرژی با کاهش اندازه.....	۱۲
شکل (۵-۲): جابه‌جایی به سمت آبی با کاهش اندازه.....	۱۳
شکل (۶-۲): مراحل تشکیل یک سیم کوانتومی یا یک نقطه‌ی کوانتومی به وسیله‌ی لیتوگرافی با باریکه الکترونی. (الف) پوشاندن چاه کوانتومی با رزیست، (ب) تاباندن نور با محافظت نمونه با یک الگو، (پ) آرایش پس از حل کردن قسمت تابش دیده‌ی رزیست به کمک یک محلول ظهور، (ت) پس از اضافه کردن پوشش میانی لایه برداری، (ث) آرایش پس از حذف باقیمانده‌ی رزیست، (ج) آرایش پس از لایه برداری قسمتهایی از چاه کوانتومی، (ت) نانو ساختار نهایی روی زیرلایه پس از حذف پوشش میانی لایه برداری [۲۴].....	۱۴
شکل (۷-۲): مکان‌یابی و درمان تومور با استفاده از تزریق نقاط کوانتومی.....	۱۶
شکل (۸-۲): سلول خورشیدی با فناوری نقاط کوانتومی.....	۱۷
شکل (۱-۳): نمایی از (الف) ساختار سولفید روی (ب) ساختار الماسی.....	۲۷
شکل (۲-۳): ساختار نواری GaAs [۲۲].....	۲۷
شکل (۳-۳): شکافتگی تراز انرژی اتمی برای یک ترکیب دوتایی مانند GaAs [۲۲].....	۲۸
شکل (۴-۳): ساختار نواری GaAs نزدیک $k = 0$ شامل برهم‌کنش اسپین-مدار.....	۲۹
شکل (۵-۳): طیف جذبی GaAs (الف) دمای پایین (ب) دمای اتاق.....	۳۰
شکل (۱-۴): نمودار g-فاکتور بر حسب شعاع نقطه‌ی کوانتومی.....	۴۷
شکل (۲-۴): نمودار g-فاکتور بر حسب ارتفاع نقطه‌ی کوانتومی.....	۴۸
شکل (۳-۴): نمودار g-فاکتور بر حسب شدت برهم‌کنش اسپین-مدار.....	۴۸
شکل (۴-۴): نمودار g-فاکتور بر حسب میدان مغناطیسی.....	۴۹
شکل (۵-۴): نمودار g-فاکتور بر حسب میدان الکتریکی.....	۴۹
شکل (۱-۵): جذب خطی بر حسب انرژی فوتون برای شعاع‌های متفاوت.....	۶۰
شکل (۲-۵): جذب خطی بر حسب انرژی فوتون، برای ارتفاع‌های متفاوت.....	۶۱
شکل (۳-۵): جذب غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای شعاع‌های متفاوت.....	۶۱
شکل (۴-۵): جذب غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای ارتفاع‌های متفاوت.....	۶۲
شکل (۵-۵): جذب کل، خطی و غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای شعاع‌های متفاوت.....	۶۲
شکل (۶-۵): جذب کل، خطی و غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای ارتفاع‌های متفاوت.....	۶۳

- شکل (۷-۵): جذب خطی بر حسب انرژی فوتون برای شعاع‌های متفاوت ۶۴
- شکل (۸-۵): جذب خطی بر حسب انرژی فوتون، برای ارتفاع‌های متفاوت ۶۵
- شکل (۹-۵): جذب غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای شعاع‌های متفاوت ۶۵
- شکل (۱۰-۵): جذب غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای ارتفاع‌های متفاوت ۶۶
- شکل (۱۱-۵): جذب کل، خطی و غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای شعاع‌های متفاوت ۶۶
- شکل (۱۲-۵): جذب کل، خطی و غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای ارتفاع‌های متفاوت ۶۷
- شکل (۱۳-۵): جذب خطی بر حسب انرژی فوتون برای $R \leq 10nm$ ۶۸
- شکل (۱۴-۵): جذب خطی بر حسب انرژی فوتون برای $R \geq 10nm$ ۶۸
- شکل (۱۵-۵): جذب خطی بر حسب انرژی فوتون، برای $L \leq 10nm$ ۶۹
- شکل (۱۶-۵): جذب خطی بر حسب انرژی فوتون، برای $L \geq 10nm$ ۶۹
- شکل (۱۷-۵): جذب غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای $R \leq 10nm$ ۷۰
- شکل (۱۸-۵): جذب غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای $R \geq 10nm$ ۷۰
- شکل (۱۹-۵): جذب غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای $L \leq 10nm$ ۷۱
- شکل (۲۰-۵): جذب غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای $L \geq 10nm$ ۷۱
- شکل (۲۱-۵): جذب کل، خطی و غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای $R \leq 10nm$ ۷۲
- شکل (۲۲-۵): جذب کل، خطی و غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای $R \geq 10nm$ ۷۳
- شکل (۲۳-۵): جذب کل، خطی و غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای $L \leq 10nm$ ۷۴
- شکل (۲۴-۵): جذب کل، خطی و غیرخطی بر حسب انرژی فوتون برای $L \geq 10nm$ ۷۴
- شکل (۲۵-۵): جذب کل بر حسب انرژی فوتون با شدت‌های متفاوت ۷۴
- شکل (۲۶-۵): جذب غیرخطی بر حسب انرژی فوتون با شدت‌های متفاوت ۷۵
- شکل (۲۷-۵): جذب کل بر حسب انرژی فوتون، تحت تاثیر میدان الکتریکی متفاوت ۷۵
- شکل (۲۸-۵): جذب کل بر حسب انرژی فوتون، تحت تاثیر میدان مغناطیسی متفاوت ۷۶

فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
جدول (۱-۵): مقایسه‌ی ضریب جذب کل و انرژی فوتون با و بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش اسپین-مدار برای شعاع‌های متفاوت.....	۶۳
جدول (۲-۵): مقایسه‌ی ضریب جذب کل و انرژی فوتون با و بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش اسپین-مدار برای ارتفاع‌های متفاوت.....	۶۴
جدول (۳-۵): مقایسه‌ی ضریب جذب کل و انرژی فوتون با و بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش اسپین-مدار برای شعاع‌های متفاوت.....	۶۷
جدول (۴-۵): مقایسه‌ی ضریب جذب کل و انرژی فوتون با و بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش اسپین-مدار برای ارتفاع‌های متفاوت.....	۶۷
جدول (۵-۵): مقایسه‌ی ضریب جذب کل و انرژی فوتون با و بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش اسپین-مدار برای شعاع‌های متفاوت.....	۷۴
جدول (۶-۵): مقایسه‌ی ضریب جذب کل و انرژی فوتون با و بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش اسپین-مدار برای ارتفاع‌های متفاوت.....	۷۴

فصل اول

مقدمه

نقاط کوانتومی به دلیل کاربرد وسیع در فناوری، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. اخیراً تلاش‌های چشم‌گیری برای شناخت ویژگی‌های اپتیکی و الکترونیکی این نقاط انجام گرفته است که با کنترل این ویژگی‌ها می‌توان از آن‌ها در میکروالکترونیک و اپتیک غیرخطی استفاده کرد. از طرف دیگر، به دلیل پیشرفت در زمینه‌ی نانوفناوری، ساختارهای نیم‌رسانا با بعد کم، از قبیل چاه‌های کوانتومی [۱، ۲]، سیم‌های کوانتومی [۳] و به ویژه نقاط کوانتومی [۴] مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ساختارها نامزد طبیعی برای ابزارهای ایتوالکترونیکی به شمار می‌روند. اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی و همچنین در نظر گرفتن اسپین، خواص اپتیکی و گذارهای الکترون در این ساختارها را تغییر می‌دهد و همچنین باعث جابه‌جایی در ترازهای انرژی می‌شود [۵، ۶].

در بررسی خواص اپتیکی و الکترونیکی نانو ساختارهای نیم‌رسانا، اسپین نقش مهمی را ایفا می‌کند، به کارگیری درجه آزادی اسپینی و بررسی رفتار آن علاوه بر اهمیت نظری، در طراحی و ساخت دستگاه‌های اپتیکی، الکترونیکی و اسپینترونیکی^۱ کاربرد زیادی دارد. با به کار بردن

^۱ Spintronics

اسپین به انرژی کمتری نیاز بوده و گرمای کمتری نیز تولید می‌شود که یک روش امیدوارکننده برای افزایش حافظه و کاهش توان مورد نیاز کامپیوترهاست، از این رو پژوهشگران امیدوارند با پیشرفت اسپینترونیک، کامپیوترهای کوانتومی حاصل شوند [۷].

اسپینترونیک علم استفاده از اسپین الکترون‌ها در الکترونیک است، اسپین الکترون تحولی عظیم در دستگاه‌های میکروالکترونیکی به وجود خواهد آورد. قطعات الکترونیکی مرسوم تنها از بار الکتریکی استفاده می‌کنند در حالی که قطعات اسپینترونیکی از هر دو ویژگی بهره می‌گیرند. در آینده نزدیک این شاخه از علم می‌تواند به ساخت کامپیوترهای کوانتومی که میلیون‌ها بار سریع‌تر از ابرکامپیوترهای امروزی هستند و اندازه آن‌ها جیبی است، منجر شود. به این ترتیب یک علم کاملاً جدید الکترونیک مبتنی بر اسپین به وجود می‌آید و اصول و قوانین کنونی علم الکترونیک را دگرگون می‌سازد.

یکی از جنبه‌های مهم رفتار اسپین، در برهم‌کنش اسپین-مدار دیده می‌شود، این نوع برهم‌کنش به دلیل آشکار ساختن جهت اسپین و آشکارسازی نوری توجه زیادی را به خود جلب کرده است. یک نوع برهم‌کنش اسپین-مدار، برهم‌کنش راشبا است که ناشی از عدم تقارن موجود در شبکه بلور است و این عدم تقارن می‌تواند ناشی از سه عامل باشد [۸]:

۱- میدان الکتروستاتیکی داخلی

۲- اعمال میدان‌های خارجی

۳- وجود میدان درفصل مشترک‌ها

اگر این عدم تقارن ناشی از اعمال میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی خارجی باشد، می‌توانیم با کنترل این میدان‌های خارجی شدت برهم‌کنش راشبا را کنترل کنیم.

پژوهشگران مطالعات گسترده‌ای، در زمینه‌ی تاثیر برهم‌کنش اسپین-مدار راشبا انجام داده‌اند، گاهی^۱ به بررسی نظری اثرات راشبا روی یک نقطه‌ی کوانتومی نامتقارن در حضور میدان مغناطیسی پرداخته است [۹]. رضایی تاثیر برهم‌کنش اسپین-مدار را روی ترازهای انرژی و g-فاکتور یک نقطه کوانتومی کرووی مورد بررسی قرار داده است [۵]. یکی دیگر از کارهای انجام شده مطالعه‌ی جفت شدگی اسپین-مدار راشبا تحت اثر کوانتومی هال^۲

^۱ Cahay

^۲ Quantum Hall Effect

است [۱۰]. گاورنل^۱ و همکارش تأثیر شدید این برهم‌کنش را روی ساختار نواری، در یک سیم کوانتومی مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۱].

هم‌چنین بررسی خواص اپتیکی به علت نقش مهم آن‌ها در ابزارهای کاربردی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. اگر شدت نوری که به ماده تابیده می‌شود، به اندازه‌ی کافی ضعیف باشد در این صورت پاسخ محیط، از شدت نور فرودی مستقل است که به قابلیت خطی اپتیکی معروف می‌باشد، در غیر این صورت با قابلیت‌های غیرخطی اپتیکی مواجه‌ایم. اساساً تحت برهم‌کنش‌های به اندازه‌ی کافی شدید، خواص نوری تمامی نیم‌رساناها از خود مشخصه‌های غیرخطی بروز می‌دهند. این خواص می‌توانند باعث ایجاد اثراتی نظیر جذب وابسته به برانگیزش^۲، ترکیب غیرخطی موج، دوپایداری نوری، یا سایر ناپایداری‌های نوری گردند. بعضی از این اثرات دارای اهمیت زیادی می‌باشند چون می‌توانند برای کاربردهایی در ابزارهای سوئیچینگ نوری^۳، دریچه‌های منطق نوری یا حتی اجرای محاسبات نوری مفید واقع شوند.

شوای^۴ به بررسی فرآیند تولید هارمونیک سوم [۱۲] و بین لی^۵ به بررسی تولید هارمونیک دوم و فرآیند اصلاح اپتیکی در حضور میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی پرداخته‌اند [۱۳، ۱۴]. واثقی و همکاران به محاسبه‌ی ضریب اصلاح اپتیکی برای یک نقطه‌ی کوانتومی مکعبی با حضور برهم‌کنش اسپین-مدار پرداخته‌اند [۱۵]. مطالعه‌ی اثرات پولارونی روی ویژگی‌های خطی و غیرخطی نقطه‌ی کوانتومی استوانه‌ای و محاسبه‌ی انرژی بستگی، توابع موج و ضریب جذب برای نقطه‌ی کوانتومی کروی با پتانسیل سهموی با روش QGA^۶ و HFR^۷ از دیگر کارهای انجام شده است [۱۶، ۱۷]. هم‌چنین خواص اپتیکی غیرخطی یک نقطه‌ی کوانتومی کروی سه الکترونی با برهم‌کنش اسپین-مدار توسط حسن‌آبادی بررسی شده است [۱۸]، در همین راستا یوان^۸ به محاسبه‌ی ضرایب جذب خطی و غیرخطی برای یک نقطه‌ی کوانتومی کروی با ناخالصی مرکزی به روش اختلال پرداخته‌اند [۱۹].

¹ Governel

² Excitation-dependent absorption

³ Optical logic gates

⁴ Shuai

⁵ Bin. Li

⁶ Quantum Genetic Algoritm

⁷ Hartree-Fock-Roothaan

⁸ Yuan

در فصل دوم به معرفی نقاط کوانتومی و کاربرد آن‌ها پرداخته و در ادامه‌ی فصل، برهم-کنش اسپین-مدار را مطرح می‌کنیم. با توجه به این‌که کار اصلی این پایان‌نامه بررسی جذب اپتیکی است، در فصل سوم خواص اپتیک خطی و غیرخطی را مطرح کرده و با استفاده از رهیافت ماتریس چگالی، به محاسبه‌ی ضریب جذب می‌پردازیم. یکی از پرسش‌هایی که در طول پایان‌نامه مطرح می‌شود این است که با وجود برهم‌کنش اسپین-مدار ضریب ژیرومغناطیسی چه تغییری می‌کند، در فصل چهارم با استفاده از حل معادله شرودینگر، برای یک نقطه‌ی کوانتومی استوانه‌ای با پتانسیل محدودیت سهموی، واقع در میدان‌های خارجی، به محاسبه‌ی ضریب ژیرومغناطیسی می‌پردازیم. در فصل پنجم با استفاده از نظریه‌ی اختلال، ویژه مقادیر و ویژه حالات را به دست آورده، و به محاسبه‌ی ضریب جذب خطی و غیرخطی نقطه‌ی کوانتومی استوانه‌ای *GaAs* می‌پردازیم. در فصل ششم خلاصه‌ای از محاسبات را ارائه داده و مطالب را جمع‌بندی می‌کنیم.

فصل دوم

نقاط کوانتومی و برهم‌کنش اسپین-مدار

بخش اول: معرفی نقاط کوانتومی

۱-۲ فیزیک نیم‌رساناها

از آغاز تمدن، ماده در حالت جامد همیشه جالب توجه بوده است. انسان‌های اولیه به خاطر زیبایی مواد جامد، مثلاً در جواهرات متقارن و درخشان و کاربرد آن‌ها در ابزارهای فلزی، به آن‌ها علاقمند بودند. کاربردهای صنعتی باعث شدند فیزیک حالت جامد به یکی از شاخه‌های مهم فیزیک تبدیل شود. تقارن زیبا و نظم جامدهای بلوری باعث پیشرفت سریع فیزیک جامدهای بلوری در قرن بیستم شد، هم‌چنین تلاش زیادی برای شناخت جامدات بی‌شکل، به خاطر کاربرد آن‌ها در سلول‌های خورشیدی، عناصر حافظه و موجبرهای نوری شده است.

در بین گروه جامدات، نیم‌رساناها داری خواص قابل توجهی هستند و کاربردهای فراوانی دارند، اختراع ترانزیستور در قرن بیستم باعث شد این دسته از مواد جایگاه واقعی خود را بیابند. وقتی یک جامد تشکیل می‌شود، ترازهای انرژی اتم‌ها پهن می‌شود و نوارهایی که بین آن‌ها گاف‌های ممنوع است، شکل می‌گیرند. انرژی الکترون‌ها می‌تواند هر یک از مقادیر موجود در

یکی از نوارها را داشته باشد، اما این انرژی‌ها نمی‌توانند متناظر با مقادیر موجود در یکی از گاف‌های بین نوارها باشند. الکترون‌های ظرفیت که پیوندهای بلوری را شکل می‌دهند، نوارهایی را اشغال می‌کنند که نوار ظرفیت^۱ نامیده می‌شوند، همچنین اولین نوار خالی یا نیمه خالی بعد از نوار ظرفیت به نوار رسانش^۲ موسوم است. نیمرساناها را به عنوان موادی تعریف می‌کنیم که در آن‌ها نوار ظرفیت به طور کلی از الکترون‌ها پر شده باشد، و نوار رسانش خالی از الکترون باشد. و به‌طور معمول گاف انرژی در نیمرساناها در ناحیه‌ی مرئی نور و تقریباً به اندازه‌ی $E_g < 3eV$ ، و از مرتبه‌ی انرژی فوتون و یا کمتر از آن است.

می‌توان گفت که نیمرساناها در دمای اتاق عایق هستند، در این صورت هیچ الکترونی نمی‌تواند جابه‌جا شود و نوار رسانش همچنان خالی باقی می‌ماند. به عبارت دیگر دمای اتاق، $T = 300^\circ K$ ، دمای کافی برای برانگیختگی الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانش نمی‌باشد، راه دیگر برای بیان مطلب، توجه به این نکته است که مقدار گاف انرژی، به مراتب بیشتر از مقدار انرژی حرارتی $k_B T$ است، که در آن k_B ثابت بولتزمن^۳ می‌باشد.

برای انرژی‌های پایین‌تر از انرژی گاف نوار، E_g ، ماده از نظر اپتیکی شفاف است، زیرا فوتونی با انرژی کمتر از E_g نمی‌تواند باعث گذار الکترونی از نوار ظرفیت به نوار رسانش شود و در صورت جذب فوتون‌هایی با انرژی بیشتر از گاف نواری، الکترون از نوار ظرفیت به نوارهای خالی رسانش گذار داشته و رسانایی الکتریکی افزایش می‌یابد.

برای توصیف خواص اپتیکی نیمرساناها، نیازمند بررسی فرایندهای جذب اپتیکی، فوتورسانش و لومینسانس هستیم [۲۰]:

الف) جذب اپتیکی هنگامی صورت می‌گیرد که الکترون در نوار ظرفیت، یک فوتون از باریکه نوری جذب کند و به نوار رسانش گذار یابد. چنین جذبی اساساً وقتی صورت می‌گیرد که انرژی فوتون از گاف انرژی بیش‌تر باشد، جذب اپتیکی به واسطه برانگیختگی اکسایتون‌ها^۴ نیز امکان پذیر است.

¹ Valence band

² Conduction band

³ Boltzmann's constant

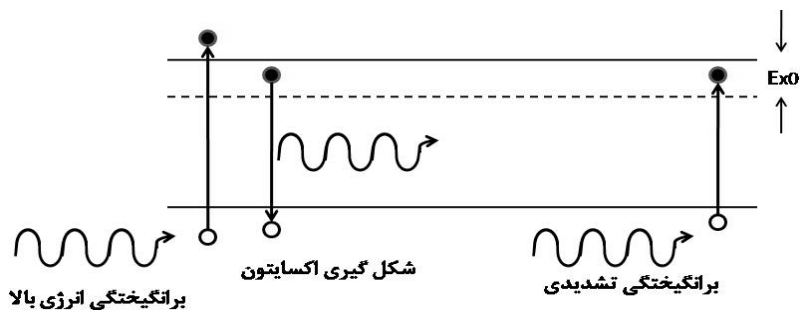
⁴ Excitons

ب) در پدیده فوتورسانش، رسانایی یک نیم‌رسانا در اثر تابش یک باریکه نوری افزایش می‌یابد. باریکه نوری سبب می‌شود حامل‌های بیش‌تری در گذر از گاف انرژی برانگیخته شوند که این خود باعث افزایش رسانایی می‌شود.

ج) لومینسانس عکس جذب اپتیکی است، الکترون‌ها ابتدا به طریقی برانگیخته شده، به تراز بالاتر می‌روند و در فرایند بازگشت به ترازهای پایین‌تر، فوتون‌هایی گسیل می‌کنند این فوتون منجر به لومینسانس می‌شود.

۲-۲ اکسایتون‌ها

برهم‌کنش کولنی بین الکترون نوار رسانش و حفره نوار ظرفیت منجر به تشکیل جفت‌های پیوندی الکترون-حفره می‌شود که اکسایتون نامیده می‌شود. به عبارتی اگر انرژی فوتون تابیده شده به یک نیم‌رسانا، قابل مقایسه با گاف نواری آن ساختار باشد، این انرژی توسط الکترون‌ها جذب شده و می‌تواند شرایط حرکت آزادانه برای یک الکترون را در ساختار بلور فراهم آورد. با توجه به شکل (۱-۲) و تحریک در انرژی بالا، اگر انرژی فوتون بزرگتر از گاف نواری باشد، از این‌رو یک الکترون آزاد به‌وجود آمده و یک حالت خالی درون نوار ظرفیت برجای می‌ماند که حفره نام دارد و رفتاری مانند ذره‌ای با بار مثبت دارد. اما در صورتی که انرژی فوتون به اندازه‌ای باشد که الکترون به تراز زیر نوار رسانش گذار یابد منجر به تشکیل اکسایتون می‌شود.



شکل (۱-۲): نمایی توصیفی از تولید تشدیدي و غیر تشدیدي اکسایتون [۲۱]

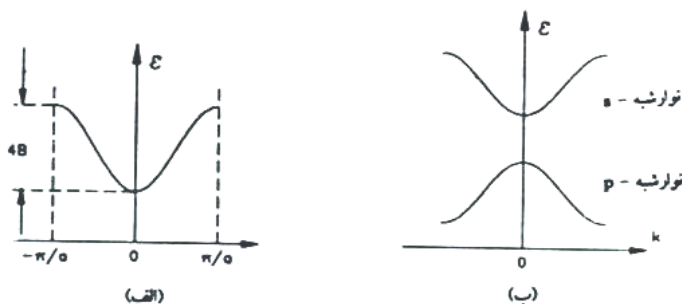
یک اکسایتون خواص یک ذره را داراست؛ متحرک است و می‌تواند در سرتاسر شبکه حرکت کنند و این شبه ذره از نظر بار الکتریکی خنثی است. همچنین، طیف‌های نوری مشخصه‌ای را به نمایش می‌گذارد. وجود اکسایتون تاثیر زیادی بر خواص الکترونی نیم‌رسانا و

جذب اپتیکی دارد، اکسایتون‌ها مسئول خطوط جذبی شدیدی هستند که در زیر انرژی گاف نوار قرار می‌گیرند. اکسایتون‌ها شباهت زیادی به اتم هیدروژن دارند که علت آن جرم بسیار بزرگ حفره نسبت به الکترون می‌باشد از این رو می‌توان نظریه‌ی بوهر را جهت بررسی خواص اکسایتون به کار برد. شعاع اکسایتونی و یا فاصله نسبی میان الکترون و حفره، نیز به همین دلیل، در اکثر مواقع شعاع بوهر اکسایتون نامیده می‌شود.

اکسایتونی که شرح دادیم یک جفت الکترون-حفره‌ی با قید ضعیف است که اکسایتون مات-وانیر^۱ نامیده می‌شود. یک اکسایتون به شدت مقید هم وجود دارد که آن را اکسایتون فرنکل^۲ می‌نامند که شبیه به حالت برانگیخته‌ی بادوام یک اتم است. این اکسایتون متحرک است و می‌تواند به وسیله‌ی برانگیختگی، بین اتم‌های مجاور در شبکه حرکت کند. تقریباً همه-ی اکسایتون‌هایی که در نیم‌رساناها با آنها مواجه‌ایم از نوع مات-وانیر هستند.

۲-۳ تقریب جرم موثر^۳

در بلورها نوارهای انرژی پهن که با گاف‌های انرژی ممنوع از یکدیگر جدا شده‌اند، جایگزین ترازهای انرژی الکترونی گسسته در اتم‌های منفرد می‌گردند. اکنون پاشندگی یک نوار انرژی برای هر نوار معین n با بردار موج k ، یعنی بستگی انرژی $\xi_n(k)$ به عدد موج بررسی می‌شود. ابتدا $\xi_n(k)$ نزدیک یک کمینه مانند $k = k_0$ بررسی می‌شود. اغلب چنین کمینه‌ای در $k = 0$ در مرکز منطقه بریلوئن رخ می‌دهد (شکل ۲-۲).



شکل (۲-۲): وجود کمینه در $k = 0$ در مرکز منطقه‌ی بریلوئن [۲۲]

بسط تیلور پاشندگی $\xi(k)$ در اطراف k_0 به صورت:

$$\xi(k) = \xi_0 + \left. \frac{d\xi}{dk} \right|_{k=k_0} (k - k_0) + \frac{1}{2} \left. \frac{d^2\xi}{dk^2} \right|_{k=k_0} (k - k_0)^2 + \dots \quad (1-2)$$

¹Mott-Wannier exciton

²Frenkel exciton

³Effective mass approximation

است، که برای مقادیر کاملاً کوچک $(k - k_0)$ ، از مراتب بالاتر که صریحاً در معادله‌ی فوق وارد نشده‌اند، صرف‌نظر می‌شود.

فرض این است که نوار $\xi(k)$ دارای یک کمینه در $k = k_0$ است، از این‌رو:

$$\left. \frac{d\xi}{dk} \right|_{k=k_0} = 0 \quad (2-2)$$

با استفاده از معادله‌ی (2-2)، معادله‌ی (1-2) به صورت :

$$\xi(k) = \xi_0 + \frac{\hbar^2(k - k_0)^2}{2m_e} \quad (3-2)$$

در خواهد آمد که در آن:

$$m_e = \frac{\hbar^2}{d^2\xi/dk^2 \Big|_{k=k_0}} \quad (4-2)$$

جرم مؤثر می‌باشد. معادله‌ی (3-2) یک نوار انرژی سهمی شکل با ثابت جرم m_e را بیان می‌کند که به آن جرم مؤثر می‌گویند. معادله‌ی (4-2) نشان می‌دهد که این جرم مؤثر با تقعر $\xi(k)$ نسبت عکس دارد. مقدار m_e متفاوت از m_0 (جرم الکترون در خلأ) است. این روش، تقریب جرم مؤثر است. در این تقریب، رفتار دینامیکی یک الکترون در بلور مانند رفتار دینامیکی یک ذره آزاد (اختلاف در جرم، $m_e \neq m_0$) بررسی می‌شود. با تقریب مرتبه اول، این تقریب جرم الکترونی نشان‌دهنده‌ی اثر پتانسیل تناوبی بلور است که بر الکترون عمل می‌کند. این امکان وجود دارد که مفهوم جرم مؤثر را به نواحی که $\xi(k)$ دارای شکل سهمی نیست (یعنی به طور مثال جملات مرتبه بالاتر در معادله (2-2) که صرف‌نظر شدنی هستند) نیز عمومیت داد. در این مورد، m_e دیگر ثابت نیست و رفتار دینامیکی الکترون در بلور به مثابه رفتار ذره‌ای با جرم متغیر (وابسته به k) است.

از آنجایی که m_e با انحنای ξ برحسب k نسبت عکس دارد، هرچه سهمی تیزتر باشد جرم مؤثر کوچکتر است. برخلاف جرم گرانشی¹، جرم مؤثر می‌تواند مثبت، منفی، صفر، یا حتی بی‌نهایت باشد. جرم مؤثر بی‌نهایت مربوط به الکترونی است که در جایگاه شبکه جایگزیده است. در این مورد، الکترون به هسته (فرض می‌شود کل جرم بلور را دربردارد) مقید می‌شود. جرم مؤثر منفی در شکل (3-2) با نواری که به سمت پایین کاو است، مربوط می‌شود. جرم

¹Gravitational mass