

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



پژوهشکده فیزیک کاربردی و تحقیقات ستاره‌شناسی

گروه فوتونیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فوتونیک گرایش الکترونیک

عنوان

بررسی حالت‌های پولاریتونی در نانوساختارهای نیم‌رسانا

استادان راهنما

دکتر اصغر عسگری

دکتر سعید شجاعی

پژوهشگر

سید مهریار علوی حجازی

بهمن ماه ۱۳۹۰

تقدیم بہ

برہمان خرم از آنم کہ جهان خرم از اوست

نغم و شادی بر عارف چہ تفاوت دارد

حمد و سپاس بی پایان پروردگار بی ہمتارا

عاشقتم بر ہمہ عالم کہ ہمہ عالم از اوست

ساقیابادہ بدہ شادی آن کاین نغم از اوست

نام خانوادگی: علوی حجازی	نام: سید مهریار
عنوان پایان نامه: بررسی حالت‌های پولاریتونی در نانوساختارهای نیم‌رسانا	
استادان راهنما: دکتر اصغر عسگری دکتر سعید شجاعی	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد رشته: فوتونیک گرایش: الکترونیک دانشگاه: تبریز دانشکده: پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی تاریخ فارغ التحصیلی: ۹۰/۱۱/۹ تعداد صفحه: ۹۸ صفحه	
کلیدواژه‌ها: نانوساختار، میکروکاواک، چاه کوانتومی، سیم کوانتومی، نقطه کوانتومی، اکسیتون، پولاریتون، شکاف رابی خلأ، جفت‌شدگی ضعیف، جفت‌شدگی قوی، مواد نیتریدی	
چکیده: در دو دهه اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در قلمرو جفت‌شدگی قوی بین نور و ماده در میکروکاواک‌های نیم‌رسانا انجام شده است. فرآیند جفت‌شدگی قوی و اندرکنش بین اکسیتون و فوتون، با انرژی‌ها و تکانه‌های یکسان، تشکیل شبه‌ذرات پولاریتون را تشریح می‌کند. علت توجه خاص به این شبه ذرات، پایین بودن جرم مؤثر درون صفحه‌ای حول مرکز منطقه اول بریلوئن در نانوساختارهای چاه کوانتومی و خواص غیرخطی آن‌هاست که امکان تولید نسل جدیدی از تقویت‌کننده‌های نوری پارامتریک، لیزرهای آستانه پایین و دیودهای نورگسیل پولاریتونی را براساس پراکندگی واداشته پولاریتون‌ها، فراهم می‌آورد. طبیعت بوزونی حالت‌های پولاریتونی، امکان رسیدن به چگالش بوز-اینشتین را در دماهای بالا میسر می‌سازد. تولید چشمه تک فوتون و ابررسانایی در دماهای بالا از دیگر مزایای کاربرد این حالت‌هاست. همچنین، این حالت‌ها می‌توانند سوییچ‌زنی را کنترل کرده، و آستانه دوپایایی را دو تا سه مرتبه مقداری کاهش دهند. میکروکاواک‌های حاوی چاه‌های کوانتومی نیم‌رسانا، نوعی از سیستم‌های آزمایشگاهی را تشکیل می‌دهند که در مطالعه فیزیک پولاریتون‌ها بسیار مناسب هستند. میزان قدرت جفت‌شدگی، به هندسه سیستم مورد مطالعه بستگی دارد. با کاهش قدرت جفت‌شدگی، حالت‌های پولاریتونی از بین می‌روند و حالت‌های خالص اکسیتون و فوتون جایگزین آن می‌شود. در این پایان‌نامه، جفت‌شدگی فوتون‌های به تله افتاده در میکروکاواک نیم‌رسانا با اکسیتون‌های یک نانوساختار نیم‌رسانای چاه کوانتومی نیتریدی مطالعه شده، با محاسبه شکاف رابی خلأ در این مواد نشان می‌دهیم که قدرت جفت‌شدگی در مواد نیتریدی چشمگیرتر از نیم‌رسانایی همچون GaAs است	

فهرست مطالب

مقدمه	۱
فصل اول: بررسی منابع و پیشینه پژوهش	۳
۱.۱. نانو ساختار	۴
۱.۱.۱. چاه کوانتومی	۶
۱.۱.۲. سیم کوانتومی	۸
۱.۱.۳. نقطه کوانتومی	۸
۱.۲. اکسیتون	۱۰
۱.۲.۱. اکسیتون در مواد کپه‌ای	۱۳
۱.۲.۲. اکسیتون در چاه کوانتومی	۱۷
۱.۳. شکاف رابی خلأ	۱۹
۱.۴. میکروکاواک	۲۲
۱.۴.۱. بازتابنده‌های توزیعی براگ	۲۲
۱.۴.۲. میکروکاواک نیم‌رسانا	۲۵
۱.۴.۳. میکروکاواک پولاریتون	۲۶
۱.۴.۴. طول عمر فوتون داخل میکروکاواک	۳۲
۱.۵. رژیم‌های جفت‌شدگی	۳۳
۱.۵.۱. رژیم جفت‌شدگی قوی	۳۶
۱.۵.۲. رژیم جفت‌شدگی بینابینی	۳۶
۱.۵.۳. رژیم جفت‌شدگی ضعیف	۳۷
۱.۶. مقایسه چند حالت	۳۷
۱.۷. نظریه هامیلتونی حالت‌های پولاریتونی	۳۸
۱.۷.۱. هامیلتونی میکروکاواک	۳۹
۱.۷.۲. فروافت پولاریتون	۴۱

فهرست مطالب

۴۲.....	۸.۱ کاربردهای حالت‌های پولاریتونی.....
۴۳.....	۹.۱ مواد نیتزیدی.....
۴۶.....	فصل دوم: مبانی و روش‌ها.....
۴۷.....	۱.۱ روش ماتریس انتقال.....
۴۷.....	۲.۱.۱ تابش عمود.....
۴۹.....	۲.۱.۲ تابش مایل.....
۵۰.....	۲.۲ پاسخدهی ماده به نور تابشی.....
۵۱.....	۲.۳ کاواک فابری- پرو.....
۵۵.....	۲.۴ اثر قطبش نور در پارامترهای بازتابنده‌های براگ.....
۵۸.....	۲.۵ محاسبه مدهای پولاریتونی.....
۶۱.....	۲.۶ رهیافت‌های مختلف در محاسبات.....
۶۲.....	۲.۷ روش تفاضل محدود.....
۶۵.....	۲.۸ هامیلتونی اکسیتون در چاه کوانتومی.....
۶۹.....	۲.۹ محاسبه قدرت نوسان کنندگی.....
۷۰.....	۲.۱۰ محاسبات مربوط به مواد نیتزیدی.....
۷۳.....	فصل سوم: بحث و نتیجه‌گیری.....
۷۴.....	۳.۱.۱ مد میکروکاواک.....
۷۴.....	۳.۱.۱.۱ بازتابنده‌های توزیعی براگ.....
۷۵.....	۳.۱.۱.۱ تابش عمودی.....
۷۸.....	۳.۱.۱.۲ تابش مایل - مد TE
۷۸.....	۳.۱.۱.۳ تابش مایل - مد TM
۷۹.....	۳.۱.۲ میکروکاواک نیم‌رسانا.....
۷۹.....	۳.۱.۲.۱ تابش عمودی.....

فهرست مطالب

۸۰	.....۳. ۱. ۲. ۲. تابش مایل - مد TE
۸۰	.....۳. ۱. ۲. ۳. تابش مایل - مد TM
۸۱	.....۳. ۲. اکسیتون در چاه کوانتومی.....
۸۲	.....۳. ۲. ۱. ترازهای انرژی الکترون در چاه کوانتومی GaN
۸۳	.....۳. ۲. ۲. ترازهای انرژی حفره در چاه کوانتومی GaN
۸۵	.....۳. ۲. ۳. انرژی بستگی اکسیتون در چاه کوانتومی GaN
۸۵	.....۳. ۳. میکروکاوک پولاریتون
۸۷	.....۳. ۳. ۱. شاخه‌های پولاریتونی در مد TE
۸۸	.....۳. ۳. ۲. شاخه‌های پولاریتونی در مد TM
۹۰	.....۳. ۴. نتیجه‌گیری.....
۹۱	.....۳. ۵. پیشنهادات.....
۹۲	.....منابع و مراجع.....

فهرست اشکال و جداول

فصل اول: بررسی منابع و پیشینه پژوهش

- شکل ۱.۱. ۱. تعداد ابعاد محدودیت، برای ساختارهای مختلف..... ۶
- شکل ۱.۲. ۲. ساختار یک چاه کوانتومی تکتابی..... ۶
- شکل ۱.۳. ۳. ساختار یک چاه کوانتومی چندتابی..... ۷
- شکل ۱.۴. ۴. اعمال محدودیت در بعد دوم و تشکیل ساختار یک سیم کوانتومی ۸
- شکل ۱.۵. ۵. اعمال محدودیت در بعد سوم و تشکیل ساختار یک نقطه کوانتومی ۹
- شکل ۱.۶. ۶. چگالی حالت‌ها..... ۹
- شکل ۱.۷. ۷. تناوب فضایی در مواد نیم‌رسانا..... ۱۰
- شکل ۱.۸. ۸. مقایسه ترازهای مجاز انرژی در اتم، مولکول و بلور..... ۱۱
- شکل ۱.۹. ۹. نمایش باند ظرفیت و باند رسانش برای یک جسم جامد و مقایسه با ترازهای اتمی..... ۱۲
- شکل ۱.۱۰. ۱۰. مفهوم حفره..... ۱۲
- شکل ۱.۱۱. ۱۱. حرکت حفره..... ۱۲
- شکل ۱.۱۲. ۱۲. نمایش حفره در ساختار یک جسم جامد..... ۱۳
- شکل ۱.۱۳. ۱۳. برهم‌کنش کولنی الکترون و حفره..... ۱۳
- شکل ۱.۱۴. ۱۴. تشکیل ترازهای اکسیتونی و محل قرار گرفتن آن..... ۱۴
- شکل ۱.۱۵. ۱۵. حالت‌های پیوستار و انرژی بستگی اکسیتونی..... ۱۵
- شکل ۱.۱۶. ۱۶. طیف جذبی با در نظر گرفتن برهم‌کنش کولنی (خطوط پر) و بدون در نظر گرفتن برهم‌کنش کولنی (خطوط خط‌چین)..... ۱۵
- شکل ۱.۱۷. ۱۷. مقایسه اکسیتون‌های فرنکل و ونیر- مات..... ۱۶
- شکل ۱.۱۸. ۱۸. انرژی بستگی اکسیتون در چاه کوانتومی..... ۱۸
- شکل ۱.۱۹. ۱۹. قاعده گزینش، در چاه کوانتومی، برای گذارهای اکسیتونی..... ۱۸
- شکل ۱.۲۰. ۲۰. اثر برهم‌کنش اتم- کاواک و حالت‌های پوشیده..... ۲۱
- شکل ۱.۲۱. ۲۱. مشاهده شکافتگی رابی خلأ در اتم سدیم..... ۲۲
- شکل ۱.۲۲. ۲۲. لایه‌های دی‌الکتریک متناوب با ضرایب شکست کم و زیاد..... ۲۳

فهرست اشکال و جداول

- شکل ۱. ۲۳. نحوه تداخل سازنده در یک بازتابنده توزیعی براگ..... ۲۳
- شکل ۱. ۲۴. طیف بازتاب از یک بازتابنده توزیعی براگ..... ۲۴
- شکل ۱. ۲۵. مدهای TE و TM و صفحه تابش..... ۲۴
- شکل ۱. ۲۶. طیف بازتاب از یک میکروکاواک نیمرسانا به همراه نمایش ضریب کیفیت آن..... ۲۵
- شکل ۱. ۲۷. مشاهده شکافتگی رابی خلأ در نانوساختار چاه کوانتومی..... ۲۷
- شکل ۱. ۲۸. از بین رفتن تبهگنی بر اثر جفت‌شدگی اکسیتون با فوتون و تشکیل حالت‌های پولاریتونی در فرکانس تشدید..... ۲۷
- شکل ۱. ۲۹. منحنی پاشندگی حالت‌های پولاریتونی بر حسب بردار موج درون صفحه‌ای..... ۲۸
- شکل ۱. ۳۰. ابعاد نوعی یک میکروکاواک و توزیع میدان در آن..... ۲۹
- شکل ۱. ۳۱. جذب چاه کوانتومی در میکروکاواک برای تعداد متفاوت از بازتابنده‌های براگ..... ۳۰
- شکل ۱. ۳۲. راستای اندرکنش فوتون با اکسیتون چاه کوانتومی..... ۳۱
- شکل ۱. ۳۳. نمایش شکاف رابی در جفت‌شدگی اکسیتون - فوتون..... ۳۱
- شکل ۱. ۳۴. مقایسه منحنی‌های پاشندگی برای مدهای TE و TM ۳۲
- شکل ۱. ۳۵. تغییرات طیف بازتابنده براگ با دما..... ۳۵
- شکل ۱. ۳۶. کاهش شکاف طیف لومینسانس، با افزایش دما برای دو پهنای باند مختلف اکسیتون..... ۳۶
- شکل ۱. ۳۷. محدوده جفت‌شدگی قوی، بینابینی و ضعیف به صورت تابعی از پهنای خط دو نوسانگر..... ۳۷
- جدول ۱. ۱. مقایسه درجات آزادی اکسیتون و فوتون و قدرت جفت‌شدگی در میکروکاواک، چاه کوانتومی و ماده کپه‌ای..... ۳۸
- شکل ۱. ۳۸. شاخه‌های پولاریتونی بالایی و پایینی..... ۴۱
- شکل ۱. ۳۹. مقایسه حالت‌های پولاریتونی با نوسان‌گرهای کلاسیک..... ۴۱
- شکل ۱. ۴۰. ساختار زینک بلند..... ۴۴
- شکل ۱. ۴۱. ساختار ورتسایت..... ۴۴

فصل دوم: مبانی و روش‌ها

- شکل ۲. ۱. تابش عمودی نور به یک لایه از جسم..... ۴۷

فهرست اشکال و جداول

- شکل ۲.۲. اثر لحاظ کردن پاشندگی در طیف بازتابنده براگ..... ۵۱
- شکل ۳.۲. مسیر حرکت نور در کاواک فابری- پرو..... ۵۲
- شکل ۴.۲. ضریب عبور از کاواک فابری- پرو برای ضرایب بازتاب مختلف آینه‌های کاواک..... ۵۳
- شکل ۵.۲. نمایش ناحیه باند توقف..... ۵۷
- شکل ۶.۲. نمایش شماتیک تعبیه چاه کوانتومی درون کاواک و نحوه وارد کردن ماتریس انتقال..... ۵۹
- جدول ۲.۱. پارامترهای مورد نیاز مربوط به محاسبات چاه کوانتومی GaN با سدهای $Al_xGa_{1-x}N$ ۷۱

فصل سوم: بحث و نتیجه‌گیری

- شکل ۱.۳. طیف بازتاب از بازتابنده توزیعی براگ $ZnSe/ZnTe$ در تابش عمودی برای ۱۵ جفت لایه..... ۷۵
- شکل ۲.۳. طیف بازتاب از بازتابنده توزیعی براگ $AlGaAs/AlAs$ در تابش عمودی برای ۱۵ جفت لایه..... ۷۶
- شکل ۳.۳. طیف بازتاب از بازتابنده توزیعی براگ $GaAs/AlAs$ در تابش عمودی برای ۱۵ جفت لایه..... ۷۷
- شکل ۴.۳. اثر تعداد لایه بر طیف بازتاب بازتابنده‌های براگ..... ۷۷
- شکل ۵.۳. مقایسه طیف بازتاب از بازتابنده توزیعی براگ برای مد TE تابش مایل..... ۷۸
- شکل ۶.۳. مقایسه طیف بازتاب از بازتابنده توزیعی براگ برای مد TM تابش مایل..... ۷۸
- شکل ۷.۳. مقایسه مدهای TE و TM در طیف بازتاب از بازتابنده توزیعی براگ..... ۷۹
- شکل ۸.۳. طیف بازتاب از یک میکروکاواک نیم‌رسانا در تابش عمودی..... ۷۹
- شکل ۹.۳. مقایسه طیف بازتاب از بازتابنده توزیعی براگ برای مد TE تابش مایل..... ۸۰
- شکل ۱۰.۳. مقایسه طیف بازتاب از بازتابنده توزیعی براگ برای مد TM تابش مایل..... ۸۱
- شکل ۱۱.۳. نمودار همگرایی ترازهای انرژی در چاه کوانتومی..... ۸۲
- شکل ۱۲.۳. باند رسانش چاه کوانتومی متشکل از لایه‌های $GaAs$ با سدهای $Al_xGa_{1-x}As$ ۸۲
- شکل ۱۳.۳. باند رسانش چاه کوانتومی متشکل از لایه‌های GaN با سدهای $Al_xGa_{1-x}N$ ۸۳
- شکل ۱۴.۳. باند ظرفیت چاه کوانتومی متشکل از لایه‌های $GaAs$ با سدهای $Al_xGa_{1-x}As$ ۸۳
- شکل ۱۵.۳. تغییر تقعر تابع موج باند ظرفیت چاه کوانتومی متشکل از لایه‌های $GaAs$ با سدهای $Al_xGa_{1-x}As$ ۸۴
- شکل ۱۶.۳. باند ظرفیت چاه کوانتومی متشکل از لایه‌های GaN با سدهای $Al_xGa_{1-x}N$ ۸۴

فهرست اشکال و جداول

- شکل ۳. ۱۷. انرژی بستگی اکسیتون در چاه کوانتومی متشکل از لایه‌های GaN با سدهای $Al_xGa_{1-x}N$ ۸۵
- شکل ۳. ۱۸. جفت‌شدگی قوی برای چاه کوانتومی $GaAs$ ۸۶
- شکل ۳. ۱۹. جفت‌شدگی قوی برای چاه کوانتومی $GaAs$ ۸۶
- شکل ۳. ۲۰. طیف بازتاب از میکروکاوک پولاریتون حاوی چاه کوانتومی GaN و لایه‌های $ZnSe/ZnTe$ بازای
زوایای مختلف تابش برای مد TE ۸۷
- شکل ۳. ۲۱. شاخه‌های پولاریتونی بالایی و پایینی در چاه کوانتومی GaN برای مد TE ۸۸
- شکل ۳. ۲۲. طیف بازتاب از میکروکاوک پولاریتون حاوی چاه کوانتومی GaN و لایه‌های $ZnSe/ZnTe$ بازای
زوایای مختلف تابش برای مد TM ۸۹
- شکل ۳. ۲۳. شاخه‌های پولاریتونی بالایی و پایینی در چاه کوانتومی GaN برای مد TM ۸۹
- شکل ۳. ۲۴.
- شکل ۳. ۲۵.

سال ۱۹۹۲ را می‌توان آغاز عصر میکروکاواک در اپتیک نانو ساختارهای نیم‌رساناها دانست. در دو دهه اخیر، میکروکاواک‌ها به عنوان یکی از پرکاربردترین ادوات نیم‌رسانا مورد توجه قرار گرفته‌اند. تاثیر چشمگیر این ادوات در رشد صنعت و تکنولوژی در دهه‌های اخیر بر کسی پوشیده نیست. موادی همچون سیلیسیوم، گالیوم، آرسنیک، ایندیوم، فسفر و آلومینیوم از جمله موادی هستند که در ساختار میکروکاواک‌ها، به کار رفته، تأثیر چشمگیری در زندگی روزمره بشر گذاشته‌اند [۱]. مشاهده جفت‌شدگی مدهای نرمال، در نانو ساختار چاه کوانتومی در این سال‌ها، علوم میکروکاواک را وارد عرصه جدیدی کرده است [۲]. نانو ساختار شامل چاه کوانتومی، سیم کوانتومی و نقطه کوانتومی هستند که با اعمال محدودیت به حرکت ذره به ترتیب در یک، دو و سه بعد باعث ایجاد خواص کوانتومی می‌شود، بدین مفهوم که با این اعمال محدودیت ترازهای انرژی گسسته می‌شوند. پیشرفت روشهای رشد بلور باعث شده است تا نیم‌رساناهای ابعاد پایین ساخته شوند [۳].

برهم‌کنش نور با مواد نیم‌رسانا یکی از مهمترین دلایل توجه به این مواد بوده است. تحریک نوری این مواد، اعم از مواد کپه‌ای یا نانو ساختارها باعث تولید شبه ذراتی می‌شود که اکسیتون نام دارد. اکسیتون‌ها شبه‌ذرات ناشی از برهم‌کنش کولنی بین الکترون و حفره هستند و با ایجاد تراز در ناحیه باند گاف، جذب لبه باند، در ساختارهای نیم‌رسانا را به میزان قابل توجهی تحت تأثیر قرار می‌دهند [۴].

یک میکروکاواک نیم‌رسانا، متشکل از بازتابنده‌های توزیعی براگ، به همراه یک نانو ساختار، می‌تواند به صورت یک مجموعه واحد عمل کنند. در این صورت نانو ساختار، داخل یک میکروکاواک تعبیه می‌شود. با تابش نور به این مجموعه، اکسیتون نانو ساختار و فوتون محصور شده در میکروکاواک، با یکدیگر جفت می‌شوند و تشکیل حالت‌های پولاریتون کاواک را می‌دهند که رفتار آنها مشابه هیچکدام از حالت‌های اکسیتونی یا فوتونی نیست. حالت‌های پولاریتون اکسیتونی، ویژگی‌های منحصر به فردی دارند، که در طراحی و ساخت دیودهای نورگسیل [۵]، لیزرهای بدون آستانه [۶]، تولید چشمه تک فوتون [۷]، ابررسانایی دمای اتاق [۸]، چگالش بوز- اینشتین در دمای اتاق [۹]، کنترل سوئیچ‌زنی و کاهش آستانه دوپایایی [۱۰] و کاربردهای متنوع دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند که بررسی دقیق آن‌ها باعث ایجاد رشته جدیدی به نام پولاریتونیک شده است [۱۱].

پیشرفت‌های اخیر و چشمگیر مواد نیم‌رسانای نیتریدی $III - V$ و تکنولوژی ادوات، منجر به تحقیقات وسیع مورد علاقه و فعالانه و افزایش کاربردهای مواد نیتریدی در الکترونیک و اپتوالکترونیک شده است. قطبش پیزوالکتریک و میدان‌های داخلی مواد نیتریدی، حجم گسترده‌ای از تحقیقات را به همراه داشته است. در این حجم گسترده، تعدادی از محققین پیشرو در مواد نیتریدی و تکنولوژی ادوات، درباره انگیزه‌ها، نکات فنی کلیدی و وضعیت فعلی تحقیقات وابسته به گستره وسیعی از کاربردهای ادوات نیتریدی، در حال فعالیت هستند. این سیستم‌ها،

چشم‌اندازهای بسیار امیدبخشی را برای کاربردهای ادوات نیم‌رسانا در طول موج‌های آبی و فرابنفش از خود به نمایش گذاشته‌اند [۱۲].

شبه‌ذرات ناشی از جفت‌شدگی انواع دیگری نیز دارد و از جمله آن‌ها می‌توان جفت‌شدگی الکترون با فونون (کوانتوم ارتعاشات شبکه) را نام برد، که منجر به تولید شبه ذره پولارون می‌شود. جفت‌شدگی اکسیتون با فونون، منجر به شکل‌گیری شبه ذراتی می‌شود که پولاریتون فونونی نامیده می‌شود [۱۳].

آنچه در این پایان‌نامه، مورد بحث و بررسی قرار گرفته است، استفاده از نانوساختارهای نیم‌رسانا با تأکید بر مواد نیتریدی، به منظور بررسی جفت‌شدگی اکسیتون-فوتون است، که منجر به شکل‌گیری شبه ذرات پولاریتون کاواک در میکروکاواک‌های نیم‌رسانا می‌شود و از این به بعد، برای اختصار پولاریتون نامیده می‌شود.

فصل اول این پایان‌نامه به بررسی وضعیت پژوهش و فعالیت‌های انجام شده پیش از این در میکروکاواک‌های نیم‌رسانا و فعالیت‌های انجام شده روی مواد نیتریدی اشاره دارد. بعضی از مفاهیم کلی همچون جفت‌شدگی، قدرت جفت‌شدگی، شکاف رابی خلأ، ساختار میکروکاواک متشکل از بازتابنده‌های توزیعی براگ و ... نیز در این فصل بیان شده است.

در فصل دوم پایان‌نامه روش‌های محاسباتی به کار رفته در محاسبات نرم افزاری توضیح داده شده است. روش ماتریس انتقال، اثر ضریب شکست در تابش نور به میکروکاواک، محاسبات مربوط به اثر قطبش بر پارامترهای میکروکاواک از جمله موارد مرتبط با مد فوتونی محصور شده در میکروکاواک است. همچنین از روش تفاضل محدود برای محاسبه ترازهای انرژی اکسیتون در چاه کوانتومی نیتریدی استفاده کرده‌ایم. در بخش ۲.۲ نیز نحوه وارد ضریب شکست در چاه کوانتومی را توضیح داده‌ایم.

فصل سوم نیز نتایج حاصل از محاسبات عددی را مورد بحث و بررسی قرار داده‌ایم. این نتایج اهمیت مواد نیتریدی در جفت‌شدگی اکسیتون و فوتون را نشان می‌دهد. در این فصل با بررسی جداگانه طیف بازتاب بازتابنده براگ و میکروکاواک نیم‌رسانا، مد کاواک را به دست می‌آوریم و در می‌یابیم که با تغییر زاویه تابشی نور به میکروکاواک شاهد تغییر در قدرت جفت‌شدگی خواهیم بود به طوری که در یک زاویه خاص جفت‌شدگی به حداکثر میزان خود می‌رسد. هر چه از این زاویه فاصله بگیریم جفت‌شدگی ضعیف‌تر می‌شود.

فصل اول

بررسی منابع و پیشینه پژوهش

۱.۱. نانو ساختار^۱

روش‌های نوین رشد بلور مانند برآری باریکه مولکولی^۲ و لایه‌گذاری بخار شیمیایی فلز- ماده آلی^۳ امکان ساخت لایه‌های فوق نازک را با کیفیت عالی از مواد نیم‌رسانا فراهم آورده است. اصطلاح فوق نازک به سیستم‌هایی گفته می‌شود که ضخامت آن‌ها از مرتبه طول موج دوبروی حاملین در این سیستم‌ها باشد [۱۳].

الکترونیک از مقیاس بزرگ به مقیاس کوچک پیشرفت کرده است. در این فرآیند، ایده‌های شهودی، از جهان فیزیک کلاسیک بدست آمده‌اند تا روش‌های کاملاً متفاوتی را بر اساس قوانین مکانیک کوانتومی داشته باشند. وقتی فرآیندهای الکترونی در ساختارهایی با اندازه‌ای از مرتبه سانتیمتر و یا حتی میکرومتر اتفاق می‌افتد، سیستم به صورت پیوسته توصیف می‌شود. با تغییر خیلی آرام شرایط، می‌توان انتظار داشت که نتایج، به صورت خیلی آرام تغییر کند. وقتی اندازه فیزیکی سیستم کوچک‌تر شود اثرات مکانیک کوانتومی مهم می‌شود. در این شرایط یک سیستم به اندازه کافی کوچک، قادر خواهد بود که فقط تعدادی انرژی‌های گسسته داشته باشد.

مفید است که بعضی مرتبه‌های مقداری را متذکر شویم. برای اتم‌های یک جامد اندازه نوعی سیستم به اندازه شعاع بوهر اتم هیدروژن یعنی حدود نیم آنگستروم است. برای یک نیم‌رسانا مثل *GaAs* فاصله فضایی بلورها حدود 5\AA و یک تک لایه (کمترین اندازه لایه‌های اتمی) نصف این مقدار یعنی حدود $2/5\text{\AA}$ است. در اصل مواد نیم‌رسانا می‌توانند به گونه‌ای رشد داده شوند تا با دقت یک تک لایه دسته‌بندی شوند. در هر حال تکنیک‌های رشد لایه‌نشانی، باعث ایجاد ساختارهایی شده‌اند که الکترون‌ها را در اندازه‌هایی از مرتبه چند فاصله اتمی محدود کرده است به طوری که می‌تواند باعث محدودیت حرکت الکترون‌ها شود.

در صحبت پیرامون سیستم‌های کوچک، از عبارت «میکروسکوپی» برای اشاره به اتم‌های انفرادی یا مهندسی سیستم در ابعاد نانومتری استفاده می‌شود. ساختارهای با این ابعاد را نانو ساختار می‌نامند و بحث ما را در این پایان‌نامه به خود معطوف کرده است. سیستم‌های مزوسکوپی آن‌هایی هستند که شامل تعداد زیادی اتم‌ها هستند ولی در آن‌ها اثرات کوانتومی همچنان وجود دارد. در صورتی که انتظار داریم، سیستم‌های ماکروسکوپی با اندازه‌های میکرومتر یا بزرگ‌تر، رفتار کلاسیکی از خود نشان دهند.

نانوساختارها باعث محدودیت حرکت حاملین (الکترون‌ها و حفره‌ها) در فضا می‌شوند. اثرات کوانتومی در سیستم‌هایی پدیدار می‌شوند که حاملین در ناحیه‌ای با اندازه‌ای از مرتبه طول موج دوبرویشان محدود شده باشند، در

^۱ Nanostructure

^۲ Molecular Beam Epitaxy (MBE)

^۳ Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD)

غیر این صورت، ویژگی‌های حرکت در راستای محدود شده مشابه حرکت در مواد کپه‌ای است. اگر طول محدودیت، خیلی بزرگتر از طول موج دوبروی باشد، در راستای محدودیت پیوستار انرژی به وجود می‌آید، چون فاصله بین ترازهای انرژی بسیار کم می‌شود و اگر این طول، خیلی کوچک‌تر از طول موج دوبروی باشد، ترازهای انرژی بیرون از راستای محدود شده می‌افتند و در نتیجه دیگر خاصیت کوانتومی وجود ندارد. همچنین اگر طول محدودیت بسیار کوچک باشد، تمام تابع موج از داخل ناحیه محدود کننده بیرون می‌افتد و دیگر محدودیت کوانتومی وجود ندارد. این مسئله در بخش ۱.۲.۲ با جزئیات بیشتری مورد بحث قرار خواهد گرفت.

وقتی این محدودیت فقط در یک بعد اتفاق بیفتد، به طوری که محدودیت حرکت الکترون در جهت Z باشد، در این صورت، حرکت الکترون در جهات X و Y آزاد خواهد بود و گاز الکترونی دو بعدی^۴ تولید می‌شود. محدودیت در دو جهت Y و Z باعث می‌شود تا الکترون‌ها، فقط در جهت X آزادی حرکت داشته باشند و به این ترتیب گاز الکترونی یک بعدی^۵ حاصل می‌شود. همچنین محدودیت سه بعدی باعث تولید گاز الکترونی صفر بعدی^۶ می‌شود. نانو ساختارهای فوق را به ترتیب چاه کوانتومی^۷، سیم کوانتومی^۸ و نقطه کوانتومی^۹ می‌نامیم [۱۴].

کاهش ابعاد حرکتی با محدود کردن حاملین در یک لایه نیم‌رسانا منجر به تغییرات محسوسی در رفتار آنها می‌شود. این قاعده با کاهش بیشتر ابعاد حرکت الکترون از چاه کوانتومی دو بعدی به سیم کوانتومی تک بعدی و در نهایت به نقطه کوانتومی صفر بعدی قابل تعمیم است، که منظور از بعد، تعداد درجات آزادی الکترون است [۱۳]. در حقیقت، در سیم کوانتومی، الکترون در دو بعد محدود شده است، در حالی که در چاه کوانتومی، فقط در یک بعد محدود شده است و درجه آزادی حرکت آن دو است. در نقطه کوانتومی الکترون در سه بعد محدود شده است و درجه آزادی آن صفر است. طول مشخصه این ساختارها قابل مقایسه با موج دوبروی حاملین آزاد است. با این وصف اگر درجه آزادی D_f و درجه محدودیت D_c باشد؛ همواره رابطه $D_c + D_f = 3$ برقرار است [۱۵]. سمت چپ شکل ۱.۱ نمایشگر یک جسم نیم‌رسانای کپه‌ای است که در آن حاملین، محدودیت حرکت ندارند. در این صورت، حاملین می‌توانند آزادانه در سه بعد حرکت کنند. شکل‌های سمت راست، اعمال محدودیت به حرکت حاملین را نشان می‌دهد و به ترتیب از بالا به پایین، بیانگر محدودیت در یک، دو و سه بعد هستند و به ترتیب چاه کوانتومی، سیم کوانتومی و نقطه کوانتومی را نمایش می‌دهند [۱۵].

^۴ 2 Dimensional Electron Gas (2DEG)

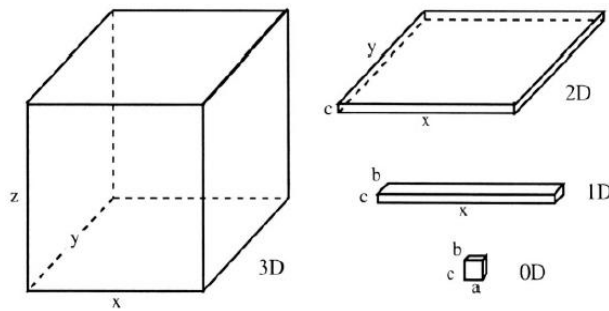
^۵ 1 Dimensional Electron Gas (1DEG)

^۶ 0 Dimensional Electron Gas (0DEG)

^۷ Quantum Well

^۸ Quantum Wire

^۹ Quantum Dot



شکل ۱.۱. تعداد ابعاد محدودیت، برای ساختارهای مختلف [۱۶].

می‌توان چگالی حالت‌ها را برای مواد کپه‌ای و نانوساختارها تعریف کرد. این کمیت به این صورت تعریف می‌شود: «تعداد حالت‌های مجاز انرژی در واحد حجم که انرژی آن‌ها بین E و $E + dE$ قرار دارد.» این کمیت در مواد کپه‌ای متناسب با \sqrt{E} است (شکل ۱.۶).

نانوساختارها، خاصیت بسیار مهم و قابل توجهی دارند که در مباحث پیش‌رو از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و آن این است که نانوساختارها قادر به بازتابش نور هستند [۱۷].

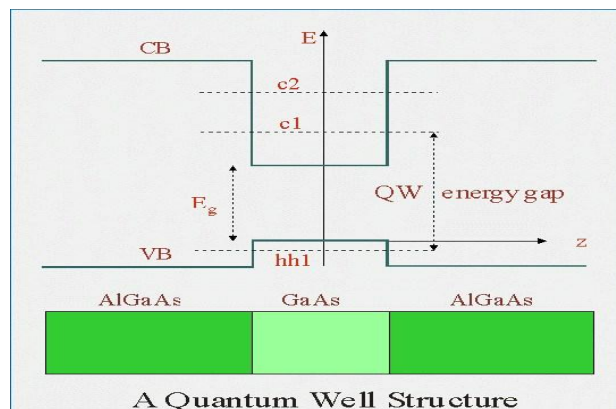
۱.۱.۱. چاه کوانتومی

فیلم‌های نیم‌رسانا با ضخامت کمتر از 100 \AA را تحت عنوان سیستم‌های محدود کننده دوبعدی می‌شناسیم. یک گروه از این چنین سیستم‌های دوبعدی را تحت عنوان ساختارهای چاه کوانتومی می‌شناسیم. چاه کوانتومی تک‌تایی^۱، شامل یک لایه خیلی نازک است که از یک نیم‌رسانای ساندویچ شده، بین دو لایه نازک، از نیم‌رساناهای با گاف انرژی پهن‌تر تشکیل شده است. مثال خیلی مشهور، که مطالعات بسیار زیادی روی آن انجام شده است لایه نازکی از $GaAs$ است که بین آلیاژی از نیم‌رسانای سه‌تایی $Al_xGa_{1-x}As$ قرار گرفته باشد. در این فرمول، x کسر مولی آلومینیوم است [۱۳].

شکل ۱.۲ ساختار این چاه کوانتومی تک‌تایی را نشان می‌دهد که در آن باند ظرفیت و باند رسانش چاه کوانتومی مشخص شده است. دو تراز اول انرژی الکترون‌ها یعنی تراز حالت پایه و اولین حالت برانگیخته در باند رسانش و تراز حالت پایه حفره سنگین در باند ظرفیت در این شکل به نمایش گذاشته شده است. نکته قابل ذکر در این نمودار توجه به تفاوت گاف انرژی $GaAs$ و گاف انرژی چاه کوانتومی است. گاف انرژی در چاه کوانتومی بزرگتر از گاف انرژی در $GaAs$ است.

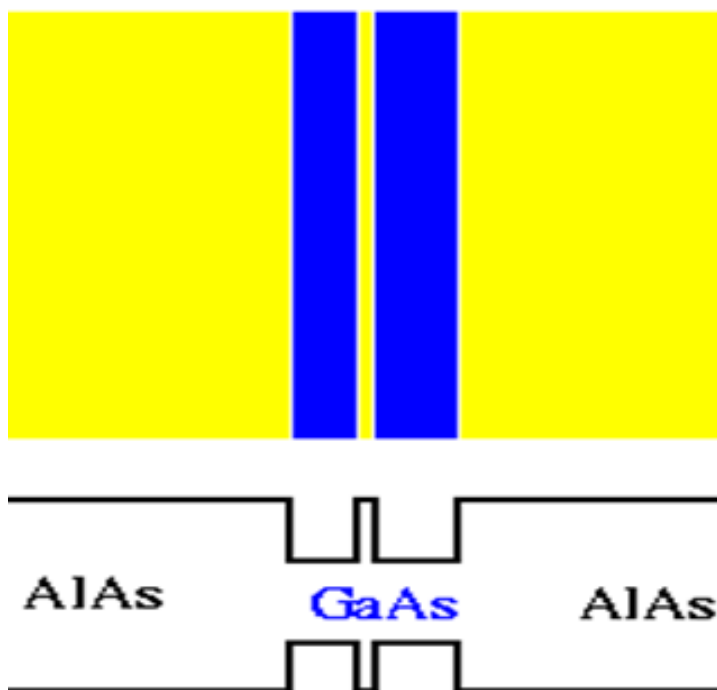
در این صورت ΔE_c جداشدگی نوار رسانش یا به بیان دیگر اختلاف انرژی سد و چاه در نوار رسانش و ΔE_v جداشدگی نوار ظرفیت یا اختلاف انرژی سد و چاه در نوار ظرفیت می‌باشد.

^۱ Single Quantum Well (SQW)



شکل ۲.۱. ساختار یک چاه کوانتومی تکتابی.

با رشد متناوب لایه‌های چاه کوانتومی تکتابی، ساختار یک چاه کوانتومی چندتابی^{۱۱} صورت می‌گیرد. به طور معمول، چنین ساختاری، شامل ۱۰۰ دوره تناوب است. طرحواره‌ای از یک چاه کوانتومی چندتابی در شکل ۳.۱ نشان داده شده است. این شکل، تناوبی شامل دو دوره از چنین ساختاری را نشان می‌دهد.



شکل ۳.۱. ساختار یک چاه کوانتومی چندتابی [۱۳].

یک چاه کوانتومی می‌تواند نور را بازتاب کند. این امر به دلیل اختلاف در گاف انرژی مواد تشکیل دهنده است. مواد با گاف انرژی بزرگ‌تر، خاصیت رسانندگی کم‌تری دارند و این به معنی ثابت دی‌الکتریک کوچک‌تر برای این نوع مواد است. چون ثابت دی‌الکتریک متناسب با ضریب شکست است، در این صورت مواد با گاف انرژی بزرگ‌تر، ضریب

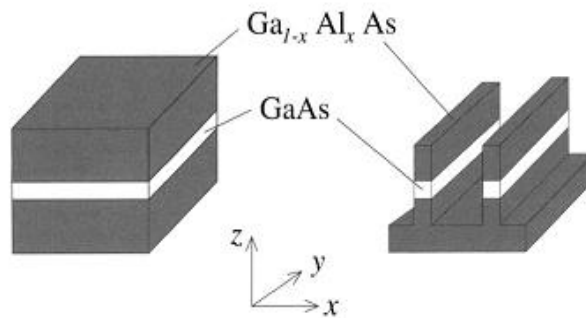
^{۱۱} Multiple Quantum Well (MQW)

شکست کوچکتر دارند. این اختلاف، در ضریب شکست لایه‌های متناوب چاه کوانتومی باعث بازتابش نور از این چنین ساختاری می‌شود.

چگالی حالت‌ها در ساختار چاه کوانتومی تابعیت پله‌ای دارد و بر حسب تابع پله‌ای $\Theta(E - E_i)$ بیان می‌شود. در این رابطه E_i عبارتست از i امین تراز انرژی الکترون یا حفره در چاه کوانتومی مورد نظر که می‌تواند به صورت تکتایی یا چندتایی باشد. (شکل ۱.۶)

۱.۱.۲. سیم کوانتومی

ساختاری که در بخش قبلی توضیح داده شد یک ساختار لایه‌ای بود که حاملین را به یک صفحه محدود می‌کرد و یک پتانسیل یک بعدی را از طریق رشد لایه‌های نیم‌رسانا با گاف کوچک و بزرگ به وجود می‌آورد. قدم بعدی، الگوسازی مشابه، برای بعد دیگر است به گونه‌ای که آزادی حرکت ذره در یک بعد باشد. در این صورت، ساختار مورد نظر، یک سیم کوانتومی است [۱۷]. شکل ۱.۴ طرحواره‌ای از یک سیم کوانتومی را نشان می‌دهد.



شکل ۱.۴ اعمال محدودیت در بعد دوم و تشکیل ساختار یک سیم کوانتومی [۱۵].

در یک ساختار محدود کننده دو بعدی مثل سیم کوانتومی، چگالی حالت‌ها، متناسب است با $\frac{1}{\sqrt{E}}$ (شکل ۱.۶).

۱.۱.۳. نقطه کوانتومی

نقاط کوانتومی نیم‌رسانا ساختارهای محدود کننده سه بعدی با ابعاد نانومتری هستند که حاملین (الکترون‌ها و حفره‌ها) را در سه بعد محدود می‌کنند و ترازهای انرژی گسسته مانند ترازهای اتمی دارند. در ساخت نقاط کوانتومی از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به لیتوگرافی^{۱۲}، سنتز شیمیایی^{۱۳}، رشد لایه نشانی خودسامان^{۱۴} و روش‌های متنوع دیگر اشاره کرد.

^{۱۲} Lithography

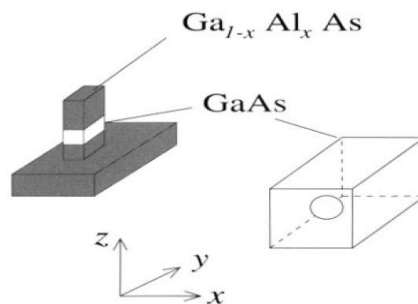
^{۱۳} Chemical Synthesize

^{۱۴} Self-Assembled Epitaxial Growth

فصل اول: بررسی منابع و پیشینه پژوهش

روش آخر این مزیت را دارد که اندازه، شکل، ترکیبات و موقعیت نقطه کوانتومی را می‌توان به وسیله تکنیک‌های رشد به میزان گسترده‌ای تغییر داد. علاوه بر این می‌توان آن‌ها را به طور طبیعی، در حین رشد درون ساختارهای پیچیده‌تر تعبیه کرد. این مسئله باعث می‌شود تا بتوان در کاربردهای وسیعی، از این روش استفاده کرد که از جمله آن‌ها می‌توان ساخت ادوات فوتونیک و الکترونیک را نام برد.

اخیرا رشد خودساز نقاط کوانتومی روی گستره وسیعی از آلیاژها از جمله $InAs/GaAs$, Ge/Si , $(In, Ga)N/GaN$, $CdSe/Zn(S, Se)$, $(Ga, In)P/InP$ انجام شده است. ناحیه طیفی در این ساختارها از مادون قرمز نزدیک ($\lambda = 1/5 \mu m$) شروع شده تا ناحیه سبز - آبی ($\lambda = 430 - 500 nm$) ادامه دارد. این امر باعث شده است تا امروزه، شرکت‌های مختلف در سرتاسر دنیا به سمت تجاری سازی ادوات نقطه کوانتومی حرکت کنند. برای مثال دیودهای لیزری نقاط کوانتومی فعلی، لیزرهای چاه کوانتومی را از رده خارج کرده‌اند. پارامترهایی همچون چگالی آستانه، حساسیت دمایی و پهنای خط بهره در این نوع لیزرها بسیار کم‌تر از لیزرهای متداول چاه کوانتومی است [۱۸]. شکل ۱.۵ اعمال محدودیت در بعد سوم و تشکیل ساختار نقطه کوانتومی را نشان می‌دهد.



شکل ۱.۵. اعمال محدودیت در بعد سوم و تشکیل ساختار یک نقطه کوانتومی [۱۵].

نقاط کوانتومی در شکل‌های متنوعی ساخته می‌شوند و می‌توانند به صورت نقطه کوانتومی کروی، مکعبی، هرمی و یا انواع متنوع دیگری ساخته شوند. شکل نقطه کوانتومی را نوع پتانسیل محدود کننده حاملین تعیین می‌کند [۱۵]. تابعیت چگالی حالت‌ها در نقاط کوانتومی، به صورت تابع دلتای دیراک $\delta(E - E_i)$ است که از محدودیت سه بعدی حاملین ناشی می‌شود. چنین تابعیتی کاملا مشابه سیستم‌های اتمی است. به همین دلیل نقاط کوانتومی را اتم‌های مصنوعی^{۱۵} می‌نامند. شکل ۱.۶ چگالی حالت‌ها را نشان می‌دهد که به ترتیب از راست به چپ نمایشگر نقطه کوانتومی، سیم کوانتومی، چاه کوانتومی و ماده کپه‌ای می‌باشد.

^{۱۵} Artificial Atoms