

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش حالت جامد

مطالعه‌ی اثر برهم کنش الکترون - حفره و الکترون - الکترون بر
خواص الکترونی و نوری نقطه‌ی کوانتومی سه‌موی

استاد راهنما:

دکتر قاسم رضایی

استاد مشاور:

دکتر بهروز واثقی

پژوهشگر:

مجید صدری

بهمن ماه ۱۳۸۹



عنوان پایان نامه

مطالعه‌ی اثر برهم‌کنش الکترون - حفره و الکترون - الکترون بر خواص الکترونی و نوری نقطه‌ی کوانتومی سه‌موی

به وسیله‌ی:

مجید صدری

پایان نامه

ارائه شده به تحصیلات تکمیلی دانشگاه به عنوان بخشی از فعالیت‌های تحصیلی لازم برای اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد

در رشته‌ی:

فیزیک

در تاریخ ۱۳۸۹/۱۱/۲۶ توسط هیات داوران زیر بررسی و با درجه‌ی عالی به تصویب نهایی رسید.

امضا
امضا
امضا
امضا
امضا

۱- استاد راهنما: دکتر قاسم رضایی با مرتبه‌ی علمی استادیار

۲- استاد مشاور: دکتر بهروز وانقی با مرتبه‌ی علمی استادیار

۳- استاد داور داخل گروه: دکتر ابراهیم صادقی با مرتبه‌ی علمی دانشیار

۴- استاد داور خارج گروه: دکتر محمود مرادی با مرتبه‌ی علمی استاد

۵- مدیر گروه: دکتر بهروز وانقی با مرتبه‌ی علمی استادیار

بهمن ماه ۱۳۸۹

رساله‌ی حاضر، حاصل پژوهش‌های نگارنده در دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک
گرایش ماده چگال است که در بهمن ماه ۱۳۸۹ در دانشکده‌ی علوم پایه دانشگاه
یاسوج به راهنمایی جناب آقای دکتر قاسم رضایی و مشاوره‌ی جناب آقای دکتر بهروز
وائقی از آن دفاع شده است و کلیه‌ی حقوق مادی و معنوی آن متعلق به دانشگاه
یاسوج می‌باشد.

تقدیم به

مهربان ترین پدر و مادر دنیا

سپاسگزاری

حمد و سپاس خداوند را که سپاس مخصوص ذات اوست.

حال که این رساله به اتمام رسیده است، کمال تشکر و قدردانی را از استاد ارجمند و گرانقدر جناب آقای دکتر قاسم رضایی که یار و مددکار من بوده‌اند و با صبر و شکیبایی مرا به انجام این مهم رهنمون ساخته‌اند، دارم. همچنین از زحمات تمامی اساتید محترم گروه فیزیک دانشگاه یاسوج، که مفتخر به شاگردی ایشان بوده‌ام، سپاسگزارم. از اعضای محترم کمیته‌ی پایان نامه، آقایان دکتر قاسم رضایی، دکتر بهرو وثیقی، دکتر ابراهیم صادقی، دکتر محمود مرادی و سرکار خانم دکتر فخری یوسفی تشکر می‌نمایم. همچنین از زحمات فراوان تمامی اعضای هیأت علمی گروه فیزیک دانشگاه قدردانی می‌نمایم. در پایان از پدر دلسوز و مادر فداکارم که هیچگاه دین من به ایشان ادا نمی‌شود، متشکر و سپاسگزارم.

نام: مجید	نام خانوادگی: صدری
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته و گرایش: فیزیک (ماده چگال)
استاد راهنما: دکتر قاسم رضایی	تاریخ دفاع: ۱۳۸۹/۱۱/۲۶

مطالعه‌ی اثر برهم‌کنش الکترون - حفره و الکترون - الکترون بر خواص الکترونی و نوری نقطه‌ی کوانتومی سهموی

از دیدگاه تئوری و عملی، موضوع نقاط کوانتومی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. تلاش‌های اخیر متمرکز بر درک خواص الکترونی و نوری نقاط کوانتومی است که این نقاطی محدودیت کوانتومی را در هر سه راستای فضایی متحمل می‌شوند. نقاط کوانتومی نیم رسانا ساختارهایی هستند که در آن‌ها حرکت الکترون‌ها در تمامی راستاها محدود است. پتانسیل محدودیت کوانتومی موجب تغییر چگالی حالت‌ها و خواص فیزیکی این ساختارهای شبه صفربعدی می‌شود. در این پایان‌نامه، برهم‌کنش الکترون-حفره، الکترون-الکترون و اثر میدان الکتریکی خارجی بر خواص الکترونی و نوری نقطه‌ی کوانتومی سهموی مورد توجه قرار گرفته است. بدین منظور با استفاده از روش قطری کردن ماتریس‌ها، ویژه مقادیر و ویژه حالت‌های انرژی را به دست آورده و سپس با استفاده از روش ماتریس چگالی خواص نوری را مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج نشان می‌دهد که برهم‌کنش الکترون-حفره، الکترون-الکترون و میدان الکتریکی خارجی به طور قابل توجهی سبب تغییر ویژه مقادیر و ویژه حالت‌های نقطه‌ی کوانتومی می‌شوند. علاوه بر این، این آثار تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های نوری خطی و غیرخطی نقطه‌ی کوانتومی دارند.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: پیش درآمد
۱	۱-۱- مقدمه.....
۱	۲-۱- مقدمه ای بر نانو تکنولوژی.....
۱	۱-۲-۱- پیشینه‌ی نانو.....
۳	۲-۲-۱- نانو فناوری.....
۳	۳-۱- روش‌های تجربی تولید مواد در مقیاس نانویی.....
۴	۴-۱- نگاهی اجمالی بر نیم‌رساناها.....
۵	۵-۱- ساختارهای کوانتومی.....
۵	۱-۵-۱- چاه کوانتومی.....
۶	۲-۵-۱- سیم کوانتومی.....
۷	۳-۵-۱- نقطه‌ی کوانتومی.....
۹	۶-۱- ساختار فصول آینده.....
	فصل دوم: نیم رساناها و ساختارهای کوانتومی محدود
۱۰	۱-۲- مقدمه.....
۱۰	۲-۲- ساختار بلور.....
۱۱	۱-۲-۲- شبکه‌های بلوری.....
۱۳	۳-۲- شبکه‌های بلوری.....

صفحه	عنوان
۱۵	۴-۲- انواع نیم‌رساناها.....
۱۵	۵-۲- نوارهای انرژی نیم‌رساناها.....
۱۷	۶-۲- ترازهای الکترونی در پتانسیل دوره‌ای.....
۱۷	۱-۶-۲- قضیه‌ی بلاخ.....
۱۸	۲-۶-۲- شرط مرزی بورن-فون کارمن.....
۱۹	۷-۲- تقریب جرم مؤثر.....
۲۲	۸-۲- چگالی حالت‌های نیم رسانای حجمی.....
۲۳	۹-۲- طیف انرژی ساختار دو بعدی: چاه کوانتومی.....
۲۷	۱۰-۲- طیف انرژی ساختار تک بعدی: سیم کوانتومی.....
۳۰	۱۱-۲- طیف انرژی ساختار صفر بعدی: نقطه‌ی کوانتومی.....
۳۱	۱۲-۲- نتیجه‌گیری.....
فصل سوم: بررسی ترازهای انرژی نقطه‌ی کوانتومی سهموی	
۳۳	۱-۳- مقدمه.....
۳۳	۲-۳- نوسانگر هماهنگ.....
۳۳	۱-۲-۳- نوسانگر هماهنگ ناهمسانگرد.....
۳۴	۲-۲-۳- نوسانگر هماهنگ همسانگرد.....
۳۵	۳-۳- مسائل سه بعدی در دستگاه مختصات کروی.....
۳۶	۴-۳- نوسانگر هماهنگ همسانگرد در مختصات کروی.....
۴۰	۵-۳- تأثیر بر هم‌کنش الکترون- حفره بر ترازهای انرژی نقطه‌ی کوانتومی سهموی.....
۴۲	۶-۳- ترازهای انرژی نقطه‌ی کوانتومی در حضور میدان الکتریکی خارجی.....

۵۰	.....۸-۳- نتیجه گیری
فصل چهارم: بررسی خواص نوری نقطه‌ی کوانتومی سهموی	
۵۰	.....۱-۴- مقدمه
۵۱	.....۲-۴- پدیده‌های خطی و غیرخطی
۵۱	.....۱-۲-۴- تولید هماهنگ مرتبه‌ی دوم
۵۲	.....۲-۲-۴- تولید هماهنگ مرتبه‌ی دوم و اثر اپتیکی کر
۵۴	.....۳-۴- تحول زمانی ماتریس چگالی
۵۶	.....۴-۴- حل معادله‌ی تحول زمانی ماتریس چگالی با استفاده از روش اختلال
۵۹	.....۵-۴- محاسبه‌ی ضرایب جذب و شکست نوری
۵۹	.....۱-۵-۴- محاسبه‌ی پذیرفتاری خطی با استفاده از ماتریس چگالی
۶۰	.....۲-۵-۴- محاسبه‌ی پذیرفتاری غیر خطی مرتبه‌ی دوم
۶۳	.....۳-۵-۴- محاسبه‌ی پذیرفتاری غیر خطی مرتبه‌ی سوم به کمک ماتریس چگالی
۶۹	.....۶-۴- محاسبه تغییرات ضریب شکست و ضریب جذب نقطه‌ی کوانتومی سهموی
۷۰	.....۷-۴- محاسبات عددی و نتایج
۱۰۷	.....۸-۴- نتیجه گیری
فصل پنجم: نتیجه گیری	
۱۰۸	.....نتیجه گیری
۱۱۰	.....منابع

فهرست نگاره‌ها

صفحه	عنوان
فصل اول	
۶	نگاره‌ی ۱-۱- چاه کوانتومی $Al_xGa_{1-x}As / GaAs$ و نمایش حرکت الکترون در صفحه چاه.....
۷	نگاره‌ی ۲-۱- سیم کوانتومی $Al_xGa_{1-x}As / GaAs$ با سطح مقطع مربعی
۸	نگاره‌ی ۳-۱- نقطه‌ی کوانتومی از جنس $GaAs$ محصور شده توسط دو لایه از جنس $Al_xGa_{1-x}As$
فصل دوم	
۱۱	نگاره‌ی ۱-۲- سلول واحد اولیه.....
۱۱	نگاره‌ی ۲-۲- شبکه مکعبی ساده.....
۱۲	نگاره‌ی ۳-۲- شبکه مکعبی مرکز حجمی
۱۲	نگاره‌ی ۴-۲- شبکه مکعبی مرکز سطحی.....
۱۲	نگاره‌ی ۵-۲- ساختار الماسی
۱۳	نگاره‌ی ۶-۲- ساختار سولفید روی بلور گالیم - آرسناید.....
۱۴	نگاره‌ی ۷-۲- طرح نوارهای انرژی نارسانا، نیم‌رسانا و رسانا.....
۱۶	نگاره‌ی ۸-۲- نمودار نوار ظرفیت و هدایت نیم رساناها با گاف نواری مستقیم و غیر مستقیم.....
۱۶	نگاره‌ی ۹-۲- نمایش ساختار نواری گالیم آرسناید و ژرمانیوم در دمای اتاق
۲۳	نگاره‌ی ۱۰-۲- چگالی حالات نوار رسانش نیم رسانای حجمی بر حسب انرژی
	نگاره‌ی ۱۱-۲- نمودار انرژی چاه کوانتومی متشکل از یک ماده نیم رسانای
۲۵	متفاوت بین دو رسانای مشابه.....
۲۶	نگاره‌ی ۱۲-۲- نمودار حالات چاه کوانتومی در فضای وارون.....

عنوان	صفحه
نگاره‌ی ۲-۱۳- چگالی حالت‌های دو بعدی برای چاه کوانتومی GaAs با ضخامت بسیار کم	
و سد پتانسیل بی‌نهایت بلند.....	۲۷
نگاره‌ی ۲-۱۴- سیم کوانتومی با سطح مقطع مستطیلی و سد پتانسیل بی‌نهایت.....	۲۷
نگاره‌ی ۲-۱۵- چگالی حالت‌های سیم کوانتومی یک بعدی GaAs با سد پتانسیل بی‌نهایت	
و ابعاد بسیار کوچک.....	۳۰
نگاره‌ی ۲-۱۶- چگالی حالت‌های یک ساختار صفر بعدی با سد پتانسیل بی‌نهایت بلند	
و طول ابعاد برابر با هم.....	۳۱
فصل سوم	
نگاره‌ی ۳-۱- تغییرات ترازهای انرژی نقطه‌ی کوانتومی سهموی با و بدون اثر برهم‌کنش	
الکترون- حفره به ازای $F = 0(\frac{kv}{cm})$	۴۴
نگاره‌ی ۳-۲- تغییرات ترازهای انرژی نقطه‌ی کوانتومی سهموی با در نظر گرفتن اثر برهم‌کنش	
الکترون- حفره به ازای $F = 50(\frac{kv}{cm})$ و $F = 100(\frac{kv}{cm})$	۴۵
نگاره‌ی ۳-۳الف- تغییرات انرژی نقطه‌ی کوانتومی سهموی با و بدون برهم‌کنش	
الکترون- حفره و به صورت تابعی از میدان الکتریکی به ازای $\omega_0 = 0.8 \times 10^{14} (s^{-1})$	۴۶
نگاره‌ی ۳-۳ب- تغییرات انرژی نقطه‌ی کوانتومی سهموی با و بدون برهم‌کنش	
الکترون- حفره و به صورت تابعی از میدان الکتریکی به ازای $\omega_0 = 1.4 \times 10^{14} (s^{-1})$	۴۶
نگاره‌ی ۳-۴- تغییرات ترازهای انرژی نقطه‌ی کوانتومی سهموی با وجود اثر برهم‌کنش	
الکترون- الکترون و بدون اثر برهم‌کنش الکترون- حفره به ازای $F = 0(\frac{kv}{cm})$	۴۷
نگاره‌ی ۳-۵- تغییرات ترازهای انرژی نقطه‌ی کوانتومی سهموی با در نظر گرفتن اثر برهم‌کنش	

صفحه	عنوان
۴۸	الکترون-الکترون به ازای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm}\right)$ و $F = 100 \left(\frac{kv}{cm}\right)$ نگاره‌ی ۳-۶- تغییرات انرژی نقطه‌ی کوانتومی سهموی با و بدون برهم کنش
۴۹	الکترون-الکترون و به صورت تابعی از میدان الکتریکی به ازای $\omega_0 = 1.4 \times 10^{14} (s^{-1})$ فصل چهارم
۵۲	نگاره‌ی ۴-۱- تولید هماهنگ مرتبه دوم و نمودار ترازهای انرژی آن نگاره‌ی ۴-۲- تولید هماهنگ سوم و نمودار ترازهای انرژی مربوط به آن نگاره‌ی ۴-۳- نمودارهای فاینمن برای فرآیندهای غیر خطی مرتبه‌ی سوم،
۶۴	ترکیب چهار موج، تولید هماهنگ مرتبه‌ی سه، اثر کر و اثر رامان واداشته نگاره‌ی ۴-۴- تغییرات ضرایب جذب خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای کوانتومی سهموی در حضور میدان الکتریکی خارجی با و بدون اثر بر هم کنش الکترون-حفره نگاره‌ی ۴-۵- ضرایب جذب خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای کوانتومی سهموی در حضور میدان الکتریکی خارجی برای فرکانس‌های مختلف به ازای $F = 50 (kv / cm)$ نگاره‌ی ۴-۶- تغییرات ضرایب جذب خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای کوانتومی سهموی با وجود اثر بر هم کنش الکترون-حفره بر حسب تغییرات F و فرکانس $\omega_0 = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ نگاره‌ی ۴-۷- تغییرات ضرایب شکست خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای کوانتومی سهموی در حضور میدان الکتریکی خارجی با و بدون برهم کنش الکترون-حفره نگاره‌ی ۴-۸- ضرایب شکست خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای کوانتومی سهموی در حضور میدان الکتریکی خارجی برای فرکانس‌های مختلف به ازای $F = 50 (kv / cm)$ نگاره‌ی ۴-۹- تغییرات ضرایب جذب خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای کوانتومی سهموی با وجود اثر بر هم کنش الکترون-حفره بر حسب تغییرات F و فرکانس $\omega_0 = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$
۷۶	۷۶

عنوان

صفحه

نگاره‌ی ۴-۱۰- تغییرات ضریب همسوسازی نوری برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی

۷۷ با وجود اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره برای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$

نگاره‌ی ۴-۱۱- تغییرات ضریب همسوسازی نوری برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی

۷۸ همراه با اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره برای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$ و تغییرات ω

نگاره‌ی ۴-۱۲- تغییرات ضریب همسوسازی نوری برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی

۷۹ همراه با اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره برای $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ و تغییرات میدان

نگاره‌ی ۴-۱۳- تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی دوم برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی

۸۰ با و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره برای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$ و $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$

نگاره‌ی ۴-۱۴- تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی دوم برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی

۸۱ همراه با اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره برای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$ و تغییرات

نگاره‌ی ۴-۱۵- تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی دوم برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی

۸۲ همراه با اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره برای $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ و تغییرات میدان

نگاره‌ی ۴-۱۶- تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی سوم برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی

با اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره

۸۳ برای $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ و $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$

نگاره‌ی ۴-۱۷- تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی سوم برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی

۸۴ با اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره برای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$ و تغییرات ω

صفحه	عنوان
	نگاره‌ی ۴-۱۸- تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی سوم برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی
۸۵	همراه با اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره برای $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ و تغییرات میدان.....
	نگاره‌ی ۴-۱۹- تغییرات عامل ساختار برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی سه ترازه همراه با اثر
۸۵	بر هم‌کنش الکترون-حفره و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره بر حسب تغییرات میدان.....
	نگاره‌ی ۴-۲۰- تغییرات عامل ساختار برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی دو ترازه همراه با اثر
۸۶	بر هم‌کنش الکترون-حفره و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره بر حسب تغییرات فرکانس
	نگاره‌ی ۴-۲۱- تغییرات عامل ساختار برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی دو ترازه همراه با اثر
۸۶	بر هم‌کنش الکترون-حفره و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره بر حسب تغییرات میدان.....
	نگاره‌ی ۴-۲۲- تغییرات عامل ساختار برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی چهار ترازه همراه با اثر
۸۷	بر هم‌کنش الکترون-حفره و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره بر حسب تغییرات فرکانس
	نگاره‌ی ۴-۲۳- تغییرات عامل ساختار برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی چهار ترازه همراه با اثر
۸۷	بر هم‌کنش الکترون-حفره و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-حفره بر حسب تغییرات میدان.....
	نگاره‌ی ۴-۲۴- تغییرات ضرایب جذب خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای یک سیستم
۸۸	دو الکترونی در حضور میدان الکتريکی خارجی با و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون.....
	نگاره‌ی ۴-۲۵- ضرایب جذب خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای یک سیستم دو الکترونی
۸۹	در حضور میدان الکتريکی خارجی برای فرکانس‌های مختلف به ازای $F = 50(kv / cm)$
	نگاره‌ی ۴-۲۶- تغییرات ضرایب جذب خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای یک سیستم
۹۰	دو الکترونی با وجود اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون بر حسب تغییرات F
	نگاره‌ی ۴-۲۷- تغییرات ضرایب شکست خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای یک سیستم
۹۱	دو الکترونی در حضور میدان الکتريکی خارجی با و بدون برهم‌کنش الکترون-الکترون.....
	نگاره‌ی ۴-۲۸- ضرایب شکست خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای یک سیستم

صفحه

عنوان

- ۹۲ دو الکترونی در حضور میدان الکتریکی خارجی برای فرکانس‌های مختلف
 نگاره‌ی ۴-۲۹- تغییرات ضرایب جذب خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای یک سیستم
 دو الکترونی با وجود اثر بر هم کنش الکترون-حفره بر حسب تغییرات
- ۹۳ F و فرکانس $\omega_0 = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$
 نگاره‌ی ۴-۳۰- تغییرات ضریب همسوسازی نوری برای یک سیستم دو الکترونی با بر هم‌کنش
 الکترون-الکترون و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون
- ۹۴ برای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$ و $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$
 نگاره‌ی ۴-۳۱- تغییرات ضریب همسوسازی نوری برای یک سیستم دو الکترونی همراه با
 اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون برای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$ و تغییرات ω
 نگاره‌ی ۴-۳۲- تغییرات ضریب همسوسازی نوری برای یک سیستم دو الکترونی همراه با
 اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون برای $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ و تغییرات میدان
 نگاره‌ی ۴-۳۳- تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی دوم برای یک سیستم دو الکترونی با و بدون اثر بر هم‌کنش
 الکترون-الکترون برای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$ و $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$
 نگاره‌ی ۴-۳۴- تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی دوم برای یک سیستم دو الکترونی همراه با
 اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون با تغییرات ω
 نگاره‌ی ۴-۳۵- تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی دوم برای یک سیستم دو الکترونی همراه با اثر بر هم‌کنش
 الکترون-الکترون برای $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ و تغییرات میدان
 نگاره‌ی ۴-۳۶- تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی سوم برای یک سیستم دو الکترونی با و بدون اثر بر هم‌کنش

صفحه	عنوان
۹۹	الکترون-الکترون برای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$ و $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ نگاره‌ی ۴-۳۷. تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی سوم برای یک سیستم دو الکترونی همراه با اثر بر هم‌کنش
۱۰۰	الکترون-الکترون برای $F = 50 \left(\frac{kv}{cm} \right)$ و تغییرات ω نگاره‌ی ۴-۳۸. تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی سوم برای یک سیستم دو الکترونی همراه با اثر بر هم‌کنش
۱۰۱	الکترون-الکترون برای $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ و تغییرات میدان نگاره‌ی ۴-۳۹. تغییرات عامل ساختار برای یک سیستم دو الکترونی سه ترازه همراه با اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون بر حسب
۱۰۱	تغییرات میدان در $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ نگاره‌ی ۴-۴۰. تغییرات عامل ساختار یک سیستم دو الکترونی دو ترازه همراه با اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون بر حسب
۱۰۲	تغییرات فرکانس در $F = 50 (kv / cm)$ نگاره‌ی ۴-۴۱. تغییرات عامل ساختار برای یک سیستم دو الکترونی دو ترازه همراه با اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون بر حسب تغییرات میدان نگاره‌ی ۴-۴۲. تغییرات عامل ساختار برای یک سیستم دو الکترونی چهار ترازه همراه با اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون بر حسب تغییرات میدان نگاره‌ی ۴-۴۳. تغییرات عامل ساختار برای یک سیستم دو الکترونی چهار ترازه همراه با اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون و بدون اثر بر هم‌کنش الکترون-الکترون
۱۰۳	بر حسب تغییرات میدان در $\omega = 1.0 \times 10^{14} (S^{-1})$ سهموی در حضور میدان الکتریکی خارجی با بر هم‌کنش الکترون-حفره و الکترون-الکترون ۱۰۴

- نگاره‌ی ۴-۴۵. مقایسه‌ی تغییرات ضرایب جذب خطی و غیرخطی و ضریب جذب کل برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی در حضور میدان الکتریکی خارجی با بر هم کنش الکترون-حفره و الکترون-الکترون. ۱۰۵
- نگاره‌ی ۴-۴۶. مقایسه‌ی تغییرات ضریب همسوسازی نوری برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی در حضور میدان الکتریکی خارجی با بر هم کنش الکترون-حفره و بر هم کنش الکترون-الکترون. ۱۰۵
- نگاره‌ی ۴-۴۷. مقایسه‌ی تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی دوم برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی در حضور میدان الکتریکی خارجی با بر هم کنش الکترون-حفره و بر هم کنش الکترون-الکترون. ۱۰۶
- نگاره‌ی ۴-۴۸. مقایسه‌ی تغییرات ضریب هماهنگ مرتبه‌ی سوم برای نقطه‌ی کوانتومی سهموی در حضور میدان الکتریکی خارجی با بر هم کنش الکترون-حفره و بر هم کنش الکترون-الکترون. ۱۰۶

فصل اول

پیش درآمد

۱-۱ مقدمه

انسان کنجکاو همواره در دنیای ناشناخته‌ها سیر کرده تا بتواند گره‌ای از مشکلات خود بگشاید و جهان پیرامون را به تسخیر خود درآورد. یکی از علومی که در این امر مدد رسان انسان بوده است فناوری نانو می‌باشد. این فناوری به دنیای اتم‌ها و مولکول‌ها مربوط می‌شود، به آشنایی با روش‌های کوچک سازی از یک سو و پی بردن به مکانیزم جاری در قلمرو ۱۰۰۰-۱ نانومتر از سوی دیگر [۱]. پیدایش فناوری نانو انقلاب عظیمی در تمامی ابعاد زندگی بشری اعم از الکترونیک، پزشکی، صنایع نظامی و فضایی را به وجود آورد. تسری عرصه علم مواد به مقیاس نانو دسترسی به خواص منحصر به فردی را ممکن می‌سازد. استفاده از اتم‌ها و مولکول‌ها به طور مجزا در جایگاه مناسب ساختمانی آن‌ها، سبب کاربرد شگرف این فناوری شده است. یکی از زمینه‌های این فناوری که موضوع پژوهش بسیار گسترده‌ای در عصر حاضر بوده، نیم رساناهای صفر بعدی^۱ یا نقاط کوانتومی^۲ می‌باشد. در قیاس با ساختارهای کپه‌ای^۳ (سه بعدی) و سیم‌های کوانتومی^۴ (یک بعدی)، نقاط کوانتومی به علت وجود محدودیت فضایی اعمال شده بر حرکت حامل‌های بار و در نتیجه گسسته شدن چگالی حالت‌های الکترونی، دارای خواص نوری کاملاً منحصر به فردی می‌باشند. لذا این سیستم‌ها در ساخت قطعات اپتیکی و الکترونیکی کاربرد فراوانی دارند [۲].

۱-۲ مقدمه‌ای بر نانو تکنولوژی

۱-۲-۱ پیشینه‌ی نانو

شاید بتوان منشأ پیدایش فناوری نانو را در یونان باستان جستجو کرد. دانشمندان آن دوره بر این باور

¹ Zero dimensional semiconductors

² Quantum dots

³ Bulk material

⁴ Quantum wires

بودند که مواد را می‌توان به اجزاء کوچکی تقسیم کرد تا به ذراتی خرد نشدنی رسید. دموکریتوس^۵ فیلسوف یونانی واژه اتم به معنی تقسیم نشدنی را برای توصیف ذرات سازنده مواد به کار برد. به طور دقیق نمی‌توان گفت از چه زمانی مزایای استفاده از موادی با اندازه‌ای از مرتبه‌ی نانو برای بشر مشخص شد، اما مشهور است که در قرن چهارم میلادی شیشه‌گران رومی شیشه‌هایی حاوی فلزات نانومتری می‌ساختند. در سال ۱۶۶۱ رابرت بویل^۶ در کتاب «شیمیدان شکاک» عقیده‌ی ارسطو مبنی بر این که ماده از چهار عنصر آب، خاک، آتش و هوا تشکیل شده را مورد سرزنش قرار داده و پیشنهاد کرد ذرات ریز مواد به روش‌های مختلف ترکیب شده تا کورپسل‌ها^۷ یعنی بخش‌های بسیار کوچکی از یک ماده را تشکیل دهند. وی به اهمیت خوشه‌ها که به سادگی فرو نمی‌پاشند نیز اشاره کرد. در سال ۱۸۷۵ مایکل فارادی^۸ در مقاله‌ای تلاش کرد تا چگونگی تأثیر ذرات فلزی بر رنگ پنجره کلیسا را توضیح دهد تا این که در سال ۱۹۰۸ گوستاوما^۹ توانست وابستگی رنگ شیشه‌ها به اندازه و نوع فلزات را مشخص کند. در دهه‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰ میلادی فعالیت‌های تجربی روی ذرات ریز فلزی وجود داشت، اما تعداد آزمایش‌ها محدود بوده و در آن زمان به این فعالیت‌ها «نانو فناوری» نمی‌گفتند، تا این که در سال ۱۹۷۴ نوریو تانیگوچی^{۱۰} استاد دانشگاه علوم توکیو واژه‌ی فناوری نانو را بر سر زبان‌ها انداخت. تا دهه ۱۹۸۰ به علت عدم وجود روش‌های مناسب ساخت نانو ساختارها فعالیت زیادی صورت نپذیرفت. در سال ۱۹۸۱ روشی برای ساخت خوشه‌های فلزی ابداع شد. در این روش با استفاده از یک لیزر کانونی بر توان، فلزات تبخیر و به پلاسمای داغ مبدل می‌شوند، سپس دمش ناگهانی هلیوم بخار را سرد می‌کند و موجب چگالش اتم‌های فلزی و تبدیل آن‌ها به خوشه‌هایی با اندازه‌های مختلف می‌شود. در سال ۱۹۸۵ از این روش برای ساخت فولرین (C₆₀) استفاده شد. در سال ۱۹۸۲ اکیموف^{۱۱} و اموشنکو^{۱۲}، دو دانشمند روسی نخستین مشاهده اثرات محدودیت کوانتومی^{۱۳} را گزارش دادند. نخستین بلور فوتونی سه بعدی که دارای یک گاف نوری کامل بود، در سال ۱۹۹۰ به وسیله یابلونوویچ^{۱۴} ساخته شد [۴]. مایکل روکز^{۱۵} در سپتامبر ۲۰۰۱ طی مقاله‌ای به تعدادی از چالش‌های پیش روی این تکنولوژی اشاره کرده است. یک چالش اساسی، ارتباط بین دنیای نانو و دنیای بزرگ مقیاس است. مثلاً وقتی اندازه‌ی میله صلب کاهش می‌یابد، بسامد تشدید مغناطیسی آن زیاد می‌شود. در نظام نانو، بسامدها می‌توانند به بزرگی 10^{10} هرتز و محدوده‌ی دامنه‌های ارتعاش 10^{-12} (پیکومتر) تا 10^{-15} (فمومتر) باشند [۳].

⁵ Democritus

⁶ Robert Boil

⁷ corpuscle

⁸ Michael Farady

⁹ Gustav Mie

¹⁰ Norio Taniguchi

¹¹ Ekimov

¹² Omushchenko

¹³ Quantum confinement

¹⁴ Yablonovich

¹⁵ Michal Roukes