دانشگاه اراک

دانشکده علوم پایه

کارشناسی ارشد فیزیک حالت جامد

محاسبه‌ی انرژی حالت پایه‌ی سیم‌های کوانتومی با مقطع دایره‌ای

پژوهشگر

مطهره قمری

استاد راهنما

دکتر سید عبدالعلی ذوالانواری

استاد مشاور

دکتر علی‌حسین محمدظاهری

تابستان ۱۳۹۰

بسم ا... الرحمن الرحیم

محاسبه‌ی انرژی حالت پایه‌ی سیم‌های کوانتومی با مقطع دایره‌ای

توسط:

مطهره قمری

پایان نامه

ارائه شده به مدیریت تحصیلات تکمیلي به عنوان بخشي از فعالیت هاي تحصیلي لازم براي اخذ درجه کارشناسي ارشد

در رشته فیزیک حالت جامد

از

دانشگاه اراک

اراک-ایران

ارزیابي وتصویب شده توسط کمیته پایان نامه بادرجه: عالی

دکتر سید عبدالعلی ذوالانواری (استاد راهنما) ..... استادیار

دکتر علی‌حسین محمدظاهری (استاد مشاور) ..... استادیار

دکتر مهران قلی‌پورشهرکی (دانشگاه اراک) ..... استادیار

تابستان، ۱۳۹۰

تقدیم

به آن‌هایی که برای ابراز بندگی در درگاه الهی، با تمام وجود تلاش نمودند.

سپاس گزاری

پس از هر پایان اول باید خدای را شکرگزار بود که انگیزه‌ی آغاز و توانایی ادامه را ارزانی کرد و سپس با سپاس فراوان از اساتید گرانقدرم دکتر سیدعبدالعلی ذوالانواری و دکتر علی‌حسین محمدظاهری و دیگر اساتید محترمی که در این راه مرا یاری نمودند.

در این‌جا از صبوری‌ها و مهربانی‌های خانواده‌ی عزیزم که اشتیاق هماره‌شان بال پرواز بود و نگاه همیشه نگرانشان چراغ راه سپاس‌گزارم.

و در آخر در انجام این کار از کمک‌های بی‌دریغ هم‌کلاسی‌ها و دوستان عزیزی برخوردار بوده‌ام که در این‌جا از همگی آن‌ها تشکر می‌کنم.

چکیده

علی رغم مشکلات فراوان در ساخت سیستم‌های‌کوانتومی یک بعدی مانند سیم‌های‌کوانتومی، مواد نانوساختار در چند دهه‌ی اخیر توسعه یافته‌اند.

در این تحقیق بعد از مقدمه‌ای کوتاه درباره‌ی فناوری نانو، کاربردهای آن، مواد نانوساختار و روش-های ساخت آن توضیح داده شده است و پس از آن به توصیف سیم‌های‌کوانتومی، روش‌های ساخت، ویژگی و کاربردهای آن پرداخته‌ایم.

به دنبال آن ترکیب گالیم‌آرسناید و اهمیت آن در فیزیک حالت جامد معرفی شده است.

در پایان انرژی و تابع‌موج سیم‌های‌کوانتومی با سطح مقطع دایره‌ای(گالیم‌آرسناید) با جرم‌موثر ثابت و متغییر نسبت به شعاع با استفاده از حل معادله‌ی شرودینگر به روش عددی محاسبه شده است.

و همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش شعاع، کاهش انرژی سیم‌های‌کوانتومی مشاهده شد.

فهرست

عنوان صفحه

فصل اول

۱-۱ مقدمه ۲

۱- ۲ تاریخچه‌ی فناوری نانو ۲

۱-۲-۱ فناوری نانوی کهن ۳

۱-۲-۲ فناوری نانوی نوین ۴

۱-۲-۳ رویدادهای مهم در زمینه ی فناوری نانو ۶

۱-۲-۴ اهمیت فناوری نانو ۷

۱-۲-۵ کاربردها ۸

فصل دوم

۲-۱ مقدمه ۱۱

۲-۲ نقاط، سیم ها و چاه‌های کوانتومی ۱۱

۲-۲-۱ ایجاد نانو ساختارهای کوانتومی ۱۵

۲-۳ سیم‌های کوانتومی ۱۸

۲-۳-۱ روش‌های ساخت ۲۰

۲-۳-۲ ویژگی مغناطیسی ۲۲

۲-۳-۳ ویژگی اپتیکی ۲۵

۲-۳-۴ ویژگی انتقالی ۲۵

۲-۳-۵ رسانایی گرمایی ۲۷

۲-۴ کاربردها ۲۸

۲-۵ گالیم ۳۰

۲-۵-۱ آرسنیک ۳۳
۲-۵-۲ ترکیب گالیم آرسناید ۳۵
۲-۵-۳ ساخت بلور گالیم آرسناید ۳۷
۲-۵- ۴ کاربردها..... ۳۸
۲-۶ جرم‌موثر گالیم آرسناید..... ۳۹

فصل سوم

۳-۱ مقدمه ۴۲
۳-۲ به‌دست‌آوری انرژی سیم‌های کوانتومی با جرم‌موثر ثابت ۴۲
۳-۲-۱ حالت اول: پتانسیل در داخل سیم صفر ودر خارج سیم بینهایت ۵۱
۳-۲-۲ حالت دوم: پتانسیل در داخل سیم صفر و در خارج سیم مقدار متناهی $V.$ ۵۵
۳-۲-۳ به‌دست‌آوری تابع موج های سیم های کوانتومی در حالت حدی ۵۸
۳-۳ به‌دست‌آوری انرژی سیم‌های کوانتومی با جرم‌موثر متغییر با شعاع ۶۳

فصل چهارم

۴-۱ نتیجه‌گیری ۷۶
۴-۱-۱ محدودیت‌ها ۷۸
۴-۱-۲ پیشنهادات ۷۸

صفحه‌ی چکیده و صفحه‌ی عنوان به زبان انگلیسی

فهرست اشکال

عنوان صفحه

فصل اول

۱-۱جام لیکرگوس ۴

فصل دوم

۲-۱ ایجاد نانو ساختارهای مستطیلی با کاهش ابعاد ماده ۱۲

۲-۲ ایجاد نانو ساختارهای منحنی الخط با کاهش ابعاد ماده ۱۲

۲-۳ یک روش ساخت سیم‌های کوانتومی..... ۱۳

۲-۴ یک سیم‌کوانتومی و نمایش شماتیکی از درجات آزادی حرکت الکترون ۱۴

۲-۵ مراحل شکل‌گیری سیم یا نقاط‌کوانتومی توسط لیتوگرافی با اشعه‌ی الکترونی ۱۶

۲-۶ چاه کوانتومی چهار لایه روی یک زمینه که توسط لاک محافظ پوشانده شده است ۱۷

۲-۷ آرایه‌ی نقاط‌کوانتومی که توسط لیتوگرافی آرایش اولیه‌ی در شکل ۲-۶ نشان داده شده است..... ۱۸

۲-۸ وادارندگی نانوسیم‌های نیکل بر حسب شعاع ۲۴

۲-۹ گالیم ۳۰

۲-۱۰ آرسنیک ۳۳

۲-۱۱ گالیم‌آرسناید ۳۵

۲-۱۲ جرم‌موثر الکترون‌ها در گالیم‌آرسناید ۴۰

فصل سوم

۳-۱ طرح شماتیکی از یک سیم‌کوانتومی با مقطع دایره‌ای ۴۲

۳-۲ نمودار توابع بسل ۴۹

۳-۴ نمودار توابع نویمان ۶۰

فصل چهارم

۴-۱ نمودار انرزی برای یک سیم کوانتومی با مقطع دایره‌ای ۷۷

فصل اول

مقدمه‌ای بر فناوری نانو

۱-۱ مقدمه

به دلیل اهمیت فناوری نانو در دنیای امروز در این فصل به تاریخچه‌ی نانوی کهن و نوین پرداخته و چند مورد از کاربردهای آن بیان می‌شود.

۱-۲ تاریخچه‌ی فناوری نانو

این که فناوری نانو دقیقا از چه زمانی شروع شد درست مشخص نیست. در طول تاریخ دانشمندان معتقد بودند مواد را می‌توان به اجزای کوچک تقسیم کرد و به ذراتی رسید که خرد ناشدنی هستند و این ذرات بنیان مواد را تشکیل می‌دهند تا این که در حدود ۴۰۰ سال پیش از میلاد مسیح، دموکریتوس فیلسوف یونانی برای اولین بار واژه‌ی اتم را که در زبان یونانی به معنی تقسیم نشدنی است، برای توصیف ذرات سازنده‌ی مواد به کار برد از این رو شاید بتوان او را پدر فناوری و علوم نانو دانست[۱]. نانو فناوری واژه‌ای است که به تمام فناوری‌های پیشرفته در عرصه‌ی کار با مقیاس نانو اطلاق می‌شود. معمولا منظور از مقیاس نانو، ابعادی در حدود یک تا صد نانومتر ($۱\ nm=۱۰^{-۹}m$) است.

۱-۲-۱ فناوری نانوی کهن

انسان از دیرباز به طور غیر مستقیم تا حدودی، به خاصیت ذرات ریز پی برده بود[۲]، مثلا صدها سال است که شیمیدانان از تکنیک‌هایی در کار خود استفاده می‌کنند که بی‌شباهت به تکنیک-های امروزی نانو نیست. بشر مدت‌هاست از برخی شگردهای این فناوری در بهینه کردن فرایندها و ساخت با کیفیت‌تر اشیا بهره می‌برد[۳].

شاید اولین نانوتکنولوژیست‌ها شیشه‌گران قرون وسطی هستند که در ساخت شیشه‌ی کلیساهای خود از ذرات نانومتری طلا استفاده می‌کردند و با این کار شیشه‌های رنگی بسیار جذابی به دست می‌آمد، که رنگ به وجود آمده در این شیشه‌ها بر پایه‌ی این حقیقت است که مواد با ابعاد نانو دارای همان خواص مواد با ابعاد میکرو نمی‌باشد و یا در قرن نهم توسط صنعت‌گران منطقه‌ی بین النهرین برای جلا دادن ظروف سفالی به طور خاص از نانو ذرات استفاده می‌شد، که به نظر می‌آید قدیمی‌ترین شی به دست آمده که از این طریق ساخته شده، جام لیکرگوس باشد که متعلق به قرن چهارم میلادی بوده که در موزه‌ای در انگلستان نگهداری می‌شود.

این جام، بسته به جهت نوری که به آن می‌تابد به رنگ‌های متفاوتی دیده می‌شود. در معرض نور غیرمستقیم جام سبز به نظر می رسد اما با تابیدن نورمستقیم به آن، نقوش برجسته‌ی آن به رنگ قرمز و بدنه‌ی آن نیمه‌شفاف می‌شود.

می‌توان این بخش از فعالیت‌ها را با نام فناوری نانوی کهن نامید. زیرا اگرچه به طور مستقیم از فراورده‌ها و خواص ناشی از نانو ذرات بهره مند بوده است، ولی هیچ گونه آگاهی قبلی نسبت به اصل موضوع نداشته و عملا امکان کنترل و کندوکاو در نانوذرات را نداشته است.

۱-۱ جام لیکرگوس

۱-۲-۲ فناوری نانوی نوین

اولین جرقه‌ی فناوری نانوی نوین در سال ۱۹۵۹ زده شد. در این سال ریچارد فاینمن طی سخنرانی‌ای با عنوان "فضای زیادی، در سطوح پایین وجود دارد"، ایده‌ی فناوری نانو را مطرح ساخت[۴]. وی این نظریه را ارایه داد که در آینده‌ای نزدیک می‌توانیم مولکول‌ها و اتم‌ها را مستقیما دست‌کاری کنیم.

فاینمن در سخنرانی خود این پرسش را مطرح کرد که: "چه اتفاقی رخ می دهد اگر ما بتوانیم اتم‌های یکسانی را تک‌تک جا به جا کنیم و دوباره آن‌ها را به دلخواه بچینیم؟"

همچنین او در ادامه، این نظریه را ارایه کرد که در آینده‌ای نزدیک می‌توانیم مولکول‌ها و اتم‌ها را به صورت مستقیم دست‌کاری کنیم، و با این دست‌کاری مثلا می‌توان تمام دایره المعارف بریتانیا را بر روی یک سنجاق نگارش کرد یعنی ابعاد آن به اندازه ی $\frac{۱}{۲۵۰۰۰}$ ابعاد واقعی‌اش کوچک می‌شود. و

او همچنین از دوتایی کردن اتم‌ها برای کاهش ابعاد کامپیوترها سخن گفت و به این جهت است که فاینمن را به عنوان پایه‌گذار نانو می‌شناسند.

واژه‌ی فناوری نانو اولین بار توسط نوریوتاینگوچی استاد دانشگاه علوم توکیو در سال ۱۹۷۴ بر زبان‌ها جاری شد. اولین واژه را برای توصیف ساخت مواد دقیقی که اندازه‌ی ابعادی آن‌ها در حد نانومتر است، به کار برد[۵].

در سال ۱۹۸۶ این واژه توسط اریک درکسلر در کتابی تحت عنوان موتور آفرینش؛ آغاز دوران نانوفناوری باز آفرینی و تعریف مجدد شد. وی این واژه را به شکل عمیق‌تری در رساله‌ی دکترای خود بررسی کرد و بعدها آن را در کتابی تحت عنوان نانوسیستم‌ها، ماشین‌های مولکولی و چگونگی ساخت و محاسبات آن ها توسعه داد.

واقعیت این است که علوم نانو به مقیاس کوچک‌تر از اتم کاری ندارند، بلکه نگرشی متفاوت در مورد پدیده‌های جدید می‌دهد که با این نظریه، جهان روندی رو به کوچک‌تر شدن پیش می‌گیرد.

بنابراین فناوری نانو، فناوری است که بر پایه‌ی دست‌کاری تک‌تک اتم‌ها و مولکول‌ها استوار بوده تا بتوان ساختاری پیچیده را با خصوصیات اتمی تولید کرد.

تفاوت اصلی فناوری نانو با فناوری‌های دیگر در مقیاس مواد و ساختارهایی است که در این فناوری مورد استفاده قرار می‌گیرند. البته تنها کوچک بودن اندازه مد نظر نیست؛ بلکه زمانی که اندازه‌ی مواد در این مقیاس قرار می‌گیرد، خصوصیات ذاتی آن‌ها از جمله رنگ، استحکام، مقاومت خوردگی و ... تغییر می‌یابد. در حقیقت اگر بخواهیم تفاوت این فناوری را با فناوری‌های دیگر به صورت قابل ارزیابی بیان نماییم، می‌توانیم وجود "عناصر پایه" را به عنوان یک معیار ذکر کنیم. عناصر پایه در حقیقت همان عناصر نانومقیاسی هستند که خواص آن‌ها در حالت نانومقیاس با خواص‌شان در مقیاس بزرگ‌تر فرق می‌کند[۶].

برای درک بهتر مقیاس نانو می‌توان گفت که یک نانومتر یک هزارم میکرون است. همچنین با ایجاد ارتباط میان اندازه‌ی اتم‌ها و مقیاس نانو می‌توان یک نانومتر را راحت‌تر تصور کرد. یک نانومتر برابر قطر ۱۰ اتم هیدروژن یا ۵ اتم سیلیسیم است.

چیزی که با این تشابه مشخص می‌شود این است که نانوفناوری عبارت است از هنر دست‌کاری مواد در مقیاس اتمی یا مولکولی و به خصوص ساخت قطعات و لوازم میکروسکوپی.

لذا علم نانو را می توان بسط علم به دنیای بسیار کوچک دانست زیرا می‌تواند تمام بخش‌های تکنولوژی را به دنیای واقعی کوچک‌ترین‌ها ببرد. بنابراین علم نانو و نانوفناوری را می‌توان نگرش عمیق در پژوهش و تحولات دانست که هدف آن کنترل رفتار و ساختار بنیادی مواد در حد اتم‌ها و مولکول‌ها می‌باشد. در نتیجه می‌توان نانوفناوری را در یک فرایند خود سامان ده اتم‌ها، مولکول‌های مجزا یا مولکول‌هایی که به صورت خوشه‌وار درساختارهای مواد و قطعات با ویژگی‌های متفاوت هستند، پنداشت. پس باید در کنار اثرات کوچک شدگی قطعات، افزایش تعداد آن‌ها را نیز مد نظر قرار داد. به عبارتی دیگر باید به فرآیند کوچک شدن قطعات از یک طرف و به افزایش تعداد آن از طرف دیگر نگریست و به این نکته‌ی مهم توجه داشت که مرتب قرار گرفتن این قطعات بسیار اهمیت دارد چرا که می‌تواند بر اثر ناهماهنگی که بین آن‌ها صورت می‌گیرد بازده‌ی قطعات الکترونیکی را کاهش داده و یا حتی مانع کارکرد آن شود[۷].

۱-۲-۳ رویدادهای مهم در زمینه ی فناوری نانو

۱۸۵۷ مایکل فارادی محلول کلوئیدی طلا را کشف کرد.

۱۹۰۵ تشریح رفتار محلول‌های کلوئیدی توسط آلبرت انیشتین.

۱۹۳۲ ایجاد لایه‌های اتمی به ضخامت یک مولکول توسط لنگمویر (Langmuir).

۱۹۵۹ فاینمن ایده‌ی " فضای زیاد در سطوح پایین " را برای کار با مواد در مقیاس نانو مطرح کرد.

۱۹۷۴ برای اولین بار واژه فناوری نانو توسط نوریو تانیگوچی بر زبان‌ها جاری شد.

۱۹۸۱ IBM دستگاهی اختراع کرد که به کمک آن می‌توان اتم‌ها را تک‌تک جابه‌جا کرد.

۱۹۸۵ کشف ساختار جدیدی از کربن C۶۰ .

۱۹۹۰ شرکت IBM توانایی کنترل نحوه قرارگیری اتم‌ها را نمایش گذاشت.

۱۹۹۱ کشف نانو لوله‌های کربنی.

۱۹۹۳ تولید اولین نقاط‌کوانتومی با کیفیت بالا.

۱۹۹۷ ساخت اولین نانوترانزیستور.

۲۰۰۰ ساخت اولین موتور DNA.

۲۰۰۱ ساخت یک مدل آزمایشگاهی سلول سوخت با استفاده از نانولوله.

۲۰۰۲ شلوارهای ضدلک به بازار آمد.

۲۰۰۳ تولید نمونه‌های آزمایشگاهی نانوسلول‌های خورشیدی.

۲۰۰۴ تحقیق و توسعه برای پیشرفت در عرصه‌ی فناوری نانو ادامه دارد.

۱-۲-۴ اهمیت فناوری نانو

فناوری نانو رویکردی جدید به علم و فناوری و پژوهش است به عبارت دیگر نگاهی بنیادی از مقیاس مولکولی به دنیای اطراف است.

تحلیل‌گران بر این باورند که فناوری نانو، فناوری زیستی و فناوری اطلاعات، سه قلمرو علمی هستند که انقلاب سوم صنعتی را شکل می‌دهند. پیش از این، انسان دو انقلاب بزرگ: انقلاب کشاورزی و انقلاب صنعتی را پشت سر گذاشته است. تجربه‌ی این انقلاب‌ها به انسان آموخته است که چگونه چنین تحولی می‌تواند زندگی بشر را تحت تاثیر قرار دهد. از این رو، بشر با آمادگی بیشتری وارد عرصه‌ی اطلاعات و ارتباطات گردید. در راستای این تحولات کشورهای در حال

توسعه که اغلب از دو انقلاب پیشین جا مانده اند می‌کوشند با سرمایه‌گذاری در این سه قلمرو، عقب‌ماندگی خود را جبران کنند[۹].

مهم‌ترین عامل و محرک اصلی رشد فناوری نانو، سود اقتصادی آن می باشد.این رویکرد جدید ریشه در پنجاه سال گذشته دارد و در علوم فیزیک و شیمی رد پای آن دیده می‌شود. در فناوری نانو قادر به تولید ساختارهایی هستیم که در طبیعت موجود نیست.

علم نانو و فناوری نانو، اطلاعاتی را پیرامون کنترل اندازه‌ی ساختارهای نانو، توزیع اندازه‌ی این مواد و ترکیبات و نحوه ی چیدمان آن‌ها را ارایه می دهد[۱۰]. برخی از مزایای فناوری نانو، تولید مواد قوی‌تر و کاهش هزینه‌های تولید است. تفاوت اصلی فناوری نانو با سایر فناوری‌ها، در مقیاس مواد و ساختارهایی است که در این فناوری مورد استفاده قرار می‌گیرد و معیار اصلی آن عناصر پایه است.

عناصر پایه همان عناصر نانو مقیاسی می‌باشند که خواص‌شان در حالت نانو در مقایسه با مقیاس بزرگ‌تر تفاوت دارد. مثلا به دلیل توسعه‌ی خواص ویژه‌ی پودرهای بسیار ریز شیمی‌سطح؛ نظیر تراکم، مقاومت، خواص نوری و واکنش‌های سینتیک؛ تقاضای این پودرهای ریز در حوزه‌ها و صنایع مختلفی مانند مواد سرامیکی، رنگدانه‌ها، محصولات شیمیایی، داروشناسی و کاغذسازی رو به گسترش است.

۱-۲-۵ کاربردها

در حقیقت کاربرد فناوری نانو از کاربرد عناصر پایه نشات می‌گیرد. هر کدام از این عناصر پایه، ویژگی‌های خاصی دارند که استفاده از آن‌ها در زمینه‌های مختلف، موجب ایجاد خواص جالبی می‌گردد. از جمله کاربردهای فناوری نانو می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. در الکترونیک مانند دیودهای نورافشان

۲. در ساخت حسگرهای هوشمند مانند حسگرهای شیمیایی و زیستی قابل اطمینان و دارای عمر طولانی

۳. در عرصه‌ی پزشکی مانند نانو روبات‌ها
۴. در حمل و نقل جهت راندمان بالای مصرف سوخت
۵. در علوم کشاورزی برای تولید محصولات مرغوب‌تر
۶. در صنعت مانند صنعت خودروسازی

فصل دوم

سیم‌های کوانتومی

۲-۱ مقدمه

در این فصل در ابتدا با بیان ساختارهای کوانتومی و روش‌های ساخت آن‌ها به توضیح سیم-کوانتومی، روش ساخت و کاربرد آن‌ها پرداخته و در ادامه با معرفی عنصرهای گالیم و آرسنیک، ترکیب گالیم‌آرسناید، روش ساخت بلور گالیم‌آرسناید و کاربردهای آن را توضیح داده و در آخر به معرفی جرم موثر سیم‌کوانتومی گالیم‌آرسناید متغییر با شعاع پرداخته شده است.

۲-۲ نقاط، سیم‌ها و چاه‌های کوانتومی

وقتی که ابعاد یک ماده به طور پیوسته از اندازه‌های بزرگ مانند متر و سانتی‌متر به اندازه‌های کوچک کاهش می‌یابد، در ابتدا خواص ثابت باقی مانده و به تدریج تغییرات کوچکی مشاهده می‌شود تا این که وقتی ابعاد ماده به زیر ۱۰۰ نانومتر می‌رسد تغییرات شدیدی در خواص ماده رخ می‌دهد. اگر اندازه‌ی یک بعد ماده تا محدوده‌ی نانومتر کاهش یابد در حالی که دو بعد دیگر آن بزرگ هستند، ساختاری موسوم به چاه‌کوانتومی به دست می‌آید. اگر اندازه‌ی دو بعد از ماده تا محدوده‌ی نانومتر کاهش یابد و یک بعد آن همچنان بزرگ باقی بماند، ساختار حاصل سیم-کوانتومی نامیده می‌شود. حالت حدی کاهش اندازه‌ی ماده، نقطه‌ی‌کوانتومی می باشد که در آن هر سه بعد ماده به محدوده‌ی نانومتر می‌رسد. کلمه‌ی کوانتوم به این دلیل همراه این سه نوع نانوساختار به کار می رود که تغییرات خواص فیزیکی در حوزه‌ی ابعاد بسیار کوچک ناشی از طبیعت کوانتوم- مکانیک ذرات می‌باشد. شکل ۲-۱ فرایند کاهش اندازه برای هندسه‌ی مستطیلی و شکل ۲-۲ کاهش مذبور را برای هندسه‌ی کروی نشان می‌دهد[۱۱].