دانشگاه زنجان

کنترل خواص اپتیکی نانو ذرات با استفاده از میدان‌های لیزری

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد

سحر گهرشناسان اصفهانی

استاد راهنما: دکتر محمّد محمودی

استاد مشاور: دکتر جمال داودی

مهر ۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

چکیده

در این پایان‌نامه، درهمتنیدگی[۱] بین یک سیستم نقطه کوانتومی دوگانه (مولکول نقطه کوانتومی) و میدان مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنتروپی ون‌نیومن[۲] به عنوان ابزاری برای بررسی درهمتنیدگی بین اتم و میدان استفاده شده و تأثیر پارامترهای مختلف ، نظیر تونل‌زنی (که توسط تغییر ولتاژ ایجاد می‌شود)، شدت میدان و نسبت دو گسیل خودبخودی بر رفتار درجه درهمتنیدگی سیستم بررسی شده است. با تغییر هر یک از این پارامترها، درهمتنیدگی سیستم دستخوش تغییر می‌شود، بطوریکه با تغییر پارامتر تونل‌زنی توسط تغییر ولتاژ اعمالی، آنتروپی تقلیل یافته سیستم نقطه کوانتومی و درنتیجه درهمتنیدگی دستخوش تغییر می‌شوند.

کنترل خواص اپتیکی سیستم نظیر جذب[۳]، پاشندگی[۴] و سرعت گروه[۵] نیز توسط دامنه و فاز مورد بررسی قرار گرفته است. با اعمال یک میدان دمشی[۶] و یک میدان کاوشگر[۷] به سیستم نقطه کوانتومی، ویژگی‌های جذب و پاشندگی سیستم وابسته به فاز خواهند بود، بنابراین خصوصیات اپتیکی سیستم را در حضور پارامتر تونل‌زنی توسط دامنه و فاز میدان‌های اعمالی می‌توان کنترل کرد.

---

[۱] $Entanglement$

[۲] $John\ Von\ Neumann$

[۳] $absorption$

[۴] $dispersion$

[۵] $group\ velocity$

[۶] $coupling\ field$

[۷] $probe\ field$

فهرست

چکیده . . . . . سه

مقدمه . . . . . هفت

۱ مقدمه ای بر نانو تکنولوژی

۱.۱ تعریف فناوری نانو: ۲

۱.۱.۱ دنیای جدید نانو مقیاس ۴

۲.۱.۱ زیرشاخه‌های فناوری نانو ۵

۳.۱.۱ چگونه می‌توان ساختارهای خیلی کوچک را ایجاد نمود؟ ٦

۴.۱.۱ خواص وابسته به اندازه مواد ٦

۲.۱ چاه ها، سیم‌ها و نقاط کوانتومی ۹

۱.۲.۱ ساختار الکترونی نیمه رساناها : ۱۱

۲.۲.۱ نقاط کوانتومی ۱۲

۳.۲.۱ کاربردهای نقاط کوانتومی : ۱۴

۲ بر هم‌کنش نور با ماده

۱.۲ برهمکنش اتم با میدان الکترومغناطیسی ۱۶

۱.۱.۲ نظریه کلاسیک برهمکنش اتم با میدان الکترومغناطیسی ۱۷

۲.۱.۲ نظریه نیمه کلاسیک برهمکنش اتم با میدان الکترومغناطیسی ۲۰

۳.۱.۲ فرمول بندی ماتریس چگالی ۲۳

۲.۲ نور کند سرعت و نور تند سرعت ۲۵

۳.۲ درهمتنیدگی و آنتروپی کوانتومی ۳۰

۱.۳.۲ درهمتنیدگی ۳۱

۲.۳.۲ آنتروپی کوانتومی ۳۱

۳.۳.۲ آنتروپی کوانتومی معیاری برای سنجش درهمتنیدگی ۳۲

۳ کنترل آنتروپی توسط پارامتر تونل‌زنی در یک مولکول نقطه کوانتومی

۱.۳ مدل سیستم اتمی و معادلات حرکت ۳۶

۲.۳ تحول آنتروپی و درهمتنیدگی : ۳۸

۳.۳ بحث و بررسی در مورد درهمتنیدگی درمولکول نقطه کوانتومی ۳۹

۴.۳ نتیجه گیری ۴۲

۴ کنترل خواص اپتیکی نقاط کوانتومی با استفاده از دامنه و فاز

۱.۴ مدل سیستم اتمی و معادلات حاکم بر آن ۴۴

۲.۴ بحث و بررسی ۴۸

۳.۴ بحث و بررسی رفتار دینامیکی سیستم ۵۳
۴.۴ نتیجه‌گیری ۵۸
مراجع ۵۹

مقدمه

نقاط کوانتومی نیمه‌رساناهایی در ابعاد نانو هستند که حرکت الکترون‌های نوار رسانش در هر سه بعد فضا محدود شده است، بنابراین الکترون‌ها و حفره‌ها تنها مجموعه گسسته‌ای از انرژی‌ها را می‌توانند اشغال کنند و خواص اپتیکی مشابه با بخارهای اتمی از خود نشان می‌دهند[۱،۲]. بنابراین نقاط کوانتومی ویژگی‌هایی شبیه به بخارهای اتمی دارند با این تفاوت که دارای ضرایب اپتیکی غیرخطی بالا و گشتاورهای دوقطبی گذارهای درون نواری بزرگ (به دلیل جرم مؤثر کوچک الکترون) هستند. پدیده‌هایی شامل همدوسی کوانتومی مانند، لیز کردن بدون وارونگی جمعیّت(LWI)، شفافیّت القایی الکترومغناطیسی(EIT) و نور کند سرعت در نقاط کوانتومی نیز ظاهر شده است. نظریه همدوسی کوانتومی در نیمه رسانای نقطه کوانتومی بررسی شده است[۳] و همدوسی کوانتومی در آنسامبلی از نقاط کوانتومی نیز مشاهده شده است[۴—۶]. همدوسی کوانتومی در یک ساختار نقطه کوانتومی را می‌توان توسط اعمال میدان لیزری یا بوسیله تونل‌زنی الکترون القاء کرد[۷]. به دلیل کاربردهای متنوع ساختارهای نیمه‌رسانا در اپتوالکترونیک، این سیستم‌ها همواره مورد توجّه بوده‌اند.

درهمتنیدگی یکی از عجیب‌ترین جنبه‌های مکانیک کوانتومی است. در یک سیستم کوانتومی مرکب درهمتنیده، هرکدام از زیرسیستم‌ها با هم مرتبط هستند، حتی اگر دور از هم قرار داشته باشند و برهمکنشی با هم نداشته باشند. اگرچه سیستم کوانتومی مرکب می‌تواند به عنوان یک حالت خالص توضیح داده شود، اما یک چنین توضیحی برای زیرسیستم‌ها ممکن نیست. اندازه‌گیری روی یک زیرسیستم بر اندازه‌گیری روی سیستم دیگر تأثیر خواهد گذاشت. این مفهوم برای اولین بار در سال ۱۹۳۵ در یک مقاله معروف[۸] توسط اینشتین [۸]، پودلسکی [۹] و روزن [۱۰] مطرح شد، امّا نام درهمتنیدگی در مقاله دیگری که در پاسخ به مقاله EPR در همان سال توسط شرودینگر نوشته شده بود معرفی گردید. درهمتنیدگی نقش مهمی در فرآیندهای اطلاعات کوانتومی مانند ارتباطات کوانتومی [۹]، محاسبات کوانتومی[۱۰] و رمزنویسی کوانتومی[۱۱] ایفا می‌کند. سیستم‌های فیزیکی گوناگونی که درهمتنیدگی را نشان می‌دهند هم به صورت تجربی و هم به صورت تئوری بررسی شده‌اند[۱۲—۱۶]. اخیراً اثر تداخل کوانتومی بر درهمتنیدگی بررسی شده است[۱۷]. امروزه درهمتنیدگی در

[۸] $Einstein$

[۹] $Podolsky$

[۱۰] $Rosen$

برهمکنش اتم—اتم، میدان—میدان و برهمکنش اتم—میدان مشاهده شده است. فونیکس[11] و نایت[12] در مقالات خود[۱۸،۱۹] نشان دادند که آنتروپی ون‌نیومن به این دلیل که شامل همه‌ی مؤلفه‌های ماتریس چگالی می‌باشد، می‌تواند به عنوان یک معیار بسیار مفید برای درجه خلوص یک حالت کوانتومی به کار رود. آنها همچنین نشان دادند که که تحول زمانی آنتروپی جزئی اتم(میدان) همان تحول زمانی درهمتنیدگی بین اتم و میدان می‌باشد. در بخش اوّل این پایان نامه، درهمتنیدگی به وجود آمده در برهمکنش اتم—میدان از طریق آنتروپی کوانتومی و کنترل آن از طریق تونل‌زنی بررسی شده است. به این صورت که، درهمتنیدگی در یک سیستم نقطه کوانتومی دوگانه پادمتقارن مورد مطالعه قرار گرفته و تأثیر پارامترهای مختلف، نظیر تونل‌زنی(که توسط تغییر ولتاژ ایجاد می‌شود)، شدّت میدان و نسبت دو گسیل خودبخودی بر درجه‌ی درهمتنیدگی بررسی شده است.

همدوسی کوانتومی و تداخل کوانتومی نقش مهمی در برهم‌کنش میدان لیزر همدوس با سیستم کوانتومی بازی می‌کنند و کاربردهای زیادی در کوانتوم اپتیک دارند [۲۰]. یک کاربرد جالب، تغییر انتشار پالس نور در یک سیستم کوانتومی است که به خواص پاشندگی محیط وابسته است. مطالعات اولیّه بر روی انتشار نور بوسیله لرد ریلی[13] در اواخر قرن ۱۹ انجام شد[۲۲] و او اظهار داشت که یک پالس نوری در محیط با سرعت گروه حرکت می‌کند نه سرعت فاز. علاوه براین، نظریه پاشندگی غیرعادی را بیان کرد، اما او سرعت گروه پالس نور را با سرعت انرژی یا سرعت سیگنال برابر در نظر گرفت. اگرچه این موضوع باعث بروز مشکلاتی با نظریه نسبیت در محیط پاشنده شد[۲۳]، ولی مسئله توسط سامرفلد و بریلوئن حل شد[۲۴]. مطالعات عملی و تئوری برای درک انتشار نور تند[14] و نور کند[15] در یک سیستم منفرد انجام شده است. به عنوان مثال، کنترل سرعت سیستم‌های اتمی بوسیله تغییرات فرکانس، دامنه و فاز میدان‌های اعمالی انجام شده است[۲۷—۲۵]. همچنین طرح‌های گوناگونی توسط دکتر محمودی و همکارانش برای تغییر انتشار نور کند سرعت به نور تند سرعت در محیط اتمی پیشنهاد شده است[۳۲—۲۸]. از سوی دیگر، پدیده‌های مشابهی شامل همدوسی کوانتومی مانند، لیز کردن بدون وارونگی (LWI)، شفافیّت القای الکترومغناطیسی[EIT]، و نورکند سرعت، همچنین می‌تواند در سیستم‌های نیمه‌رسانا ظاهر شود. به خاطر کاربرد گسترده‌ی مؤلفه‌های نیمه‌رسانا در اپتوالکترونیک، تمایل زیادی برای دستیابی به چنین پدیده‌هایی در سیستم‌های نیمه‌رسانا وجود دارد. در بخش دیگری از این پایان‌نامه، کنترل

[11] $Phoenix$
[12] $Knight$
[13] $Lord\ Rayleigh$
[14] $superluminal$
[15] $subluminal$

خواص اپتیکی مولکول نقطه کوانتومی با استفاده از پارامترهای مختلف سیستم مانند دامنه و فاز میدان‌های اعمالی بررسی شده است. با اعمال یک میدان دمشی و یک میدان کاوشگر به سیستم نقطه کوانتومی، این خواص وابسته به فاز بوده، بطوریکه با تغییر فاز نسبی بین میدان‌های اعمالی، انتشار نور در سیستم می‌تواند به صورت تند سرعت و یا کند سرعت باشد.

فصل اول

مقدمه ای بر نانو تکنولوژی

پیشوند نانو ($Nano$) از لغت یونانی تحت نام کوتوله مشتق شده است. تا سال ۱۹۷۴ از لغت نانو تکنولوژی استفاده نشده بود، تا اینکه یکی از محققین ژاپنی به نام نوریو تانیگوچی[۱]، این لغت را در ارتباط با مهندسی مواد در اندازه‌های نانومتری مورد استفاده قرار داد. ریچارد فاینمن[۲]، متخصص کوانتوم نظری و دارنده جایزه نوبل، در سخنرانی معروف خود در سال ۱۹۶۰، با عنوان « فضاهای زیادی در سطوح پایین وجود دارد» به بررسی بعد رشد نیافته‌ای از علم مواد پرداخت که اساس و نظام عمل و اندیشه‌ی جهان را لرزاند. وی در این سخرانی اظهار داشت: «اصول فیزیکی، تا آنجایی که من توانایی فهم آن را دارم، بر خلاف ساختن اتم به اتم اشیاء، حرفی نمی‌زند». او فرض را بر این قرار داد که اگر دانشمندان فرا گرفته‌اند که چگونه ترانزیستورها و دیگر سازه‌ها را با مقیاس‌های کوچک بسازند، پس ما خواهیم توانست که آنها را کوچک و کوچک‌تر کنیم. در واقع آنها به مرزهای حقیقی‌شان در لبه‌های نامعلوم کوانتوم نزدیک خواهند شد و فقط هنگامی این کوچک شدن متوقف می‌گردد که خود اتم‌ها تا حد زیادی ناپایدار شده و غیر قابل فهم گردند. فاینمن فرض کرد، وقتی زمان یا سبک خاص اتم‌ها کشف گردد، طراحی دقیق مولکول‌ها امکان پذیر خواهد بود. در این صورت می‌توان یک اتم را به نحوی در مقابل دیگری قرار داد که ایجاد کوچکترین محصول مصنوعی و ساختگی ممکن گردد. اما با استفاده از این

[۱] $Nobuhiko\ Taniguchi$

[۲] $Richard\ Feynman$

فرم‌های بسیار کوچک چه وسایلی می‌توان ساخت؟ فاینمن در ذهن خود یک «دکتر مولکولی» را تصور کرد که صدها بار از یک سلول منحصر به فرد کوچکتر است و می‌تواند به بدن انسان تزریق شده و درون بدن برای سلامتی یا درمان و ترمیم حرکت نماید. این نظر و منطق فاینمن، دنیای اجسام و افعال «بزرگ» سال‌های صنعتی را به سوی کوچک شدن سوق داد. امّا فاینمن، هرگز از نام «نانو فناوری» استفاده نکرد. نوریو تانیگوچی این واژه را برای توصیف ساخت مواد (وسایل) دقیقی که تلورانس ابعادی آنها در حد نانومتر می‌باشد، بکار برد.

ماروین مینسکی[۳] پدر هوش مصنوعی، در اواسط دهه ۷۰، افکار در ظاهر دور از واقعیت دانشجوی جوان خود، اریک درکسلر را برای باروری تفکرات فاینمن پذیرفت و به عنوان استاد راهنما، پایان نامه او را هدایت نمود. درکسلر نسبت به وسایل بسیار کوچک فاینمن علاقمند شده بود و قصد داشت تا در مورد توانمندی‌های آنان کاوش کند. او در اوایل دهه ۸۰، درجه استادی خود را در رشته علوم کامپیوتر دریافت کرد و اولین مقاله علمی خود در مورد نانو فناوری مولکولی را در سال ۱۹۸٦ ارائه داد. واژه « نانو فناوری» مجدداً در سال ۱۹۸٦ توسط درکسلر در کتابی با عنوان «موتور آفرینش: آغاز دوران فناوری نانو» باز آفرینی و تعریف شد. وی به شکل عمیق‌تری این واژه را در رساله دکتری خود مورد بررسی قرار داد و در سال ۱۹۹۱ تنها درجه دکتری در نانو فناوری را از دانشگاه ام. آی. تی. دریافت نمود. وی هم اکنون از پیشگامان فناوری نانو به حساب می‌آید. در حقیقت کاربرد فناوری نانو از کاربرد عناصر پایه نشأت می‌گیرد. هر کدام از این عناصر پایه، ویژگی‌های خاصی دارند که استفاده از آنها در زمینه‌های مختلف، موجب ایجاد خواص جالبی می‌گردد.

۱.۱ تعریف فناوری نانو:

فناوری نانو، توانمندی تولید مواد، ابزار و سیستم‌های جدید در سطح مولکولی و اتمی (۱ تا ۱۰۰ نانومتر) است. این توانمندی با دستکاری در آرایش اتم‌ها و مولکول‌ها و بهره گیری از خواصی که در این مقیاس ظاهر می شوند، بدست می‌آید. به بیان ساده‌تر فناوری نانو به دنبال دستکاری کوچکترین اجزاء ماده (مولکول‌ها

[۳] *Marvin Minsky*

واتم‌ها) است. فناوری نانو، فناوری است که بر پایه دستکاری تک تک اتم‌ها و مولکول‌ها استوار است، بدین منظور که بتوان ساختاری پیچیده را با خصوصیات اتمی تولید کرد. اجزای سازنده مواد که از آنها به عنوان آجرهای ساختمانی مواد نام می‌بریم و خواص مواد وابسته به آنهاست، در اندازه نانومتر هستند، بنابراین اتم‌ها و مولکول‌ها به عنوان واحدهای ساختاری مواد در اندازه نانومتری هستند. دستکاری واحدهای ساختاری مواد باعث تغییر خواص آنها می‌شود و دستیابی به خواص جدید در مواد، هدف دانشمندان بوده است. علم و فناوری نانو، دانش و ابزار لازم را برای تسلط بر واحدهای ساختاری مواد و تغییر آنها فراهم می‌آورد. نقطه شروع و توسعه اولیّه فناوری نانو به طور دقیق مشخص نیست. شاید بتوان گفت که اولین نانو تکنولوژیست‌ها شیشه گران قرون وسطایی بوده‌اند که از قالب‌های قدیمی $(Medieal forges)$ برای شکل دادن شیشه‌هایشان استفاده می‌کرده‌اند، البته این شیشه‌گران نمی‌دانستند که چرا با اضافه کردن طلا به شیشه رنگ آن تغییر می‌کند. در آن زمان برای ساخت شیشه‌های کلیساهای قرون وسطایی از ذرات نانومتری طلا استفاده می‌شده است و با این کار شیشه‌های رنگی بسیار جذابی بدست می‌آمده است. این قبیل شیشه‌ها هم اکنون در بین شیشه‌های بسیار قدیمی یافت می‌شوند. رنگ بوجود آمده در این شیشه‌ها بر پایه این حقیقت استوار است که مواد با ابعاد نانو دارای همان خواص مواد با ابعاد میکرو نمی‌باشند. در واقع یافتن مثالهایی برای استفاده از نانو ذرّات فلزی چندان سخت نیست. رنگدانه‌های تزئینی جام مشهور $Lycurgus$ در روم باستان (قرن چهارم بعد از میلاد) نمونه‌ای از آنهاست. این جام هنوز در موزه بریتانیا قرار دارد و بسته به جهت نور تابیده به آن رنگهای متفاوتی دارد، نور انعکاس یافته از آن سبز است ولی اگر نوری از درون آن بتابد، به رنگ قرمز دیده می‌شود. آنالیز این شیشه حکایت از وجود مقادیر بسیار اندکی از بلورهای فلزی ریز (nm) ۷۰۰ دارد، که حاوی نقره و طلا با نسبت مولی تقریباً ۱۴ به ۱ است، حضور این نانو بلورها باعث رنگ ویژه جام $Lycurgus$ گشته است.

شکل۱—۱: رنگدانه‌های تزئینی جام مشهور $Lycurgus$ در روم باستان (قرن چهارم بعد از میلاد)

۱.۱.۱ دنیای جدید نانو مقیاس

ساخت موادی با وزن بسیار کم واستحکام بیشتر از فولاد

تشخیص سرطان وقتی هنوز چند سلول بیشتر نیست

رسانایی ۱۰۰۰ برابر مس در نانو لوله‌های کربنی

افزایش ۱۰۰۰ برابر ظرفیت حافظه‌های کامپیوتر

قطعات پلاستیکی رسانا با افزودن نانو لوله‌های کربنی

شیشه‌های خود تمیز شونده برای ساختمان‌های بلند با قیمت نه چندان بالا

پارچه‌های با دوام که کثیف هم نمی‌شوند

کاهش ۳۰ درصدی وزن اتومبیل با استفاده از نانو کامپوزیت‌ها در بدنه و قطعات خودرو و . . .

۲.۱.۱ زیر شاخه‌های فناوری نانو

علوم و فناوری مرتبط با نانو ساختارهای «تر» (نرم)— فناوری نانو مرطوب

این شاخه به مطالعه سیستم‌های زیست محیطی که اساساً در محیط‌های آبی پیرامون وجود دارند، می‌پردازد و چگونگی مقیاس نانومتری ساختمان مواد ژنتیکی، غشاها و سایر ترکیبات سلولی را مورد مطالعه قرار می‌دهد. موفقیّت این رشته بوسیله ساختمان‌های حیاتی فراوانی که تشکیل شده‌اند و نحوه‌ی عملکرد ساختمانشان در مقیاس نانویی نظارت می‌شود، به اثبات رسیده است. این شاخه دربرگیرنده علوم پزشکی، دارویی، زیست محیطی و کلاً علوم مرتبط به Bio می‌باشد.

علوم وفناوری مرتبط با نانو ساختارهای «خشک» (سخت)— فناوری نانو خشک

از علوم پایه شیمی و فیزیک مشتق می‌شود وبه تمرکز روی ساختمان‌های کربنی، سیلیکون و دیگر مواد غیر آلی می‌پردازد. قابل تأمل است که فناوری خشک‌ـمرطوب، استفاده از مواد و نیمه‌هادی‌ها را نیز می‌پذیرد. الکترون‌های آزاد و انتقال دهنده در این مواد آنها را برای محیط مرطوب سودمند می‌سازد، امّا همین الکترون‌ها خصوصیات فیزیکی فراهم می‌کنند که ساختارهای خشک از آنها در الکترونیک، مغناطیس و ابزارهای نوری استفاده می‌کنند. اثر دیگر که باعث پیشرفت ساختارهای خشک می‌شود، این است که قسمت‌های خود تکثیر مشابه ساختارهای مرطوب را دارا هستند.

نانو تکنولوژی تخمینی (محاسبه‌ای)

به مطالعه مدل سازی و ساختن ظاهر ساختمان‌های پیچیده در مقیاس نانویی توجه دارد. توانایی پیش‌بینی و تجزیه و تحلیل محاسبه‌ای در موفقیّت نانو تکنولوژی بحرانی است، زیرا طبیعت میلیون‌ها سال وقت لازم دارد که نانو تکنولوژی مرطوب را به صورت کاربردی درآورد. شناختی که بوسیله محاسبه بدست می آید به ما اجازه می‌دهد که زمان پیشرفت نانو تکنولوژی خشک را به چند دهه کاهش دهیم که این تأثیر مهمی در نانو تکنولوژی مرطوب نیز دارد. نانو تکنولوژی تخمینی، پلی است برای ارتباط بین علوم مهندسی، محاسباتی، کامپیوتر وفناوری جدید. با توجه به ساختارهای عنوان شده برای نانوتکنولوژی، تأثیر متقابل آنها بر یکدیگر و لزوم مشارکت هر سه ساختار برای خلق و توسعه اکثر محصولات نانویی، واضح است که فناوری برتر آینده نقطه

تلاقی تفکّر و عمل تمامی دانشمندان و محققان علوم مختلف است.

۳.۱.۱ چگونه می‌توان ساختارهای خیلی کوچک را ایجاد نمود؟

از بالا به پایین: کاهش ابعاد یک ماده بزرگ و شکل‌دهی آن تا یک محصول نانو مقیاس. در رویکرد از بالا به پایین برای تولید یک محصول نانو مقیاس، از شکل دهی و اصلاح مواد حجیم[۴] استفاده می‌کنند. در روش‌های مطرح در این رویکرد، با کاهش ابعاد یک ماده بزرگ و شکل‌دهی آن، محصولی با ابعاد نانو بدست می آید. به عبارت دیگر، اگر اندازه یک ماده بزرگ به طور متناوب کاهش یابد تا به محصولی با ابعاد نانومتری تبدیل شود، از رویکرد بالا به پایین استفاده شده است. در روش‌های مطرح در این نوع رویکرد، اغلب و نه همیشه، قسمتی از مواد به شکل ضایعات هدر می‌روند.

از پایین به بالا: چینش اتم‌ها و مولکول‌ها با ابعادی کوچکتر از نانومتر در کنار یکدیگر و ساخت یک محصول نانو متری می‌باشد. در رویکرد از پایین به بالا، یک محصول از مواد ساده‌تر بدست می آید. اصل در این رویکرد، چینش اتم‌ها و مولکول‌ها با ابعادی کوچکتر از نانومتر، در کنار یکدیگر به منظور ساخت و تولید یک محصول نانومتری است. برای درک بهتر این رویکرد، می‌توان تصور کرد که اتم‌ها و مولکول‌ها به وضوح دیده می‌شوند و می توان آن‌ها را به طور دلخواه در کنار یکدیگر قرار داد تا شکل مورد نظر حاصل شود. روش‌های این رویکرد معمولاً ضایعاتی ندارد.

۴.۱.۱ خواص وابسته به اندازه مواد

کدام خواص و چگونه در مقیاس نانو تغییر می‌کنند؟

بسیاری از خواص جامدات به محدوده‌ی اندازه‌ای که در آن سنجیده می‌شوند، بستگی دارند. هنگام بررسی مواد حجیم، جزئیات میکروسکوپی، میانگین‌گیری می‌شوند. در محدوده‌ی بزرگ—مقیاس که معمولاً در زمینه‌های سنتی فیزیک همچون مکانیک، الکترومغناطیس و اپتیک بررسی می‌شود، اندازه‌ی اشیاء مورد مطالعه در

[۴] $bulk$

محدوده‌ی میلی‌متر تا کیلومتر است. خواصی از این مواد که ما با آنها سروکار داریم، همچون چگالی و مدول کشسانی در مکانیک ، مقاومت ویژه و مغناطش در الکترومغناطیس و ثابت دی الکتریک در اپتیک، خواص میانگین هستند. هنگامی که اندازه‌گیری ها در محدوده میکرومتر یا نانومتر انجام می‌شود، بسیاری از خواص مواد، همچون خواص مکانیکی، فروالکتریکی و فرومغناطیسی تغییر می‌کنند.آنچه نانو ذرّات را بسیار قابل توجه می‌کند و به آنها خواص منحصر به فردی می‌دهد، این است که اندازه‌ی آنها از طول‌های بحرانی[۵] که ویژگی اختصاصی بسیاری از پدیده‌های فیزیکی‌اند، کوچکتر است. به طور کلی، می‌توان خواص فیزیکی مواد را به کمک بعضی از این طول‌های بحرانی؛ مثلاً، طول پخش گرمایی یا طول پراکندگی مشخص کرد. رسانایی الکتریکی به وسیله‌ی مسافتی که الکترون‌ها بین برخوردهایشان با اتم‌های مرتعش یا ناخالصی‌های یک جامد طی می‌کنند، تعیین می‌شود. این مسافت، «مسیر آزاد میانگین» یا «طول پراکندگی»[۶] نامیده می‌شود. اگر اندازه ذرات از این طول‌های مشخصه کمتر باشد، ممکن است فیزیک یا شیمی جدیدی پدیدار شود. شاید یک تعریف مفید برای نانو ذره این باشد: تجمعی از اتم‌ها با اندازه‌ای بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر که به صورت جزئی از یک ماده حجیم به نظر برسد و ابعاد آن کمتر از طول مشخصه‌ی بعضی پدیده‌های طبیعی باشد.

خواص مواد:

- خواص نوری (رنگ، شفافیّت و ...)
- خواص الکتریکی (رسانایی و ...)
- خواص فیزیکی (سختی، نقطه ذوب و ...)
- خواص شیمیایی (واکنش پذیری، سرعت واکنش و ...)

تغییر خواص نوری: رنگ طلا

توده طلا در طبیعت به رنگ زرد دیده می‌شود امّا طلا در مقیاس نانو به رنگ قرمز است، زیرا: ذرّات به قدری کوچکند که الکترون‌ها در آنها نمی‌توانند آزادانه حرکت کنند بنابراین در برابر نور واکنش متفاوتی دارند.

[۵] *critical lenght*

[۶] *scattering lenght*

تغییر خواص الکتریکی: هدایت نانو لوله‌ها

خواص الکتریکی و رسانایی نانو لوله‌های کربنی با تغییر قطر و تعداد دیواره‌های آن تغییر می‌کند. نوع ساختار نانو لوله‌ها نیز بر نحوه جریان الکتریکی آنها اثر گذار است.

تغییر خواص فیزیکی: نقطه ذوب

- دمای نقطه ذوب دمایی است که در آن مولکول‌ها، اتم‌ها و یون‌ها در ماده انرژی لازم برای غلبه بر نیروهای درون مولکولی را بدست می‌آورند.
- اتم‌های سطحی چون در تماس با اتم‌های کمتری هستند انرژی کمتری نیاز دارند.

در مقیاس نانو تغییر اندازه اثر خیلی زیادی بر افزایش اتم‌های سطحی دارد و عمده اتم‌ها در سطح ماده‌اند، بنابراین نقطه ذوب با کاهش اندازه ذرّه کاهش می‌یابد.

چرا خواص در مقیاس نانو تغییر می کنند؟

مقیاس همه چیز را تغییر می‌دهد . . .

- در دنیای اطراف ما مقیاس‌های مختلفی وجود دارد.
- در مقیاس‌های مختلف، نیروهای متفاوتی بین مواد موجود است.

به چهار طریق مواد نانو مقیاس با ماکرو مقیاس متفاوتند:

۱) در مقیاس نانو نسبت سطح به حجم بیشتر است.

- با کوچکتر شدن ذرّات، مقدار بیشتری از مواد در تماس با مواد اطراف آن قرار می‌گیرد.
- با افزایش سطح تماس، به عنوان مثال در کاتالیست‌ها امکان انجام واکنش را برای مواد دیگر ایجاد کرده‌ایم.
- با کوچک نمودن اندازه ذرّات، با استفاده از حجم کمی از مواد، سطح بیشتری را می‌توان پوشاند.

۲) نیروهای گرانشی در مقیاس نانو قابل صرفنظر بوده و بجای آن نیروهای الکترومغناطیسی غالبند.

- نیروهای گرانشی تابعی از جرم و فاصله بین ذرّات نانومتری است.
- نیروهای الکترومغناطیسی تابعی از بار الکتریکی ذرّات هستند.

جرم ذرّات نانومتری قابل صرفنظر است، بنابراین نیروهای غالب در چنین سیستم‌هایی، نیروهای الکترومغناطیسی است.

۳) مدل‌های مکانیک کوانتومی بجای مکانیک کلاسیک برای توصیف حرکت و انرژی در مقیاس نانو بکار می‌روند.

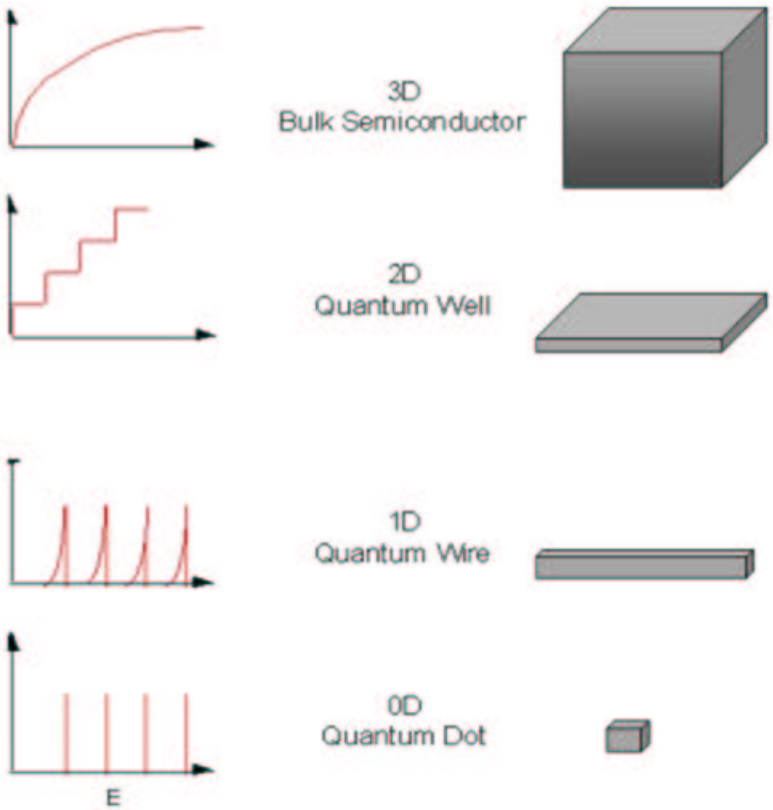
- برای توصیف پدیده‌هایی در مقیاس نانو که مکانیک کلاسیک قادر به توصیف آنها نیستند از مکانیک کوانتوم استفاده می‌شود.

۴) در مقیاس نانو حرکت مولکولی تصادفی اهمیّت بیشتری دارد.

- در مقیاس ماکرو، جابجایی‌ها دیده می‌شوند اما علّت آن مشاهده نمی‌شود، مثل حرکت ذرّات گرد و غبار هوا.
- امّا در مقیاس نانو، ذرّات حرکت گسترده‌ای دارند و برخورد آنها با ذرّات کوچکتر حائز اهمیّت می‌شود.

۲.۱ چاه ها، سیم‌ها و نقاط کوانتومی

وقتی اندازه یا بعد یک ماده به طور پیوسته از یک اندازه‌ی بزرگ یا ماکروسکوپیک، مثلاً یک متر یا یک سانتی‌متر به اندازه خیلی کوچک کاهش می‌یابد، در ابتدا خواص ماده بی‌تغییر می‌ماند؛ سپس تغییرات کوچکی آغاز می‌شود تا سرانجام وقتی اندازه به کمتر از ۱۰۰ نانو متر میرسد، تغییرات چشمگیری در خواص ماده به وقوع



شکل ۱—۲: چگالی حالات به صورت تابعی از انرژی به ترتیب از بالا به پایین در سه بعد(مـ ده‌لیّ حجیم)، دوبعد(چاه کوانتومی)، یک بعد(سیم کوانتومی) و صفربعد(نقطه کوانتومی)[۲].

می‌پیوندد. اگر یکی از ابعاد تا محدوده‌ی نانو کوچک شود و ابعاد دیگر بزرگ باقی بمانند، ساختاری حاصل می‌شود که «چاه کوانتومی» [۷] نامیده می‌شود. اگر دو بعد تا این حد کوچک شوند و بعد دیگر بزرگ بماند، ساختار حاصل یک «سیم کوانتومی»[۸] نام دارد. حالت نهایی این فرآیند کاهش اندازه، موردی است که در آن هر سه بعد به محدوده‌ی کوچک نانو متر می‌رسند که در این وضعیت یک «نقطه کوانتومی» [۹] خواهیم داشت. واژه «کوانتوم» به این دلیل با این سه نوع ساختار همراه است که تغییرات در خواص، ناشی از طبیعت «کوانتوم‌ـمکانیک» فیزیک در ناحیه ی فرا کوچک می‌باشد.

در شکل (۱ـ۲) نمودار چگالی حالت‌ها بر حسب انرژی برای چهار ساختار کریستال‌های حجیم، چاه کوانتومی، سیم کوانتومی و نقطه کوانتومی رسم شده است و بیانگر تغییر چگالی حالت‌های الکترون‌های نوار رسانش با کاهش ابعاد و کاهش تعداد درجات آزادی سیستم است .

[۷] *quantum well*
[۸] *quantum wire*
[۹] *quantum dot*

عبارت «چگالی حالات» $D(E)$ به تعداد ترازهای انرژی در یک بازه معین اشاره دارد، که در تعیین ویژگی‌های الکتریکی، گرمایی و دیگر خواص فلزّات و نیمه‌رساناها بسیار مهم است. همانطور که مشاهده شد، تغییرات آن به طور قابل توجهی برای هر چهار نوع ساختار متفاوت است. این بدین معناست که ماهیت بعد و محدودیت مربوط به یک نانو ساختار خاص، اثر بارزی بر خواصش دارد و بسیاری از خواص الکترونی و دیگر ویژگی‌های فلزّات و نیمه‌رساناها به طور قابل توجهی با تغییر بعد، تغییر می‌کنند.

۱.۲.۱ ساختار الکترونی نیمه رساناها :

وقتی اتم‌ها شبکه را تشکیل می‌دهند، ترازهای گسسته انرژی اتم به صورت نوارهای انرژی درمی‌آیند و بین این نوارها گاف انرژی وجود دارد. انرژی الکترون‌ها می‌تواند هر یک از مقادیر موجود در یکی از این نوارها را داشته باشد، امّا این انرژی‌ها نمی‌توانند متناظر با مقادیر موجود در یکی از گاف‌های بین نوارها باشند. نوارهای انرژی پایین‌تر که وابسته به ترازهای اتمی داخلی هستند، باریک‌تر و پر از الکترون‌اند؛ بنابراین این نوارها در خواص الکترونی مواد نقشی ندارند. الکترون‌های خارجی یا الکترون‌های ظرفیت که پیوندهای بلوری را شکل می‌دهند، نوارهایی را اشغال می‌کنند که «نوار ظرفیت» نامیده می‌شوند. نوار هدایت بالاتر از نوار ظرفیت است. درمواد نیمه رسانای حجیم، گاف بین نوارهای هدایت و ظرفیت نسبت به عایق‌ها بسیار کمتر است؛ بنابراین انرژی گاف E_g به انرژی گرمایی K_BT نزدیک‌تر است و گرمای نهان مـ ده در دامّای اتاق می‌تواند موجب برانگیختگی گرمایی تعدادی از الکترون‌های نوار ظرفیت به نوار هدایت، یعنی جایی که آنها جریان را منتقل می‌کنند، شود. تعداد الکترون‌هایی که بوسیله‌ی فرآیند برانگیختگی گرمایی به نوار هدایت رسیده‌اند، نسبتاً کم است و درصد بسیار کمی از الکترون‌ها در نوار رسانش قرار می‌گیرند امّا به هیچ وجه قابل صرفنظر کردن نیستند. بیشتر الکترون‌ها در نوار ظرفیت قرار می‌گیرند؛ بنابراین هدایت الکتریکی کم است و عبارت «نیمه‌رسانا» مصداق پیدا می‌کند. وقتی اندازه یک ذرّه فلزی که دارای خواص حجمی است، به چندصد اتم کاهش می‌یابد، چگالی حالات در نوار هدایت که نوار بالایی و حاوی الکترون‌ها است، به طور غیرمنتظره‌ای تغییر می‌کند و مجموعه‌ای از ترازهای گسسته‌ی انرژی که ممکن است فاصله ترازهای انرژی در آنها بزرگتر از انرژی گرمایی K_BT باشد، جانشین