دانشگاه صنعتی شیراز

دانشکده علوم، گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

در رشته فوتونیک - فیزیک

اثر میدان مغناطیسی بر روی خواص نوری چاه‌های کوانتومی آلاییده شده نوع n

نگارش:

مرتضی نظری

استاد راهنما:

دکتر محمدجواد کریمی

استاد مشاور:

دکتر علیرضا کشاورز

شهریور ۱۳۹۲

چکیده

اثر میدان مغناطیسی بر روی خواص نوری چاه‌های کوانتومی آلاییده شده نوع n

نگارش:

مرتضی نظری

فناوری نانو فضای تحقیق جدیدی را به روی پژوهشگران گشوده است. از جمله زمینه‌های مطرح شده در نانو فناوری، نانو اپتیک می‌باشد. با استفاده از شبیه‌سازی می‌توان پدیده‌های فیزیکی که در ابعاد نانو رخ می‌دهند را مطالعه کرد. یکی از مباحثی که در دو دهه‌ی گذشته در نانو اپتیک مورد توجه قرار گرفته است، تحقیق در مورد چاه‌های کوانتومی آلاییده است. چاه‌های کوانتومی آلاییده شده کاربردهای وسیعی در ابزار اپتوالکترونیکی فوق سریع از قبیل لیزرهای نیمرسانا و آشکارسازهای مادون قرمز دارند.

در این پایان نامه، ضرایب جذب و تغییرات شکست خطی، غیرخطی و کل چاه کوانتومی آلاییده‌ی با ساختار $GaAs/Al_xGa_{1-x}As$ به صورت عددی تحقیق شده است. در تقریب جرم مؤثر، ساختار الکترونیکی چاه کوانتومی آلاییده با حل خود سازگار معادله‌های شرودینگر و پواسون محاسبه می‌شود. خواص نوری با استفاده از تقریب ماتریس چگالی به دست می‌آید. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میدان مغناطیسی، قله‌های تشدید به سمت انرژی‌های بیشتر جابه‌جا می‌شوند. اندازه‌ی قله‌های تشدید خواص نوری با افزایش میدان مغناطیسی، کاهش می‌یابد.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱: مقدمه **۱**

۱-۱ پیش گفتار ۲

۱-۲ مقدمه‌ای بر نانو ۲

۱-۳ تاریخچه نانو ۴

۱-۴ کاربردهای فناوری نانو ۶

۱-۵ معایب فناوری نانو ۸

۱-۶ نانو ساختارهای کوانتومی ۹

۱-۶-۱ چاه کوانتومی ۱۰

۱-۶-۲ سیم کوانتومی ۱۱

۱-۶-۳ نقطه کوانتومی ۱۲

۱-۷ چگالی حالت‌های ساختار کپه‌ای و چاه‌های کوانتومی ۱۲

۱-۷-۱ محاسبه چگالی حالت‌ها در ساختارهای کپه‌ای ۱۲

۱-۷-۲ محاسبه چگالی حالت‌ها در چاه‌های کوانتومی ۱۶

۱-۸ معرفی فصل‌های بعد ۱۸

فصل ۲: بررسی ساختار نیمرساناها و آلاییدگی **۲۰**

۲-۱ مقدمه ۲۱

۲-۲ ساختار بلوری ۲۱

۲-۲-۱ سلول واحد ۲۲

۲-۲-۲ شبکه براوه ۲۳
۲-۲-۳ عدد همارایی ۲۳
۲-۲-۴ شبکه الماسی ۲۴
۲-۳ نظریه نواری ۲۵
۲-۴ خواص اساسی نیمرساناها ۲۷
۲-۴-۱ تقریب جرم مؤثر ۲۷
۲-۴-۲ نیمرسانا با گذار مستقیم و غیرمستقیم ۲۸
۲-۴-۳ نیمرسانای ذاتی ۲۹
۲-۴-۴ نیمرسانای غیرذاتی و آلایش ۲۹
۲-۴-۵ تراز فرمی ۳۱
۲-۴-۶ انتقال حامل‌ها در نیمرسانا - تحرک ۳۴
۲-۴-۷ جذب نوری ۳۶
۲-۴-۸ بازترکیب ۳۶
۲-۵ رشد بلور ۳۷
۲-۵-۱ رشد حجمی بلور ۳۸
۲-۵-۲ رشد رونشستی مواد ۳۸
۲-۶ آلایش مدوله ۴۱
۲-۷ گاز الکترونی دو بعدی ۴۳
۲-۸ ساختارهای آلاییده مدوله ۴۴
۲-۸-۱ ویژگی ساختارهای آلاییده مدوله ۴۴
۲-۸-۲ کاربرد ساختارهای آلاییده مدوله ۴۵

فصل ۳: حل معادله‌ی شرودینگر و پواسون به روش خود سازگار ۴۶

۳-۱ مقدمه ۴۷
۳-۲ معادلات شرودینگر و پواسون ۵۰
۳-۲-۱ چشمه‌های بار ۵۱
۳-۲-۲ انرژی فرمی و خنثی بودن بار ۵۴

۳-۳ روش تکرار ۵۵

فصل ۴: بررسی خواص نوری با استفاده از ماتریس چگالی ۵۷

۴-۱ مقدمه ۵۸

۴-۲ تحول زمانی ماتریس چگالی ۵۸

۴-۳ حل معادله‌ی تحول زمانی ماتریس چگالی با استفاده از روش اختلال . . ۶۲

۴-۴ محاسبه‌ی ضریب جذب و ضریب شکست خطی و غیرخطی با استفاده از ماتریس چگالی ۶۵

۴-۴-۱ محاسبه‌ی پذیرفتاری خطی با استفاده از ماتریس چگالی ۶۵

۴-۴-۲ محاسبه‌ی پذیرفتاری غیرخطی مرتبه‌ی دو با استفاده از ماتریس چگالی ۶۹

۴-۴-۳ محاسبه‌ی پذیرفتاری غیرخطی مرتبه‌ی سوم با استفاده از ماتریس چگالی ۷۳

۴-۴-۴ محاسبه‌ی تغییرات ضریب جذب و ضریب شکست چاه کوانتومی . . ۷۸

۴-۵ نتیجه گیری ۸۰

فصل ۵: بررسی خواص نوری چاه کوانتومی آلاییده‌ی مدوله ۸۱

۵-۱ مقدمه ۸۲

۵-۲ چارچوب نظری ۸۴

۵-۳ روش حل عددی معادلات شرودینگر و پواسون ۸۸

۵-۳-۱ روش تیراندازی خطی ۸۸

۵-۴ بررسی خواص نوری چاه کوانتومی آلاییده ۹۰

۵-۴-۱ اثر پهنای چاه بر روی خواص نوری سیستم ۹۱

۵-۴-۲ اثر ارتفاع سد پتانسیل بر روی خواص نوری سیستم ۹۳

۵-۴-۳ اثر غلظت آلاییدگی بر روی خواص نوری سیستم ۹۴

۵-۴-۴ اثر میدان مغناطیسی بر روی خواص نوری سیستم ۹۵

۵-۴-۵ اثر فشار هیدرواستاتیکی بر روی خواص نوری سیستم ۹۷

۵-۵ نتیجه گیری ۹۹

فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۰۰

مراجع ۱۰۳

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱: تعداد درجات آزادی و محدودیت برای نانو ساختارهای کوانتومی [۱] ۹

جدول ۳-۱: تغییر انرژی پتانسیل در مرکز چاه نسبت به لبه‌ی چاه [۱۷]. ۵۶

جدول ۵-۱: پارامترهای استفاده شده در محاسبات ۹۱

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱: نمای انرژی پتانسیل برای یک چاه کوانتومی. ۱۰
شکل ۱-۲: توابع موج برای ترازهای مجاز انرژی یک چاه کوانتومی ۱۱
شکل ۱-۳: سیم کوانتومی با سطح مقطع مستطیلی و سد پتانسیل بی‌نهایت [۱] . ۱۱
شکل ۱-۴: نقطه کوانتومی با سطح مقطع مستطیلی و سد پتانسیل بی‌نهایت [۱] ۱۲
شکل ۱-۵: چگالی حالت‌های کوانتومی ۱۸

شکل ۲-۱: نمونه‌ای از شبکه‌ی سه بعدی با بردارهای انتقال و زوایای بین آن‌ها . ۲۲
شکل ۲-۲: نمونه‌ای از سلول‌های واحد در شبکه دو بعدی ۲۲
شکل ۲-۳: سلول واحد بلور مکعبی ۲۳
شکل ۲-۴: ساختار شبکه الماسی ۲۵
شکل ۲-۵: تشکیل نوارهای انرژی [۷]. ۲۶
شکل ۲-۶: نمایش طرح نوارهای انرژی [۷]. ۲۷
شکل ۲-۷: نیمرسانا با گذار مستقیم و غیرمستقیم ۲۸
شکل ۲-۸: ساختار نواری آلاییدگی نوع n و p ۳۱
شکل ۲-۹: تابع توزیع فرمی - دیراک [۵] ۳۲
شکل ۲-۱۰: تابع توزیع فرمی اعمال شده به نیمرسانا [۵] ۳۳
شکل ۲-۱۱: نمودار مسیر الکترون در نیمرسانا [۷] ۳۴
شکل ۲-۱۲: رشد رونشستی فاز مایع ۳۹
شکل ۲-۱۳: رشد رونشستی فاز بخار [۷] ۴۰

شکل ۲-۱۴: طرحی از دستگاه رونشستی پرتو مولکولی [۱۱] ۴۱
شکل ۲-۱۵: ساختار $AlGaAs/GaAs$ مدوله آلاییده [۱۳] ۴۲
شکل ۲-۱۶: نمای نوار رسانش و تشکیل گاز الکترونی دوبعدی در چاه کوانتومی . ۴۴

شکل ۳-۱: چاه کوانتومی آلاییده‌ی مدوله [۱۷] ۴۸
شکل ۳-۲: اشغال ترازهای انرژی تا تراز فرمی توسط حامل‌ها [۱۷] ۴۹

شکل ۴-۱: نمودار فرآیندهای غیر خطی مرتبه‌ی دوم [۲۱] ۷۰
شکل ۴-۲: نمودار فرآیند تولید هماهنگ سوم [۲۱] ۷۴

شکل ۵-۱: طرح چاه کوانتومی مربعی آلاییده ۸۴
شکل ۵-۲: تغییرات ضرایب جذب خطی، غیرخطی و کل بر حسب انرژی فوتون فرودی برای پهنای چاه متفاوت ۹۲
شکل ۵-۳: تغییرات ضرایب شکست مرتبه اول، سوم و کل بر حسب انرژی فوتون فرودی برای پهنای چاه متفاوت ۹۲
شکل ۵-۴: تغییرات جذب خطی، غیر خطی و کل به صورت تابعی از انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف غلظت آلومینیوم ۹۳
شکل ۵-۵: تغییرات ضرایب شکست خطی، غیر خطی و کل چاه کوانتومی آلاییده برای مقادیر مختلف غلظت آلومینیوم ۹۴
شکل ۵-۶: تغییرات جذب خطی، غیر خطی و کل بر حسب انرژی فوتون فرودی برای غلظت آلاییدگی متفاوت ۹۵
شکل ۵-۷: تغییرات ضرایب شکست خطی، غیر خطی و کل بر حسب انرژی فوتون فرودی برای مقادیر مختلف غلظت آلاییدگی ۹۵
شکل ۵-۸: تغییرات نمایه‌ی پتانسیل محدود کننده و توابع موج ۹۶
شکل ۵-۹: تغییرات ضرایب جذب خطی، غیر خطی و کل برای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی ۹۶
شکل ۵-۱۰: تغییرات ضرایب شکست خطی، غیر خطی و کل برای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی ۹۷

شکل ۵-۱۱: تغییرات ضرایب جذب خطی، غیر خطی و کل، برای مقادیر مختلف فشار هیدرواستاتیکی ۹۸
شکل ۵-۱۲: تغییرات ضرایب شکست خطی، غیر خطی و کل برای مقادیر مختلف فشار هیدرواستاتیکی ۹۸

فصل۱

مقدمه

۱-۱ پیش گفتار

قرن نوزدهم را با اختراع ماشین بخار می‌شناسیم. پدیده اعجاب انگیز قرن بیستم نیز اختراع و پیشرفت روزافزون رایانه‌ها و عصر فضا بود. ناچار باید قرن بیست‌ویکم را قرن «فناوری نانو» بنامیم. فناوری نانو یک علم چند رگه است. به گونه‌ای که علوم پایه‌ای نظیر فیزیک و شیمی را به علوم مهندسی پیوند زده و در سایر علوم نظیر داروسازی، پزشکی، علوم نظامی و غیره نیز دخالت دارد. اتم‌ها و مولکول‌ها به واسطه خواص شیمیایی و اشکالی که دارند به یکدیگر متصل می‌گردند. حال با دستکاری در این آرایش منظم (که بدون در نظر گرفتن قواعد فیزیک امکان‌پذیر نیست) خواص ماده از همان ساختار زیرین و اصلی‌اش متحول می‌شود. در واقع یکی از اهداف فناوری نانو دستکاری اتم‌ها به صورت جداجدا و قرار دادن آن‌ها در یک الگوی خاص در جهت ایجاد یک ساختار مطلوب و در مقیاس خیلی ریز است. یکی از زمینه‌های این فناوری که موضوع پژوهش بسیار وسیعی در قرن حاضر بوده، نیمرسانای کم‌بعد می‌باشد. چنین ساختارهایی دارای برخی خواص منحصر به فرد هستند که در سیستم‌های کپه‌ای مشاهده نمی‌شود.

۱-۲ مقدمه‌ای بر نانو

امروز علم تا حد دسترسی به اندازه‌هایی زیر محدوده‌ی میکرومتر پیشرفت کرده است. در این راستا روش‌ها و تکنیک‌های دست‌یابی به محدوده‌های نانومتری، نانو فناوری نامیده می‌شود. در واقع نانو فناوری ایجاد و بهره‌برداری از مواد، قطعات و سیستم‌ها در مقیاس‌های بسیار ریز و در حد نانومتری یعنی همان مقیاس‌ها و اندازه‌های اتمی و مولکولی است. نانو فناوری به روش‌های مناسب برای ساخت و سرهم بندی ساختارهای کارآمد که دارای حداقل یک بعد در ابعاد نانومتری باشند، می‌پردازد. این نانو ساختارها که از کوچک‌ترین بلوک‌های ساختمانی شناخته شده ساخته می‌شوند، ریزترین اشیاء ساخت بشر بوده و دارای خصوصیات و رفتارهای

فیزیکی، شیمیائی و زیستی جدیدی هستند. هدف نانو فناوری، آگاهی و بهره‌گیری از این خصوصیات و ساخت و استفاده مؤثر از آن‌ها است. مهارت مطرح در این فناوری، دست کاری اتم‌ها به طور جداگانه و جای دادن دقیق آن‌ها در مکانی است که برای رسیدن به ساختار دلخواه و ایده‌آل مورد نیاز است.

در یک چشم انداز نانوتکنولوژی طیف وسیعی از مواد را دربر می‌گیرد که طبقه‌بندی آن‌ها ضروری است. مهم‌ترین این طبقه‌بندی‌ها «خصوصیت» و «نوع» مواد نانو ساختار است، که شامل خصوصیات مختلف الکتریکی، مکانیکی، نوری، مغناطیسی و شیمیایی هر یک از نقاط قابل تأمل در این فناوری نوین است. اما در این مسیر مشکلاتی هم وجود دارد، که یکی از آن‌ها تغییر خواص فیزیکی در نتیجه تغییر قوانین فیزیکی از کلاسیک به کوانتوم است. چرا که وقتی ماده جامدی را در فضایی کمتر از ۱۰۰ نانومتر محدود می‌کنیم، این محدودیت در رفتار آن تأثیر می‌گذارد و به تصویر کشیدن این محدودیت در روابط و معادلات مشکل است. مشکل دیگر این‌که در علوم مهندسی کنونی، علوم را تفکیک و هر یک را جداگانه بررسی می‌کنند، در حالی که این جداسازی در مقیاس نانو مقدور نیست، زیرا غالباً خصوصیات مختلف بر هم تأثیر می‌گذارند و ضرورت ایجاد دانش‌های جدید احساس می‌شود.

براساس فرهنگ وبستر[۱]، پیشوند نانو از ریشه‌ی یونانی $nanos$ به معنای کوتوله گرفته شده است و در ادبیات علمی به کاهش با ضریب $۱۰^{-۹}$ اشاره دارد. رفتار فیزیکی در مقیاس نانومتری توسط مکانیک کوانتومی پیش‌بینی شده و روی‌هم‌رفته با معادله‌ی شرودینگر توصیف می‌شود. در حقیقت معادله‌ی شرودینگر امکانی برای درک ساختار و خواص اتم‌ها فراهم می‌آورد. ایده محدود کردن مقیاس اساساً به دلایل متعددی جالب است. رویکرد اندازه‌ی مقیاس اتمی، قوانین فیزیک را از کلاسیکی به قوانین مکانیک کوانتومی تغییر می‌دهد. یک نانومتر ($۱۰^{-۹}$) حدوداً ۱۰ برابر اندازه کوچکترین اتم‌ها مانند هیدروژن و کربن است. در حالی که یک میکرومتر به طور آشکار بزرگتر از طول موج قابل مشاهده‌ی نور است. یک میلی‌متر به اندازه یک سر سنجاق است که تقریباً کوچکترین اندازه در دسترس در ماشین‌های امروزی است. به طور میانگین سه تا شش اتم در کنار همدیگر طولی معادل یک نانومتر را اشغال می‌کنند. به عنوان مثالی در جهت تجسم بهتر فناوری نانو باید بگوییم بشر تاکنون سعی داشته چیدمان و آرایش اتم‌ها را مطابق میل خود تغییر دهد و موادی با خصوصیات و کاربردهای

[۱] Webster

بسیار متفاوت بسازد. تصور کنید که بتوانیم اتم‌های زغال سنگ را به گونه‌ای تغییر دهیم که تبدیل به الماس شوند و یا با تغییر آرایش اتم‌های موجود در سنگ یک تراشه رایانه‌ای درست کنیم.

در حالی که تعاریف زیادی برای فناوری نانو وجود دارد، پژوهش‌گاه فناوری نانو انگلستان تعریف فناوری نانو را بدین‌گونه بیان می‌کند: قلمروی از علم و فناوری که به ابعاد و حدهای مجاز ۰/۱ تا ۱۰۰ نانومتر در جایی که این ابعاد یا حدهای مجاز بتوانند نقش مهمی در خواص قطعه ایفا کنند، می‌پردازد. سازمان اِن. اِن. آی[1] تعریفی را برای فناوری نانو ارائه می‌دهد که دربرگیرنده‌ی هر سه تعریف زیر باشد:

۱. توسعه‌ی فناوری نانو و تحقیقات در سطوح اتمی، مولکولی یا ماکرومولکولی در مقیاس اندازه‌ای ۱ تا ۱۰۰ نانومتر.

۲. خلق و استفاده از ساختارها و ابزارها و سیستم‌هایی که به‌خاطر اندازه‌ی کوچک یا حد میان آن‌ها، خواص و عمل‌کرد نوینی دارند.

۳. توانایی کنترل یا دست‌کاری مواد در سطوح اتمی.

۱-۳ تاریخچه نانو

در حالی که بسیاری از مردم نانو فناوری را زمینه‌ای جدید می‌دانند که محصولی با کاربردهای پیشرفته به مصرف‌کنندگان می‌دهد، اما همه چیز علوم نانو جدید نیست. بسیاری از فناوری‌های موجود مانند کاتالیزگری و عکاسی از فرآیندهای نانومقیاس استفاده می‌کنند. ولی امکان سنتز، سازمان‌دهی و ساخت مواد براساس نیاز در نانو مقیاس خاستگاه بسیار جدیدی دارد. مفهوم مواد نانوساختار با بیش از دو دهه سابقه در فیزیک نتیجه توسعه‌های فناوری در دستگاه‌های تولید و شناسایی مواد نانوساختار، به همراه افزایش توان محاسباتی در شیمی کوانتومی و توسعه مدل‌های نظری است. نانوذرات خواصی بین خواص مواد به شکل کپه‌ای و یک ذره‌ی تکی دارند.

در یونان باستان، مردم و به‌خصوص دانشمندان، بر این باور بودند که مواد را می‌توان آن‌قدر به اجزای کوچک تقسیم کرد تا به ذراتی خرد ناشدنی رسید که بنیاد مواد را تشکیل

[1] National Nanotechnology Initiative

می‌دهند. شاید بتوان دموکریتوس[1]، فیلسوف یونانی را پدر فناوری و علوم نانو دانست، چرا که وی در حدود ۴۰۰ سال قبل از میلاد مسیح نخستین بار واژه اتم را که در زبان یونانی به معنی تقسیم نشدنی است، برای توصیف ذرات سازنده مواد به‌کار برد. با تحقیقات و آزمایش‌های بسیار، دانشمندان تاکنون ۱۰۸ نوع اتم و تعداد زیادی ایزوتوپ کشف کرده‌اند. آن‌ها هم‌چنین پی‌برده‌اند که اتم‌ها از ذرات کوچک‌تری مانند کوارک‌ها و لپتون‌ها تشکیل شده‌اند. نقطه شروع و توسعه اولیه فناوری نانو، به طور دقیق مشخص نیست. شاید بتوان گفت که اولین نانو فناوریست‌ها شیشه‌گران قرون‌وسطایی بوده‌اند که از قالب‌های قدیمی برای شکل دادن شیشه‌هایشان استفاده می‌کرده‌اند. در آن زمان برای ساخت شیشه‌های کلیساهای قرون‌وسطایی از ذرات نانومتری طلا استفاده می‌شد و شیشه‌های رنگی بسیار جذابی به دست می‌آمد. البته این شیشه‌گران نمی‌دانستند چرا با اضافه کردن طلا به شیشه رنگ آن تغییر می‌کند. این قبیل شیشه‌ها هم‌اکنون در بین شیشه‌های بسیار قدیمی یافت می‌شوند. رنگ به‌وجود آمده در این شیشه‌ها بر پایه این حقیقت استوار است که مواد با ابعاد نانو دارای همان خواص مواد با ابعاد میکرو نیستند. در واقع یافتن مثال‌هایی برای استفاده از نانوذرات فلزی چندان سخت نیست. رنگ‌دانه‌های تزیینی جام مشهور لیکرگوس[2]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 ۷۰۰ نانومتری دارد که حاوی نقره و طلا با نسبت مولی تقریباً ۱۴ به ۱ است. حضور این نانو بلورها باعث رنگ ویژه جام لیکرگوس گشته‌است.

در سال ۱۹۵۹ ریچارد فاینمن[3] مقاله‌ای درباره قابلیت‌های فناوری نانو در آینده منتشر ساخت. با وجود موفقیت‌هایی که توسط بسیاری تا آن زمان کسب شده‌بود، ریچارد فاینمن را پایه‌گذار این علم می‌شناسند. فاینمن که بعدها جایزه نوبل را در فیزیک دریافت کرد، در آن سال در مهمانی شامی که توسط انجمن فیزیک آمریکا برگزار شده‌بود، سخنرانی کرد و ایده‌ی نانو فناوری را برای عموم مردم آشکار ساخت. عنوان سخنرانی وی «فضای زیادی در سطوح پایین وجود دارد» بود. سخنرانی او شامل این مطلب بود که می‌توان تمام دایره

---

[1] Democritus
[2] Lycurgus
[3] Richard Feynman

المعارف بریتانیکا را روی یک سنجاق نگارش کرد؛ یعنی ابعاد آن به اندازه ۲۵۰۰۰ : ۱ ابعاد واقعی‌اش کوچک می‌شود. او هم‌چنین از دوتایی کردن اتم‌ها برای کاهش ابعاد رایانه‌ها سخن گفت. در آن زمان رایانه‌ها بسیار بزرگ‌تر از ابعاد کنونی بودند، اما فاینمن احتمال می‌داد که ابعاد آن‌ها را بتوان حتی از ابعاد رایانه‌های کنونی نیز بسیار کوچک‌تر کرد. او هم‌چنین در آن سخنرانی توسعه بیش‌تر فناوری نانو را پیش‌بینی کرد. ۱۵ سال بعد یعنی در سال ۱۹۷۴، نوریو تانیگوچی[۱] در سخنرانی خود در دانشگاه علوم توکیو برای اولین بار واژه‌ی نانوتکنولوژی را به کار برد. تا آن زمان مفاهیم این علم، فقط به صورت نظری و تئوری بحث می‌شدند تا این که در سال ۱۹۸۱، گرد بینینگ[۲] و هاینریش روهرر[۳] در آزمایشگاه تحقیقاتی آی. بی. اِم[۴] در زوریخ، موفق به اختراع میکروسکوپ تونلی روبشی[۵] شدند. این دستاورد ارزشمند، بزرگترین گام در پیشرفت عملی و تجربی نانو فناوری بود. واژه‌ی «نانوفناوری» مجدداً در سال ۱۹۸۶ توسط درکسلر[۶] در کتابی با عنوان «موتور آفرینش: آغاز دوران فناوری نانو» بازآفرینی و تعریف شد. وی به شکل عمیق‌تری این واژه را در رساله‌ی دکتری خود مورد بررسی قرار داد و در سال ۱۹۹۱ درجه‌ی دکترا در نانوفناوری را دریافت نمود. از آن زمان تاکنون هر روز شاهد یافته‌های جدیدی از فناوری نانو هستیم.

۱-۴ کاربردهای فناوری نانو

ریچارد فاینمن زمانی گفت: «در مقیاس اتمی، انواع جدیدی از نیرو، احتمال و اثرها داریم». فناوری‌های کنونی پیش‌بینی‌های او را پس از نیم قرن ثابت کرده‌اند. دورنمای هیجان‌انگیز نانو فناوری و قابلیت آن تقریباً در هر زمینه‌ای قابل تصور است؛ از پزشکی و الکترونیک تا صنعت ساختمان از پیشرفت‌های فناوری نانو سود می‌برند.

فناوری نانو با کار کردن در محدوده اتم‌ها و توانایی تغییر در آرایش و چیدمان آن‌ها توانسته است تحولی شگرف در علوم مختلف پدید آورد و راندمان و کارایی سیستم‌ها را با استفاده کمتر از مواد خام و تولید با کیفیت بالاتر به نحو مطلوبی افزایش دهد. همچنین،

---

[۱] Norio Taniguchi
[۲] Gerd Binnig
[۳] Heinrich Rohrer
[۴] International Business Machines
[۵] Scanning tunneling microscope
[۶] Drexler

نانوتکنولوژی با ماهیت فرا رشته‌ای خود، مرزهای علوم مختلف را درهم شکسته و باعث ایجاد زمینه‌ای شده است که بتوان از نتایج، امکانات و ابزار تمامی رشته‌ها و علوم مختلف در جهت افزایش کیفیت زندگی استفاده نمود. علوم و فناوری نانو، عنصری اساسی در درک بهتر طبیعت در دهه‌های آتی خواهد بود. از جمله موارد مهم در آینده، همکاری‌های تحقیقاتی میان‌رشته‌ای، آموزش خاص و انتقال ایده‌ها و افراد به صنعت خواهد بود. بخشی از تأثیرات و کاربردهای نانوتکنولوژی به شرح زیر می‌باشد:

صنایع خودروسازی از بزرگ‌ترین صنایع جهان می‌باشد. با توجه به رشد روز افزون و پیشرفت صنعت خودروسازی استفاده از فناوری‌های نوین نیز در این صنعت از اهمیت فراوانی برخوردار است و نانو فناوری به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل در این زمینه حائز اهمیت می‌باشد. ساخت بدنه‌های سبک‌تر و مقاوم‌تر برای خودرو، ساخت لاستیک‌هایی با مقاومت سایشی بهتر، ساخت قطعات موتور با عمر چند برابر، کاهش مصرف سوخت خودرو، ساخت باتری‌هایی با انرژی بالا و دوام بیشتر، سازگار کردن خودرو با محیط زیست و بسیاری موارد دیگر از جمله کاربردهایی هستند که فناوری نانو در صنعت خودرو خواهد داشت.

پزشکی نانو که در واقع کاربرد فناوری نانو در پیشگیری و درمان بیماری‌ها در بدن انسان است. این دانش در حالت تکامل، این ظرفیت بالقوه را دارد که علم پزشکی را کاملا دگرگون کند. کاربردهای ثبت شده و آزمایشگاهی پزشکی نانو، آزمایش‌های تشخیصی، شیمی‌درمانی، پمپ‌های انسولین، تزریق‌های بدون سوزن، فعالیت‌های کمکی در بخش شنوایی، سنسورهای مختلف پزشکی و سیستم تحویل دارو در بافت‌های بدن هستند.

صنایع نفت، گاز و پتروشیمی نیز کمابیش از دایره نفوذ فناوری نانو دور نمانده و تا حدودی فناوری نانو در این محدوده نیز وارد شده است. استفاده از فناوری‌های نانو در تصویر برداری‌های لرزه‌ای، کاربرد در مقاوم سازی و بهبود خواص گل‌حفاری، ساخت نانو کامپوزیت‌ها و بهبود مقاومت حرارتی و فشاری مته‌های حفاری، استفاده از نانو افزودنی‌ها جهت افزایش کارایی سیمان حفاری، کاربرد نانو در کاتالیست‌ها و ... از موارد کاربرد این فناوری در صنایع بالادستی و پایین‌دستی نفت هستند.

فناوری نانو نقطه همگرایی علوم مختلف در آینده است. در این میان یکی از پرکاربردترین شاخه‌های فناوری نانو، صنعت الکترونیک و اپتوالکترونیک می‌باشد. امروزه افزایش ظرفیت ذخیره داده، افزایش سرعت انتقال آن و کوچک کردن هر چه بیشتر وسائل الکترونیکی و به

خصوص ترانزیستورها دارای اهمیت بسیاری است زیرا کوچک تر شدن ابعاد وسائل الکترونیکی علاوه بر افزایش سرعت پردازش، توان مصرفی را نیز کاهش می‌دهد و نانو الکترونیک می‌تواند در رسیدن به ابعاد هر چه کوچک‌تر راهگشا باشد. نانوالکترونیک رویکرد تازه‌ای را در صنعت الکترونیک در زمینه انواع جدید مدارها، پردازشگرها، شیوه‌های ذخیره اطلاعات و حتی روش‌های نوین الکترونیک نوری جهت انتقال اطلاعات دارد.

نانو اپتیک شاخه‌ای دیگر از فناوری نانو است و می‌توان آن را طیف گسترده‌ی علم اپتیک در مقیاس نانومتری دانست که گستره‌ای از کاربردهای نانوفناوری تا نانو علوم بنیادی را دربر می‌گیرد. امروزه عناصر نانو اپتیک در همه‌ی شاخه‌های علم و فناوری پراکنده شده‌اند. نانو اپتیک به دنبال ایجاد قطعات و ساختارهای نوری با دقتی نانومتری است. در مقیاس نانو، پدیده‌های نوری نیز همانند پدیده‌های فیزیکی دیگر دچار تغییر می‌شوند. اثرات نوری جدیدی که در نانو ساختارها بروز می‌کند، می‌تواند کاربردهای مختلفی داشته باشد و در صنایع فراوانی گسترش یابد. تمرکز نانو اپتیک بر ساخت اجزای اپتوالکترونیک، توسعه‌ی منابع جدید نوری، تولید لنزهای دقیق نانومتری و غیره است.

۱-۵ معایب فناوری نانو

در کنار تمام فواید و تأثیرات مثبت، فناوری نانو یک سری مضراتی نظیر تولید جنگ‌افزارهای شیمیایی کشتار جمعی و سایر جنبه‌های نظامی دیگر نیز دارد. از این گذشته به دلیل تماس مستقیم بین شخص و مواد شیمیایی نانومقیاس، نانو ذرات می‌توانند به DNA آسیب برسانند و ایجاد سرطان کنند. نانو ذرات به قدری کوچک هستند که می‌توانند از غشای سلول و سد حفاظتی آن عبور کنند و در سازوکارهای آن اختلال ایجاد کنند و در عین حال آنقدر بزرگ هستند که بتوانند آثار محسوس و نامطلوبی به جای بگذارند. یکی دیگر از مشخصه‌های فناوری نانو دیربازده بودن آن در تمامی سطوح اعم از سرمایه‌گذاری، مطالعه، تحقیق و تدریس در آن است.

۱-۶ نانو ساختارهای کوانتومی

پیشرفت‌های اخیر تکنولوژی نیمرساناها منجر به ساخت برخی ساختارهای کم بعد شده که در آنها الکترون‌ها و حفره‌ها در ترازهای کوانتیده جایگزیده‌اند. در حقیقت توسعه‌ی تکنیک‌های رشد، رشد شکل‌ها و اندازه‌های متنوعی از ساختارهای کوانتومی را ممکن ساخته است. محدودیت الکترون‌ها و حفره‌ها در یک لایه‌ی نیمرسانای نازک باعث تغییر در رفتار آن‌ها می‌شود. می‌توان با کاهش بیشتر ابعاد محیط، از یک چاه کوانتومی دو بعدی به یک سیم کوانتومی یک بعدی و در نهایت به یک نقطه‌ی کوانتومی صفر بعدی رسید. به دلیل تأثیر محدودیت کوانتومی، این ساختارها برخی خصوصیات فیزیکی جالب که کاملاً متفاوت از خصوصیات این سیستم‌ها در حالت کپه‌ای هستند را بروز می‌دهند. اگر تعداد درجات آزادی را با D_f و تعداد جهت‌های محدودیت را با D_c نشان دهیم، داریم [۱]:

$$D_f + D_c = ۳ \qquad (۱-۱)$$

جدول زیر تعداد درجات آزادی و محدودیت را برای ساختارهای کوانتومی نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱: تعداد درجات آزادی و محدودیت برای نانو ساختارهای کوانتومی [۱]

سیستم	D_f	D_c
کپه‌ای	۳	۰
چاه کوانتومی	۲	۱
سیم کوانتومی	۱	۲
نقطه کوانتومی	۰	۳

یکی دیگر از عوامل بروز خواص جالب توجه و متفاوت از حالت کپه‌ای در نانو ذرات، نسبت سطح به حجم بسیار زیاد است. با کوچک شدن ابعاد ذرات این نسبت به گونه‌ای بزرگ می‌شود که در برخی از گزارش‌ها آمده است که یک گرم از پودر نانو ذرات، ۱۲۰۰ متر مربع سطح را در خود می‌گنجاند [۲]. بنابراین برخلاف یک ماده کپه‌ای، با کاهش اندازه‌ی مواد نمی‌توان سهم اتم‌های سطحی آن را نادیده گرفت. با کوچک شدن اندازه‌ی نانو ذرات، نسبت تعداد اتم‌های حاضر در سطح به تعداد اتم‌های موجود در حجم افزایش می‌یابد که این حقیقت به افزایش انرژی آزاد سطح می‌انجامد. به علت اینکه نانو ساختارها خیلی کوچک هستند، می‌توانند در