بسم الله الرحمن الرحيم

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و

نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه رازی است

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک

گرایش نظریه میدان‌های کوانتمی

عنوان پایان نامه

بررسی نقض نا مساوی بل با استفاده از نقطه های کوانتومی

استاد راهنما

دکتر شاهپور مرادی

نگارش:

محسن حدادها

تیر ماه ۱۳۸۹

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش نظریه میدان‌های کوانتومی

نام دانشجو

محسن حدادها

تحت عنوان:

بررسی نقض نا مساوی بل با استفاده از نقطه های کوانتومی

در تاریخ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید

۱- استاد راهنما	دکتر شاهپور مرادی	با مرتبه ی علمی	امضاء
۳- استاد داور داخل گروه	دکتر سید حمزه موسوی	با مرتبه ی علمی	امضاء
۴- استاد داور خارج از گروه	دکتر رضا سپهوند	با مرتبه ی علمی	امضاء

تقدیم به:

پدر و مادرم

الهی!

نام تو ما را جواز و مهر تو ما را جهاز.

الهی!

شناخت تو ما را امان و لطف تو ما را عیان.

چکیده

در سال‌های اخیر کارهای قابل توجه‌ای برای پردازش اطلاعات و محاسبات از طریق مکانیک کوانتومی صورت گرفته است. محاسبات کوانتومی مزیت‌های فراوانی نسبت به روش‌های سنتی دارد. محاسبات کوانتومی از پدیده‌ای به نام درهمتنیدگی بهره می‌برد.وقتی دو کیوبیت درهمتنیده باشند ویژگی‌های کوانتومی آن‌ها به هم متصل می‌شوند. با استفاده از درهمتنیدگی می‌توان محاسبات را به یکباره انجام داد. سیستم‌ها و فرضیه‌های فراوانی برای انجام محاسبات کوانتومی پیشنهاد شده است، اما بهترین آن‌ها سیستم‌هایی هستند که از نقاط کوانتومی تشکیل شده باشند. نقاط کوانتومی کریستال‌هایی در حد نانو هستند که از مواد نیمه رسانا ساخته شده‌اند. بنابراین در پردازش اطلاعات به روش کوانتومی از فناوری نانو استفاده می‌شود. نقاط کوانتومی توانایی محدود کردن الکترون را دارند و این سرآغاز انجام محاسبات است. یکی از بهترین سیستم‌ها برای انجام محاسبات کوانتومی،سیستم نقاط کوانتومی جفت شده داخل کاواک می‌باشد. این سیستم به دلیل زمان ناهمدوسی بالا و برهمکنش سریع بین کیوبیت‌ها یک سیستم کارآمد به شمار می‌آید. در این سیستم شاهد چندین برهمکنش هستیم، این برهمکنش‌ها نقش اساسی را ایفا می‌کنند. از جمله برهمکنش فونون–اکسایتون و برهمکنش اکسایتون–اکسایتون و برهمکنش فورستر. این برهمکنش‌ها باعث ایجاد درهمتنیدگی می‌شوند، ما در این پایان نامه،این برهمکنش‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم و با استفاده از تابع موج سیستم تابع همبستگی را به دست می‌آوریم و در شرایط مختلف پارامتر بل را محاسبه می‌کنیم و تحول زمانی پارامتر بل را بدست می‌آوریم و همچنین درهمتنیدگی را به صورت مستقیم بدست می‌آوریم و در نهایت منحنی‌های مربوط به آن‌ها را رسم می‌کنیم و دیده می‌شود که می‌توان از تحول زمانی نامساوی بل به عنوان ابزاری برای تعیین تحول زمانی درهمتنیدگی استفاده می‌کنیم.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول:نقاط کوانتومی..... ۱

۱-۱- نقاط کوانتومی..... ۲

۱-۲- چاه کوانتومی..... ۳

شکل(۱-۱)..... ۴

شکل(۱-۲)..... ۴

۱-۳- تولید نقاط کوانتومی..... ۴

۱-۳-۱ نقاط کوانتومی جانبی..... ۵

شکل(۱-۳)..... ۵

شکل(۱-۴)..... ۶

شکل(۱-۵)..... ۶

۱-۳-۲ نقاط کوانتومی ستونی..... ۶

شکل(۱-۶)..... ۶

۱-۴ کاربردهای دیگر نقاط کوانتومی..... ۷

۱-۴-۱ نشانگرهای بیولوژیکی..... ۷

شکل(۱-۷)..... ۷

۱-۴-۲ دیودهای نورانی سفید..... ۷

۱-۴-۳ اتم‌های مصنوعی..... ۸

۱-۴-۴ عناصر مدارهای نوری..... ۸

۱-۴-۵ مولدهای انرژی خورشیدی.....۸

فصل دوم:نظریه اطلاعات و محاسبات کوانتومی.....۱۰

۲-۱ مقدمه.....۱۱

۲-۲ اطلاعات کلاسیکی.....۱۱

شکل (۲-۱).....۱۲

شکل (۲-۲).....۱۲

۲-۳ محتوای اطلاعاتی در یک پیام.....۱۲

۲-۴ آنتروپی و تئوری اطلاعات شانون.....۱۳

۲-۵ انواع آنتروپی.....۱۴

۲-۵-۱ آنتروپی نسبی.....۱۵

۲-۵-۲ آنتروپی شرطی.....۱۵

۲-۵-۳ آنتروپی وابسته.....۱۵

۲-۵-۴ اطلاعات متقابل.....۱۵

۲-۶ کامپیوترهای کوانتومی.....۱۶

۲-۶-۱ تاریخچه.....۱۶

۲-۷ پایه‌های‌اصلی‌محاسبات‌کوانتومی.....۱۶

۲-۷-۱ کیوبیت.....۱۶

۲-۷-۲ قدرت کیوبیت‌ها در محاسبات کوانتومی.....۱۷

۲-۷-۳ انواع کیوبیت‌ها.....۱۷

۲-۷-۴ اکسایتون.....۱۸

شکل (۲-۳).....۱۹

۲-۸ گیت‌های کوانتومی.....۱۹

۲-۹ مدارهای کوانتومی.....۲۰

شکل (۲-۴).....۲۱
۲-۱۰ الگوریتم‌های کوانتومی.....۲۱
۲-۱۰-۱الگوریتم دویچ.....۲۱
شکل (۲-۵).....۲۲
۲-۱۱ شرایط *Di Vincenzo*.....۲۳
۲-۱۲ معرفی قطعات کوانتومی برای محاسبات کوانتومی.....۲۴
۲-۱۳ پیشنهاد نقاط کوانتومی برای محاسبات کوانتومی.....۲۵
۲-۱۳-۱ کیوبیت بار.....۲۵
شکل (۲-۶).....۲۶
شکل (۲-۷).....۲۶
۲-۱۳-۲ شرایط *Di Vincenzo* برای فرضیه کیوبیت بار.....۲۷
۲-۱۳-۳ اسپین الکترون نقاط کوانتومی.....۲۷
شکل (۲-۸).....۲۸
شکل (۲-۹).....۲۹
۲-۱۳-۴ شرایط *Di Vincenzo* برای فرضیه کیوبیت اسپین.....۳۰
۲-۱۴ نقاط کوانتومی نیمه رسانا.....۳۰
شکل (۲-۱۰).....۳۱
۲-۱۵ قطعات ترکیبی.....۳۱
۲-۱۵-۱ نقاط کوانتومی داخل کاواک.....۳۱
شکل (۲-۱۱).....۳۲
۲-۱۵-۲ اسپین هیدروژنیک (اسپین ترکیبی).....۳۳

شکل (۲-۱۲)..... ۳۳

۲-۱۶ سنجش در همتنیدگی..... ۳۴

۲-۱۷ دستگاه دو قسمتی و پایه‌های بل..... ۳۴

۲-۱۸ روش‌هایی برای سنجش در همتنیدگی..... ۳۶

۲-۱۸-۱ اندازه‌گیری در همتنیدگی به وسیله محاسبه تلاقی..... ۳۶

۲-۱۸-۲ اندازه‌گیری در همتنیدگی به وسیله محاسبه EOF..... ۳۸

۲-۱۸-۳ نوشتن ماتریس چگالی بر اساس پایه های بل..... ۳۹

۲-۱۹ پارادوکس انیشتین-پودولسکی-روزن (EPR)..... ۴۰

شکل (۲-۱۳)..... ۴۰

۲-۲۰ متغیرهای پنهان و نامساوی بل..... ۴۲

فصل سوم:نقض نامساوی بل و درهمتنیدگی برای نقاط کوانتومی..... ۴۴

۳-۱ مقدمه..... ۴۵

۳-۲ مدل فیزیکی برهمکنش دو نقطه کوانتومی جفت شده در یک کاواک..... ۴۶

۳-۳ بدست آوردن پارامتر بل..... ۵۶

شکل (۳-۱)..... ۵۷

شکل (۳-۲)..... ۶۰

شکل (۳-۳)..... ۶۱

شکل (۳-۴)..... ۶۴

شکل (۳-۵)..... ۶۶

شکل (۳-۶)..... ۶۷

۳-۴ اندازه‌گیری درهمتنیدگی..... ۶۷

شکل (۳-۷).....۷۱

شکل (۳-۸).....۷۲

شکل (۳-۹).....۷۳

فصل چهارم: بررسی حالت دیگری از نقاط کوانتومی داخل کاواک.....۷۴

۴-۱ مدل فیزیکی.....۷۵

شکل (۴-۱).....۸۰

شکل (۴-۲).....۸۱

شکل (۴-۳).....۸۳

شکل (۴-۴).....۸۴

۴-۲ نتیجه گیری.....۸۴

نتیجه گیری.....۸۵

پیوست ها.....۸۶

پیوست الف.....۸۷

پیوست ب.....۹۵

پیوست ج.....۱۰۲

پیوست د.....۱۰۷

منابع و مآخذ.....۱۱۱

فصل اول

نقاط کوانتومی

۱-۱ نقاط کوانتومی

نقاط کوانتومی کریستال‌هایی در مقیاس نانو که از مواد نیمه رسانا ساخته شده‌اند[۱].پهنای نقاط کوانتومی بین دو تا ده نانومتر هست که معادل قرار گرفتن ۱۰ تا ۵۰ اتم در کنار هم است. بنابراین نقاط کوانتومی به دلیل کوچک بودنشان دسته منحصر به فردی از نیمه رسانا ها به شمار می‌آیند. در این ابعاد کوچک مواد رفتار متفاوتی دارند و این رفتار متفاوت، قابلیت‌های بی سابقه ای در کاربردهای علمی و فنی به نقاط کوانتومی می‌بخشند.

یک نقطه کوانتومی می‌تواند شامل یک یا چندین هزار الکترون باشد. نقاط کوانتومی توانایی این را دارند که حرکت الکترون را محدود کنند و این محدودیت سرآغاز تحولات عظیمی است که کاربردهای فراوانی در محاسبات کوانتومی دارد. کارایی نقاط کوانتومی به خاطر قابل تنظیم بودن طول موجشان است. وقتی نقاط کوانتومی را با محرک نور ماورای بنفش وادار به تابش می‌کنیم این طول موج رنگ نقاط کوانتومی را مشخص می‌کند. مقدار این طول موج به جنس و اندازه نقاط کوانتومی بسیار حساس است و روش‌های جدید در فناوری نانو به تولید کنندگان آنها توانایی زیادی در کنترل این طول موج بخشیده است. این خاصیت مهم تنها با مکانیک کوانتومی قابل وصف است ترازهای انرژی در یک توده از ماده نیمه رسانا بسیار به هم نزدیک هستند.به طوری که می‌توان آن‌ها را پیوسته دانست گپ انرژی بین باند ظرفیت و باند رسانش وجود دارد. به وسیله محرک می-توان الکترون را از یک باند ظرفیت جدا کرد و به باند رسانش برد، بنابراین یک حفره در باند ظرفیت ایجاد می-شود. اما در نقاط کوانتومی که از نیمه رسانا ساخته شده‌اند به دلیل کوچک بودنشان یک تفاوت بارز وجود دارد. وقتی یک الکترون از باند ظرفیت به باند رسانش می‌رود به طور طبیعی باید در ماده جابجا شود، مقدار جابجایی به احترام نیلز بوهر به شعاع بوهر معروف است . در توده نیمه رسانا این جابجایی در مقایسه با ابعاد ماده بسیار کوچک است و مشکلی پیش نمی‌آید اما در نقاط کوانتومی که در حد شعاع بوهر کوچک هستند دیگر قواعد توده نیمه رسانا برقرار نیست و نمی‌توان انرژی‌ها را پیوسته دانست و بین ۲ تراز انرژی فاصله می‌افتد بنابراین انرژی کوانتیزه می‌شود. فاصله گپ انرژی در نقاط کوانتومی باعث می‌شود که الکترون برای گذار به باند رسانش انرژی بیشتری آزاد کند. با اضافه و کم کردن اتم به نقطه کوانتومی قابل تغییر است و این قابلیت باعث تنظیم

طول موج تابشی و در نهایت انتخاب رنگ دلخواه برای نقطه کوانتومی می‌شود. بنابراین می‌توان گفت وقتی سایز یک قطعه تا حد شعاع بوهر کوچک باشد آنگاه ترازهای انرژی گسسته می‌شوند و پدیده‌های کوانتومی مشاهده می‌شوند، این عبارت به اصل اندازه کوانتیزه معروف است. نقاط کوانتومی انواع مختلفی دارند اما بهترین آن‌ها برای اجرای گیت‌های کوانتومی، نقاط کوانتومی الکتروستاتیکی می‌باشند. نقاط کوانتومی الکتروستاتیکی شامل سدها و چاه‌های پتانسیل می‌باشند، منبع و الکترودهای جریان در بالا و پایین این نقاط قرار دارند. محدود شدن الکترون توسط چاه پتانسیل بسیار مهم هست و آگاهی از مقدار این پتانسیل برای مطالعه و مدل سازی خواص الکترونی نقطه کوانتومی مفید است. محدود شدن الکترون توسط پتانسیل به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نمی-باشد ولی می‌توان قوانین اولیه الکتروستاتیک را به وسیله معادله پواسون برای چنین نانو ساختارها محاسبه کرد. می‌توان به صورت زیر پتانسیل را نمایش داد:

$$V = V_{\cdot} exp\left(-\left(\frac{r}{R}\right) - \left(\frac{|z|}{Z}\right)^{p} \right), \qquad (۱-۱)$$

که $V_{\cdot}$ عمق چاه پتانسیل است. $p > ۱, r = \sqrt{x^{۲} + y^{۲}}$ و R و Z مقدارهایی از رنج محدودیت پتانسیل در جهت-های x و y و z هستند. به ازای p=۲ یک پتانسیل گاوسی داریم و به ازای p> ۱۰ چاه پتانسیل مستطیلی داریم. وقتی یک الکترون در یک نقطه کوانتومی محدود می‌شود حالت‌های مقید ایجاد می‌شود بنابراین نقطه کوانتومی را می‌توان یک اتم مصنوعی به حساب آورد. وقتی دو نقطه کوانتومی با هم جفت شوند یک مولکول مصنوعی را به وجود می‌آورند.

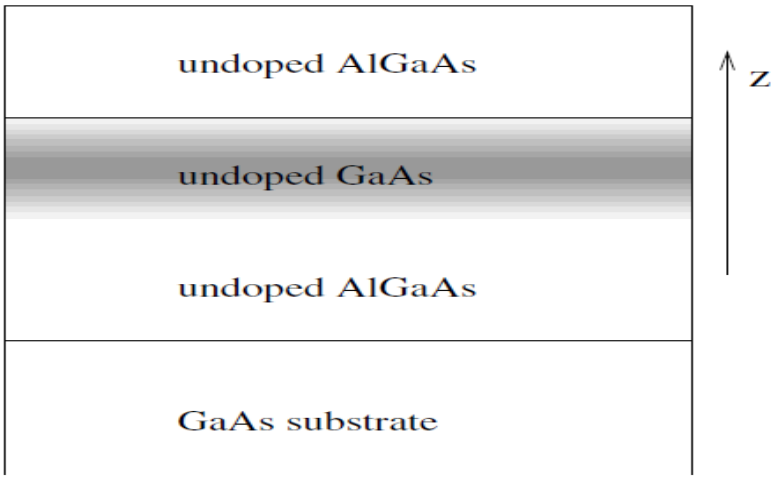
۱-۲ چاه کوانتومی

یک چاه کوانتومی نقطه آغازین برای ساخت نقطه کوانتومی است. به وسیله تکنیک‌های شیمیایی و مولکولی یک لایه بسیار نازک می‌تواند بر روی یک توده از یک ماده گذاشته شود، این کار باعث ساخته شدن چاه‌های کوانتومی می‌شود. دو نوع چاه کوانتومی داریم:

۱-چاه کوانتومی که از کنار هم گذاشتن چندین لایه کریستالی با استفاده از تکنیک‌های شیمیایی و مولکولی ایجاد می‌شود.

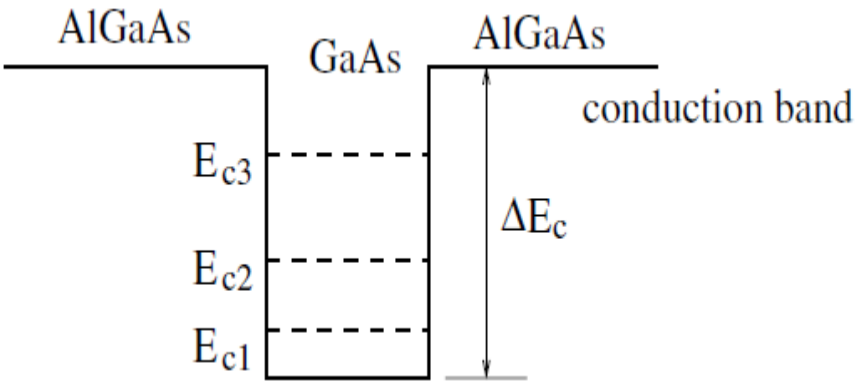
۲- چاه کوانتومی که از کنار هم گذاشتن چندین لایه کریستالی با استفاده تنظیم غلظت ناخالصی ایجاد می شود.

انتخاب هر دو روش برای ساختن قطعات کوانتومی باید منجر به محدود شدن حرکت الکترون شود.



شکل(۱-۱)

در شکل (۱-۲) یک چاه کوانتومی با لایه های *AlGaAs/GaAs* را مشاهده می‌کنیم. یک لایه آلومینیوم گالیوم آرسنیک (*AlGaAs*) بر روی سطحی از *GaAs* گذاشته شده سپس یک لایه با ضخامت کمتر از ۱۰۰ نانومتر از *GaAs* روی *AlGaAs* قرار گرفته و دوباره لایه‌ای از *GaAs* روی آن قرار می‌گیرد.



شکل(۱-۲)

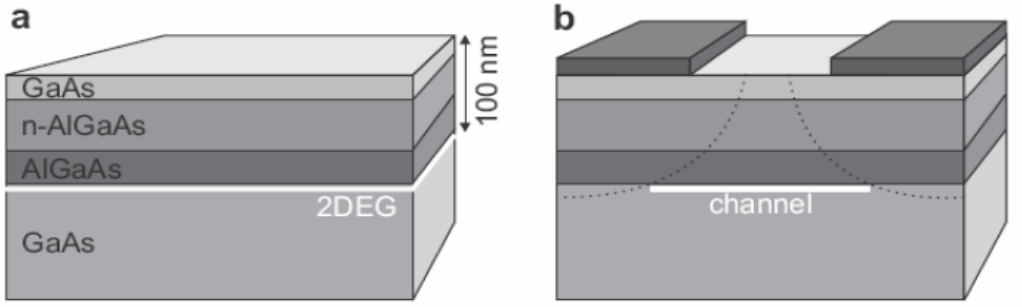
در شکل (۱-۲) ترازهای انرژی چاه کوانتومی شکل (۱-۱) را نشان می‌دهد. الکترون به وسیله سد انرژی *AlGaAs* محدود می‌شود.

۱-۳ تولید نقاط کوانتومی

هم اکنون دیدی که از نقاط کوانتومی داریم این است که، نقاط کوانتومی شبیه جعبه‌ای هستند که از الکترون‌ها پر شده است. به وسیله اعمال ولتاژ به این جعبه می‌توانیم در مورد خواص الکترونی نقاط کوانتومی اطلاعاتی را کسب کنیم. این ولتاژ از طریق الکترود گیت‌ها منتقل می‌شود. در ادامه ساختار دو نمونه از نقاط کوانتومی را بررسی می‌کنیم.

۱-۳-۱ نقاط کوانتومی جانبی[۱]

ساختار این نقاط به ما اجازه می‌دهد که تمامی پارامترها قابل کنترل باشند. برای ساختن این نقاط کوانتومی ابتدا لایه‌های مختلفی از مواد نیمه‌رسانا را بر روی هم قرار می‌دهیم. این لایه‌ها هر ماده نیمه‌رسانایی می‌تواند باشد.



شکل (۱-۳)

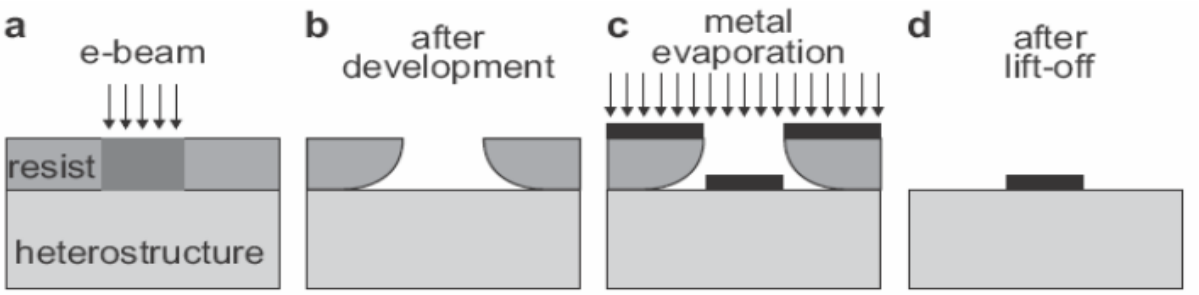
در شکل (۱-۳) *a* لایه هایی از *GaAs* و *AlGaAs* روی هم قرار گرفته‌اند و کریستال منظمی بدست آمده است[۲].الکترون‌ها در وجه مشترک لایه گیر می‌کنند. بنابراین الکترون یک گاز الکترونی دو بعدی *(2DEG)* را تشکیل می‌دهد. به وسیله یک میدان الکتریکی از طریق اعمال ولتاژ منفی به الکترودها می‌توان الکترون‌ها را خالی کرد، شکل (۱-۳) *b*.

مراحل ساخت گیت‌های این نقاط کوانتومی به صورت زیر است:

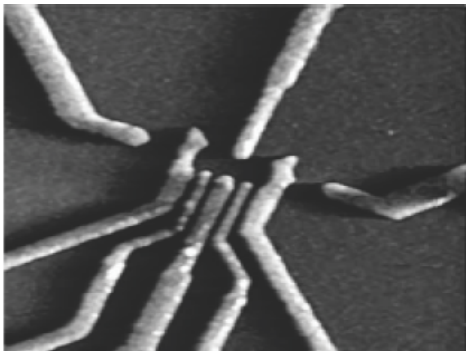
ابتدا قسمتی از سطح نقطه کوانتومی را که فوتو رسیست[۲] شده، در معرض پرتو الکترونی قرار می‌دهیم سپس فلزاتی مانند طلا و تیتانیوم را بر روی آن قسمت قرار می‌دهیم و در نهایت قسمت‌هایی که فلز با سطح فوتورسیست شده مخلوط شده بر می‌داریم و در نهایت گیت‌ها به دست می‌آیند. شکل (۱-۴) مراحل ساخت را نشان می‌دهد و شکل (۱-۵) یک گیت تولید شده را نشان می‌دهد.

۱-*Gated Quantum Dots*

۲-*Photoresist*



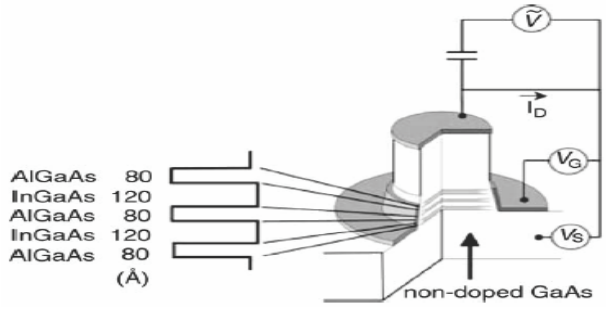
شکل (۱-٤)



شکل (۱-۵)

۱-۳-۲ نقاط کوانتومی ستونی[۱]

در شکل(۱-۶) یک نقطه کوانتومی ستونی نمایش داده شده است. این نقطه کوانتومی از یک سد دوتایی ساخته شده است. تعداد الکترون‌ها در نقاط کوانتومی توسط تونل زدن از صفر تا ۴۰ متغیر است. این تونل زدن توسط تغییرات ولتاژ امکان پذیر است.



شکل(۱-٦)

۱-*Vertical Quantum Dots*

سد دوتایی از یک چاه *InGaAs* با ضخامت ۱۲ نانومتر و سدهای *AlGaAs* با ضخامت ۷/۵-۹ نانومتر تشکیل شده‌اند.

۱-٤ کاربردهای دیگر نقاط کوانتومی

۱-٤-۱ نشانگرهای بیولوژیکی

امکان تابش در فرکانس‌های مطلوب، نقاط کوانتومی را ابزاری کارآمد برای نشانه‌گذاری و تصویربرداری از

شکل (۱-۷)

سلول‌های موجودات زنده ساخته است. می‌توان نقاط کوانتومی را به انتهای بیومولکول‌های بزرگ مانند پروتئین‌ها یا رشته‌های *DNA* متصل کرد و از آنها برای شناسایی و ردیابی بیماری‌های درون بدن موجودات زنده استفاده کرد. تنوع طول موج‌های تابش نقاط کوانتومی این امکان را فراهم آورده است که همزمان چندین نشانگر را در اجزای سلول زنده به کار برد و از نحوه و میزان برهمکنش آنها مطلع شد. پیش از این از مولکول‌های رنگی برای این کار استفاده می‌شد که تنوع کمتری از نقاط کوانتومی از نظر رنگ دارند و بیشتر باعث اختلال در فعالیت سلول‌های زنده می‌شوند.

۱-٤-۲ دیودهای نورانی سفید

قابلیت تنظیم اندازهٔ گپ انرژی با نقاط کوانتومی، این قابلیت را در اختیار ما می‌گذارد که آنها را به عنوان دیود نورانی به کار بگیریم. به این ترتیب، می‌توان به بازهٔ بیشتری از رنگ‌ها دست یافت و منابع نور با کارآیی بسیار بالا ایجاد کرد. همچنین با ترکیب نقاط کوانتومی با ابعاد مختلف، می‌توان منابع پربازده برای تولید نور سفید ایجاد کرد، زیرا همهٔ آنها را می‌توان از یک طریق برانگیخت.می‌دانیم که نور سفید را می‌توان به نورهایی با رنگ‌های مختلف تجزیه کرد، مانند همان چیزی که در رنگین‌کمان مشاهده می‌کنیم. معکوس این حالت هم امکان‌پذیر است، یعنی می‌توان با ترکیب سه پرتو نوری یا بیشتر، با طول موج‌های مختلف، نوری تولید کرد که

سفید به نظر بیاید. با آنکه نقاط کوانتومی در ابعاد مختلف طول موج‌های مختلفی تابش می‌کنند، اما همهٔ آنها را می‌توان با یک پرتو نور دارای طول موجی در محدودهٔ ماورای بنفش تحریک کرد. حال اگر سه تا از این محلول‌ها، و حتی بیشتر، را مخلوط کنیم، با جذب نور ماورای بنفش، نور سفیدرنگی از خود ساطع می‌کنند. چون طیف تابشی نقاط کوانتومی بسیار باریکتر از لامپ‌های التهابی است، دیگر اتلاف انرژی به صورت نور مادون قرمز، که در روشنایی لامپ بی‌تأثیر است، وجود ندارد. در نتیجه، منبع نور سفید با بازدهی بسیار بیشتری خواهیم داشت.

۱-٤-۳ اتم‌های مصنوعی

باردار کردن نقاط کوانتومی، به علت کوچکی، به سادگی باردار کردن اجسام بزرگ نیست. برای اضافه کردن هر الکترون به یک نقطهٔ کوانتومی، باید بر انرژی الکترواستاتیک بین الکترون‌های روی نقطهٔ کوانتومی غلبه کرد. این کار را با اعمال میدان الکتریکی انجام می‌دهند. الکترون‌هایی که به نقاط کوانتومی اضافه می‌شوند، در ترازهای گسستهٔ انرژی قرار می‌گیرند. این ترازها شبیه ترازهای مختلف اتم‌های عناصرند. به همین علت، به این نقاط کوانتومی باردارشده «اتم‌های مصنوعی» می‌گویند که خواصی متفاوت از اتم‌های عناصر طبیعی دارند. این اتم‌ها، امروزه موضوع تحقیقات وسیعی هستند و تعدادی از آنها به نام اولین کسی که این آزمایش‌ها را رویشان انجام داده، نامگذاری شده است.

۱-٤-٤ عناصر مدارهای نوری

یکی از اصلی‌ترین چالش‌های صنعت ارتباطات، سرعت انتقال داده‌هاست که در حال حاضر به علت محدودیت طبیعی نیمه‌رساناهای توده‌ای در جذب و پاسخ به سیگنال، نمی‌تواند بیشتر از این شود. قابلیت تنظیم انرژی گپ و به تبع آن طیف جذبی و خواص ویژهٔ نقاط کوانتومی، می‌تواند بر این مشکل فائق آید. نقاط کوانتومی همچنین قابلیت ایجاد لیزرهای کارآمدتر با اغتشاش کمتر برای ارتباطات سریع‌تر را فراهم می‌کنند.

۱-٤-۵ مولدهای انرژی خورشیدی

در نبود سوخت‌های فسیلی، یکی از منابع مهم تولید انرژی الکتریکی، تابش خورشید است. مشکل اصلی مولدهای کنونی انرژی خورشیدی، هزینهٔ بالا و کارآیی کم آن‌ها است. سلول‌های خورشیدی از موادّ نیمه‌رسانا تشکیل شده‌اند که با جذب نور خورشید، الکترون‌ها را به ترازهای باند رسانش هدایت می‌کنند و به نحوی باعث ایجاد نیروی محرکهٔ الکتریکی می‌شوند. بازدهی سلول‌های خورشیدی توسط طیف جذبی آنها که جزو خواص ذاتی نیمه‌رساناهای توده‌ای است تعیین می‌شود. با طراحی نقاط کوانتومی که بیشتر همپوشانی را در طیف جذبی