دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده فیزیک

مطالعه‌ی رفتار گذرای وابسته به زمان ترابرد الکتریکی از یک جفت نقطه‌ی کوانتومی موازی با استفاده از رهیافت تابع گرین غیرتعادلی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد فیزیک، گرایش ماده‌ی چگال

معصومه زند

استاد راهنما
دکتر فرهاد فضیله

۱۳۹۳

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک ماده‌ی چگال خانم معصومه زند

تحت عنوان

مطالعه‌ی رفتار گذرای وابسته به زمان ترابرد الکتریکی از یک جفت نقطه‌ی کوانتومی موازی با استفاده از رهیافت تابع گرین غیرتعادلی

در تاریخ ۱۳۹۳/۱۰/۱۷ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱ - استاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر فرهاد فضیله
۲ - استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر پیمان صاحب سرا
۳ - استاد داور	دکتر فرهاد شهبازی
۴ - استاد داور	دکتر سیدجواد هاشمی‌فر
سرپرست تحصیلات تکمیلی	دکتر فرهاد شهبازی

سپاس...

سپاس مهربان سایبانی را که چه بسیار مهربانانه چتر زندگیم شد... خداوندگار مهربانیها...

و سرمایه‌های ارزشمند زندگیم ... آنان که صبورانه سوختند تا ساخته شوم ... همان‌هایی که اندیشه‌های راستینم برای ظهور لبخند پرمهرشان بی‌تابانه شتاب می‌کند... پدر عزیز و مادر مهربانم...

و هم درسی‌های روزهای تلخ و شیرین مدرسه‌ی زندگیم که با شادیهایم شاداب، و با غم‌هایم غمین بودند... آنانی که از صمیم قلب دوستشان دارم... مادربزرگ مهربان و برادران و خواهران با محبتم...

و همه‌ی کسانی که از الف دیروز تا یای امروز همپایم بودند.. آنانی که تخته سیاه از سپیدی وجودشان جان می‌گیرد.... آموزگاران دلسوزم... بویژه استاد راهنمای عزیزم جناب آقای دکتر فرهاد فضیله که کلامشان گره‌گشای سوالات ذهنم، و وجودشان مایه‌ی دلگرمی و آرامشم بود... و همچنین استاد مشاور ارجمندم جناب آقای دکتر پیمان صاحب سرا که با خوشرویی وسعه‌ی صدر پاسخگوی نادانستن‌هایم بودند... و اساتید داور، جناب آقای دکتر فرهاد شهبازی و جناب آقای دکتر سید جواد هاشمی فر که بازخوانی این پایان نامه را با تمام کاستی‌هایش متقبل شدند...

و ماندگارترین‌هایی که برایم بی‌بهانه دوست داشتنی بودند... دوستان و همکلاسیهای عزیزم...

و اینک قلم در بیان سپاس‌ها نفس کوتاه می‌کند... و این دل است که برایشان نفس‌های ماندگار آرزو می‌کند...

معصومه زند
زمستان ۹۳

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به بهترین های زندگیم

پدر و مادر عزیزم . . .

که وجودشان برایم

شوق زیستن است . . .

و

امید ماندن . . .

. . .

. . .

و باطله ای برای فیزیک . . .

به پاس آفریدگاریش در خلقت ذهن های باز و اندیشه های توانمند . . .

فهرست مطالب

چکیده ۱

۱ مقدمه ۲

۲ نقاط کوانتومی و کاربردهای آن ۴
۱.۲ معرفی و تاریخچه‌ی نقاط کوانتومی ۴
۲.۲ معرفی حوزه‌ی مزوسکوپی ۵
۳.۲ کوانتش بار و انرژی شارژ ۷
۴.۲ تولید و پارامترهای فیزیکی نقاط کوانتومی ۱۰
۵.۲ نظریه‌ی پایه‌ی ترابرد الکترونی از میان نقاط کوانتومی ۱۲
۱.۵.۲ جعبه‌ی تک الکترونی ۱۵
۲.۵.۲ ترانزیستور تک الکترونی ۱۵
۶.۲ تاثیر دما روی ترابرد نقاط کوانتومی ۱۸
۷.۲ تونل‌زنی بار- کوانتیده ۱۹
۸.۲ اثر انسداد کولنی در نقاط کوانتومی ۲۱
۹.۲ نوسان و پلکان کولنی در نقاط کوانتومی ۲۳
۱۰.۲ اثر تحدید کوانتومی در نقاط کوانتومی ۲۵
۱۱.۲ تراز و حالت در نقاط کوانتومی ۲۶
۱۲.۲ اثرات برهم‌کنش الکترون- الکترون در نسل‌ها ۲۸
۱۳.۲ انرژی شارژ یک برهم‌کنش مهم در نقاط کوانتومی ۳۱
۱۴.۲ خواص نقاط کوانتومی ۳۱
۱۵.۲ کاربردهای نقاط کوانتومی ۳۲
۱.۱۵.۲ ساخت اتم‌های مصنوعی ۳۲
۲.۱۵.۲ کامپیوترهای کوانتومی ۳۲
۳.۱۵.۲ نشانگرهای بیولوژیکی ۳۳
۴.۱۵.۲ دیودها ۳۳
۵.۱۵.۲ مولدهای انرژی خورشیدی ۳۴

۳ تقسیم‌بندی ترابرد الکترونی در ساختارهای مزوسکوپی ۳۵
۱.۳ ترابرد الکترونی تعادلی ۳۵
۱.۱.۳ احتمال عبور ۳۷
۲.۱.۳ تماس بدون بازتاب ۳۸
۳.۱.۳ مدهای عرضی ۳۹
۴.۱.۳ تابع توزیع ۳۹
۵.۱.۳ تعداد مدهای عرضی ۴۰

۶.۱.۳ مقاومت تماس ۴۲
۷.۱.۳ رهیافت لاندائر-بوتیکر ۴۲
۲.۳ ترابرد الکترونی غیرتعادلی ۴۴
۱.۲.۳ تابع همبستگی الکترون ۴۵
۲.۲.۳ تابع همبستگی حفره ۴۷
۳.۲.۳ توابع پراکندگی داخلی و خارجی ۴۷
۴.۲.۳ خود انرژی و تابع گرین ۴۹
۵.۲.۳ برهم‌کنش الکترون-الکترون ۵۰
۶.۲.۳ رهیافت تابع گرین غیرتعادلی ۵۱

۴ مطالعه‌ی ترابرد الکترونی در نقاط کوانتومی موازی ۵۶
۱.۴ رابط‌ها ۵۸
۱.۱.۴ مدل تنگابست ۵۸
۲.۱.۴ کاهش مرتبه‌ی ماتریس ۶۰
۳.۱.۴ محاسبه‌ی تابع گرین در سطح یک رابط نیمه‌بی‌نهایت ۶۱
۴.۱.۴ ولتاژ بایاس ۶۴
۲.۴ نمونه ۶۴
۱.۲.۴ اثر آهارانوف-بوهم ۶۴
۲.۲.۴ الگوی هابارد ۶۷
۳.۲.۴ الگوی ناخالصی اندرسون ۶۸
۴.۲.۴ نظریه‌ی میدان میانگین ۶۸
۵.۲.۴ اعمال ولتاژ درگاهی ۶۹
۶.۲.۴ درهم‌تنیدگی کوانتومی ۷۰
۷.۲.۴ برهم‌کنش RKKY ۷۱
۳.۴ اتصال رابط‌ها و نمونه ۷۲
۱.۳.۴ تابع طیفی ۷۲
۲.۳.۴ اصل برهم‌نهی و تداخل امواج ۷۳

۵ بررسی پدیده‌های تشدیدی در نقاط کوانتومی ۷۵
۱.۵ تونل‌زنی تشدیدی ۷۵
۱.۱.۵ مبانی تونل‌زنی ۷۵
۲.۱.۵ تونل‌زنی تشدیدی وابسته به زمان ۷۸

۶ مطالعه‌ی رفتار گذرای وابسته به زمان جریان الکتریکی ۸۱
۱.۶ اثر قدرت اتصال نمونه به رابط‌ها بر جریان الکتریکی ۸۲
۲.۶ اثر اعمال غیرمستقیم میدان مغناطیسی بر جریان الکتریکی ۸۵
۳.۶ اثر اعمال برهم‌کنش بر جریان الکتریکی ۸۷
۴.۶ گذار به فاز نارسانا با افزایش نسبت U/t ۸۸
۵.۶ اثر جابه‌جایی پتانسیل شیمیایی رابط‌ها بر جریان الکتریکی ۸۹
۶.۶ اثر افزایش ولتاژ بایاس بر جریان الکتریکی ۹۰

۷ بحث و نتیجه‌گیری ۹۲

مراجع ۹۴

چکیده

نقاط کوانتومی یک نوع از ابزار مصنوعی تولید شده محسوب می‌شوند. به‌طور کلی نقاط کوانتومی ناحیه‌هایی کوچک از مواد نیم‌رسانا معرفی می‌شوند که اندازه‌ی آن‌ها از مرتبه‌ی ۱۰۰ نانومتر است. یک نقطه‌ی کوانتومی یک ابزار رسانا در مقیاس زیرمیکرونی است که شامل چندین هزار الکترون است. نقاط کوانتومی در حالت کلی از شکل‌گیری گاز الکترونی در ناحیه‌ی مشترک بین دو ساختار نیم‌رسانا ایجاد شده و با اعمال یک پتانسیل الکتروستاتیکی به دریچه‌ی فلزی، محصورسازی الکترون‌ها در یک ناحیه‌ی نقطه مانند در سطح مشترک شکل می‌گیرد. به‌علت رخ دادن اثر انحصار کوانتومی و همچنین محدودیت حرکت الکترون در سه بعد، نقاط کوانتومی به‌عنوان سامانه‌های صفربعدی تلقی می‌شوند.خواص ترابردی یک نقطه‌ی کوانتومی با اتصال آن به رابط‌ها وعبور جریان از نقطه‌ی کوانتومی اندازه‌گیری می‌شود. نقاط کوانتومی متعلق به یک کلاس بزرگ‌تر از سیستم‌ها، موسوم به حوزه‌ی مزوسکوپی می‌باشند که حد وسط حوزه‌ی میکروسکوپی مانند هسته‌ها و اتم‌ها و حوزه‌ی ماکروسکوپی مانند توده‌های مواد هستند. یک سیستم زمانی مزوسکوپی نامیده می‌شود که طول همدوسی فاز الکترون‌ها (فاصله‌ای که الکترون طی می‌کند بدون این‌که فاز آن دچار واهلش شود) در مقایسه با طول سیستم قابل مقایسه باشد. همدوسی فاز به جفت‌شدگی الکترون‌ها با محیط اطرافشان و فرایندهای شکست فازی وابسته است، و فرایندهای شکست فاز شامل یک تحول در حالت سیستم هستند. برای محاسبه‌ی ترابرد در سیستم‌های بس‌ذره‌ای که شامل فرایندهای شکست فاز هستند، رهیافت تابع گرین غیرتعادلی بسیار کارآمد است. این رهیافت دربرگیرنده‌ی نظریه‌ی میکروسکوپی برای ترابرد کوانتومی شامل برهم‌کنش‌ها است. رهیافت تابع گرین غیرتعادلی شامل دینامیک کوانتومی با تعریف آماری پراکندگی‌های ناشی از برهم‌کنش‌ها است. توان واقعی این رهیافت برای توصیف ترابرد کوانتومی در حضور برهم‌کنش‌ها است. برای دریافت ترابرد الکترونی در این رهیافت در نظر گرفتن یک تک‌ذره‌ی متحرک در یک پتانسیل موثر که آن‌را احاطه می‌کند اساس کار را تشکیل می‌دهد.

در این پروژه یک مولکول مصنوعی متشکل از یک جفت نقطه‌ی کوانتومی موازی که از دو طرف به زنجیره‌های نیمه‌بی‌نهایت از رابط‌های رسانا اتصال یافته است در نظر می‌گیریم و با استفاده از رهیافت تابع گرین غیرتعادلی به مطالعه‌ی رفتار گذرای وابسته به زمان ترابرد الکتریکی این سامانه در دمای صفر می‌پردازیم.

کلمات کلیدی: *نقاط کوانتومی، ترابرد کوانتومی، تابع همبستگی، رژیم انسداد کولمبی، رهیافت تابع گرین غیرتعادلی*

فصل ۱

مقدمه

در این پایان‌نامه انگیزه‌ی ما بر این است که به بررسی برخی از ویژگی‌های اساسی ترابرد از میان دسته‌ای از نانوساختارهای نیمه‌هادی، موسوم به نقاط کوانتومی بپردازیم که از موضوعات جالبی است که ذهن بشر امروز را به خود معطوف ساخته‌است. یکی از دلایل عمده‌ای که ما را مصمم کرد تا نانوساختارها را برای بررسی ویژگی‌های ترابردی برگزینیم این است که در مواد توده‌ای به علت زیاد بودن تعداد اتم‌ها فقط میانگینی از خواص اتم‌ها به‌عنوان خصوصیات ماده در نظر گرفته می‌شود اما در مقیاس نانو به علت کم بودن تعداد اتم‌ها در ماده، اتم‌ها خواص ذاتی خود را نشان می‌دهند بنابراین کار در این حوزه از دقت بالاتری برخوردار است. در فصل دوم به معرفی تاریخچه‌ای از نقاط کوانتومی می‌پردازیم. این دسته از مواد متعلق به حوزه‌ی مزوسکوپی می‌باشند و به همین دلیل شاهد پدیده‌های کوانتومی بسیار جالبی نظیر کوانتش بار و کوانتش انرژی در آن‌ها هستیم که تئوری پایه‌ی ترابرد الکترونی در نقاط کوانتومی، بر اساس آن‌ها شکل می‌گیرد.

در ادامه به‌طور مختصر تاثیر دما را بر ترابرد نقاط کوانتومی مورد بحث قرار دادیم و سپس به مطالعه‌ی پدیده‌های مهمی نظیر انحصار کوانتومی و انسداد کولمبی که در نقاط کوانتومی رخ می‌دهند می‌پردازیم و در نهایت، فصل دوم را با توصیفی از چگونگی وضعیت ترازها و حالت‌ها در نقاط کوانتومی به اتمام می‌رسانیم.

در فصل سوم، ترابرد از میان ساختارهای مزوسکوپی را به دو دسته‌ی عمده‌ی تعادلی و غیرتعادلی تفکیک می‌نماییم. برای حل مسائلی که سامانه در حالت تعادل ترمودینامیکی است از رهیافت تعادلی لاندائر- بوتیکر یا رابطه‌ی فیشرلی استفاده می‌شود ولی برای زمانی که با اعمال یک ولتاژ خارجی با مقداری ملموس، سامانه را از حالت تعادل خارج کنیم رهیافت تابع گرین غیرتعادلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این رهیافت که ابزار محاسباتی بسیار قدرتمند در حضور برهم‌کنش‌های موثر الکترون-

الکترون و الکترون- فونون است، یافتن یک حالت پایدار کوانتومی برای سامانه هدف کار را تشکیل می‌دهد. شایان ذکر است که اعمال برهم‌کنش‌ها در این رهیافت با استفاده از قضیه‌ی مقدار میانگین صورت گرفته تا تحت این شرایط مسئله را به‌صورت مسئله‌ی یک تک‌ذره‌ی موثر کاهش دهیم. این رهیافت به علت دربرگیری سهم برهم‌کنش‌ها رفتار ترابردی واقعی‌تری نسبت به رهیافت لاندائر- بوتیکر برای ساختارهای مزوسکوپی از خود نشان می‌دهد بنابراین دقت محاسبات نیز در مقایسه با رهیافت لاندائر- بوتیکر بالاتر است. این دلیل ما را بر آن داشت که این روش را برای مطالعه‌ی رفتار گذرای وابسته به زمان جریان الکتریکی در حضور برهم‌کنش‌ها انتخاب کنیم.

در فصل چهارم، یک ملکول مصنوعی متشکل از دو نقطه‌ی کوانتومی موازی را که از طرفین به زنجیره‌های نیمه‌بی‌نهایت رسانا اتصال یافته است، برای بررسی این رهیافت در نظر گرفتیم . این ساختار در چندین آزمایش مورد بررسی قرار گرفته و کاربردهای عملی جالبی در نانوالکترونیک و فیزیک بس‌ذره‌ای بنیادی دارد. ابتدا با در نظرگیری یک هامیلتونی مشخص برای سه بخش مختلف این سامانه که شامل رابط‌ها، نمونه و جفت‌شدگی رابط‌ها با نمونه است، حرکت الکترون را با گسسته‌سازی سامانه شبیه‌سازی می‌کنیم که این روند، معادل با استفاده از هامیلتونی مدل تنگابست است که توصیف کننده‌ی حرکت الکترون میان سایت‌های یک شبکه است. در مرحله‌ی بعد با داشتن هامیلتونی، تابع گرین کل را محاسبه می‌نماییم. برای لحاظ کردن سهم برهم‌کنش‌ها در تابع گرین نیاز به معرفی توابع همبستگی الکترون و حفره داریم که با داشتن این توابع طی یک چرخه‌ی همگرایی می‌توان از طریق یک فرایند خودسازگار، تابع گرین و تابع همبستگی را از طریق هم محاسبه نمود تا به هم همگرا شوند و در نهایت حالت پایدار ساختار کوانتومی به‌دست آید.

در فصل پنجم، با مبانی اولیه‌ی تونل‌زنی آشنا می‌شویم و پدیده‌های نوسانی وابسته به زمان ترابرد الکترونی را که در نقاط کوانتومی موازی توسط دیگران مورد تحقیق قرار گرفته است، بیان کردیم.

در فصل ششم، رفتار گذرای وابسته به زمان جریان الکتریکی را تحت اعمال برهم‌کنش جایگاهی و اعمال غیرمستقیم میدان مغناطیسی به‌دست آوردیم و اثر قدرت جفت‌شدگی به رابط‌ها را بر تغییر رژیم ترابردی بررسی نموده و تاثیرافزایش بایاس و افزایش نسبت U/t بر مقدار جریان مانای نهایی نیز از نتایجی است که در این فصل مورد تحلیل قرار گرفته شده‌است. در نهایت در فصل هفتم، یک نتیجه‌گیری کلی از پروژه‌ی انجام‌شده خواهیم‌داشت.

فصل ۲

نقاط کوانتومی و کاربردهای آن

۱.۲ معرفی و تاریخچه‌ی نقاط کوانتومی

اخیراً پیشرفت‌های قابل توجهی در فناوری نانو صورت گرفته‌است که امکان ساخت و به‌کارگیری نانوساختارهایی از جمله نقاط کوانتومی [۱] ، حلقه‌های کوانتومی [۲] و رساناهای مولکولی [۳] را در صنایع الکترونیک و اسپین الکترونیک فراهم نموده است [۱]. نقطه‌ی کوانتومی نانو کریستالی است که از مواد نیم‌رسانا ساخته شده‌است و به اندازه‌ی کافی کوچک است که خواص مکانیک کوانتومی از خود نشان می‌دهد [۲] ، یا در تعریفی دیگر می‌توان نقطه‌ی کوانتومی را اکسیتونی [۴] دانست که در فضای سه‌بعدی محدود شده‌است [۳].

اهمیت نیم‌رسانا بودن نقاط کوانتومی در این است که رسانایی الکتریکی این مواد را با محرک‌های خارجی نظیر تابش نور یا گرما و اعمال میدان الکتریکی می‌توان تغییر داد تا حدی که به ماده‌ی رسانا تبدیل شوند و همین خاصیت عمده نقاط کوانتومی را به‌عنوان یکی از اجزای حیاتی انواع مدارهای الکتریکی و ابزارهای نوری تبدیل کرده است [۴].

مطالعه روی نقاط کوانتومی در سال ۱۹۷۰ آغاز شد و برای اولین بار، مارک رید [۵] اصطلاح نقطه‌ی کوانتومی را ابداع کرد. در سال ۱۹۸۰ این گروه از نانو ذرات توسط لوئیس بروس [۶] در محلول‌های

---

[۱] Quantum dots

[۲] Quantum rings

[۳] Molecular conductors

[۴] Exiton

[۵] Mark Reed

[۶] Louis Brus

کلوئیدی ساخته شد، وی پس از سال ۱۹۸۴ به رابطه‌ی بین شکاف انرژی نانوذرات نیم‌رسانا و اندازه‌ی آن‌ها دست یافت [۵، ۶]. یکی از عملکردهای بسیار جالب نانوساختارها این است که قابلیت جذب هر تعداد الکترون وارد شده را دارا می‌باشند، بنابراین بر اساس تعداد الکترون‌های وارد شده خواص و رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند [۷]. نقاط کوانتومی دارای پهنای ۱۰-۲ نانومتر هستند که معادل قرارگیری ۱۰ تا ۵۰ اتم است، این نقاط از لحاظ ساختاری معمولاً دارای هسته‌ای از جنس سلنید کادمیوم [۷] هستند که به‌وسیله‌ی یک پوسته‌ی نیمه‌هادی دیگر از جنس سولفید روی [۸] پوشیده شده‌است. البته این ترکیبات می‌توانند بسته به طول موج مورد نظر از نیمه‌هادی‌های دیگری نظیر تلورید کادمیوم یا سولفیدکادمیوم نیز تهیه می‌شوند [۲] .

در نقاط کوانتومی هر سه بعد ماده در مقیاس نانومتری قرار می‌گیرند بنابراین به دلیل کوچکی ابعادشان خواص ماده با فیزیک کلاسیک قابل توجیه نیست و در حیطه‌ی فیزیک کوانتوم مورد بررسی قرار می‌گیرند. نقاط کوانتومی بطور معمول با تشکیل یک گاز الکترونی دوبعدی در سطح یک ساختار نیم‌رسانا و با اعمال یک پتانسیل الکتروستاتیکی به دریچه [۹] ی فلزی در منطقه‌ی کوچک نقطه مانند شکل می‌گیرند و چون حرکت الکترون‌ها در سه بعد محصور شده‌است یک نقطه‌ی کوانتومی به‌عنوان یک سیستم صفر بعدی تلقی می‌شود [۲، ۸].

۲.۲ معرفی حوزه‌ی مزوسکوپی

نقاط کوانتومی متعلق به یک کلاس بزرگ‌تر از سیستم‌ها موسوم به حوزه‌ی مزوسکوپی [۱۰] می‌باشند که حد وسط حوزه‌ی میکروسکوپی مانند هسته‌ها و اتم‌ها و حوزه‌ی ماکروسکوپی مانند توده‌های مواد هستند که در شکل ۱.۲ این حوزه را که در برگیرنده‌ی نانوساختارهایی نظیر نقاط کوانتومی است، به تصویر کشیدیم.

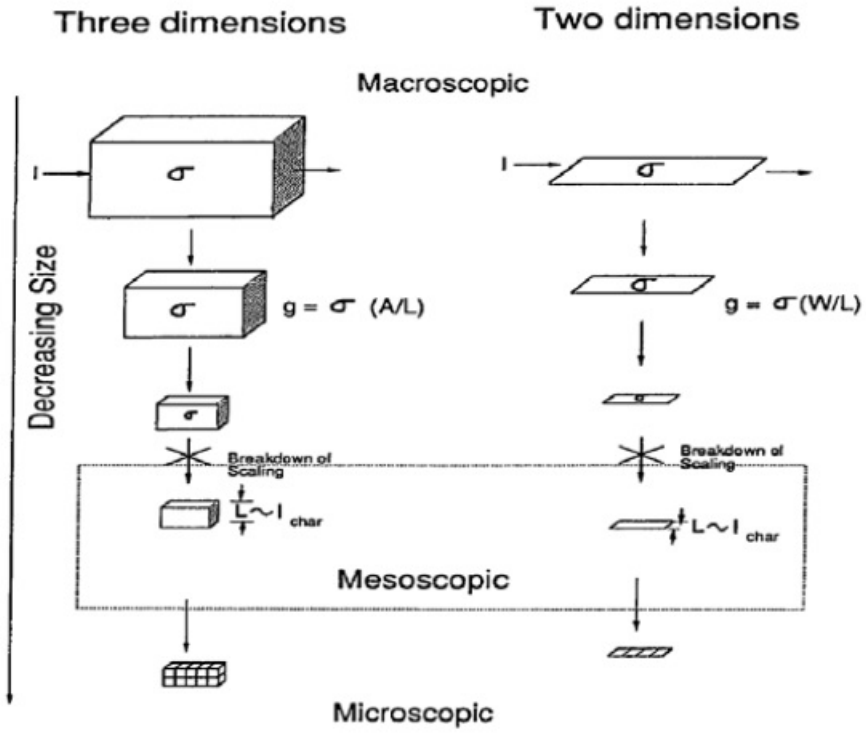
---

[۷] SeCd

[۸] ZnS

[۹] Gate

[۱۰] Mesoscopic



شکل ۱.۲: مقیاس بندی ترابرد الکترونی. در رژیم مزوسکوپی ابعاد نمونه در محدوده‌ی ده‌ها سلول واحد شبکه قرار می‌گیرد و اثرات تداخلی کوانتومی در این رژیم آشکار می‌شود [۹].

نقاط کوانتومی به دلیل دارا بودن ویژگی‌های زیر که طول‌های مشخصه نامیده می‌شوند، در حوزه‌ی مزوسکوپی قرار می‌گیرند:

۱- طول موج دوبروی الکترون‌ها بزرگ‌تر یا قابل مقایسه با طول نمونه باشد. طول موج فرمی با رابطه‌ی زیر به چگالی الکترون‌ها مربوط می‌شود.

$$\lambda_{\mathrm{f}} = \frac{۲\pi}{k_{\mathrm{s}}} = \sqrt{\frac{۲\pi}{n_{\mathrm{s}}}} \qquad (۱.۲)$$

۲- مسافت آزاد میانگین [۱۱] (فاصله‌ای که یک الکترون می‌پیماید قبل از این‌که تکانه‌ی اولیه‌ی آن کاملاً تصادفی شود) بزرگ‌تر یا قابل مقایسه با طول نمونه باشد. رابطه‌ی مربوط به آن برای دماهای

[۱۱] Mean free path

خیلی پایین به‌صورت زیر است.

$$L_{\mathrm{m}} = v_{\mathrm{f}}\tau_{\mathrm{m}} \qquad (۲.۲)$$

که در رابطه‌ی فوق τ_m زمان واهلش تکانه (یعنی مدت زمانی‌که سپری می‌شود تا تکانه‌ی الکترون تصادفی شود) و v_f سرعت فرمی است.
۳-طول همدوسی فاز [۱۲] الکترون‌ها (فاصله‌ای که الکترون می‌پیماید بدون این‌که همدوسی خود را از دست بدهد و فاز اولیه‌اش ویران گردد) بزرگ‌تر یا قابل مقایسه با طول نمونه باشد.

$$L_{\phi} = v_{\mathrm{f}}\tau_{\phi} \qquad (۳.۲)$$

که در رابطه فوق τ_ϕ زمان واهلش فاز است [۹].

۳.۲ کوانتش بار و انرژی شارژ

برای یک جزیره [۱۳] ی منزوی و معلق در هوا تعداد ذرات بنیادی در جزیره (بارهای مثبت و منفی) مقادیر صحیحی می‌گیرند بنابراین بار Q باید مضرب صحیحی از بار اولیه داشته باشد

$$Q = Ne \qquad (۴.۲)$$

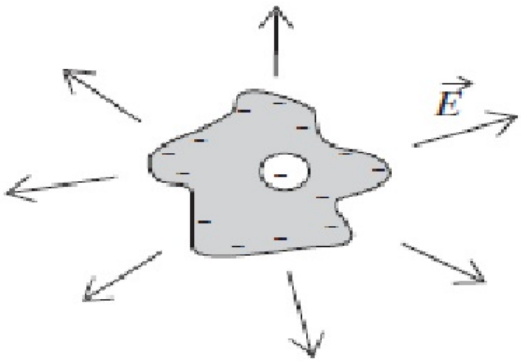
که N در رابطه‌ی فوق تعداد الکترون‌های اضافی در جزیره است. از آن‌جا که جزیره فلزی است، بار واقعی در سطح جزیره تمرکز یافته است و هیچ باری درون حجم آن وجود ندارد. طبق شکل ۲.۲ بار Q یک میدان الکتریکی اطراف جزیره تولید می‌کند و این میدان فضایی برای ذخیره‌ی انرژی الکتروستاتیک است.

همان‌طور که از الکتروستاتیک می‌دانیم این انرژی را می‌توان از طریق خازن C مربوط به جزیره بیان کرد.

---

[۱۲] Phase coherence length

[۱۳] Island



شکل ۲.۲: جمع‌آوری انرژی شارژ موجب ایجاد میدان الکتریکی خارجی توسط بار اضافی موجود در جزیره‌ی فلزی می‌شود [۱۱].

$$E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{(eN)^2}{2C} = E_c N^2 \qquad (۵.۲)$$

در رابطه‌ی فوق C ظرفیت خازنی است که از احاطه شدن جزیره توسط عایق اطرافش تشکیل شده‌است، انرژی مورد نیاز برای ذخیره‌سازی یک الکترون در این خازن، انرژی شارژ [۱۴] نامیده می‌شود. که این انرژی مولد یک برهم‌کنش الکترون-الکترون است و با E_c نمایش داده می‌شود. برای انتقال الکترون‌ها به جزیره این انرژی باید توسط یک منبع ولتاژ خارجی و یا توسط نوسانات گرمایی عرضه شود در غیر این‌صورت انتقال الکترون مسدود شده و انسداد کولنی [۱۵] رخ خواهد داد [۱۱، ۱۰] که در بخش‌های بعد به توضیح بیشتر آن می‌پردازیم.

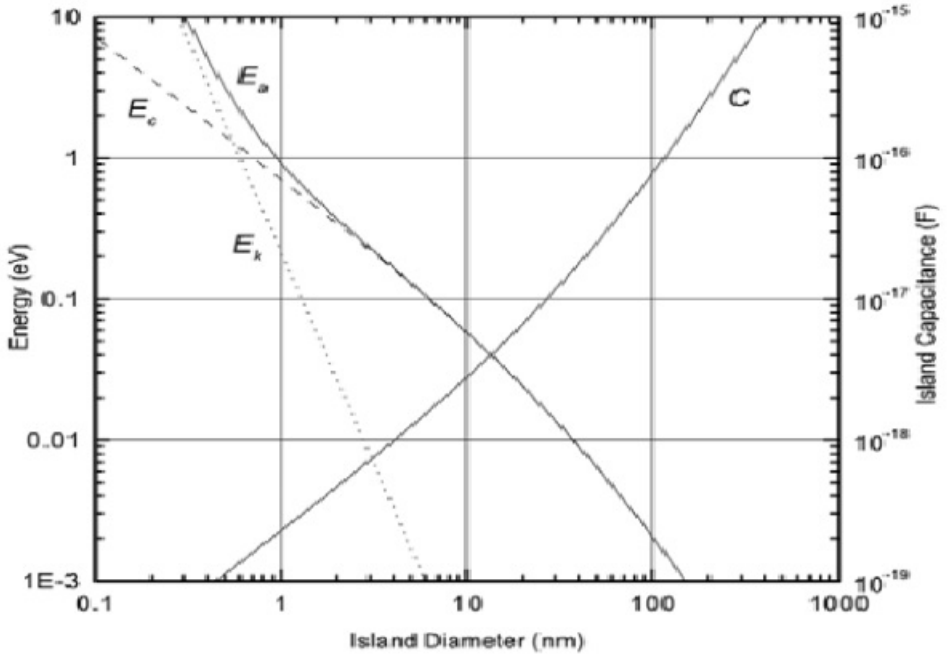
خازن‌های معمولی به دلیل داشتن ابعاد بزرگ، دارای ظرفیت‌های بزرگی هستند بنابراین طبق رابطه‌ی $E_c = \frac{e^2}{2C}$ مقدار انرژی شارژ در آن‌ها خیلی کوچک خواهد بود که عملا در نویزهای حرارتی محیط از بین می‌رود. اگر جزیره ابعاد خیلی کوچکی داشته باشد (نقطه‌ی کوانتومی باشد) در این‌صورت ظرفیت خازن معادل آن کوچک می‌شود و در نهایت مقدار انرژی شارژ بزرگ خواهد شد. دلیل افزایش انرژی شارژ در این حالت، گسسته بودن ترازهای انرژی در نقاط کوانتومی است که در این حالت برای به‌دست آوردن انرژی آستانه برای تونل‌زنی مقدار فاصله‌ی بین ترازها به انرژی شارژ افزوده می‌شود.

[۱۴] Charging energy

[۱۵] Coulomb blockade

تحت شرایط بیان شده انرژی آستانه با رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود [۱۳، ۱۲].

$$E_{\mathrm{a}} = E_{\mathrm{c}} + \delta_{c} \qquad (۶.۲)$$

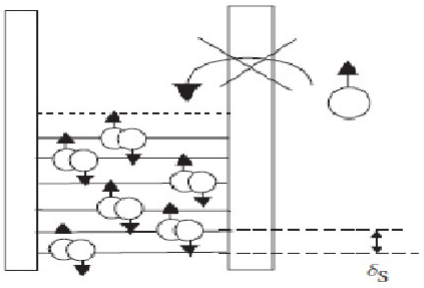


شکل ۳.۲: ظرفیت خازن و انرژی آستانه برحسب ابعاد جزیره [۱۲].

همان‌طور که در شکل ۳.۲ مشاهده می‌شود در ابعاد کمتر از ۱۰ نانومتر که در حیطه‌ی کار ما برای بررسی نقاط کوانتومی در نظر گرفته می‌شود، سطوح انرژی مجاز مانند سطوح یک چاه پتانسیل عمل می‌کنند و به مقدار قابل توجهی از هم فاصله می‌گیرند و دیگر نمی‌توان برای انرژی ترازهای پیوسته (باند انرژی) در نظر گرفت. در شکل ۴.۲ وضعیتی از انتقال الکترون برای ابعاد خیلی کوچک را به نمایش گذاشته‌ایم.

برای ابعاد بالا چون $\delta_{\mathrm{s}} = ۰$ است و ترازها پیوسته می‌شوند رابطه‌ای به‌صورت زیر خواهیم داشت.

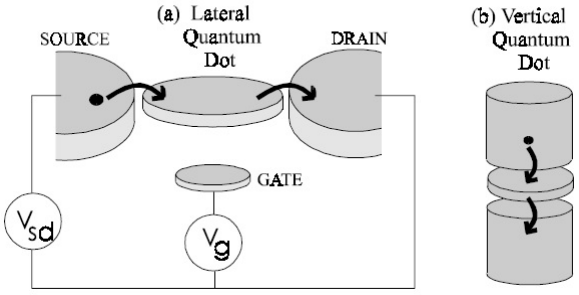
$$E_{\mathrm{a}} = E_{\mathrm{c}} \qquad (۷.۲)$$



شکل ۴.۲: مقدار انرژی لازم برای قرار دادن یک الکترون در جزیره فقط به اندازه‌ی فاصله‌ی بین ترازها نیست بلکه شامل انرژی شارژ است که به تعداد ذرات اضافه شده بستگی دارد و دربرگیرنده‌ی سهم برهم‌کنش‌های الکترون-الکترون نیز می‌باشد [۱۱].

۴.۲ تولید و پارامترهای فیزیکی نقاط کوانتومی

همان‌طور که در شکل ۵.۲ مشاهده می‌شود نقاط کوانتومی در دو هندسه‌ی افقی [۱۶] و عمودی [۱۷] وجود دارند، در نقاط کوانتومی افقی شار جریان الکترون‌ها در داخل سطح محصور، و در نقاط کوانتومی عمودی شار جریان عمود بر سطح است.



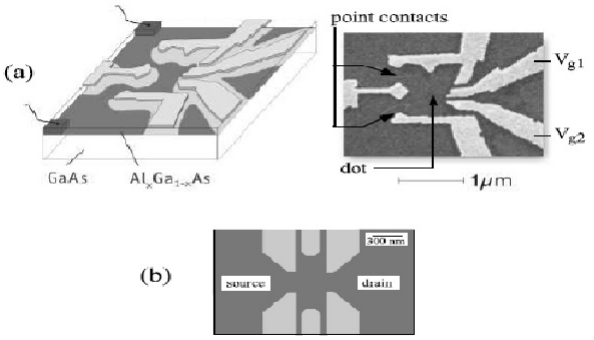
شکل ۵.۲: تصویر نقاط کوانتومی دیسک گونه‌ی متصل به منبع و مخزن. تصویر سمت راست نقطه‌ی کوانتومی در هندسه‌ی عمودی و تصویر سمت چپ نقطه‌ی کوانتومی در هندسه‌ی افقی را نشان می‌دهد [۸].

---

[۱۶] Lateral

[۱۷] Vertical

نقاط کوانتومی به روش‌های مختلف تولید می‌شوند. یک مثال نوعی از یک نقطه‌ی افقی و روش تولید آن در شکل ۶.۲ آورده شده‌است.
لایه‌ای از $AlGaAs$ بالای لایه‌ای از $GaAs$ به‌صورت یک پرتو مولکولی رشد داده می‌شود. الکترون در فصل مشترک $GaAs/AlGaAs$ به‌صورت گاز الکترونی دوبعدی انباشته می‌شود و دریچه‌های فلزی به‌وسیله‌ی یک پرتو الکترونی ضعیف در بالای ساختار ایجاد می‌شوند.
یک ولتاژ اعمالی منفی به قسمت بالای دریچه‌ی فلزی، زیر دریچه را از الکترون تهی می‌کند و الکترون‌ها را در ناحیه‌ای کوچک محدود می‌سازد و همین محدودیت الکترون در فضای سه‌بعدی نقاط کوانتومی را ایجاد می‌کند [۸].



شکل ۶.۲: نقطه‌ی کوانتومی. شکل(a) : یک نقطه‌ی کوانتومی بکار برده شده در سال۱۹۹۶ توسط فولک و همکاران .شکل سمت راست نمایش تصویر از دید بالا است در این تصویر الکترون‌ها در سطح مشترک دو گاز به‌دام افتاده‌اند و گاز الکترونی دوبعدی در ناحیه‌ی تاریک‌تر شکل دیده می‌شود. ایجاد محدودیت افقی برای ناحیه‌ی نقطه‌ی کوانتومی با اعمال یک ولتاژ منفی در بالای دریچه‌ی فلزی (ناحیه‌ی سایه روشن) دیده می‌شود و نقطه‌ی کوانتومی از طریق تماس‌های نقطه‌ای به منبع و مخزن متصل شده‌اند. شکل (b) :دیاگرام میکروگرافی دیگر از نقطه‌ی کوانتومی است که توسط استرکمپ و همکاران در سال ۱۹۹۷ استفاده شده‌است. ناحیه‌ی تاریک مرکزی شامل نقطه‌ی کوانتومی و ناحیه‌هایی که با سایه روشن نشان داده شدند رابط‌های فلزی‌اند [۸].