



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش ماده چگال

**تحلیل نتایج مشخصه جریان – ولتاژ یک نانو ذره فلزی متصل به سیم رابط**

استاد راهنما:

دکتر محمد علی شاهزمانیان

پژوهشگر:

اصغر یوسفی

آذر ماه ۱۳۹۱

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات  
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه  
متعلق به دانشگاه اصفهان است



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش ماده چگال آقای

اصغر یوسفی تحت عنوان

**تحلیل نتایج مشخصه جریان – ولتاژ یک نانو ذره فلزی متصل به سیم رابط**

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

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمد علی شاهزمانیان با مرتبه علمی استاد امضا

۲- استاد داور داخل گروه دکتر با مرتبه علمی امضا

۳- استاد داور خارج گروه دکتر با مرتبه علمی امضا

امضای مدیر گروه

به نام آنکه جان را فکرت آموخت

چراغ دل به نور دانش افروخت

شکر و سپاس خدای را که با الطاف ربانی اش توفیق داد تا این پایان نامه را به پایان رسانده و از خداوند منان توفیق و سعادت همه یویندگان و رحروان علم و دانش را خواهانیم اینک که حاصل همه تلاش ها شمر شمر واقع شده است بر خود فرض می دانم که با بضاعت اندکم در کمال ادب و احترام مراتب سپاس و قدردانی خالصانه و صمیمانه را از همه کسانی که مراد این وادی یاری نموده اند ابراز داشته به ویژه از:

استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر محمد علی سخرنیان که با دلگرمی ها و تشویقهایشان همواره راهنما و چراغ راه من بوده اند و ساعات متمادی وقتی که بر روی این پژوهش گذاشتند، میبد این توجه بسیار قابل تقدیر است، از ایشان بسیار تشکر می کنم.

در نهایت، حاصل این کار را به پدر و مادرم، پشتیبانان بی قید و شرط و همیشگی ام، خورشیدهایی که هرگاه دنیا بر ایمم به تاریکی می گراید روشنای را بهم بودند و تنها ماوای امن من، تقدیم می کنم. امید که پاس کوچک مرا پذیرا باشند.

از دوستان گرامی که شاید نشان در این فهرست از قلم افتاده است ولی در پیشبرد این پژوهش یاری ام داده اند، از صمیم قلب تشکر می کنم و برایشان بهترین آرزوها را دارم.

اصغر یوسفی

آذر ۱۳۹۱

## چکیده

در این پایان نامه سامانه‌ای شامل یک نانو ذره فلزی که به الکترودهای منبع و تخلیه و دریاچه متصل است، مورد بررسی قرار گرفته است. در این گونه سامانه‌ها اگر جفت‌شدگی نانو ذره و الکترودها قوی باشد پدیده نابهنجاری پس خور صفر، و اگر جفت‌شدگی ضعیف باشد پدیده حصر کولنی غالب است. در سامانه مورد بررسی، جفت‌شدگی نقطه کوانتومی با الکترودها تخلیه خیلی بیشتر از جفت‌شدگی آن با الکترودهای دیگر است. هدف تحقیق بررسی و تحلیل ویژگیهای نمودارهای جریان - ولتاژ است که نتایج تجربی آن توسط فریدمن و همکاران اندازه‌گیری شده است. در فصل آخر رابطه‌های مربوط به نابهنجاری پس خور صفر را برای دماهای بالا به دست می‌آوریم که با نتایج تجربی توافق خوبی دارد. در نمودارهای تجربی برای دمای پایین یک تقارن در این نمودارها برای ولتاژهای مثبت و منفی وجود دارد در حالی که برای رابطه‌های ذکر شده این تقارن وجود ندارد و برای ولتاژهای منفی رسانش با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد. با اصلاح رابطه مربوط به حصر کولنی متوجه شده‌ایم که ولتاژ باید به صورت توان دو در رابطه تغییر کند. نکته دیگر نوساناتی است که در نمودار رسانش در دمای پایین وجود دارد و علت آن حصر کولنی بیان شده است. نمودار مربوط به حصر کولنی نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ مقدار آن کم می‌شود در صورتی که در نتایج آزمایشگاهی این نوسان‌ها در ولتاژهای نسبتاً بالاتری از ولتاژ صفر رخ می‌دهد. این بدان معنی است که نوسانات موجود در رسانش نمی‌تواند مربوط به حصر کولنی باشد.

**کلید واژه:** نقطه کوانتومی، نابهنجاری پس خور صفر، حصر کولنی

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول: مقدمه
۱-۱	تاریخچه نقاط کوانتومی.....
۲-۱	ترانزیستور تک الکترونی.....
۳-۱	حصر کولنی.....
۴-۱	کمینه مقاومت تونلی برای تک الکترون.....
۵-۱	کاربردهای نقطه کوانتومی.....
۱-۵-۱	کاربردهای زیستی.....
۲-۵-۱	سلول‌های خورشیدی.....
۳-۵-۱	رایانه کوانتومی.....
۴-۵-۱	دیودهای نور گسیل.....

## فصل دوم: سامانه‌های مزوسکوپیک

۱-۲	مقدمه.....
۲-۲	محدوده سامانه‌های مزوسکوپیک.....
۳-۲	ترابرد غیر خطی: مدل اندرسون.....
۴-۲	ترابرد خطی.....
۵-۲	ترابرد خطی در حد $U, \epsilon_b \rightarrow \infty$ .....
۶-۲	پتانسیل شمیایی در ترابرد غیر خطی و غیر خطی.....
۷-۲	دو روش برای جریان تونلی: قاعده طلایی فرمی، تابع گرین.....
۸-۲	انتقال در روش تابع گرین ناترازمند.....
۹-۲	پربند کلدیش و رهیافت نموداری.....



۲۵..... نتیجه‌گیری ۱۰-۲

### فصل سوم: نانو ذرات

۲۷..... مقدمه ۱-۳

۲۸..... نوار انرژی نیم‌رساناهای کپه‌ای ۲-۳

۳۰..... اثرات اندازه کوانتومی در نیم‌رساناها ۳-۳

۳۴..... طیف انرژی الکترون‌ها در نقطه کوانتومی ۴-۳

۳۵..... تقریب هارتری ۱-۴-۳

۳۶..... تقریب هارتری-فوک ۲-۴-۳

۴۳..... ویژگی‌های اپتیکی نانو ذره فلزی ۵-۳

۴۵..... اثر گندو ۶-۳

۴۵..... نتیجه‌گیری ۷-۳

### فصل چهارم: رسانش نقطه کوانتومی جفت شده با سیم‌های رابط

۴۸..... مقدمه ۱-۴

۴۹..... فرموله کردن مسئله ۲-۴

۵۲..... توسعه رسانش تونلی ۳-۴

۵۷..... مشخصات و نحوه ساخت سامانه ۴-۴

۵۸..... نتایج تجربی ۵-۴

۶۰..... بررسی و تحلیل نتایج ۶-۴

۶۹..... نتیجه‌گیری ۷-۴

۷۰..... پیوست الف:

## فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۳.....	شکل ۱-۱ ترانزیستور تک الکترونی .....
۴.....	شکل ۱-۲ اعمال ولتاژ به ترانزیستور .....
۴.....	شکل ۱-۳ نوسان جریان با ولتاژ دریچه.....
۵.....	شکل ۱-۴ مدار معادل برای ترانزیستور .....
۶.....	شکل ۱-۵ ترازهای فرمی الکترونها و نقطه کوانتومی .....
۷.....	شکل ۱-۶ نمودار تعادلی برای ترانزیستور تک الکترونی .....
۸.....	شکل ۱-۷ نمودار رسانش بر حسب ولتاژ دریچه و ولتاژ منبع- تخلیه در دمای پایین برای مواد مختلف.....
۲۴.....	شکل ۲-۱ مثالی برای تحول زمانی ماتریس چگالی کاهش یافته .....
۲۸.....	شکل ۳-۱ نمودار چگالی حالت ها بر حسب انرژی برای ابعاد مختلف جسم .....
۳۰.....	شکل ۳-۲ ساختار نوار انرژی در نیمرسانای ماکروسکوپی .....
۳۱.....	شکل ۳-۳ گسستگی در نوارهای انرژی نقطه کوانتومی .....
۳۳.....	شکل ۳-۴ تأثیر اندازه بر روی ویژگی‌های الکترونیکی ساختارهای نیم رسانا .....
۳۸.....	شکل ۳-۵ تصاویر سه بعدی از نقاط کوانتومی با اشکال مختلف .....
۳۹.....	شکل ۳-۶ انرژی حالت پایه برای دیسک ، عدسی و مخروط هرمی به صورت تابعی از شعاع.....
۴۰.....	شکل ۳-۷ تصویری از سطح مقطع یک نقطه کوانتومی .....
۴۱.....	شکل ۳-۸ ترازهای انرژی برای نوار ظرفیت و رسانش نقطه کوانتومی InAs-GaAs .....
۴۲.....	شکل ۳-۹ تغییرات انرژی بر حسب شعاع نقطه کوانتومی استوانه‌ای.....
۴۲.....	شکل ۳-۱۰ تغییرات انرژی بر حسب ارتفاع نقطه کوانتومی استوانه‌ای.....

- شکل ۳-۱۱ نوسان‌های پلاسما برای یک کره فلزی ..... ۴۳
- شکل ۴-۱ نمودار رسانش-ولتاژ ..... ۴۹
- شکل ۴-۲ نمایش نموداری تونل زنی پی در پی و هم تونل‌زنی ..... ۵۳
- شکل ۴-۳ نمودار رسانش بر حسب بار نقطه کوانتومی ..... ۵۶
- شکل ۴-۴ رسانش دیفرانسیلی به صورت تابعی از ولتاژ ..... ۵۸
- شکل ۴-۵ نمودار رسانش بر حسب ولتاژ در پیچه نقطه کوانتومی ..... ۵۹
- شکل ۴-۶ رسانش دیفرانسیلی بر حسب ولتاژ ..... ۵۹
- شکل ۴-۷ نمودار رسانش بر حسب ولتاژ برای رابطه اصلی و رابطه اصلاح شده ..... ۶۶
- شکل ۴-۸ نمودار تجربی رسانش بر حسب ولتاژ منبع- تخلیه ..... ۶۶
- شکل ۴-۹ نمودارهای رسانش با در نظر گرفتن  $E_c$  ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۰ نمودار رسانش بر حسب ولتاژ تنها برای حصر کولنی ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱ نمودار رسانش برای رابطه اصلاح شده ..... ۶۸

## فصل اول

### مقدمه

#### ۱-۱ تاریخچه نقطه کوانتومی

در اواخر دهه ۵۰ میلادی مطالعات بر روی سامانه‌های کوانتومی مصنوعی آغاز شد که اغلب به صورت نظری بود. در دهه ۶۰ میلادی با توسعه روش‌های جدید امکان ساخت یک لایه نیم‌رسانا با خلوص بالا بین دو لایه نیم‌رسانا از نوع دیگر فراهم آمد بدین صورت خواص اپتیکی و مشخصه‌های اجسام دو بعدی کشف شد. در آغاز دهه ۸۰ میلادی پیشرفت سریع در فن‌آوری سبب شکل‌گیری روش دقیق‌تر لیتوگرافی شد که در ابتدا به ساخت اجسام یک بعدی یا سیم‌های کوانتومی منجر شد [۱].

نقاط کوانتومی کلوئیدی در سال ۱۹۸۱ میلادی ساخته شد. کادمیوم سولفید کپه‌ای اغلب به عنوان ماده‌ای ایدآل برای الکترودها محسوب می‌شود با قرار دادن این ماده در مقابل پرتو و ایجاد لایه محافظ در اطراف آن برای جلوگیری از خوردگی، نقاط کوانتومی کلوئیدی ساخته می‌شود.

مواد به صورت نقاط کوانتومی خواص منحصر به فردی از خود نشان دادند که در جسم کپه‌ای آن مشاهده نشده بود که از جمله آن تابش فلورسانسی را می‌توان نام برد که طول موج آن به اندازه ذره بستگی داشت. از اندازه‌گیری طول موج جذبی و گسیلی توسط ذره می‌توان گاف انرژی آن را به دست آورد [۲]. در میانه دهه ۸۰ میلادی نقاط کوانتومی توسط روش اچینگ<sup>۱</sup> توسعه داده شدند. در پایان دهه ۸۰ و اوایل دهه ۹۰ میلادی روش-های لیتوگرافی و اچینگ تکامل یافتند که هنوز هم مورد استفاده هستند [۱]. اما در آنها بجای لیتوگرافی توسط نور از لیتوگرافی توسط الکترون یا یون استفاده می‌شود که دقت بالاتری دارد.

---

<sup>1</sup> Etching

لنت<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۳ میلادی امکان ساخت سلول‌های کوانتومی را پیش‌بینی کرد این سلول‌ها در رایانه‌های کوانتومی امکان استفاده دارند و برای کار در دمای اتاق ابعاد آنها باید از مرتبه دو نانو متر باشد. تأثیرات دما مشکل اصلی پیش روی این سلول‌های محاسباتی کوانتومی است. انرژی بحرانی، اختلاف انرژی حالت پایه و اولین حالت برانگیخته است، اگر این انرژی به طور قابل توجهی از  $k_B T$  بزرگتر باشد سامانه‌ی شامل نقطه کوانتومی قابل اعتماد خواهد بود. خوشبختانه این اختلاف انرژی با کاهش ابعاد نقطه کوانتومی افزایش می‌یابد اگر اندازه سلول از مرتبه چند آنگسترم باشد، اختلاف انرژی با سطوح انرژی اتمی قابل مقایسه خواهد بود. پیشرفت فن‌آوری منجر به ساخت نقاط کوانتومی کوچک و کوچکتر در حد چند نانو متر شده است که باعث عملکرد نقاط کوانتومی در دماهای بالاتر می‌شود. علاقه به استفاده از نقاط کوانتومی در زیست پزشکی در سال ۱۹۹۸ میلادی با اتصال نقاط کوانتومی به پروتئین‌ها آغاز شد [۳]. در اوایل سال ۲۰۰۹ میلادی سامانه‌ی شامل چهار نقطه کوانتومی به عنوان جایگزینی برای انجام محاسبات با روش کلاسیکی بر مبنای COMS ساخته شد که دقت ساخت آن از مرتبه نانو متر بود [۴].

## ۱-۲ ترانزیستور تک الکترونی

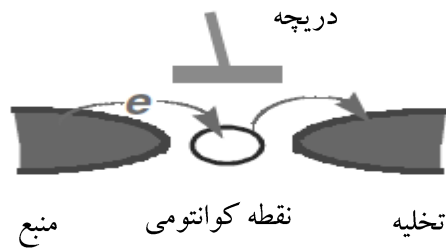
اگر یک منطقه یا مکان نقطه‌ای بتوان ایجاد که قطر آن از ۱۰ نانو متر بیشتر نباشد چنین ساختارهایی اغلب به اتم مصنوعی موسومند، زیرا همان‌طور که در اتم‌های منفرد مشخص و اثبات شده است، فواصل میان سطوح انرژی در مکان‌های نقطه‌ای نیز زیاد است. الکترون‌ها سطوح کوانتومی مجزایی را مشابه اربیتال‌های اتمی در اتم‌ها اشغال می‌کنند و طیف برانگیخته مجزایی نیز دارند. با افزایش یا از دست دادن یک الکترون از این منطقه کوچک، انرژی متناظری مشابه انرژی یونیزاسیون وجود دارد که به انرژی شارژی معروف است [۵].

یکی از فواید نقاط کوانتومی<sup>۲</sup> این است که با اتصال جریان و ولتاژ می‌توان کنترل دقیق حالت‌های آنها را بررسی کرد. یک ترانزیستور تک الکترونی<sup>۳</sup> شامل ناحیه کوچک یا نقطه‌ای است که الکترون‌ها باید از میان آن تونل بزنند تا از الکتروود منبع به الکتروود تخلیه برسند [۶]. (شکل ۱-۱)

<sup>1</sup> Lent

<sup>2</sup> Quantum Dot

<sup>3</sup> Single-Electron Transistor



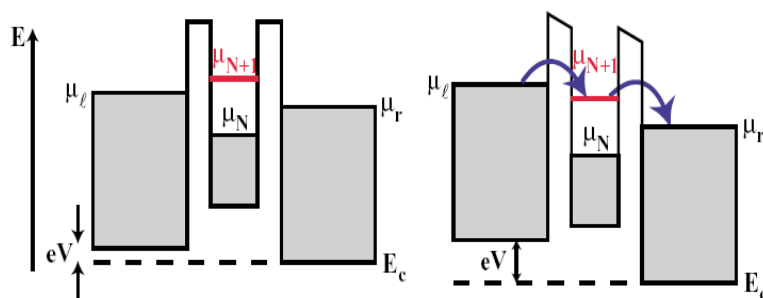
شکل ۱-۱ ترانزیستور تک الکترونی

ساخت چنین وسیله‌ای که در سال ۱۹۸۶ میلادی پیشنهاد شده بود در سال ۱۹۸۷ میلادی ساخته شد. دو الکتروود منبع و تخلیه به وسیله یک مرز عایق از نقطه کوانتومی جدا شده‌اند. انتقال بار از الکتروود منبع به نقطه کوانتومی و از نقطه کوانتومی به الکتروود تخلیه در عرض دو فاصله عایق‌ساز از طریق فرآیند تونل‌زنی مکانیک کوانتومی به وقوع می‌پیوندد. اگر انرژی کافی برای غلبه بر انرژی شارژی وجود نداشته باشد از انتقال الکترون‌ها ممانعت به عمل می‌آید که این پدیده به حصر کولنی<sup>۱</sup> مشهور است. انرژی شارژی ( $E_C$ ) به وسیله ظرفیت ( $C_\Sigma$ ) که ظرفیت خازنی بین نقطه کوانتومی و محیط اطراف است به صورت  $E_C = e^2 / C_\Sigma$  محاسبه می‌شود [۷]. برای مشاهده پدیده‌های تونل‌زنی، انرژی شارژی بار الکتریکی باید به طور قابل توجهی از انرژی حرارتی ( $k_B T$ ) بزرگتر باشد. به طوری که الکترون‌ها نتوانند با جذب انرژی گرمایی، به انرژی‌های بالاتر از انرژی شارژی برانگیخته شوند. این بدان معناست که نقاط کوانتومی یا باید فوق العاده کوچک باشند یا درجه حرارت خیلی کم باشد یا هر دو.

ابزارهای نانو ساخت رایج، نظیر لیتوگرافی پرتوی الکترونی می‌تواند به آسانی مناطق فلزی کوچکتر از  $100\text{ nm}$  با  $C_\Sigma \approx 10^{-16} F$  را بسازند اما برای این کار لازم است درجه حرارت کمتر از  $1\text{ K}$  باشد تا شرط  $E_C \gg k_B T$  تامین شود. اخیراً با استفاده از میکروسکوپ تونل‌زنی پویشی و میکروسکوپ نیروی اتمی ترانزیستورهای تک الکترونی در ابعاد زیر  $10\text{ nm}$  ساخته شده اند [۷].

از طریق اعمال ولتاژ به الکتروود منبع سد پتانسیل برای پرش الکترون روی نقطه کوانتومی طوری کاهش می‌یابد که هر بار یک الکترون می‌تواند از میان نقطه فلزی بگذرد. اگر اتصال بین الکتروود و نقطه کوانتومی ضعیف باشد این الکترون تمایل دارد که در آنجا بماند. بنابراین عبور جریان متوقف می‌شود. (شکل ۱-۲)

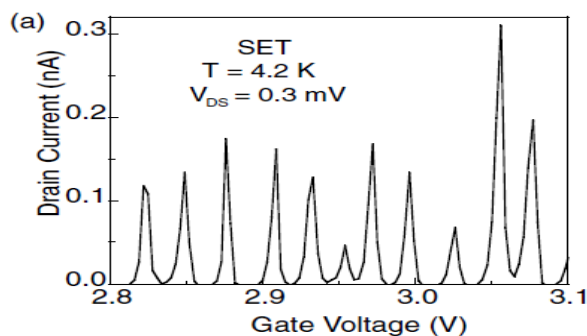
<sup>1</sup> Coulomb Blockad



شکل ۱-۲ اعمال ولتاژ به ترانزیستور

هیچ الکترون اضافی نمی‌تواند بر روی نقطه کوانتومی به واسطه پدیده حصر کولنی تونل بزند. هر گاه ولتاژ ورودی را بیشتر افزایش دهیم به طوری که پتانسیل الکتروود افزایش یابد آنگاه الکترون‌های بعدی می‌توانند به نقطه کوانتومی تونل بزنند در نتیجه افزایش تدریجی ولتاژ سبب می‌شود تا مجموعه‌ای از نوسانات متناوب در جریان به وجود آید. همچنین می‌توان ولتاژ الکتروودها را ثابت در نظر گرفت و با تغییر ولتاژ دریچه به مجموعه‌ای از این نوسانات رسید [۶] (شکل ۱-۳).

این نوسانات متناوب یک نشانه، اثر انگشت یا علامت ویژه از حصر کولنی تک الکترونی است. توانایی اندازه‌گیری و کنترل جریان در سطح تک الکترون، کاربردهای بالقوه زیادی در نانو الکترونیک دارد. یکی از مهمترین کاربردهای حصر کولنی آشکارسازی بارهای الکتریکی تک الکترون است ترانزیستورهای تک الکترونی نسبت به تغییرات کوچک در محیط فوق العاده حساس می‌باشند. بنابراین نقاط نیمه‌هادی و فلزی به عنوان الکترومترهای محلی پیشنهاد شده اند تا رفتار تک الکترون را در مدارهای الکترونیکی به ویژه در نانو مدارها مشخص نمایند. همچنین اجرای محاسبات با استفاده از نقاط کوانتومی بر پایه باردار شدن یا پدیده‌های همدوسی کوانتومی امکان پذیر است [۶].



شکل ۱-۳ نوسان جریان با ولتاژ دریچه

### ۳-۱ حصر کولنی

انرژی نقطه کوانتومی را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. یکی انرژی الکترون‌های خود نقطه کوانتومی که در سطوح انرژی گسسته قرار می‌گیرند ( $\epsilon_p$ ) و دیگری انرژی الکتروستاتیک ناشی از الکترون‌های اضافی است که از طریق تونل‌زنی از الکترودهای منبع و تخلیه به نقطه کوانتومی رسیده‌اند ( $E_{el}$ ). انرژی کل را می‌توان به صورت زیر نوشت [۶].

$$E = E_{el}(N) + \sum_p \epsilon_p, \quad (1-1)$$

انرژی الکتروستاتیک این مجموعه را می‌توان با کمک شکل ۴-۱ به دست آورد. رابطه بین بار اضافی روی نقطه کوانتومی ( $Q_0$ ) و پتانسیل الکتروستاتیکی ( $\phi$ ) به صورت زیر است.

$$Q_0 = C_\Sigma \phi - C_D V_{DS} - C_G V_G, \quad (2-1)$$

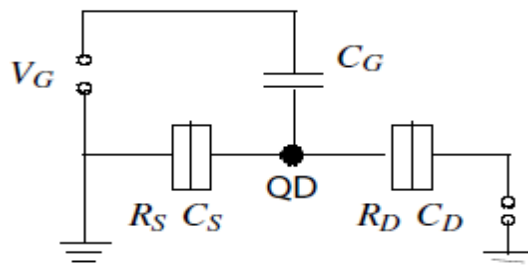
$$C_\Sigma = C_D + C_S + C_G, \quad (3-1)$$

که در آن  $C_S$  و  $C_D$  و  $C_G$  به ترتیب ظرفیت خازنی بین نقطه کوانتومی و دریچه، و تخلیه، و منبع است. انرژی لازم برای اضافه کردن  $N$  الکترون اضافی به نقطه کوانتومی خنثی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\phi(Q_0) = \frac{Q_0 + C_D V_{DS} + C_G V_G}{C_\Sigma}, \quad (4-1)$$

$$E_{el} = \int_0^{Ne} \phi(Q_0) dQ_0 = \frac{(Ne)^2}{2C_\Sigma} + \frac{(Ne)}{C_\Sigma} (C_D V_{DS} + C_G V_G), \quad (5-1)$$

$\mu(N)$  را به عنوان انرژی لازم برای افزودن آخرین الکترون به نقطه کوانتومی دارای  $N-1$  الکترون است و آن



شکل ۴-۱ مدار معادل برای ترانزیستور تک الکترونی



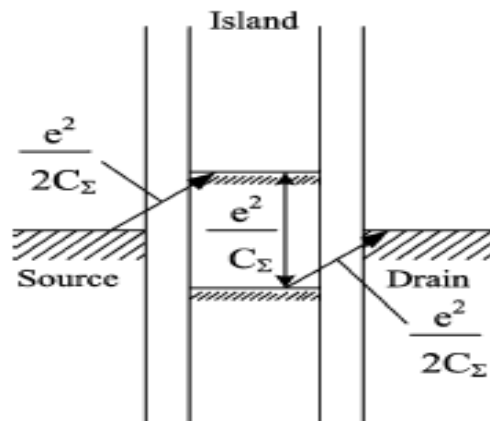
را به صورت زیر تعریف می کنیم [۶].

$$\begin{aligned}\mu(N) &= E(N) - E(N-1), \\ &= \frac{(Ne)^2}{2C_\Sigma} + \frac{Ne}{C_\Sigma}(C_D V_{DS} + C_G V_G) - \frac{((N-1)e)^2}{2C_\Sigma} - \frac{(N-1)e}{C_\Sigma}(C_D V_{DS} + C_G V_G), \\ &= \mathcal{E}_p + (N - \frac{1}{2}) \frac{e^2}{C_\Sigma} + \frac{e C_D V_{DS}}{C_\Sigma} + \frac{e C_G V_G}{C_\Sigma},\end{aligned}\quad (6-1)$$

بنابراین فاصله بین سطوح انرژی به صورت زیر به دست می آید

$$\Delta E = \mu(N) - \mu(N-1) = (\mathcal{E}_N - \mathcal{E}_{N-1}) + \frac{e^2}{C_\Sigma}, \quad (7-1)$$

معمولاً در این گونه ترانزیستورها ظرفیت خازنی بسیار کم است (از مرتبه  $10^{-18} F$  تا  $10^{-16} F$ ). بنابراین جمله دوم در زمانی که حصر کولنی قوی باشد، بیشترین تأثیر را دارد و می توان از جمله اول در مقابل جمله دوم صرف نظر کرد. در نتیجه فاصله بین ترازهای انرژی الکترون های اضافی تقریباً برابر  $e^2/c$  است. از طرف دیگر اگر در رابطه (۶-۱) بجای  $N$  عدد یک را قرار دهیم، یعنی انرژی لازم برای اضافه کردن اولین الکترون به نقطه کوانتومی را در نظر بگیریم و فرض کنیم ولتاژی به الکترودها اعمال نشده باشد ( $V_{DS} = 0$ )، و از جمله آخر صرف نظر کنیم ( $C_G$  معمولاً نسبت به  $C_D$  و  $C_S$  ناچیز است چون در پیچه نسبت به الکترودها در فاصله دورتری از نقطه کوانتومی قرار دارد)، مقدار  $e^2/2c$  را به دست می آوریم. نتایج مربوط به این قسمت به طور خلاصه در شکل ۵-۱ آمده است.

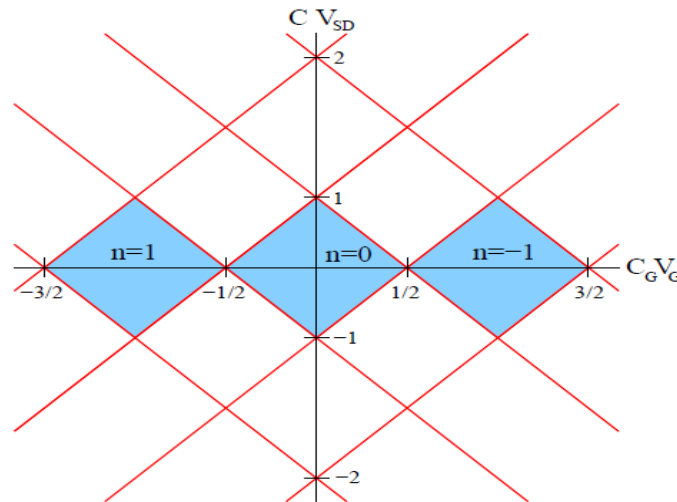


شکل ۵-۱ ترازهای فرمی الکترودها و نقطه کوانتومی [۸].

برای حالتی که هیچ ولتاژی اعمال نشده است، اختلاف سطح فرمی دو الکتروود با اولین حالت خالی نقطه کوانتومی برابر  $e^2/2C_{\Sigma}$  است. بنابراین از انتقال الکترون‌ها به نقطه کوانتومی ممانعت می‌شود که به این پدیده حصر کولنی گفته می‌شود.

آزمایش‌هایی را که بر روی تراورد الکترون از طریق نقطه کوانتومی در رژیم حصر کولنی انجام شده، را می‌توان به چند نوع تقسیم کرد: در برخی رسانش نقطه کوانتومی بر حسب ولتاژ دریاچه اندازه‌گیری شده، در حالی که ولتاژ منبع-تخلیه ( $V_{SD}$ ) صفر یا یک مقدار ثابت است. در برخی رسانش بر حسب ولتاژ منبع-تخلیه در ولتاژ دریاچه ثابت اندازه‌گیری شده است و دسته سوم آزمایش‌هایی است که در آن هم ولتاژ دریاچه و هم ولتاژ منبع-تخلیه متغیر است. در این مورد چون تعداد پارامترها زیاد است برای نمایش آنها علاوه بر محورهای مختصات از میزان رنگ‌ها نیز برای متغیرها استفاده می‌شود در ادامه به بررسی این نمودارها برای نقطه کوانتومی که در رژیم حصر کولنی قرار دارد، می‌پردازیم.

در حالتی که علاوه بر ولتاژ دریاچه یک ولتاژ منبع-تخلیه محدود نیز به سامانه اعمال شده است، مدل استاندارد برای توصیف آن نمودارهای تعادلی<sup>۱</sup> است که ساده‌ترین آن در شکل ۶-۱ آورده شده است [۹].

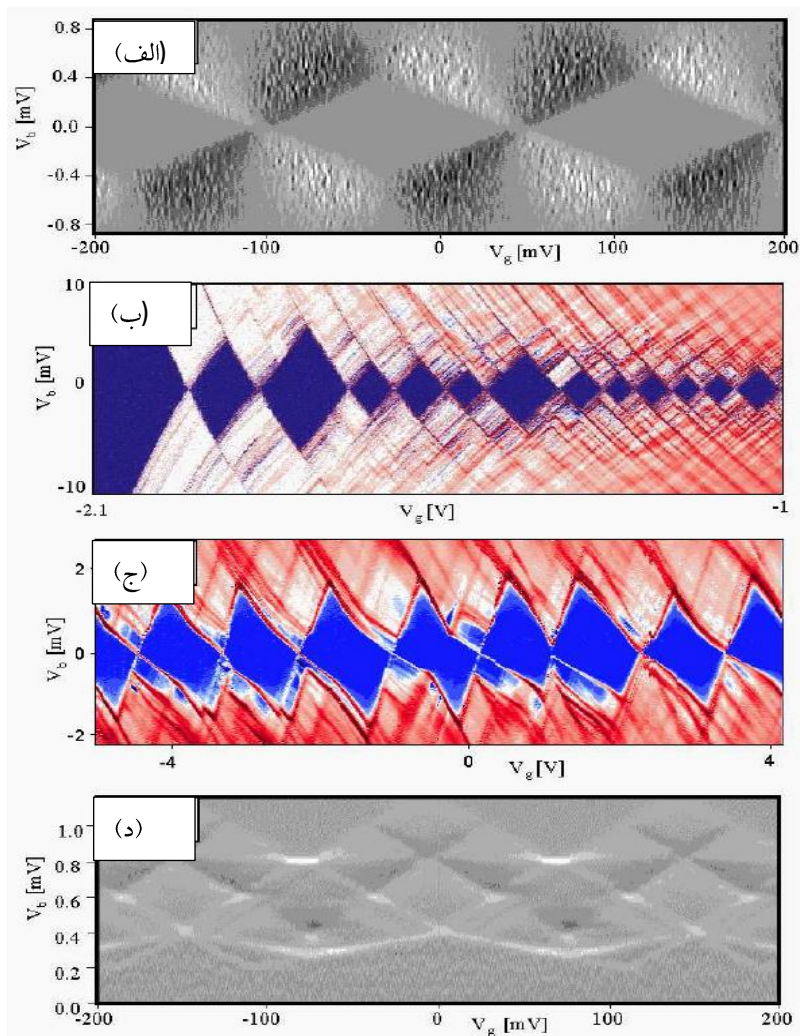


شکل ۶-۱ نمودار تعادلی برای ترانزیستور تک الکترونی: مناطق پر رنگ تر داخل لوزی‌ها را لوزی کولنی می‌گویند در این مناطق تعداد الکترون‌ها در نقطه کوانتومی ثابت و انتقال الکترون از طریق آن متوقف است و در روی خطوط مورب متقاطع که لوزی‌ها را به وجود می‌آورند شرایط برای انتقال الکترون از طریق نقطه کوانتومی فراهم است [۹].

<sup>1</sup> Stability diagram

این شکل تنها یک طرح ساده برای ویژگی‌های کلیدی است. برای هنگامی که ولتاژ منبع- تخلیه صفر است رسانش تنها در نقاطی که در آن ولتاژ دریاچه در رابطه  $C_G V_G = n/2$  صادق است غیر صفر است و در بین این نقاط رسانش صفر است. همان‌طور که در شکل (۶-۱) نشان داده شده است، می‌توان مناطقی که در آن رسانش برای ولتاژ محدود منبع- تخلیه صفر است گسترش داد (مناطق پر رنگ). که به آنها لوزی‌های کولنی گفته می‌شود در این لوزی‌ها تعداد الکترون‌ها در نقطه کوانتومی ثابت و هیچ انتقالی از طریق آنها صورت نمی‌گیرد. افزایش ولتاژ باعث افزایش تعداد ترازهای انرژی قابل دسترس برای انتقال را فراهم می‌آورد.

مجموعه‌ای از نمودارهای تجربی در شکل ۷-۱ نشان داده شده است [۹].



شکل ۷-۱ نمودار رسانش بر حسب ولتاژ دریاچه و ولتاژ منبع- تخلیه در دمای پایین برای مواد مختلف: (الف) یک ترانزیستور تک الکترونی فلزی (ب) یک ترانزیستور تک الکترونی نیم رسانا (ج) ترانزیستور تک الکترونی با نانولوله کربنی (د) یک ترانزیستور تک الکترونی ابررسانا [۹].

مناطق لوزی مانند در طول محور ولتاژ صفر مناطقی هستند که در آن حصر کولنی اتفاق می‌افتد. رسانش برای برای ترانزیستور تک الکترونی فلزی و ابررسانا به صورت تابع دوره‌ای از ولتاژ دریچه است و برای آنها انرژی محصورسازی خیلی کم است ولی برای ترانزیستور تک الکترونی نیم رسانا و نانو لوله کربنی به صورت تابعی دوره‌ای از ولتاژ دریچه نیست در این مواد انرژی محصورسازی مهم است. توجه شود در برخی مواد این لوزی‌ها مشابه هم نیستند دلیل آن به ویژگی‌ها و ساختار داخلی آنها مرتبط است و با مدل بسیار ساده شده حصر کولنی قابل بیان نیست.

### ۱-۴ کمینه مقاومت تونلی برای تک الکترون

در تصویر کلاسیکی، الکترون در نقطه جایگزیده است به این صورت که یک الکترون یا روی نقطه کوانتومی قرار دارد یا نه. اما در تصویر مکانیک کوانتومی میانگین الکترون‌های روی نقطه کوانتومی،  $\langle N \rangle$ ، در نظر گرفته می‌شود که لزوماً یک عدد صحیح نیست. برای اینکه مدل حصر کولنی صادق باشد باید رابطه  $|N - \langle N \rangle|^2 \ll 1$  برقرار باشد. بنابراین اگر پهنای سد تونلی کافی نباشد نمی‌توان از جایگزیده بودن در نقطه کوانتومی صحبت کرد. برای بحث کمی در این مورد از عدم قطعیت انرژی الکترون داریم

$$\Delta E \Delta T > \frac{h}{4\pi}, \quad (8-1)$$

با جایگزاری  $\Delta E = e^2 / 2C$  و  $\Delta T \approx R_t C$  در رابطه فوق به رابطه زیر می‌رسیم

$$R_t > \frac{h}{2\pi e^2} = 25813\Omega, \quad (9-1)$$

یعنی برای مشاهده حصر کولنی باید حداقل مقاومت تونلی بین الکترونها و نقطه کوانتومی  $25K\Omega$  باشد. آزمایش‌های تجربی نیز این حداقل برای مشاهده حصر کولنی را نشان داده اند [۱۰].

### ۱-۵ کاربردهای نقطه کوانتومی

#### ۱-۵-۱ کاربردهای زیستی

ردیابی سلول‌ها بعد از پیوند همواره از دغدغه‌های اصلی محققان در عرصه علم ترمیمی است. یافتن یک ماده به عنوان ردیاب که بتواند ضمن ماندگاری طولانی در سلول، آثار سمی کمتری را نیز به دنبال داشته باشد به عنوان یک راه حل برای این مشکل در نظر گرفته می‌شود. نانو بلورهای نیم‌رسانا موسوم به نقاط کوانتومی به دلیل