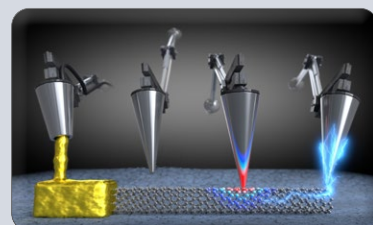




مقایسات بین آزمایشگاهی، آزمون مهارت، چرا و چگونه؟



روش آزمون غربالگری با بالا چیست؟ (بخش اول: معرفی، ساز و کار، کاربرد)



استفاده از میکروسکوپ پروبی روبشی در ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی



ارزیابی عملکرد دستگاه اسپکتروفتومتر در اندازه‌گیری میزان نیتریت و نیترات در میوه‌ها و سبزیجات به طریق بیناب‌سنجی مولکولی



مقایسه کیفیت روش‌های آرایه فازی و تمرکز کامل، در ارزیابی عیوب داخلی قطعات فلزی

مروری بر روش‌های اندازه‌گیری زاویه تماس مایعات

مجال برای ارتقای دانش و تخصص مدیران و کارشناسان آزمایشگاه‌ها

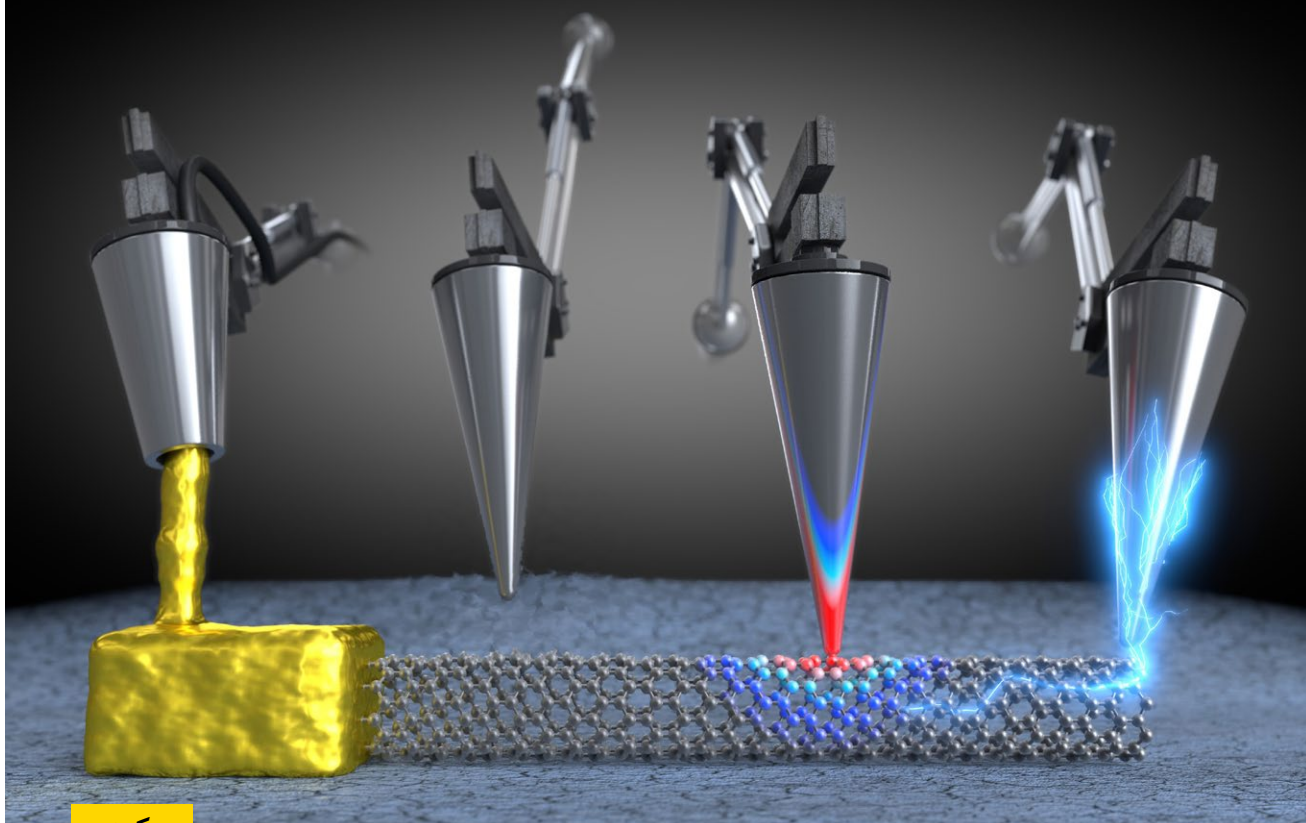
در سال ۱۳۹۹ ده عنوان استاندارد ملی به همت اعضای شبکه آزمایشگاهی تدوین شد

نویسندگان

سمیه جلیلزاده آذر^{۱*}مریم خسروی^۲رامونا نیک‌خصال^۳

*somayehjalilzadeh@yahoo.com

استفاده از میکروسکوپ پروبی روبشی در ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی



چکیده

ترانزیستورهای تک الکترونی^۵ به‌عنوان یکی از اساسی‌ترین ابزارهای تک الکترونی، در تحقیقات حوزه نانو الکترونیک بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. این نوع ترانزیستورها دارای توان مصرفی بسیار پایین، سرعت عملکرد بالا، افت هدایتی کم، کنترل‌پذیری مناسب و قابلیت کوچک‌سازی در ابعاد نانومتر هستند. ترانزیستور تک الکترونی یک ابزار سویچینگ نانومتری است که حرکت الکترون‌ها را کنترل می‌کند. با توجه به گستره کاری آن‌ها و به‌منظور به کارگیری این نوع ترانزیستور در دمای محیط (با داشتن حداقل نوسانات کولن^۶)، ساخت این نوع از ترانزیستورها با جزیره‌های کوانتومی کوچک بسیار حائز اهمیت است. امروزه با به کارگیری میکروسکوپ‌های تونل‌زنی روبشی^۷ و میکروسکوپ نیروی اتمی^۸ ساخت این

نوع از ترانزیستورها با جزیره‌های در حد چند نانومتر با نوسانات کولنی پایدار در دمای اتاق امکان‌پذیر شده‌است. در این مقاله به بررسی اساس کار ترانزیستور تک الکترونی و روش‌های مختلف به کارگیری میکروسکوپ‌های پروبی روبشی در ساخت آنها پرداخته خواهد شد.

واژه‌های کلیدی

میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی، میکروسکوپ نیروی اتمی، ترانزیستور تک الکترون، فرایند نانو اکسیداسیون^۹، شکاف کولنی^{۱۰}، پلکان کولنی^{۱۱}، نوسانات کولنی.

در چند سال اخیر، تحقیقات و پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه طراحی و ساخت ابزارهای الکترونیکی (مانند ترانزیستورها) در مقیاس نانومتری صورت گرفته است، به طوری که نتایج حاصل از آن‌ها به شکل‌گیری فن‌آوری جدید نانوالکترونیک منجر شده است. با کوچک‌تر شدن قطعات نیمه‌هادی و نزدیک شدن آنها به ابعاد نانومتری، چالش‌های جدیدی در ساخت قطعات الکترونیکی ایجاد شده است. به لحاظ مقیاس، مینیاتورسازی یا کوچک‌سازی دستگاه‌های الکترونیکی امروزی تا به اندازه‌ای است که پدیده‌های کوانتومی می‌توانند بر عملکرد دستگاه اثری مستقیم داشته و تمام ویژگی‌های آن را تغییر دهند. بنابراین، از اثرات کوانتومی می‌توان برای ایجاد دستگاه‌های جدید الکترونیکی نیز استفاده کرد. ترانزیستورها یکی از مهم‌ترین قطعات الکترونیکی در ساخت مدارات مجتمع هستند. مطالعات روی کاهش اندازه و افزایش سرعت آن‌ها امروزه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین و تاثیرگذارترین عوامل در عملکرد ابزارهای الکترونیکی است. یکی از زمینه‌هایی که توجه نسبتاً بالاتری در کوچ‌سازی مدارات ترانزیستوری دارد، مبدل‌های پردازش توان در ابعاد بسیار کوچک است. این مبدل‌ها با الگوهای مناسب کلیدزنی قادر به دستیابی انرژی به شکلی مطلوب از منابع با توان و ولتاژ بسیار پایین هستند. کاهش اندازه کلید و امکان بالا بردن فرکانس کلیدزنی که خود اندازه سایر اجزای مبدل را کاهش می‌دهد، سبب کاهش اساسی افت تلفات هدایتی مبدل نیز می‌شود.

مطالعات فعلی بیانگر وجود محدودیت‌های بنیادین در این حوزه بوده که مانع از کاهش بیشتر اندازه نانوترانزیستورهای معمولی با هدف افزایش سرعت و کاهش سطح آن‌ها است. از طرفی به دلیل نوفه، جریان نشتی بالا و مقاومت خروجی پایین، استفاده از این نوع از ترانزیستورها در بسیاری از کاربردها نامناسب شده است.

لذا تحقیقات زیادی به‌منظور جایگزینی ترانزیستورهای معمولی صورت پذیرفته است که یکی از آن‌ها استفاده از قطعه‌ای است که بر مبنای تونل‌زنی کنترل شده الکترون‌ها از میان سد پتانسیل کار می‌کند. با کوچک شدن بیش از حد ابعاد ترانزیستورها ضخامت لایه‌های عایق بین قسمت‌های مختلف آن به اندازه‌ای کوچک می‌شود که حامل‌ها امکان تونل‌زنی کنترل نشده از طریق آن‌ها را می‌یابند. قطعه مذکور قادر است که جریان الکتریکی در حد تغییرات یک یا چند الکترون بر حسب زمان را کنترل کند و به همین دلیل ترانزیستور تک الکترونی نامیده می‌شود. این دستگاه از پدیده مکانیک کوانتومی تونل‌زنی بهره‌برداری می‌کند و می‌تواند به‌عنوان یک سوئیچ یا به‌عنوان یک تقویت کننده، شبیه به ترانزیستور اثر میدان‌های^{۱۲} معمولی باشد، اما می‌تواند انتقال الکترون‌ها را نیز کنترل کند. بنابراین جالب است که ویژگی‌ها و کاربردهای آن به‌خوبی بررسی شوند. ترانزیستور تک الکترونی، مشابه ترانزیستور اثر میدان، می‌تواند در حالت تقویت کننده به‌عنوان یک الکترومتر برای اندازه‌گیری میزان بار یا اختلاف بار یک سیستم خاص استفاده شود. فیزیکدانان میشل دیورت^{۱۳} و رابرت شولکف^{۱۴} ادعا می‌کنند که ترانزیستور تک الکترونی در واقع بسیار مناسب است که الکترومتر باشد، زیرا دارای انرژی بسیار بالا و حساسیت باری است که بسیار نزدیک به حدود نظریه کوانتومی است.

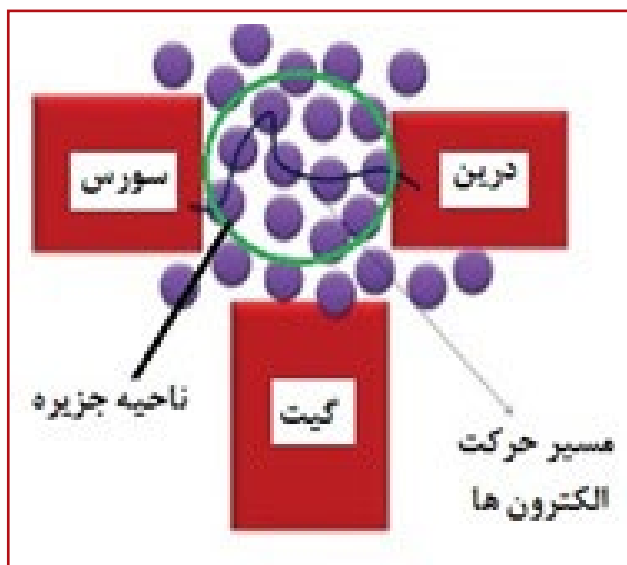
ابزارهای تک الکترونی توانایی دستکاری و کنترل انتقال تک الکترون‌ها را دارند. ساخت یک ابزار تک الکترونی نیازمند ساخت تکرارپذیر ذرات رسانای نانومتری و جا دادن دقیق آن‌ها نسبت به الکترودهای خارجی است. با استفاده از ابزارهای تک الکترونی در مدارهای مجتمع، امکان داشتن یک مدار مجتمع فوق بزرگ با مجتمع‌سازی بسیار بالا و توان مصرفی بسیار پایین فراهم و منجر به کاهش توان مصرفی می‌شود.

ترانزیستور تک الکترونی اساسی‌ترین ابزار تک الکترونی محسوب می‌شود. این نوع از ترانزیستورها به علت توان مصرفی پایین و چگالی بالا بسیار مورد توجه هستند. نوسانات حرارتی تاثیر بسزایی در عملکرد درست این نوع ترانزیستورها دارد، لذا دستیابی به ترانزیستورهای تک الکترونی با قابلیت کار در دمای محیط بسیار حائز اهمیت است. برای کاربردهای عملی، ضروری است که ترانزیستور تک الکترونی در دمای محیط کار کند. برای این منظور، اندازه جزیره ترانزیستور تک الکترونی باید به اندازه تقریباً ۱۰ نانومتر باشد تا از ظرفیت کل خازن در ترانزیستور تک الکترونی کاسته شود و بر مشکلات نوسانات حرارتی غلبه کند. با تجهیزاتی پیشرفته‌ای مانند روش پرتو یونی متمرکز^{۱۵} امکان ساخت این ترانزیستورها تا ابعاد چند ده نانومتر ایجاد شد که نهایتاً ظرفیت خازنی حاصل از آن‌ها تا حدود ۱۰ nF فراهم شده است.

با توجه به پیشرفت‌های قابل ملاحظه فرآیندهای تولید نانو ساختارها با استفاده از میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی و میکروسکوپ نیروی اتمی، بررسی‌های گسترده‌ای در بکارگیری این دو روش در ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی انجام شد که حاصل آن ساخت ترانزیستورهایی با جزیره‌های در ابعاد بسیار کوچک تا نزدیکی ۱۰ نانومتر، با اتصالات تونلی با ظرفیت خازنی بسیار کوچک (کمتر از $10^{-18} \times 9 \times 10^{-18}$) و با مقاومت تونل‌زنی مناسب است، در ادامه پس از بررسی اساس کار ترانزیستور تک الکترونی برخی از آن‌ها بررسی می‌شود [۱ - ۴].

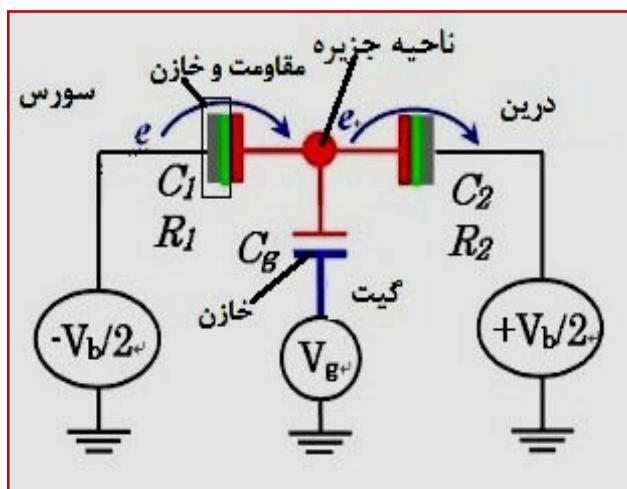
اساس کار ترانزیستور تک الکترون (SET)

است. مقدار این مقاومت به صورت نمایی با ضخامت سد تغییر می کند و اندازه ضخامت سد از مرتبه یک تا چند نانومتر است. در ترانزیستور تک الکترونی انتقال الکترون از طریق تونل زنی کوانتومی امکان پذیر است و از آنجا که تونل زنی به داخل یا خارج ناحیه جزیره به ترازهای انرژی وابسته است، بار الکتریکی که از طریق اتصالات تونلی بین الکترودهای سورس و درین در جریان است (شکل (۳))، مضرب صحیحی از بار الکترون است و پتانسیل الکتریکی جزیره به کمک الکترودهای سورس و درین می نامند، کنترل می شود.



شکل (۳): نمایی از مسیر انتقال الکترون در ترانزیستور تک الکترونی [۸].

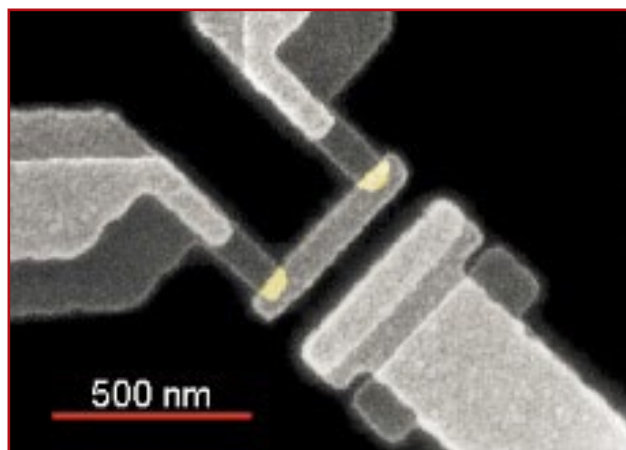
الکترودهای رسانا در سورس و درین که در ناحیه جزیره از هم جدا شده اند علاوه بر مقاومت، یک ظرفیت خازنی هم دارند (شکل (۴)).



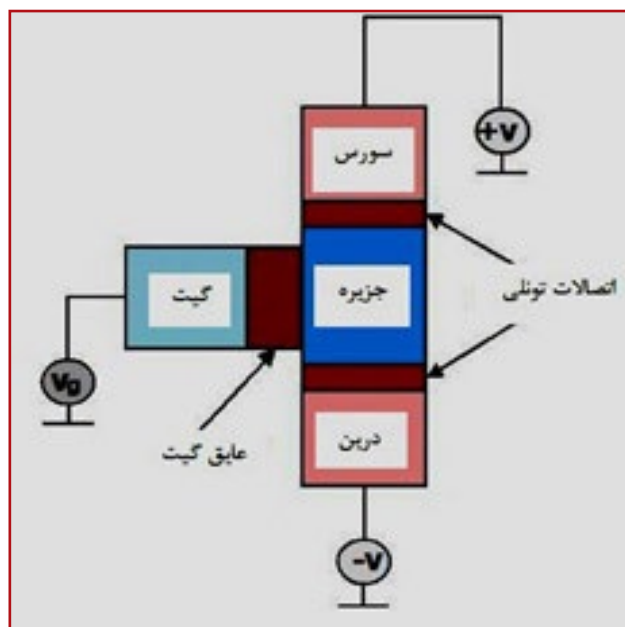
شکل ۴: نمایی از مدار داخلی ترانزیستور تک الکترونی [۹].

همان گونه که می دانیم برای دو رسانا که به وسیله یک عایق از هم جدا شده اند، بار الکتریکی با ظرفیت خازنی و ولتاژ مطابق رابطه (۱) متناسب است:

ترانزیستورهای تک الکترونی (شکل (۱)) توانایی دستکاری و کنترل انتقال الکترون ها را دارند. این ترانزیستورها از دو اتصال تونلی با یک الکترودهای مشترک تشکیل شده اند، الکترودهای مشترک جزیره نامیده می شود و تنها با الکترودهای دو طرف اتصال تونلی که پایه های سورس^۶ و درین^۷ نامیده می شوند، تبادل الکترونی انجام می دهد (شکل (۲)).



شکل (۱): نمایی از ترانزیستور تک الکترونی [۶].



شکل (۲): نمایی از ترانزیستور تک الکترونی [۷].

همان گونه که می دانیم یک اتصال تونلی ساده، عبور از یک سد عایق نازک میان دو الکترودهای رسانا است که طبق قوانین مکانیک کوانتومی با اعمال ولتاژ امکان عبور الکترون از سد عایق فراهم می شود. لذا با اعمال ولتاژ بیاس، جریان تونل زنی بین دو الکترودهای برقرار می شود، این جریان تونل زنی با ولتاژ بیاس متناسب است. در حقیقت این اتصال تونلی مانند مقاومت مقدار ثابت رفتار می کند و همان مقاومت اهمی



شکل (۵): (الف): مشخصه جریان-ولتاژ برای دو اتصال تونل زنی متقارن، (ب): مشخصه جریان-ولتاژ برای دو اتصال تونل زنی نامتقارن (پلکان کلونی) [۹].

انرژی الکترواستاتیک (کلونی) مورد نیاز برای شارژ نقطه کوانتومی با n الکترون از رابطه (۳) حاصل می شود:

$$E = (ne)^2/2C \quad (۳)$$

از آن جایی که در شرایط واقعی نقطه کوانتومی ممکن است به واسطه حضور ناخالصی‌ها دارای بار خالص صفر نباشد، بار خالص Q_0 لزوماً مضرب صحیحی از بار الکترون نیست و برای نقطه کوانتومی در نظر گرفته می شود. از طرفی نقطه کوانتومی (ناحیه جزیره) با دو الکترون کوپل شده برای هر اتصال یک ظرفیت خازنی (C_1 و C_2) در نظر گرفته شده است (شکل (۴)); بنابراین، ظرفیت خازنی کل معادل رابطه (۴) است:

$$C = C_1 + C_2 \quad (۴)$$

لذا با در نظر گرفتن بار Q_0 و ظرفیت خازنی کل، اتصالات رابطه (۳) معادل رابطه (۵) می شود:

$$E = \frac{(Q_0 - ne)^2}{2(C_1 + C_2)} \quad (۵)$$

در نتیجه تغییرات انرژی الکترواستاتیک (انرژی کلونی) سیستم با افزودن یک الکترون به نقطه کوانتومی برابر است با:

$$E_{n+1} - E_n = \left(n + \frac{1}{2} - \frac{2Q_0}{e} \right) \quad (۵)$$

در حالت خنثی مقدار Q_0 برابر صفر بوده و تغییر انرژی الکترواستاتیک برابر با $e^2/(C_1 + C_2)$ می شود.

در ترانزیستورهای تک الکترونی، کنترل کلیه انتقالات الکترونی در ناحیه جزیره از طریق میزان ولتاژ اعمال شده به الکترون گیت صورت می گیرد، این الکترون توسط یک اتصال خازنی به جزیره متصل شده است. در حالت قطع هیچ تراز انرژی در نقطه کوانتومی برای تونل زنی الکترون‌ها از سورس به جزیره در دسترس نیست و تمام انرژی با انرژی کمتر از انرژی الکترونی در سورس اشغال شده اند، وقتی یک ولتاژ مثبت به الکترون گیت اعمال می شود، ترازهای انرژی جزیره در سطح پایین تری قرار می گیرند و الکترون‌ها می توانند از الکترون

$$Q = CV \quad (۱)$$

که در آن: (Q) بار کل روی رسانا، (C): ظرفیت خازنی و (V) ولتاژ میان دو رسانا است.

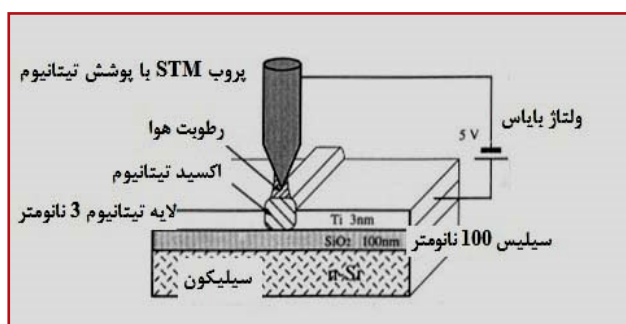
برای انتقال الکترون در ناحیه جزیره به انرژی معادل انرژی الکترواستاتیکی (کلونی) نیاز است، این انرژی با اعمال ولتاژ بین الکترودهای سورس و درین (V_{ds}) تامین می شود. با افزایش ولتاژ (V_{ds}) از مقدار صفر به سمت مقادیر بیشتر، ابتدا هیچ جریانی میان الکترودهای سورس و درین برقرار نمی شود، این توقف جریان الکترونی سد کلونی نامیده می شود که حاصل برهم کنش دافعه الکترون-الکترون روی ناحیه جزیره است که ترانزیستورهای تک الکترونی برای کنترل انتقال تک الکترون‌ها در ناحیه جزیره از آن استفاده می کنند. مقدار انرژی کلونی (انرژی شارژ الکترواستاتیک) به مقدار بار الکترونیکی الکترون‌ها و ظرفیت خازنی کل مدار وابسته است و از رابطه (۲) به دست می آید:

$$E_C = e^2/2C \quad (۲)$$

که در آن: (E_C) انرژی الکترواستاتیکی (کلونی)، (e) بار الکترونیکی الکترون و (C) ظرفیت خازنی کل است.

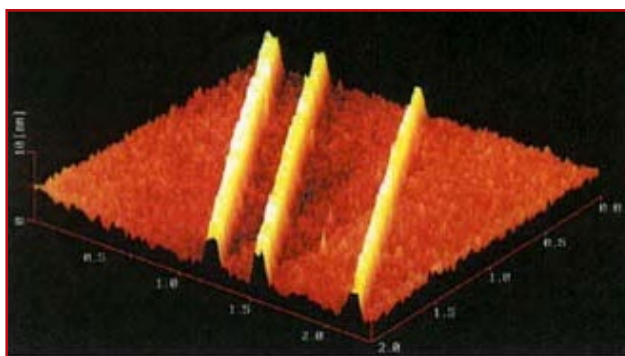
جریان میان الکترودهای سورس و درین تنها در صورتی برقرار می شود که ولتاژ اعمال شده (V_{ds}) قادر به برقراری ولتاژ در ناحیه جزیره باشد، به کمترین مقدار این ولتاژ، ولتاژ آستانه می گویند. هنگامی که ولتاژ اعمال شده به ولتاژ آستانه برسد، یک الکترون به ناحیه جزیره وارد یا خارج شده و جریان برقرار می شود. با ورود الکترون به ناحیه جزیره از اتصال تونل زنی (۱) (اتصال بین الکترون سورس و جزیره)، الکترون دیگری تمایل بالایی برای خروج از اتصال تونل زنی (۲) (اتصال بین الکترون درین و جزیره) دارد. بنابراین، با ورود الکترون اول به ناحیه جزیره تقریباً به صورت آبی الکترون دیگری از آن خارج می شود. در این حالت نمودار مشخصه جریان-ولتاژ برای دو اتصال تونل زنی متقارن خواهد بود (شکل (۵-الف)). اگر مقاومت تونل زنی اتصال‌های تونل زنی تفاوت بسیار بزرگی داشته باشد، یک رفتار نامتقارن و به صورت پلکانی در مشخصه جریان-ولتاژ مشاهده می شود (شکل (۵-ب)). در این حالت نیز با اعمال ولتاژی برابر ولتاژ آستانه یک الکترون از اتصال (۱) به ناحیه جزیره وارد شده و جریان برقرار می شود، اما به دلیل مقاومت تونل زنی بالای اتصال (۲)، الکترون به سرعت از ناحیه جزیره خارج نمی شود و به دلیل وجود یک بار الکترونی اضافه در ناحیه جزیره و افزایش جریان، ولتاژ بیشتری برای غلبه بر انرژی کلونی نیاز است، این رفتار منجر به افزایش پله‌ای جریان نسبت به ولتاژ شده و به پلکان کلونی معروف است.

می‌شود. بین سطح نمونه و نوک پروب که دارای پوششی از جنس پلاتین است، بایاس مثبت اعمال می‌شود. هنگامی که پروب در نزدیکی سطح نمونه قرار داده شود، علاوه بر جریان تونل‌زنی، جریان فارادی نیز بین سوزن و سطح نمونه از طریق مولکول‌های آب موجود در هوا برقرار می‌شود (در اینجا نوک سوزن به‌عنوان کاتد و رطوبت محیط به‌عنوان الکترولیت عمل می‌کنند) و طی یک فرآیند الکتروشیمیایی همراه با روبش سطح با استفاده از پروب، خطوط نازکی از تیتانیوم اکسید روی سطح ایجاد می‌شود (شکل (۶)). با معکوس شدن جهت ولتاژ بایاس اعمالی هیچ الگویی روی سطح تشکیل نمی‌شود، این امر نشان دهنده این است که الگو به‌صورت الکتروشیمیایی شکل گرفته است.



شکل (۶): انجام فرآیند اکسیداسیون لایه تیتانیوم با زیر لایه سیلیکونی با استفاده از پروب میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی به‌عنوان الکتروود [۱۱].

بعد از انجام این فرآیند اکسیداسیون تصویر توپوگرافی از سطح تهیه می‌شود تا مشخصات خطوط حاصل مورد بررسی قرار گیرد. همان‌گونه که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، سه خط تیتانیوم اکسید روی لایه تیتانیوم تشکیل شده است که به ترتیب دارای پهنا و ارتفاع ۸۰ nm و ۴ nm هستند.



شکل (۷): تصویر توپوگرافی از سه خط تیتانیوم اکسید که با روش اکسیداسیون با استفاده از میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی تشکیل شده‌اند. تصویر فوق با میکروسکوپ در سرعت روبش ۰/۱ mm/sec، ولتاژ بایاس ۵ V و جریان تونل‌زنی ۱ nA تهیه شده است که در آن پهنا و ارتفاع خطوط به ترتیب ۸۰ nm و ۴ nm هستند [۱۱].

برای اطمینان از تشکیل تیتانیوم اکسید روی الگوی ساخته شده با میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی، میزان توزیع اکسیژن در کل سطح نمونه با استفاده از روش طیف‌سنجی الکترونی اوزه^{۱۹}

سورس به جزیره و از آنجا به الکتروود درین تونل بزند. عملکرد ترانزیستور تک الکترونی تنها با ولتاژهای اعمال شده روی الکتروودهای سورس، درین و گیت تعیین نمی‌شود، بلکه عوامل دیگری همچون دما و بارهای خارجی نیز روی آن اثرگذار هستند. نوسانات حرارتی تاثیر زیادی بر عملکرد صحیح ترانزیستور تک الکترونی داشته و ویژگی‌های مناسب جریان-ولتاژ در ترانزیستور تک الکترونی را از بین می‌برند، مقدار این نوسانات در شرایط محیطی افزایش می‌یابند.

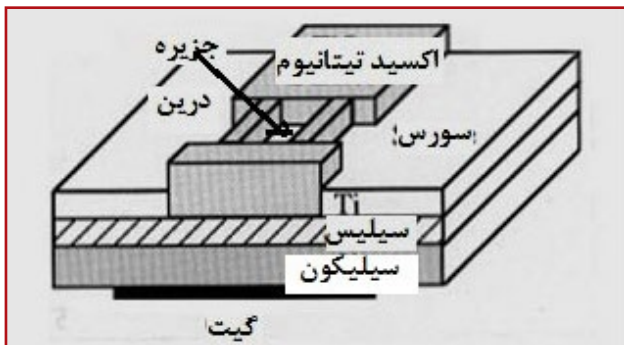
با افزایش مقدار انرژی الکترواستاتیکی در ترانزیستورهای تک الکترونی، امکان عملکرد مناسب آنها در شرایط محیطی فراهم می‌شود. این امر با پایین آوردن ظرفیت خازنی کل حاصل می‌شود. طبق رابطه (۵) به دلیل اینکه انرژی الکترواستاتیک با ظرفیت خازنی کل متناسب است اگر ظرفیت خازنی جزیره به مقدار بسیار کم (تا حدود 10^{-18} F) کاهش یابد، ترانزیستور تک الکترونی می‌تواند به راحتی در دمای محیط هم کار کند [5-9].

به‌کارگیری میکروسکوپ‌های پروبی روبشی در ساخت ترانزیستور تک الکترونی

امروزه استفاده از STM و AFM در فرآیندهای تولید نانو ساختار بسیار مورد توجه بوده و باعث پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در این زمینه شده است. این میکروسکوپ‌ها برای به‌کارگیری در تجهیزات نوری و الکترونیکی کاملاً جذاب هستند. همان‌گونه که در قسمت‌های قبل مطرح شد، به‌منظور استفاده از ترانزیستورهای تک الکترونی در مدارات مجتمع دارای چگالی بالا و قابلیت کار با قدرت فوق‌العاده کم حتی با چند الکترون در دمای محیط لازم است تا حد امکان اندازه جزیره آن‌ها کاسته شود. برای این منظور، با به‌کارگیری میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی و میکروسکوپ نیروی اتمی، اندازه جزیره ترانزیستور تک الکترونی را تقریباً تا ۱۰ نانومتر کوچک کرده تا از ظرفیت کل خازن ترانزیستور تک الکترونی کاسته و بر مشکلات نوسانات حرارتی غلبه شود. چند نمونه از ساخت چنین ساختارهای نانوفراپیندی در ادامه بررسی می‌شود [۹ تا ۱۱].

برای ایجاد و ساخت جزایر نانومتری، ماتسوموتو و همکارانش از میکروسکوپ تونل‌زنی روبشی به‌عنوان کاتد استفاده و خطوطی از جنس تیتانیوم اکسید با عرض ۱۸ نانومتر و ارتفاع ۳ نانومتر روی سطح فلز تیتانیوم ایجاد نموده و از این روش برای ساخت ترانزیستور تک الکترونی استفاده کردند. در این بررسی، الگوهای نانومتری از طریق فرآیند نانو اکسیداسیون با استفاده از میکروسکوپ تونلی روبشی روی لایه تیتانیوم ایجاد می‌شود. در این روش، ابتدا نمونه که شامل لایه‌ای از رسوبات نازک تیتانیوم (با ضخامت ۳ نانومتر) که روی زیر لایه سیلیکونی است، در محیط هوا به‌منظور انجام فرآیند اکسیداسیون در دستگاه میکروسکوپ تونلی روبشی قرار داده

پس از ایجاد و تشکیل الگوهای نانومتري با استفاده از میکروسکوپ تونل زنی روبشی که در قسمت بالا توضیح داده شد، دو نوع ترانزیستور تک الکترونی با این روش ساخته شد. تفاوت اصلی این دو نوع ترانزیستور در موقعیت قرارگیری الکتروده گیت و تعداد جزیره‌ها است. شکل (۱۰) تصویری از ترانزیستور تک الکترونی را با اتصال الکتروده گیت در قسمت پشت زیرلایه سیلیکونی نشان می‌دهد. الکترودهای سورس و درین در دو طرف جزیره و به لایه تیتانیومی به ضخامت ۳nm متصل شده‌اند، در منطقه مرکزی لایه تیتانیومی جزیره قرار دارد که با دو خط باریک موازی از تیتانیوم اکسید محاصره شده است، این خطوط به عنوان عایق بین الکترودهای سورس و درین عمل کرده و جریان‌های تونل زنی بین پایه‌های ترانزیستور از طریق آنها ایجاد می‌شود، کلیه مراحل ساخت و تولید این ترانزیستور با فرایند نانو اکسیداسیون با استفاده از میکروسکوپ تونل زنی روبشی انجام شده است.



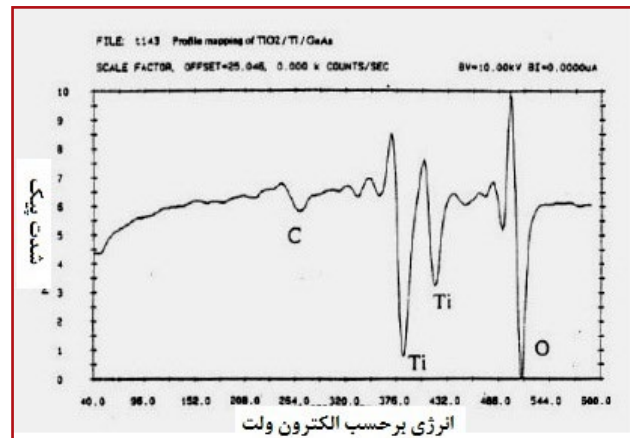
شکل (۱۰): نمایی از ترانزیستور تک الکترونی که گیت در پشت آن قرار گرفته است. این ترانزیستور با فرایند نانو اکسیداسیون با استفاده از میکروسکوپ تونل زنی روبشی ساخته شده است [۱۱].

بعد از ساخت ترانزیستور با میکروسکوپ نیروی اتمی، تصویر توپوگرافی از آن گرفته شد (شکل (۱۱)). در تصویر سه بعدی مناطق مختلف ترانزیستور شامل پایه‌های درین و سورس، ناحیه جزیره خطوط باریک تیتانیوم اکسید و سدهای تیتانیوم اکسید قابل مشاهده هستند.



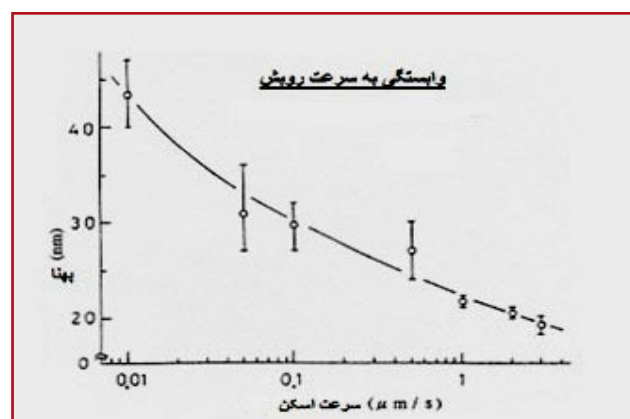
بشکل (۱۱): تصویر سه بعدی میکروسکوپ نیروی اتمی از ترانزیستور تک الکترونی دارای یک جزیره با اتصال الکتروده گیت در قسمت پشت بستر سیلیکونی [۱۱].

مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت و همان گونه که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، فقط در نواحی که خطوط تیتانیوم اکسید قرار دارند پیک واضحی از اکسیژن در انرژی ۵۰۰ eV دیده می‌شود. لذا با توجه به نتایج حاصل از روش طیفسنجی الکترونی اوژه و مقدار اکسیژن موجود در طیف حاصل، مشخص می‌شود که فرایند اکسیداسیون در این خطوط با موفقیت انجام شده است.



شکل (۸): آنالیز طیفسنجی الکترونی اوژه از الگوی ساخته شده با میکروسکوپ تونل زنی روبشی، در شکل پیک‌های واضحی از اکسیژن، تیتانیوم و کربن مشخص شده است [۱۱].

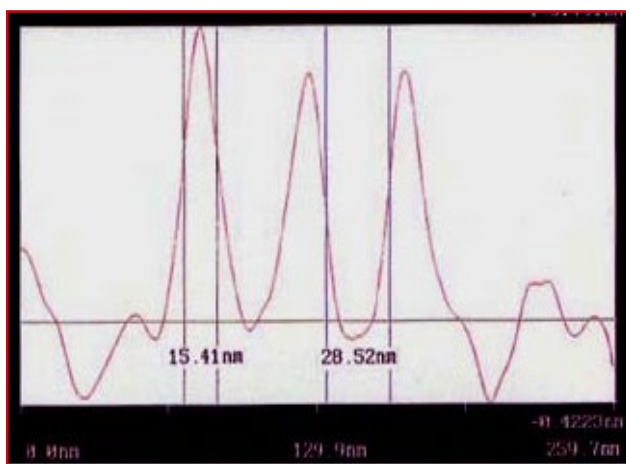
در بررسی انجام شده مشخص شد که پهنا و ارتفاع خطوط اکسید شده به شدت به سرعت روبش پروب بستگی دارد، این وابستگی اندازه خط به سرعت روبش پروب در شکل (۹) نشان داده شده است. با افزایش سرعت روبش از $0.1 \mu\text{m}/\text{sec}$ به $3 \mu\text{m}/\text{sec}$ در شرایط یکسان با ولتاژ بایاس ۵ V و جریان ۱ nA، پهناي خط و ارتفاع خط به ترتیب از ۴۵ nm به ۱۸ nm، و از $3/5 \text{ nm}$ به $2/5 \text{ nm}$ به شدت کاهش می‌یابد. این نتایج نشان می‌دهد که با افزایش سرعت روبش پروب، جریان فارادی که بین نوک پروب و سطح تیتانیوم جریان دارد در طول واحد کاهش می‌یابد. بنابراین، پهنا و ارتفاع خط تیتانیوم اکسید شده، کاهش می‌یابند.



شکل (۹): وابستگی پهناي خط تیتانیوم اکسید شده به سرعت روبش پروب میکروسکوپ تونل زنی روبشی در ولتاژ بایاس ۵ V و جریان ۱ nA [۱۱].



شکل (۱۳): تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی از ترانزیستور تک الکترونی با اتصال گیت جانبی و ساختار دو جزیره‌ای [۱۱].

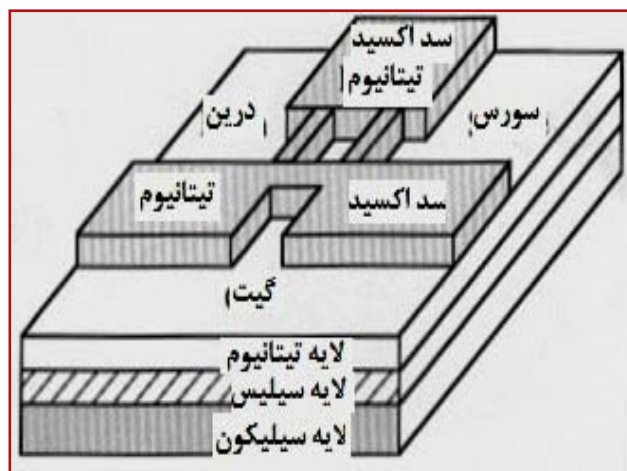


شکل (۱۴): پروفایل اندازه‌گیری‌های اتصالات تونل‌زنی و جزیره‌ها در ترانزیستور تک الکترون با میکروسکوپ نیروی اتمی [۱۱].

شکل (۱۵) مشخصات جریان و ولتاژ پایه درین در یک ترانزیستور تک الکترونی با اتصال گیت جانبی و ساختار ۵ جزیره‌ای در دمای محیط را نشان می‌دهد. شکاف کلونی واضحی حدود 160 mV در حوالی ولتاژ تخلیه صفر مشاهده می‌شود، همچنین هیچ نشانه‌ی جریانی در شکاف کلونی مشاهده نمی‌شود. این امر به علت تعداد جزیره‌ها و اتصالات تونل‌زنی است که می‌توانند جریان تونل‌زنی‌های مشترک را به شدت کاهش دهند. پله‌های کلونی نیز با دوره تناوبی تقریباً یکسان حتی در دمای محیط به دست می‌آیند. اولین پله کلونی در $+180 \text{ mV}$ و -180 mV به وضوح دیده می‌شود [۱۱ تا ۱۳].

مشخصات قسمت‌های مختلف ترانزیستور با میکروسکوپ نیروی اتمی مورد بررسی قرار گرفت. اندازه پهنا و طول سدهای تیتانیوم اکسید به ترتیب $20-15 \text{ nm}$ و $50-30 \text{ nm}$ ابعاد جزیره $30-20 \text{ nm}$ در $30-50 \text{ nm}$ و طول اتصالات مناطق تونل‌زنی به ترتیب $2-3 \text{ nm}$ و طول $30-50 \text{ nm}$ گزارش شد. از طرفی همان‌گونه که در قسمت‌های قبل اشاره شد، ضخامت کل لایه تیتانیوم حدود 3 nm بوده که حدود 1 nm از لایه فوق مربوط به مقدار ضخامت لایه اکسید شده ناشی از قرارگیری در معرض هوا است؛ بنابراین، ضخامت طبیعی لایه تیتانیوم در اتصالات مناطق تونل‌زنی کمتر از 3 nm می‌شود. با ایجاد این مناطق کوچک، ظرفیت خازنی کاهش محسوسی تا حدود F^{-1} می‌یابد و امکان کار ترانزیستور تک الکترونی در دمای محیط به راحتی فراهم می‌شود.

شکل (۱۲) نوع دیگری از ترانزیستور تک الکترونی را با اتصال جانبی الکترونی گیت بوده که این ساختار دارای یک جزیره بین مناطق سورس و درین است. الکترونی گیت از منطقه جزیره با یک سد تیتانیوم اکسید به ضخامت 50 nm جدا می‌شود. این سد کلیه جریان‌های ناشی را از بین می‌برد و به‌عنوان عایق مناسب عمل می‌کند.

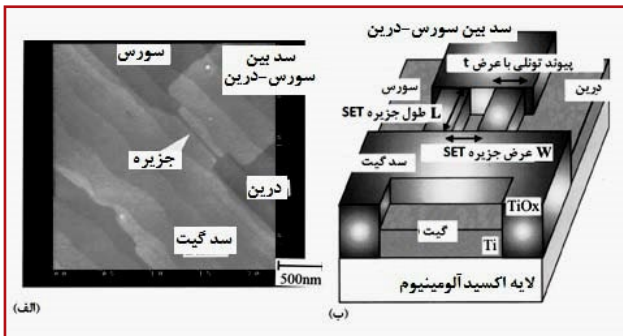


شکل (۱۲): نمایی از ترانزیستور تک الکترونی با اتصال گیت جانبی، ساخته شده با فرایند نانو اکسیداسیون STM [۱۱].

با افزایش تعداد پیوندهای تونل‌زنی، ساختارهای چند جزیره‌ای به راحتی ساخته می‌شوند. شکل (۱۳) نمایی از تصویر AFM با اتصال گیت جانبی در ترانزیستور تک الکترونی ساخته شده با سه پیوند تونل‌زنی شامل دو جزیره را نشان می‌دهد.

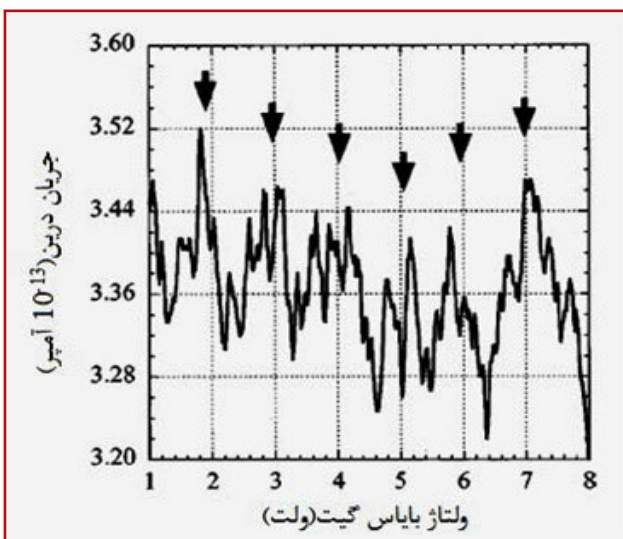
شکل (۱۴) پروفایل اندازه‌گیری‌های انجام شده با میکروسکوپ نیروی اتمی روی تصویر توپوگرافی ترانزیستور تک الکترونی برای تعیین پهنای اتصالات تونل‌زنی و عرض جزیره‌ها را نشان می‌دهد، اندازه پهنای هر سه پیوند تونل‌زنی حدود 15 nm و عرض هر دو جزیره حدود 28 nm به دست آمد.

شده با این روش را نشان می‌دهد. با روش فوق اتصالات تونل‌زنی با پهنایی حدود ۵ nm و جزیره‌ای با پهنای و طول، ۷ nm و ۱۷ nm ایجاد شد و از طرفی پهنای سد اکسیدی بین الکترودهای سورس-درین و الکترودهای گیت-جزیره بیش از ۱ μm شده که در نتیجه آن تمامی جریان‌های نشتی حذف می‌شود.

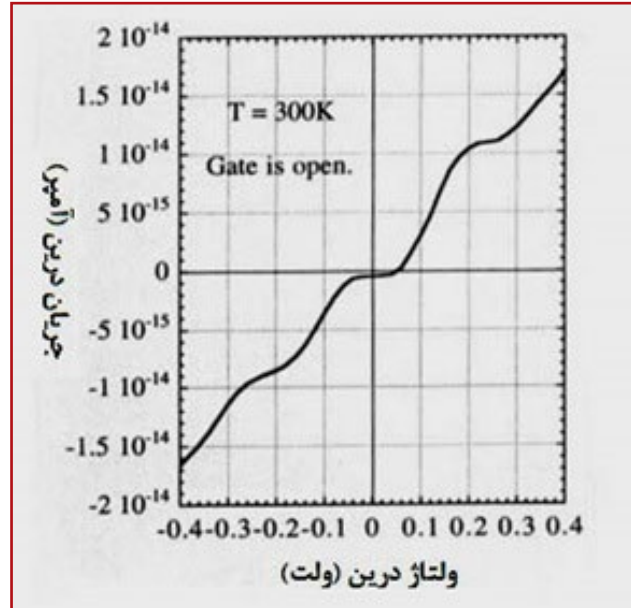


شکل (۱۷): (الف): تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی از ترانزیستور تک الکترونی، (ب): نمایی از ترانزیستور تک الکترونی [۱۴].

بررسی روند کاهش پهنای این اتصالات تونل‌زنی و تاثیر آن‌ها بر ظرفیت خازنی نشان می‌دهد که با وجود کاهش آن‌ها، اثر محسوسی روی میزان ظرفیت خازنی کل ($10^{-19} \times 1/6$) دیده نمی‌شود؛ زیرا در ترانزیستور فوق علاوه بر وجود اثر میدان الکتریکی حاصل در اتصالات تونل‌زنی، میدان‌های الکتریکی موجود در زیرلایه اتصالات تونل‌زنی نیز بر مقدار این ظرفیت خازنی کل اثرگذار هستند. همچنین بررسی‌ها نشان می‌دهد که این میدان‌ها اثر بیشتری بر ظرفیت خازنی کل دارند. در نتیجه با در نظر گرفتن اثر این میدان‌ها و کاهش پهنای اتصالات تونل‌زنی، ترانزیستوری با ظرفیت خازنی مطلوب و مشخصه نوسانات کولنی مناسب (حدود ۱ ولت) برای کار در شرایط محیط ساخته شد (شکل (۱۸)) [۱۴ تا ۱۶].



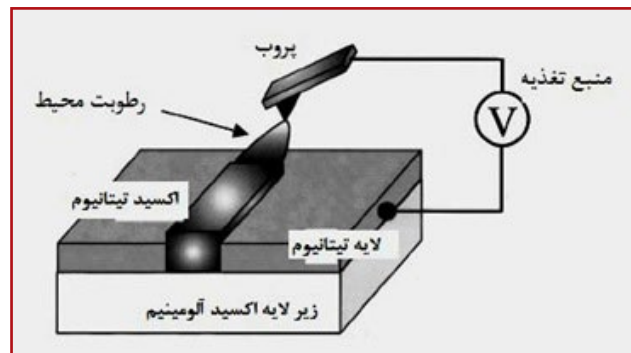
شکل (۱۸): مشخصه نوسانات کولنی در ترانزیستور تک الکترونی ساخته شده با میکروسکوپ نیروی اتمی، مقدار ولتاژ بایاس برای الکترودهای ۵ ولت و برای الکترودهای گیت از ۱ تا ۸ ولت است [۱۴].



شکل (۱۵): مشخصات جریان-ولتاژ درین در ترانزیستور تک الکترونی با اتصال گیت جانبی و ساختار ۵ جزیره‌ای در دمای محیط. شکاف و پله‌های کولونی به ترتیب ۱۶۰ mV و ۱۸۰ mV دیده می‌شوند [۱۱].

تشکیل الگوی نانومتری و ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی

با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی و میکروسکوپ نیروی اتمی، اثر مستقیم کاهش پهنای اتصالات تونل‌زنی و تاثیر زیر لایه بر ظرفیت خازنی کل و در نتیجه بهبود عملکرد ترانزیستور تک الکترونی در دمای محیط بررسی شد. برای این منظور فرایند اکسیداسیون با استفاده از یک پروب سیلیکونی با اتصال نانولوله کربنی تک-دیواره^{۲۰} روی سوزن، با هدف کاهش پهنای اتصالات تونل‌زنی در ترانزیستور تک الکترونی انجام شد. با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی و انجام فرایند نانو اکسیداسیون، ساخت ترانزیستور تک الکترونی روی لایه تیتانیومی با ضخامت ۱ nm با زیرلایه آلومینیوم اکسید با ضخامت ۲ میکرومتر در رطوبت محیط انجام شد (شکل (۱۶)).



شکل (۱۶): انجام فرایند اکسیداسیون لایه تیتانیوم با زیر لایه آلومینیوم اکسید با استفاده از پروب میکروسکوپ نیروی اتمی به‌عنوان الکترودهای [۱۴].

شکل (۱۷-الف) و (۱۷-ب)، تصویر توپوگرافی میکروسکوپ نیروی اتمی و نمایی از ساختار ترانزیستور تک الکترونی ساخته

ترانزیستورهای تک الکترونی دارای کاربردهای فراوانی نظیر ساخت الکترودهای حساس، ساخت مبدل‌های الکترونیکی، ساخت حسگرهای حساس و غیره هستند. در بیشتر این کاربردها، به استفاده از آن‌ها در ابعاد نانو و امکان کار در شرایط محیط نیاز است. وابستگی انرژی الکترواستاتیکی (انرژی کولنی) به مقدار ظرفیت خازنی و ابعاد جزیره، کنترل سخت جریان‌های تونل‌زنی با کاهش ابعاد اتصالات تونل‌زنی و تاثیرپذیری جریان‌های تونل‌زنی از نوسانات حرارتی از مهم‌ترین مشکلاتی است که در ساخت این نوع از ترانزیستورها وجود دارد. لذا به کارگیری روش‌های مناسب در حوزه ساخت این ترانزیستورها به منظور غلبه بر محدودیت‌های موجود بسیار با اهمیت است. امروزه استفاده از میکروسکوپ‌های نیروی اتمی و تونل‌زنی روبشی موفقیت‌های چشم‌گیری در رفع این مشکلات و ساخت این نوع ترانزیستورها با نوسانات کولنی مناسب داشته است. این روش‌های میکروسکوپی مزایای قابل توجهی از نظر هزینه، سهولت به کارگیری و امکان کنترل و تعیین مشخصه‌های ترانزیستور در تمام مراحل ساخت نسبت به سایر روش‌های مرسوم دارا هستند و همین امر باعث استفاده گسترده‌ای از آن‌ها در ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی شده است.

پی‌نوشت

۱. کارشناسی ارشد میکروبیولوژی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران
۲. کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران
۳. دکتری مدیریت راهبردی ایمنی، بهداشت، محیط‌زیست، دانشگاه الزهراء(س)
۴. عضو کارگروه تخصصی میکروسکوپ پروبی روبشی

5. Single-Electron Transistor (SET)
6. Coulomb oscillation
7. Scanning Tunneling Microscope (STM)
8. Atomic Force Microscope (AFM)
9. Nano oxidation process
10. Coulomb gap
11. Coulomb staircase
12. Field-effect Transistor (FET)
13. Devoret
14. Schoelkopf
15. Field-effect Transistor (FIB)
16. Source
17. Drain
18. Gate
19. Auger electron spectroscopy (AES)
20. Single-walled carbon nano-tube (SWNT)

- [1] P. Santosh Kumar Karrea_ and Paul L. Bergstrom, Room temperature operational single electron transistor fabricated by focused ion beam deposition.
- [2] Masahiko hasumi, Yoshinobu aoyagi, Takuo sugano, Single electron transistor and fabrication technologies.
- [3] Arnaud Beaumont, Christian Dubuc, Jacques Beauvais, and Dominique, Room Temperature Single-Electron Transistor Featuring Gate-Enhanced ON-State Current. Drouin.
- [4] P. Santosh Kumar Karre, Paul Bergstrom, Room temperature operational single electron transistor fabricated by focused ion beam deposition.
- [5] Devoret M.H. and Schoelkopf R. J (2000). Amplifying quantum signals with the single-electron transistor". Nature 406: p.1039-1046.
- [6] Francesco Maddalena, "Single-Electron Transistor, As fast and ultra sensitive electrometer", MSC plus.
- [7] Anurag Srivastava^{1*}, B. Santhibhushan¹, Vikash Sharma^{1,2}, Kamalpreet Kaur^{1,2}, Md. Shahzad Khan¹, Madura Marathe³, Abir De Sarkar⁴ and Mohd. Shahid Khan, Influence of Boron Substitution on conductance of Pyridine and Pentane based Molecular Single Electron Transistors: First Principles Analysis.
- [8] Manoranjan Acharya (2009), Development of room temperature operating single electron transistor using FIB etching and deposition technology.
- [9] Rai C, Khursheed A and Haque FZ (2019), Review on Single Electron Transistor (SET): Emerging Device in Nanotechnology.
- [10] R S Liu, D Suyatin, H Pettersson, and L Samuelson, Assembling ferromagnetic single-electron transistors by atomic force microscopy.
- [11] Kazuhiko Matsumoto (1998). " Application of scanning tunneling/atomic force microscope nano-oxidation process to room temperature operated single electron transistor and other devices". Scanning Microscopy . 1 (12): 61–69.
- [12] K. Matsumoto, M. Ishii, K. Segawa, and Y. Oka, Room temperature operation of a single electron transistor made by the scanning tunneling microscope nanooxidation process for the TiOx/Ti system.
- [13] Hao Zheng, Alexander Weismann & Richard Berndt (2013). " Tuning the electron transport at single donors in zinc oxide with a scanning tunnelling microscope".
- [14] Y. Gotoh, K. Matsumoto, T. Maeda, E. B. Cooper, S. R. Manalis, H. Fang, S. C. Minne, T. Hunt, H. Dai, J. Harris, C. F. Quate (2000). " Experimental and theoretical results of room-temperature single-electron transistor formed by the atomic force microscope nano-oxidation process". Scanning Microscopy . 18 (4): 1321–1325.
- [15] H.W. Schumacher, U.F. Keyser, U. Zeitler, R.J. Haug, K. Eberl (2000). " Controlled mechanical AFM machining of two-dimensional electron systems: fabrication of a single-electron transistor". PHYSICA . 6: 860–863.
- [16] Antoine Roy-Gobeil, Single-electron charging using atomic force microscopy.

Scanning Probe Microscope application in the fabrication of Single Electron Transistors

Author

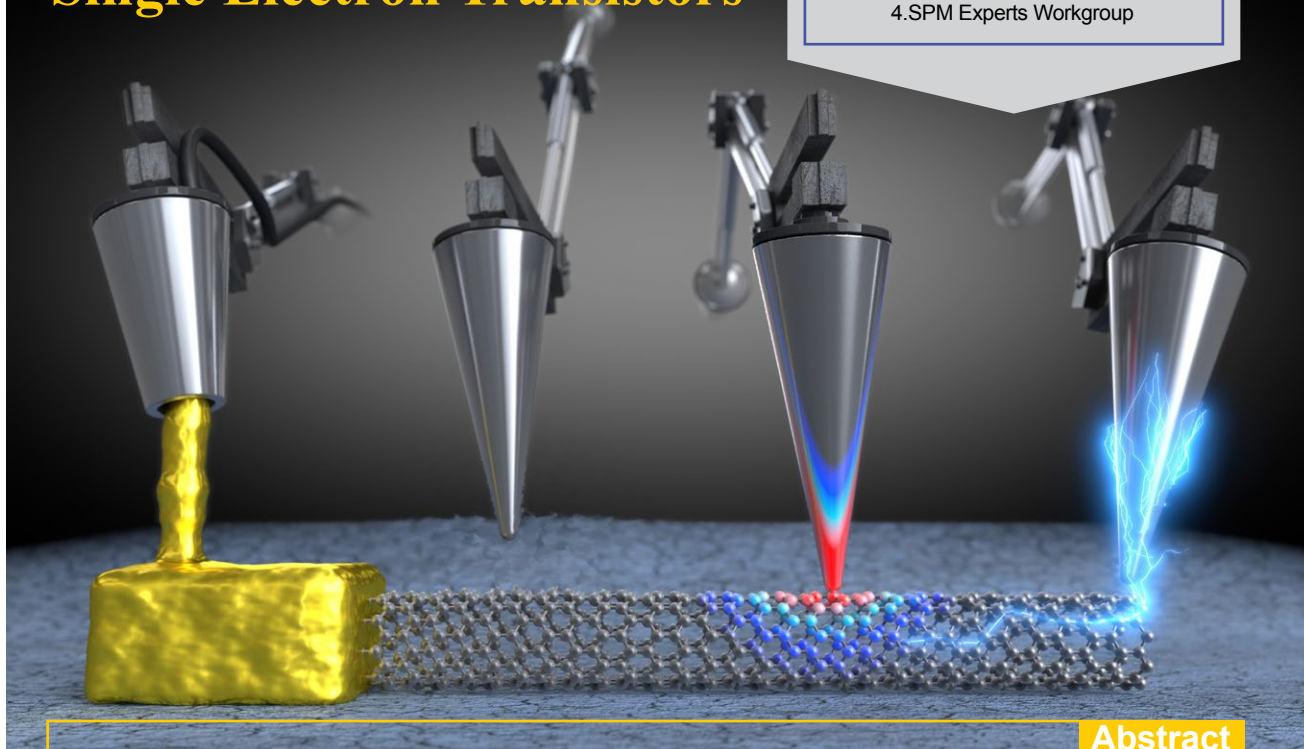
Somayeh Jalilzadeh Azar^{1,4*}

Maryam Khosravi^{2,4}

Ramona Nikkhesal^{3,4}

* somayehjalilzadeh@yahoo.com

1. M.Sc. Microbiology, Chemistry & Chemical Engineering Research Center of Iran
2. M.Sc of Polymer Engineering, Iran Polymer and Petrochemical Institute
3. D.BA health, safety and environment (HSE), Alzahra University
4. SPM Experts Workgroup




Abstract

Single-electron transistors (SETs) are one of the most basic single electron tools and have received much attention in the field of nanoelectronics. These types of transistors have very low consumption power, high performance speed, low conductivity losses, good controllability and the ability to miniaturize to nanometer dimensions. A single electron transistor is a nanometer switching device that controls the movement of electrons. Due to their scope of working and in order to using this type of transistor at ambient temperature with a minimum of Coulomb oscillations, making of this type of transistor with small quantum islands is very important. Nowadays, with the using of scanning tunneling microscopes (STM) and atomic force microscopy (AFM), it is possible to making these types of transistors with islands in the range of a few nanometers with stable Coulomb oscillations at room temperature. In this paper, the basis of the working of single electron transistor and different methods of using scanning probe microscopes in their construction will be investigated.

Keywords

Scanning Tunneling microscope, Atomic force microscope, Single electron transistor (SET), nano oxidation process, Coulomb gap, Coulomb staircase, Coulomb oscillations.



A review on methods of measuring the contact angle of liquids



Inter Laboratory Comparisons,
Proficiency Testing ,
Why and How?



What is the High-Throughput
Screening (HTS) test method?
Part One: Introduction,
Mechanism and Application



Spectrophotometer application
in measuring nitrite and nitrate
content in fruits and vegetables
and their products through
molecular interferometry.



Comparison the quality of
internal defects evaluation of
metal parts with fuzzy array and
full focus methods



Scanning Probe Microscope
application in the fabrication of
Single Electron Transistors