

مروری بر ترانزیستور تک الکترونی: اصول، ساخت، مدل سازی و کاربردها

زهرا حسینی، تیمور قنبری*

دانشکده فناوری های نوین، دانشگاه شیراز

چکیده

ترانزیستور تک الکترونی (SET) به عنوان اساسی ترین ابزار تک الکترونی در تحقیقات حوزه نانوتکنولوژی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. این نوع ترانزیستور با توان مصرفی بسیار پایین و سرعت عملکرد بالا یک ابزار سویچینگ نانومتری است که حرکت یک تک الکترون را کنترل می کند. در این مقاله، اصول کار SET و برخی روش های ساخت آن شرح داده شده است. همچنین روش های مختلف مدلسازی SET به همراه نرم افزارهای در دسترس برای شبیه سازی آن معرفی شده اند. در بخش آخر این مقاله، برخی از کاربردهای SET به طور مختصر معرفی شده اند.

واژه های کلیدی: ترانزیستور تک الکترونی؛ سد کولنی؛ مدلسازی؛ ساخت

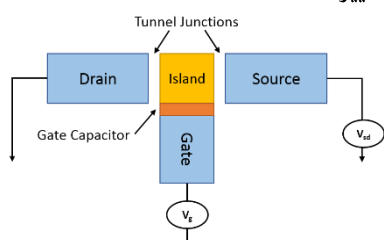
ایمیل نویسنده مسئول: ghanbarih@shirazu.ac.ir

۱- مقدمه

ابزارهای تک الکترونی توانایی دستکاری و کنترل انتقال تک الکترون ها را دارند [۱]. در سال ۱۹۰۹، میلیکان برای اولین بار دستکاری تک الکترون ها را بطور تجربی نشان داد. اما به دلیل محدودیت های روش های ساخت، تا اواخر دهه ۸۰ میلادی امکان وارد کردن ابزارهای تک الکترونی در مدارهای حالت جامد امکان پذیر نشد [۲،۳]. ساخت یک ابزار تک الکترونی نیازمند ساخت تکرارپذیر ذرات رسانای نانومتری و جادادن دقیق آن ها نسبت به الکترودهای خارجی است. با پیشرفت روش های ساخت سیستم های نانومتری در چند دهه اخیر، ساخت ابزارهای تک الکترونی و گسترش حوزه علم و تکنولوژی الکترونیک مبتنی بر SET مهیا شده است [۴-۶]. با استفاده از ابزارهای تک الکترونی در مدارهای مجتمع، امکان داشتن یک مدار مجتمع فوق بزرگ با مجتمع سازی بسیار بالا و توان مصرفی بسیار پایین فراهم می شود. توان مصرفی تقریباً با تعداد الکترون هایی که در عملیات منطقی از منبع ولتاژ به زمین منتقل می شوند متناسب است. بنابراین، انتظار می رود استفاده از ابزارهای تک الکترونی در مدارهای مجتمع بسیار بزرگ منجر به کاهش توان مصرفی شود [۷].

ترانزیستور تک الکترونی اساسی ترین ابزار تک الکترونی محسوب می شود [۸-۱۰]. شکل ۱ طرحواره ساختمان یک ترانزیستور تک الکترونی را نشان می دهد. یک ترانزیستور تک الکترونی از دو اتصال تونلی با یک الکتروود مشترک تشکیل شده است. الکتروود مشترک جزیره نامیده می شود و تنها با الکترودهای دو طرف اتصال تونلی که سورس و درین نامیده می شوند تبادل الکترون انجام می دهد. انتقال الکترون از طریق تونل زنی کوانتومی امکان پذیر است و از آنجا که تونل زنی به داخل و یا خارج یک جزیره کوچک با ترازهای انرژی گسسته اتفاق می افتد، بار الکتریکی که از طریق اتصالات تونلی در جریان است گسسته و مضرب صحیحی از بار الکترون است. پتانسیل الکتریکی جزیره

توسط الکتروود سومی (گیت) که به طور خازنی به آن الحاق شده است، قابل تغییر است.



شکل ۱. طرحواره ساختمان یک ترانزیستور تک الکترونی

در ادامه، ابتدا اساس کار ترانزیستور تک الکترونی و سپس روش های ساخت و مدل سازی و برخی کاربردهای این نوع ترانزیستور شرح داده شده است.

۲- اساس کار ترانزیستور تک الکترونی

یک اتصال تونلی ساده، یک سد عایق نازک میان دو الکتروود رساناست. طبق قوانین الکتروودینامیک کلاسیک، هیچ جریانی از یک سد عایق عبور نمی کند. اما طبق قوانین مکانیک کوانتومی، یک احتمال متناهی برای عبور الکترون از سد عایق وجود دارد (تونل زنی کوانتومی) [۱۱]. بنابراین با اعمال ولتاژ بایاس، جریان تونل زنی برقرار می شود. صرف نظر از عوامل دیگر، جریان تونل زنی با ولتاژ بایاس متناسب است. به عبارت دیگر، اتصال تونلی مانند یک مقاومت مقدار ثابت رفتار می کند. چنین مقاومتی همان مقاومت اهمی است. مقدار این مقاومت به صورت نمایی با ضخامت سد تغییر می کند و اندازه نوعی ضخامت سد از مرتبه یک تا چند نانومتر است.

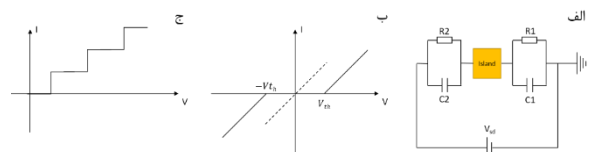
ساختار متشکل از دو الکتروود رسانا که با یک لایه عایق از هم جدا شده اند، نه تنها یک مقاومت دارد، بلکه یک ظرفیت خازنی متناهی نیز از خود نشان می دهد. می دانیم برای دو رسانا که با یک عایق از هم جدا شده اند، بار و ولتاژ متناسبند:

(۱)

$$Q = CV$$

که در آن، Q بار کل روی رسانا، C ظرفیت خازنی و V ولتاژ میان رساناهاست.

بنابراین برای اتصال‌های تونلی حاضر در SET، نه تنها یک مقاومت بلکه یک ظرفیت خازنی نیز در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب مدار معادل دو اتصال تونلی حاضر در یک ترانزیستور تک الکترونی را می‌توان به صورت مدار رسم شده در شکل ۲ الف نشان داد.



شکل ۲. الف) مدار معادل اتصالات تونلی یک ترانزیستور تک الکترونی. ب) نمودار مشخصه جریان-ولتاژ برای دو اتصال تونلی متقارن (خط پر) و برای حالتی که $\frac{e}{2} = |Q_0 - ne|$ (خط-چین)، Q_0 بار اولیه جزیره است. ج) نمودار مشخصه جریان-ولتاژ برای دو اتصال تونلی نامتقارن (پلکان کولنی)

هر اتصال تونلی میان جزیره با الکتروود سورس یا درین، با یک مقاومت و خازن موازی مدل می‌شود. مقدار مقاومت با مقاومت تونل-زنی الکترون تعیین می‌گردد و ظرفیت خازن به ابعاد جزیره وابسته است. جزیره یک نقطه کوانتومی با ابعاد چند نانومتر است. پارامترهای R_1 و C_1 مقاومت و خازن پایه سورس و جزیره، و R_2 و C_2 مقاومت و خازن اتصال جزیره و درین می‌باشند. پارامتر V_{sd} ولتاژ اعمال شده بین سورس و درین است.

با افزایش V_{sd} از مقدار صفر به مقادیر بالاتر، ابتدا هیچ جریانی میان الکترودهای سورس و درین برقرار نمی‌شود. زیرا انتقال یک الکترون به جزیره و یا خارج ساختن یک الکترون از آن نیازمند صرف انرژی‌ای برابر انرژی شارژ الکتروستاتیک می‌باشد. این توقف جریان الکترونی سد کولنی نامیده می‌شود و اولین بار در دهه شصت میلادی توسط گیاور در اتصالات تونلی تشکیل شده از نانوذرات فلزی مشاهده شد [۱۲]. سد کولنی نتیجه برهم‌کنش دافعه الکترون-الکترون روی جزیره است. یک ترانزیستور تک الکترونی از این پدیده برای کنترل انتقال تک الکترون‌ها به جزیره استفاده می‌کند [۱۳].

انرژی شارژ الکتروستاتیک یا انرژی کولنی برابر است با:

$$E_c = \frac{e^2}{2C} \quad (۲)$$

که در آن e بار الکترون و C ظرفیت خازنی کل می‌باشد. جریان میان الکترودهای سورس و درین تنها در صورتی برقرار می‌شود که ولتاژ اعمال شده (V_{sd}) قادر به برقراری ولتاژ ϕ در نقطه کوانتومی باشد به طوری که:

$$e\phi \geq E_c = \frac{e^2}{2C} \quad (۳)$$

کمترین مقدار این ولتاژ، ولتاژ آستانه خوانده می‌شود و با V_{th} نشان داده می‌شود. بنابراین در نمودار جریان-ولتاژ ترانزیستور تک الکترونی، ناحیه‌ای به عرض $2V_{th}$ با جریان صفر مشاهده می‌شود. وقتی ولتاژ اعمال شده به ولتاژ آستانه برسد، یک الکترون به

نقطه کوانتومی وارد و یا از آن خارج شده و جریان برقرار می‌شود. با ورود الکترون به نقطه کوانتومی از اتصال ۱، الکترون دیگری تمایل بالایی برای خروج از نقطه کوانتومی از اتصال ۲ پیدا خواهد کرد. بنابراین با ورود الکترون اول به نقطه کوانتومی، تقریباً به صورت آتی، الکترون دیگری از آن خارج می‌شود. در این حالت نمودار مشخصه جریان-ولتاژ به صورت شکل ۲ ب خواهد بود.

اگر مقاومت تونل‌زنی اتصال‌های تونلی تفاوت بسیار بزرگی داشته باشند، به عنوان مثال $R_{T2} \gg R_{T1}$ باشد، یک رفتار پلکانی در مشخصه جریان-ولتاژ مشاهده می‌شود. در این حالت نیز با اعمال ولتاژی برابر ولتاژ آستانه، یک الکترون از اتصال ۱ به نقطه کوانتومی وارد شده و جریان برقرار می‌شود. اما به دلیل مقاومت تونل زنی بالای اتصال ۲، الکترون به سرعت از نقطه کوانتومی خارج نمی‌شود و خروج الکترون نیازمند اعمال ولتاژ بالاتری می‌باشد. در این حالت، در اغلب زمان‌ها، یک بار اضافه بر روی نقطه کوانتومی قرار دارد. بنابراین افزایش بیشتر جریان نیازمند اعمال ولتاژی برای غلبه بر انرژی الکتروستاتیک بزرگتری می‌باشد. در نتیجه جریان به طور متناسب با ولتاژ تغییر نمی‌کند و تنها زمانی افزایش می‌یابد که ولتاژ اعمال شده برای غلبه بر انرژی کولنی دو الکترون کافی باشد [۸]. این رفتار منجر به افزایش پله-ای جریان نسبت به ولتاژ می‌شود و به پلکان کولنی معروف است (شکل ۲ ج).

حال به بررسی کمی این رفتار می‌پردازیم. انرژی الکتروستاتیک مورد نیاز برای شارژ نقطه کوانتومی با n الکترون برابر است با:

$$E = \frac{(ne)^2}{2C} \quad (۴)$$

از آنجا که در شرایط واقعی نقطه کوانتومی ممکن است به واسطه حضور ناخالصی‌ها، گروه‌های قطبی یا غیره دارای بار خالص صفر نباشد، بار خالص Q_0 که لزوماً مضرب صحیحی از بار الکترون نیست برای نقطه کوانتومی در نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر، در یک آزمایش واقعی، نقطه کوانتومی با دو الکتروود کوپل شده است که برای هر اتصال یک ظرفیت خازنی در نظر گرفته می‌شود (C_1 و C_2). بنابراین ظرفیت خازن معادل برابر $C_1 + C_2$ خواهد بود. با در نظر گرفتن بار Q_0 و ظرفیت خازنی اتصالات، رابطه ۴ به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

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

تغییر انرژی الکتروستاتیک سیستم با افزودن یک الکترون به نقطه کوانتومی برابر است با:

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n = \frac{(Q_0 - (n+1)e)^2}{2(C_1 + C_2)} - \frac{(Q_0 - ne)^2}{2(C_1 + C_2)} = \frac{e^2}{2(C_1 + C_2)} (2n + 1 - \frac{2Q_0}{e}) \quad (۶)$$

وقتی نقطه کوانتومی ابتدا کاملاً خنثی باشد، یعنی $Q_0 = 0$ ، تغییر انرژی الکتروستاتیک برابر است با $\frac{e^2}{2(C_1 + C_2)}$ حالت جالب دیگر وقتی اتفاق می‌افتد که $\frac{e}{2} = |Q_0 - ne|$ ، در این حالت $\Delta E = 0$ بوده و سد کولنی اتفاق نمی‌افتد! نمودار مشخصه جریان-ولتاژ این حالت با خط‌چین در شکل ۲ ب نشان داده شده

گسستگی انتقال الکترون را از بین ببرد. برای جلوگیری از این مشکل، انرژی کولنی باید از نوسانات حرارتی بیشتر باشد. بنابراین، یک شرط لازم برای مشاهده پدیده تک الکترونی به این صورت است که:

$$E_c = \frac{e^2}{2C} \gg K_B T \quad (10)$$

که در آن K_B ثابت بولتزمن و T دما برحسب کلون است. این شرط بیان می‌کند که برای مشاهده اثر گسستگی انتقال الکترون از سد تونلی در دمای اتاق، ظرفیت خازنی باید کمتر از ۳/۰۹ aF باشد:

$$\frac{e^2}{2C} \gg K_B T \Rightarrow C \ll \frac{e^2}{2K_B T} \approx 3.09 \times 10^{-18} F \quad (11)$$

برای داشتن یک اتصال تونلی با این ظرفیت خازنی، اندازه جزیره باید کوچکتر از ۱۰ نانومتر باشد. زمان مشخصه مورد نیاز برای شارژ و یا تخلیه جزیره از طریق مقاومت تونلی برابر است با:

$$\Delta t = R_t C \quad (12)$$

که در آن R_t مقاومت تونل‌زنی اتصال تونلی و C ظرفیت خازنی اتصال است. طبق اصل عدم قطعیت هایزنبرگ:

$$\Delta E \Delta t > \frac{h}{4\pi} \Rightarrow R_t > \frac{h}{2\pi e^2} = 25813 \Omega \quad (13)$$

که در آن h ثابت پلانک می‌باشد. نتایج تجربی نیز نشان داده‌اند که این شرط لازم برای مشاهده اثرات شارژ تک الکترونی است.

۳- ساخت ترانزیستور تک الکترونی

ترانزیستورهای تک الکترونی به عنوان اجزایی برای مدارهای مجتمع با توان مصرفی پایین و چگالی بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. برای دستیابی به این موضوع، باید ترانزیستورهای تک الکترونی با قابلیت کار کردن در دمای اتاق تولید شوند. در بخش قبل به حدود لازم ظرفیت خازنی و نوسانات حرارتی برای عملکرد درست ترانزیستور تک الکترونی اشاره شد. این محدودیت‌ها ما را ملزم به استفاده از جزیره‌هایی با ابعاد کوچکتر از ۱۰ نانومتر و با اتصالات تونلی با ظرفیت بسیار کوچک (کمتر از ۳ aF) و با مقاوت تونل‌زنی مناسب در ترانزیستور تک الکترونی می‌کنند. با پیشرفت روش لیتوگرافی بیم الکترونی و فراهم آمدن امکان ساخت طرح‌هایی با ابعاد چند ده نانومتر به این روش، ترانزیستورهای تک الکترونی‌ای با جزایر بسیار کوچک و اتصالات با ظرفیت خازنی کم ساخته شدند. اما در تمام این ترانزیستورها ظرفیت خازنی جزیره به حدود ۱۰۰ aF می‌رسید [۱۷-۱۴].

ماتسوموتو و همکارانش با کمک گرفتن از میکروسکوپ تونلی روبشی به عنوان الکتروند آندیزاسیون در ساخت طرح نانومتری بر مشکلات مربوط به کنترل اندازه و جایگاه ساختار غلبه کرده و خطوطی از جنس تیتانیوم اکسید به عرض ۱۸ نانومتر و ارتفاع ۳ نانومتر بر روی سطح فلز تیتانیوم ایجاد کردند [۱۸]. یک سال بعد آن‌ها با استفاده از همین روش ترانزیستور تک الکترونی ساختند که در دمای اتاق پلکان کولنی با پله‌های ۱۵۰ میلی‌ولتی نشان می‌داد [۱۹]. شکل ۱۳ الف طرحواره مراحل ساخت ترانزیستور تک

است. بنابراین واضح است که بار اولیه روی نقطه کوانتومی نقش بسیار مهمی در انتقال الکترون در این سیستم بازی می‌کند. این توقف عملکرد سد کولنی به دلیل حضور بار بر روی نقطه کوانتومی از مهمترین مشکلات ترانزیستور تک الکترونی می‌باشد. برای برقراری جریان در اتصالات تونلی، باید ولتاژ به اندازه کافی بزرگی اعمال شود تا بر سد کولنی غلبه کرده و الکترون به نقطه کوانتومی وارد و یا از آن خارج شود. حال اندازه این ولتاژ مورد نیاز را بدست می‌آوریم.

به ازای ولتاژ اعمال شده برابر V ، پتانسیل ϕ ایجاد شده در نقطه کوانتومی نسبت به زمین (ولتاژ اتصال با ظرفیت خازنی C_1) برابر است با:

$$\phi = \frac{C_2}{C_1 + C_2} V \quad (V) \quad (14)$$

با افزایش V ، ϕ متناسب با آن افزایش می‌یابد. وقتی انرژی مربوطه برابر انرژی شارژ شدن ΔE (رابطه ۶) شود، یک الکترون به نقطه کوانتومی اضافه می‌شود. یعنی:

$$\frac{eC_2}{C_1 + C_2} V = \frac{e^2}{2(C_1 + C_2)} (2n + 1 - \frac{2Q_0}{e}) \quad (15)$$

اگر بار خالص اولیه روی نقطه کوانتومی صفر باشد، یعنی $Q_0=0$ ، داریم:

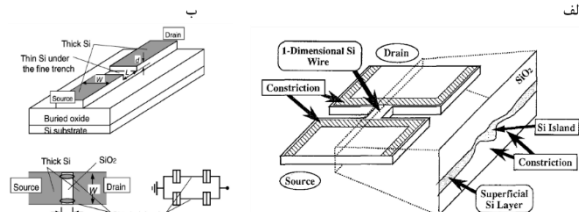
$$V_{th,1} = \frac{e}{2C_2} (2n + 1) \quad (16)$$

$V_{th,1}$ ولتاژ آستانه برای انتقال یک الکترون از سورس به نقطه کوانتومی است. اگر $n=0$ و $Q_0=0$ ، ولتاژ آستانه برای انتقال یک الکترون به نقطه کوانتومی از خازن C_1 ، برابر است با $\frac{e}{2C_2}$. در این حالت، به طور متناظر ولتاژ آستانه برای انتقال یک الکترون از خازن C_2 ، برابر $\frac{e}{2C_1}$ خواهد بود. بنابراین ولتاژ آستانه قابل مشاهده برای برقراری جریان، مینیمم این دو مقدار خواهد بود. پلکان کولنی در ولتاژهای آستانه برای تغییر تعداد الکترون‌های روی نقطه کوانتومی از n به $n+1$ اتفاق می‌افتد.

همانطور که در شکل ۱ نشان داده شد، در ترانزیستور تک الکترونی جزیره به طور خازنی به الکتروند سومی که الکتروند گیت نامیده می‌شود کوپل شده است و ولتاژی به گیت اعمال می‌شود (V_g). ولتاژ گیت انتقال تک تک الکترون‌ها را کنترل می‌کند و بدین ترتیب کنترل‌کننده قطع یا وصل بودن ترانزیستور می‌باشد. در حالت قطع، هیچ تراز انرژی در نقطه کوانتومی برای تونل زنی الکترون‌ها از سورس به جزیره در دسترس نیست و تمام ترازهای انرژی با انرژی کمتر از انرژی الکترون در سورس اشغال شده‌اند. وقتی یک ولتاژ مثبت به الکتروند گیت اعمال می‌شود، ترازهای انرژی جزیره در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرند. بدین ترتیب الکترون می‌تواند از سورس به جزیره و از آنجا به الکتروند درین تونل بزند. علیرغم اینکه در یک ترانزیستور معمولی الکترون‌ها به طور پیوسته در حرکتند اما با کوچک شدن ابعاد جزیره در ترانزیستور تک الکترونی (در مقیاس نانومتر)، انرژی ترانزیستور کوانتیده شده و در نتیجه پدیده شارژ و تخلیه گسسته خواهد بود.

شارژ و تخلیه یک اتصال تونلی به نوسانات حرارتی حساس است. نوسانات حرارتی می‌تواند حرکت الکترون‌ها را مختل کرده و اثر

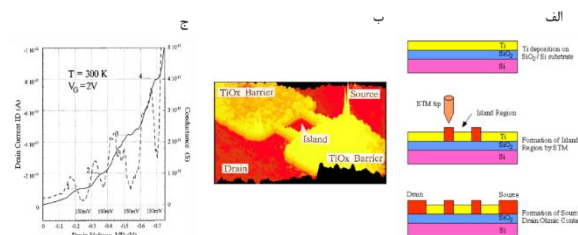
به ساختار به ترانزیستور تک الکترونی تبدیل شد. وقتی لایه سیلیکون سطحی تحت اکسیداسیون حرارتی قرار می‌گیرد، نه تنها لایه بالایی بلکه لایه زیرین در نقاط نزدیک به لبه نیز اکسید می‌شود. این اتفاق به دلیل تجمع اتم‌های اکسیژن در این نقاط اتفاق می‌افتد. اما در نقاط میانی سیم سیلیکونی، استرس مکانیکی ناشی از رشد سیلیکون دی اکسید بیشتر است و مانع از اکسیداسیون بیشتر سیم سیلیکونی می‌شود. به این ترتیب نقاط هاشورخورده در شکل ۴ الف نسبت به نقاط دیگر بیشتر اکسید شده، نازک می‌شوند و به عنوان اتصال تونلی در ساختار ترانزیستور تک الکترونی ایفای نقش می‌کنند [۲۱]. در واقع در این روش، نه تنها اندازه جزیره کوچکتر از اندازه اولیه می‌شود، بلکه اتصالات تونلی به طور خود به خود در دو سر سیم سیلیکونی ایجاد می‌شوند. با لایه نشانی یک لایه از جنس پلی سیلیکون آلاییده با فسفر بر روی سیم سیلیکونی به عنوان الکترود گیت، ساخت ترانزیستور تکمیل می‌شود. به این روش ترانزیستورهایی با ظرفیت خازنی بسیار کوچک تا حد 1 aF ساخته شدند [۲۲،۲۴].



شکل ۴. الف) طرحواره ساختار سیم سیلیکونی و نواحی دو بعدی مجاور بعد از اکسیداسیون گرمایی در ساخت ترانزیستور تک الکترونی به روش اکسیداسیون وابسته به ساختار [۲۱] ب) طرحواره ساختار اولیه مورد استفاده در ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی دوقلو به روش اکسیداسیون وابسته به ساختار عمودی قبل و بعد از اکسیداسیون حرارتی [۲۵]

روش اکسیداسیون وابسته به ساختار عمودی که روشی مستخرج از روش اکسیداسیون وابسته به ساختار است قادر به ساخت ترانزیستور تک الکترونی با یک جفت جزیره می‌باشد [۲۵،۲۶]. برای ساخت ترانزیستور به این روش، گودالی کوچک در ساختار سیم سیلیکونی اولیه تعبیه می‌شود. در شکل ۴ ب طرحواره ساختار مورد استفاده قبل و بعد از اکسیداسیون حرارتی نشان داده شده است. در طی فرایند اکسیداسیون حرارتی بخش‌های ضخیم سیم سیلیکونی بدون تغییر باقی مانده و قسمت میانی بخش نازک سیم سیلیکونی (زیر گودال) اکسید می‌شود. بدین ترتیب در لبه‌های بخش نازک سیم سیلیکونی دو جزیره کوچک با اندازه تقریباً یکسان تشکیل می‌شود. این جزایر در واقع در سیلیکون دی اکسید جاسازی شده‌اند و از طریق سدهای تونلی که به طور خودبه‌خود طی فرایند اکسیداسیون ایجاد شده‌اند به نواحی سیم سیلیکونی با ضخامت بیشتر ارتباط دارند. بدین ترتیب با قرار دادن یک لایه الکترود گیت در بالای این جزایر، دو ترانزیستور تک الکترونی با اتصال موازی به یکدیگر بدست می‌آیند. از آنجا که در این روش ساختار اولیه سیم سیلیکونی در راستای عمودی دستکاری می‌شود، این روش اکسیداسیون وابسته به ساختار عمودی نامیده شده است [۲۵].

الکترونی با استفاده از نوک میکروسکوپ تونلی روبشی را نشان می‌دهد. ابتدا یک لایه نازک به ضخامت 3 nm از فلز تیتانیوم بر روی زیرلایه سیلیکون که سطح آن به روش حرارتی به سیلیکون دی اکسید تبدیل شده است، لایه نشانی می‌شود. سپس خطوط نازک تیتانیوم اکسید به روش آنندیزاسیون بر روی لایه تیتانیوم تشکیل می‌شوند. برای این کار از نوک میکروسکوپ تونلی روبشی به عنوان کاتد استفاده می‌شود و رطوبت محیط به عنوان الکترولیت ایفای نقش می‌کند. شکل ۳ ب تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی ناحیه جزیره ترانزیستور تک الکترونی را نشان می‌دهد.



شکل ۳. الف) طرحواره مراحل ساخت ترانزیستور تک الکترونی با استفاده از میکروسکوپ تونلی روبشی. ب) تصویر میکروسکوپ نیروی اتمی ناحیه جزیره ترانزیستور تک الکترونی. ج) مشخصه جریان-ولتاژ ترانزیستور تک الکترونی در دمای اتاق [۱۹،۲۰]

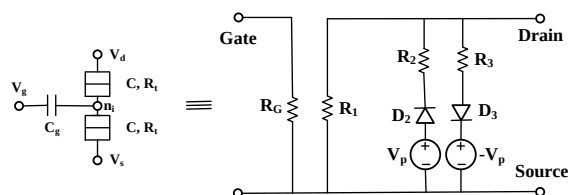
مشخصه جریان-ولتاژ این ترانزیستور تک الکترونی، که در دمای اتاق و با اعمال ولتاژ گیت برابر 2 V ولت اندازه‌گیری شده، در شکل ۳ ج نشان داده شده است. در این شکل خط پیوسته جریان و خط چین ظرفیت خازنی ترانزیستور را نشان می‌دهد. به دلیل ضخامت متفاوت اتصالات تونلی دو طرف جزیره در این ترانزیستور که برابر 18 nm و 27 nm ساخته شده است، مشخصه جریان-ولتاژ به شکل پلکان کولنی رفتار می‌کند. در فاصله ولتاژ صفر تا ولتاژ 0.75 V ولت 4 پلکان کولنی با فواصل تقریبی 150 mV ولت به وضوح قابل مشاهده است. ظرفیت خازنی با افزایش ولتاژ بایاس تقریباً در همان فواصل 150 mV ولتی نوسان می‌کند.

تاگاهاشی و همکارانش دو روش جدید برای ساخت ترانزیستورهای تک الکترونی سیلیکونی بسیار کوچک به نام‌های اکسیداسیون وابسته به ساختار و اکسیداسیون وابسته به ساختار عمودی طراحی کردند [۲۱-۲۴]. آن‌ها در واقع یک ساختار سیلیکونی کوچک را به یک ترانزیستور تک الکترونی کوچک تبدیل کردند. این روش‌ها از پدیده ویژه‌ای که به هنگام اکسیداسیون حرارتی ساختارهای کوچک سیلیکون بر روی سیلیکون دی اکسید اتفاق می‌افتد بهره می‌برند. مشاهده شد که مقدار اکسیداسیون در نقاط خاصی، که به طرح اولیه ساختار وابسته است، می‌تواند تقویت شود. به همین دلیل این روش‌ها اکسیداسیون وابسته به ساختار نامیده شدند. برای ساخت ترانزیستور تک الکترونی، تاگاهاشی و همکارانش ابتدا با کمک نانولیتوگرافی بیم الکترونی، نانوسیم سیلیکونی به ضخامت 20 nm و طول 50 nm تا 200 nm بر روی ویفر SIMOX ایجاد کردند. سپس این ساختار یک بعدی به روش اکسیداسیون وابسته

$$R_1(Vg) = CR_1 + CR_2 \cdot \cos(CF_1 \cdot Vg) \quad (14)$$

$$(15)$$

$R_2(Vg) = R_3(Vgs, V_{ds}) = CV_p / (CI_2 - 2 \cdot CV_p / R_1(Vgs, V_{ds}))$
 مقاومت‌های موجود در مدل به شدت غیرخطی می باشند و نیاز است در شبیه سازی مقادیر لحظه ای آنها با توجه به ولتاژ گیت محاسبه و لحاظ گردد. پارامترهای CF_1 , CV_p , CI_2 , CR_1 و CR_2 برای تنظیم مشخصه‌های ولتاژ-جریان در ولتاژهای مختلف گیت مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقادیر پارامترهای فوق در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۶. مدار معادل یک ترانزیستور تک الکترونی

جدول ۱. مقادیر پارامترها

CF_1	CV_p	CI_2	CR_1	CR_2
60	0.02	0.2×10^{-9}	300×10^6	100×10^6

شبیه‌سازهای مدارات الکتریکی متداول که بر مبنای قوانین کیرشهف بنا نهاده شده‌اند در شرایطی که بار الکتریکی پیوسته فرض شود قابل استفاده هستند. اما در همه مداراتی که در آنها ترانزیستور تک الکترونی بکار رفته پدیده تونل‌زنی وجود دارد و بنابراین انتقال بار بصورت گسسته خواهد بود. بطور کلی سه روش برای شبیه‌سازی مدارات مبتنی بر ترانزیستور تک الکترونی وجود دارد که عبارتند از: ۱- روش مدلسازی ماکرو با SPICE ۲- روش مونت کارلو و ۳- روش معادله حاکم [۲۰].

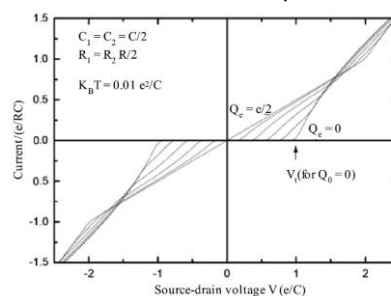
۱- روش مدلسازی ماکرو با SPICE: می توان مشخصه I-V یک ترانزیستور تک الکترونی را به همان روشی که ترانزیستور دو قطبی یا اثر میدانی در SPICE مدلسازی می‌شود، شبیه سازی نمود [۳۰]. مهمترین مزیت این روش سرعت خیلی بالای آن در شبیه‌سازی نسبت به دو روش دیگر است. به این ترتیب با این روش مدارات با تعداد ترانزیستور تک الکترونی زیاد را نیز می‌توان در مدت مناسبی شبیه‌سازی نمود. از نظر تئوری مهمترین عیب این روش به این موضوع بر می‌گردد که در آن تعامل کوئنی بین ترانزیستورهای تک الکترونی مجاور لحاظ نشده است، که این موضوع برای تحلیل صحیح مدارات ضروری است. در برخی مدلسازی‌های صورت گرفته با این روش، این نقص با یک مرحله پیش پردازش برطرف شده است. با این کار تمام وابستگی‌های یک ترانزیستور تک الکترونی به المانهای اطراف قبل از شبیه‌سازی آن لحاظ می‌گردد.

۲- روش مونت کارلو: شیوه مونت کارلو با تمام وقایع تونل ممکن شروع شده و احتمال آنها محاسبه می‌گردد. سپس وقایع بر حسب احتمال وقوع مرتب شده و یکی از وقایع ممکن به صورت تصادفی انتخاب می‌گردد. این کار دفعات زیادی انجام شده تا

از دیگر روش‌های ساخت ترانزیستور تک الکترونی می‌توان به روش‌هایی اشاره کرد که در آنها نانوذرات مورد استفاده به عنوان جزیره ابتدا به روش‌های شیمیایی تهیه شده و سپس این نانوذرات میان الکترودهای سورس و درین قرار می‌گیرند [۲۷-۲۹]. برای این کار الکترودهای سورس و درین ابتدا به روش‌های لیتوگرافی بیم الکترونی در فواصل مناسب از یکدیگر بر روی زیرلایه مناسب جاسازی می‌شوند. به عنوان مثال کلین و همکارانش ابتدا نانوذراتی با ابعاد چند نانومتر را با روش‌های شیمیایی خیس تولید کردند و سپس لایه‌ای از این نانوذرات بر روی ساختاری که از اتصالات طلا بر روی ویفر سیلیکون تشکیل شده است و قبلاً به روش لیتوگرافی بیم الکترونی ساخته شده، لایه نشانی می‌کردند. [۲۷، ۲۸]. خنداگر و همکارانش از روش به دام انداختن الکتروستاتیک برای قرار دادن نانوذرات از پیش تهیه شده فلزی میان الکترودها استفاده کردند [۲۹].

۴- مدل‌سازی ترانزیستور تک الکترونی

منحنی مشخصه جریان-ولتاژ ترانزیستور تک الکترونی برای ولتاژهای مختلف گیت در شکل ۵ نشان داده شده است. قابل ذکر است در ولتاژ گیت صفر، انسداد کوئنی رخ می‌دهد. در این حالت هیچ الکترونی نمی‌تواند به داخل یا خارج جزیره تونل بزند و در نتیجه جریان درین-سورس صفر است. با افزایش ولتاژ درین-سورس و عبور از حد بحرانی، ترانزیستور روشن شده و می‌تواند از خود جریان عبور دهد. تاثیر ولتاژ گیت-سورس این است که ولتاژ بحرانی درین-سورس برای هدایت سوئیچ را کاهش می‌دهد. لازم به ذکر است که در بایاس ترانزیستور تک الکترونی، معمولاً ولتاژ درین-سورس کوچک و در حد میلی‌ولت می‌باشد، در حالی که ولتاژ گیت می‌تواند به چند ولت نیز برسد.



شکل ۵. منحنی مشخصه جریان-ولتاژ ترانزیستور تک الکترونی تحت ولتاژهای گیت مختلف

در شکل ۲ مدار معادل ماکرو یک ترانزیستور تک الکترونی نشان داده شده است. متناسب با مشخصه‌های ولتاژ-جریان درین-سورس، این مدل از دو شاخه شامل مقاومت، دیود و منبع ولتاژ تشکیل شده است. برای جاری شدن جریان در هر دو بایاس مثبت و منفی درین-سورس، جهت دیود D_2 و منبع ولتاژ V_2 در جهت عکس دیود D_3 و منبع ولتاژ V_3 قرار داده شده است. انرژی شارژ شدن، تابعی از ولتاژ گیت بوده و به طور دوره‌ای تغییر می‌کند. این وابستگی در روابط (۱۴) و (۱۵) ارائه شده است.

انتقال الکترون‌ها از طریق شبکه شبیه‌سازی شود [۶]. وقایع تونل-زنی مستقل از هم و با توزیع نمایی در نظر گرفته می‌شوند. تئوری تک الکترونی ارتودکس معادله نرخ تونل‌زنی را برای هر پیوند در یک مدار بزرگ بصورت زیر ارائه می‌دهد:

$$\Gamma(\Delta F) = \frac{\Delta F}{q_e^2 R_T (1 - e^{(-\Delta F / k_B T)})} \quad (16)$$

که در آن ΔF تغییر انرژی آزاد در زمانی است که یک الکترون از طریق پیوند تونل زده و عبور می‌کند. پارامترهای k_B و Γ ، RT به ترتیب مقاومت تونل، نرخ تونل‌زنی و ثابت بولتزمن می‌باشند. تغییر در انرژی آزاد که تا اندازه‌ای می‌توان آن را معادل تغییر در انرژی سیستم دانست از بررسی کل مدار قابل درک است. می‌توان با استفاده از ماتریس ظرفیت سیستم، ΔF را محاسبه کرد. اگر نرخ تونل‌زنی در یک فرآیند پواسن گنجانده شود، بلوک‌های ساختاری اصلی برای شبیه‌سازی مبتنی بر مونت کارلو پیاده‌سازی می‌شوند. فرآیند پواسن می‌تواند بصورت زیر تغییر فرم داده شود:

$$\tau = \frac{-\ln r}{\Gamma} \quad (17)$$

که r یک عدد تصادفی بین $[0,1]$ با توزیع نرمال است و τ زمانی است که در آن یک الکترون تونل‌زنی می‌کند. فرآیند مونت کارلو به صورت زیر است:

الف- شروع با یک لیست از همه وقایع تونل‌زنی با نرخ‌های تونل‌زنی مشخص در شرایط بایاسینگ فعلی
ب- زمان‌های تونل‌زنی تصادفی عینی T_i را برای همه وقایع محاسبه می‌کنیم.

ج- واقعه با کمترین مقدار τ اول رخ داده و به عنوان مرحله برنده مونت کارلو لحاظ می‌شود.

د- ولتاژ و بار در تمامی گره‌های مدار بروزرسانی می‌شود.
ه- از طریق نمونه‌گیری تصادفی، نرخ‌های تونل‌زنی جدید محاسبه شده و برنده‌های جدید تعیین می‌گردند.

اگر این فرآیند دفعات زیادی تکرار شود، رفتار ماکروسکوپی مدار می‌تواند محاسبه شود.

۳- روش معادله حاکم: در روش مونت کارلو نتایج با جمع آوری آماری حاصل می‌شوند. با در نظر گرفتن وقایع زیادی با هم بطور متوسط نتیجه صحیح حاصل می‌شود. به عنوان یک راه حل جایگزین می‌توان مجموعه‌ای از معادلات را برای تشریح فرآیندهای انتقال شارژ در مدارهای مبتنی بر ترانزیستور تک الکترونی پیدا نمود، که بصورت جبری می‌توان آنها را حل کرد.

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = \sum [\Gamma_{ij} P_j(t) - \Gamma_{ji} P_i(t)] \quad (18)$$

که در آن Γ_{ij} نرخ انتقال بار از حالت j به حالت i بوده و $P_i(t)$ احتمال اشغال وابسته به زمان حالت i می‌باشد. این معادله به معادله حاکم معروف است. حل این معادله ظاهراً بسیار آسان است ولی این یک معادله با ماتریس نمایی است و حل عددی آن بسیار مشکل است. از آنجایی که تعداد حالت‌های ممکن بینهایت است، مجبوریم که آنهایی که بیشترین احتمال را دارند در نظر بگیریم. انجام این اولویت‌بندی در بیشتر مدارات غیر ممکن است زیرا هر طرح ساده‌ای تعداد حالت‌های بسیار زیادی داشته که

منجر به خیلی بزرگ شدن ماتریس شده و اهمیت تعدادی از آنها نیز معلوم نیست. می‌توان از یک الگوی تطبیقی استفاده نمود که از یک حالت و یا یک مجموعه از حالت‌ها شروع کرده و به تدریج تمام فضای حالت را برای پیدا نمودن حالت‌های مرتبط‌تر جستجو می‌کند. برای مدارات بسیار کوچک روش معادله حاکم مزیت‌هایی نسبت به روش مونت کارلو دارد [۳۱].

سه روش مذکور برای مدلسازی ترانزیستور تک الکترونی در شبیه‌سازی‌هایی همانند SIMON، MOSES و KOSEC بکار گرفته شده‌اند. در این شبیه‌سازی‌ها برای محاسبه حالت‌های بار از تمام جزایر کولنی بمنظور لحاظ نمودن تعامل بین جزایر کولنی مجاور بکار گرفته می‌شود. این فرآیندها غالباً بر اساس روش مونت کارلو بوده و از آنجا که این روش مبتنی بر محاسبه شارژ متوسط حالت‌ها در هر مرحله است و نیاز است کلیه مراحل کاملاً ساماندهی شوند، زمان زیادی برای شبیه‌سازی نیاز است. سایر شبیه‌سازی‌ها در این خصوص عبارتند از SENECA، MATLAB و SPICE. در جدول ۲ مقایسه‌ای بین این سه روش ارائه شده است.

جدول ۲: مقایسه بین روش‌های مختلف شبیه‌سازی ترانزیستور تک الکترونی

پارامتر	روش ماکرو مدل SPICE	روش مونت کارلو	روش معادله حاکم
زمان شبیه‌سازی	کم	زیاد	زیاد
دقت	کم	زیاد	زیاد
سد کولنی	نمی‌تواند لحاظ شود	لحاظ می‌شود	لحاظ می‌شود
سایز مدار مورد شبیه‌سازی	بزرگ	متوسط	بسیار کوچک
شبیه‌ساز	PSPICE, MATLAB	SIMON, MOSES	MATLAB, SPICE

۵- کاربردهای ترانزیستور تک الکترونی

با توجه به ویژگی‌های منحصر بفرد ترانزیستورهای تک الکترونی از آنها می‌توان در کاربردهای مختلفی بهره جست [۱۰، ۱۱]. ذیلاً به ارائه کلیاتی از برخی از این کاربردها می‌پردازیم.

الف) الکترومتر بسیار حساس: از ترانزیستورهای تک الکترونی می‌توان در ساخت الکترومترهای بسیار حساس برای استفاده در برخی از آزمایشات فیزیک استفاده کرد. برای مثال از این الکترومتر می‌توان در مشاهده دقیق اثرات زوجیت در ابررساناها بهره جست. با این الکترومتر می‌توان جریان‌های در حدود ۲۰-۱۰ آمپر را اندازه‌گیری نمود. بنابراین از این چنین الکترومتری می‌توان در اندازه‌گیری کمیت‌ها در پدیده‌های کوانتومی استفاده نمود.

ب) دروازه‌های منطقی: مصرف توان در مدارات منطقی مبتنی بر المان‌های متداول قابل ملاحظه است. این موضوع به ابعاد و جریان کشیده شده توسط پایه‌های کنترلی آنها برمی‌گردد. با استفاده از دروازه‌های منطقی مبتنی بر ترانزیستورهای تک الکترونی می‌توان علاوه بر کاهش ابعاد مدار، تنها با عبور تعداد محدودی الکترون دروازه را کنترل کرد و مصرف توان به حداقل ممکن می‌رسد.

تک الکترونی می‌توان به سختی فراهم آوردن رزولوشن مورد نیاز و کنترل برهمکنش میان ترانزیستورها در فواصل بسیار نزدیک از هم اشاره کرد. از سوی دیگر، شبیه سازی ترانزیستور تک الکترونی از اهمیت بالایی برخوردار است زیرا به درک رفتار و مشخصه‌های آن کمک بزرگی می‌کند و پیش‌بینی رفتار ابزار را قبل از طراحی و ساخت آن فراهم می‌سازد.

۵- منابع

1. K. K. Likharev, Single-electron devices and their applications, Proc. IEEE 87, 606–632, 1999.
2. H. R. Zeller and I. Giaever, Tunneling, Zero-Bias Anomalies, and Small Superconductors, Phys. Rev. 181, 789–799, 1969.
3. C. . Gorter, A possible explanation of the increase of the electrical resistance of thin metal films at low temperatures and small field strengths, Physica 17, 777–780, 1951.
4. K. K. Likharev, Correlated discrete transfer of single electrons in ultrasmall tunnel junctions, IBM J. Res. Dev. 32, 144–158, 1988.
5. K. K. Likharev, Single-Electronics: Correlated Transfer of Single Electrons in Ultrasmall Junctions, Arrays, and Systems, Granular Nanoelectronics 371–391, 1991.
6. S. S. Khakhkhar, Computer Engineering a Comparative Study of Macro Models of Single Electron Transistor, Journal of information, knowledge and research in computer engineering 2, 428–432, 2012.
7. Z. A. . Durrani, Coulomb blockade, single-electron transistors and circuits in silicon, Phys. E Low-dimensional Syst. Nanostructures 17, 572–578, 2003.
8. S. Goyal and A. Tonk, A Review towards Single Electron Transistor, Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng. 4, 36–39, 2015.
9. O. Vince, A Brief Introduction to Single Electron Transistors, 1–6, 2011.
10. O. Kumar and M. Kaur, Single Electron Transistor: Applications & Problems, Int. J. VLSI Des. Commun. Syst. 1, 24–29, 2010.
11. L. Esaki, New Phenomenon in Narrow Germanium p-n Junctions," Phys. Rev. 109, 603–604, 1958.
12. I. Giaever and H. R. Zeller, Superconductivity of Small Tin Particles Measured by Tunneling, Phys. Rev. Lett. 20, 1504–1507, 1968.
13. V. Singh, A. Agrawal, and S. Singh, Analytical Discussion of Single Electron Transistor (SET), Int. J. Soft Comput. Eng. 2, 502–507, 2012.
14. D. Ali and H. Ahmed, Coulomb blockade in a silicon tunnel junction device, Appl. Phys. Lett. 64,

(ج) میدل‌های الکترونیک قدرت: در سال‌های اخیر بکارگیری ترانزیستورهای تک الکترونی در مدارات الکترونیکی مجتمع و الکترونیک قدرت رو به افزایش است. این موضوع به دلیل حساسیت بالای آنها نسبت به بار الکتریکی، مصرف پایین انرژی و چگالی بالای مجتمع‌سازی می‌باشد. سرعت قطع و وصل بالای ترانزیستورهای تک الکترونی آنها را برای کاربردهای سوئیچینگ فرکانس بالا بسیار مناسب می‌کند. با افزایش فرکانس کاری مدارات الکترونیک قدرت، ابعاد المانهای مدار کاهش یافته و تلفات هدایتی مدار کاهش می‌یابد. از جمله کاربردهای ترانزیستورهای تک الکترونی در الکترونیک قدرت می‌توان به نانو اینورترها و نانو چاپرها برای درایو میکروروباتها، MEMS ها و NEMS ها اشاره کرد.

(د) سنسور تشخیص تشعشع مادون قرمز: ترانزیستور تک الکترونی می‌تواند برای آشکارسازی سیگنال‌های مادون قرمز در دمای اتاق نیز بکار رود. محاسبات پاسخ نوری سیستم‌های تک الکترونی به امواج الکترومغناطیس با فرکانس حدود E_c/h نشان داده است که بطور کلی پاسخ به این امواج با آنچه به عنوان تونل‌زنی مبتنی بر فوتون در تئوری تین‌گردن مطرح می‌شود، متفاوت است [۳۲]. در واقع این تئوری بر پایه تونل‌زنی‌های مستقل (غیرهمبسته) بنا شده است در حالی که در ابزارهای تک الکترونی انتقال الکترون عموماً همبسته است. بنابراین به نظر می‌رسد ابزارهای تک الکترونی، به ویژه آرایه‌های چند اتصاله یک بعدی با آهنگ تونل-زنی همزمان کند می‌توانند برای تشخیص امواج الکترومغناطیس با فرکانس بالا مورد استفاده قرار گیرند.

(ه) سنسور بسیار حساس تشخیص مایکروویو: دیگر کاربرد ترانزیستور تک الکترونی سنسور بسیار حساس مایکروویو می‌باشد. در ترانزیستور تک الکترونی، جزیره از طریق دو اتصال تونلی با ظرفیت خازنی بسیار کم و یک گیت خازنی به طور ضعیف به یک مدار بایاس کوپل شده است. در ولتاژهای بایاس پایین و دماهای کم، ممکن است تنها یک شبه ذره کوچک از طریق تونل زنی هدایت شده با فوتون به جزیره القا شود. از آنجا که زمان لازم برای تونل زنی این شبه ذره به خارج جزیره بسیار زیاد است، این شبه ذره عملاً در داخل جزیره به دام می‌افتد. در عین حال بار از طریق این سیستم انتقال پیدا می‌کند. از آنجا که فقط انتقال هدایت شده با فوتون می‌تواند سنسور را روشن کند، این ابزار می‌تواند برای آشکار سازی امواج مایکروویو مورد استفاده قرار گیرد.

گذشته از کاربردهای ذکر شده در این بخش، ترانزیستورهای تک الکترونی در کاربردهای دیگری از جمله سنسور بار، استانداردهای دما، اسپکتروسکوپی تک الکترونی و غیره مورد استفاده قرار گیرند.

۴- نتیجه گیری

اهمیت و قابلیت‌های منحصر به فرد ترانزیستور تک الکترونی به عنوان ابزاری که کنترل حرکت تک الکترون‌ها را فراهم می‌آورد بر هیچکس پوشیده نیست. همین قابلیت‌ها باعث توجه محققان به این نوع ترانزیستور و تلاش برای غلبه بر محدودیت‌های حوزه ساخت آن شده است. از مهمترین مشکلات ساخت ترانزیستورهای

- fabricated by vertical pattern-dependent oxidation, Japanese J. Appl. Physics, Part 1 Regul. Pap. Short Notes Rev. Pap. 39, 2325–2328, 2000.
26. Y. Takahashi, A. Fujiwara, Y. Ono, and K. Murase, Silicon single-electron devices and their applications, Proc. 30th IEEE Int. Symp. Mult. Log. 411–420, 2000.
27. D. L. Klein, R. Roth, A. K. L. Lim, A. P. Alivisatos, and P. L. McEuen, A single-electron transistor made from a cadmium selenide nanocrystal, Nature 389, 699–701, 1997.
28. D. L. Klein, P. L. McEuen, J. E. B. Katari, R. Roth, and A. P. Alivisatos, An approach to electrical studies of single nanocrystals, Appl. Phys. Lett. 68, 2574–2576, 1996.
29. S. I. Khondaker and Z. Yao, Fabrication of nanometer-spaced electrodes using gold nanoparticles, Appl. Phys. Lett. 81, 4613–4615, 2002.
30. Y. S. Yu, H. S. Lee, and S. W. Hwang, SPICE Macro-Modeling for the Compact Simulation of Single Electron Circuits, 33, S269–S272, 1998.
31. S. Mahapatra, V. Vaish, C. Wasshuber, K. Banerjee, and A. M. Ionescu, Analytical modeling of single electron transistor for hybrid CMOS-SET analog IC design, Electron Devices, 51, 1772–1782, 2004.
32. A. N. Cleland, D. Esteve, C. Urbina, and M. H. Devoret, An extremely low noise photodetector based on the single electron transistor, J. Low Temp. Phys. 93, 767–772, 1993.
- 2119–2120, 1994.
15. D. J. Paul, J. R. A. Cleaver, H. Ahmed, and T. E. Whall, Coulomb blockade in silicon based structures at temperatures up to 50 K, Appl. Phys. Lett. 63, 631–633, 1993.
16. M. Field, C. G. Smith, M. Pepper, D. A. Ritchie, J. E. F. Frost, G. A. C. Jones, and D. G. Hasko, Measurements of Coulomb blockade with a noninvasive voltage probe, Phys. Rev. Lett. 70, 1311–1314, 1993.
17. U. Meirav, M. A. Kastner, and S. J. Wind, Single-electron charging and periodic conductance resonances in GaAs nanostructures, Phys. Rev. Lett. 65, 771–774, 1990.
18. K. Matsumoto, S. Takahashi, M. Ishii, M. Hoshi, A. Kurokawa, S. Ichimura, and A. Ando, Application of STM Nanometer-Size Oxidation Process to Planar-Type MIM Diode, Jpn. J. Appl. Phys. 34, 1387–1390, 1995.
19. K. Matsumoto, M. Ishii, and K. Segawa, Application of scanning tunneling microscopy nanofabrication process to single electron transistor, J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct. 14, 1331–1335, 1996.
20. P. K. Sinha and S. Sanjay, Single Electron Transistor and its Simulation methods, 2, 1907–1925, 2014.
21. Y. Takahashi, H. Namatsu, K. Kurihara, K. Iwadate, M. Nagase, and K. Murase, Size dependence of the characteristics of si single-electron transistors on SIMOX substrates, IEEE Trans. Electron Devices 43, 1213–1217, 1996.
22. Y. Takahashi, A. Fujiwara, K. Yamazaki, H. Namatsu, K. Kurihara, and K. Murase, Si memory device operated with a small number of electrons by using a single-electron-transistor detector, Electron. Lett. 34, 45–46, 1998.
23. K. Iwdate, M. Nagase, K. Murase, S. Horiguchi, Y. Takahashi, K. Kurihara, Y. Nakajima, H. Namatsu, and M. Tabe, Fabrication technique for Si single-electron transistor operating at room temperature, Electron. Lett. 31, 136–137, 1995.
24. Y. Takahashi, A. Fujiwara, K. Yamazaki, H. Namatsu, K. Kurihara, and K. Murase, A Si Memory Device Composed of a One-Dimensional Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor Switch and a Single-Electron-Transistor Detector, Jpn. J. Appl. Phys. 38, 2457–2461, 1999.
25. Y. Ono, Y. Takahashi, K. Yamazaki, M. Nagase, H. Namatsu, K. Kurihara, and K. Murase, Single-electron transistor and current-switching device