طراحی و مدل‌سازی مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال سازگار با دمای اتاق به کمک نانوترانزیستورهای تک‌الکترونی با جزیره کوانتوم نقطه‌ای نیمه‌هادی

حامد امین زاده[1] محمد میرعلایی[2] محمد علی دشتی[3]

۱- دانشیار- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه پیام‌نور- تهران - ایران

haminzadeh@ieee.org

۲- کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر - بوشهر - ایران

miralaei_m@yahoo.com

۳- دانشجوی دکتری- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز - شیراز - ایران

dashti.ali1362@gmail.com

چکیده: در این مقاله، جزئیات طراحی و مدل‌سازی یک مبدل آنالوگ به دیجیتال سازگار با دمای اتاق با استفاده از نانوترانزیستورهای تک‌الکترونی با جزیره کوانتوم‌نقطه‌ای سیلیکونی ارائه شده است. در مقایسه با نانو ترانزیستورهای تک‌الکترونی با جزیره فلزی، استفاده از جزایر سیلیکونی در حد چند نانومتر سبب می‌شود که ترانزیستور عملکرد مطلوبی دردمای اتاق داشته باشد و نظام انسداد و نوسان کولنی آن پایدار گردد. نانو ترانزیستورهای با جزیره سیلیکونی همچنین همخوانی بیشتری با فرآیند ساخت CMOS دارند و می‌توان آن دو را به صورت ترکیبی و بر روی یک بستر مشترک پیاده‌سازی کرد. مبدل آنالوگ به دیجیتال این مقاله ، از نوسان‌های کولنی پایدار مشخصه جریان- ولتاژ ترانزیستورهای تک الکترونی سیلیکونی در دمای اتاق بهره‌برداری می‌کند. نمونه سه‌بیتی شبیه‌سازی شده از آن با فرکانس نمونه‌برداری 5 GS/s، از آرایش مقسم خازنی و سه زوج ترانزیستور تک الکترونی در آرایش مکمل استفاده می کند. شبیه‌سازی آن با استفاده از شبیه‌ساز مونت-کارلوی سایمون انجام گرفته است و نتایج بدست آمده حکایت از عملکرد پایدار ایستا و پویا در دمای اتاق دارد.

کلمات کلیدی: نانوترانزیستورهای تک‌الکترونی، فرآیند ساخت نانو، دمای اتاق، رژیم انسدادکولنی، مبدل های آنالوگ به دیجیتال با سرعت بالا و نوسان‌های کولنی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۲

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۷

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حامد امین زاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - بزرگراه ارتش- دانشگاه پیام‌نور - دانشکده‌ی مهندسی برق

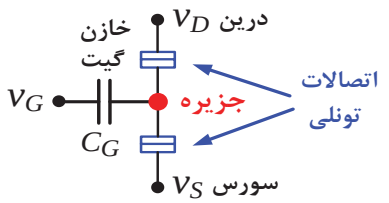
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]

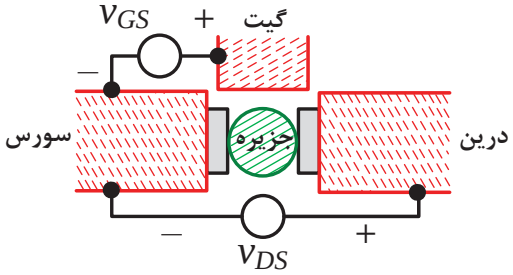
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.2 Summer 2017

۱- مقدمه

با کوچک‌تر شدن اندازه قطعات نیمه‌هادی و نزدیک شدن آنها به عناصر بنیادین طبیعت یعنی اتم‌ها و مولکول‌ها، چالش‌های جدیدی فراروی فن‌آوری ساخت این قطعات قرار گرفته و امکان پیاده‌سازی مؤثر آنها را با مشکل مواجه نموده است. مطالعات فعلی نشان می‌دهند که این محدودیت‌های بنیادین، در چند سال آینده مانع از کاهش بیشتر اندازه نانوترانزیستورهای CMOS با هدف افزایش سرعت و کاهش سطح آنها خواهند شد [۳-۱]. هم اینک نیز اثرات مرتبط با چالش‌های حوزه نانو شامل نویز، جریان نشتی بالا و مقاومت خروجی پایین، استفاده از نانوترانزیستورهای CMOS را در بسیاری کاربردها نامناسب کرده است [۶-۴]. چندین گزینه به‌منظور جایگزینی ترانزیستورهای ماسفت فراروی دانشمندان قرار دارد. یکی از آنها، استفاده از قطعه‌ای است که بر مبنای تونل‌زنی کنترل شده الکترون‌ها از میان سد پتانسیل کار می‌کند [۷]. 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 تک‌الکترونی» نامیده می‌شود. اساس کار نانوترانزیستورهای تک‌الکترونی (Single Electron Transistor یا به اختصار SET) بر مبنای همین تونل‌زنی متوالی در قالب دو اتصال فلزی عایق و یک جزیره بسیار کوچک (کوانتومی) مرکزی استوار است. شکل (۱) مدل مداری ترانزیستور SET را نشان می‌دهد. کاربرد سه پایانه اصلی یعنی سورس، درین و گیت دقیقا شبیه به پایانه‌های متناظر در ترانزیستورهای ماسفت است. الکترون‌ها از میان دو سد پتاسیل در بین اتصالات فلزی و جزیره تونل‌زنی کرده و، بسته به اندازه ولتاژ گیت، به صورت کنترل شده از سورس به درین راه می‌یابند (شکل (۲)). ولتاژ گیت، سطح پتاسیل جزیره مرکزی و آستانه تونل‌زنی را کنترل می‌کند و مقدار آن از مرتبه ولت است. ولتاژ اولیه گیت را می‌توان با اضافه کردن یک الکترود گیت جانبی (backgate) در کنار الکترود گیت اصلی تنظیم نمود. ترانزیستورهای SET حد نهایی افزاره‌های کلیدزنی با ابعاد نانومتری هستند و بر مبنای یکی از اصول بنیادین در ابعاد نانو، یعنی تونل‌زنی الکترون‌ها به یک جزیره کوانتومی فلزی، نیمه‌هادی یا مولکولی کار می‌کنند [۸,۹]. این قطعات به واسطه ویژگی‌های منحصر به فردی که از لحاظ توان مصرفی و سطح اشغالی فوق‌العاده کوچک دارند از پتاسیل بالای برای مجتمع-سازی برخوردار هستند. ادامه تحقیقات بر روی آنها، نوید افزایش چشم‌گیر تراکم مدارهای مجتمع را در آینده‌ای نزدیک می‌دهد [۳-۲].



شکل (۱): آرایش مداری یک ترانزیستور SET



شکل (۲): ساختار فیزیکی ترانزیستور SET

یک ویژگی منحصر به فرد ترانزیستورهای SET، تناوبی بودن جریان درین- سورس با تغییر ولتاژ گیت آن است که با عنوان «نوسان کولنی» شناخته می‌شود. منشاء اصلی آن، سازوکار نقل و انتقال الکترون‌ها به جزیره کوانتومی است که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

به ازای ولتاژ گیت صفر ولت، انسداد کولنی در جزیره رخ می‌دهد. در این وضعیت هیچ الکترونی قادر نیست که به داخل جزیره و یا از آن به خارج تونل‌زنی کند. لذا جریان درین- سورس و هدایت ترانزیستور برابر با صفر خواهند بود. با افزایش ولتاژ گیت، به تدریج انرژی پتانسیل جزیره کاهش یافته و اولین سطح انرژی خالی در مجاورت با سطوح فرمی درین و سورس قرار می‌گیرد. با اعمال ولتاژ درین- سورس چند ده میلی‌ولت، الکترون‌ها در این حالت قادر خواهند بود که از پایانه سورس به جزیره و سپس به درین تونل‌زنی نموده و جریان قابل اندازه گیری درین- سورس را ایجاد کنند. اگر ولتاژ گیت باز هم افزایش یابد، سطوح انرژی جزیره باز هم پایین‌تر آمده و یک الکترون آزاد در بالا-ترین سطح انرژی به دام می‌افتد. افزایش انرژی جزیره به واسطه حضور این الکترون، مجددا باعث انسداد کولنی می‌شود. تفاوت انسداد فعلی با قبلی (به ازای ولتاژ صفر ولت) آن است که یک الکترون اضافی در جزیره به دام افتاده است. واضح است که با افزایش بیشتر ولتاژ گیت انسدادهای جدیدی رخ داده و تعداد بیشتری الکترون به دام می‌افتند [۸,۱۰]. این پدیده باعث تغییر تناوبی هدایت انتقالی و جریان ترانزیستور با ولتاژ گیت خواهد شد که مبنای ایجاد نوسان‌های کولنی می‌باشد.

در ادامه این مقاله، در بخش ۱-۱ به مقایسه راهکارهای ممکن برای پیاده‌سازی مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال فلش می‌پردازیم. در این رابطه برتری‌های مبدل آنالوگ به دیجیتال ساخته شده از ترانزیستورهای SET را نسبت به ساختارهای معمول مبتنی بر ترانزیستورهای CMOS برخواهیم شمرد. مبدل فلش از نوع ترانزیستور تک الکترونی این مقاله، به کمک یک آرایش مداری بهینه موسوم به «تابع متقارن متناوب» (Periodic Symmetric Function یا PSF) طراحی شده است. تابع PSF یک تابع متناوب با دوره تناوب T_p و با نماد $F_p(X)$ است که وابسته به مجموع ورودی‌ها بوده ($X = \sum x_i$) و از رابطه $F_p(X) = F_p(X + T_p)$ تبعیت می‌کند. توابع مورد نظر با استفاده از ترانزیستورهای تک‌الکترونی با جزیره کوانتوم نقطه‌ای

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.2 Summer 2017

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]

سیلیکونی پیاده‌سازی شده‌اند. با مطالعه روابط موجود در مقالات، بخش ۲ به تحلیل رفتار بلوک اصلی سازنده مبدل پیشنهادی در دمای اتاق یعنی ترانزیستور SET سیلیکونی می‌پردازد. این ترانزیستورها دارای جزیره کوانتوم نقطه‌ای سیلیکونی به شکل کروی و با ابعاد زیر 10 نانومتر هستند. بر خلاف ترانزیستورهای SET با جزیره فلزی که تنها در دماهای نزدیک به صفر مطلق کارآیی مطلوب دارند، ترانزیستورهای مورد نظر دارای رفتاری پایدار در دمای اتاق ($T = 300^{o}\mathrm{k}$) هستند. در بخش ۳، رفتار ترانزیستور مورد نظر را شبیه‌سازی خواهیم کرد و یک آرایش مداری بهینه برای پیاده‌سازی مبدل بر مبنای توابع متقارن متناوب ارائه خواهیم کرد. توابع PSF کاربرد زیادی در مکمل‌گیری، شمارش و جمع و تفریق نمودن داده‌های دیجیتال دارند [۱۱,۱۲]. در این مقاله، اما، مشخصه ورودی- خروجی مبدل آنالوگ به دیجیتال با کمترین هزینه و به کمک توابع PSF پایدار در دمای اتاق پیاده‌سازی شده است. تابع موردنظر دارای تنها دو ترانزیستور SET مکمل با جزیره کوانتوم سیلیکونی است و در دمای اتاق عملکرد پایدار دارد. لذا طراحی یک مبدل آنالوگ به دیجیتال n بیتی و مبتنی بر ترانزیستورهای SET در دمای اتاق ممکن شده است. جزئیات شبیه سازی یک مبدل آنالوگ به دیجیتال ۳ بیتی از این نوع، در بخش سوم ارائه خواهد شد. در نهایت بخش چهارم به نتیجه‌گیری و جمع‌بندی مطالب اختصاص دارد.

۱-۱ مقایسه انواع مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال

مبدل‌های داده از ضروری‌ترین بلوک‌های پردازش اطلاعات در پردازش‌گرهای کنونی محسوب می‌شوند [۵]. در این مقاله، به مدل‌سازی و طراحی یک مبدل آنالوگ به دیجیتال مبتنی بر ترانزیستور SET پرداخته‌ایم. بر خلاف ترانزیستورهای ماسفت با قابلیت انتقال بار از زیر ناحیه گیت، نانوافزاره‌های SET از یک جزیره نانومتری برای انتقال بار به روش تونل‌زنی استفاده می‌کنند. این ترانزیستورها به دلیل مصرف توان فوق العاده پایین، سطح اشغالی کم و مشخصه ولتاژ- جریان منحصر به فرد، از پتانسیل بالایی برای استفاده در مبدل‌های داده برخوردار هستند [۱۳]. تاکنون ساختارهای متعددی برای پیاده‌سازی مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال فلش با استفاده از ترانزیستورهای SET، ماسفت و ترکیب آنها پیشنهاد شده است [۱۴,۱۵,۱۶,۱۷]. بررسی این مبدل‌ها نشان می‌دهد که نوع مبتنی بر ترانزیستور SET، فشرده‌تر و کارآمدتر بوده و از سرعت بالاتر و توان مصرفی پایین‌تری برخوردار است. به عنوان نمونه، مبدل n بیتی گزارش شده در [۱۴] تنها به n زوج ترانزیستور SET مکمل نیاز دارد. این در حالی که است که مبدل فلش متناظر با آن در فرآیند CMOS، به 2^n مقایسه‌کننده نیازمند است. این امر به معنای کاهش قابل توجه نرخ پیچیدگی و تعداد بلوک‌های لازم برای پیاده‌سازی مبدل (از نمایی به خطی) است و در درجه نخست، از خاصیت تناوب ذاتی جریان در ترانزیستورهای SET نشأت می‌گیرد. نباید این نکته را نیز از نظر دور داشت که پیچیدگی یک مقایسه‌کننده در فن‌آوری CMOS، به مراتب بیشتر از یک زوج SET مکمل ساده است. برخلاف مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال CMOS، مبدل‌های SET نیازی به کدکننده (Encoder) برای تبدیل کد خروجی به باینری ندارند. دلیل آن، وجود خاصیت تناوب ذاتی ترانزیستورهای SET است که باعث می‌شود که خروجی زوج SET مکمل، از ابتدا به شکل باینری باشد. مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال مبتنی بر نانو افزاره‌های SET را می‌توان بر مبنای توابع متقارن متناوب پیاده‌سازی نمود. اما عدم دسترسی به ترانزیستورهای با رفتار پایدار در دمای اتاق سبب شده است که کاربرد این بلوک (و مدارهای مشتق شده از آن)، اغلب به دماهای بسیار پایین و در محدوده چند درجه کلوین محدود گردد [۱۴,۱۵,۱۶,۱۷]. ساختار پیشنهاد شده در [۱۵]، از یک مدار ترکیبی شامل ترانزیستورهای ماسفت و SET به‌منظور طراحی مبدل استفاده می‌کند. به قیمت افزایش پیچیدگی، نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده توان مصرفی پایین‌تر و سرعت نمونه‌برداری بالاتر نسبت به مبدل CMOS یکسان است. نحوه شبیه‌سازی این مبدل، مبتنی بر برازش منحنی بر روی نمودارهای واقعی در دماهای بسیار پایین و به کمک شبیه‌ساز SPICE است. اما هیچ راهکاری برای پایدار و صحت عملکرد مبدل در دمای اتاق پیشنهاد نشده است.

در این مقاله از یک معماری بهینه برای پیاده‌سازی مبدل آنالوگ به دیجیتال فلش مبتنی بر ترانزیستورهای SET سیلیکونی استفاده شده است. در مقایسه با مبدل‌های رایج [۱۴,۱۵,۱۶,۱۷]، این ساختار به حداقل تعداد بلوک‌ها برای پردازش نیاز دارد. اگر چه تعداد بلوک‌های آن با ساختار پیشنهاد شده در مقاله [۱۵] برابری می‌کند، اما تابع متقارن متناوب آن تنها به دو SET سیلیکونی نیاز دارد. این در شرایطی است که دروازه دقیق موجود در [۱۵]، از ترکیب یک SET فلزی و دو ترانزیستور ماسفت شکل گرفته است. مزیت مهم دیگر ساختار پیشنهادی، توانایی آن در تولید خروجی پایدار در دمای اتاق است؛ در حالی که ساختارهای مبتنی بر SET قبلی لزوما در دماهای بسیار پایین عملکردی پایدار دارند.

۲- ترانزیستورهای تک الکترونی با جزیره کوانتوم نقطه‌ای سیلیکونی

طراحی یک مبدل داده کارآمد مبتنی بر ترانزیستورهای سیلیکونی در دمای اتاق، قبل از هر چیز نیازمند یک مدل دقیق از رفتار ترانزیستورهای موردنظر است [۸,۹,۱۸-۲۰]. برای این کار به یک توصیف دقیق و جامع از خواص بنیادین نانوترانزیستورهای تک‌الکترونی نیاز داریم. یک تئوری جامع برای درک چگونگی باردار شدن جزیره کوانتوم نقطه‌ای، مدل انسداد کولنی است که بر پایه تئوری‌های آماری شکل گرفته است. این مدل قادر است که رفتار ترانزیستور تک‌الکترونی با جزیره فلزی و نیمه‌هادی را تشریح کند [۷]. بر مبنای مدل انسداد کولنی، سازوکار انتقال بار در ترانزیستور SET از تونل‌زنی متوالی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.2 Summer 2017

الکترون‌ها به جزیره سرچشمه می‌گیرد. جزیره کوانتومی به صورت خازنی با الکترود گیت تزویج دارد و با تغییر ولتاژ گیت، سطوح انرژی جزیره نسبت به ترازهای فرمی الکترودهای سورس و درین تغییر می‌کنند. با این کار، نرخ انتقال الکترون از طریق جزیره کنترل می‌شود. انسداد کولنی زمانی اتفاق می‌افتد که هیچ تراز انرژی‌ای در مقابل ترازهای فرمی درین و سورس قرار نگیرد. لذا انتقال الکترون از سورس به درین متوقف می‌شود و تعداد الکترون‌های آزاد موجود در جزیره کوانتومی ثابت باقی می‌مانند.

انرژی لازم برای اضافه کردن یک الکترون جدید به جزیره با E_a نشان داده می‌شود که به میزان بار الکتریکی موجود در آن بستگی دارد. اثرات کوانتومی و کنش‌های بین الکترون‌ها می‌توانند بار جزیره را به‌صورت گسسته تغییر دهند. در مجموع، E_a برابر با حاصل جمع دو مولفه زیر است.

$$E_a = E_C + \Delta E \qquad (۱)$$

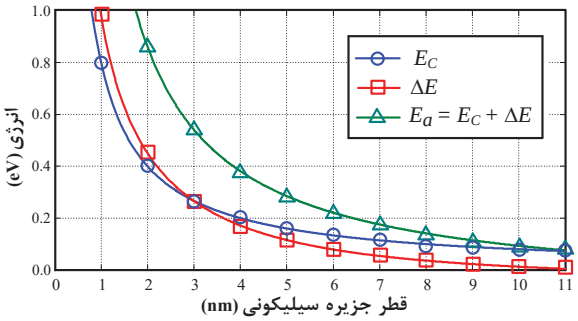
در آن، ΔE برابر با تفاوت بالاترین سطح انرژی اشغال شده به پایین‌ترین سطح انرژی اشغال نشده در جزیره کوانتومی و E_C انرژی لازم برای باردار شدن جزیره است که به میزان اندرکنش الکترون‌ها بستگی دارد [۷]. یک راه تقریبی برای بدست آوردن E_C، محاسبه انرژی لازم برای باردار شدن ظرفیت کل خازنی جزیره یا C_Σ است. مقدار این خازن برابر است با [۲۱]

$$C_\Sigma = C_S + C_G + C_D \qquad (۲)$$

در رابطه بالا C_S، C_G و C_D به ترتیب ظرفیت خازن‌های دیده شده از جزیره تا پایانه‌های سورس، گیت و درین می‌باشند. واضح است که با این نمادگذاری و با در نظر گرفتن e به‌عنوان بار الکترون، E_C از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۲,۲۳]

$$E_C = e^2/C_\Sigma \qquad (۳)$$

افزایش میزان نوسان الکترون‌ها با افزایش انرژی آنها در دماهای بالاتر از صفر مطلق، به تدریج سازوکار انسداد کولنی و انتقال کنترل شده الکترون‌ها را بر هم می‌زند. برای آنکه بتوانیم از نوسان های حرارتی در دمای اتاق صرفنظر کنیم باید همچنان رابطه $E_a \gg K_BT$ را برقرار نگاه داریم. طبق این رابطه تنها آن دسته از ترانزیستورهای تک الکترونی قادر هستند که در دمای اتاق، نوسان‌های کولنی پایدار داشته باشند که E_a به حد کافی بزرگ و از مرتبه چند الکترون‌ولت داشته باشند [۲۳]. در ترانزیستورهای SET با جزیره کوانتومی فلزی، ΔE همواره خیلی کوچکتر از E_C است. لذا طبق رابطه (۱)، E_a تقریباً برابر با E_C گردیده و رژیم انسداد کولنی در دمای اتاق به شرط $E_C \gg K_BT$ برقرار خواهد ماند. با توجه به اندازه متداول E_C، این شرط به هیچ وجه در مورد فلزات برقرار نمی‌باشد. به این ساز و کار، «رژیم کلاسیک انسداد کولنی» در فلزات می‌گویند و تحلیل آن بر مبنای تئوری ارتدکس انجام می‌گیرد [۷]. برخلاف جزایر فلزی، گسستگی سطوح انرژی در جزایر نیمه‌هادی با ابعاد نانومتری باعث می‌شود که ΔE آنها قابل مقایسه و یا حتی بزرگتر از E_C آنها باشد.



شکل (۳): تغییرات E_C، ΔE و E_a بر حسب قطر جزیره سیلیکونی

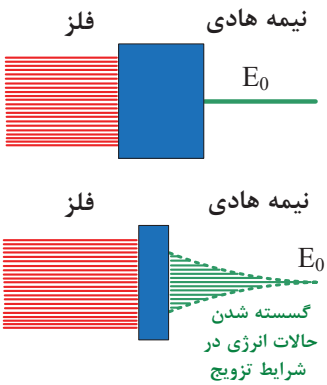
شکل (۳) نتیجه شبیه‌سازی E_C، ΔE و E_a را بر حسب قطر یک جزیره نیمه‌هادی سیلیکونی نشان می‌دهد. نمودار مذکور با حل معادلات شرودینگر سه بعدی برای یک کره سیلیکونی در ابعاد نانومتر و با استفاده از نرم‌افزار *Nextnano* بدست آمده است. با کاهش کافی قطر جزیره تا حد چند نانومتر می توان E_a را به قدر کافی افزایش داد و به رژیم نوسان کولنی پایدار در دمای اتاق و حتی بالاتر از دمای اتاق دست یافت.

ساز وکار انتقال بار در ترانزیستور SET با جزیره کوانتوم نقطه‌ای سیلیکونی کمی متفاوت از رژیم انسداد کولنی کلاسیک است و بر مبنای « رژیم انسداد کولنی کوانتومی» انجام می‌شود [۷,۱۰,۲۴]. از نقاط ضعف تئوری ارتدکس، صرفنظر کردن از گسستگی سطوح انرژی است. این وضعیت تنها برای جزایر فلزی معتبر می‌باشد [۲۵]. اما رژیم انسداد کولنی کوانتومی می‌تواند نرخ تونل‌زنی را به ازای هر سطح انرژی و با در نظر گرفتن گسستگی سطوح محاسبه نموده و تصویری از جریان عبوری و هدایت انتقالی ترانزیستور ارائه دهد.

شکل (۴) چگالی حالت‌های انرژی را قبل و بعد از اتصال فلز به نیمه‌هادی در ترانزیستور SET با جزیره سیلیکونی نشان می‌دهد. قبل از اتصال، چگالی حالات انرژی شامل یک سطح مشخص E_0 در جزیره و توزیع یکنواخت سطوح در الکترود فلزی است. ولی پس از تزویج الکترود با جزیره سطوح انرژی به شکل یکنواخت توزیع می‌شوند و مجددا در فواصل دورتر به سطح اولیه E_0 می‌رسد.

انرژی‌ای که پس از تزویج باعث تونل‌زنی و انتقال الکترون‌ها از درین به سورس می‌شود، انرژی آزاد نام دارد و از اختلاف انرژی کل ذخیره شده در قطعه و انرژی دریافت شده از منابع ورودی نشات می‌گیرد [۲۲]. تغییر تعداد الکترون‌های جزیره از n به $n+1$ منجر به تغییر انرژی آزاد می‌شود که آن را با ΔF نشان می‌دهیم. در حالت کلی، نرخ تونل‌زنی الکترون‌ها از سد پتانسیل فلز و جزیره کوانتوم نقطه‌ای نیمه‌هادی یک فرآیند تصادفی با توزیع احتمالی است. به کمک قانون طلایی فرمی می‌توان نشان داد که نرخ تونل‌زنی از حالات اشغال شده الکترود فلزی به حالات اشغال نشده جزیره سیلیکونی با n الکترون از رابطه زیر بدست می‌آید [۷,۲۲]

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.2 Summer 2017



شکل (۴): چگالی حالات انرژی قبل و بعد از تزویج الکتروها با جزیره کوانتوم نقطه‌ای نیمه‌هادی

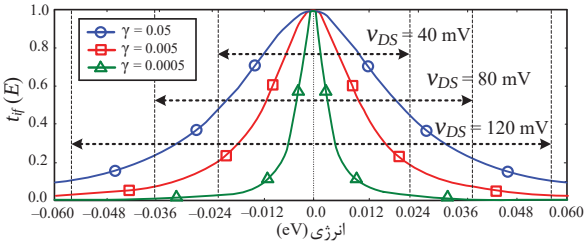
$$\Gamma(n,n+1)=\frac{2\pi}{\hbar}t_{if}\int_{-\infty}^{+\infty}f(E)[1-f(E-\Delta F)]dE \qquad (۴)$$

در رابطه بالا، t_{if} احتمال تونل‌زنی بین حالات اولیه و نهایی، $f(E_i)$ تابع توزیع فرمی احتمال پربودن سطح انرژی E_i در جزیره و $1-f(E_f)$ احتمال پیدا کردن سطح خالی انرژی E_f در جزیره است. برای جزایر کوانتوم نقطه‌ای سیلیکونی با سطوح انرژی گسسته، نمی‌توان t_{if} را برای همه سطوح ثابت فرض کرد. با یک تقریب خوب می‌توان t_{if} بر حسب انرژی را با یک تابع لورنتز و با ضابطه زیر مدل‌سازی نمود تا از آن برای تخمین هدایت انتقالی قطعه استفاده شود [۱۸,۲۴]

$$t_{if}(E)=\sum_n \alpha_n \frac{(\gamma_n/2)^2}{(E-E_n)^2+(\gamma_n/2)^2} \qquad (۵)$$

در رابطه بالا، $E_n(n=0,1,2,\dots)$ اندازه سطوح انرژی جزیره سیلیکونی و در شرایطی است که این سطوح در ابعاد نانومتری از یکدیگر گسسته شده‌اند. پارامتر γ_n برابر با پهنای تابع بالا در نصف ارتفاع بوده و فرکانس فرار الکترون از جزیره را نشان می‌دهد. متغیر $0\le\alpha_n\le 1$ نشان‌دهنده شدت عبور است و با شفافیت، طول و عرض سد پتانسیل ارتباط دارد. شکل (۵) حاصل شبیه‌سازی t_{if} یک ترانزیستور SET با جزیره سیلیکونی را بر حسب سطوح انرژی و به ازای مقادیر مختلف γ_n نمایش می‌دهد. به ازای سطوح انرژی پایین‌تر که متناظر با گسستگی کمتر آن سطوح است (مثلا در $\gamma_n=0.0005$)، t_{if} تقریبا مستقل از ولتاژ و جریان بوده و لذا به نرخ تونل‌زنی و جریان درین ثابت می‌انجامد (رابطه (۴)). ولی به ازای سطوح انرژی بالاتر ($\gamma_n=0.005$ و $\gamma_n=0.05$)، تغییرات ولتاژ درین-سورس به تغییرات شدیدتر جریان می‌انجامد.

تفاوت اصلی مشخصه جریان- ولتاژ ترانزیستورهای با جزیره نیمه-هادی و ترانزیستورهای با جزیره فلزی، از گسستگی سطوح انرژی و وابستگی t_{if} به انرژی ناشی می‌شود. این موضوع برای جزایر فلزی مصداق نداشته و t_{if} همواره ثابت است.



شکل (۵): احتمال تونلی‌زنی t_{if} بر حسب سطوح انرژی

۲-۱ شبیه سازی ترانزیستور

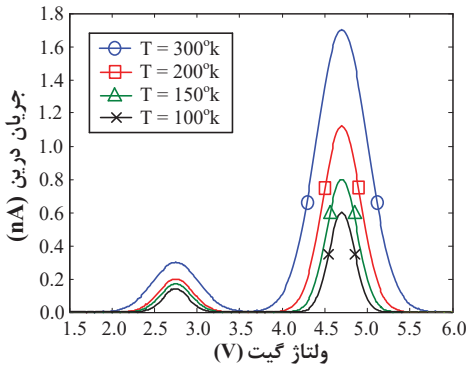
در این مقاله، از نرم‌افزارهای *Nextnano* و سایمون (*SIMON*) به-منظور شبیه‌سازی رفتار فیزیکی و مداری ترانزیستورهای تک‌الکترونی استفاده شده است [۲۶]. به کمک *Nextnano* می‌توان انرژی لازم برای باردار شدن جزیره E_C و نیز اختلاف سطوح انرژی ΔE را به صورت مجزا از هم بدست آورد. از طرف دیگر، شبیه‌ساز سایمون قادر است که اثرات گسسته شدن انرژی در جزیره را با تعریف یک تابع لورنتز مجزا لحاظ کند. تنظیم تابع لورنتز به طور دستی و با تنظیم ارتفاع (H) و پهنای (W) هر سطوح انرژی انجام گردید. این دو پارامتر مقاومت سد پتانسیل جزیره سلیکونی را نسبت به سطوح گسسته انرژی تغییر می‌دهند. متغیر H ارتفاع نهایی تابع لورنتز و متغیر W، پهنای هر سطح انرژی را در جزیره بر اساس شکل تابع لورنتز تعیین می‌کند. تعیین دقیق میزان W پیچیده است؛ اما با نرمالیزه کردن تابع لورنتز و در نظر گرفتن $H=1$ می‌توان اثرات ناشی از تغییر اندازه جزیره کوانتومی و میزان گسستگی و پهن شدن سطوح را به شکل ساده‌تری مطالعه نمود. چگونگی مدل‌سازی ترانزیستورهای SET، همچنان از بحث های داغ موجود در مقالات اخیر است [۸,۹]. در این مقاله مقادیر مجهول مدل به‌گونه‌ای تنظیم شده‌اند که نتایج بدست آمده با منحنی‌های جریان- ولتاژ ترانزیستور تک‌الکترونی ساخته شده با جزیره سیلیکونی کروی موجود در [۲۱] (و با خازن کلی $C_\Sigma=4\pi\varepsilon_r\varepsilon_0 r=0.43\ aF$) مطابق باشند. لازم به ذکر است که چنین خازن‌هایی به طور مستقیم پیاده‌سازی نمی‌شوند بلکه به شکل جانبی و از تزویج جزیره کروی با الکترودهای اطراف بدست می‌آیند. جزیره کروی از جنس سیلیکون با قطر ۲ نانومتر، توسط سدهای پتانسیلی با عایق SiO_2 محصور شده است. دو سطح اول انرژی آن، با حل معادله شرودینگر سه‌بعدی به کمک نرم‌افزار *Nextnano* بدست آمدند. این مقادیر به ترتیب برابر با 0.77 eV برای تراز انرژی پایه و 1.20 eV برای اولین تراز انرژی تحریک شده و از لبه باند هدایت هستند. لذا اختلاف بین این دو سطح انرژی (یا همان ΔE) در حدود 0.43 eV تخمین زده می‌شود. این اختلاف به عنوان یک پارامتر اولیه در شبیه-ساز سایمون لحاظ گردید و با استفاده از آن، مشخصه جریان- ولتاژ یک ترانزیستور SET نمونه شبیه‌سازی گردید. مقدار بدست آمده برای ΔE با انرژی لازم برای باردار شدن جزیره (یا همان E_C) قابل مقایسه است. به کمک نرم‌افزار *Nextnano* می‌توان تغییرات ΔE را بر حسب قطر جزیره کروی مطالعه کرده (شکل (۳)) و حداقل قطر لازم برای

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.2 Summer 2017

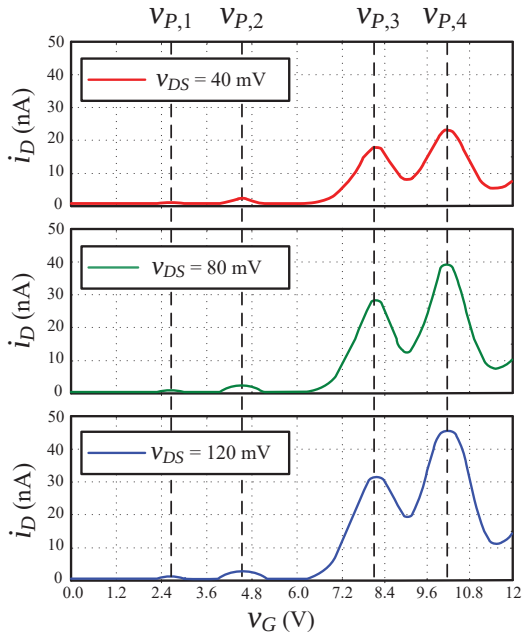
عملکرد پایدار در دمای اتاق را بدست آورد. چنین عملکرد مطلوبی تنها با جزایر کوانتومی سیلیکونی و با قطر حداکثر 3.5 nm حاصل می‌شود [۲۴,۲۷]. شکل (۶)، حاصل شبیه‌سازی جریان درین- ولتاژ گیت ترانزیستور را در دماهای مختلف و به ازای $v_{DS} = 50$ mV نمایش می‌دهد. نوسان‌های کولنی در همه دماها و از جمله دمای اتاق قابل رویت بوده و عملکرد مطلوب ترانزیستور تک الکترونی سیلیکونی را در دمای اتاق نوید می‌دهد. دامنه قله‌های جریان، با افزایش ولتاژ گیت و افزایش تعداد الکترون‌های اضافی در جزیره بزرگتر می‌شوند. دلیل این مساله را باید ناشی از وابستگی نمایی پهنای سطوح انرژی به ارتفاع و پهنای سد پتانسیل دانست. به عبارت دیگر، ارتفاع سد پتانسیل با افزایش v_{GS} کمتر می‌گردد که موجب می‌شود که احتمال تونل‌زنی الکترون‌ها از سد پتانسیل به صورت نمایی افزایش یابد. به عنوان یک نتیجه کلی، پهنا و ارتفاع قله‌های جریان با بیشتر شدن ولتاژ گیت افزایش می‌یابند.شکل (۷) نوسان‌های کولنی نمودار جریان- ولتاژ را در دمای اتاق و به ازای ولتاژهای درین- سورس مختلف نشان می‌دهد. با افزایش v_{DS}، ارتفاع و پهنای قله‌های جریان افزایش می‌یابند. در واقع به ازای هر ولتاژ درین- سورس، یک سطح انرژی مشخص از جزیره کوانتومی بین سطوح فرمی درین و سورس قرار می‌گیرد. لذا طبق شکل (۵)، آن قسمت از پهنای سطح انرژی که میان انرژی سورس و درین قرار گیرد مشخص کننده احتمال تونل‌زنی و اندازه قله جریان خواهد بود. برای آن دسته از سطوح انرژی که پهنای بیشتری دارند، افزایش ولتاژ اثر قوی‌تری بر روی قله خواهد گذاشت چرا که بیشتر شدن ولتاژ در هر گام، پهنای انرژی بیشتری را قابل رویت نموده و موجب افزایش قله جریان خواهد شد. نکته قابل تامل دیگر در شکل (۷) تغییر نرخ افزایش ارتفاع قله‌ها با افزایش ولتاژ گیت است. منشاء این قضیه را باید در انتقال تراز انرژی از حالت پایه (اوربیتال شبه s) به اولین تراز انرژی تحریک شده (اوربیتال شبه p) دانست. برای اوربیتال شبه p، احتمال حضور الکترون در لبه‌های جزیره کوانتومی (و پهنای سطوح انرژی) بیشتر از اوربیتال شبه s است [۲۷]. بنابراین دو قله ابتدایی جریان که مربوط به اسپین بالا و پایین تراز انرژی پایه هستند، ارتفاع بسیار کمتری نسبت به دو قله انتهایی (اسپین بالا و پایین تراز انرژی تحریک شده اول) دارند.

نکته پراهمیت دیگر در رابطه با مشخصه ترانزیستور SET سیلیکونی، نحوه محاسبه ولتاژ گیت معادل با قله‌های جریان (ولتاژهای $v_{P,1}$، $v_{P,2}$، $v_{P,3}$ و $v_{P,4}$ در شکل (۷)) است. الکترودهای درین، گیت و سورس دارای تزویج خازنی با جزیره کوانتومی هستند. لذا اعمال ولتاژ v_{DS} پتانسیل جزیره را به اندازه $(C_D/C_\Sigma)v_{DS}$ کاهش می‌دهد. فرض کنید که تنها راه برای افزایش جریان درین، کم‌کردن پتانسیل حالت‌های خالی انرژی در جزیره باشد به‌طوری‌که این سطوح در بین سطوح فرمی درین و سورس قرار گیرند. انرژی مورد نیاز برای خنثی‌سازی الکتریکی جزیره برابر است با

$$E_N = E_C/2 + \Delta E - v_{DS} \qquad (۶)$$



شکل (۶): منحنی جریان-ولتاژ ترانزیستور SET سیلیکونی؛ شامل نوسان های کولنی در دماهای مختلف



شکل (۷): تغییرات جریان بر حسب ولتاژ درین- سورس در دمای اتاق

با توجه به تزویج خازنی گیت، این انرژی معادل با ولتاژ گیتی به اندازه زیر است:

$$v_{G1} = \left(\frac{C_\Sigma}{C_G}\right)\left[\frac{e}{2C_\Sigma} + \frac{\Delta E}{e} - \frac{C_D}{C_\Sigma}v_{DS}\right] \qquad (۷)$$

برای آنکه جریان به حداکثر مقدار خود برسد، پایین ترین سطح انرژی باید در میانه سطوح فرمی درین و سورس قرار گیرد. لذا $v_{P,1}$ وقتی حاصل خواهد شد که ولتاژ گیت اضافی به مقدار $(C_\Sigma/C_G)(v_{DS}/2)$ نیز به v_{G1} اضافه شود:

$$v_{P,1} = \frac{C_\Sigma}{C_G}\left[\frac{e}{2C_\Sigma} + \frac{\Delta E}{e} - \frac{C_D}{C_\Sigma}v_{DS}\right] + \frac{C_\Sigma}{C_G}\left(\frac{v_{DS}}{2}\right) \qquad (۸)$$

با کمی افزایش ولتاژ، اولین سطح خالی انرژی با یک الکترون آزاد پر

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.2 Summer 2017

می‌شود و انسداد کولنی رخ می‌دهد. برای حداکثر شدن مجدد جریا باید سطوح انرژی مجددا به میزان $E_C = e^2/C_\Sigma$ کاهش یابند. این مقدار معادل با ولتاژ گیتی به قرار زیر است:

$$v_{P,2} = v_{P,1} + \frac{C_\Sigma}{C_G}\left(\frac{e}{C_\Sigma}\right) \quad (۹)$$

با افزایش بیشتر ولتاژ گیت، تغییر تراز انرژی رخ می‌افتد. لذا قله سوم با کاهش پتانسیل جزیره به میزان $E_a = E_C + \Delta E$ اتفاق می‌افتد که معادل با ولتاژ گیت به اندازه زیر است:

$$v_{P,3} = v_{P,2} + \frac{C_\Sigma}{C_G}\left(\frac{e}{C_\Sigma} + \frac{\Delta E}{e}\right) \quad (۱۰)$$

در تراز یکسان، قله چهارم با کاهش انرژی به میزان E_C رخ می‌دهد که معادل با ولتاژ گیت به اندازه زیر است:

$$v_{P,4} = v_{P,3} + \frac{C_\Sigma}{C_G}\left(\frac{e}{C_\Sigma}\right) \quad (۱۱)$$

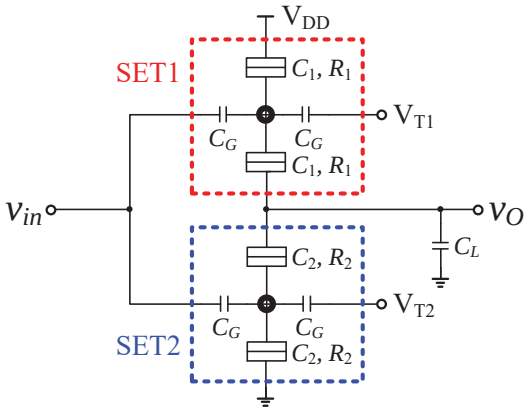
به همین ترتیب، نوسان های کولنی به ازای سطوح مختلف انرژی تکرار می‌شوند تا قله‌های بعدی از روابط مشابه بدست می‌آیند.

۳- مبدل های آنالوگ به دیجیتال مبتنی بر ترانزیستورهای تک الکترونی در دمای اتاق

سرعت بالا و سطح اشغالی بسیار کوچک، ترانزیستورهای SET را در زمره بهترین گزینه‌ها به‌منظور پیاده‌سازی مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال پرسرعت قرار می‌دهد. در این قسمت، ابتدا جزئیات طراحی یک مبدل آنالوگ به دیجیتال فلش شامل ترانزیستورهای تک الکترونی سیلیکونی را در بخش ۳-۱ مطالعه می‌کنیم. پس از آن در بخش ۳-۲، رفتار ایستا و پویای یک مبدل ۳ بیتی از این نوع با فرکانس نمونه-برداری 5 GS/s را شبیه‌سازی نموده و نتایج حاصل را با کارهای تحقیقاتی مشابه مقایسه می‌کنیم.

۳-۱ نحوه طراحی مبدل

شکل (۸) آرایش مداری PSF استفاده شده در این مقاله را به تصویر می‌کشد. ساختار آن شامل دو ترانزیستور SET مکمل است که مشابه با دروازه معکوس‌کننده در مدارهای CMOS رفتار می‌کنند. با این حال، نوسان‌های کولنی ترانزیستورهای SET1 و SET2، مشخصه انتقالی متفاوتی را نسبت به یک معکوس‌کننده ساده نتیجه می‌دهد. هر ترانزیستور دارای یک گیت اصلی و یک گیت جانبی است. تزریق سیگنال آنالوگ ورودی v_{in} از طریق گیت اصلی انجام شده و سطح منطقی ولتاژ دیجیتال خروجی v_O را تعیین می‌کند. برای این کار، ولتاژ گیت‌های جانبی توسط منابع V_{T1} و V_{T2} به گونه‌ای تنظیم می شوند که رفتار مکمل ترانزیستوری، مشابه با دو نوع pMOS و nMOS در فن‌آوری CMOS، حاصل شود.



شکل (۸): آرایش مداری بلوک‌های PSF پیاده‌سازی شده با دو ترانزیستور SET با جزایر سیلیکونی

قبل از هر چیز لازم است که پارامترهای اصلی دو ترانزیستور SET تعریف شوند. عناصر R_1، R_2 و C_1 و C_2 به ترتیب نشان‌دهنده مقاومت و خازن پیوندهای تونلی هستند. اندازه خازن‌ها به شکل فیزیکی پیوندها بستگی دارند در حالی که مقاومت‌ها، به طور مستقیم وابسته به نرخ تونل‌زنی الکترون‌ها هستند (رابطه (۴)). عملکرد مطلوب در دمای اتاق مستلزم آن است که انرژی لازم برای باردار شدن جزیره بسیار بزرگتر از نوسان‌های حرارتی بوده و مقاومت‌های تونل‌زنی R_1 و R_2 به‌مراتب کوچک‌تر از مقاومت واحد کوانتومی یعنی $R_Q = h/e^2 \approx 28.5\ \mathrm{k\Omega}$ گردند. مقدارهای دقیق R_1، R_2 و C_1 و C_2 از طریق شبیه‌سازی و پس از تعیین دقیق نوع ترانزیستور و ابعاد جزیره کوانتومی آن تعیین می‌شوند. دو خازن مساوی C_G در شکل (۸)، نشان‌دهنده خازن‌های تزویج گیت‌ها با جزیره کوانتومی هستند و دوره تناوب نوسان های کولنی را در دمای اتاق طبق روابط (۸) تا (۱۱) تعیین می‌کنند.

عملکرد کلی دو ترانزیستور SET موجود در PSF را می‌توان با در نظر گرفتن هر یک به عنوان یک کلید ساده بررسی نمود. وضعیت روشن بودن (ON) یا خاموش بودن (OFF) هر کلید توسط ولتاژ گیت اصلی یعنی v_{in} تعیین می‌شود. مقاومت روشن بودن (R_{ON}) و خاموش بودن (R_{OFF}) هر ترانزیستور تک‌الکترونی که در دمای بالاتر از صفر مطلق کار می‌کند، متفاوت از مقدارهای ایده‌آل صفر و بینهایت است. با این حال، اگر ترانزیستور در یک دمای مشخص پایدار باشد، R_{OFF} آن به طرز قابل‌توجهی بزرگتر از R_{ON} خواهد بود ($R_{OFF} \gg R_{ON}$). فرض کنید که سیگنال اعمال شده به ورودی PSF به گونه‌ای باشد که ترانزیستور SET1 را در وضعیت روشن و ترانزیستور SET2 در وضعیت خاموش قرار دهد. در این شرایط، خازن بار C_L از طریق SET1 و با ولتاژ تغذیه V_{DD} شارژ می‌شود و خواهیم داشت:

$$v_O = R_{OFF}V_{DD}/(R_{OFF} + R_{ON}) \approx V_{DD} \quad (۱۲)$$

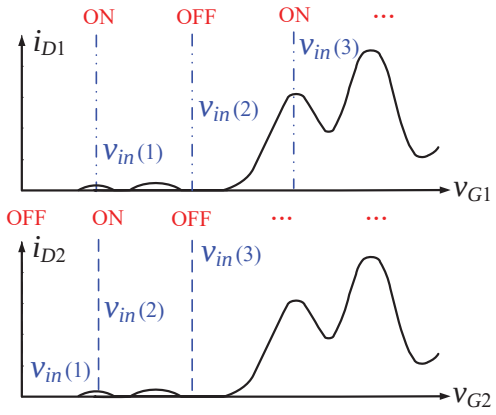
این ولتاژ در خروجی به عنوان سطح '1' منطقی تلقی می‌شود. در حالت دیگر، فرض کنید که ترانزیستور SET1 در وضعیت خاموش و

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.2 Summer 2017

ترانزیستور SET2 در وضعیت روشن قرار داشته باشند. خازن بار از طریق SET2 دشارژ می‌شود و ولتاژ خروجی از رابطه

$$v_O = R_{ON}\mathrm{V_{DD}}/(R_{OFF}+R_{ON}) \approx 0 \qquad (۱۳)$$

و معادل با سطح ’0‘ منطقی بدست می‌آید. شکل (۹) نوسان



شکل (۹): تغییر جریان درین با ولتاژ گیت ترانزیستورهای SET1 و SET2 در دمای اتاق

های دوره‌ای دو ترانزیستور SET1 و SET2 را به شکل گرافیکی به تصویر می‌کشد. با فرض آنکه $v_{in} = v_{in}(1) = 0$ باشد،SET1 روشن و SET2 خاموش بوده و v_O طبق رابطه (۱۲) به $\mathrm{V_{DD}}$ نزدیک خواهد شد. هم اکنون، اگر v_{in} را از $v_{in}(1)$ به $v_{in}(2)$ افزایش دهیم جریان SET1 کاهش یافته و جریان SET2 بیشتر می‌شود. لذا وضعیت روشنایی دو ترانزیستور برعکس خواهد شد و ولتاژ خروجی طبق رابطه (۱۳) نزدیک به صفر بدست می‌آید. اگر باز هم v_{in} را از $v_{in}(2)$ به $v_{in}(3)$ افزایش دهیم، وضعیت دو ترانزیستور به‌گونه‌ای خواهد شد که ولتاژ خروجی مجددا برابر با ’1‘ منطقی می‌گردد. این نوسان‌های تناوبی ادامه می‌یابند تا رفتار PSF بحث شده در بخش مقدمه بدست آید.

با استفاده از ترانزیستورهای SET سیلیکونی می‌توان PSF شکل (۸) را به گونه‌ای طراحی کرد که در دمای اتاق رفتار پایدار داشته باشد. برای این کار، ولتاژ گیت جانبی ترانزیستور SET2 را برابر با صفر در نظر می‌گیریم:

$$\mathrm{V_{T2}} = 0\ \mathrm{V}. \qquad (۱۴)$$

پس از آن، ولتاژ گیت جانبی SET1 را بر روی قله اول جریان (رابطه (۸)) تنظیم می‌کنیم. لذا، به ازای $v_{in}(1)$، وضعیت روشنایی دو ترانزیستور به گونه‌ای می‌شود که خروجی برابر با سطح ’1‘ منطقی گردیده و رفتار مطلوب نشان‌داده‌شده در شکل (۹) حاصل شود:

$$\mathrm{V_{T1}} = v_{P,1} = \frac{C_\Sigma}{C_G}\left[\frac{e}{2C_\Sigma} + \frac{\Delta E}{e} - \left(\frac{C_D}{C_\Sigma}\right)v_{DS} + \frac{v_{DS}}{2}\right] \simeq \frac{C_\Sigma}{C_G}\left[\frac{e}{2C_\Sigma} + \frac{\Delta E}{e}\right]. \qquad (۱۵)$$

با این نتایج، ولتاژ ورودی $v_{in}(2) = v_{in}(1) + \mathrm{V_{T1}}$ ترانزیستور SET2 را در وضعیت روشن و ترانزیستور SET1 را در وضعیت خاموش قرار داده و وضعیت خروجی را از ’1‘ منطقی به ’0‘ منطقی سوق می‌دهد. سومین تغییر سطح منطقی، به‌ازای v_{in} رابطه زیر رخ می دهد:

$$v_{in}(3) = v_{P,3} = v_{P,1} + \frac{C_\Sigma}{C_G}\left(\frac{2e}{C_\Sigma} + \frac{\Delta E}{e}\right) \qquad (۱۶)$$

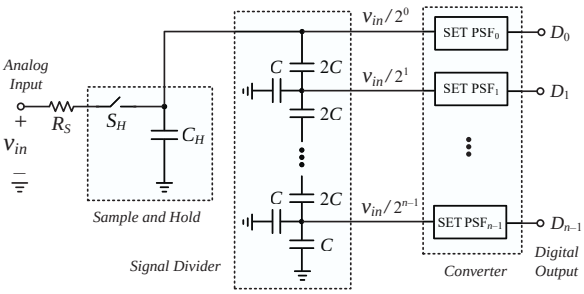
این ورودی مجددا باعث افزایش ولتاژ خروجی می شود. لذا، در مجموع، نوسان‌های دوره‌ای بین سطوح منطقی ’1‘ و ’0‘ تکرار می‌شوند تا مشخصه PSF ایده‌آل در دمای اتاق حاصل شود.

شکل (۱۰) آرایش بلوکی مبدل آنالوگ به دیجیتال n بیتی مبتنی بر PSF های سازگار با دمای اتاق را نمایش می‌دهد. این مبدل از یک مدار نمونه‌بردار در ورودی، یک شبکه خازنی مقسم ولتاژ برای تولید مقیاس‌های صحیحی از سیگنال آنالوگ نمونه‌برداری شده و هسته اصلی شامل n بلوک PSF تشکیل می‌شود. مدار نمونه‌بردار از یک خازن نگهدارنده و یک کلید ساده تشکیل شده است که کلید موجود در آن، با استفاده از یک ترانزیستور SET ساخته می‌شود. این مدار، نمونه اولیه را تا اتمام پردازش و تولید معادل دیجیتال خروجی نگاه می‌دارد و با فرکانس نمونه‌برداری کلی مبدل کار می‌کند. مقسم ولتاژ ورودی، سیگنال آنالوگ v_{in} را به مقیاس‌های مناسب $v_{in}/2$، $v_{in}/4$ و .... و$v_{in}/2^{n-1}$ جهت اعمال به PSF های موجود در هسته تبدیل می‌کند. این سیگنال‌ها سپس توسط PSF ها پردازش می‌شوند و با توجه به نوسان‌های کولنی آنها، به طور مستقیم به کدهای دیجیتال صحیح تبدیل می‌شوند. کمترین بیت قابل تمایز توسط مبدل $v_{LSB}(\min)$ را می‌توان با توجه به اختلاف قله‌های فرد جریان در شکل (۹) تخمین زد. این اختلاف، طبق روابط (۸) تا (۱۱)، منجر به رابطه زیر برای $v_{LSB}(\min)$ می‌شود:

$$v_{LSB}(\min) = \frac{1}{2}\left(\frac{2e}{C_\Sigma} + \frac{\Delta E}{e}\right)\frac{C_\Sigma}{C_G} \qquad (۱۷)$$

وابستگی رابطه بالا به ΔE، مصالحه میان قدرت تفکیک مبدل را با عملکرد پایدار در دمای اتاق آشکار می‌کند. به قیمت کاهش دمای کاری مبدل، قدرت تفکیک را می‌توان با کاهش ΔE بهبود بخشید. در بهترین حالت و به ازای $\Delta E = 0$، قدرت تفکیک به $v_{LSB}(\min) =$ e/C_G محدود شده و بازه دمایی مشابه با حالتی خواهد شد که از ترانزیستورهای SET فلزی استفاده شود. نکته بعدی بهتر شدن قدرت تفکیک مبدل با افزایش C_G (از طریق افزایش قطر جزیره و الکترود گیت) می‌باشد. با این کار اما

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.2 Summer 2017



شکل (۱۰): مبدل آنالوگ به دیجیتال ۳ بیتی نمونه مبتنی بر SET سیلیکونی در دمای اتاق

E_C طبق رابطه (۳) کاهش یافته و منجر به کاهش حداکثر دمای عملکرد پایدار مبدل می‌گردد. افزایش C_G همچنین بیشتر شدن اثر بارگذاری بلوک‌های PSF بر روی شبکه نردبان خازنی می‌شود. برای محاسبه اثر بارگذاری بلوک‌های PSF بر روی شبکه نردبان خازنی، ابتدا باید ظرفیت خازن ورودی ترانزیستورهای تک‌الکترونی (C_{SET}) را با در نظر گرفتن نکات زیر تخمین بزنیم:

۱- وقتی بار خالص موجود در جزیره در مقایسه با بار گیت کوچک باشد، $C_{SET} \approx C_G$ خواهد بود.

۲- وقتی بار خالص جزیره قابل مقایسه با بار گیت گردد، از بار خالص جزیره نمی‌توان صرفنظر نمود. با در نظر گرفتن v_{island} به عنوان ولتاژ جزیره، C_{SET} این حالت از رابطه

$$C_{SET} = C_G(1 - dv_{island}/dv_G) \qquad (۱۸)$$

محاسبه می‌شود. در اغلب اوقات، حالت اول برقرار است و خازن ورودی PSF ها برابر با $2C_G$ است. به عبارت دیگر، اغلب دو ترانزیستور تک-الکترونی موازی با خازن معادل C_G از شبکه مقسم خازنی دیده می-شود.

فرکانس نمونه‌برداری مبدل شکل (۱۰) را می‌توان به دو شیوه تعریف کرد. با وجود مدار نمونه‌بردار (SHA) در ورودی مبدل، فرکانس نمونه‌برداری آن طوری تنظیم می‌شود که با فرکانس نمونه-برداری کل برابر باشد. شیوه کلی دیگر، تنظیم فرکانس سیگنال ساعت رجیسترهای خروجی به‌گونه‌ای است که از خروجی PSF ها به‌طور همزمان و با یک نرخ مشخص نمونه‌برداری کند.

۳-۲ نتایج شبیه‌سازی

کارآیی مبدل پیشنهادی در دمای اتاق، از طریق شبیه‌سازی یک مبدل آنالوگ به دیجیتال ۳ بیتی با آرایش شکل (۱۰) به اثبات رسید. فرکانس نمونه‌برداری مبدل همان فرکانس مدار نمونه‌بردار ورودی و برابر با 5 GS/s می‌باشد. مدار نمونه‌بردار از یک خازن نگهدارنده و یک کلید ساده تشکیل شده است که از ترانزیستور SET ساخته می‌شود. تقسیم کننده سیگنال، ولتاژ ورودی آنالوگ (v_{in}) را به مقیاس‌های مناسب $v_{in}/2$ و $v_{in}/4$ جهت اعمال به PSF های موجود در هسته مبدل تبدیل می‌کند. این سیگنال‌ها سپس توسط PSF ها پردازش می‌شوند تا کدهای دیجیتال صحیح تولید شوند. شبیه‌سازی مبدل توسط نرم‌افزار سایمون حکایت از تولید سیگنال‌های دیجیتال پایدار در دمای اتاق دارد. شکل (۱۱) تغییر صحیح سیگنال دیجیتال خروجی $(D_2D_1D_0)$ را با افزایش خطی سیگنال ورودی نشان می‌دهد. در بررسی این کدها نباید لحظات گذار از یک حالت به حالت دیگر را لحاظ نمود چرا که در این لحظات بیت‌های خروجی اعداد صحیحی را نشان نمی دهند. طبعاً در لحظه نمونه برداری از بیت‌ها توسط رجیسترهای خروجی، کدهای صحیح به قسمت دیجیتال راه می‌یابند. عملکرد پویای مبدل را با شبیه‌سازی طیف توان به ازای سیگنال سینوسی ورودی با فرکانس نایکویست بررسی نمودیم. شکل (۱۲) دامنه طیف توان خروجی بر حسب فرکانس را نمایش می‌دهد. نسبت سیگنال به نویز و اعوجاج یا SNDR بدست آمده در فرکانس نایکویست برابر با 18.46 dB است که تنها 1.5 dB با نسبت سیگنال به نویز کوانتیزاسیون فاصله دارد. با توجه به این مقدار SNDR، تعداد بیت موثر ENOB در حدود 2.77 تخمین زده می‌شود. بررسی عملکرد ایستایی مبدل، با محاسبه ضرایب غیرخطی تفاضلی یا DNL و تجمعی یا INL ممکن است. در مبدل پیشنهادی، این کار با اعمال یک ولتاژ سینوسی فرکانس پایین به مبدل و محاسبه اختلاف هیستوگرام بدست آمده با هیستگرام سیگنال سینوسی ایده‌آل انجام گرفت. حداکثر DNL و INL بدست آمده از این روش، به ترتیب 0.71 LSB و 0.62 LSB هستند که نشان‌دهنده عدم وجود کد گمشده، غیریکنواختی یا هر خطای قابل ملاحظه دیگر می‌باشند. مبدل شبیه‌سازی شده در دمای اتاق، مصرف توان ایستا ندارد. مصرف توان پویای آن نیز وابسته به فرکانس سیگنال آنالوگ اعمال شده به ورودی می-باشد. جدول (۱) عملکرد مبدل پیشنهادی را با انواع مشابه موجود در مقالات اخیر مقایسه می‌کند. با توجه به نوع ترانزیستورهای استفاده شده، این مبدل تنها مبدل با عملکرد پایدار در دمای اتاق است.

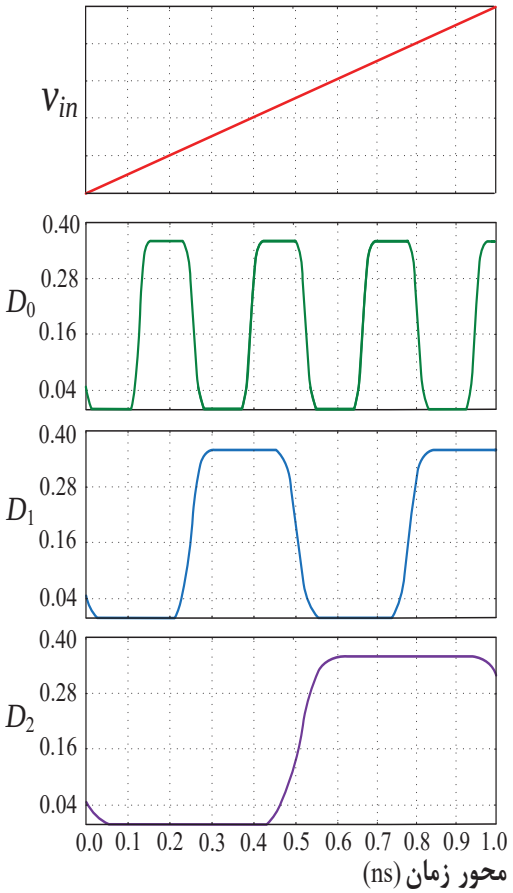
افزایش تعداد بیت‌ها به سادگی و از طریق اصلاح شبکه مقسم خازنی و نیز افزودن بلوک‌های PSF بیشتر انجام‌پذیر است. با توجه به تعداد بلوک‌های کمتر مبدل پیشنهاد شده در مقایسه با مبدل‌های CMOS (و فرکانس قطع بالاتر ترانزیستورهای SET در مقایسه با نوع ماسفت)، افزایش فرکانس نمونه‌برداری به بالاتر از ده گیگاهرتز (فرکانس کاری فعلی مبدل‌های فلش CMOS)، امکان‌پذیر خواهد بود.

۴- نتیجه‌گیری

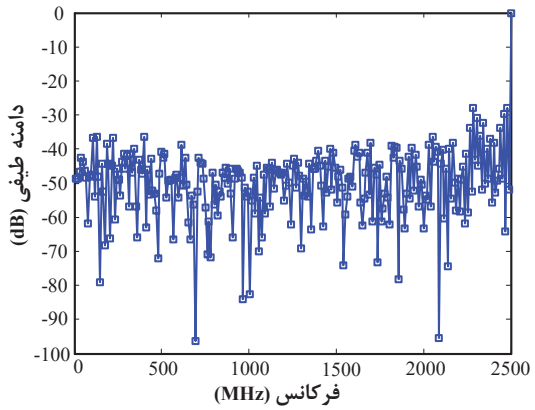
در این مقاله برای اولین بار جزئیات طراحی یک مبدل آنالوگ به دیجیتال n بیتی با استفاده از نانوترانزیستورهای تک‌الکترونی با جزیره کوانتوم نقطه‌ای سیلیکونی در دمای اتاق مورد بحث قرار گرفته است. استفاده از جزیره کوانتومی نیمه‌هادی سبب می‌شود که مبدل عملکرد پایداری در دمای اتاق داشته باشد و نوسان‌های کولنی آشکار باشند. ابتدا به بررسی مدل جریان- ولتاژ ترانزیستور با توجه به نرخ تونل‌زنی بارها پرداختیم. پس از آن عملکرد یک تابع متقارن متناوب طراحی

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol14 No.2 Summer 2017

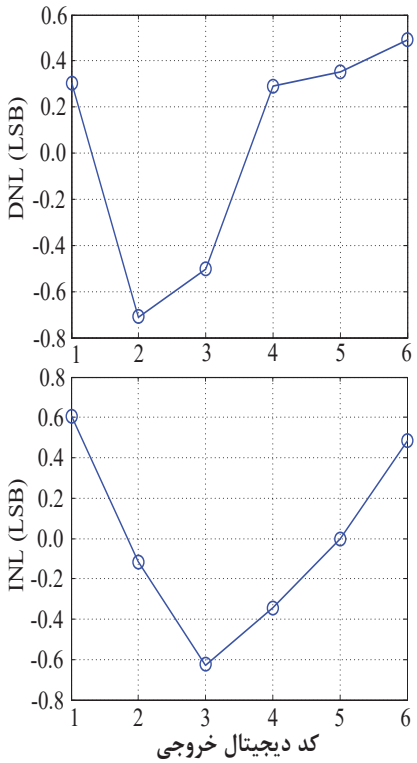
شده بر مبنای ترانزیستورهای موردنظر را در دمای اتاق بررسی نمودیم. تابع مذکور از اثر نوسان‌های کولنی ترانزیستورها استفاده می‌کند و تنها به دو زوج ترانزیستور تک‌الکترونی با جزیره سیلیکونی نیاز دارد. نمونه سه بیتی از مبدل آنالوگ به دیجیتال فلش با فرکانس نمونه‌برداری 5 GS/s، بر اساس چنین توابع متقارنی طراحی گردیده و معیارهای ایستایی (ضرایب غیرخطی تفاضلی و تجمعی) و پویایی (نسبت سیگنال به نویز) آن شبیه‌سازی شده‌اند. مبدل مورد نظر تنها به چهار خازن مجتمع در آرایش مقسم خازنی و سه تابع متقارن متناوب احتیاج دارد و نیازی به مقایسه‌کننده و مدار کدکننده (همانند مبدل-های فلش) ندارد. در مقایسه با سایر نمونه ها، مبدل مورد نظر دارای اجزای کمتری است و مزایای قابل توجهی از جمله امکان کار در دمای اتاق، سرعت بالا و سطح اشغالی کم دارد.



شکل (۱۱): نتایج شبیه سازی برای مبدل آنالوگ به دیجیتال ۳ بیتی طراحی شده در دمای اتاق.



شکل (۱۲): شبیه‌سازی طیف خروجی مبدل با اعمال ورودی سینوسی با فرکانس نایکویست.



شکل (۱۳): شبیه‌سازی ضرایب غیر خطی تفاضلی (DNL) و تجمعی (INL) مبدل.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]

جدول (۱): مقایسه عملکرد مبدل پیشنهادی با انواع مشابه.

ساختار	[۱۴] (2004)	[۱۵] (2007)	[۱۶] (2009)	[۱۷] (2010)	مبدل پیشنهاد شده
فن‌آوری	Metal SET	CMOS /Metal SET	CMOS /Metal SET	CMOS/Metal SET	Silicon SET
قدرت تفکیک	۴ بیت	۴ بیت	۴ بیت	۳ بیت	۳ بیت
فرکانس نمونه-برداری	–	20 MHz	100 kHz	20 MHz	5000 MHz
DNL INL	–	0.25LSB 0.25LSB	0.5LSB 0.5LSB	–	0.71LSB 0.62LSB
دمای عملکرد مناسب	10°k ناپایدار در دمای اتاق	27°k ناپایدار در دمای اتاق	77°k ناپایدار در دمای اتاق	100°k ناپایدار در اتاق	300°k پایدار در دمای اتاق

مراجع

[1] Kim, Y-B., "Challenges for Nanoscale MOSFETs and Emerging Nanoelectronics", Transactions on Electrical and Electronic Materials, Vol. 11, No. 3, pp. 93-105, 2010.

[2] Rezali, F. A. M, Sharifah F., Wan M. H., Norhayati S. "Scaling Impact on Design Performance Metric of Sub-Micron CMOS Devices Incorporated with Halo." IEEE Regional Symp. on Micro and Nanoelectronics, 2015.

[3] Moore, G. E. "Progress in Digital Integrated Electronics." Electron Devices Meeting, Vol. 21, 1975.

[4] Aminzadeh, H., Dashti, A. "Hybrid Cascode Compensation with Current Amplifiers for Nano-Scale Three-Stage Amplifiers Driving Heavy Capacitive Loads", Analog Integ. Circuit Signal Processing, Vol. 83, No.3, pp. 331-341, 2015.

[5] Aminzadeh, H. "MOSFET-Only Pipelined Analogue-to-Digital Converters: Non-Linearity Compensation by Digital Calibration", Int. J. Electronics, Vol. 101, No. 2, pp. 158-173, 2014.

[6] Danaie, M., Aminzadeh, H., Naseh, S. "On the Linearization of MOSFET Capacitors", IEEE Int. Symp. Circuits Systems, 2007.

[7] Grabertand, H., Devoret, M. H., Single Charge Tunneling: Coulomb Blockade Phenomena in Nanostructures, Springer Science & Business Media, Vol. 294, 2013.

[8] Ghosh, A., et al. "A Modified Macro Model Approach for SPICE Based Simulation of Single Electron Transistor." J. Computational Electronics, pp. 1-7, 2016.

[9] Jain, A., et al. "A New SPICE Macro Model of Single Electron Transistor for Efficient Simulation of Single-Electronics Circuits." Analog Integ. Circuits Signal Processing, Vol. 82, No. 3, pp. 653-662, 2015.

[10] Miralaie, M., Leilaeioun, M., Abbasian, K., "Modeling of a Room-Temperature Silicon Quantum Dot-Based Single-Electron Transistor and the Effect of Energy-Level Broadening on its Performance", J. Elec. Materials, Vol. 42, No. 1, pp. 47-57, 2013.

[11] Hu, C., Sorin D., Cotofana, S. D., Jianfei J. "Single-Electron Tunneling Transistor Implementation of Periodic Symmetric Functions." IEEE Trans. Circ. Systems II: Express Briefs, Vol. 51. No. 11, pp. 593-597, 2004.

[12] Cotofana, S. D., Vassiliadis, S., "Periodic Symmetric Functions, Serial Addition and Multiplication with Neural Networks", IEEE Trans. Neural Networks, Vol. 9, pp. 1118–1128, Nov. 1998.

[13] Ou, X., Wu., N. J., "Analog–Digital and Digital–Analog Converters Using Single-Electron and MOS Transistors", IEEE Trans. Nanotech., Vol. 4, pp. 722-729, Nov. 2005.

[14] Hu, C., Cotofana S. D., Jiang, J., "Analog-to-Digital Converter Based on Single-Electron Tunneling Transistors", IEEE Trans. Very Large Scale Integ., Vol. 12, No. 11, pp. 1209-1211, Nov. 2004.

[15] Lee, C. H., et.al., "Design of a Robust Analog-to-Digital Converter Based on Complementary SET/CMOS Hybrid Amplifier", IEEE Trans. Nanotech., Vol. 6, No. 6, pp. 667-675, Nov. 2007.

[16] Lee, J., et al. "Ultra-Energy-Efficient Analog-to-Digital Converters Based on Single-Electron Transistor/CMOS Hybrid Technology for Biomedical Applications", Semiconductor Science and Technology, Vol. 24, No. 11, 2009.

[17] Li, Q., Li C., Gang W. "Digital-Analog and Analog-Digital Converters Based on Single-Electron and MOS Transistors." IEEE 8th Int. Conf. Control Automation. 2010.

[18] Datta, S., Quantum Transport: Atom to Transistor, Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2005.

[۱۹] مرادی نسب، مهدی، فتحی‌پور، مرتضی، **"مدل بسته جریان-ولتاژ در ترانزیستورهای نانولوله کربنی آلاییده"**، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال هشتم- شماره دوم، ۶۸-۶۲، دانشگاه امیرکبیر، تهران، زمستان ۱۳۹۰.

[۲۰] ظهیری، زینب، حسینی، سید ابراهیم، کبیریان دهکردی، بهنام، **"معرفی یک ترانزیستور دوقطبی جدید بر اساس وارونگی سطحی"**، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، جلد ۱۱- شماره دوم، ۱۵-۹، دانشگاه امیرکبیر، تهران، زمستان ۱۳۹۵.

[21] Beenakker, C. W. J. "Theory of Coulomb-Blockade Oscillations in the Conductance of a Quantum Dot", Physical Review B, Vol. 44, No. 4, pp. 1646, 1991.

[22] Shin, S.J., et..al, "Si-Based Ultra-Small Multi-Switching Single Transistor Operating at Room-Temperature", Appl. Phys. Lett., Vol. 97, No. 10, Sep. 2010.

[23] Wasshuber, C., Computational Single-Electronics. Springer Science & Business Media, 2012.

[24] Korotkov, A., Konstantin L. "Resonant Fowler-Nordheim Tunneling Through Layered Tunnel Barriers and its Possible Applications", Int. Elec. Devices Meeting, 1999.

[25] Miralaie, M., et al. "Modeling and Analysis of Room-Temperature Silicon Quantum Dot-Based Single-Electron Transistor Logic Gates." J. Computational Theoretical Nanoscience, Vol. 11, No.1, pp. 15-24, 2014.

[26] Kouwenhoven, L.P., et al. "Electron Transport in Quantum Dots", Mesoscopic Electron Transport., Springer Netherlands, pp. 105-214, 1997.

[27] Wasshuber, C., Hans K., Siegfried S. "SIMON-A Simulator for Single-Electron Tunnel Devices and

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]

Circuits", IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integ. Circ. Systems, Vol. 16, No. 9, pp. 937-944, 1997.
[28] Sée, J., Philippe D., Sylvie G. "Comparison Between a sp 3 d 5 Tight-Binding and an Effective-Mass Description of Silicon Quantum Dots", Physical Review B, Vol. 66, No. 19, pp. 193-307, 2002.
[29] Tucker, J. R. "Complementary Digital Logic Based on the Coulomb Blockade", J. Applied Physics, Vol. 72, No. 9, pp. 4399-4413, 1992.

زیرنویس‌ها

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.2.8.1]