

# آتوماتای کوانتومی سلولی نقطه‌ای (QCA)

مؤلفان:

عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی کرمانشاه

عباس رضایی

لیلا نوری

عضو هیأت علمی دانشگاه صنعتی کرمانشاه

سهراب مجیدی‌فر

رضایی، عباس، ۱۳۵۶ -

آتوماتای کوانتومی سلولی نقطه‌ای (QCA) / مولفان عباس رضایی، لیلا نوری، سهراب مجیدی‌فر. - کرمانشاه: دانشگاه صنعتی کرمانشاه، انتشارات، ۱۳۹۵.  
ز، ۱۶۷ ص: مصور (بخشی رنگی).

ISBN: 978-600-96084-1-6

فهرست‌نویسی براساس اطلاعات فیپا.

کتابنامه: ص: [ ۱۶۵ ] - ۱۶۷.

۱. ماشین‌های خودکار سلولی کوانتومی. ۲. Quantum cellular automaton.

الف. نوری، لیلا، ۱۳۶۲ - ب. مجیدی‌فر، سهراب، ۱۳۶۵ - ج. دانشگاه صنعتی کرمانشاه. د. عنوان.

۵۱۱/۳

QA۲۶۷/۵ / م۲۶

شماره کتابشناسی ملی: ۴۳۵۵۳۳۱



دانشگاه صنعتی کرمانشاه

#### انتشارات دانشگاه صنعتی کرمانشاه

عنوان کتاب: آتوماتای کوانتومی سلولی نقطه‌ای (QCA)

مؤلفان: عباس رضایی، لیلا نوری، سهراب مجیدی‌فر

ناشر: انتشارات دانشگاه صنعتی کرمانشاه

طراح جلد: عباس قدردان

چاپخانه: انتشارات نوروزی

تاریخ و نوبت چاپ: ۱۳۹۵ - اول

شمارگان: ۵۰۰ جلد

قطع: وزیری

قیمت: ۲۰۰.۰۰۰ ریال

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۹۶۰۸۴-۱-۶ ISBN: 978-600-96084-1-6

کرمانشاه، بزرگراه امام خمینی، معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه صنعتی کرمانشاه

کد پستی: ۶۷۱۵۶۸۵۴۲۰ | تلفن: ۰۸۳۳۸۳۰۵۰۰-۵ | نامبر: ۰۸۳۳۸۳۰۵۰۰۶

سایت: [www.kut.ac.ir](http://www.kut.ac.ir) | ایمیل: [info@kut.ac.ir](mailto:info@kut.ac.ir)

## پیش‌گفتار

QCA یک تکنولوژی جایگزین است که روش نوینی برای محاسبه در سطح نانو ارائه می‌دهد. مدارهایی که تحت تکنولوژی CMOS ساخته می‌شوند، تفاوت بسیار چشمگیری در مساحت و میزان توان مصرفی نسبت به مدارهای تحت تکنولوژی QCA دارند. بدین معنی که نسبت به مدارهای QCA مساحت بسیار زیادی اشغال می‌کنند و توان مصرفیشان بسیار بیشتر است. به همین دلیل است که QCA با این خصوصیات منحصر به فرد تحول بزرگی در حوزه علم کامپیوتر و مدارهای منطقی به حساب می‌آید. در این کتاب ضمن آشنایی با این تکنولوژی، نحوه طراحی مدارهای منطقی با استفاده از مثال‌های متنوعی از آن مطرح می‌شود. فصل اول این کتاب مقدمه‌ای بر قطعات و ساختارهای نانو است. فصل دوم به مروری بر تکنولوژی QCA، اصول پایه آن و پیاده‌سازی گیت‌ها و قطعات پایه در آن می‌پردازد. در فصل سوم نحوه طراحی مدارهای QCA ترکیبی آمده است. فصل چهارم به معرفی ابزارهای طراحی و شبیه‌سازی مدارهای QCA مانند نرم‌افزار QCA Designer می‌پردازد. در فصل پنجم نحوه طراحی مدارهای QCA ترتیبی توضیح داده شده است. در فصل ششم پیاده‌سازی گیت‌های همه‌منظوره در QCA ارائه شده است. فصل هفتم به طرح مباحث ویژه در طراحی و بهینه‌سازی مدارهای QCA می‌پردازد. در فصل هشتم طراحی چند مدار نمونه با استفاده از نرم‌افزار QCA Designer آورده شده است. در پایان نیز لیست منابع و مراجع مورد استفاده در تنظیم این متن آمده است.

عباس رضایی، لیلا نوری، سهراب مجیدی‌فر

## فهرست عناوین فصل‌ها

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه‌ای بر قطعات و ساختارهای نانو
۱۱	فصل دوم: تکنولوژی QCA
۳۱	فصل سوم: طراحی منطق ترکیبی QCA
۴۳	فصل چهارم: ابزارهای طراحی و شبیه‌سازی
۷۳	فصل پنجم: طراحی مدارهای QCA ترتیبی
۸۷	فصل ششم: پیاده‌سازی گیت‌های همه‌منظوره در QCA
۱۱۳	فصل هفتم: مباحث ویژه در طراحی مدارهای QCA
۱۳۳	فصل هشتم: طراحی چند مدار نمونه با استفاده از نرم‌افزار QCADesigner
۱۶۵	فهرست منابع و مآخذ

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه‌ای بر قطعات و ساختارهای نانو
۱	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ قطعات مبتنی بر نانولوله کربنی
۴	۳-۱ نانوسیم‌ها
۵	۴-۱ قطعات تک الکترونی
۶	۱-۴-۱ جعبه تک الکترونی
۶	۲-۴-۱ دام تک الکترونی
۷	۳-۴-۱ پمپ و پایه گردان تک الکترونی
۸	۴-۴-۱ ترانزیستور تک الکترونی (SET)
۹	۵-۱ ترانزیستورهای اسپین
۱۱	فصل دوم: فناوری QCA
۱۱	۱-۲ سلول QCA
۱۳	۲-۲ قطعات پایه QCA
۱۶	۳-۲ پیاده‌سازی QCA
۱۶	۱-۳-۲ QCA فلزی
۱۸	۲-۳-۲ QCA مولکولی
۱۹	۳-۳-۲ QCA مغناطیسی
۲۰	۴-۲ کلاک‌بندی
۲۴	۵-۲ بهره‌توان و تلفات

۲۵	۶-۲ مدارهای QCA
۲۸	۷-۲ مقایسه قطعات نانو فناوری
۳۱	<b>فصل سوم: طراحی منطق ترکیبی QCA</b>
۳۱	۱-۳ مقدمه
۳۲	۲-۳ طراحی مبتنی بر گیت QCA با ابزارهای سنتز تجاری موجود
۳۶	۳-۳ سنتز منطقی
۳۶	۱-۳-۳ سنتز منطقی مبتنی بر گیت‌های AND/OR
۳۶	۲-۳-۳ سنتز مبتنی بر منطق اکثریت (MALS)
۳۶	۳-۳-۳ گیت AND-OR-INVERTER (AOI)
۳۸	۴-۳-۳ سنتز منطقی با استفاده از گیت AOI
۴۳	<b>فصل چهارم: ابزارهای طراحی و شبیه‌سازی</b>
۴۳	۱-۴ مقدمه
۴۳	۲-۴ نرم‌افزار QCADesigner
۴۴	۱-۲-۴ موتور شبیه‌سازی دوحالتی
۴۹	۲-۲-۴ موتور شبیه‌سازی بردار همبستگی
۵۳	۳-۴ محیط شبیه‌سازی نرم‌افزار QCADesigner
۵۳	۱-۳-۴ نصب QCADesigner تحت ویندوز مایکروسافت
۵۴	۲-۳-۴ توضیح محیط نرم‌افزار QCADesigner
۵۹	خاتمه شبیه‌سازی

۷۳	<b>فصل پنجم: طراحی مدارهای ترتیبی QCA</b>
۷۱	۱-۵ مقدمه
۷۱	۲-۵ فلیپ فلاپ RS (RS FF) در QCA
۷۴	۳-۵ محدودیت‌های زمان‌بندی استفاده از فلیپ فلاپ‌های RS
۷۵	۴-۵ الگوریتمی برای تخصیص ناحیه کلاک‌بندی
۷۵	۱-۴-۵ نمای کلی الگوریتم
۷۷	۲-۴-۵ جزئیات الگوریتم
۷۹	۵-۵ مثال‌هایی از مدارهای QCA
۸۱	۶-۵ طراحی مدار شیفت رجیستر
۸۴	۷-۵ طراحی مدار شیفت رجیستر بازخورد خطی یک بیتی
۸۷	<b>فصل ششم: پیاده‌سازی گیت‌های همه‌منظوره در QCA</b>
۸۷	۱-۶ مقدمه
۸۷	۲-۶ گیت همه‌منظوره
۸۸	۳-۶ طراحی‌های گیت همه‌منظوره
۸۸	۱-۳-۶ سنتز مبتنی بر AND/OR
۹۰	۲-۳-۶ سنتز مبتنی بر بردار اکثریت
۹۲	۳-۳-۶ LUT مبتنی بر حافظه
۹۷	۴-۳-۶ طراحی LUT با استفاده از مولتی‌پلکسر
۹۹	۴-۶ بحث و نتیجه‌گیری
۱۰۰	۵-۶ طراحی و بهینه‌سازی با گیت‌های همه‌منظوره (ULG)

۱۱۳	<b>فصل هفتم: مباحث ویژه در طراحی مدارهای QCA</b>
۱۱۳	۱-۷ کلاک‌بندی دوبعدی برای مدارهای QCA
۱۱۷	۱-۱-۷ مقایسه طرح کلاک‌بندی یک‌بعدی و دوبعدی
۱۱۷	۲-۱-۷ مسیره‌های فیدبک
۱۱۹	۳-۱-۷ نتایج شبیه‌سازی
۱۲۰	۲-۷ طراحی QCA بر اساس کاشی (Tile-Based)
۱۲۲	۱-۲-۷ کاشی‌های مبتنی بر شبکه‌های $3 \times 3$
۱۲۳	۲-۲-۷ کاشی متعامد (Orthogonal Tile)
۱۲۴	۳-۲-۷ کاشی با خروجی دوتایی (Double Fan-out Tile)
۱۲۵	۴-۲-۷ کاشی بیس لاین (Baseline Tile)
۱۲۵	۵-۲-۷ کاشی گنجایش ورودی (Fan-in Tile)
۱۲۶	۶-۲-۷ کاشی گنجایش خروجی سه تایی (Triple Fan-out Tile)
۱۲۷	۷-۲-۷ مثال‌هایی از مدارهای QCA
۱۲۹	۳-۷ طراحی و بهینه‌سازی با روش چندلایه
۱۳۰	۴-۷ طراحی با گیت اکثریت ۵ ورودی و گیت AND/OR چهار ورودی
۱۳۳	<b>فصل هشتم: طراحی چند مدار نمونه با استفاده از نرم‌افزار QCADesigner</b>
۱۳۳	۱-۸ مقدمه
۱۳۳	۲-۸ طراحی تمام جمع‌کننده و تمام تفریق‌گر
۱۳۹	۳-۸ طراحی دیکدر ۲ به ۴
۱۴۱	۴-۸ طراحی تمام مقایسه‌گر یک بیت
۱۴۴	۵-۸ طراحی مالتی‌پلکسر ۴ به ۱



۱۴۵	۶-۸ طراحی گیت XOR و Parity Checker چهار بیت
	۷-۸ طراحی مالتی پلکسر ۴ به ۱ با گیت اکثریت ۵ ورودی و گیت AND/OR چهار
۱۴۶	ورودی
۱۴۹	۸-۸ طراحی Arithmetic Extender
۱۴۹	۹-۸ طراحی Logic Extender
۱۵۲	۱۰-۸ طراحی فلیپ فلاپ نوع D (DFF)
۱۵۳	۱۱-۸ کاربردهای فلیپ فلاپ نوع D
۱۵۵	۱۲-۸ طراحی Loop Memory Cell
۱۵۵	۱۳-۸ طراحی نوسان ساز
۱۵۹	۱۴-۸ طراحی Serial Adder
۱۶۰	۱۵-۸ طراحی مولد K پالس ساعت
۱۶۲	۱۶-۸ طراحی Serial Parallel Multiplier
۱۶۳	۱۷-۸ طراحی فلیپ فلاپ RS
۱۶۵	فهرست منابع

## فصل اول

### مقدمه‌ای بر قطعات و ساختارهای نانو

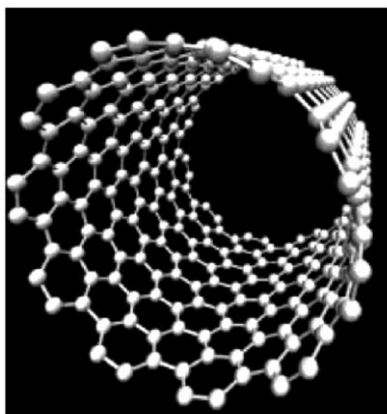
#### ۱-۱ مقدمه

در چند دهه اخیر، مجتمع‌سازی نمایی در اندازه و همچنین در قابلیت افزایش توان پردازش به وسیله فن‌آوری VLSI مبتنی بر لیتوگرافی معمولی به‌دست‌آمده است. با این حال، با توجه به محدودیت‌های فیزیکی بنیادی فن‌آوری CMOS مانند اکسیدهای گیت فوق‌العاده نازک، اثرات کانال کوتاه، نوسانات دوپینگ و لیتوگرافی این روند به‌طور فزاینده‌ای با چالش‌های جدی مانند لیتوگرافی پرهزینه در مقیاس نانو مواجه است. پیش‌بینی می‌شود که در طی فرآیند تغییرات مجتمع‌سازی فن‌آوری CMOS طول کانال تا سال ۲۰۱۹ به ۷ نانومتر خواهد رسید. در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی در مقیاس نانو صورت گرفته است تا جایگزین فن‌آوری CMOS معمولی انتخاب شود. انتظار می‌رود که این فن‌آوری بتواند به چگالی بیش از  $10^{12}$  devices/cm<sup>2</sup> برسد و در محدوده فرکانسی THz به کار گرفته شود. به دلیل ویژگی‌های منحصر به فردی که در نتیجه کاهش اندازه در فن‌آوری نانو وجود دارد، به وسیله این فن‌آوری فرصت‌های جدیدی برای محاسبات فراهم می‌شود. در میان قطعات جدید، اتوماتای سلولی کوانتومی نقطه‌ای (QCA) وابسته به پدیده‌های فیزیکی جدید (مانند فعل و انفعالات کلمبیک) و تکنیک‌های نوآورانه است که اساساً از یک مدل مبتنی بر CMOS استخراج می‌شود. فن‌آوری QCA نه تنها راه‌حلی در مقیاس نانو است، بلکه یک روش جدید محاسبه و تحولی در انتقال اطلاعات ارائه می‌دهد. ویژگی‌های پردازش سیستم‌های CMOS

را در نظر بگیرید: برخی از مدارها (به‌عنوان مثال گیت‌های منطقی) محاسبات را انجام می‌دهند؛ درحالی‌که بعضی دیگر (مانند سیم‌ها) برای انتقال سیگنال/داده و همچنین برای ارتباطات استفاده می‌شوند. در مقابل، محاسبات و ارتباطات به‌طور همزمان در QCA انجام می‌شود. در QCA از دو گیت منطقی پایه وارونگر (INV) و بردار اکثریت (MV) استفاده می‌شود. فناوری QCA بسیار امیدوارکننده است؛ چراکه به وسیله این فناوری، الگوهای محاسباتی که اساساً از CMOSهای سنتی استخراج می‌شود، می‌تواند اجرا شود. طراحی QCA شامل نمونه‌های متنوع و جدید از قبیل حافظه پویا و پردازش با سیم است. حافظه پویا نمونه‌ای از الگوی کلی‌تر پردازش با سیم است. پردازش با سیم (PBW) در QCA در حالی سبب ایجاد قابلیت دست‌کاری اطلاعات می‌شود که انتقال و ارتباط با سیگنال نیز صورت می‌پذیرد. قابلیت پردازش با سیم را می‌توان در به اصطلاح زنجیره وارونگر و همچنین در آرایش سلول‌ها در MV مشاهده کرد. علاوه بر این ویژگی چگالی فوق‌العاده بالا، QCA می‌تواند سبب به دست آوردن توان مصرفی فوق‌العاده پایین و بهره‌توانی حقیقی باشد که به دلیل چگالی بالای این قطعه در مقیاس نانو بسیار امیدوارکننده است. فناوری CMOS یک دستاورد سریع ولی دارای محدودیت‌های فیزیکی (مانند اکسید گیت بسیار نازک، اثرات کانال کوتاه و ...) است. فناوری جدیدی با ابعاد بسیار کوچک (مانند مقیاس نانو) برای تولید سیستم‌های الکترونیکی/محاسباتی آینده مورد بررسی قرار گرفته است. تاکنون قطعات جدید مانند نانولوله‌های کربنی، نانوسیم‌های سیلیکانی، ترانزیستورهای تک الکترونی، دیودهای تونل‌زنی رزونانس، قطعات تک‌مولکولی و ترانزیستورهای اسپینی طراحی شده است. پیش‌بینی می‌شود که با استفاده از این قطعات جدید به‌طور همزمان بتوان چگالی فوق‌العاده بالا و سرعت عمل فوق‌العاده بالا را به دست آورد. بنیاد ملی علوم فناوری نانو به‌منظور تولید ساختارها و ابزار و سیستم‌های با ویژگی‌های جدید با توجه به کاهش بعد اندازه قطعات را در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر تعریف می‌کند.

## ۲-۱ قطعات مبتنی بر نانولوله کربنی

همان‌طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، نانولوله‌های کربنی (CNTs) به صورت یک ورقه تا شده به شکل سیلندر از جنس گرافیت با قطر نانومتر و طول میکرون هستند. نانولوله‌های کربنی مانند قطعات مولکولی بسیار قوی، انعطاف‌پذیر و همچنین دارای قابلیت انتقال حرارت بالایی هستند. بسته به دستسازنی یا کایرالیته<sup>۱</sup> نانولوله‌ها (به‌عنوان مثال، ساختار شبکه)، آن‌ها می‌توانند فلز یا نیمه‌هادی باشند. لوله‌ها را می‌توان از نانولوله‌های تک جداره (SWNT) یا نانولوله‌های چند جداره (MWNT) و یا نانولوله‌های Multi-Fwalled ساخت به طوری که چند SWNT داخل یکدیگر قرار گیرند. نشان داده شده است که نانولوله‌های کربنی می‌توانند به‌عنوان سیم‌های مولکولی دیودها، ترانزیستورهای اثر میدان، SETها، سوئیچ قابل برنامه‌ریزی، حافظه و یا ذخیره انرژی برای باتری‌ها و سلول‌های سوختی استفاده شوند.

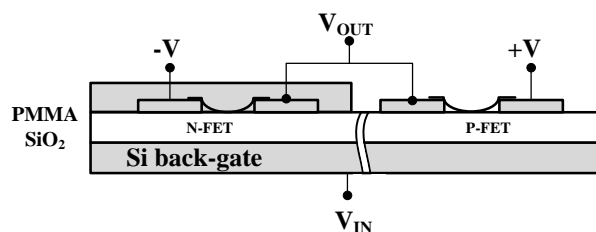


شکل ۱-۱: یک نانولوله کربنی تک جداره

---

<sup>1</sup> Chirality

باین‌حال در حال حاضر هیچ روش ساخت شناخته شده ای برای تولید یک مجموعه خالص و ساخته شده از تنها یک نوع (فلز یا نیمه‌هادی) نانولوله وجود ندارد. این امر باعث می‌شود که ساخت قطعات خاص یک فرآیند تصادفی باشد و آن را باید به عنوان محدودیتی در مجتمع‌سازی سیستم های بزرگ به حساب آورد. بدون هیچ‌گونه پردازش خاصی، ترانزیستورهای اثر میدان نانولوله کربنی دارای ویژگی نوع p هستند. در مورد نوع n نیز نشان داده شده است که FET های نانولوله کربنی نوع n را می‌توان با دوپینگ و یا سرد شدن آهسته ترانزیستورهای اثر میدان نانولوله کربنی دارای ویژگی نوع p در خلأ تولید کرد. یک وارونگر ساخته‌شده از ترانزیستورهای اثر میدان نانولوله کربنی نوع p و نوع n در شکل ۱-۲ نشان داده شده که نانولوله فلزی بالستیک است. در نقل و انتقال های بالستیک، حامل‌های بار توسط میدان الکتریکی در یک رسانا یا نیمه‌هادی بدون پراکندگی منتقل می‌شوند.

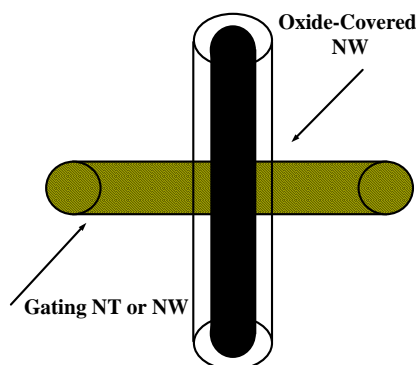


شکل ۱-۲: وارونگر نانولوله کربنی

### ۳-۱ نانوسیم‌ها

محدودیت بزرگ نانولوله‌های کربنی عدم توانایی در کنترل نانولوله کربنی فلزی یا نیمه-هادی است. این امر مشکل قابل توجهی برای ساخت قطعات در مقیاس‌های بزرگ محسوب می‌شود. نانوسیم‌های سیلیکانی تک بلوره‌ای (NWs) با قطر ۶ تا ۲۰ نانومتر و طول ۱ تا ۱۰ میکرون ساخته شده است. برخلاف نانولوله‌های کربنی، در حین ساخت مشخصه‌های الکتریکی NWها را می‌توان دقیقاً کنترل کرد. نانوسیم‌های فلزی مانند نانوسیم‌های نیمه-هادی نشان داده می‌شوند. از این قطعات می‌توان برای ساخت سیم، دیودها و FETها استفاده کرد. برخلاف نانولوله‌های کربنی، NWها را می‌توان در طول ساخت به‌دقت کنترل و روشی

برای مونتاژ موازی در تولید ایجاد کرد. نشان داده شده است که یک پیوند pn را می‌توان با عبور سیلیکون NW نوع P و گالیم نیتراید NW(GaN) نوع n تشکیل داد. همانطور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است، این اتصال دارای ویژگی روشن شدن با ولتاژ ۱ ولت است. محل اتصال n-GaN/p-Si و NW با یک ولتاژ روشن شدن بالا می‌تواند به عنوان یک FET استفاده شود. ولتاژ روشن شدن بالا با رشد یک لایه اکسید برای جلوگیری از تماس مستقیم هادی با اتصالات الکتریکی به دست آمده است. در نتیجه اتصالاتی به دست آمده که رفتار FET را نشان می‌دهد.



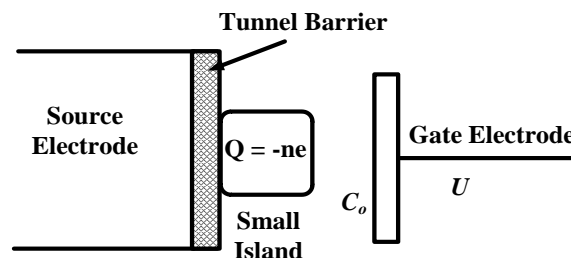
شکل ۱-۳: ترانزیستورهای اثر میدان NW

#### ۴-۱ قطعات تک الکترونی

در قطعات تک الکترونی، حرکت هر الکترون به صورت جداگانه از طریق سد تونل کنترل می‌شود. برای نشان دادن رفتار کوانتومی، یک جزیره همراه با یک سد تونل باید در اندازه بسیار کوچک باشد؛ به طوری که با افزودن یک تک الکترون به این جزیره، باعث افزایش ولتاژ قابل توجهی شود. قطعات تونل‌زنی تک الکترونی شامل یک جعبه تک الکترونی، یک ترانزیستور تک الکترونی (SET)، یک دام تک الکترونی و یک پایه گردان و پمپ تک الکترونی هستند.

### ۱-۴-۱ جعبه تک الکترونی

یک جعبه تک الکترونی بر اساس یک جزیره کوچک جدا شده از یک الکتروود منبع الکترون بزرگتر به وسیله یک سد تونل (نشان داده شده در شکل ۴-۱) است. یک میدان الکتریکی خارجی را می‌توان به جزیره با استفاده از یک الکتروود دیگر (یا گیت) جدا شده از جزیره توسط عایق ضخیم‌تر اعمال کرد که اجازه تونل‌زنی قابل توجهی را نمی‌دهد. میدان شرایط تونل‌زنی الکترون را با تغییر پتانسیل الکتروشیمیایی جزیره کنترل می‌کند.



شکل ۴-۱: دیاگرام جعبه تک الکترونی

### ۲-۴-۱ دام تک الکترونی

دام تک الکترونی یک نوع اصلاح شده از ساختار جعبه تک الکترونی است. دام تک الکترونی می‌تواند با جایگزین کردن اتصال تونل با یک آرایه یک‌بعدی از جزایر جدا شده توسط سد های تونل نشان داده شده در شکل ۵-۱ (الف) به دست آید. این ساختار یک پیکربندی حافظه داخلی را ایجاد می‌کند؛ برای برخی محدوده  $V_g$  (بین  $+V$  و  $-V$ ) سیستم ممکن است در یک یا چند حالت بار جزیره به دام بیاندازد (شکل ۵-۱ (ب)).