

به نام خدا

الکترونیک مولکولی

گردآوری

حسین عبدالله

کلمات کلیدی

MOSFET

چکیده

در این پژوهش و تحقیق هدف ما توضیحی گذرا درباره دلایل رسیدن تکنولوژی امروزی به تکنولوژی های جدید و توضیح نسبتا مفصلی درباره یکی از این تکنولوژی ها به نام الکترونیک مولکولی است. با مثالی نمونه ای از آن (لچ ها و حافظه ها در الکترونیک مولکولی) که بطور مبسوط بیان شده است. و همچنین توضیح نسبتا مفصلی درباره یکی دیگر از این تکنولوژی ها به نام ترانزیستورهای تک الکترونی می باشد. مثال نمونه ای از مقاله ای به نام (molecular electronic latches and memories) گرفته شده است.



۱. مقدمه

علم الکترونیک دارای دو جهش بسیار بزرگ در تاریخ کوچک اما بسیار پر تلاطم خوداست.

(۱) ساخت ترانزیستور

(۲) ساخت اولین مدار مجتمع شامل یک خازن و مقاومت و ترانزیستور

سومین جهش بسیار بزرگ در تاریخ علم الکترونیک باشد. *MOSFET* به نظر می رسد گذراز به عنوان اساس ساختن بلوک برای مدارهای مجتمع *MOSFET* حدود چهل سال از زمانی که بکار رفته می گذرد. اگر به دنبال ماندگاری این ترانزیستور به عنوان اساس ساختن بلوک برای مدارهای مجتمع باشیم. به دونکته می رسیم. اول قابلیت کوچک شدن بسیار بالا می باشد. *MOSFET* (امروزه در حدود میکرون) و دوم سرعت بالا. که این دو راز ماندگاری اما در حال حاضر قوانین مکانیک کوانتم و محدودیت های جدید در تکنولوژی ساخت مانع از ادامه این روند شد و باعث شد برای رسیدن به مقیاس های کوچکتر به سراغ تکنولوژی های جدید بروند.

ابتدا مشکلات ساخت مدار مجتمع در حوزه نانومتر با ماسفت را مطرح می کنیم. و سپس دو رهیافت الکترونیک مولکولی و ترانزیستورهای تک الکترونی را بیان می کنیم.

قبل از پرداخت به موضوعات بالا خالی از لطف نیست بدانیم که رهیافت های جدید برخلاف ماسفت که براساس جریان الکترونی است وابسته به پدیده های مکانیک کوانتم است. پس برای درک نکات ریز و اساسی این روش ها باید معلومات خوبی از مکانیک کوانتم داشته باشیم. از آنجا که ما (چه خواننده و چه نویسنده) در این زمینه معلومات کافی نداریم. سعی شده این تحقیق بدون اشاره به این مفاهیم انجام شود. البته واضح است که نبود این مفاهیم لطمات زیادی به تحقیق می زند. اما اهداف تحقیق آموزش مفاهیم مکانیک کوانتم نیست. پس به ناچار این تحقیق بدون اشاره به این مفاهیم انجام می شود.

اصول عملکرد و تکنیک های ساخت سه روش (ترانزیستور های نانولوله ای کربنی - وسیله های اثر کوانتم حالت جامد - وسیله های الکترونیک مولکولی) در مورد اول عملکرد شبیه ماسفت است اما در ابعاد ماده مورد استفاده برای ساخت متفاوتند.

در مورد دوم و سوم هر دو از اثرهای کوانتمی استفاده می کنند اما در ساخت متفاوتند.

در واقع وسایل حالت جامد از تکنیک های ساخت شبیه به روش های بکار گرفته برای ماسفت استفاده می کند.

پیشرفت این رهیافت ها با سرعت قابل قبولی ادامه دارد که این البته مدیون پدیده های مکانیک کوانتم و سال ها تجربه در تکنولوژی ساخت ماسفت می باشد.

در واقع الکترونیک مولکولی یک رویکرد جدید است که به مواد اولیه و اصول عملکرد جدید نیاز دارد می توان گفت انگیزه ای برای شناخت و استفاده از آنچه در مولکول های مواد اتفاق می افتد است. درمقیاس های کوچکتر از نانو ایده استفاده از یک یا چند مولکول به عنوان یک سوئیچ به نظربسیار جالب تر از بررسی بن بست های ماسفتی می باشد.

این کار علاوه بر کوچک شدن ابعاد سرعت را بسیار زیاد کرده است همچنین ارزانتر است. و بالطبع آن پیچیدگی های ساخت بسیار دشوار می شود. (در الکترونیک مولکولی هنوز در حال تحقیق در مورد روش های ساخت می باشد. که به نظر می رسد به زودی بر آن غلبه و بسمت ساخت مدار مجتمع با این تکنولوژی برود).

حال به بررسی مشکلات ماسفت در مقیاس نانو می پردازیم.

۲. مشکلات مدار مجتمع با ماسفت در مقیاس نانو

نقش ترانزیستور ماسفت در مدارات مجتمع سوئیچی است که شدت جریان عبوری را کنترل می کند. البته نوع کنترل به حالت ترمینال گیت وابسته است. در واقع حالت ترمینال گیت تعیین کننده خاموشی یا روشنی ترانزیستور است.

اگر ولتاژ گیت برای کنترل جریان عبوری از میان کانال تعیین کننده باشد. به ترانزیستور نامیده می شود. *FET*، ترانزیستور اثر میدان نامیده می شود. *BJT* اگر جریان گیت برای کنترل استفاده شود ترانزیستور پیوند دو قطبی است. *FET* نوع کاربردی و بسیار مورد استفاده ترانزیستور اثر میدانی *MOSFET* پایه تکنولوژی ماسفت با مشکلات زیادی *CMOS* با وجود تحقیقات فراوان و محققین بسیار در فناوری های کوچک روبرو شده است. که ما تعدادی از آن ها را بیان می کنیم.

۲-۱. میدان الکتریکی بالا

برای کوچک کردن ترانزیستور به مقیاس نانو لازم است یکسری از ابعاد از جمله طول کانال کاهش یابد. از آنجا که با کاهش طول کانال، ولتاژ منبع کاهش نمی یابد. در مقیاس های کوچک (در مقیاس نانو) شدت میدان الکتریکی حاصل از ولتاژ منبع در سرتاسر اکسید گیت ۰.۱ میدان اکسید به ماکزیمم اکسید به

um افزایش می یابد. برای وسیله ای با طول است. $1Mv/cm$ می رسد. و این یعنی میدان سلیسیم بیشتر از $5Mv/cm$ ماکزیمم این مقادیر عظیم میدان که با کاهش اندازه کانال افزایش می یابد باعث ایجاد جریان های نشتی شدید می شود. که باعث تنزل در عملکرد وسیله می شود. در بدترین حالت میدان باعث شکست ناگهانی (بهمنی) سد شده والکترون ها به صورت آزاد هدایت می کنند. و موج جریانی تولید می کنند که به وسیله آسیب می زند.

۲-۲. ولتاژ آستانه و منبع

با توجه به کوچکتر کردن طول کانال یک کاهش تناسبی برای ولتاژ منبع معقول است تا توان واقعی و میدان الکتریکی در حدود قابل قبولی قرار بگیرند. اما ولتاژ آستانه نباید خیلی پایین باشد. چون توان حالت ساکن (توان مصرف شده در وسیله در حالت دائمی و کنترل شده) آن باید تامین شود. (تا دستگاه بتواند کار کند) اندازه این توان تقریباً بزرگ است که علت آن وجود جریان نشتی در وسیله است. برای کاهش توان باید جریان نشتی را کاهش داد. برای کاهش جریان نشتی باید ولتاژ آستانه را بالا نگه داشت. اما بالا نگه داشتن ولتاژ آستانه چندان مطلوب نیست که دو دلیل عمده آن یکی افزایش توان مصرفی در حالات روشن و خاموش و دیگری افزایش قابل ملاحظه احتمال قرار گرفتن وسیله در حالت نا مشخص (زمانی که نه روشن است نه خاموش) می باشد. البته نباید از بحث نویز مارجین و اثرات القایی بسادگی گذشت.

۲-۳. اتلاف گرمایی

ترانزیستور انرژی هایشان را در بخش های مقاومتی به شکل گرما مصرف می کنند. اگر این گرما بطور صحیحی پخش نشود می تواند نقاط گرمایی را روی مدار ایجاد کند. این نقاط گرمایی باعث می شوند که ماده زیاد گرم شود، در نتیجه وسیله بخوبی عمل نمی کند، حتی ممکن است وسیله آسیب ببیند.

۲-۴. تاخیرهای اتصالی

کاهش عرض سیم مقاومت را افزایش می دهد. افزایش مقاومت، افزایش ثابت زمانی خازن های پارازیت رادر پی دارد. به عبارت بهتر افزایش مقاومت، افزایش تاخیر رادر پی دارد. تاخیرهای اتصالی بصورت فوق العاده در مقایسه با تاخیر های گیت افزایش می یابد. هدف مقیاس بندی فقط افزایش چگالی چپ

نیست بلکه برای افزایش سرعت هم هست. وسیله ها نمی توانند با بزرگتر شدن تاخیرهای اتصالی سریعتر شوند.

۲-۵. انقباض لایه اکسید گیت

برای یک وسیله که با تکنولوژی CMOS یک دهم میکرو متر باولتاژ ۵.۱ ولت عمل می کند. حداقل ضخامت مورد نیاز برای اکسید گیت سی آنگستروم است. این اندازه با دولایه از اتم سیلیسیم برابر است. اما نازکی بسیار زیاد چنین لایه ای باعث ایجاد تونل مکانیک کوانتومی می شود. بنابراین یک جریان نشتی از میان گیت ایجاد می شود. که این خود مانع کاهش ضخامت لایه اکسید می شود. (اثر بالا به دلیل روش های دو پینگ ناکارآمد و شروع اثرهای کوانتومی است) اما صنعت شروع به پیش دستی در این زمینه کرده است. یعنی ساخت وسایلی که اثرهای کوانتومی را در نظر بگیرد. مانند وسیله سیلیکون روی عایق که عایق بجای سیلیسیم متعارف *sise* یک لایه است که بطور ناقص قرار گرفته است. یا استفاده از برای ساخت ماسفت، و غیره

البته بعضی از گروه های تحقیقاتی از لوله های نازک کربن برای ساخت سوئیچ های مدار مجتمع استفاده می کنیم که البته موضوع مورد بحث ما نیست. حال به بررسی و شناخت الکترونیک مولکولی می پردازیم.

۳. الکترونیک مولکولی

۳-۱. درآمدی بر الکترونیک مولکولی

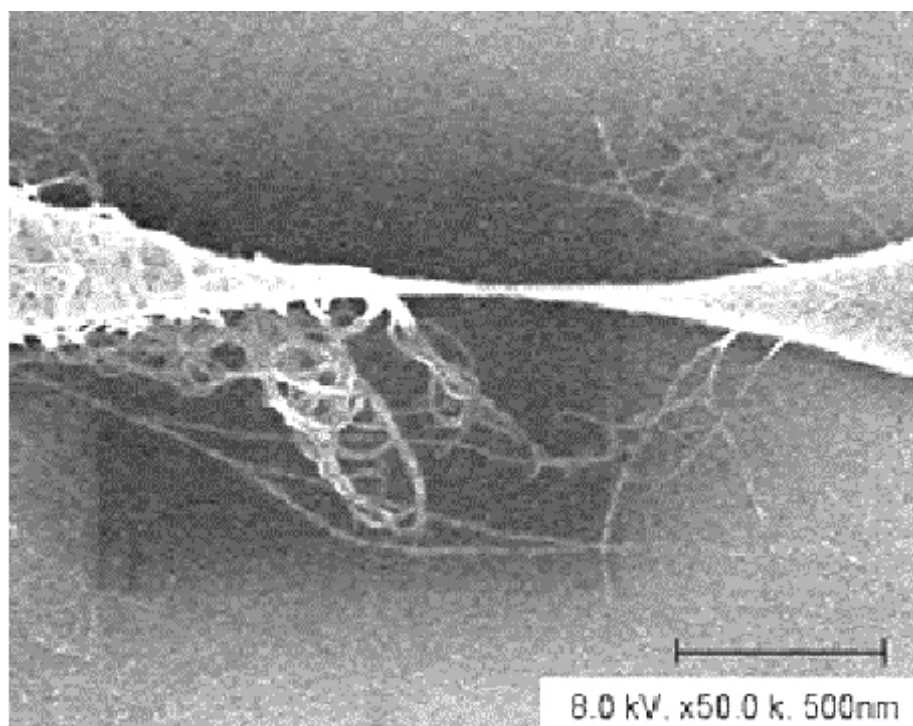
لااقل سه راه مختلف برای محاسبه با مولکولها ارائه و اثبات شده است نامید، از یک سری از واکنش-
(((محاسبه شیمیایی در اولین راهکار که می توان آن راه های شیمیایی متناظر با یک محاسبه خاص استفاده می شود، تا "جواب" به صورت محصول نهایی واکنش بدست آید.
برای محاسبه راه حل مسأله مسافرت فروشنده دوره گرد است DNA مشهورترین مثال این راهکار، استفاده از (این مسأله به دلیل سادگی بیان جزئیات آن مشهور شده است و الا برای حل موارد دارای پیچیدگی تسلسلی بیشتر به رشد فزاینده ای از قدرت محاسباتی نیازمندیم). در نوامبر ۲۰۰۱ گروهی در اسرائیل یک کامپیوتر مبتنی بر واکنش های را در درون یک لوله آزمایش به نمایش گذاشتند، که قادر به انجام تعدادی از DNA وظایف محاسباتی ساده بود. مزیت این روش موازی کاری کلان آن است

و عیب آن در این است که هر مرحله به زمان زیادی نیازمند است و محاسبه مستلزم مصرف مقادیر زیادی از مواد شیمیایی گرانبه است. به احتمال قوی این راهکار به یک روال محاسباتی تبدیل نخواهد شد، اما دیدگاههای جالبی را در دو علم شیمی و کامپیوتر پدید خواهد آورد.

راهکار دوم استفاده از مولکولهایی به عنوان «میزبان» اسپین های هسته ای است، که کیوبیت های یک کامپیوتر کوانتومی مبتنی بر تشدید مغناطیسی هسته را تشکیل می دهند. پیشگام این راهکار ایزاک چوانگ بود. که هم اکنون در MIT به سر می برد.

نکته جالب اینجاست که از این راهکار می توان برای نمایش الگوریتم های محاسبه کوانتومی گوناگونی استفاده کرد.

مثلا اخیرا IBM با استفاده از مولکولهای موجود در یک لوله آزمایش - که به خوبی به صورت یک کامپیوتر کوانتومی ۷ کیوبیتی عمل می کردند - برای نمایش تجزیه ریاضی عدد ۱۵ با الگوریتم شور استفاده کرد. با این حال اجماع عمومی بر این است، که مقیاس این راهکار را نمی توان برای یک محاسبه مفید به تعداد مناسبی از کیوبیت ها بالغ نمود.



شکل (۱): یک سنسور ذره ای که از گسیختگی یک نانولوله شکل گرفته است.

منبع: گروه مهندسی مکانیک دانشگاه نورث وسترن

در آخر، راهکار الکترونیک مولکولی قرار دارد، که از یک مولکول یا گروه مولکولی به عنوان یک قطعه الکترونیکی یک مدار بهره می برد. الکترونیک مولکولی به شکل واقعی در سال ۱۹۷۴ توسط مارک راتنر و آوی آویرام بنیان گذاشته شد. در این زمان آنها یک ساختار مولکولی را به عنوان یک دیود پیشنهاد کردند و تئوری خود را برای منطقی بودن این ادعا شرح دادند.

این زمینه قدیمی توسعه آهسته ای داشت و تا اوایل سالهای ۱۹۹۰ کار زیادی روی آن انجام نشد. در این سالها مارک رید و جیم تور انجام بعضی از تجربیات جدی راروی یک سنسور ذره ای که از گسیختگی یک نانولوله شکل گرفته شروع کرده و ایده امکان پذیری استفاده از مولکولهای آلی به عنوان قطعات الکترونیکی را ترویج کردند. در اواخر آن دهه رید و تور سیستمی از حدود ۱۰۰۰ مولکول را در یک فیلم تک لایه ای دارای ضخامت اندک به نمایش گذاشتند، که دارای خاصیت جالب مقاومت دیفرانسیلی منفی بود. سازمان پروژه های تحقیقات دفاعی پیشرفته آمریکا از ۱۹۹۹ « برنامه ای به نام » مولترونیک « را پشتیبانی کرده، که پیشرفتهای بیشتری را موجب شده است. در این راستا یک همکاری مابین دانشگاه کالیفرنیا در لوس آنجلس (UCLA) و هیولت پکارد نشان داد، که یک فیلم تک لایه ای از مولکولها می تواند به عنوان کلید بین دو الکتروود عمل کند. از آن زمان اختراعات متعددی ثبت شده تا مشخص شود چگونه بتوان از آرایه های میله های متقاطع این کلیدهای مولکولی، حافظه ساختچگونه عناصر یک آرایه ساخته شده از نانوسیم ها را بدون نیاز به مکان دهی با دقت نانومتری آدرس دهی کرد. و چگونه یک آرایه منظم از میله های متقاطع را برداشته و آن را درون یک مدار معمولی مستقر کرد گروههای بسیار دیگری در حال حاضر به شدت درگیر این عرصه شده اند. در سال ۲۰۰۱ گروهی از آزمایشگاههای بل یک ساختار شبه ترانزیستوری را گزارش کردند، که از تک لایه ای از مولکولها به عنوان جزء فعال این قطعه استفاده می کردند. هر گروهی که در این زمینه کار می کند، نشان داده که مولکولها خواص الکترونیکی جالب و بالقوه مفیدی دارند و هر یک راهبرد منحصر به فردی را برای به جریان انداختن سیستم های مولکولی در مدارات به کار گرفته است.

در حال حاضر خیلی زود است که تعیین کنیم کدام راهبرد در نهایت به موفقیت خواهد رسید، اما نتایج و گزینه های نویدبخش بسیار زیاد موجود در واقع بیانگر این مطلب است، که الکترونیک مولکولی اگرچه هنوز در مرحله تحقیق بنیادین است، اما ابدأ چیزی فانتزی نیست. بعد از یک دوره از افزایش واگرایی و رشد مفاهیم علمی، به نظر می رسد نوعی همگرایی بروز کند و مدارات الکترونیک مولکولی واقعی جنبه های بسیاری از راهکارهای کاوش شده کنونی را در ساخت خود دخیل کنند در کل پتانسیل کار بالاست.

دانشیته بیتی (اجزای منطقی و حافظه مولکولی) می تواند در حد 1 terabit/cm^2 ($6/5 \text{ terabit/in}^2$) باشد. سرعت های کلیدزنی هم تا حد چند پیکوثانیه (حدوداً ۱۰۰۰ برابر سریعتر از *DRAM* های کنونی) می تواند پایین بیاید.

در کنار این سرعت های کلیدزنی و دانشیته ها ، توان مصرفی لازم برای کلیدزنی باید بسیار اندک نگهداشته شود، تا از مشکلات مربوط به پراکنش حرارتی جلوگیری به عمل آید.

۳-۲. فرصت ها در الکترونیک مولکولی

اولین قطعات تجاری الکترونیک مولکولی به احتمال قوی سنسورها یا آشکارسازهایی خواهند بود، که از روکش دهی بعضی از نانوسیم ها (اعم از نیمه رساناها یا نانولوله های کربنی) با یک واحد تشخیص مولکولی ساخته شده، با ثبت روکش دهی بعضی از نانوسیم ها (اعم از نیمه رساناها یا نانولوله های کربنی) با یک واحد تشخیص مولکولی تغییرات مقاومت نانوسیم در هنگام تماس با مولکولهای موردنظر - که به واحد تشخیص دهنده می چسبند - در حول وحوش این مفهوم بنیان گذاری شد *NanoSys* کنند. شرکت حضور آنها را سطح دیگری از قطعات - از منظر پیچیدگی - برخی از انواع مدارات حافظه خواهند بود. در این جا دو احتمال وجود دارد. یکی قطعات میله های متقاطع است که در بالا ذکر شد است که به جای خازن دارای نوعی پیل الکتروشیمیایی است. *DRAM* و دیگری یک گونه از یکی از مزایای چنین سیستمی این است که مولکولهای با چند درجه اکسیداسیون وجود دارند که می توانند چندین بیت داده را در یک سلول واحد جای دهند.

حافظه های موجود فقط قادر به ذخیره یک بیت در هر جزء حافظه هستند عیب عمده مولکولهای آلی در نانوالکترونیک - در مقایسه با نانولوله ها یا نانوسیم ها - فقدان مقاومت آنها در مواجهه با شرایط محیطی است. بعضی از مواد شیمیایی که نتایج نویدبخشی نشان داده اند، هم با مشکل کندی کلیدزنی مواجهند.

یکی از ضعف های ساختاری مولکولی خودآرا در این است، که نتایج کنونی نرخ بسیار بالاتری از تغییر نقیصه را نسبت به راهکارهای مرسوم لیتوگرافی نشان می دهند.

بالاتری از اعتمادپذیری از طریق گزینش مناسب عوامل شیمیایی و طراحی مناسب با فرآیندهای تسلسلی دور از این حال امکان دستیابی به سطح بسیار ذهن نیست. از طرف دیگر می توان نرم افزارها را طوری طراحی کرد که از طریق آزمایش و برگزیدن عناصر در ژولای ۲۰۰۱ از چنین راهکاری *UCLA* سالم، خود را با نقایص سازگار کند. گروه مذکور هیولت پکارد و در مدارات مولکولی خودآرا شده خود

بهره برده، اختراعی در این زمینه به ثبت رساندند در درازمدت توانایی خودآرا نمودن مولکولها به صورت عناصر الکترونیکی کارا، موازنه اقتصادی بالقوه بسیار بهتری نسبت به راهکارهای لیتوگرافی مرسوم دارد. با این حال مشکل اتصال دادن عناصر به صورت یک مجموعه مفید همچنان باقی می ماند - این مشکلی است که مثل همه راهکارهای دیگر نانوالکترونیک در ساختارهای پیچیده تر غامض تر می شود و به همین علت ساختارهای حافظه به خاطر سادگی نسبی خود زودتر از مدارهای منطقی پیچیده دست یافتنی می شوند.

راهکار خودآرایی تسلسلی (بخش خودآرایی را ببینید) روالی را برای ساخت ساختارهای پیچیده تر ارائه می کند و می تواند مسأله اتصالات را نیز حل کند.

از پیوندهای شیمیایی یا دیگر نیروهای اتمی می توان برای اتصال دهی عناصر الکترونیک مولکولی به همدیگر در نقاط مناسب یک ساختار بزرگتر - که احتمالاً با روشهای مرسوم لیتوگرافی ساخته شده اند - سود جست.

در حال حاضر الکترونیک مولکولی تا حد زیادی در آزمایشگاه مانده و فرصت های اندکی را برای تجاری سازی در کوتاه و میان مدت پیشنهاد می کند. محققین مایلند فاصله زمانی ده سال یا بیشتر را برای جاری سازی پردازنده های مولکولی برآورد کنند، اما گستره فعالیت های تحقیقاتی و سرمایه گذاری های بی سابقه در این زمینه ممکن است واقعاً برخی از جهش ها و مصارف دور از انتظار را به زودی به ارمان آورند؛ مصارف حافظه ممکن است در کوتاه مدت عملی شوند. زمان دراز پیش بینی شده به معنی لزوم صرف نظر کردن سرمایه گذاران از این عرصه نیست، چون کار در این زمینه می توان مشتقاتی در دیگر زمینه ها (مخصوصاً شرکت های آشکارسازی زیستی) داشته باشد.

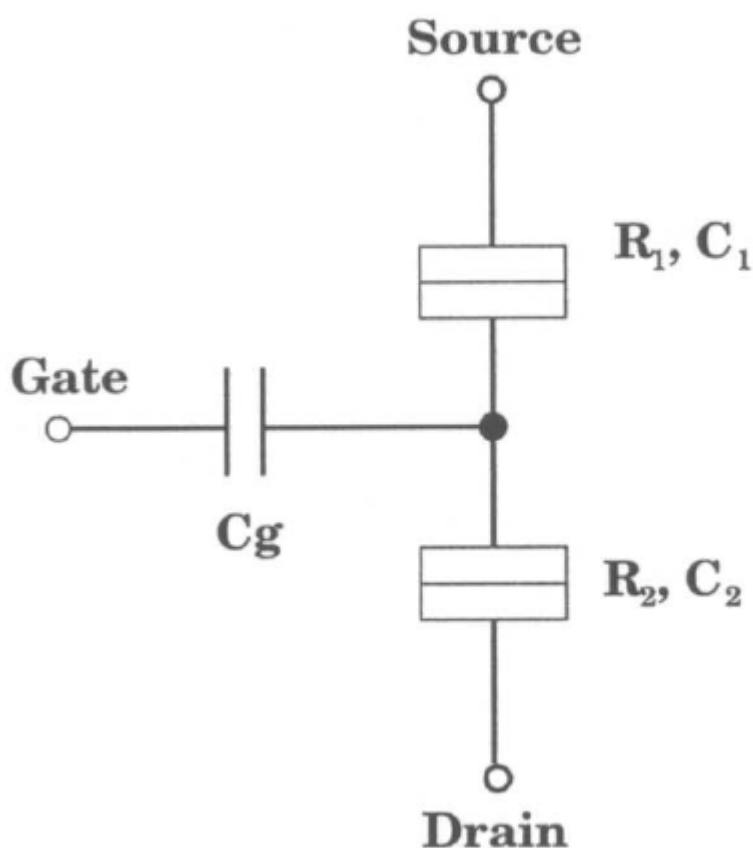
حال که دید کلی از الکترونیک مولکولی پیدا کردیم به بررسی تخصصی تر دو مطلب مورد بحث در این مقاله می پردازیم. که آن ها به ترتیب الکترونیک مولکولی است. لازم بذکر است که مرجع ما در این دو بخش مقاله ای از آقایان *T.Raja, V.D.Agrawal and M.L.Bushnell* تحت عنوان *A Tutorial on the Emerging Nanotechnology Device* می باشد.

۴. ترانزیستور تک الکترونی (*single-electron transistor (SET)*)

هدف گذاری در این مقاله توضیح اصول و فیزیک پشت سر *SET* ها را توضیح می دهد. همچنین نمودارهای هدایت و مشخصات ولتاژ - جریان آن نیز مورد بررسی واقع می شود.

۴-۱. اصول ترانزیستورهای تک الکترونی

ساختار ترانزیستور تک الکترونی در شکل (۲) بخوبی نشان داده شده است. همانطور که می بینید این وسیله از دو اتصال تونلی که در شکل هر کدام با یک خازن و یک مقاومت نشان داده شده و یک جزیره جدا کننده دو اتصال که به بایاس گیت وصل شده تشکیل شده است.



شکل (۲): شکل یک SET

البته به جزء بایاس گیت یک بایاس درین -سورس نیز در سرتاسر اتصال های تونلی همانطور که در شکل می بینید وجود دارد.

برای یک ترانزیستور تک الکترونی می توان دو سد پتانسیل در نظر گرفت. در واقع دو اتصال تشکیل یک مدار متشکل از دو اتصال تونلی بصورت سری می دهند. که یک جزیره بین دو اتصال توسط منبع ولتاژ قرار گرفته بین درین و سورس تامین می شود. برای بایاس های کوچک هیچ جریانی از الکترون ها بین درین و سورس ایجاد نمی شود. زیرا انرژی کافی برای غلبه بر سد پتانسیل در الکترون ها موجود

نیست. برای بررسی نحوه ایجاد جریان فرض می کنیم که ولتاژ بایاس گیت برابر با صفر باشد. سپس به افزایش بایاس درین -سورس می -پردازیم. البته همانطور که گفته شد بایاس های کم هیچ جریانی برقرار نمی شود.

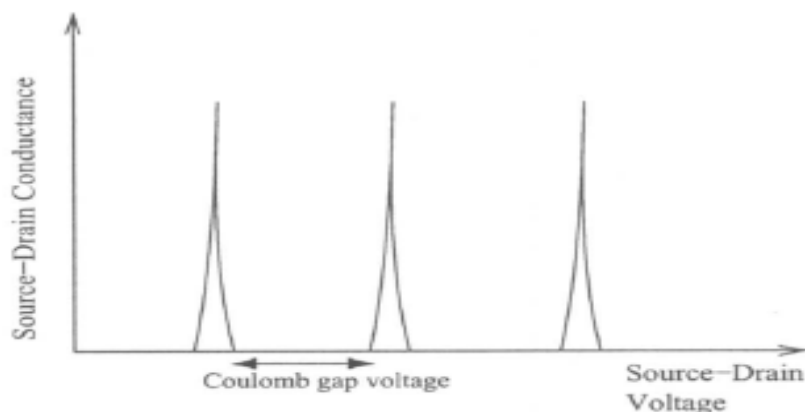
افزایش ولتاژ بایاس درین -سورس بطور دائمی باعث ایجاد پدیده تونلینگ، *Tunneling* در دیود (اتصال) اول می شود. یعنی یک الکترون از سد پتانسیل اتصال اول تونل زده و خود را به جزیره قرار گرفته بین دو اتصال می رساند. حضور الکترون در جزیره باعث افزایش سطح انرژی از Ne به $(N+1)e$ می شود. (N): تعداد الکترون موجود در جزیره قبل از وقوع پدیده *Tunneling* یا در بایاس گیت و درین سورس صفر می باشد).

بر اساس اصل جاذبه و دافعه بارهای ناهمنام و همنام، پس الکترون های موجود در جزیره قبل از ورود الکترون اضافی نسبت به هم ایجاد نیروی دافعه داشته اند. که این نیروها باعث ایجاد حالتی در سیستم می شوند که سیستم را به سمت تعادل ببرد. حال وجود الکترون اضافی تعادل قبلی را بهم زده، و نیروهای دافعه در راستای برقراری تعادل، سعی در خارج کردن الکترون اضافی از جزیره را دارند. در واقع جهت نیروهای اعمالی به سمت خروج الکترون از سد پتانسیل دوم می باشد. با وقوع پدیده *Tunneling* در اتصال دوم و خروج الکترون اضافی از جزیره سیستم و انرژی به حالت قبلی برمی گردند. یعنی سیستم به تعادل و انرژی به Ne برمی گردد. (این پدیده را با خاصیت اینرسی جزیره و تمایل به حفظ آن نیز می توان توجیه کرد).

از آنجا که ولتاژ سورس به درین تغییری نکرده است. یک الکترون جدید دوباره از سد پتانسیل اتصال اول تونل می زند. و بر اساس تحلیل بالا الکترونی نیز از جزیره به تونل زنی از سد پتانسیل دوم می شود. در نتیجه تکرار پدیده بالا یک جریان یکنواخت و پیوسته از دو اتصال عبور می کند. که مقدارش با افزایش ولتاژ بایاس درین -سورس متناسب است. (فراموش نکنیم که فرض ما ولتاژ بایاس کیت برابر صفر بوده است).

حال اگر ما به نحوی ارتفاع سد پتانسیل اتصال دوم را بالاتر از سد پتانسیل اول ببریم واضح است که تعدادی از الکترون ها در جزیره محبوس می شوند. قبل از آنکه بتوانند به این پدیده که بازداشتن الکترون ها از ترک فوری جزیره است سد یا انسداد کولمب (*coulomb blockade*) می گویند. (از این به بعد از آن به نام سد کولمب نام می بریم).

افزایش ولتاژ درین -سورس ضروری برای غلبه بر سد کولمب، ولتاژ دهنه کولمب (*coulomb gab*) *voltage* نامیده می شود. هنگامیکه ولتاژ درین -سورس را زیاد می کنیم بارهای الکتریکی یک افزایش تدریجی در جریان می دهند که این تنها بخاطر افزایش ولتاژ دهنه کولمب که در شکل (۳) نشان داده شده می باشد. از آنجا که شکل موج دیده شده شبیه پلکان است به آن پلکان کولمب می گویند.



شکل (۳): هدایت بر حسب ولتاژ

فرض کنید ولتاژ درین -سورس را پایین ولتاژ دهنه کولمب نگه داریم اگر ولتاژ گیت را زیاد کنیم در واقع انرژی اولیه سیستم را زیاد می کنیم. یا انرژی جزیره با الکترون اضافی را بتدریج کاهش می دهیم. می توان نتیجه گرفت که ولتاژ گیت متناظر است با نقطه ماکزیمم لبریز شدن سد کولمب، که هردو حالت منجر به محدود شدن انرژی حالت پایین تر سیستم می شوند.

بالا بردن سد کولمب باعث می شود الکترون ها به داخل و خارج سد تونل بزنند. همچنین ارتفاع سد کولمب را بسادگی توسط شارژ منفی نیم الکترونی خازن گیت بالا می بریم. می توان این فرایند را با ایزوله کردن جزیره و شارژ خازن با واحد کوانتیزه بار الکترون، در حالیکه گیت یک منبع الکترون فراوان است، تصور کرد. بارها در خازن گیت یک جابجایی الکترون ها ناشی از یونهای مثبت رانشان می دهند. (بحث ریاضی برای بخش های دیگر) حال اگر ولتاژ گیت را همچنان افزایش دهیم. خازن با منفی یک الکترون شارژ می شود. و این یعنی کاهش ارتفاع سد، و به طبع آن توقف تونل زنی الکترون ها، که از آن به حالت

دوم یاد می شود. حالتی پایدار با انرژی پایین تر از حالت قبلی که نقش حالت قطع سوئیچ را بازی می کند.

سد کولمب دوباره برقرار می شود ولی با این تفاوت که تعداد الکترون های ثابت جزیره یکی افزایش یافته است. پس ما هر دو حالت قطع و وصل جریان را با تغییر ولتاژ گیت شناسایی کردیم.

حالت اول: (وصل)، شارژ منفی نیم الکترونی خازن گیت

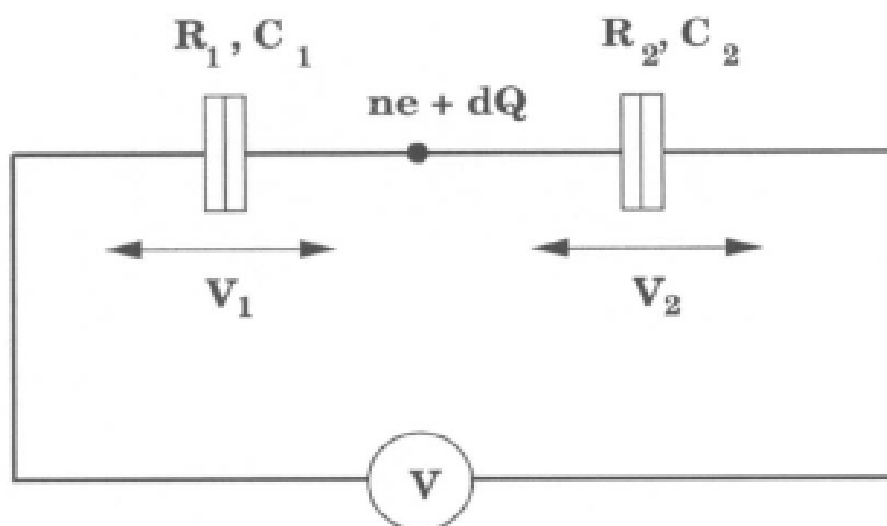
حالت دوم: (قطع)، شارژ منفی یک الکترونی خازن گیت

سادگی کار ما را امیدوار به جایگزینی این تکنولوژی به جای ماسفت می کند.

حال موضوع را با کمی ریاضیات تحلیل می کنیم.

۲-۴. مشخصات جریان - ولتاژ ترانزیستورهای تک الکترونی

در بخش قبل با نحوی عملکرد ترانزیستورهای تک الکترونی بدون هر گونه آنالیز ریاضی روبرو شدیم. حال عملکرد توضیح داده شده در بالا را با تحلیل ریاضی آن بیان می کنیم.



شکل (۴): مدار دو اتصالی ترانزیستور تک الکترونی

سیستم دو اتصالی نشان داده شده در شکل (۴) را در نظر می گیریم. پارامترها و اندازه های هر دو اتصال در شکل مشخص شده است. در ابتدا فرض می کنیم

$$R_1 \ll R_2 \quad C_1 \ll C_2$$

این فرض باعث می شود سرعت تونل زنی در اتصال اول خیلی بزرگتر از اتصال دوم شود. همچنین فرض می کنیم بایاس خارجی درین-سورس بقدری زیاد باشد که جریانی از چپ به راست برقرار شود. (شکل ۵ را نگاه کنید) افزایش ولتاژ بایاس برای کنترل ولتاژ دهنه کولمب برابر است با:

$$V_1 = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot V - \frac{ne + \delta Q}{C_1 + C_2}$$

$$V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot V + \frac{ne + \delta Q}{C_1 + C_2}$$

که $ne + \delta Q$ بار روی الکتروود مرکزی است. که نتیجه n الکترون روی الکتروود ناشی از واقعه تونل زنی و یک بار ابتدائی δQ ناشی از ولتاژ خارجی متصل شده به الکتروود بوسیله خازن گیت است.

برای ولتاژ خارجی معلوم الکترون ها به الکتروود مرکزی تونل می زنند. تا V_1 به نسبت $e/(C_1 + C_2)$ در نقطه سد کولمب اتصال کوچک شود. با توجه به فرض سرعت بالا در تونل زنی، سیستم قبل از نیاز ما به هدایت سد کولمب خواهد رسید. این تضمینی بر برقراری هدایت سد کولمب در موقع لزوم می باشد. و بسادگی از لحاظ ریاضی قابل اثبات است.

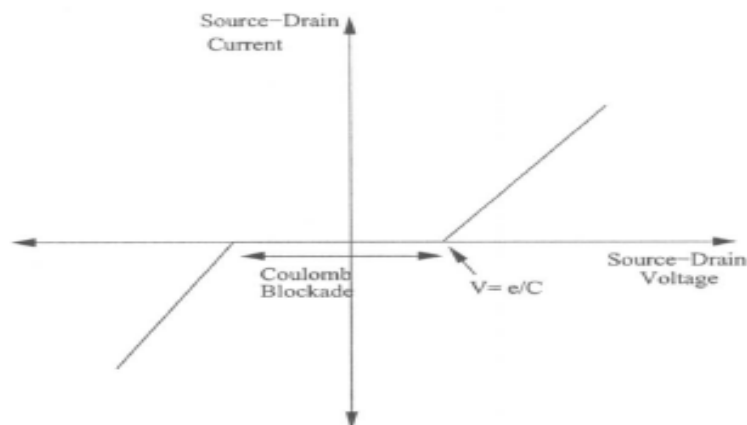
حال به ادامه مطلب باز می گردیم. در این حال می بینیم به خارج C_2 اتصال می زنند. اما سرعت این تونل زنی محدود است. و در واقع جریان عبوری از وسیله تابع سرعت تونل زنی از اتصال دوم است. (فراموش نکردیم که سد کولمب اتصال دوم را بالاتر از سد کولمب اتصال اول در نظر گرفتیم). و برطبق فرمول بالا می بینیم که V_2 بوسیله شرایط سد کولمب اتصال اول محدود است. پس ساده ترین نتیجه گیری ممکن ثبات جریان عبوری از وسیله یک رنج از ولتاژ خارجی است. برای افزایش تعداد الکترون ها در الکتروود باید به طریق زیر عمل کرد.

$$\Delta V_1 = \frac{e}{C_1 + C_2} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot \Delta V \Rightarrow \Delta V = \frac{e}{C_2}$$

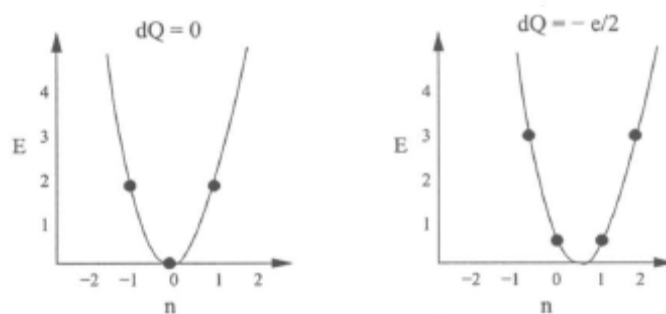
برطبق بالا می دانیم. که با تغییر از پارامترهای زیر به ما اجازه می دهد که جریان را افزایش دهیم.

$$\Delta I = \frac{\Delta V}{R_2} = \frac{e}{R_2(C_1 + C_2)}$$

بنابراین در منحنی مشخصه ولتاژ-جریان ما با نموداری که نمایش چند خط متفاوت در عرض های مختلف ΔV روبرویم. وقتی پارامترها را نزدیک کنیم یعنی $R_1 \approx R_2$ و $C_1 \approx C_2$ ، سرعت تونل زدن در هر دو اتصال با یکدیگر قابل مقایسه است. هدایت سد دیگر نظیر هدایت قبلی (طراحی قسمت های بالاوپایین منحنی ولتاژ-جریان که بطور خطی در شکل (۵) نمایش داده شده نیست).



شکل (۵): منحنی مشخصه ولتاژ-جریان



شکل (۶): دیاگرام انرژی اثر بار کسری در الکتروود مرکزی از دو اتصال رانشان می دهد. ولی بارها تنها می توانند بوسیله یک مقدار صحیح به سوی حالات علامت گذاری شده با نقاط توپر در شکل تغییر کند.

۳-۴. هدایت ترانزیستورهای تک الکترونی

شکل ترانزیستورهای تک الکترونی نمایش داده شده است. برای تحلیل ابتدا بایاس خارجی بکاررفته بین سورس-درین را صفر در نظر می گیریم. $(V \approx 0)$ انرژی خازنی الکتروود مرکزی برابر است با

$$E = \frac{(ne + \delta Q)^2}{2(C_1 + C_2)}$$

که n تعداد الکترون گیر افتاده در جزیره است. (الکترون هایی که از اتصال اول تونل زده ولی در اتصال دوم گیر افتاده اند). δQ بار کسری ناشی از الکتروود گیت است. برطبق فرمول بالا رابطه بین انرژی الکتروستاتیکی و n به شکل منحنی سهموی می باشد. که این منحنی برای دو مقدار محدود δQ در شکل (۶) نشان داده شده است. تبصره: که ناشی از ذات گسسته از تونل زنی است تنها این انرژی ها بانقاط توپر نمایش داده شده اند. (فراموش نکنیم که در حوزه کوانتومی هستیم).
انرژی فعال سازی تونل زنی بصورت انرژی مورد نیاز برای اضافه کردن یک الکترون به جزیره تعریف می شود نمایش ریاضی آن بصورت زیر می باشد.

$$\Delta E = E(n+1) - E(n)$$

که وقتی $\delta Q = 0$ است.

$$E = \frac{e^2}{2(C_1 + C_2)}$$

که به آن انرژی سد کولمب نیز گفته می شود. این همان هدایت عادی است که قبلاً بطور مفهومی بیان شده است. حال برای حالت $\delta Q = -e/2$ انرژی فعال سازی کاهش می یابد. در واقع بسمت صفر میل می کند و هر دو حالت $E(n)$ و $E(n+1)$ تنزل می یابند. بنابراین بارهای انتقال آزاد می شوند و میزان هدایت یک پیک در اندازه و بار دارد. (هدایت افزایش شدیدی می یابد). ما این نقاط ویژه که میزان هدایت را افزایش می دهند. باید توجه کافی داشته باشیم. در واقع این نقاط منحنی ولتاژ-جریان در بخش های پلکان کولمب واقع شده اند. بخش های پلکان ولتاژ دهنه کولمب در ترمینال گیت از یکدیگر جدا شده اند.

۴-۴. جمع بندی ترانزیستور های تک الکترونی

در این بخش، ماصول اساسی و عملکرد ترانزیستور های تک الکترونی را توضیح دادیم. اما رنج خاصی که برای قطع و وصل ترانزیستورهای تک الکترونی باید بدهیم. مشکلات زیادی را در زمینه جایگذاری این تکنولوژی با ماسفت ایجاد می شود. به هر حال ترانزیستور های تک الکترونی برای ساخت حافظه ها بکار می رود.

۵. الکترونیک مولکولی

یک اکثریت عمده از ابزار کوانتومی حالت جامد با مانعی به نام بطور کافی دقیق نبودن روش های لایتوگرافی برای عهده دار شدن ابزارهای یکنواخت در سرتاسر چیپ روبرو است. در واقع اصول اساسی در این تکنولوژی یکسان کردن ترکیب مولکول ها در ساختار مولکولی در ساختن ابزار های محاسباتی می باشد.

مولکول های تک بطور معمولی در رنج نانومتر می باشند. این مولکول ها یکسان هستند. و می توانند اساساً به شکل ساختارهایی که تابعی از سوئیچ و یا حتی ترانزیستورهای حالت جامد هستند، ترکیب شوند. البته کارگاههای برای تست اجرا، مدل ابزارهای جدید وجود دارد. نمی خواهیم بگوییم که ابزارهای الکترونیک مولکولی از یک تصور تحقیقی چندان فرا تر رفته اند. اما مزایای قابل توجه ساخت ما را مجبور به حرکت بسمت عملی تر کردن این تفکر می برد. در این بخش ما انواع متفاوت ابزارهای الکترونیک مولکولی و راههای عمومی اجرا آن را توضیح می دهیم. همچنین ما یک توضیح مختصری از سیم های مولکولی و بینش ابزارهای متفاوت را نیز بیان می کنیم. برای فهم الکترونیک مولکولی باید به فهم مطلوبی از شیمی آلی است یافته باشیم. اما ما حوصله جدا سازی مطالب را از ابعاد مختلف نداریم. پس هدف را فقط به آشنایی مقدماتی با محاسبات مولکولی می پردازیم.

۵-۱. ابزارهای سوئیچی مولکولی

اینجا ما ابزارهای الکترونیکی را به چهار بخش تقسیم می کنیم.

- (۱) ابزارهای اثر کوانتومی: که بوسیله کنترل کردن میدان الکتریکی بالا عبوری از وسایل عمل می کند.
- (۲) ابزارهای مولکولی الکترومکانیکی: نیروهای مکانیکی و الکتریکی را برای تغییر پیکر بندی یا به حرکت در آوردن مولکول های سوئیچ کننده یا گروهی از آن ها را، تاجریان قطع و وصل کند، استفاده می کنند.

۳) ابزارهای مولکولی فتواکتیو (پاسخ دهنده به نور): نور را برای تغییر پیکر بندی یا به حرکت در آوردن مولکول های سوئیچ کننده یا گروهی از آن ها را، تاجریان قطع و وصل کند، استفاده می کنند.

۴) ابزارهای سوئیچی الکتروشیمی: از را برای تغییر پیکر بندی یا به حرکت در آوردن مولکول های سوئیچ کننده یا گروهی از آن ها را، تاجریان قطع و وصل کند، استفاده می کنند.

در حال حاضر توجه بیشتر روی دو گروه اول است. چون قرابت بیشتری با ادوات حالت جامد دارند. ابزارهای فتواکتیو سریع و کوچکند اما آنها نمی توانند سوئیچ شوند بصورت مدار مجتمع، وسایل الکتروشیمیایی را باید با یک حلال پوشاند که این نیز با اهداف مدار مجتمع نمی خواند. اما به نظر توضیح مختصری درباره نحوی اجرا و مونتاژ ابزارهای الکترونیکی قبل از ادامه بحث مفید می باشد.

۵-۲. اجرا و مونتاژ ساختارهای الکترونیک مولکولی

در حالت کلی الکترونیک مولکولی اساسش روی پذیرفتن این که فرآیند های شیمیایی وجود دارد که می توانند یک ارتباط الکتریکی را بسازند. اما در این جا نیز دو راه عمده وجود دارد.

چیمو سنتز (*MS(machanosynthesis chemo)*) هست. که برای اجرای ساختارهای نانویی مولکول با مولکول استفاده می شود.

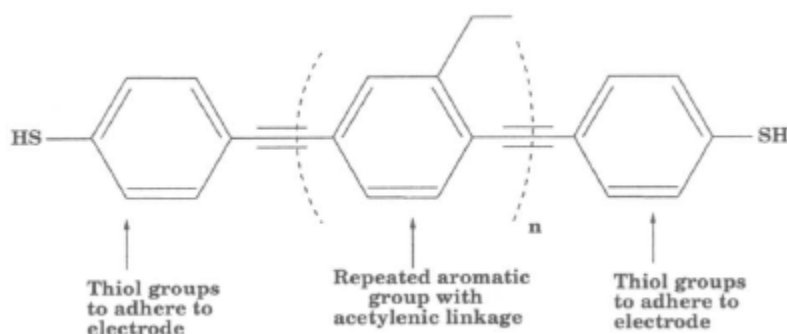
کاوشگر نانو (ادوات کنترل کننده با دقت بالا) مانند میکروسکوپ اسکن کننده تونل زدن الکترون ها (*STM*) و میکروسکوپ های زیر اتمی (*AFM*)، این ابزارهای حساس با مهارت بسیار ساخت در سطح مولکولی را ممکن کرده اند. و بوسیله کاوشگر نانو و ساختارهای مولکولی یافت شده که بصورت سوئیچی یا ترانزیستوری عمل می کنند. رویای ساخت مدار مجتمع مولکولی را به واقعیت نزدیکتر کرده اند.

البته چیمو سنتز (*MS(machanosynthesis chemo)*) یک راه دیگری برای ساخت ساختارهای نانویی می باشد. که با استفاده از مونتاژ کردن شیمیایی خود مولکول ها به رهیافت جدیدی می رسیم.

۵-۳. سیم های مولکولی

با مونتاژ مولکول ها می توانند گیت ها را ساخت اما ارتباط آن ها باید بوسیله سیم های مولکولی باشد. و این برای ابزارهای دو دهانه ای بسیار ضروری است. سیم های مولکولی که الکترون ها را بین آن ها عبور می دهد. یک ساختمان آن ها یک حلقه ساده است.

اما یک مشکل بزرگی برای این مولکول این است که علیرغم هدایت خوب، پاسخ باندی خوبی ندارد. و آن‌هایی که پاسخ باندی خوبی دارند هدایت خوبی ندارند و همچنین اگر سیم‌ها یک ضخامت مولکولی داشته باشند. پس مقاومت بسیار بالایی را نشان می‌دهند. و این نیز مشکل بسیار جدی می‌باشد. اولین جرقه این مباحث جدید با کشف توپ باکی زده شد. این مولکول از ۶۰ اتم کربن تشکیل شده است. که البته تا حدودی پاسخ فرکانسی و هدایت مطلوبی را ارائه می‌دهد. ردیف‌های توپ باکی با ترکیب با یکدیگر لوله‌های باکی را تشکیل می‌دهند. که این مشابه اتم‌های نانو تیوپ کربن هست که با پیوندهای شیمیایی محکم در کنار یکدیگر نگه داشته شده‌اند. این‌ها آرایه‌های شش ضلعی از اتم‌های هدایت‌کننده و بهترین سیم‌های مولکولی که تا کنون ساخته شده‌اند هستند.



شکل (۷): یک سیم مولکولی با گروه‌های چیول سرویس دهنده مانند الکترودهای کوتاه شده

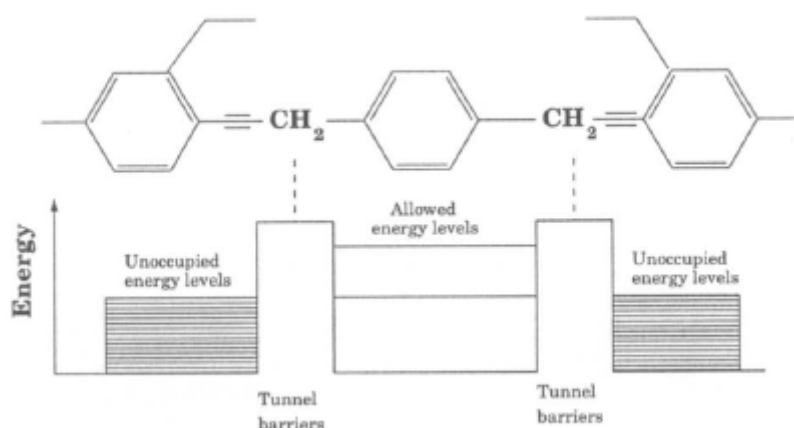
دیگر آلترناتیو‌هایی مانند گروه‌های تیول از دیگر موارد مورد استفاده سیم‌های مولکولی هستند. این ساختارها به الکترودهای موازی می‌چسبند و تشکیل یک اتصال بندی فعال می‌دهند. یک سیم مولکولی ساده با این پیوند‌ها در شکل (۷) نشان داده شده است. این سیم‌ها از بنزن شبیه حلقه‌های هیدروکربور اشباع نشده ساخته شده‌اند.

دستکاری‌های ریز در اجرا مولکول‌های سوئیچ‌کننده به نظر آسان‌تر از نشان دادن آن‌ها در سیم‌هایی شبیه ساختارشان است. و این به نظر راهی آینده‌دار در سیم‌های مولکولی است.

۵-۴. ابزارهای الکترونیک مولکولی اثر کوانتم

این ابزارها با یک تصور وام گرفته شده از پدیده تونل زنی و اثر سوئیچ کردن الکترون تک کار می کنند. در واقع تصور اصلی خلق چاه پتانسیل برای ایجاد محدودیت در الکترون های گیر افتاده در آن است. کنترل این چاه های پتانسیل توسط میدان الکتریکی است. با تغییر آن حالات قطع و وصل را ایجاد می کنند. البته مثال های عملی برای اثبات خصوصیات اثرهای کوانتمی و شرایط تونل زنی از سد کولمب با ابزار های متعدد ساخته شده وجود دارد. که این چاه کوانتمی می تواند همچنین در نقش یک سیم مولکولی شبیه شکل (۷) نیز بکار رود. که روش آن داخل کردن زوج های اوربیتال کانبجوکیست در گروه های سد می باشد. که این توزیع پتانسیل در شکل (۸) نمایش می دهند.

وقتی مولکول ها در یک بایاس ولتاژ قرار می گیرند. ارتفاع سد کاهش می یابد. پس پدیده تونل زنی شدید تر می شود. اما یک مشکل اساسی زیاد بودن انرژی بارگذاری در سمت دیگر چاه نسبت به سطح انرژی فاصله گذاشته با چاه است.



شکل (۸): یک سد پتانسیل خلق شده از گر های سد در یک سیم مولکولی

که مطلب بالا نشان می دهد که ممکن است سورس ودرین سطوح انرژی جفت شدن را نداشته باشند. و در نتیجه تونل زنی به خارج متوقف شود در حالی که تونل زنی به داخل وجود دارد. به هر حال راههای متعددی برای استفاده از سد پتانسیل موجود است که ابزارهای الکترونیک مولکولی آینده از آن استفاده خواهند کرد.

۵-۵. ابزارهای الکترونیک مولکولی الکترومکانیکال

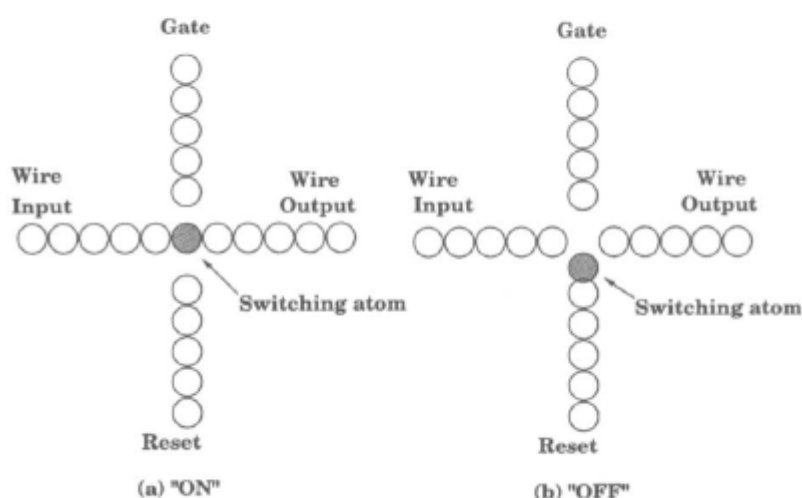
همانطور که در بخش معرفی ابزار های الکترونیک مولکولی گفته شد ابزارهای الکترومکانیکال از نیروهای الکتریکی و مکانیکی برای تغییر شکل یا دستکاری مولکول ها استفاده می کنند. می دانیم که ورودی های مکانیکی سریعتر از ورودی های الکتریکی می باشد. پس سرعت این ابزار با ورود عنصر مکانیکی سرعت قابل قوی می گیرد. اما نکته جالب توجه قابلیت استفاده از این نیروها برای ایجاد حالات قطع و وصل می باشد. نکته اساسی که باعث ایجاد گونه های مختلف از این ابزار می شود. به نحوی استفاده از این نیروها برای ایجاد حالات قطع و وصل مولکولی برمی گردد. که ما بعضی از این گونه ها را در زیر معرفی می کنیم.

۵-۶. تقویت کننده های تک مولکولی

این کاربرد دیگری از توپ باکی است که در بخش های قبل گفته شد. مولکول کربن ۶۰ می تواند نگه داشته شود. بین راس میکروسکوپ اسکن کننده تونل زننده (STM) ولایه وقتی راس روی آن فشار وارد می کند. در این زمان توپ باکی تغییر شکل می دهد. و هدایتش کاهش می یابد. پس به نظر می رسد ما به یک راه برای کم وزیاد کردن هدایت دست یافته ایم. البته در این قسمت نیرو خارجی توسط یک گیت فیزوالکتریک یا یک سیستم محرک که توسط یک میدان الکتریکی کنترل می شود.

۵-۷. باز بخش های اتمی

مفهوم یک باز بخش اتمی در شکل (۹) نمایش داده شده است. اینجا یک اتم متحرک وجود دارد که توسط گیت کنترل می شود. اتصال سیم ها حالت وصل وعدم اتصال سیم ها حالت قطع سوئیچ را نشان می دهد. در واقع اتم بین کنترل کننده - کنترل نکننده فاز حرکت می کند. و بسادگی اثر سوئیچی را نشان می دهد. یک سیم سومی قابل مقایسه باترینال گیت می تواند همچنین اضافه شود. که بطور مرتب شارژ و دشارژ می شود. اگر اتم گیت اتم سوئیچی را دفع کند پس حالت خاموش پیش می آید. و اگر اتم گیت اتم سوئیچی را جذب کند حالت وصل پیش می آید. بهر حال سیستم های مبتنی بر باز پخش های اتمی محدود به دو حالت هستند. و بدون عبور سیم ها توابع منطقی کمی می تواند از این ساخته شود. که این دو مشکلات سیستم های مبتنی بر باز پخش های اتمی هستند.



شکل (۹): یک باز بخش اتمی که عمل می کند با گیت a اتم سوئیچ کننده در فاز روشن است بخاطر جذب گیت b اتم سوئیچ کننده در حالت خاموش است بخاطر دفع گیت، ترمینال $rest$ نقش باز - گرداننده اتم سوئیچی به حالت روشن را بر عهده دارد.

۵-۸. باز بخش های اتمی محدود

این ابزار مستقر روی گشتاورهای اتمی مشابه یک باز بخش اتمی کار می کند. با یک تفاوت، که در این جا گشتاور مولکول ها را می چرخاند. البته به دلیل قابلیت اطمینان بیشتر باز بخش های اتمی در ساخت جذب کننده هایی که در داخل گرو های ($rotamer$) هستند چندان کار بردی ندارند. ($rotamer$ بخشی از یک مولکول است) وقتی $rotamer$ روی سیم سوئیچ هستند. حالت وصل است و جریان برقرار است. و وقتی $rotamer$ به خارج از سیم می چرخند حالت قطع است و جریانی وجود ندارد.

۵-۹. جمع بندی الکترونیک مولکولی

به زودی ساخت ترانزیستورهای مولکولی جنبه صنعتی به خود خواهد گرفت این ابزارها در مقیاس نانویا با مونتاژ کردن خودشان و یا با مداخله کاوشگرهای نانویی ساخته خواهند شد. سیم های مولکولی با کمک بهم پیوستن مولکول های توپ باکی ساخته خواهد شد. ابزارهای اثر کوانتومی به سزعت فرا گیر خواهند شد. راههای استفاده از نیروهای مکانیکی و الکتریکی را برای تغییر پیکر بندی یا به حرکت در آوردن مولکول های سوئیچ کننده یا گروهی از آن ها را، تاجریان قطع و وصل کند، عمل تر خواهد شد. آینده مشکلات باز بخش ها را به حداقل خواهد رساند و ساخت آن ها را ممکن خواهد کرد.

۶. حافظه ها ولج های الکترونیک مولکولی

بسیاری از ابزارهای الکترونیک مولکولی در حال حاضر دارای دو ترمینال است. (ورودی-خروجی) این وسایل عملکردی شبیه دیودهای معمولی در ابزارهای حالت جامد یا دیودهای تشدیدکننده تونلی (رزونانس) دارد. در این مقاله، به بررسی امکان مجتمع سازی دیودهای مولکولی در معماری مدارات جریان می پردازد. در واقع هدف اولیه محققین ساخت یک دیود معمولی (از لحاظ مشخصه ولتاژ - جریان) اما ساختاری متفاوت (مولکولی) بوده است. که خوشبختانه تا به امروز محقق شده است. و هدف بعدی که هدف این، مقاله هم می باشد. مجتمع سازی فرایند بالا است. که البته به طور کلی و نمونه ای بحث شده است.

مثال نمونه ای همان طور که از اسم مقاله مشخص است. یک لچ بای استابل و یک حافظه است.

مولکول مورد استفاده *2-amino-4- ethynylpheny-4 ethynylpheny-5 nitro-1- bensenethiolate*

است. که توسط گروه *reed* از دانشگاه *yale* منتشر شده است.

که برای یک لچ بای استابل و یک آرایه حافظه شبیه سازی شده است و نتایج توسط نرم افزار *HSPICE*. تحلیل شده است.

بیش از ۲۵ سال پیش مولکول ها برای ساختن بلوک های توابع منطقی و خانواده هایشان پیشنهاد شدند. در واقع ابزار الکترونیک مولکولی پتانسیل بالا تری نسبت ماسفت ها برای ارائه مزایای بیشتر دارند. چون مدارهای مجتمع ساخته شده با مولکول ها از بعد اندازه و زمان پاسخ بسیار بهبود یافته است. (اندازه کوچکتر، و زمان پاسخ های سریعتر) درست است که مزایای بالا اهمیت زیادی دارد. اما فاکتورهای دیگری نیز مانند ساده گی برقراری اتصالات داخلی، ساده گی اجرا و همچنین ساده گی پیدا کردن نقص و رفع آن نقص برای گسترش یک تکنولوژی موثر است.

اگر چه این امروزهء مشخص شده است که چندین نوع از عناصر غیر خطی دو ترمینال را می توان با ترکیبات شیمیایی ساخت. اما این هنوز به صورت فنی به مدار مجتمع منتقل نشده است.

اگر چه امروزهء تصور داشتن یک مونتاژ دقیق با دقت و در فاصله نزدیک بسیار مشکل است اما وجود اثرات الکتریکی سودمند ما را در رساندن این تصور مبهم به واقعیت مشتاق تر می کند.

این کار با تمرکز برای طراحی و توسعه چندین کاربرد های پتانسیل و مدارات الکترونیک مولکولی محقق خواهد شد. در این مقاله مایک لچ بای استابل که در حافظه ها استفاده می شود را شبیه سازی کرده ایم. و در نهایت مفاهیم معماری از این مدارها مورد بحث واقع شده است.

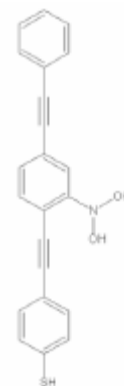
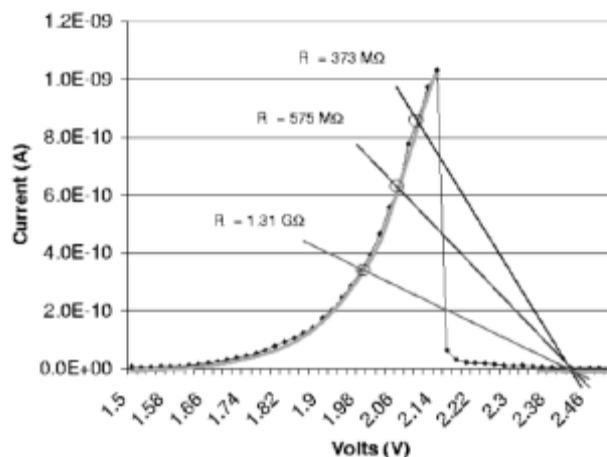
۶-۱. سیستم‌ها و عناصر مداری

یک اکثریتی از ابزارهای الکترونیک مولکولی دو ترمینالی شبیه دیود ها ساخته شده اند. خصوصیات این ابزارها انواع دیود های معمولی (مانند دیودهای یکسوکننده و دیودهای تشدیدکننده رزونانسی) را در بر می گیرند. خانواده های منطقی به خوبی برحسب دیود طراحی شده اند. تعداد زیادی از گیت های منطقی و سیستم های دیجیتال طراحی شده برحسب دیود موجد هستند پس اگر ما سیستم مدار مجتمع دیودی را بسازیم. توانایی ساخت گیت های منطقی ساده ای مانند *AND* یا *OR* امری بدیهی خواهد بود. چون این گیت های منطقی ساخته می شوند فقط با دیودهای یکسوکننده و این پیچیدگی چالش را بسیار کم خواهد کرد. اما نباید بسادگی از این نکته گذشت که ما هر چقدر در اجرا و مونتاژ و تحلیل پاسخ های ولتاژ-جریان دیودهای یکسو ساز مهارت داریم. درباره دیودهای الکترونیک مولکولی ناتوانیم. که این به متفاوت و گستردگی مولکول های مورد استفاده باز می گردد.

مثلاً در منحنی ولتاژ-جریان مولکول

2- *amino-4-ethynylphenyl-4 ethynylphenyl-5nitro-1-benzenethiolate* ناحیه ای با مقاومت متغیر منفی موجود است. که از آن برای استفاده در ساختارهایی مانند اسیلاتورها، حافظه ها و عناصر منطقی دیجیتال استفاده می کنیم. وقتی یک وسیله *NDR* را بطور سری با یک مقاومت و یک منبع قرار می دهیم. یک لچ بای استابل ساخته ایم. اگر چه بار گذاری با یک مقاومت ساده ترین روش ساخت یک لچ بای استابل است. اما تحقیقات قدیمی تری وجود دارد. که نشان می دهد که یک *RTD* می تواند با یک *FET* تخلیه ای یا *RTD* دیگری برای ساختن یک لچ و یا یک بای استابل بارگذاری شود. این روش در تکنولوژی *CMOS* بسادگی و بدون هیچ مشکلی بکار رفته است.

همان طور که شکل (۱۰) داده های ولتاژ-جریان اضافه شده به یک مقاومت های بار متغیر را نشان می دهد. می بینیم که وسیله مولکولی یک پیک ماکزیمم جریان تقریباً برابر $1nA$ و یک پیک مینیمم جریان تقریباً برابر $1pA$ دارد. ضریب تغییرات جریان بصورت 10^3 به یک 1 است. پیک جریان در ولتاژ $2.12V$ اتفاق می افتد و در ناحیه 0 تا $1.57V$ وسیله هدایت می کند. تنها مینیمم جریان یا $1pA$ برقرار است.



شکل (۱۰): یک خط بار

۶-۲. لچ بای استابل

در شبیه سازی ، به سه دلیل یک مقاومت را با DNR سری می کنیم. (وقتی یک وسیله NDR رابطور سری با یک مقاومت و یک منبع قرار می دهیم . یک لچ بای استابل ساخته ایم.) اول مشخصات ولتاژ-جریان ابزارهای الکترونیک مولکولی با اهداف مجتمع سازی با FET همخوانی ندارد. مثلاً پیک جریان که در رنج چند نانو است بارها کوچکتر از جریان مورد نیاز ما برای تقسیم در خط باردار با FET تخلیه ای است. و همچنین امکان حل ابزارهای الکترونیک مولکولی ، دلیل دوم می باشد. که ما از مقاومت استفاده می کنیم. در واقع بار گذاری وسیله DNR با DNR دیگر مشخصات ولتاژ-جریان مشابه ای را ارائه می دهد. که برای یک دو نقطه عمل کننده ثابت وساده مناسب نیست. اگر دو تا از این وسایل بطور سری قرار گرفته باشند بایاس ولتاژ که نتایج خط بار رادر یک تعداد زیادی از نقاط تقسیم می کند. که این خود ناشی از طول نواحی از مشخصه می باشد که هدایت می کند. (بین 0.57 تا 1.0 و بزرگتر از 2.4) یک ویژگی عمومی از RTD که می سازند. این است که در این نوع بار گذاری ممکن است بطور متناوب قابلیت هدایت از ولتاژها بالاتر از DNR در وسیله باشد. و سرانجام این نکته معلوم می شود که مولکول ها یک مقاومت خطی بزرگی را که در مدار مجتمع استفاده شود.

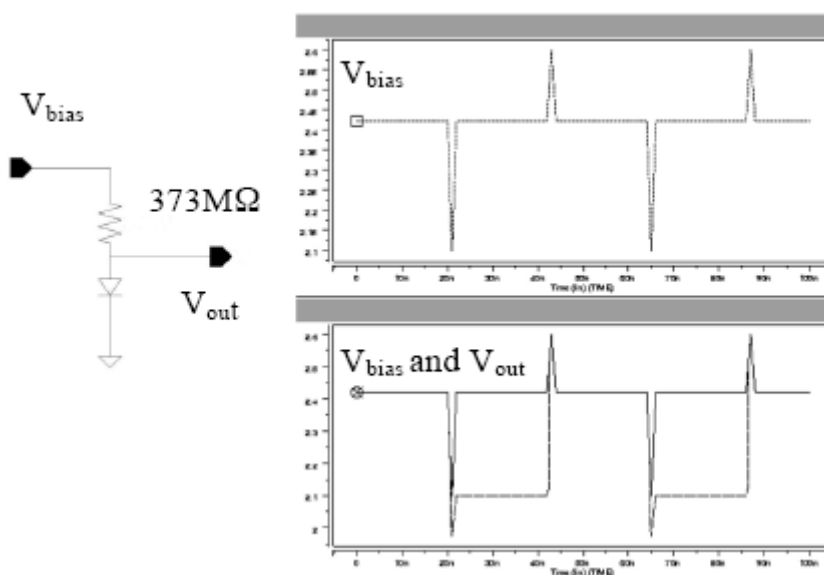
همانگونه که اشاره شد مقدار مقاومت بار با شیب خط بار، تعیین می گردد. این فشرده سازی مکان دو نقطه ثابت ولتاژهای بالا و پایین برای هر دو حالت لچ بای استابل را تعیین می کند. در حالت ولتاژ بالا وسیله در حالت هدایت پایین قرار دارد. و در حالت ولتاژ پایین وسیله در حالت هدایت بالا قرار دارد. قطع کردن

x از هر خط بار که حذف منبع ولتاژ است (V_{dd}) در شکل (۱۰) نشان داده شده است. قطع کردن y از هر خط بار که حذف منبع ولتاژ تقسیم شده بوسیله مقاومت بار یا (V_{dd}/R) است.

در شکل (۱۱) فشرده سازی چندین مقدار مقاومت بار روی نقاط بای استابل نشان داده شده است. برای این سه خط بار منبع ولتاژ (V_{dd}) برابر ۲.۴۱ ولت و R به ترتیب $373M\Omega$ و $575M\Omega$ و $1.3G\Omega$ می باشد. اگر مقاومت بار کم باشد ($373M\Omega$) این خطر وجود دارد که لچ به حالت ولتاژ پایین برود قبل از آنکه *STAR-HSPICE* مورد استفاده برای شبیه سازی مدار لچ نشان داده شده در شکل (۱۱) آماده شود.

که این خود یک مدل منبع جریان کنترل شده با ولتاژ محدود می باشد. همانگونه که ترمینال ورودی خروجی یک لچ عنصر G را در *HSPICE* نشان داده در شکل (۱۱) نشان می دهد. همچنین شکل (۱۱) شکل موج خروجی و ورودی از بار لچ سری با مقاومت $373M\Omega$ و منبع ۲.۴۱ ولت را نشان می دهد. دو نقطه پایدار با منبع پالسی V_{bis} به یکدیگر متصل می گردند همانگونه که نشان داده شده در شکل (۱۱) این لچ به سبب دو نقطه مجزا بوسیله ۰.۳۲ ولت، پایدار عمل می کند تحول از حالت ولتاژ پایین به حالت ولتاژ بالا نیازمند یک پالس V_{bis} کوچکتر نسبت به بالا و پایین است این وجود دارد زیرا نقطه پایدار ولتاژ پایین عمل می کند نزدیکتر به ناحیه NDR به نسبت نقطه پایدار ولتاژ بالا با مقدار بزرگتر، دو نقطه پایدار بطور مساوی از بخش NDR می توانند قرار بگیرند. نتایج نشان می دهد بزرگی پالسی V_{bis} مورد نیاز برای تحول بین دو حالت را انجام دهد.

states.



شکل (۱۱): نتایج یک لچ بای استابل

نقطه امید بخش در مجتمع سازی مولکولی ناشی از ساختار های منظم معماری عنصر حافظه است. ساختارهای تکراری و منظم خود رابه شیو های تکنولوژی نانویا اجزای مولکولی مونتاژ شده تصادفی نزدیک می بیند. یک راه برای ساختن سلول های حافظه طراحی مداراتی است که به ما اجازه می دهند آرایه های توابع بزرگ را مندرج کنیم.

شکل (۱۲) یک مثال از حافظه هائی است که از NDR استفاده می کند. وهر دو ذخیره کننده هستند. همچون قبل همه مقادیر مقاومت $373M\Omega$ هستند و خازن ها با NDR پاسخ دیودی نزدیک به مطلوب برای عملکرد DC ، جایگزین شده اند. یک پایه $rest$ بوسیله کشیدن خط کلمه بالا را تا ۲.۷ ولت انتخاب می کند. که نیروهای همه لچ های حافظه بر روی خط کلمه هدایت پایین است. سپس خط کلمه انتخاب کند که می تواند با ولتاژ کمتر از ۲.۲۷ می تواند بنویسد. مادامیکه بالا بردن نوشتن خط بیت که یک منطق ۰ در آن ذخیره شده است تنها با اثر ترکیب کردن شرایط بایاس تولید می گردد. بایاس NDR باید زیر مرز (آستانه) بیفتد تا حالت لچ را به حالت هدایت بالا تغییر دهد در این مدت سلول های دیگر خط کلم بالا ی آستانه ه باقی می ماند که این ناشی از بایاس خط لاین کمی بالاتر است.

مادامیکه یک سلول در انتخاب کننده خط کلمه بالای ولتاژ آستانه باقی بماند که این ناشی از بایاس خطبیت پایین تراست. خواندن هست نمایش دادن بوسیله بالا بردن ولتاژ خط کلمه تا که ۲.۴۶ ولت یک مقدار کم کافی نیست برای عبور از مرز و باعث شدن یک باز نشاندن ($reset$) در سلول های حافظه ذخیره می شود.

سازمان دهی می کند. توابع منطقی بی نظم را که با روش های قبلی قابل ساخت نبود. اگر چه محتمل است که بعضی از مراحل لایتوگرافی در مقیاس نانو که نیاز به زمان سنج مسیر وسیم های ارتباط داخلی دارند این رویکرد آدرس دهی برای منطق با چگالی بالا و روش های سریع راکاهش دهند.

۶-۵. پایان

در پایان، امکان مجتمع شدن دیودهای مولکولی از معماری مدارات جریان توضیح داد شده است. یک سری از گی ها منطقی و یک آرایه حافظه 4×4 مبتنی بر روش های شارژ جریان با کنترل و تاژ با استفاده از دیودهای مولکولی شبیه سازی شده است. توضیح داده شده است. که این شبیه سازی با استفاده از ساختار لچ بای استابل و یک تکه حافظه با عمل خواندن و نوشتن شرح داده شد.

۷. نتیجه گیری

در این پژوهش و تحقیق هدف ما توضیحی گذرا درباره دلایل رسیدن تکنولوژی امروزی به تکنولوژی های جدید و توضیح نسبتا مفصلی درباره یکی از این تکنولوژی ها به نام الکترونیک مولکولی بود. با مثالی نمونه ای از آن (لچ ها و حافظه ها در الکترونیک مولکولی) که بطور مبسوط بیان شده است. و همچنین توضیح نسبتا مفصلی درباره یکی دیگر از این تکنولوژی ها به نام ترانزیستورهای تک الکترونی می باشد.

۸. مراجع

1. *Molecular electronic latches and memories*
2. *A Tutorial on the Emerging Nanotechnology Device*

۳. کتاب کاربرد نانو نوشته دکتر مغربی