



نانوسوئیچ الکترومکانیکی و کاربرد آن در حافظه های الکترونیک

جواد فرج الهی^{۱*}

^۱دانش آموخته، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: دی ۹۴، بازنگری: بهمن ماه ۹۴، پذیرش: فروردین ۹۴

چکیده

سوئیچ های نانوالکترومکانیک مشابه سوئیچ های نیمه هادی معمولی اند اما اصول عملکرد سوئیچ های نانوالکترومکانیک و نیمه هادی با هم متفاوت می باشد. با توجه به وضعیت بهینه ای که در فناوری سوئیچ های نانو الکترومکانیک وجود دارد می توان آنها را جایگزین فناوری نیمه هادی ها کرد. نکته قابل توجه در این فناوری این است که در ساختار سوئیچ های نانو الکترومکانیک نانولوله های کربنی نقش مهمی را ایفا می کنند چرا که دارای خواص فیزیکی استثنائی می باشند به گونه ای که عامل ایجاد پیشرفت های بسیاری در زمینه سیستم های نانو الکترومکانیکی نظیر ساخت انواع حافظه، انواع حسگرها با حساسیت فوق العاده بالا و... شده است. در این مقاله کاربرد و فرآیند عملیاتی سوئیچ های نانو الکترومکانیک و همچنین نحوه عملکرد برخی از انواع حافظه های ذخیره اطلاعات مبتنی بر نانولوله های کربنی به عنوان نمونه هایی از سیستم های نانو الکترومکانیکی توضیح داده شده است.

*عهده دار مکاتبات: j.farajollahi69@gmail.com

کلمات کلیدی: نانو سوئیچ الکترومکانیکی، نانولوله کربنی، نانو حافظه، نانو حسگر.

۱- مقدمه

سوئیچ های امروزی از نظر مقیاس به دو نوع میکرو الکترومکانیک^۱ و نانو الکترومکانیک^۲ تقسیم می شوند. سوئیچ های میکروالکترومکانیک که در ابعاد میکرومتری می باشند براساس تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی یا بالعکس عمل می کنند که می توان در بسیاری از صنایع مانند سیستم های الکترونیکی، پزشکی، صنایع داروسازی هوشمند، خودروسازی و... از آنها استفاده کرد. اگر این نوع سوئیچ ها در ابعاد کوچکتری ساخته شوند می توان شاهد کاهش مصرف مواد اولیه، افزایش سرعت عملکرد کلیدزنی و کاهش مصرف در انرژی و زمان باشیم که در راستای این اهداف، فناوری نانو در نظر دارد که با ساخت حافظه ها و ریزتراشه ها در مقیاس نانو بتواند تحولی در صنعت کامپیوترها، ماشین ها و الکترونیک ایجاد کند، این

اهداف با ساخت نانوسوئیچ های الکترومکانیکی که اغلب آنها بر پایه نانولوله های کربنی می باشند محقق خواهد شد. [۱]

۲- نانو لوله کربنی

گرافن یکی از مهم ترین مواد کربنی مورد استفاده در فناوری نانو است. یک صفحه گرافن از کنارهم قرار گرفتن اتم های کربن شکل می گیرد بنابراین اگر صفحه گرافنی حول یک محور مرکزی لوله شود نانولوله کربنی^۳ ایجاد می شود که خود به دو دسته تقسیم می شوند: [۲]

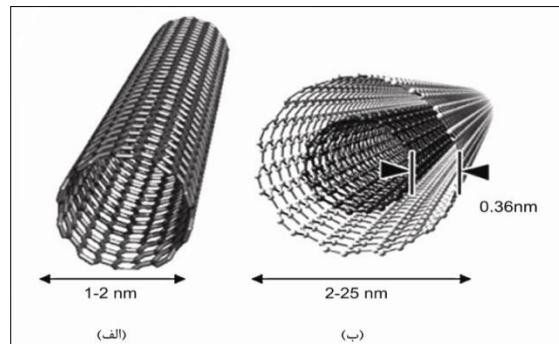
۲-۱- **نانولوله تک جداره:** با پیچیده شدن یک صفحه گرافن حول یک محور مرکزی به وجود می آید و همان طور که در شکل (۱-الف) مشاهده می شود استوانه ای توخالی به قطر ۱ تا ۲ نانومتر را شکل می دهد.

¹ Micro Electro Mechanical

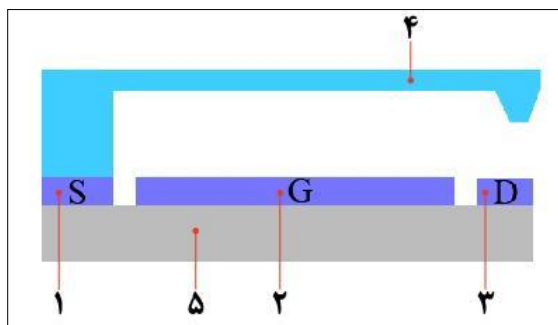
² Nano Electro Mechanical

³ Carbon nanotube

(الف) نیروی الکترواستاتیک^۷: با اعمال ولتاژ الکتریکی و ایجاد بارهای مخالف در دو صفحه، یک نیروی الکتریکی در بین آنها به وجود می‌آید که موجب جذب صفحات به یکدیگر می‌شود.
(ب) نیروی الاستیک^۸: یک نیروی ارتجاعی است مانند فنری که پس از کشیده شدن به حالت اولیه خود باز می‌گردد.
(ج) نیروی واندروالسی^۹: نیرویی که مولکولهای یک ماده را در حالت مایع یا جامد به یکدیگر ارتباط می‌دهد را نیروی بین مولکولی یا واندروالسی می‌گویند.



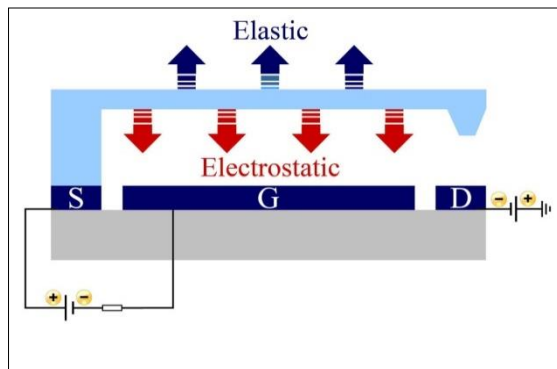
شکل (۱): (الف) نانولوله کربنی تک جداره (ب) نانولوله کربنی چندجداره [۳].



شکل (۲): ساختمان نانوسوئیچ الکترومکانیک [۴].

۴- عملکرد سوئیچ نانو الکترومکانیک

هنگامی که اختلاف پتانسیل بین الکترودهای G و S اعمال شود بارهای مخالف در تیر و الکترود G مطابق شکل (۳) باعث تشکیل نیروی الکترواستاتیک می‌شوند.



شکل (۳): حالت خاموش [۴].

با افزایش ولتاژ الکتریکی، نیروی الکترواستاتیک بر نیروی الاستیک تیر غلبه می‌کند در نتیجه موجب خم شدن و اتصال انتهای تیر به الکترود D می‌شود که مطابق شکل (۴) سوئیچ در حالت روشن قرار گرفته و جریان الکتریکی از الکترود S به

۲-۲- نانولوله چندجداره: با پیچیده شدن چند صفحه گرافن حول یک محور مرکزی به وجود می‌آید و با توجه به شکل (۱-ب) معمولا حفره‌هایی به قطر ۲ تا ۲۵ نانومتر که به صورت هم مرکز و با فاصله ۰٫۳۶ نانومتر از هم جدا شده‌اند، شکل می‌گیرد [۳].

نانولوله‌های کربنی خواص منحصر به فردی دارند از جمله این خواص، استحکام مکانیکی و هدایت الکتریکی عالی آنها می‌باشد.

۳- ساختمان نانو سوئیچ الکترومکانیک

موارد ذیل اجزای اصلی ساختمان یک نانوسوئیچ الکترو مکانیکی را تشکیل می‌دهند که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند.

۱. الکترود سورس^۴: الکترودی است که به ولتاژ منبع متصل می‌شود و با نماد S نمایش داده می‌شود.

۲. الکترود گیت^۵: الکترودی است که با اتصال الکتریکی در آن می‌توان سوئیچ را تحریک نمود و با نماد G نمایش داده می‌شود.

۳. الکترود درین^۶: الکترودی است که پس از تحریک سوئیچ موجب عبور جریان الکتریکی از خود می‌شود و با نماد D نمایش داده می‌شود.

۴. تیر یک سرگیردار: یک پل ارتباطی است که از آن جهت انتقال جریان الکتریکی از الکترود سورس به درین استفاده می‌شود.

۵. لایه عایق: معمولا از مواد دی اکسید سیلیسیم استفاده می‌شود.

سه نیرویی که نقش اصلی را در عملکرد نانوسوئیچ الکترومکانیکی بر عهده دارند عبارتند از:

⁷ Electrostatic

⁸ Elastic

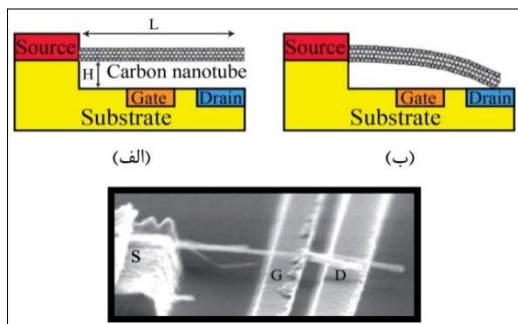
⁹ Van der Waals

⁴ Source

⁵ Gate

⁶ Drain

الکترودهای G و S اعمال شود بارهای الکتریکی در نانولوله کربنی و الکترودهای G بواسطه تشکیل نیروی الکترواستاتیک باعث خم شدن و اتصال انتهای نانولوله کربنی به الکترودهای D می شوند و مطابق شکل (۵-ب) حالت 1 ایجاد می شود.



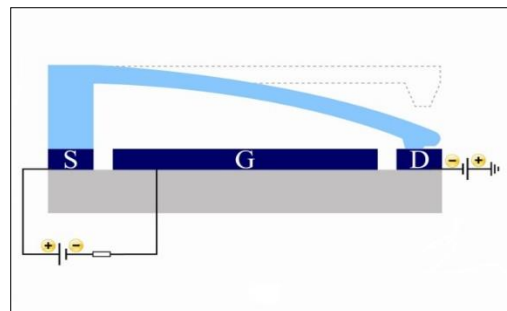
شکل (۵): حافظه مبتنی بر نانولوله کانتیلوری [۵] (الف) حالت خاموش (0) (ب) حالت روشن (1) [۱۰].

هنگامی که ولتاژ الکتریکی در الکترودهای G قطع شود حافظه به صورت غیر فرار عمل میکند چون نیروی واندروالسی در محل اتصال بیش از نیروی الاستیک می باشد که می توان با اعمال اختلاف پتانسیل معکوس (ولتاژ خروجی)، نانولوله کربنی را به موقعیت اولیه برگشت داد و مطابق شکل (۵-الف) حالت 0 ایجاد شود [۱۰].

۶-۲- حافظه مبتنی بر نانو لوله های کربنی عمودی

در این نوع حافظه می توان از نانولوله های کربنی چند جداره که مطابق شکل (۶) به صورت عمودی بر روی الکترودهای S و D قرار می گیرند استفاده نمود. هنگامی که اختلاف پتانسیل بین الکترودهای G و S اعمال شود بارهای الکتریکی در آنها سبب تشکیل نیروی دافعه الکترواستاتیکی می شوند و همانطور که در شکل (۷) مشاهده می شود نیروی دافعه الکترواستاتیکی، نانولوله کربنی الکترودهای D را به سمت نانولوله کربنی الکترودهای S حرکت می دهد و زمانی که با یکدیگر تماس الکتریکی پیدا کردند حالت 1 ایجاد می شود و جریان الکتریکی از میان دو الکترودهای عبور می کند. وقتی که ولتاژ در الکترودهای G قطع شود حافظه به صورت غیر فرار عمل می کند که این حالت در نانولوله های کربنی بلند ایجاد می شود چون نیروی واندروالسی در آنها بیشتر از نیروی الاستیک است و برای بازگشت به حالت 0 معمولا از نانولوله های کربنی کوتاه استفاده می شود. بنابراین حافظه بسته به طول نانو لوله های کربنی می تواند به صورت فرار یا غیر فرار عمل کند [۱۰].

الکترودهای D انتقال می یابد. هنگامی که ولتاژ در الکترودهای G قطع شود نیروی الاستیک، تیر را به حالت اولیه باز می گرداند و با توجه به شکل (۳) سوئیچ در حالت خاموش قرار می گیرد [۵].



شکل (۴): حالت روشن [۴].

۵- کاربردهای سوئیچ نانو الکترومکانیک

فناوری سوئیچ نانو الکترومکانیک هم اکنون سهم قابل توجهی را در اکثر صنایع مانند حافظه ها، نانو حسگرها [۶،۷]، بیوپزشکی، لرزه نگاری در صنایع نفت برای اکتشاف نفت و گاز [۸] و همچنین امروزه در محدوده دماهای ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد در مواردی چون اکتشافات زمین گرمایی، حفاری چاه های عمیق، هوافضا و صنایع خودرو قابلیت کارکرد دارند [۹].

۶- حافظه ذخیره اطلاعات

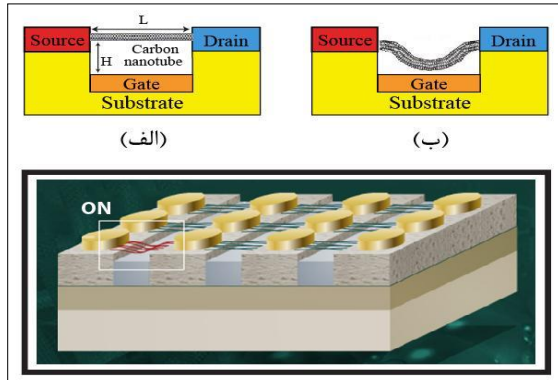
هر وسیله ای که قادر به نگهداری و ذخیره سازی اطلاعات باشد حافظه نام دارد. شیوه عملکرد حافظه ها بر اساس حالت خاموش و روشن می باشد که در الکترونیک این حالت ها را با 0 و 1 نشان می دهند. حافظه ها را می توان به دو نوع فرار و غیر فرار تقسیم نمود. حافظه ای که با قطع ولتاژ الکتریکی از 1 به 0 تغییر حالت دهد و موجب از دست رفتن اطلاعات شود را حافظه فرار و حافظه ای که با قطع ولتاژ در حالت 1 باقی بماند و موجب از دست رفتن اطلاعات نشود را حافظه غیر فرار می نامند که نوع پیکربندی حافظه ها تاثیر مستقیمی بر عملکرد آنها دارد. برای دستیابی به حافظه هایی در مقیاس نانو، می توان از نانو لوله های کربنی استفاده کرد که در این مطلب به چند نمونه از آنها اشاره می شود.

۶-۱- حافظه مبتنی بر نانو لوله های کربنی کانتیلوری^{۱۰}

در این نوع حافظه می توان از نانولوله های کربنی یک یا چند جداره استفاده نمود که مطابق شکل (۵-الف) یک قسمت از نانولوله کربنی به الکترودهای متصل شده است و انتهای دیگر آن به صورت معلق می باشد. هنگامی که اختلاف پتانسیل بین

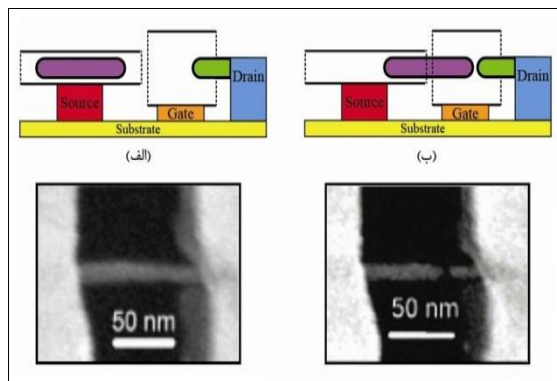
^{۱۰} Cantilever

باشد که می‌تواند به صورت رفت و برگشتی در درون نانو لوله دو جداره حرکت کند.



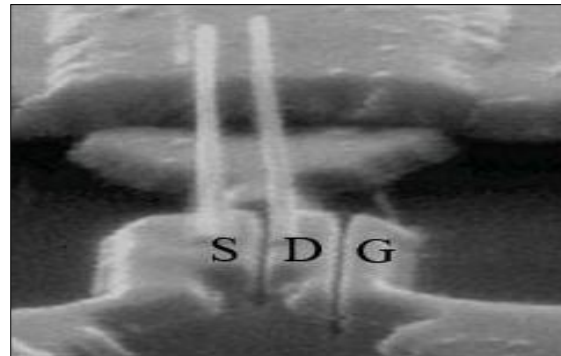
شکل (۸): حافظه NRAM (الف) حالت خاموش (0) (ب) حالت روشن (1) [۱۰].

در بالای الکتروود G یک نانولوله کربنی تو خالی سرباز قرار دارد همچنین یک نانولوله کربنی تک جداره نیز به الکتروود D متصل می‌باشد. هنگامی که ولتاژ ورودی اعمال می‌شود نیروی الکترواستاتیک باعث لغزش و خروج هسته داخلی از درون نانولوله کربنی دو جداره می‌شود و مطابق شکل (۹-ب) هسته داخلی با الکتروود D تماس الکتریکی برقرار می‌کند و حالت 1 ایجاد می‌شود. وقتی که ولتاژ ورودی قطع شود امکان دارد به دلیل وجود نیروی واندروالسی بین هسته داخلی و الکتروود D همچنین وجود نیروی اصطکاک میان هسته داخلی و دیواره نانولوله کربنی، حافظه به صورت غیر فرار عمل کند که با اعمال ولتاژ خروجی حالت 0 در حافظه ایجاد می‌شود.

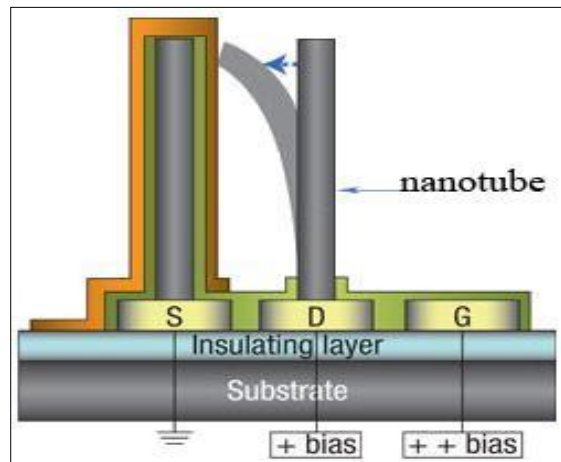


شکل (۹): حافظه مبتنی بر نانولوله تلسکوپ (الف) حالت خاموش (0) (ب) حالت روشن (1) [۱۰].

دراثر عکس‌العمل نیروی واندروالسی میان دیواره‌های نانولوله کربنی دو جداره، یک نیروی ضعیفی ایجاد می‌شود که تمایل دارد هسته را به داخل فرو ببرد و مطابق شکل (۹-الف) تا موقعی که ولتاژی اعمال نشود حافظه می‌تواند به کمک این نیرو در حالت 0 باقی بماند [۱۰].



شکل (۶): حافظه مبتنی بر نانولوله‌های کربنی عمودی [۱۰].



شکل (۷): (الف) حالت روشن (1) [۱۱].

۳-۶ حافظه NRAM

در این نوع حافظه می‌توان از نانولوله‌های کربنی تک جداره استفاده نمود. مطابق شکل (۸-الف)، نانولوله کربنی دو سرگردار از یک سمت به الکتروود S متصل شده است و از سمت دیگر به الکتروود D قابل اتصال می‌باشد و الکتروود G نیز در پائین نانو لوله کربنی قرار می‌گیرد. هنگامی که اختلاف پتانسیل بین الکتروودهای S و G اعمال شود بارهای الکتریکی در نانولوله کربنی و الکتروود G موجب ایجاد نیروی الکترواستاتیک می‌شوند که با افزایش این نیرو، نانولوله کربنی به سمت الکتروود G خم می‌شود در نتیجه اتصال با الکتروود D برقرار شده و مطابق شکل (۸-ب) حالت 1 ایجاد می‌شود. وقتی که ولتاژ الکتریکی در الکتروود G قطع شود به دلیل وجود نیروی واندروالسی در محل اتصال، حافظه به صورت غیر فرار عمل می‌کند که با اعمال ولتاژ خروجی نانولوله کربنی به موقعیت اولیه بازمی‌گردد و مطابق شکل (۸-الف) حالت 0 ایجاد می‌شود [۱۰].

۴-۶ حافظه مبتنی بر نانو لوله کربنی تلسکوپ

این نوع حافظه مانند سایر حافظه‌ها به صورت سه ترمیناله می‌باشد. مطابق شکل (۹-الف) بر روی الکتروود S یک نانولوله دو جداره سرباز قرار گرفته است و دارای یک هسته داخلی می‌باشد.

- [2] http://edu.nano.ir/oldversion/index.php?actn=papers_view&id=224 ≥
- [3] <http://jnm.snmjournals.org/content/48/7/1039.full>
- [4] <http://www.wesrch.com/wiki-889-operation-of-a-nem-nano-electrical-mechanical-switch-transistor>
- [5] Y.L. Owen, D. H.D. Espinosa, Nanoelectro mechanical contact switches, *Nature Nanotechnology*, 7 (2012) 283-295 doi:10.1038/nnano.2012.40
- [6] http://www.nano.ir/index.php?ctrl=paper&actn=papers_view&id=1329&lang=1 ≥ (1385/02/03)
- [7] http://edu.nano.ir/oldversion/index.php?actn=papers_view&id=213
- [8] http://www.nano.ir/index.php?ctrl=paper&actn=papers_view&id=1152&lang=1 ≥ (1384/05/08)
- [9] T.H. Lee, S. Bhunia, M. Mehregany, Electromechanical computing at 500 °C with silicon carbide, *Science*, 329 (2010) 1316–1318.
- [10] E. Bichoutskaia, A.M. Popov, Y.E. Lozovik, Nanotube-based data storage devices, *Materials Today*, 11(6) (2008) 38–43.
- [11] http://www.nature.com/nnano/journal/v3/n1/fig_tab/nnano.2007.417_F1.html

۷- نتیجه گیری

۱: سوئیچ های نانو الکترومکانیک قابلیت جایگزینی با اکثر کلیدهای کنونی را دارند که بتوان در شرایط محیطی و کاربردهای مختلف از آنها استفاده کرد همچنین می توان از قابلیت باقی ماندن آنها در موقعیت روشن و خاموش هنگام قطع ولتاژ ورودی، در ابزار حافظه یا مهارکننده استفاده کرد.

۲: از بارزترین ویژگی نانولوله های کربنی می توان به افزایش نسبت سطح به حجم در ریز تراشه ها و حافظه ها اشاره نمود به عنوان مثال اگر در یک تراشه یک سانتی متر مربع از نوع نیمه هادی حدود یک صد میلیون کلید جای می گیرد در تراشه مبتنی بر نانولوله های کربنی حدود یک تریلیارد کلید در یک سانتی متر مربع جای می گیرد.

۳: مدل سازی هایی که براساس تحقیق و محاسبات ایجاد می شوند برخواص فیزیکی (مکانیکی، الکترواستاتیک، ترموالاستیک) و کاهش توان مصرفی سیستم های نانو الکترومکانیکی تاثیر بسزایی دارند به گونه ای که این طراحی ها موجب صرفه اقتصادی در تولید نیز می شوند.

مراجع

- [1] W.W. Jang, J.O. Lee, J.B. Yoon, M.S. Kim, J.M. Lee, S.M. Kim, K.H. Cho, D.W. Kim, D. Park, W.S. Lee, Fabrication and characterization of a nanoelectro mechanical switch with 15-nm-thick suspension air gap, *Applied Physics Letters*, 92 (2008) 103110.