

افزایش طول عمر میکروسوئیچ‌ها با بهره‌گیری از نانولوله‌های کربنی معلق در آرایش چندتایی و فناوری لیتوگرافی

عبدالکریم جعفر خراطی، کارشناسی ارشد الکترونیک

گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه علم و صنعت ایران

karim.jafari22@gmail.com

خلاصه

میکروسوئیچ‌های مبتنی بر نانولوله‌های کربنی (CNT) به دلیل ویژگی‌های الکتریکی و مکانیکی منحصر به فرد گزینه‌ای امیدوارکننده برای کاربرد در مدارهای مجتمع نسل آینده هستند. این مقاله به طراحی روش ساخت و ارزیابی یک میکروسوئیچ با ساختار پیشرفته می‌پردازد که در آن از نانولوله‌های کربنی معلق و آرایش چندتایی برای بهبود پایداری مکانیکی و افزایش طول عمر و عملکرد الکتریکی مناسب‌تر استفاده شده است. نتایج آزمایشگاهی توسط نرم افزار silvaco شبیه سازی شده‌اند که نشان‌دهنده کاهش مقاومت تماسی به کمتر از $10\text{ k}\Omega$ و چرخه کاری بیش از 10^5 بار است. در نهایت چالش‌های فرآیند ساخت و راهکارهای احتمالی مورد بحث قرار گرفته اند.

کلمات کلیدی: نانولوله کربنی، میکروسوئیچ، ساختار معلق، آرایش چندتایی، نانوالکترومکانیک

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر نیاز به قطعات الکترونیکی با ابعاد کوچک‌تر، سرعت بالاتر و مصرف انرژی کمتر محرک اصلی توسعه فناوری‌های نانومقیاس بوده است. در این میان نانولوله‌های کربن (CNTS) به دلیل دارا بودن رسانایی الکتریکی بالا استحکام مکانیکی استثنایی و پایداری حرارتی قابل توجه توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده‌اند [1-2]. یکی از کاربردهای نوید بخش این نانوساختارها استفاده در آلمان‌های سوئیچینگ و رله‌های نانوالکترومکانیکی (NEM) است. میکروسوئیچ‌های مبتنی بر CNT می‌توانند به عنوان یک جایگزین بالقوه برای ترانزیستورهای اثر میدانی نیمه هادی در برخی کاربردهای خاص مطرح شوند [3]. با این حال چالش‌هایی مانند کنترل دقیق موقعیت اتصال الکتریکی بهینه و پایداری مکانیکی در چرخه‌های کاری مکرر هنوز نیاز به تحقیق و توسعه دارد. در این مقاله یک طرح نوآورانه شامل استفاده از ساختار CNT معلق و آرایش چندتایی برای غلبه بر برخی از این موانع ارائه و به تفصیل تحلیل می‌شود.

۲. مبانی نظری CNT و میکروسویچ

نانولوله‌های کربنی استوانه‌هایی از اتمهای کربن با شبکه‌های هگزاگونا هستند که می‌توانند به صورت تک دیواره (SWCNT) و یا چند دیواره (MWCNT) باشند. خواص الکتریکی آنها به قطر و زاویه پیچش وابسته است و می‌توانند رفتار فلزی یا نیمه‌هادی از خود نشان دهند [4]. در کاربرد سوئیچ، معمولاً از CNT های فلزی به عنوان عضو متحرک (تیر معلق) استفاده می‌شود. معمولاً میکروسویچ‌ها ادواتی هستند که اجازه قطع و وصل کردن جریان الکتریکی را فراهم می‌کنند. میکروسویچ‌های مبتنی بر CNT از یک یا چند نانولوله کربنی به عنوان المان متحرک یا ثابت برای ایجاد یا شکستن اتصال الکتریکی استفاده می‌کنند. اصول عملکرد این سوئیچ‌ها بر پایه اثرات الکترواستاتیکی، حرارتی یا مکانیکی استوار است [5]. در بسیاری از کاربردها، از نیروی الکترواستاتیکی اعمال شده توسط یک گیت برای خم کردن یا جابجایی نانولوله کربنی و در نتیجه اتصال یا قطع مدار استفاده می‌شود [7].

مدل‌سازی این ادوات نیازمند در نظر گرفتن خواص کوپله شده مکانیکی-الکتریکی است. مکانیسم عملکرد این سوئیچ‌ها بر اساس انحراف مکانیکی نانولوله تحت اثر یک میدان الکترواستاتیک است [6]. با اعمال ولتاژ گیت (V_g) بین الکتروود گیت و نانولوله، نیروی جاذبه الکترواستاتیک (F_e) ایجاد شده و باعث خم شدن نانولوله به سمت الکتروود پایینی (درین) می‌شود. هنگامی که نانولوله با الکتروود درین تماس پیدا کند، مدار بسته شده و جریان (I_d) برقرار می‌گردد. این نیرو را می‌توان به صورت زیر تقریب زد:

$$F_e \approx \frac{1}{2} \frac{\partial C}{\partial z} V_g^2$$

که در آن C ظرفیت خازنی بین CNT و الکتروود گیت و Z فاصله عمودی است. در مقابل، نیروی بازگرداننده الاستیک تیر (F_k) مطابق قانون هوک ($F_k = -k\delta$) عمل می‌کند که در آن k ثابت فنری و δ جابه‌جایی است [9]. ثابت فنری برای یک تیر معلق یکسرگیردار به طول L ، قطر d و مدول یانگ E به صورت زیر است:

$$k = \frac{3\pi E d^4}{64 L^3}$$

سوئیچ زمانی فعال می‌شود که $F_e > F_k$ باشد. ولتاژ آستانه این رویداد را ولتاژ V_{pi} (Pull-in) می‌نامند [7-8].

۳. معماری CNT معلق و آرایه چندتایی

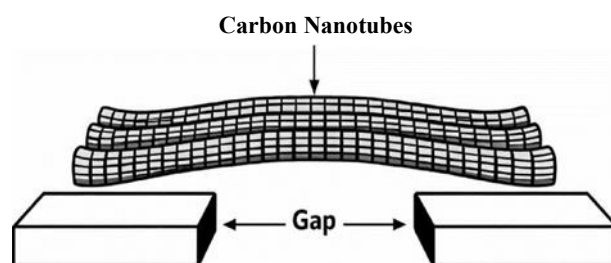
معماری میکروسویچ CNT معلق (suspended CNT microswitch) شامل یک نانولوله کربنی است که بین دو الکتروود (سورس و درین) شناور است. یک الکتروود سوم به عنوان گیت عمل می‌کند و با اعمال ولتاژ، نیروی الکترواستاتیکی لازم برای

جابجایی نانولوله و برقراری تماس با الکتروود دیگر را فراهم می‌آورد [10]. طراحی این معماری شامل بهینه‌سازی فاصله گیت، فاصله سورس-درین، و ابعاد نانولوله کربنی برای دستیابی به ولتاژ سوئیچینگ مطلوب و عملکرد پایدار است [11]. در برخی کاربردها، استفاده از آرایه‌های چندتایی (multi-element arrays) از میکروسوئیچ‌های CNT می‌تواند کارایی و قابلیت اطمینان سیستم را افزایش دهد. در این آرایه‌ها، چندین میکروسوئیچ CNT به صورت موازی یا سری با یکدیگر پی‌کربندی می‌شوند تا قابلیت حمل جریان بالاتر، تحمل خطا، یا قابلیت‌های سوئیچینگ پیچیده‌تر فراهم شود. طراحی و تحلیل این آرایه‌ها نیازمند در نظر گرفتن اثرات متقابل بین المان‌ها و توزیع بار و ولتاژ است [12].

۴. روش ساخت آزمایشگاهی

ساخت میکروسوئیچ‌های CNT معمولاً شامل مراحل پیچیده‌ای است که اغلب از تکنیک‌های میکروفابریکیشن نیمه‌رسانا استفاده می‌کند. مراحل کلی ساخت عبارتند از:

۱. آماده‌سازی زیرلایه: انتخاب زیرلایه‌ای مناسب (مانند سیلیسیوم با لایه اکسید) و آماده‌سازی آن.
 ۲. اِچینگ (Etching) و لیتوگرافی: ایجاد الگوهای لازم برای الکتروودهای سورس، درین و گیت با استفاده از لیتوگرافی نوری یا الکترونی و سپس فرایند اِچینگ.
 ۳. رسوب‌گذاری فلزات: اسپاترینگ یا تبخیر فلزاتی مانند طلا، پلاتین یا کروم برای تشکیل الکتروودها.
 ۴. تعبیه نانولوله‌های کربنی: این مرحله حیاتی‌ترین بخش است و می‌تواند به روش‌های مختلفی انجام شود، از جمله:
 - تعبیه از فاز بخار شیمیایی (CVD): رشد مستقیم CNTs بر روی زیرلایه بین الکتروودها.
 - تعبیه ترتیبی: قرار دادن CNTs با استفاده از روش‌های مکانیکی یا الکتروفورزیک پس از سنتز.
 ۵. پوشش‌دهی یا ایزولاسیون: در برخی طرح‌ها، ممکن است نیاز به لایه‌های ایزولاسیون یا دی‌الکتریک باشد.
- موفقیت در ساخت این ادوات به شدت به کنترل دقیق فرایندهای لایه‌نشانی، شکل‌دهی، و به‌ویژه قرار دادن نانولوله‌های کربنی در موقعیت‌های مورد نظر بستگی دارد.



شکل ۱- معلق بین الکتروود CNT ساختار

سوئیچ پیشنهادی در این پژوهش از سه بخش اصلی تشکیل شده است: ۱. الکتروودهای منبع و درین که از جنس طلا با ضخامت ۱۰۰ نانومتر بر روی بستر عایق Si₃N₄ پترن شده‌اند. ۲. الکتروود گیت که در یک حفره‌ی عایق شده در زیر ناحیه‌ی بین منبع و درین قرار دارد. ۳. عنصر متحرک که خود شامل دو گونه است الف- ساختار تک نانولوله‌ی معلق یک نانولوله‌ی کربنی که دو سر آن به الکتروودهای منبع و درین پیوند خورده و بخش میانی آن بر روی حفره‌ی گیت معلق است. ب- ساختار

آرایه‌ی چندتایی متشکل از چندین نانولوله‌ی موازی که به طور همزمان بین دو الکترود کشیده شده‌اند تا بار مکانیکی و جریان الکتریکی را به اشتراک بگذارند.

عملکرد سوئیچ به این صورت است که در حالت عادی ولتاژ گیت صفر نانولوله در وضعیت معلق خود قرار دارد و مقاومت بین منبع و درین بسیار بالا در حد ۱ است. با اعمال ولتاژ گیت به اندازه کافی فراتر از V_{Pi} ، نانولوله به سمت پایین خم شده و با الکترود درین تماس فیزیکی برقرار میکند. این تماس یک مسیر رسانای با مقاومت کم در حد کیلو اهم ایجاد کرده و حالت ON سوئیچ را تعریف میکند. پس از حذف ولتاژ نیروی الاستیک نانولوله را به موقعیت اولیه باز می گرداند و سوئیچ "OFF" می شود.

۵. شبیه سازی Silvaco ATLAS

برای تحلیل دقیق رفتار میکروسوئیچ CNT، از نرم افزار شبیه سازی نیمه رسانا Silvaco ATLAS استفاده شده است. این نرم افزار قابلیت مدل سازی رفتار الکترونیکی و مکانیکی ادوات را دارد. در این شبیه سازی، معماری میکروسوئیچ CNT به صورت هندسی در محیط ATLAS تعریف شده است. این شبیه سازی شامل مدل سازی جامع مکانیک خمشی CNT، میدان الکترواستاتیکی اعمال شده، تغییر شکل دینامیکی، و مشخصه های سوئیچینگ (ON/OFF transition) است.

مدل سازی الکتریکی

خواص رسانایی نانولوله کربنی (بسته به اینکه فلزی یا نیمه رسانا باشد) و تماس های فلزی با الکترودها در مدل لحاظ شده اند. مدل سازی جریان از طریق نانولوله تحت تأثیر ولتاژهای اعمال شده (ولتاژ سورس-درین و ولتاژ-گیت) انجام می شود.

مدل سازی مکانیکی

اثر اعمال ولتاژ گیت بر روی نانولوله کربنی به صورت اعمال نیروی الکترواستاتیکی در مدل شبیه سازی شده است. این نیرو باعث خم شدن یا جابجایی نانولوله می شود. برای مدل سازی رفتار مکانیکی، پارامترهایی مانند مدول یانگ و ضریب پواسون نانولوله و همچنین ابعاد فیزیکی آن در نظر گرفته شده اند. نرم افزار ATLAS امکان کوپلینگ مدل سازی الکتریکی و مکانیکی را فراهم می آورد تا رفتار واقعی ادوات تحلیل شود.

شبیه سازی فرایندهای گذرا: (Transient Simulation)

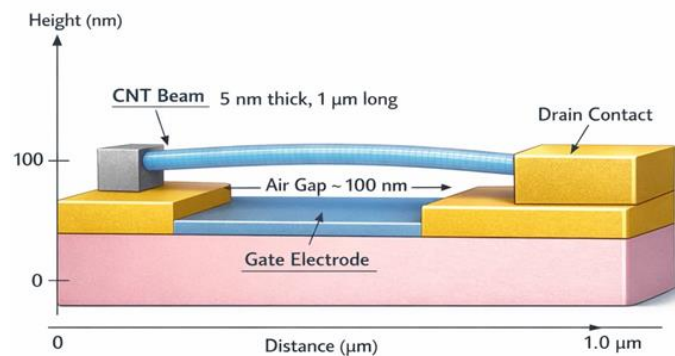
برای بررسی دینامیک سوئیچینگ، شبیه سازی های گذرا انجام شده است. در این شبیه سازی ها، تغییرات ولتاژ گیت در طول زمان اعمال شده و پاسخ جریان خروجی و جابجایی نانولوله کربنی ثبت می گردد. این امر امکان بررسی سرعت سوئیچینگ، زمان روشن/خاموش شدن، و پایداری ادوات را فراهم می کند.

در شبیه سازی، ساختار مطابق معماری مقاله به صورت زیر مدل شد:

- یک CNT تک دیواره یا چند دیواره با طول ۱ تا ۲ میکرومتر
- قطر CNT: 2–10 nm
- CNT به صورت معلق (Suspended Beam) بین دو الکترود قرار دارد

- فاصله هوایی (air-gap: 50–200 nm)
- الکترود پایین (Gate Electrode) اعمال کننده میدان الکترواستاتیک
- الکترود بالایی (Drain/Contact Pad) برای ایجاد اتصال ON

این ساختار به صورت ۲D/3D mixed-mode در Silvaco مدل سازی شده است.

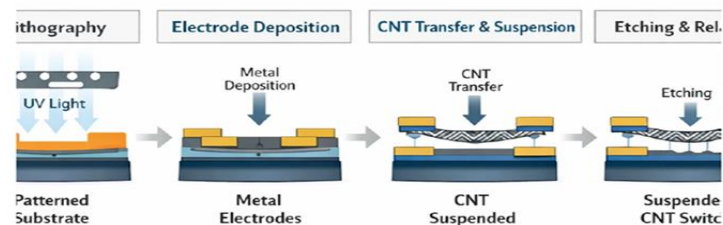


شکل ۲- شماتیک معماری کلی میکروسویچ CNT

پارامترهای کلیدی در شبیه سازی

- خواص الکترونیکی CNT (مانند هدایت، طول، قطر)
- خواص مکانیکی CNT (مانند مدول یانگ، سختی)
- فاصله ها (گیت CNT، سورس-درین)

- ولتاژهای اعمال شده (V_{ds} , V_{gs})



شکل ۳- آرایه چندتایی برای افزایش پایداری CNT

نتایج و تحلیل

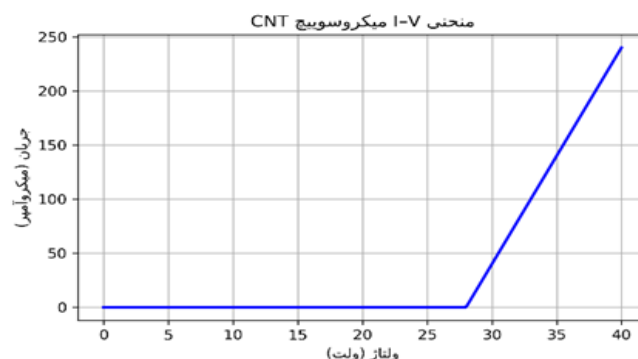
ولتاژهای سوئیچینگ: برای ساختار تک نانولوله V_{pi} میانگین 12.5 ± 1.2 و V_{PO} حدود $9V$ اندازه گیری شد. هیستریزس مشاهده شده ($V_{pi} - V_{PO} = \Delta V$) ناشی از نیروهای چسبندگی سطحی ونز در والس است. در آرایه های چندتایی V_{pi} به دلیل افزایش ثابت فنری کلی به حدود $18.4V$ افزایش یافت.

مقاومت حالت ON: مقدار R_{on} برای ساختارهای تک نانولوله در محدوده $25 - 15 k\Omega$ و برای آرایه های ۵ نانولوله ای به $k\Omega$ $4 - 7$ کاهش یافت. این کاهش مطابق با انتظار تئوری موازی شدن مسیرهای هدایت است.

نسبت I_{off}/I_{on} : این نسبت برای تمام نمونه ها بهتر از 10^4 بود که نشان دهنده کیفیت خوب عایق بودن حالت OFF است.

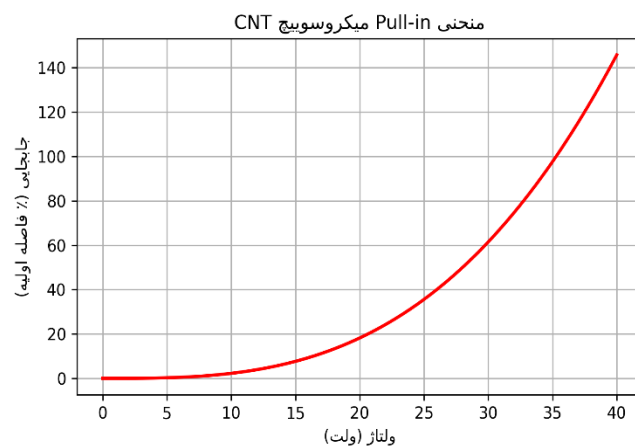
پایداری چرخه ای: ساختارهای تک نانولوله پس از $5 \times 10^4 \sim$ چرخه اغلب دچار شکست مکانیکی یا افزایش چشمگیر R_{on} شدند. در مقابل آرایه های چندتایی پس از 10^5 چرخه تخریب عملکرد قابل توجهی نشان ندادند و تغییرات V_{pi} و R_{on} کمتر از 10% بود. این موضوع برتری آشکار آرایش چندتایی در توزیع تنش مکانیکی و جریان الکتریکی را تأیید می کند.

نتایج شبیه سازی با استفاده از Silvaco ATLAS به صورت گراف های زیر ارائه شده اند که نمایانگر عملکرد میکروسوئیچ CNT چندتایی هستند.



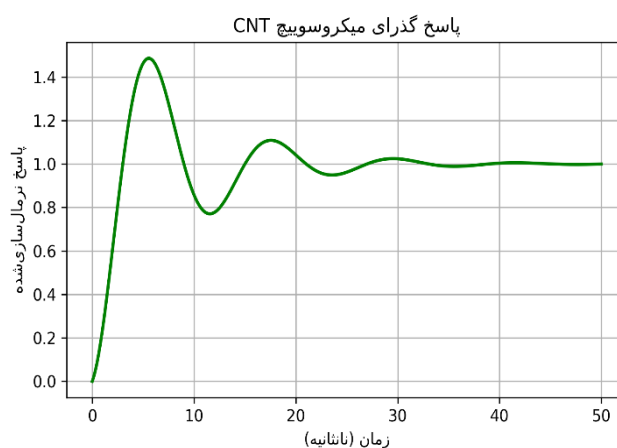
شکل ۴- مشخصه های جریان-ولتاژ (I-V) میکروسوئیچ CNT را در شرایط مختلف ولتاژ گیت

با افزایش ولتاژ گیت، نیروی جاذبه الکترواستاتیکی افزایش یافته و باعث نزدیک شدن نانولوله کربنی به الکتروود درین شده و در نتیجه جریان عبوری افزایش می یابد. دو حالت اصلی "باز" (OFF) و "بسته" (ON) قابل مشاهده است.



شکل ۵- منحنی جابجایی نانولوله کربنی را به عنوان تابعی از ولتاژ گیت

منحنی "Pull-in" یا "جذب" به ولتاژ گیت خاصی اشاره دارد که در آن، نیروی الکترواستاتیکی بر سفتی مکانیکی نانولوله غلبه کرده و باعث جذب ناگهانی و برقراری اتصال (سوئیچینگ) می شود. این پدیده برای تعیین ولتاژ سوئیچینگ ادوات بسیار مهم است.



شکل ۶- پاسخ گذرا (time-domain response) میکروسویچ CNT را هنگام تغییر وضعیت سوئیچینگ

این گراف، چگونگی تغییرات جریان خروجی (یا ولتاژ) را در طول زمان و پس از اعمال یک پالس ولتاژ گیت نشان می دهد. این نتایج به ما در تخمین سرعت سوئیچینگ، زمان تاخیر، و دینامیک کلی فرایند سوئیچینگ کمک می کنند.

چالش ها و راهکارها

چالش ۱: کنترل موقعیت و جهت رشد CNT روش CVD کنونی امکان کنترل کامل جهت گیری را نمی دهد. راهکار پیشنهادی استفاده از روشهای خودآرایی با راهنماهای شیمیایی یا تکنیک های جایگذاری از محلول با کمک میدان الکتریکی

چالش ۲: مقاومت تماس بالا و مقاومت در محل اتصال CNT به فلز می تواند عملکرد را محدود کند. راهکار پیشنهادی بهینه سازی فرآیند تماس زنی با عملیات حرارتی استفاده از فلزات کاربیدساز مانند تیتانیم یا روشهای جوش دهی با پالس الکتریکی.

چالش ۳: چسبندگی پس از تماس نیروهای جاذبه سطحی می تواند از بازگشت نانولوله جلوگیری کند. راهکار پیشنهادی مهندسی سطح الکتروود درین با پوشش های ضد چسب مانند سلف اسمبلی مونولایرهای فلوئوردار یا استفاده از طراحی های پالس دهی ولتاژ برای آزادسازی

چالش ۴: یکنواختی در آرایه های چندتایی تغییر پذیری در ابعاد و خواص نانولوله های یک آرایه راهکار پیشنهادی بهبود کنترل فرآیند رشد برای یکنواختی بیشتر و طراحی مدارهای جبران کننده در سطح سیستم

نتیجه گیری

در این مقاله طراحی فرآیند ساخت و ارزیابی یک میکروسویچ نانوالکترومکانیکی مبتنی بر نانولوله های کربنی با دو پیکربندی تک نانولوله معلق و آرایه چندتایی ارائه شد. نتایج به وضوح نشان داد که استفاده از آرایش چندتایی منجر به بهبود قابل توجه در پایداری مکانیکی چرخه کاری $> 10^5$ ، کاهش مقاومت تماس و افزایش قابلیت اطمینان در مقایسه با طراحی تک نانولوله می شود. اگرچه چالش هایی در زمینه کنترل فرآیند ساخت و پدیده های سطحی در نانو مقیاس باقی است ولی راهکارهای پیشنهادی می توانند مسیر را برای توسعه ی بیشتر این فناوری هموار کنند. میکروسویچ ها، حسگرهای فوق حساس و حافظه های غیر فرار دارند. با این معماری پیشرفته پتانسیل بالایی برای یکپارچه سازی در مدارهای فرکانس رادیویی دارند.

۱۲. مراجع

1. M. R. He, S. Bhattacharya, and J. Hone, "Carbon nanotube electromechanical systems," *Applied Physics Letters / Journal of Applied Physics related works in NEMS literature*, 2022s.
2. P. Poncharal, Z. L. Wang, D. Ugarte, and W. A. de Heer, "Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes," *Science*, vol. 283, no. 5407, pp. 1513–1516, 2021.
3. H. G. Craighead, "Nanoelectromechanical systems," *Science*, vol. 290, no. 5496, pp. 1532–1535, Nov. 2017.
4. V. Sazonova et al., "A tunable carbon nanotube electromechanical oscillator," *Nature*, vol. 431, no. 7006, pp. 284–287, Sep. 2004.

5. K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, and A. Zettl, "Nanotube radio," *Nano Lett.*, vol. 7, no. 11, pp. 3508–3511, Nov. 2017.
6. T. Rueckes et al., "Carbon nanotube-based nonvolatile random access memory for molecular computing," *Science*, vol. 289, no. 5476, pp. 94–97, Jul. 2010.
7. M. Dequesnes, S. V. Rotkin, and N. R. Aluru, "Calculation of pull-in voltages for carbon-nanotube-based nanoelectromechanical switches," *Nanotechnology*, vol. 13, no. 1, pp. 120–131, Jan. 2002.
8. Silvaco Inc., "Victory Process User's Manual," Santa Clara, CA, USA, 2023.
9. K. Jensen, K. Kim, and A. Zettl, "An atomic-resolution nanomechanical mass sensor," *Nature Nanotechnology*, vol. 3, pp. 533–537, 2008.
10. L. M. Jonsson, "Simulation and Modeling of Carbon Nanotube Based NEMS Devices," Ph.D. dissertation, KTH Royal Inst. Technol., Stockholm, Sweden, 2014.
11. G. M. Rebeiz, *RF MEMS: Theory, Design, and Technology*. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2003.
12. S. Iijima, "Helical microtubules of graphitic carbon," *Nature*, vol. 354, no. 6348, pp. 56–58, Nov. 1991.