

امکان به کارگیری نانولوله کربنی تک دیواره به عنوان یک کانال در ترانزیستورهای اثر میدانی

شیمیا رسولیⁱ؛ علی بهاریⁱⁱ

چکیده

مسیر روبه جلو در کاربرد نانولوله‌های تک دیواره کربنی به عنوان یک کانال ماسفت (ترانزیستور اثر میدانی فلز-اکسید-نیمه‌رسانا) برای تراشه‌ها و نانوترانزیستورهای آتی به قوی‌تر و مستحکم‌تر بودن ساختار آن‌ها نسبت به ساختار کانال فعلی این ترانزیستورها پیوند خورده است. بر این اساس آزمایش‌هایی در رشد گیت اکسید سیلیکون فرا نازک بر زیرلایه Si(111) انجام گردید و آنگاه به مطالعه ساختار نانولوله تک دیواره کربنی پرداخته تا روشن شود که آیا این ماده می‌تواند یک کانال خوب برای تولیدات آتی ترانزیستور ماسفت باشد؟ طیف‌ها پیش‌تر با تابش سینکروتونی گرفته شده است. در کار حاضر با مدل هم‌ارزی-انرژی، مدول یانگ نانولوله تک دیواره آرمچیر و زیگزاگ محاسبه شده و بستگی آن با طول و قطر لوله مشخص شده است که نوع آرمچیر نانولوله کربنی استحکام بیشتری از خود نشان می‌دهد که برای هدف این مقاله مناسب‌تر است.

کلمات کلیدی

نانوترانزیستور، کانال، نانولوله تک دیواره کربنی، مدول یانگ، فشار خارجی، انرژی کرنش.

The Single Wall Carbon Nanotube Ability in Metal-Oxide-Semiconductor Nanotransistor's Channel

Sh. Rasuli; Dr. A. Bahari

ABSTRACT

The ongoing race to use single wall carbon nanotubes as a channel of the Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor in future computer chips and nanotransistor has led to a search for channels with stronger structure than current channel in CMOS.

We have thus demonstrated a series of experiments to grow ultra thin oxide on Si(111) substrate and studied single wall carbon nanotube (SWCNT) structure to set if SWCNT can be a good candidate for future CMOS generation.

The spectra and image have been taken with synchrotron radiation technique. In the present work with an energy-equivalent model we could calculate Young Modulus and show relation between Young modulus with length and diameter of tube. This work shows that armchair type of single wall carbon nanotube is stronger and can fill this gap.

KEYWORDS

Nanotransistor, Channel, Single Wall Carbon Nanotube (SWCNT), Young Modulus, External Pressure, Strain Energy

ⁱ کارشناسی ارشد فیزیک حالت جامد - دانشکده علوم پایه - گروه فیزیک، بابلسر E. Mail: shimarasuli@yahoo.com

ⁱⁱ دکترا نانو تکنولوژی، عضو هیئت علمی دانشگاه مازندران - گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه - بابلسر-

E.mail: a.bahari@umz.ac.ir



در تئوری مکانیک مولکولی ساختار نانولوله را به صورت مولکول‌های کربن و پیوندهای بین آن‌ها در نظر گرفته و انرژی پتانسیل ماده از روی این ساختار مولکولی تعیین می‌شود. درحالی‌که در مدل مکانیک پیوستار نانولوله به صورت یک استوانه در نظر گرفته شده که با توجه به شرایط مسأله، استوانه توپر یا توخالی، با ضخامت یا بدون ضخامت در نظر گرفته می‌شود. از شاخه‌های این دوگروه اصلی می‌توان به دینامیک مولکولی، روش کوانتومی *ab initio*، تئوری پوسته و تئوری اجزای محدود اشاره کرد.

در این مقاله ابتدا به بررسی ساختار اکسید سیلیکون فوق نازک پرداخته شده و سپس از یک روش معادلسازی انرژی استفاده شده است. به این صورت که ابتدا مدل مولکولی نانولوله کربنی در نظر گرفته شده و انرژی پتانسیل نهایی ساختار مولکولی آن به دست آمد. پس از آن نانولوله به صورت یک ساختار به هم پیوسته استوانه‌ای شکل فرض شد و انرژی کرنش این ساختار محاسبه شده است. در پایان از برابر قرار دادن انرژی پتانسیل مولکولی و انرژی کرنش نانولوله کربنی در این دو حالت، مدول یانگ لوله تحت فشار خارجی محیطی محاسبه شده است.

۲- شرح آزمایش

نمونه‌های سیلیکون را از ورقه‌های Si(111) (نوع n، مقاومت ویژه ۵ اهم- سانتیمتر، قطر ۲ میلیمتر) به اندازه ۱۰×۱۰ میلیمتر مربع بریده شده‌اند و در بشر حاوی اتانول گذاشته و به مدت یک ساعت، وارد حمام فراصوت گردید تا نمونه‌های تمیز به دست آید. سپس آن را وارد محفظه فرا خلاء کرده و با عبور سریع چندین باره جریان از دو سر نمونه تمیز گردید. نوار ظرفیت گرفته شده از سینکروترون (برای جزئیات بیش تر رجوع گردد به کار مولف در [۳و۴]) در شکل (۱) نشان دهنده وجود تنها حالت‌های سطح و حالت‌های تنها توده سیلیکون است و هیچ آلودگی و ناخالصی را نشان نمی‌دهد. آنچه از طیف شکل (۱) بدست می‌آید، وجود ساختار تمیز سیلیکون است که به عنوان یک زیرلایه مناسب در نانوترانزیستورهای اثر میدانی به کار آمده است.

از زمان کشف نانولوله‌های کربنی تا امروز زمان زیادی نمی‌گذرد اما تحقیقات گسترده محققان در زمینه‌های مختلف روی این ماده جدید نشان از کاربردهای گوناگون این ماده دارد. خواص گوناگون این ماده از جمله خواص مکانیکی و الکتریکی آن بسیار مورد توجه دانشمندان قرار گرفته است. نانولوله‌های کربنی خواص رسانایی و نیمه رسانایی بسیار خوبی از خود نشان می‌دهند. خاصیت رسانایی نانولوله کربن تا شش برابر مس هم گزارش شده است.

رسانایی خوب نانولوله‌های کربنی تک دیواره سبب شده که به عنوان ماده جایگزین در بسیاری از قطعات الکترونیکی که وظیفه حمل جریان الکتریکی را بر عهده دارند کاربرد داشته باشد. گروه پژوهشی و مولفین مقاله در حال حاضر بر نانوترانزیستورها تمرکز نموده و با توجه به موانع و مشکلاتی که با کوچک‌شدگی سریع نانوقطعات الکترونیکی پیش آمده است [۱] و [۲]. به مطالعه ویژگی‌های مواد تشکیل دهنده یک نانوترانزیستور اثرمیدانی از جمله گیت و کانال آن می‌پردازد تا امکان استفاده از آنها را در تولیدات آتی نانوترانزیستورهای CMOS بررسی کند. چندی پیش نشان داده شده [۸] که نانوترانزیستورهایی با گیت‌های دوتایی به جای تک گیتی برتری‌هایی دارند که از جمله آنها کاهش جریان نشتی در گیت اکسیدهای فوق نازک است [۲] و [۳] و [۴]. اما مشکل بزرگی که همچنان وجود دارد، عبور حامل‌ها از کانال است که تحرک پذیری و محدودیت حرکت آنها باعث معرفی نانولوله کربنی شده است [۱].

از آنجا که اگر نانولوله کربنی بخواهد در کانال یک نانوترانزیستور قرار گیرد، تحت تأثیر فشارهای خارجی خواهد بود و این فشارهای خارجی ممکن است باعث خم شدن، شکستن و یا تغییر ساختار لوله شود و به دلیل اهمیتی که ساختار در خواص رسانایی نانولوله‌های کربنی دارد، پس بررسی قدرت مقاومت نانولوله‌های کربنی در برابر فشار خارجی بسیار مهم است. برای این منظور به بررسی مدول یانگ پرداخته شد که از جمله عوامل مهم در تعیین خواص مکانیکی یک ماده است. برای نانولوله‌های کربنی مدول‌های یانگ مختلفی گزارش شده است. این مقادیر از روش‌های گوناگون نظری و تجربی به دست آمده‌اند که به دلیل دقیق نبودن وسایل و دستگاه‌های مورد استفاده درمقیاس نانو تا کنون نتایج تجربی یکدیگر را تأیید نکرده‌اند [۵] و [۹]. در بیشتر موارد، مدول یانگ از روش‌های محاسباتی محض به دست آمده‌اند که به دو گروه اصلی مکانیک مولکولی و مکانیک

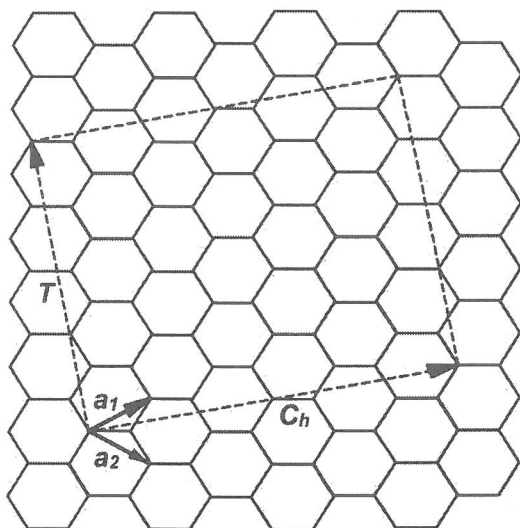
دیده می‌شود که سیلیکون رشد یافته روی نانوآکسید سیلیکون، ساختاری بی‌شکل دارد و می‌تواند به دلیل جلوگیری از جریان نشستی و تونل‌زنی همچنان به عنوان گیت به کار رود اما وقتی ضخامت آن بسیار کاهش می‌یابد و به زیر یک نانومتر می‌رسد، آنگاه در درجه اول باید به سراغ کانال ترانزیستوری رفت و سپس در پی ماده دی‌الکتریک مناسب بود. برای کانال عبوری حامل‌ها، نانولوله کربنی پیشنهاد شده است. پس به مطالعه نظری ساختار نانولوله کربنی پرداخته تا روشن شود که کدام نوع نانولوله کربنی (آرمچیر یا زیگزاگ) و با چه قطری قابلیت آن را دارند تا به عنوان یک کانال به کار روند. بنا بر این در بخش‌های پیش رو به مطالعه مهمترین ویژگی مکانیکی این ماده یعنی مدول یانگ پرداخته می‌شود.

۳- نانولوله کربنی

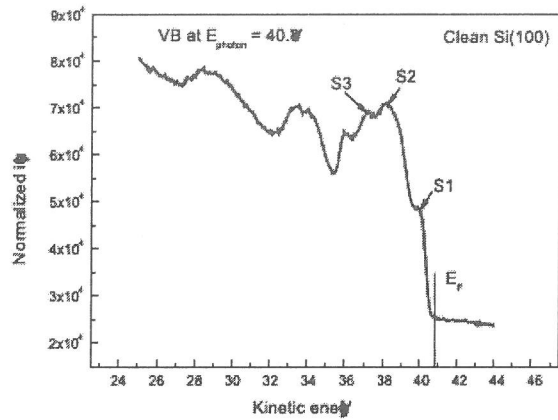
نانولوله‌های کربنی از یک صفحه گرافن لوله شده درست می‌شود. گرافن متشکل از یک شبکه اتم‌های کربن است که در یک ساختار شش‌ضلعی روی یک صفحه کنارهم قرار گرفته‌اند. دو عدد صحیح m و n تمام مشخصه‌های یک نانولوله تک دیواره کربنی را بیان می‌کنند. با این دو عدد بردارکایرال صفحه گرافن بوجود می‌آید که \hat{a}_1 و \hat{a}_2 بردارهای واحد شبکه گرافن هستند. شکل (۳).

$$C_h = n\hat{a}_1 + m\hat{a}_2$$

اگر روی صفحه گرافن مستطیلی جدا شود به گونه‌ای که C_h طول مستطیل باشد، با لوله کردن این مستطیل گرافنی در جهتی که C_h محیط استوانه باشد، یک نانولوله تک دیواره به دست خواهد آمد.

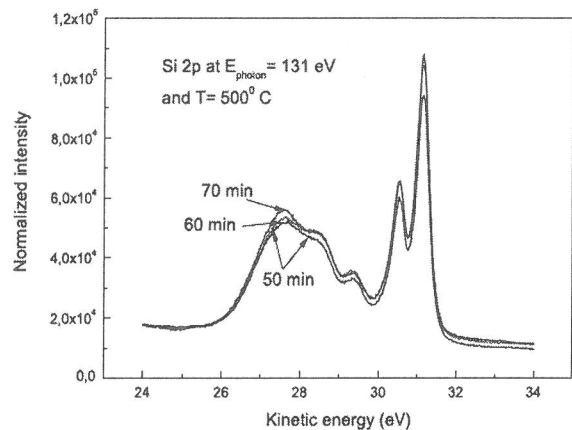


شکل (۳): صفحه گرافن با بردارهای مشخصه نانولوله



شکل (۱): طیف نوار ظرفیت که با انرژی 40.8 الکترون ولت فوتون ورودی به وسیله تابش سینکروترونی به دست آمده است. S_1 و S_2 و S_3 حالت‌های تمیز سطح سیلیکون تمیز را نشان می‌دهند.

بر زیرلایه مزبور، مولکول‌های اکسیژن به روشی که شرح آن می‌آید تابانده می‌شوند که طیف Si 2p گرفته شده از تابش سینکروترونی در شکل (۲) بیان می‌کند که پیوندهای جالب و مطلوبی بین اتم‌های سیلیکون و مولکول‌های اکسیژن در دمای 500°C درجه سانتیگراد شکل گرفته و جابجایی طیف‌ها به سمت انرژی جنبشی پایین‌تر است. با توجه به انرژی فوتون فرودی = انرژی جنبشی - انرژی بستگی می‌توان جابجایی به سمت انرژی بستگی بالاتر را دلالت بر پیوندهای تشکیل شده Si و O_2 دانست که کاهش شدت قله‌های Si 2p_{3/2} و Si 2p_{1/2} در شکل (۲) مؤید این برداشت است. شایان گفتن است که مولکول‌های O_2 به خوبی قادرند با سیلیکون تشکیل پیوند دهند و فیلم اکسید سیلیکون را شکل دهند.



شکل (۲): طیف Si 2p اکسید سیلیکون که توسط سنکروترون با انرژی فوتون فرودی 131 الکترون ولت و در دمای 500°C درجه سانتیگراد گرفته شده است.

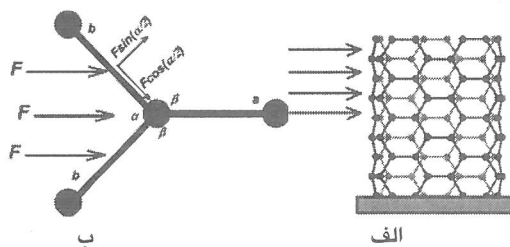
$$U_{tot} = U_b + U_\theta + U_\omega + U_\tau + U_{vdw} + U_e$$

که U_b انرژی کشش پیوندی، U_θ انرژی تغییر زاویه پیوندی، U_ω انرژی چرخشی پیوندها، U_τ انرژی پیچشی پیوندهای کربن-کربن است. U_{vdw} انرژی واندروالس بین اتم های کربن و U_e انرژی الکترواستاتیک بین آن ها است. با توجه به اینکه می توان از اثر ناچیز انرژی های پیوندی U_ω و U_τ و U_e و غیرپیوندی U_{vdw} چشم پوشی کرد [6] و [7]. در محاسبات این مقاله تنها از دو انرژی کشش پیوند و تغییر زاویه پیوندی، آن هم از نوع نوسانگر هماهنگ ساده، استفاده شده است.

$$U_{tot} = U_b + U_\theta$$

۴-۱- نانولوله تک دیواره آرمچیر

شکل (۴) یک نانولوله نوع آرمچیر را در کنار واحد ساختاری آن نشان می دهد که تحت تاثیر فشار هماهنگ از اطراف قرار می گیرد. یک سر لوله مقید است و این فشار خارجی می تواند لوله را خم کند. شکل (۴الف). هر واحد ساختاری با توجه به نوع هندسه آن دارای یک پیوند به طول a و دو پیوند به طول b ، یک زاویه α و دو زاویه β است.



شکل (۴): الف) نیروی وارد بر نانولوله تک دیواره آرمچیر (ب) نیروی وارد بر واحد ساختاری آرمچیر

نیروی ناشی از این فشار خارجی به صورت شکل (۴ ب) به ساختار نانولوله اعمال می شود. انرژی های جزء ساختاری لوله به صورت رابطه (۱) است:

$$U_{ra} = \frac{1}{2} k_r (da)^2 \quad (1)$$

$$U_{rb} = \frac{1}{2} k_r (db)^2$$

$$U_{\theta\alpha} = \frac{1}{2} k_\theta (d\alpha)^2 \quad (2)$$

$$U_{\theta\beta} = \frac{1}{2} k_\theta (d\beta)^2$$

که $k_\theta = 8/76 \times 10^{-10}$ و $k_r = 6/25 \times 10^{-7}$ اند [6]. اگر نیروهای وارد شده بر واحد ساختار لوله به دو مؤلفه در راستای پیوند و عمود بر پیوند تجزیه شوند، نیروهایی را که

ارتفاع این لوله همان عرض مستطیل گرافنی است که با توجه به اعداد n و m مشخص می شود.

$$T = t_1 \hat{a}_1 + t_2 \hat{a}_2$$

t_1 و t_2 اعداد صحیح هستند که با شرط عمود بودن بردار T بر بردار C_h می توان مقدار آنها را برحسب m, n محاسبه کرد.

$$\hat{C}_h \cdot \hat{T} = 0$$

$$(n \hat{a}_1 + m \hat{a}_2) \cdot (t_1 \hat{a}_1 + t_2 \hat{a}_2) = 0$$

$$\begin{cases} t_1 = (n + 2m) \\ t_2 = -(2n + m) \end{cases}$$

اما از آنجا که T حداقل طول نانولوله ای تک دیواره است، باید کوچک ترین بردار T را در نظر گرفت.

پس:

$$t_1 = \frac{n + 2m}{r}$$

$$t_2 = \frac{-(2n + m)}{r}$$

که r بزرگترین مقسوم علیه مشترک بین $(n+2m)$ و $(2n+m)$ است.

نانولوله با ثابت های (n, n) یک نانولوله زیگزاگ و $(n, 0)$ یک نانولوله آرمچیر نامیده می شود.

۴-۲ مدول یانگ

مدول یانگ جسم یا همان نسبت تنش به کرنش جسم نسبتی است که سفتی یک ماده با آن سنجیده می شود. برای یک ماده ویژگی های مکانیکی زیادی از جمله سختی، انعطاف پذیری، چکش خواری، استحکام و... تعریف می شود. از جمله این ویژگی ها سفتی جسم است که به عنوان خاصیتی از جسم تعریف می شود که به موجب آن جسم می تواند در برابر تغییر شکل مقاومت کند. مدول یانگ جسم اهمیت بسیاری در طراحی و ساخت قطعات مختلفی که از ماده ساخته می شود دارد. در کل یکی از ویژگی های اساسی ماده برای استفاده از آن در صنایع مختلف از جمله صنعت نانو قطعات الکترونیکی است.

در مورد نانولوله های کربن که نقش اساسی در صنایع الکترونیک آینده ایفا می کنند حفظ ساختار برای ثابت ماندن خواص رسانایی ماده عامل مهمی است. هر چه مدول یانگ یک ساختار بیشتر باشد آن ماده سفت تر است و مقاومت بیشتری در برابر تغییر شکل از خود نشان می دهد.

برای مطالعه خواص یک ساختار مهمترین موردی که باید بررسی شود، نوع پتانسیل حاکم بین اتم ها در ساختار آن شبکه است. همه پتانسیل های پیوندی و غیرپیوندی حاکم بین اتم های کربن در نانولوله عبارتند از:

باعث کشش پیوندی و تغییر زاویه پیوندی می‌شود، به دست می‌دهند. در این صورت با استفاده از روابط تعادل نیروها و گشتاورها روابط (۳) و (۴) بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} f \cos(\alpha/2) &= k_r db \\ 2f &= k_r da \end{aligned} \quad (3)$$

(۴)

$$f \sin(\alpha/2) \frac{b}{2} = k_\theta d\alpha + k_\theta d\beta \cos \varphi$$

که φ زاویه بین دو صفحه a-a و b-b است.

$$\cos \varphi = \frac{-\operatorname{tg}(\alpha/2)}{\operatorname{tg}(\beta)} \quad (5)$$

با جایگذاری da و db از روابط (۳) در (۱) انرژی‌های کشش پیوندی a و b به دست می‌آیند.

$$U_{ra} = \frac{f^2}{2k_r}$$

$$U_{rb} = \frac{f^2 \cos^2(\alpha/2)}{2k_r}$$

به علاوه از تقارن هندسی شکل (۴) بدست می‌آید:

$$\cos(\beta) = -\cos(\alpha/2) \cos(\pi/n)$$

و از آنجا

$$d\beta = \frac{-\sin(\alpha/2)}{2 \sin(\beta)} \cos(\pi/n) d\alpha \quad (6)$$

که زاویه شکست خط فرضی C-C در سطح مقطع لوله آرمچیر است.

با جایگذاری (۵) و (۶) در (۴) به دست می‌آید:

$$d\alpha = \frac{fb}{k_\theta} \lambda_\alpha$$

که

$$\lambda_\alpha = \frac{\sin(\alpha/2) \sin(\beta) \operatorname{tg}(\beta)}{2 \sin(\beta) \operatorname{tg}(\beta) + \sin(\alpha/2) \operatorname{tg}(\alpha/2) \cos(\pi/n)}$$

و از آنجا

$$d\beta = \frac{fb}{k_\theta} \lambda_\beta$$

که

$$\lambda_\beta = \frac{-\sin(\alpha/2)}{2 \sin(\beta)} \cos(\pi/n) \lambda_\alpha$$

با جایگذاری da و db در (۲) انرژی‌های تغییر زاویه پیوندی هم محاسبه می‌شوند.

$$U_{\theta\alpha} = \frac{f^2 b^2 \lambda_\alpha^2}{2k_\theta}$$

$$U_{\theta\beta} = \frac{f^2 b^2 \lambda_\beta^2}{2k_\theta}$$

در حالت کلی برای یک نانولوله (n,n)، به تعداد 2nj واحد ساختاری وجود دارد که ز تعداد ردیفی است که از این واحدها در طول لوله چیده شده پس انرژی کل یک نانولوله که از زردیف این واحدها تشکیل شده است، برابر خواهد بود با:

$$U_{tot} = 2njU_{ra} + 4njU_{rb} + 2njU_{\theta\alpha} + 4njU_{\theta\beta} \quad (7)$$

از طرف دیگر با توجه به علم متالورژی مواد، انرژی کرنش یک ساختار پیوسته استوانه ای تحت خمش به صورت زیر به دست می‌آید که عبارتند از:

$$U_c = \frac{1}{2} \int_0^L \frac{M^2}{EI} dx$$

که M گشتاور خمشی است که در فاصله x از سر لوله وارد می‌شود، I گشتاور لختی سطح مقطع حول محور خنثای لوله، L طول لوله و E هم مدول یانگ این ساختار است. در اینجا چون یک استوانه جدار نازک وجود دارد که از ضخامت آن چشم-پوشی می‌شود، از اثر نیروهای برشی چشم پوشی کرده و تنها تنش‌های عمودی را در نظر گرفته می‌شود. در پایان با جایگذاری $M=f \times x$ و $I = \pi R^4/2$ و $L = 2j b \sin(\alpha/2)$ بدست می‌آید:

$$U_c = \frac{2^4 f^2 (j b \sin(\alpha/2))^3}{6\pi R^4 E} \quad (8)$$

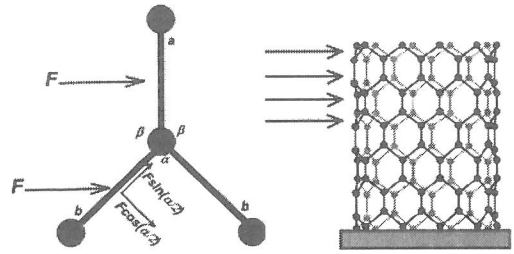
مدول یانگ یک نانولوله تک‌دیواره آرمچیر از برابر قرار دادن (۷) و (۸) به دست می‌آید.

$$E = \frac{8j^2 b^3 \sin^3(\alpha/2)}{3\pi R^4 n \left(\frac{1}{k_r} + \frac{2 \cos^2(\alpha/2)}{k_r} + \frac{b^2 \lambda_\alpha^2}{k_\theta} + \frac{2b^2 \lambda_\beta^2}{k_\theta} \right)}$$

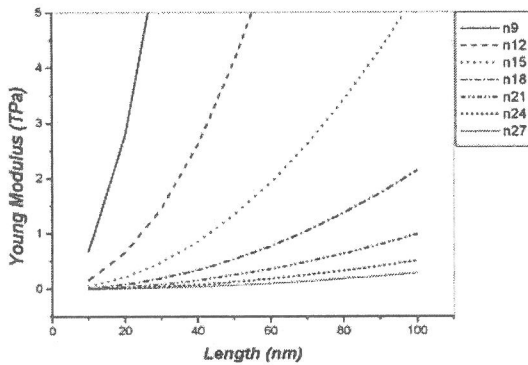
۴-۲- نانولوله تک دیواره زیگزاگ

شکل (۵) یک نانولوله تک‌دیواره زیگزاگ را در کنار واحد ساختاری آن نشان می‌دهد. واحد ساختاری زیگزاگ همانند آرمچیر از یک پیوند به طول a و دو پیوند به طول b، یک زاویه α و دو زاویه β تشکیل شده است با این تفاوت که نسبت به آرمچیر به اندازه ۹۰ درجه چرخیده است.

شکل (۶) نمودار تغییرات مدول یانگ نانولوله آرمچیر نسبت به طول آن را نشان می‌دهد و n مشخصه نانولوله است که در شکل مشخص شده است. بدیهی است با افزایش n قطر لوله زیاد می‌شود. از شکل می‌توان دریافت که با افزایش طول لوله مدول یانگ افزایش پیدا می‌کند اما با افزایش قطر لوله، کاهش پیدا می‌کند. برای لوله‌هایی که n آن‌ها از ۹ تا ۱۵ تغییر می‌کنند، قطر بین ۱ تا ۲ نانومتر دارند، مقدار مدول یانگ بیشتر است. دیده می‌شود که برای $n > 24$ ، که قطر لوله از ۳ نانومتر بیشتر است، گستره‌ی تغییرات مدول یانگ نسبت به طول کم است یعنی در قطرهای بالاتر مقدار مدول یانگ تا اندازه‌ای ثابت می‌شود.

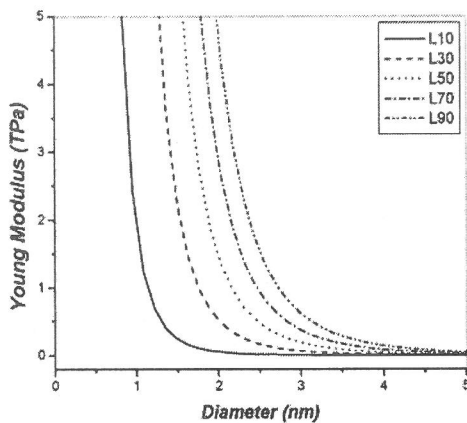


شکل (۵): الف) نیروی وارد بر نانولوله تک دیواره زیگزاگ (ب) نیروی وارد بر واحد ساختاری زیگزاگ



شکل (۶): تغییرات مدول یانگ نانولوله آرمچیر نسبت به طول

در شکل (۷) که تغییرات مدول یانگ نانولوله آرمچیر بر حسب قطر در طول‌های متفاوت نشان داده شده، مشخص است که مدول یانگ نسبت به افزایش قطر یک روند نمایی کاهش پیدا می‌کند. با افزایش قطر لوله، مدول یانگ کاهش پیدا می‌کند در حالی‌که با افزایش طول لوله، مدول یانگ افزایش پیدا می‌کند.



شکل (۷): تغییرات مدول یانگ نانولوله آرمچیر بر حسب قطر

با نوشتن معادلات تعادل همانند حالت آرمچیر و با توجه به این که در این حالت زاویه شکست خط فرضی C-C در سطح مقطع لوله زیگزاگ، $2\pi/n$ است، انرژی پتانسیل مولکولی نانولوله زیگزاگ محاسبه خواهد شد:

$$U_{tot} = njU_{ra} + 2njU_{rb} + njU_{\theta\alpha} + 2njU_{\theta\beta} \quad (9)$$

که چون هیچ تغییر طولی در راستای پیوند a وجود ندارد، $U_{ra}=0$ ، n شاخص لوله و ز تعداد ردیف‌های واحد ساختاری است که با توجه به طول لوله تعیین می‌شود.

برای نانولوله زیگزاگ $L = j(a + b \sin(\alpha/2))$ و انرژی کرنش آن از رابطه (۱۰) به دست می‌آید:

$$U_c = \frac{2f^2 j^3 (a + b \sin(\alpha/2))^3}{6\pi R^4 E} \quad (10)$$

در پایان با برابر قرار دادن (۹) و (۱۰) مدول یانگ نانولوله زیگزاگ همانند آرمچیر به دست می‌آید:

$$E = \frac{j^2 (a + b \sin(\alpha/2))^3}{3\pi R^4 n \left(\frac{\sin^2(\alpha/2)}{k_r} + \frac{b^2 \lambda_\alpha^2}{2k_\theta} + \frac{b^2 \lambda_\beta^2}{k_\theta} \right)}$$

۵- بحث

با توجه به فرآیندی که از معادلسازی انرژی در بخش‌های قبل توضیح داده شد، رفتار مکانیکی نانولوله کربنی در ناحیه الاستیک با بررسی مدول یانگ آن مورد مطالعه قرار گرفت. همانطور که یونگ وو و همکارانش [۱۰] با یک روش معادلسازی انرژی، مدول یانگ نانولوله را تحت فشار محوری نزدیک به ۰/۵ TPa محاسبه کردند که با افزایش شعاع لوله افزایش پیدا می‌کند، با کار انجام شده می‌توان بر این باور بود که این فشار خارجی نانولوله را تحت خمش قرار می‌دهد. حال بسته به این که نانولوله با چه طول و قطری تحت فشار قرار گیرد، نتایج به دست آمده برای مدول یانگ متفاوت خواهد بود.

روند کاهش تا قطرهای کمتر از یک نانومتر در طول ثابت زیاد است اما در قطرهای بیش از یک نانومتر کم است. همچنین دیده می‌شود که برای قطرهای بزرگتر از ۲ نانومتر در گستره‌ی طولی ۹۰-۱۰ نانومتر تغییر خیلی زیادی در مقادیر مدول یانگ دیده نمی‌شود در حالی‌که بیشترین تغییرات مدول یانگ در محدوده قطر ۱/۵-۱ نانومتر دیده می‌شود.

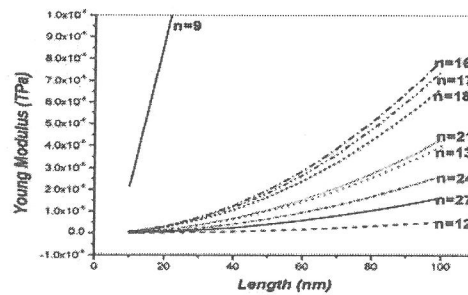
۶- نتیجه

زیرلایه بسیار تمیز سیلیکون را آماده کرده و اکسید سیلیکون فرا نازک بر این زیرلایه رشد داده شد. آنگاه به بررسی ویژگی فیلم اکسید فوق نازک پرداخته شد. در پی یافتن یک کانال مستحکم بوده تا هنگام قرارگیری در نانوترانزیستورهای اثر میدانی، ساختار آن هنگام عبور حامل‌ها خیلی کم دستخوش تغییر شود.

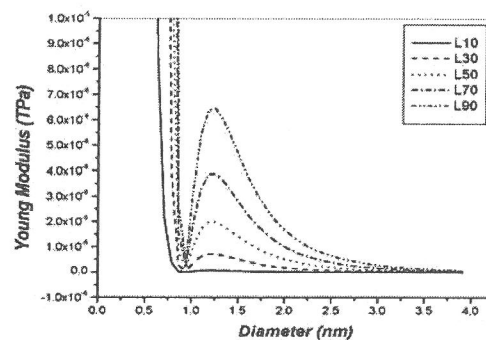
نانولوله‌های آرمچیر با طول زیاد و شعاع کم مدول یانگ بیشتری دارند اما تغییرات مدول یانگ در شعاعهای کم به شدت حساس به تغییر قطر است. پس در صورتی که در نانوترانزیستور نیاز به قطر حوالی یک نانومتر و طول ۶۰-۱۰ نانومتر باشد، نوع آرمچیر که مدول یانگش هزار برابر مدول یانگ زیگزاگ است، مناسب تر به نظر می‌رسد. همچنین به دلیل اینکه در قطرهای نزدیک به ۲-۵ نانومتر نمودار مدول یانگ برحسب قطر نوع زیگزاگ تغییرات بیشتری دارد در صورتی‌که تغییرات نوع آرمچیر هموار است و از یک روند کلی نزولی پیروی می‌کند و چون تغییرات آن قابل پیش‌بینی بیشتری است، در آزمایش‌های تجربی خطای کمتری هم خواهد داشت. اما در گستره قطر بالای ۳ نانومتر، نانولوله زیگزاگ خیلی زیاد حساس به قطر نیست و با طول‌های مختلف در این گستره‌ی قطر، تغییرات مدول یانگش یک هزارم نوع آرمچیر است (گستره‌ی تغییرات نوع زیگزاگ در حد گیگاپاسکال است و نوع آرمچیر در حد تراپاسکال). البته از لحاظ مقدار هم یک هزارم نوع آرمچیر است اما باز هم مقدار بالایی دارد، پس نانولوله زیگزاگ هم می‌تواند گزینه خوبی در قطرهای بیشتر از ۳ نانومتر باشد. در حالت کلی با توجه به کارکرد نانولوله می‌توان تعیین کرد که از چه نوع نانولوله‌ای در نانوترانزیستورها باید استفاده کرد. نتیجه حاضر نشان می‌دهد که نانولوله تک دیواره آرمچیر با گستره قطر ۲/۵-۱/۵ نانومتر قابلیت آن را دارد تا به طور تجربی مطالعه شود و به عنوان کانال نانوترانزیستور به کار آید.

شاخص L در شکل نشان دهنده‌ی طول لوله برحسب نانومتر است. پس در این حالت نانولوله‌ای با شعاع کمتر و طول بیشتر مفیدتر خواهد بود اما باید به این نکته هم توجه کرد که در شعاعهای کم مدول یانگ به شدت به تغییر قطر حساس است و با تغییر کمی در قطر لوله، مدول یانگ آن تغییرات زیادی خواهد داشت.

برای نانولوله‌های تک دیواره زیگزاگ، تغییرات اساسی در قطرهای نزدیک به یک نانومتر رخ می‌دهد. طبق نمودار (۸) دیده می‌شود که برای نانولوله‌های زیگزاگ با $n < 12$ که قطرشان کمتر از یک نانومتر است، با افزایش شعاع در طول ثابت، مدول یانگ کاهش پیدا می‌کند. سپس تا $n = 16$ با افزایش شعاع در طول ثابت، مدول یانگ افزایش پیدا می‌کند. پس از $n = 16$ هم، باز روند کاهش مدول یانگ با افزایش شعاع اتفاق می‌افتد.



شکل (۸): تغییرات مدول یانگ نانولوله زیگزاگ بر حسب طول در شکل (۸) دیده می‌شود که برای شعاعهای کمتر از یک نانومتر، تغییرات مدول یانگ خیلی زیاد است تا جایی که حتی گستره آن بطورکامل با گستره‌ی تغییرات مدول یانگ در شعاعهای بالای یک نانومتر تفاوت می‌کند. در شکل (۹) که تغییرات مدول یانگ نانولوله زیگزاگ بر حسب قطر را نشان می‌دهد، با کاهش طول لوله زیگزاگ، مدول یانگ کاهش پیدا می‌کند.



شکل (۹): تغییرات مدول یانگ نانولوله زیگزاگ بر حسب قطر



نهایت تقدیر و سپاس را داشته باشیم. بررسی طیف ها و کار نظری در گروه فیزیک دانشگاه مازندران صورت پذیرفته است.

طیف های سینکروترونی پیش تر بوسیله ی دکتر بهاری با راهنمایی پروفسور پر مورگن در دانشگاه آرهوس کشور دانمارک گرفته شده است و جا دارد از پروفسور پر مورگن

۸- مراجع

- Li, C.; Chou, T.; " A structural mechanics approach for the analysis of carbon nanotubes", International Journal of Solids and Structures, vol. 40, p.p. 2487-2499, 2003. [۷]
- Bahari, A.; Morgen, P.; Padreson, K. ; Functional properties of Nanostructured Material (Vol.223 , 229-257); Springer (2006) , ISBN-13- 978-4020-4594-3 [۸]
- Pourfath, M., Ungersboeck, E.; Gehring, A.; Cheong, B.H.; Park W.J.; Kosina, H.; Selberherr, S., "Optimization of Schottky barrier carbon nanotube field effect transistors", Microelectronic Engineering, vol. 81, p.p. 428-433, 2005. [۹]
- Bahari, A., Morgen, P.; "Roads to ultrathin silicon oxides"; Journal of Vacuum Science and Technology A; vol.23, p.p.201-207, 2005. [۱۰]
- Salvetat, J.P.; D. Briggs, G. A.; Bonard, J.M.; Bacsá , R.R.; Kulik, A.J.; Stöckli, T.; Burnham , N.A.; Forró , L., " Elastic and Shear Moduli of Single-Walled Carbon Nanotube Ropes", Physical Review Letters, vol.. 82, p.p. 944-947., 1999. [۱۱]
- Bahari, A., Morgen, P., Pedersen, K. Li, Z.S ; "Growth of a stacked silicon nitride / silicon oxide dielectric on Si(100)"; Journal of Vacuum Science & Technology B; Vol. 24, p.p. 2119-2123; 2006. [۱۲]
- Wu, Y.; Zhang, X.; Leung, A.Y.T.; Zhong, W.; "An energy-equivalent model on studying the mechanical properties of single-walled carbon nanotubes"; Thin-Walled Structures, vol. 44, p.p. 667-676, 2006. [۱۳]
- Bahari, A., Morgen, P., Pedersen, K. Li, Z.S ; " Valence band studies of the formation of ultrathin pure silicon nitride films on Si(100)" , Surface Science, vol. 600, p.p.2966-2971, 2006. [۱۴]
- Krishnan, a.; Dujardin, E.; Ebbesen, T. W.; Yianilos, P. N.; Treacy, M. M. J., " Young's modulus of single-walled nanotubes", Physical Review B, vol.58, p.p. 14013-14019, 1998. [۱۵]
- Kalamkarov, A.L.; Georgiades, A.V.; Rokkam, S.K.; Veedu, V.P.; Ghasemi-Nejhad, M.N., "Analytical and numerical techniques to predict carbon nanotubes properties", International Journal of Solids and Structures, vol. 43, p.p. 6832-6854, 2006. [۱۶]