

روش سریع برای تحلیل و تشخیص گرافن نانوریبون FET توسط تابع گرین نامتعادل

محمد کرمی^۱، حاتم محمدی کامروا^۲ و حجت اله سروری

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا، Karami.mohammad.2010@Gmail.com

^۲ عضو هیات علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد فسا، Hmkamrava@Yahoo.com

^۳ موسسه آموزش عالی پاسارگاد شیراز، Hojatsarvari@Gmail.com

چکیده - در این مقاله به مطالعه و بررسی، بر اساس مدل اربیتال P_z ساده نمودار انرژی آرمچر و نانوریبون های گرافنی زیگزاگی با در نظر گرفتن اولین و سومین همسایه های نزدیک (FNN & TNN) پرداخته می شود. سپس از روش تابع گرین نامتعادل برای محاسبه ی هدایت در A- GNR استفاده کرده ایم پس از آن GNRFET تک ورودی در فضای واقعی را بررسی کرده ایم با این شرط که تحت هر V_{gs} انرژی تمام اتم های داخل کانال همچنان $q V_{gs}$ باقی بماند و در نتیجه به حل معادله پواسون دیگر نیازی نیست. محاسبه ی عددی ماتریس های خودانرژی را بر اساس دو روش انجام می شود که در پی آن یک نتیجه ی مشابه بدست می آید اما مدت زمان CPU متفاوتی صرف می شود، بنابراین یکی از مزایای روش ما به طور قابل ملاحظه ای صرف زمان کمتری در محاسبات است. تعداد اتم های موجود در عرض کانال نانوریبون طوری انتخاب می شود تا کانال بعنوان یک نیمه هادی عمل کند. اما در رابطه با مخازن (سورس و درین) تعداد اتم های موجود در عرضشان آنها را به نوارهای فلزی تبدیل می کند. نتایج بکار گرفتن TNN در مقایسه با نتایج FNN نشان می دهد که TNN دقیق تر و معتبر تر است، در پایان می توانیم نتیجه بگیریم که در A-GNRFET اجزاء کانال زنی جریان از مخزن به کانال به نوبه ی خود معنادار و قابل توجه اند.

کلید واژه- گرافن نانوریبون، FET، NEGF.

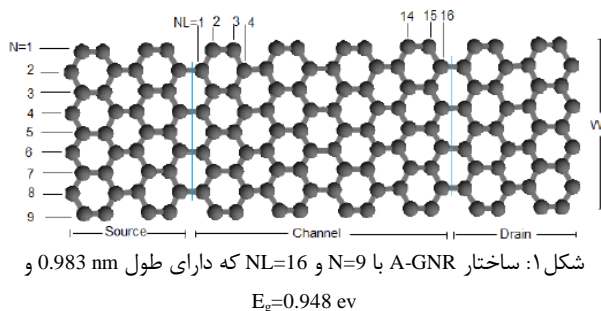
نانوتیوب های کربنی (CNTs) دو مشکل اساسی دارند . کمبود کنترل کایرالیته در جریان تولید منجر به درهم آمیختن نانوتیوب های نیمه هادی و متالیک می شود. علاوه بر این، در حال حاضر هیچ روشی وجود ندارد که بتوان به واسطه ی آن صدها میلیون نانوتیوب را در مکان های مورد نیاز برای ایجاد مدارهای مجتمع به درستی جای داد [۴].

اخیراً گرافن به دلیل کاربرد آسان تر توجه فراوانی را در زمینه های نظری و تجربی به خود جلب کرده است [۵]، [۶]. خصوصیات جالب مغناطیسی و الکتریکی گرافن، این ماده را به کاندید نوید بخشی برای کاربردهای الکترونیکی آینده تبدیل

۱ مقدمه

نانوساختارهای کربنی، مثل فولرین، گرافن و نانوتیوب های کربنی (CNTs) به دلیل تنوع خصوصیات فیزیکی چشمگیرشان از جالب ترین ساختارها هستند . الکترونیک کربن بنیاد یکی از امید بخش ترین گزینه هایی است که می تواند در تکنولوژی الکترونیک آینده جایگزین سیلیکون شود . مشاهده شده است که نانوتیوب های کربنی به واسطه ی خصوصیات الکتریکی شان، هدایت شبه بالستیکی از خود نشان می دهند و به عنوان ترانزیستور، ساطع کننده ی نور و سنسور عمل می کنند [۲]، [۳].

بر اساس نمودار باند انرژی که مبتنی بر اربیتال P_z است، یک A-GNRs با $N=3n$ و $N=3n+1$ در عرضش به عنوان نیمه - هادی عمل می کند، اما اگر تعداد اتم ها در عرض آن $N=3n+2$ باشد به صورت فلز رفتار می کنند [۱۰]. این گونه عملکردها و رفتارها نشان می دهد که A-GNR ماده ی مناسبی برای کانال و مخزن ترانزیستور اثر میدانی (FET)، (Field Effect Transistor)، است. در این مقاله، از A-GNR با $N=9$ استفاده می کنیم که خود یک ابزار نیمه هادی است و عرضی معادل $w=0.983\text{nm}$ دارد، و E_g آن 0.948 eV است، E_g با افزایش عرض، کاهش پیدا می کند. شکل ۱، یک A-GNR را با $N=9$ و $NL=16$ اتم نشان می دهد که در مقاله ی حاضر از این A-GNR به عنوان کانال ترانزیستور استفاده می کنیم. اشکال 2(a) و 2(b) نمودارهای باند انرژی را در مقابل $K(E-K)$ برای A-GNR با $N=9$ نشان می دهند که نزدیکترین همسایه ی اول و سوم به مرکز اتم، به ترتیب (FNN و TNN)، را نیز در برمی گیرند. این نتایج تقریباً شبیه آن چیزی است که در مرجع [۱۱] ارائه شده است. از دیدگاه تجربی، مشخصه نوید بخش ریون این است که مواد گرافری را می توان به آسانی با روش های لیتوگرافی نانوالکترونیک استاندارد الگوبرداری کرد. بر خلاف نانوتیوب های کربنی و دیگر نانوساختارهای اندک بعدی، امروزه یک GNRs که



کرده است. گرافن در اصل ورقه ی صاف و همواری از اتم های کربن است و سنگ بنای نانوتیوب های کربنی (CNTs) محسوب می شود. ساختار صاف و هموار گرافن باعث می شود که گرافن مفیدتر از CNTs باشد، چراکه گرافن به وسیله ی تکنیک های لیتوگرافی سنتی به آسانی آماده می شود. ورقه های گرافن دو بعدی (به عبارت دیگر، تک لایه ای از گرافیت) درصد بالایی از جابجایی حامل را نشان می دهند. چنین ورقه های دوبعدی تک - لایه ای یا اندک لایه ای کربن که رفتار ترمودینامیکی پایداری دارند، به ورقه های گرافری مشهورند [۷]. گرافن تک لایه ای، اتم - های کربن به هم فشرده ی sp^2 را در برمی گیرد که در یک ساختار کریستالی لانه زنبوری فشرده چیده شده اند. در واقع گرافن تک لایه ای، شبه فلزی است که همپوشی بسیار کمی بین باند ظرفیت و باند هدایت آن وجود دارد. در این سیستم دوبعدی، جابجایی حامل در دمای اتاق می تواند تا $27000\text{ cm}^2/\text{Vs}$ افزایش یابد و گرافن را جذاب ترین ماده برای ابزارهای نانوالکتریکی آینده کند [۸].

بر خلاف CNTs (نانوتیوب های کربنی)، طبیعت متالیکی و به هم فشرده ی گرافن دوبعدی باعث می شود که تنها از ورقه های گرافن دوبعدی به عنوان ابزارهای نیمه هادی استفاده شود. در سال های اخیر نانوریون های باریک به تقلید از ورقه های گرافری ساخته شده اند [۹]. نانوریون های گرافری (GNRs) که عرض ورقه ی آنها اندازه ی محدود و طول ورقه ی آنها بی نهایت طویل است، بسته به عرضشان خصوصیات الکترونیکی بی نظیری دارند. GNRs که با گرافن دوبعدی مقایسه می شود، خصوصیات الکترونیکی مشخصی را نشان می دهد، GNRs را می توان به عنوان نانوریون های گرافری آرمچر (A-GNRs) یا به عنوان نانوریون های گرافری زیگزاگی (Z-GNRs) طبقه بندی کرد. A-GNRs بسته به عرضشان یا نیمه هادی و یا متالیک هستند، اما Z-GNRs برای تمام عرض ها متالیک هستند [۱۰].

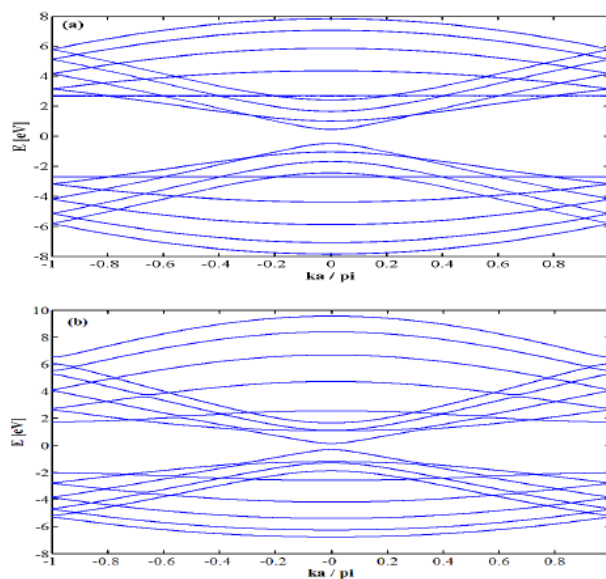
شرویدینگر با روش NEGF برای تعیین توزیع بار در کانال حل می‌شود و سپس فرمول لاندور- بوتیکر برای محاسبه ی جریان مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر این، ما از دو سلول واحد انتقال متفاوت به منظور تشکیل دادن هامیلتونیان سیستم برای محاسبه ی ماتریس‌های خودانرژی‌زا بهره گرفته‌ایم. در این بررسی نتایج مشابهی را مشاهده کردیم اما مدت زمان CPU برای سلول- های واحد متفاوت انتخاب شده، فرق می‌کند. روش پیشنهادی برای کاهش زمان محاسبه ی موارد خیلی بزرگ هامیلتونیان، بسیار مفید است.

۲- فرمول

شکل ۳ ساختار GNRFET با یک ورودی نشان داده شده است. مطابق مرجع [15] تعداد اتم‌های موجود در عرض کانال GNR، $n=9$ باشد در نظر می‌گیریم. همچنین طول کانال را $NL=16$ اتم در نظر گرفتیم و سورس و درین باعث می‌شود که همان عرض کانال را داشته باشیم اما طول ها نیمه نامحدود می‌باشد. مطابق مرجع [16] یک باندینگ C-H را برای هر کدام از اتم‌های کربن موجود در لبه GNR در نظر گرفته ایم. در واقع وضعیت باند C-H (σ state) بر روی ساختار الکترونیکی نزدیک به سطح فرمی تأثیری ندارد، زیرا هیچ تعاملی بین باند σ و باند π توسط اربیتال P_z وجود ندارد ولی روش ساده اربیتال P_z هنوز هم یک روش معتبر است. بیشتر روش‌های پیچیده مثل نظریه گسترده هاکل و محاسبات اصلی اولیه [17] نشان داده‌اند که در نزدیک سطح فرمی ساختار باند GNR با پایان اتم‌های هیدروژن اساساً شبیه نتیجه ی P_z TB محاسبه مدل اربیتال است. بر اساس ساختار داده شده و هندسی ابزار هامیلتونیان کانال که شامل تقریب FNN می‌شود به عبارت زیر است، مرجع [15]:

$$H = \sum_{n=1}^p q V_{gs} |n\rangle\langle n| + \sum_{n=1, n \neq m}^p t |n\rangle\langle m| \quad (1)$$

مطابق مرجع [18] q بار الکترون، V_{gs} ولتاژ ورودی و t بعنوان پارامتر TB مساوی با -2.7 eV است. قسمت اول در سمت راست



شکل ۲: ساختار باند الکترونیک ارمچر GNR با $N=9$ (a) نزدیکترین همسایه اول. (b) نزدیکترین همسایه سوم، E_g در GNR (b) کمتر از (a)

نانوساختارهای ریزسنجی پیچیده ای دارد قابل تقلید و الگوبرداری است [۱۲] و این باور نیز وجود دارد که ترکیبی از روش‌های استاندارد لیتوگرافی و شیمیایی به الگوبرداری کردن از گرافری با دقت اتمی روی سطح مولکول کمک می‌کند [۱۳]. کانال هندسه‌ای GNRFET را می‌توان با لیتوگرافی تعریف کرد که به طور بالقوه ای بیشتر از کانال هندسه ای CNTFET بر هندسه کنترل دارد [۱۴]. استفاده از A-GNR به عنوان کارایی از ترانزیستور هنوز مورد مطالعه است [۱۵]. تأثیر عیب و نقص‌های لبه و نقص‌های پنتاگون- هپتاگون بر روی رفتار ترانزیستور نیز مورد بررسی قرار گرفته است. نشان داده شده است که این عیب و نقص‌ها واکنش ترانزیستور را تا حد زیادی خراب نمی‌کنند [۱۵]. تابع گرین نامتعادل (NEGF) بدون حل معادله ی پواسون و با در برداشتن تنها FNN در روش اتصال محکم (TB)، برای تحقیق و بررسی در انتقال حامل و خصوصیات I_{ds} - V_{ds} مربوط به A-GNRFET مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۵].

در این مقاله، انتقال حامل و خصوصیات I_{ds} - V_{ds} مربوط به A-GNRFET را با دربرگرفتن تقریب TNN در محاسبات TB مطالعه کرده‌ایم. در واقع، بدون حل معادله ی پواسون، معادله ی

رابطه (1) اثر ولتاژ ورودی را بر اتم های p درون کانال نشان می - دهد، که $p=N*NL/2$ در شکل ۱ نیز نشان داده شده است . قسمت دوم در سمت راست رابطه (1) تعامل بین اتم n و اتم - های FNN اتم n را نشان می دهد که m شاخص اتم های درون کانال را به جز اتم n مشخص می کند. بر اساس هامیلتونیان سیستم می توانیم تابع گرین مربوطه را به صورت زیر بنویسیم، مرجع [19]:

$$G = [EI + i0^+ - H - \sum s - \sum D]^{-1} \quad (2)$$

E نشان دهنده انرژی، $\sum s/D$ ماتریس خودانرژی زای سورس و درین است که شامل تماس ماتریس خودانرژی زای سورس و درین با کانال نیز می شود و I ماتریس واحد است. برای تعیین و محاسبه ی ماتریس های خودانرژی زای سورس و درین دو حالت متفاوت زیر را در نظر می گیریم:

حالت ۱: سلول واحد در مناطق سورس و درین همانطور که در شکل 4(a) نشان داده شده، انتخاب شده است، که این سلول واحد در سراسر مناطق سورس و درین تکرار می شود. بنابراین منطقی است که ماتریس α_1 را مطابق با سلول واحد در سورس و درین در نظر بگیریم و Gss (Gsd) بعنوان تابع گرین سطحی مربوط به تماس سورس و درین در نظر گرفته می شود.

$$\sum s = \beta_1^+ Gss \beta_1 \quad (3 - a)$$

$$\sum D = \beta_1 Gsd \beta_1^+ \quad (3 - b)$$

$$Gss = [EI + i0^+ - \alpha_1 - \beta_1^+ Gss \beta_1]^{-1} \quad (4 - a)$$

$$Gsd = [EI + i0^+ - \alpha_1 - \beta_1 Gsd \beta_1^+]^{-1} \quad (4 - b)$$

ماتریس β_1 تعامل بین دو سلول همسایه را دربرمی گیرد.

حالت ۲: در حالت دوم سلول واحد همانطور که در شکل

4(b) نشان داده شده، انتخاب شده است . در این حالت α_i شامل تمام اتم های موجود در ستون می شود. ماتریس α_1 مطابق با α_5 است و Gss_1 نیز مطابق با Gss_5 است و به همین شکل Gsd_1 نیز Gsd_5 مطابق است. بنابراین می توانیم به این صورت بنویسیم:

$$\sum s = \beta_4^+ Gss_1 \beta_4 \quad (5 - a)$$

$$\sum D = \beta_4 Gsd_1 \beta_4^+ \quad (5 - b)$$

$$Gss_1 = [EI + i0^+ - \alpha_1 - \beta_1^+ Gss_2 \beta_1]^{-1} \quad (6 - a)$$

$$Gsd_1 = [EI + i0^+ - \alpha_1 - \beta_1 Gsd_2 \beta_1^+]^{-1} \quad (6 - b)$$

$$Gss_2 = [EI + i0^+ - \alpha_2 - \beta_2^+ Gss_3 \beta_2]^{-1} \quad (7 - a)$$

$$Gsd_2 = [EI + i0^+ - \alpha_2 - \beta_2 Gsd_3 \beta_2^+]^{-1} \quad (7 - b)$$

$$Gss_3 = [EI + i0^+ - \alpha_3 - \beta_3^+ Gss_4 \beta_3]^{-1} \quad (8 - a)$$

$$Gsd_3 = [EI + i0^+ - \alpha_3 - \beta_3 Gsd_4 \beta_3^+]^{-1} \quad (8 - b)$$

$$Gss_4 = [EI + i0^+ - \alpha_4 - \beta_4^+ Gss_1 \beta_4]^{-1} \quad (9 - a)$$

$$Gsd_4 = [EI + i0^+ - \alpha_4 - \beta_4 Gsd_1 \beta_4^+]^{-1} \quad (9 - b)$$

از Gss_1 (Gsd₁) تا Gss_4 (Gsd₄) تابع های گرین سطحی مربوط به ستون های اول تا چهارم درون سورس و درین هستند و ماتریس β_i تعامل بین ستون های همسایه را نشان می دهد. تا اینجا می توان ماتریس های $\sum s$ و $\sum D$ را با هر یک از دو مورد فوق محاسبه کرد. در این ماتریس های وسیع Γ_s & Γ_D را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\Gamma_s = i(\sum s - \sum s^+) \quad (10 - a)$$

$$\Gamma_D = i(\sum D - \sum D^+) \quad (10 - b)$$

و در نتیجه ضریب انتقال در برابر انرژی را می توان به این صورت محاسبه کرد:

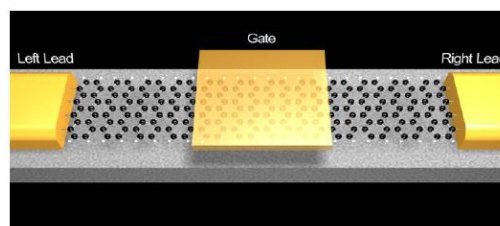
$$T(E) = \text{Trace}[\Gamma_s G \Gamma_D G^+] \quad (11)$$

اکنون، خصوصیات ولتاژ جریان با استفاده از $T(E)$ بدست می - آید و فرمول لاندور-بوتیکر به صورت زیر است:

$$I = 2q/\hbar \int T(E) [f(E - \mu_s) - f(E - \mu_d)] dE \quad (12)$$

\hbar ضریب پلانک کاهش یافته، f تابع فرمی - دیراک است و $\mu_s(\mu_d)$ پتانسیل الکتروشیمیایی سورس و درین است همانطور که $\mu_s = E_f$ و $\mu_d = E_f - q V_{ds}$ است که در اینجا E_f نشان - دهنده ی انرژی فرمی GNR و به عنوان سطح مرجع مساوی با صفر است.

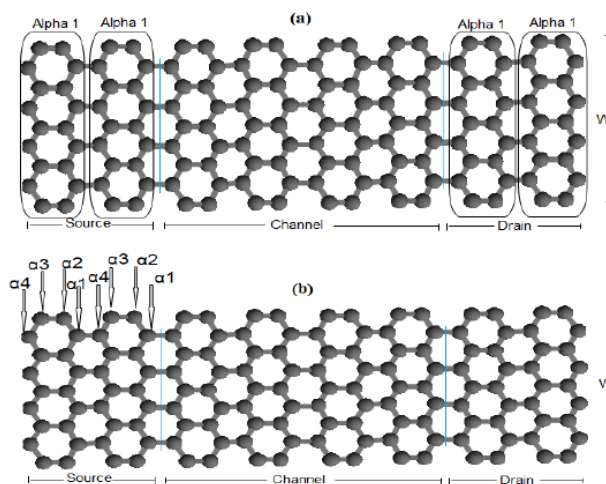
این نیز مشاهده می‌شود که $T(E)$ در باند هدایت و باند ظرفیت GNR شکل مشابهی دارد. علاوه بر این، همانطور که شکل ۵ نشان می‌دهد، ضریب انتقال $T(E)$ در برابر انرژی FNN به طور تدریجی اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری تدریجی $T(E)$ نشان می‌دهد که حامل‌ها با شیوه‌های جداگانه‌ی متفاوتی انرژی را انتقال می‌دهند. اما در تقریب TNN، $T(E)$ به طور واضح تعیین و اندازه‌گیری نشده‌اند.



شکل ۳: ساختار GNR-FET با یک گیت

۳- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش تابع نامتعادل گرین که از معادلات و رویکردهای توصیف شده در مقاله‌ی حاضر بدست آمد A-GNR-FET همراه با مشخصاتی که در شکل ۱ نشان داده شده، تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی شده است. دو شکل از سلول واحد که در شکل شماره‌ی ۴ نشان داده شده و هر دو نوع از تقریب -های FNN و TNN به کار گرفته شده‌اند. شکل ۵ ضریب‌های انتقال درون تمام زیر باندها را در برابر انرژی دستگاه برای دو سلول واحد پیشنهادی نشان می‌دهد (همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است). شکل ۵(a) نشان می‌دهد که نوع سلول



شکل ۴: دو نوع متفاوت سلول واحد برای محاسبه ماتریس خود انرژی از (a) حالت ۱ با سلول واحد بزرگ. (b) با سلول واحد ستون

دلیل این امر ممکن است همپوشی باندها و تعامل بین اتمی بیشتری بین سلول‌های کانال باشد. باید توجه کرد که $T(E)$ بزرگتر از ۱ به دلیل دربرگرفتن انتقال بعلت تمام زیر باندها است.

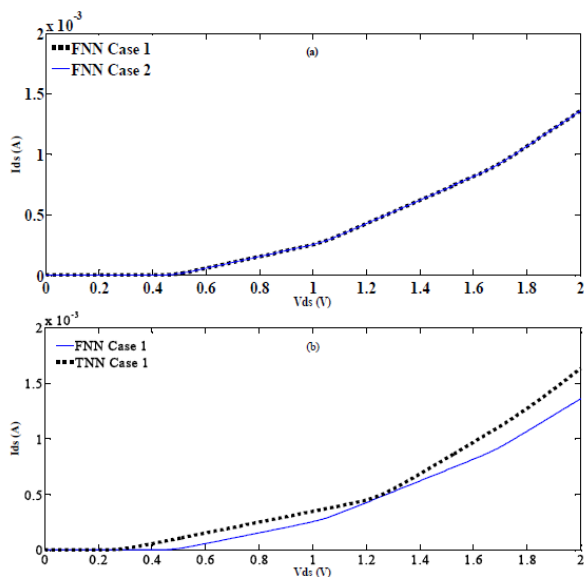
شکل ۶ خصوصیات $I_{ds}-V_{ds}$ مربوط به A-GNR-FET را در $V_{gs}=0$ V نشان می‌دهد. شکل 6(a) نشان می‌دهد که $I_{ds}-V_{ds}$ برای انواع متفاوت سلول‌های واحد مشابه است. (همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است).

باید عنوان کرد که نتایج دقیقاً مشابه نتایجی است که در مرجع [15] آمده است و این امر خود صحت روش این مقاله را نشان می‌دهد، اما در شکل 6(b)، $I_{ds}-V_{ds}$ در نوع تقریب‌های (FNN و TNN) مشابه نیست و می‌توان گفت که $I_{ds}-V_{ds}$ تقریب TNN معتبرتر و نزدیک‌تر به نتایج اولیه است.

در جدول ۱، مدت زمان CPU صرف شده در حالت‌های متفاوت سلول‌های واحد و تقریب‌ها که نتایج مشابهی نیز از آنها بدست می‌آید را نشان داده‌ایم. در واقع، می‌توانیم مشاهده کنیم که با سلول واحد پیشنهادی این کار مدت زمان CPU به طور چشمگیری کاهش می‌یابد و این امر برای GNR دارای عرض زیاد و اندازه‌ی زیاد هامیلتونیان بسیار مهم است.

باید توجه کرد که ارزش پارامترهای S_0 ، S_1 ، S_2 و t_1 ، t_2 با ارزش‌های موجود در قطرهای بزرگ CNT مساوی باشد. این امر با فرض اینکه در قطر بزرگ CNT تأثیر نیروی تعاملی

واحد هیچ تأثیری بر ضریب انتقال ندارد اما همانطور که در شکل ۵(b) نشان داده شده است نوع تقریب (FNN و TNN) ضریب انتقال را به طور چشمگیری تغییر می‌دهد. از شکل ۵



شکل ۶: خصوصیات $I_{ds}-V_{ds}$ مربوط به A-GNRFET (a) حالت ۱ و ۲ با تقریب FNN. (b) حالت ۱ با تقریب FNN و TNN

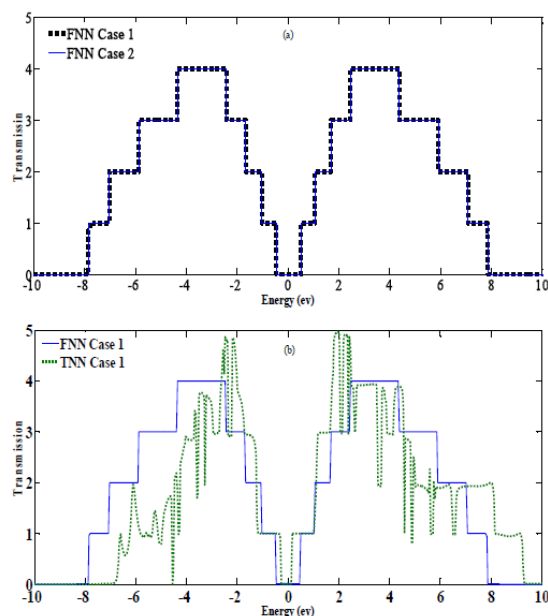
بین اتم‌های درون تیوب کم و ناچیز است و می‌توان آنها را نادیده گرفت، توجیه می‌شود.

جدول ۱: مدت زمان CPU برای محاسبه A-GNRFET با $N=9$ با یک لپ‌تاپ دارای CPU=2.20 GHz و RAM=2.0 GB

تقریب TB	حالت ۱	حالت ۲
FNN	127 sec	111400 sec
TNN	522 sec	-----

مراجع

- [1] Chau R, Datta S, Doczy M, Doyle B, Jin B, Kavalieros J. "Benchmarking nanotechnology for high-performance and low-power logic transistor applications". IEEE Trans Nanotechnol; 4(2), 2005.
- [2] J.A.Misewich, R.Martel, Ph.Avoiris, J.C.Tsang, S.Heinze, and J.Tersoff, Science 300, 783, 2003.
- [3] J. Kong, N. Franklin, C. Chou, S. Pan, K. Cho, and H. Dai, Science 287, 622, 2000.
- [4] M.C. Lemme, T.J. Echtermeyer, M. Baus, B.N. Szafrank, J. Bolten, M. Schmidt, T. Wahlbrink and H. Kurz " Mobility in Graphene Double Gate Field Effect Transistors ", Solid State Electronics, Vol. 52. Issue 4, pp 514-518, 2008.
- [5] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films," Science, vol. 306, pp. 666–669, Oct. 2004.
- [6] Y. Zhang, Y. W. Tan, H. L. Stormer, and P. Kim, "Experimental observation of the quantum Hall effect and Berry's phase in graphene," Nature, vol. 438, pp. 201–204, Nov. 2005.
- [7] Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, Jiang D, Zhang Y, Dubonos SV. "Electric field effect in atomically thin carbon films" Science; 306:666-9, 2004.
- [8] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films," Science, vol. 306, pp. 666–669, Oct. 2004.
- [9] Y. Zhang, J. P. Small, W. V. Panyus, and P. Kim, Appl. Phys. Lett. 86, 073104, 2005.
- [10] Zheng H X, Wang Z F, Shi Q W and Chen J, Phys. Rev. B 75 165414, 2007.
- [11] Peng Xin-Xiang, Liao Wen-Ru and Zhou Guang-Hui, " Optoelectronic



شکل ۵: ضریب انتقال انرژی A-GNRFET (a) تقریب FNN برای حالت ۱ و ۲. (b) تقریب FNN و TNN برای حالت ۱

Properties for Armchair-Edge Graphene Nanoribbons ",
 DOI:
 10.1088/0256-307X/25/9/092.
 [12] C. Berger, Z. Song, X. Li, X. Wu, N. Brown, C. Naud, D. Mayou,
 T. Li,
 J. Hass, A. N. Marchenkov, E. H. Conrad, P.N. First and W. A. de Heer,
 Science 312, 119, 2006.
 [13] Zhiping Xu, Quan-Shui Zheng and Guanhua Chen, "Elementary
 building blocks of graphene-nanoribbon-based electronic devices",
 Applied Physics Letters 90, 223115, 2007, DOI: 10.1063/1.2745268.
 [14] Yijian Ouyang Youngki Yoon Jing Guo, "Scaling Behaviors of
 Graphene Nanoribbon FETs: A Three-Dimensional Quantum
 Simulation Study" IEEE Transactions on Electron Devices, 2007.
 [15] Thornill, S. Wu, N. Wang, Z.F. Shi, Q.W. Jie Chen, "Graphene
 nanoribbon field-effect transistors", circuits and systems, ISCAS 2008,
 IEEE International Symposium on, doi:10.1109/ISCAS.2008.4541381.
 [16] Gengchiao Liang, Neophytos Neophytou, Dmitri E. Nikonov, and
 Mark
 S. Lundstrom, "Performance Projections for Ballistic Graphene
 Nanoribbon Field-Effect Transistors", IEEE Transactions on Electron
 Devices, Vol. 54, No. 4, April 2007.
 [17] K. Kobayashi, "Electronic structure of a stepped graphite surface,"
 Phys.
 Rev. B, Condens. Matter, vol. 48, no. 3, pp. 1757–1760, Jul. 1993.
 [18] S. Reich, J. Maultzsch, P. Ordejon and C. Thomsen, "Tight-Binding
 description of graphene", Phys. Rev. B 66, 035412, 2002.
 [19] S. Datta, "Quantum transport: Atom to transistor, 2nd edn.
 Cambridge
 University press, Cambridge, 2005.