

یافته‌های نوین در مشخصات و اثرات کانال کوچک ترانزیستورهای اثرمیدانی نانوتیوب کربن دوگیتی

زهرا عارفی‌نیا* و علی اصغر اروجی**
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۷/۷/۱۴ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۸/۵)

چکیده -

(DG-CNTFET)

DG-CNTFET

()

DG-CNTFET

واژگان کلیدی :

Novel Attributes in the characteristics and short channel effects of double gate carbon nanotube field-effect transistors

Z. Arefinia and A. A. Orouji

Electrical and Computer Engineering Faculty, Semnan University

Abstract: *In this paper, the short channel effects of different gate configurations and geometry parameters of carbon nanotube (CNT) field-effect transistors with doped source and drain extensions are investigated. The simulation is based on the self-consistent solution of the three-dimensional Poisson equation and Schrödinger equation with open boundary conditions,*

** - استادیار

* - کارشناس ارشد

within the nonequilibrium Green's function formalism. Simulation results show that double gate structure offers quasi-ideal subthreshold slope and drain induced barrier lowering even for the rather thick oxide (5nm). Then, the investigation of electrical characteristics of double gate carbon nanotube field-effect transistor (DG-CNTFET) shows that as the CNT normalized density or CNT diameter increases, the current in the on-state increases as well. Also, the off-state current in DG-CNTFET decreases with increasing drain voltage. Furthermore, in the negative gate voltages, for a large drain voltage, increasing in drain current due to band to band tunneling requires a larger negative gate voltage, and for low drain voltage, resonant states appear.

Keywords: Short channel effects, Nonequilibrium Green's function, Field-effect transistor, Double gate, Carbon nanotube.

۱- مقدمه

MATLAB به صورت سه بعدی شبیه سازی شده است. از آنجا که نتایج نشان می دهند که ساختار دوگیتی CNTFET که در شکل (۱) رسم شده است، دارای نوسانات زیرآستانه شبه ایدئال و DIBL قابل قبولی است، تاثیر پارامترهای مختلف بر اثرات کانال کوچک و مشخصه های الکتریکی آن مورد بررسی قرار گرفته است. شبیه سازی بر پایه حل معادله شرودینگر با شرایط مرزی باز در چارچوب تابع گرین ناترازمند (NEGF) بنا شده و برای حل معادله پواسون سه بعدی از روش گشتاورها [۱۰] استفاده شده است.

۲- روش شبیه سازی

۲-۱- معادله انتقال با روش NEGF

تابع گرین به صورت زیر توصیف می شود [۱۱]:

$$G(E) = [EI - H - \Sigma_S - \Sigma_D]^{-1} \quad (1)$$

که در آن E انرژی، I ماتریس واحد، H ماتریس هامیلتونین نانوتیوب و Σ_S و Σ_D به ترتیب ماتریسهای خودانرژی سورس و درین اند. اگر تعداد کل اتمهای کربن نانوتیوب N باشد، در آن صورت اندازه ماتریس هامیلتونین $N \times N$ خواهد شد. همانطور که معادله (۱) نشان می دهد با در نظر نگرفتن جمله Σ_{scat} که مربوط به پراکندگی الکترونهاست، انتقال کاملاً بالیستیک برای شبیه سازی رفتار ترانزیستورها در نظر گرفته شده است.

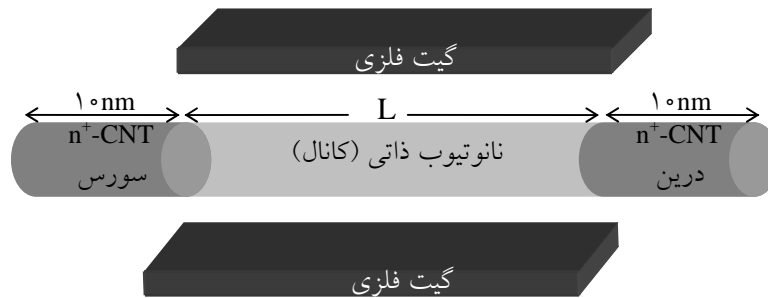
تمام آرایه های ماتریس خودانرژی سورس، Σ_S ، به جز آرایه (۱،۱) که به صورت زیر تعریف می شود، برابر صفر است.

$$\Sigma_S(1,1) = \frac{(E - U_1)^2 + t^2 + b_{2m}^2}{2(E - U_1)} \pm \frac{\sqrt{[(E - U_1)^2 + t^2 + b_{2m}^2]^2 - 4(E - U_1)^2 t^2}}{2(E - U_1)} \quad (2)$$

پس از کشف نانوتیوبها توسط آیجیما [۱] پیشرفتهای چشمگیری از نظر مدلسازی فیزیکی و تکنولوژیکی در زمینه ترانزیستور اثرمیدانی نانوتیوب کربن (CNTFET) صورت گرفته است. به عنوان مثال، نتایج تجربی CNTFET سد شاتکی به دست آمده [۲] و نشان داده شده است که جریان به طور عمده، توسط میدان القایی ساختار نواری نانوتیوب در دو انتهای نانوتیوب حاصل می شود. البته چنین مکانیزمی کارایی قطعه را به شدت محدود می کند. رفتار شبه دوقطبی [۳]، کنترل ضعیف کانال و تنزل خصوصیات الکتریکی مانند افزایش جریان نشتی و نوسانات زیرآستانه در چنین قطعاتی، مخصوصاً ترانزیستورهای شامل نانوتیوب با قطر بزرگتر، دیده می شود [۴ و ۵]. همچنین به طور تجربی اثبات شده است که برای کاهش سد القایی درین (DIBL) به یک مقدار قابل قبول، باید کاهش ابعاد ترانزیستور از قوانین خاصی (به عنوان مثال، نسبت طول کانال به ضخامت اکسید باید بزرگتر از ۱۸ باشد) پیروی کند [۴].

تاکنون راه حل های مختلفی برای فائق آمدن بر این نواقص، پیشنهاد شده است که از میان آنها می توان به انتخاب سطوح تماس از جنس فلز مثل پالادیم یا کلسیم برای ایجاد سطوح تماس اهمی [۶ و ۷] و روش تولید بارهای القایی اشاره کرد [۸] و [۹]. همچنین با تعریف گیت های چندگانه می توان کارایی ترانزیستورها را بیشتر کرد، زیرا توسط آن می توان پتانسیل مستقل در نواحی سورس، درین و کانال ایجاد کرده و سد شاتکی را در سطح تماس به وجود آورد.

در این مقاله تاثیر ساختارهای متفاوت گیت بر اثرات کانال کوچک CNTFET با سورس و درین آلییده، توسط نرم افزار



شکل ۱- ساختار سه بعدی DG-CNTFET شبیه سازی شده

۲-۲- معادله پواسون

برای شبیه سازی قطعه با استفاده از روش المان محدود، گسسته سازی روی فضا صورت می گیرد و معادلات انتقال برای تمام المانهای حجمی فضا به صورت جداگانه محاسبه می شود. برای به دست آوردن عناصر قطر ماتریس هامیلتونین، H ، در معادله (۱)، که پتانسیل الکتروستاتیکی در جایگاه هر اتم کربن است، باید از معادله پواسون استفاده کرد. در شبیه سازیهای سه بعدی، معادله پواسون به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\nabla \left[\varepsilon(\vec{r}) \nabla U(\vec{r}) \right] = p(\vec{r}) - n(\vec{r}) + N_D^+(\vec{r}) - N_A^-(\vec{r}) + \rho_{fix} \quad (5)$$

که $U(\vec{r})$ پتانسیل الکتروستاتیکی، $\varepsilon(\vec{r})$ ثابت دی الکتریک، $N_D^+(\vec{r})$ و $N_A^-(\vec{r})$ به ترتیب چگالی یونهای دهنده و گیرنده و چگالی بارهای ثابت است. چگالی بارهای ثابت، صفر در نظر گرفته شده است و چگالی الکترونها و حفره ها (به ترتیب n و p) با حل معادله شرودینگر با شرایط مرزی باز از طریق فرمولبندی تابع گرین ناترازمند (NEGF) محاسبه می شوند [۱۵]. همچنین برای حل معادله شرودینگر، هامیلتونین تنگ بست در پایه اتمی فضای حقیقی (اوربیتالهای p_z) به کار برده می شود [۱۶]. مزیت استفاده از پایه های فضای حقیقی در مقایسه با پایه های فضای مدی به علت در نظر گرفتن جریان ناشی از پدیده تونل زنی میان نواری و درون نواری است، دلیل این امر این است که تمام نوارهای نانوتیوب به طور همزمان در روش پایه های فضای حقیقی در نظر گرفته می شوند.

در این مقاله از نانوتیوبهای زیگزاگی استفاده شده است، اما روش پیشنهاد شده در این مقاله را می توان برای نانوتیوب با هر

که در آن انرژی، U_1 آرایه $(1,1)$ ماتریس پتانسیل، $t \approx 3eV$ بیانگر پتانسیل بر همکنش دو جایگاه مجاور در شبکه در مدل تنگ بست و b_{2m} برابر با $b_{2m} = 2t \cos(\pi m/n)$ که n مربوط به کایرالیته نانوتیوب و m عدد کوانتومی زاویه ای است که مقادیر صحیح می گیرد.

به طریق مشابه تنها آرایه غیر صفر ماتریس خود انرژی درین آرایه (N,N) است، که همانند معادله (۲) است با این تفاوت که به جای U_1 ، U_N یعنی آرایه (N,N) ماتریس پتانسیل قرار می گیرد.

جریان به صورت زیر محاسبه می شود:

$$I = \frac{2q}{h} \int_{-\infty}^{+\infty} dE T(E) [f(E - E_{FS}) - f(E - E_{FD})] \quad (3)$$

که q بار الکترون، h ثابت پلانک و $T(E)$ ضریب انتقال است که به صورت زیر محاسبه می شود [۱۲]:

$$T = -\text{Tr} \left[\left(\Sigma_S - \Sigma_S^\dagger \right) G \left(\Sigma_D - \Sigma_D^\dagger \right) G^\dagger \right] \quad (4)$$

که در آن Tr اپراتور تریس است. البته با این مدل تنها می توان انتقال یک بعدی بین سورس و درین را شبیه سازی کرد، یعنی جریان نشی گیت در این مدل در نظر گرفته نمی شود زیرا می توان نشان داد که برای ترانزیستورهای با طول کانال چند نانومتر جریان گیت در مقایسه با جریان درین قابل چشم پوشی است.

از دیدگاه عددی تابع گرین با تکنیک بازگشتی محاسبه می شود [۱۳ و ۱۴]. باید به این نکته در اینجا اشاره کرد که در اغلب شبیه سازیها، ماتریس خود انرژی را برای سطح تماسهای نیمه منتهای، به عنوان شرط مرزی، می نویسند. در نتیجه می توان در نظر گرفت که نانوتیوب در دو انتهایش به نانوتیوبهای بلند نامتناهی متصل شده است.

نوع کایرالیته تعمیم بخشید، زیرا تغییرات مورد نیاز تنها شامل تغییر در ماتریس هامیلتونین خواهد بود، به این ترتیب که ابتدا طول و کایرالیته نانوتیوب مشخص می‌شود آنگاه مختصات سه‌بعدی هر اتم کربن محاسبه خواهد شد [۱۶]. سپس محدوده سه‌بعدی شبه‌سازی مشخص شده و نقاط شبکه‌ای مطابق با هر اتم کربن تعریف می‌شود. همچنین با استفاده از تقریب بار نقطه‌ای می‌توان تمام بارهای آزاد اطراف هر اتم کربن را به طور یکنواخت در سلول واحد شامل هر اتم توزیع کرد. با فرض اینکه پتانسیل شیمیایی سورس و درین در حالت تعادل برابر با تراز فرمی نانوتیوب باشد چگالی الکترونها برابر است با:

$$n(\vec{r}) = 2 \int_{E_i}^{+\infty} dE \left[|\psi_S(E, \vec{r})|^2 f(E - E_{FS}) + |\psi_D(E, \vec{r})|^2 f(E - E_{FD}) \right] \quad (6)$$

همچنین چگالی حفره‌ها برابر خواهد بود با:

$$p(\vec{r}) = 2 \int_{-\infty}^{E_i} dE \left[|\psi_S(E, \vec{r})|^2 (1 - f(E - E_{FS})) + |\psi_D(E, \vec{r})|^2 (1 - f(E - E_{FD})) \right] \quad (7)$$

که \vec{r} مختصات هر اتم کربن، f تابع توزیع فرمی-دیراک، $|\psi_S|^2$ احتمال پر شدن حالت‌های اتمی اتم کربن توسط حامل‌های سورس (درین)، E_{FS} و E_{FD} تراز فرمی سورس (درین) و E_i انرژی میان‌نوری نانوتیوب^۱ یا به عبارتی دیگر تراز خنثایی بار [۱۷ و ۱۸] هستند.

با محاسبه این U جدید از معادله پواسون، باید دوباره هامیلتونین، H ، و سپس معادله انتقال NEGF، معادله (۱) را محاسبه کرد. یعنی یک حلقه خود سازگار بین معادله پواسون و انتقال کوانتومی به وجود می‌آید و این حلقه تا زمانی که همگرایی حاصل شود یعنی ماکزیمم تغییر در پتانسیل از مقدار خطای تعیین شده کمتر شود، $U^{tol} \leq (|U^{قبلی} - U^{جدید}|)_{max}$ ، ادامه می‌یابد. که مقدار تیرانس پتانسیل، U^{tol} ، معمولاً ۱ meV در نظر گرفته می‌شود.

از دیدگاه عددی یک سیستم غیر خطی با روش نیوتن-رافسون با طرح بازگرداننده گومل حل می‌شود. معادله شرودینگر در ابتدای هر حلقه نیوتن-رافسون معادله پواسون

حل می‌شود و تا زمانی که حلقه نیوتن همگرا شود چگالی بار نانوتیوب ثابت فرض می‌شود. چرخه الگوریتم تا زمانی که تفاوت پتانسیل محاسبه شده در انتهای دو حلقه نیوتن کمتر از ۱ meV شود ادامه می‌یابد.

در استفاده از تکنیک بازگشتی، از آنجا که در هر حلقه نیوتن چگالی الکترونها مستقل از پتانسیل است، در نقاطی از محدوده که شامل اتمهای کربن است ژاکوبی برابر صفر می‌شود و کنترل روی تصحیح پتانسیل از بین می‌رود و مشکل همگرایی به وجود می‌آید. بنابراین برای رفع مشکل همگرایی، روشی برای حدس مقدار بار به کار می‌رود تا مقدار تقریبی ژاکوبی در هر حلقه نیوتن به دست آید. برای این منظور از یک تابع نمایی برای حدس مقدار بار استفاده می‌شود [۱۹]، به این صورت که اگر n چگالی الکترون، همانند معادله (۵)، باشد، چگالی الکترون در i امین مرحله از حلقه نیوتن، n_i به صورت زیر بیان می‌شود:

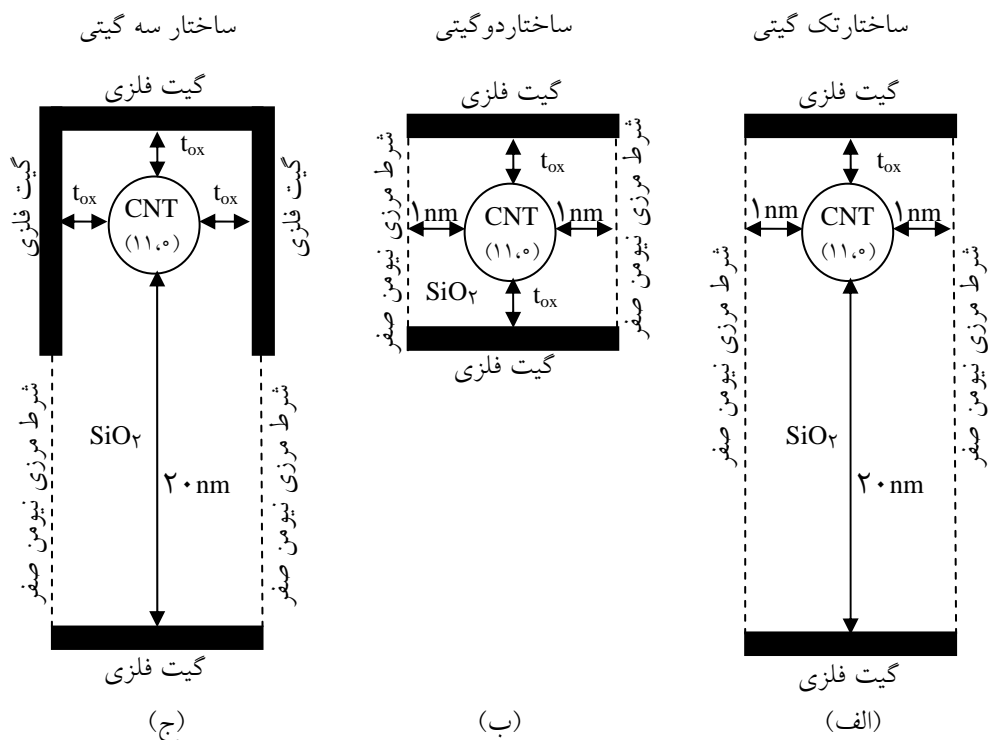
$$n_i = ne^{\left(\frac{\phi_i - \tilde{\phi}}{V_T} \right)} \quad (8)$$

که ϕ_i و $\tilde{\phi}$ به ترتیب پتانسیل‌های الکتروستاتیکی محاسبه شده در اولین و i امین مرحله از حلقه نیوتن است و V_T ولتاژ حرارتی است. همین روند محاسباتی برای چگالی حفره‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود.

۳- نتایج و بحث

در این مقاله نانوتیوب زیگزاگی (۱۱،۰) با قطر ۰/۹ نانومتر که روی SiO_2 [۲۰] جاسازی شده، به کار رفته است. همچنین نانوتیوب ذاتی (غیرآلاییده) با طول متغیر L به عنوان کانال و در دو انتهای آن نانوتیوب آلاییده با اتمهای نوع n به طول ۱۰ نانومتر، به عنوان سورس و درین عمل می‌کنند. لازم به ذکر است که در سورس و درین این ترانزیستورها به ازای هر اتم کربن به طور متوسط f اتم دهنده وجود دارد.

برای بررسی کارایی ترانزیستورهای CNTFET، ابتدا مشخصات dc آنها مورد بررسی قرار می‌گیرند و سپس رفتار ترانزیستورها بر حسب اثرات کانال کوچک و جریانهای I_{on} و



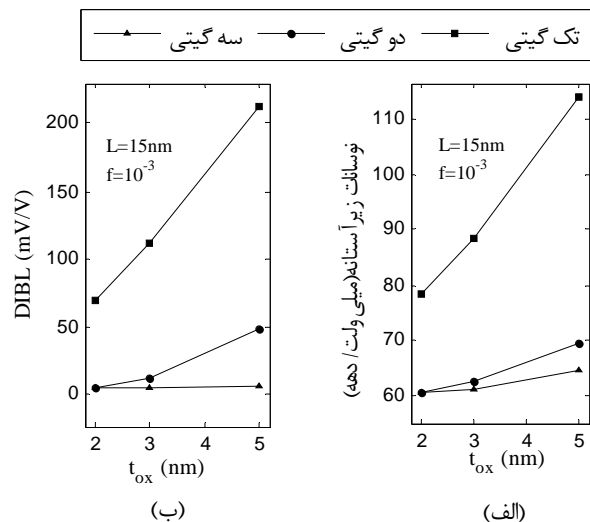
شکل ۲ - سطح مقطع عرضی ترانزیستور اثر میدانی نانوتیوب کربن با آرایشهای مختلف گیت

(الف) تک گیتی، (ب) دوگیتی، (ج) سه گیتی. شرایط مرزی نیومن صفر در وجوه جانبی سطح مقطع عرضی فرض شده است.

کانال ثابت $L=15\text{ nm}$ ، بررسی می‌شود. برای اینکه بتوان آرایه‌ای از نانوتیوبها را به کار برد از شرایط مرزی نیومن در وجوه جانبی سطح مقطع عرضی استفاده می‌شود. در شکل (۲-الف) و (ب) به ترتیب نوسانات زیر آستانه و DIBL به عنوان تابعی از اکسید گیت رسم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود هر چه گیت، کانال را بیشتر احاطه کند کنترل کانال بهتر می‌شود و در نتیجه ترانزیستور سه‌گیتی رفتار ایدئالی را، حتی برای ضخیمترین اکسید گیت در نظر گرفته شده (5 nm) نشان می‌دهد.

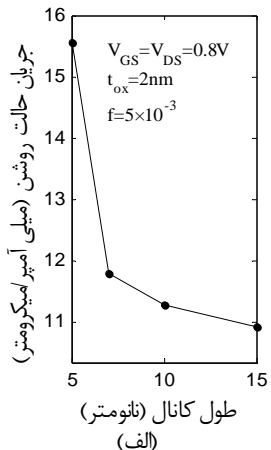
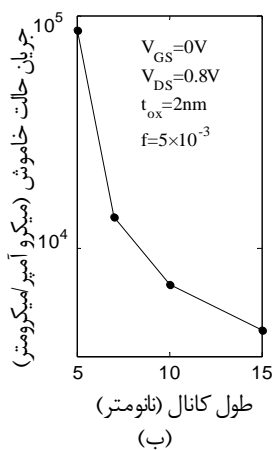
به‌علاوه در شکل (۳) دیده می‌شود که ساختار دوگیتی نوسانات زیرآستانه شبه ایدئال و DIBL قابل قبولی را در محدوده ضخامت‌های SiO_2 در نظر گرفته شده، نشان می‌دهد. اما ترانزیستور تک گیتی مقدار نوسانات زیرآستانه و DIBL قابل قبولی را فقط برای اکسید گیت نازک (2 nm) نشان می‌دهد.

حال به بررسی مشخصات ترانزیستور اثر میدانی نانوتیوب کربن دوگیتی (DG-CNTFET)، که در شکل (۱) رسم شده

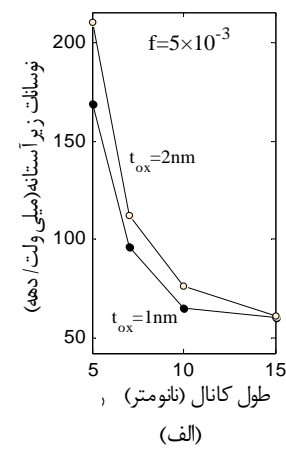
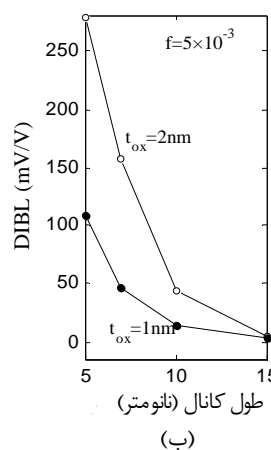


شکل ۳- (الف) نوسانات زیر آستانه و (ب) DIBL به عنوان تابعی از اکسید گیت مربوط به آرایشهای مختلف گیت.

I_{off} تجزیه و تحلیل می‌شوند. همچنین اثرات کانال کوچک برای آرایشهای مختلف گیت (تک گیتی، دوگیتی و سه گیتی) با طول



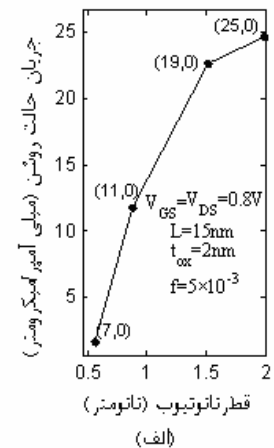
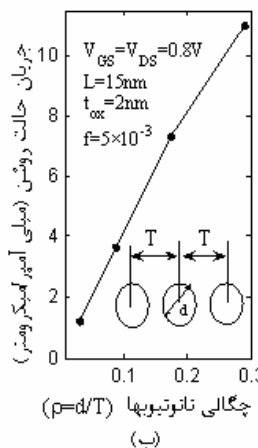
شکل ۵ - (الف) جریان حالت روشن (I_{on}) و (ب) جریان حالت خاموش (I_{off}) به ازای واحد طول، بر حسب طول کانال-DG-CNTFET



شکل ۴ - (الف) نوسانات زیرآستانه و (ب) DIBL بر حسب طول کانال DG-CNTFET با ضخامت اکسید ۱ و ۲ نانومتر.

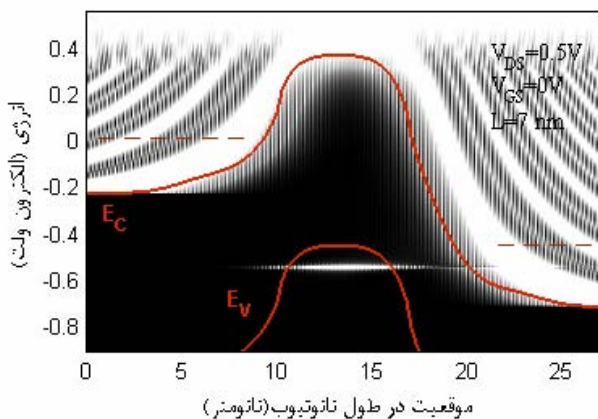
است. همان‌طور که این شکلها نشان می‌دهند DG-CNTFET عملکرد بسیار خوبی تا طول کانال ۱۰ نانومتر از خود نشان می‌دهند. شکل (۵-الف) و (ب) به ترتیب جریان حالت روشن (I_{on}) و جریان حالت خاموش (I_{off}) به ازای واحد طول را بر حسب طول کانال در DG-CNTFET نشان می‌دهد. هنگامی که طول کانال را کاهش می‌دهیم اثرات کانال کوچک مهمتر می‌شود و در شرایط بایاسینگ یکسان، ترانزیستور با طول کوتاهتر جریان بیشتری را به دلیل کاهش سد کانال نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که جریان I_{on} در $V_{DS}=V_{GS}=0.8V$ و جریان I_{off} در $V_{DS}=0.8V$ و $V_{GS}=0V$ محاسبه شده است.

در شکل (۶-الف) به عنوان تابعی از قطر نانوتیوب در طول کانال ۷ نانومتر رسم شده است. هنگامی که قطر نانوتیوب افزایش می‌یابد حالت‌های کوانتیزه انرژی هر اتم حلقه نانوتیوب به یکدیگر نزدیکتر شده در نتیجه زیرباندهای بیشتری در انتقال الکترون نقش خواهند داشت و هدایت کانال افزایش می‌یابد. شکل (۶-ب) I_{on} را بر حسب چگالی نانوتیوب (تعداد نانوتیوبها در واحد طول، $\rho=d/T$) که همان‌طور که در بخش الحاقی شکل (۶-ب) دیده می‌شود، فاصله بین مراکز دو نانوتیوب است) نشان می‌دهد، مطابق این شکل، با افزایش

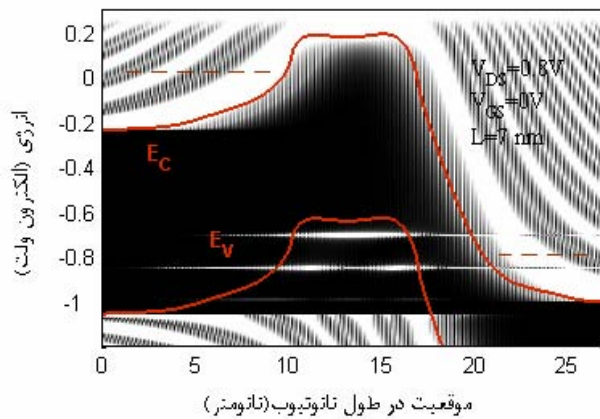


شکل ۶- (الف) جریان حالت روشن بر حسب قطر نانوتیوب (ب) جریان حالت روشن بر حسب چگالی نانوتیوب (تعداد نانوتیوبها در واحد طول، $\rho=d/T$) که همان‌طور که در بخش الحاقی شکل دیده می‌شود، فاصله بین مراکز دو نانوتیوب است). جریان حالت روشن (I_{on}) در $V_{DS}=V_{GS}=0.8V$ محاسبه شده است.

است و سطح مقطع آن در شکل (۲-ب) آورده شده است، می‌پردازیم. نوسانات زیرآستانه و DIBL این ترانزیستور به ترتیب در شکل (۴-الف) و (ب) بر حسب تابعی از طول کانال DG-CNTFET با ضخامت اکسید ۱ و ۲ نانومتر رسم شده

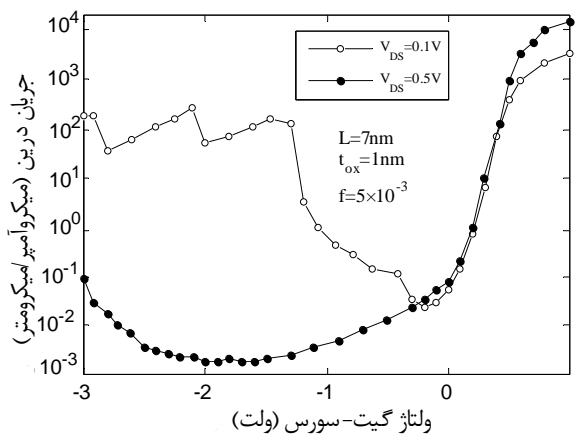


(ب)

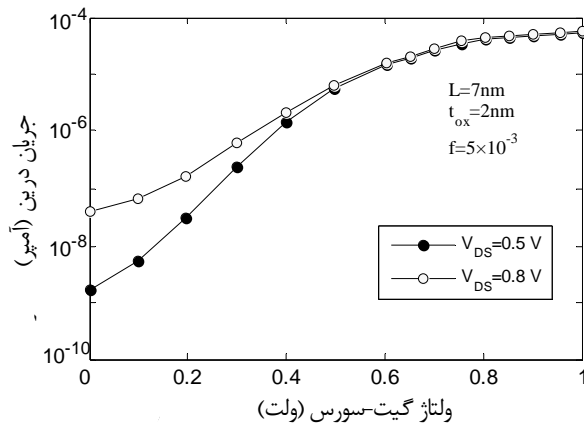


(الف)

شکل ۷ - چگالی حالت‌های نانوتیوب در DG-CNTFET بر حسب انرژی و مختصات نانوتیوب به ازای $V_{GS}=0V$ و $V_{DS}=0.8V$ (الف) و $V_{GS}=0V$ و $V_{DS}=0.5V$ (ب) $V_{DS}=0.5V$. خط چینها تراز فرمی سورس و درین را نشان می‌دهند.



شکل ۹ - مشخصه انتقال DG-CNTFET با طول کانال ۷ نانومتر و ضخامت اکسید ۱ نانومتر، به ازای $V_{DS}=0.5V$ و $V_{DS}=0.1V$.



شکل ۸ - مشخصه انتقال DG-CNTFET با طول کانال ۷ نانومتر و ضخامت اکسید ۲ نانومتر، به ازای $V_{DS}=0.8V$ و $V_{DS}=0.5V$.

می‌آید. لازم به ذکر است که در تمام شبیه‌سازی تراز فرمی سورس در انرژی صفر ثابت نگه‌داشته شده است.

اثر دیگر حالت‌های مقید روی مشخصه DG-CNTFET در ولتاژهای گیت منفی نمایان می‌شود. از آنجا که تونل زنی باند به باند هم در درین وهم در سورس صورت می‌گیرد، جریان در ولتاژهای گیت منفی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، همان‌طور که در شکل (۹) دیده می‌شود برای ولتاژهای درین بزرگتر احتیاج به ولتاژ گیت منفی بزرگتری داریم تا افزایش جریان درین مشهود باشد، زیرا در ولتاژ درین بالا، اثر حالت‌های مقید در باند ظرفیت

چگالی نانوتیوب‌های کربن جریان نیز افزایش می‌یابد. نکته جالب دیگر در مورد DG-CNTFET، افزایش جریان I_{off} با افزایش ولتاژ درین است. زیرا با افزایش ولتاژ درین-سورس، حفره‌هایی که از درین به سورس تونل‌زنی می‌کنند حالت‌های مقیدی که در لایه ظرفیت وجود دارند را اشغال می‌کنند (شکل ۷-الف). اما برای ولتاژهای درین کمتر (شکل ۷-ب) حالت‌های مقید از تراز فرمی بسیار دورند، بنابراین همان‌طور که در شکل (۸) دیده می‌شود رفتار خطی در ناحیه زیرآستانه برای منحنی نیمه لگاریتمی مشخصه انتقال به دست

بیشتر می‌گردد، در نتیجه احتمال تونل‌زنی باند به باند کاهش می‌یابد. به‌علاوه، در شکل (۹) دیده می‌شود که در $V_{DS}=0/1V$ ، در ولتاژهای گیت منفی حالت‌های تشدید ظاهر می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، مشخصات الکتریکی و اثرات کانال کوچک ترانزیستور اثر میدانی نانوتیوب کربن با سورس و درین آلائیده، با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی بر اساس تابع گرین ناترازمند مورد بررسی قرار گرفت. هم‌چنین تاثیر آرایشهای مختلف گیت و تغییر ابعاد ترانزیستور تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان

واژه نامه

دادند که ساختار دوگیتی نوسانات زیرآستانه و DIBL قابل قبولی را در طولهای مختلف کانال دارد و به ازای افزایش قطر نانوتیوب و افزایش چگالی نانوتیوب جریان حالت روشن آن نیز افزایش می‌یابد. هم‌چنین جریان نشی DG-CNTFET با افزایش ولتاژ درین-سورس افزایش می‌یابد. نتیجه مهمی که باید به آن اشاره کرد این است که در ولتاژهای گیت منفی و ولتاژ درین زیاد نیاز به ولتاژ گیت منفی بزرگتری داریم تا افزایش جریان درین ناشی از تونل‌زنی باند به باند، مشهود باشد و در ولتاژهای گیت منفی و ولتاژ درین کم حالت‌های تشدید ظاهر می‌شود

1. mid-gap energy

مراجع

1. S. Iijima, "Helical Microtubules of Graphite Carbon," *Nature*, Vol. 354, pp. 56–58, 1991.
2. Heinze, S., Tersoff, J., Martel, R., Derycke, V., Appenzeller, J., and Avouris, P., "Carbon Nanotubes as Schottky Barrier Transistors," *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 89, pp. 106801–106803, 2002.
۳. عارفی نیا، ز.، و اروجی، ع. ا. «جریان نشی در ترانزیستورهای نانوتیوب کربن با سد شاتکی»، *شازدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران*، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، ص ۵۶–۵۳، ۱۳۸۷.
4. Appenzeller, J., Knoch, J., Martel, R., Derycke, V., Wind, S., and Avouris, P., "Short-Channel Like Effects in Schottky Barrier Carbon Nanotube Field-Effect Transistors," *IEDM Tech. Dig.*, pp. 285–288, 2002.
5. Arefinia, Z., and Orouji, A. A., "Novel Attributes in Scaling Issues of Carbon Nanotube Field-Effect Transistors," *Microelectronics Journal*, in Press, 2008.
6. Javey, A., Guo, J., Wang, Q., Lundstrom, M., and Dai, H., "Ballistic Carbon Nanotube Field-Effect Transistors," *Nature*, Vol. 424, pp. 654–657, 2003.
7. Nosh, Y., Ohno, Y., Kishimoto, S., and Mizutani, T., "N-Type Carbon Nanotube Field-Effect Transistors Fabricated by Using Ca Contact Electrodes," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, p. 073105, 2005.
8. Chen, J., Klinke, C., Afzali, A., and Avouris, P., "Self-Aligned Carbon Nanotube Transistors with Charge Transfer Doping," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 86, p. 123108, 2005.
9. Bockrath, M., Hone, J., Zettl, A., McEuen, P., Rinzler, A. G., and Smalley, R. E., "Chemical Doping of Individual Semiconducting Carbonnanotube Ropes," *Phys. Rev. B. Condens. Matter*, Vol. 61, pp. R10607–R10608, 2000.
10. Guo, J., Datta, S., Lundstrom, M., and Anantram, M. P., "Towards Multi-Scale Modeling of Carbon Nanotube Transistors," *International J. on Multiscale Computational Engineering*, Vol. 2, pp. 257-276, 2004.
11. Datta, S., *Electronic Transport in Mesoscopic Systems*, Cambridge University Press, New York, 1995.
12. Datta, S., "Nanoscale Device Modeling: Green's Function Method," *Superlattices Microstruct.*, Vol. 28, pp. 253–277, 2000.
13. Lake, R., Klimeck, G., Bowen, R. C., and Jovanovic, D., "Single and Multiband Modeling of Quantum Electron Transport Through Layered Semiconductors Devices," *J. Appl. Phys.*, Vol. 81, pp. 7845–7869, 1997.
14. Svizhenko, A., Anantram, M. P., Govindam, T. R., and Biegel, B., "Two Dimensional Quantum Mechanical Modeling of Nanotransistors," *J. Appl. Phys.*, Vol. 91, pp. 2343–2354, 2001.
15. Guo J., et al., "Performance Analysis and Design

- Optimization of Near Ballistic Carbon Nanotube Field-Effect transistors," *IEDM Tech. Dig.*, pp. 703-706, 2004.
16. Saito, R., Dresselhaus, G., and Dresselhaus, M. S., *Physical Properties of Carbon Nanotubes*, Imperial College Press, London, U.K., 2003.
 17. Tersoff, J., "Schottky-Barrier Heights and the Continuum of Gap States," *Physical Review Letters*, Vol. 52, pp. 465-468, 1984.
 18. Tersoff, J., "Reference Levels for Heterojunctions and Schottky Barriers," *Physical Review Letters*, Vol. 56, pp. 675-675, 1986.
 19. Lopez Sancho, M. P., Lopez Sancho, J. M., and Rubio, J., "Highly Convergent Schemes for the Calculation of Bulk and Surface Green Function," *J. Phys. F. Met. Phys.*, Vol. 15, pp. 851-858, 1984.
 20. Arefinia, Z., and Orouji, A. A., "Investigation of the Novel Attributes of a Carbon Nanotube FET with High- k Gate Dielectrics," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, Vol. 40, pp. 3068-3071, 2008.