

مجله فیزیک کاربردی دانشگاه الزهراء (س)  
شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹۲

## اثر دما بر چگالی جریان در ترانزیستور اثر میدانی نانونوار گرافینی

ترانه وظیفه‌شناس<sup>۱</sup>

هادی رحمانی نژاد<sup>۲</sup>

محمد براتی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۱/۹

تاریخ تصویب: ۹۲/۴/۱۳

### چکیده

گرافین، به دلیل تحرک الکترونی بالا و انعطاف‌پذیری، برای ساخت قطعات الکترونیکی نظیر ترانزیستورهایی با عملکرد بالا در چند سال اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله ما اثر دما را بر چگالی جریان یک ترانزیستور اثر میدانی نانو نوار گرافینی (GNRFET) بررسی می‌کنیم که در آن کانال متشکل از آرایه‌ای از نانونوارهای گرافینی دسته‌صندلی می‌باشد. در این جا جریان

<sup>۱</sup> دانشیار فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی؛ t-vazifeh@sbu.ac.ir

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری فیزیک، دانشگاه شهید بهشتی

الکتريکي را با استفاده از پتانسيل الکتروستاتيکی کمينه‌ای که از حل تقریبی معادله پواسون تقریبی با شرایط مرزی مناسب به دست می‌آید، در مقادیر متفاوت ولتاژهای گیت بالا و پایین محاسبه می‌نماییم. نتایج ما نشان می‌دهند اثر دما بر منحنی مشخصه جریان-ولتاژ به لحاظ کمی قابل ملاحظه است به طوری که با بالا رفتن دما، چگالی جریان بشدت افزایش یافته و این افزایش در دماهای بالاتر، بیشتر است. همچنین با افزایش ولتاژ گیت بالا و گیت پایین، شیب منحنی جریان برحسب دما تندتر می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** نانونوار گرافینی، ترانزیستور اثر میدانی، ولتاژ گیت، منحنی مشخصه‌ی جریان-ولتاژ، اثر دما

## ۱. مقدمه

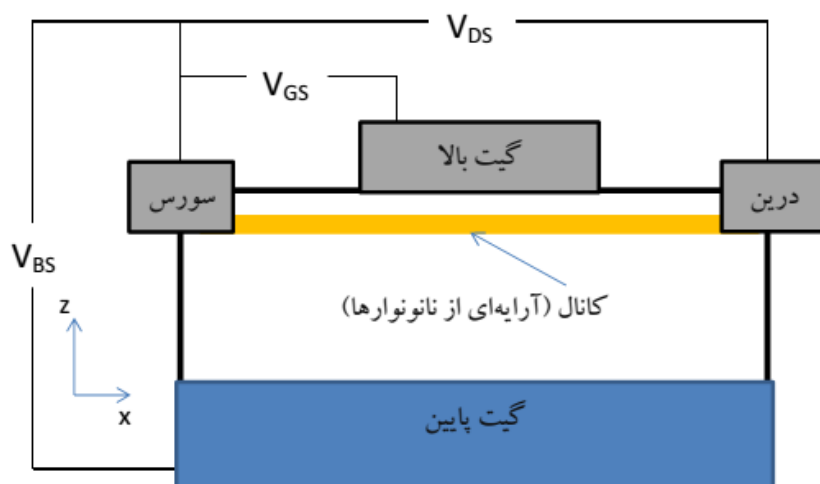
گرافین یک لایه منفرد از اتم‌های کربن است که یک شبکه بلوری دوبعدی لانه زنبوری را تشکیل می‌دهند [۱]. این ساختار با ویژگی رسانندگی الکتريکی بالا کاندیدای امیدبخشی برای استفاده در فناوری نانوالکترونیک آینده می‌باشد. طیف انرژی متمایز الکترون‌ها و حفره‌ها در گرافین، قابلیت‌های استثنایی را برای وسایلی که بر پایه آن ساخته می‌شوند، به ویژه ترانزیستورهای اثر میدانی، فراهم می‌نماید. با این حال گرافین یک ماده با گاف انرژی صفر است که برای استفاده در ترانزیستور اثر میدانی مناسب نیست. با محدود سازی گرافین از پهلوها در ابعاد نانو به صورت یک نوار، می‌توان ساختار نوار انرژی آن را برای رسیدن به گاف انرژی مورد نظر تغییر داد. به این نوارها، نانونوار گرافینی (GNR) گفته می‌شود. با انتخاب مناسب عرض نانونوار می‌توان یک ساختار گرافینی با گاف انرژی مناسب و همزمان با تحرک الکترونی بالا به وجود آورد [۲].

ترانزیستورهای اثر میدانی گرافینی به صورت تک لایه یا گاف انرژی صفر و نیز دولایه با ویژگی گاف متناهی به طور نظری مورد بررسی وسیعی قرار گرفته‌اند و ساخت و تعیین مشخصه‌های این نوع ترانزیستورها نیز در موارد مختلفی گزارش شده‌اند [۳-۱۱]. از سوی

دیگر توجه پژوهشگران به بررسی ترانزیستور اثر میدانی بر پایه نانونوار گرافینی معطوف گشته است چنانچه که ذکر شد ساختاری با گاف انرژی غیر صفر دارد، معطوف گشته است [۱۲-۱۶]. در مرجع ۱۵ مدلسازی این نوع ترانزیستور، با کانالی متشکل از آرایه‌ای از نانونوارهای گرافینی انجام شده و توزیع پتانسیل الکتروستاتیکی در آن با حل معادله پواسون به دست آمده است. سپس با استفاده از پتانسیل درون کانال، منحنی مشخصه جریان-ولتاژ محاسبه شده است. همانطور که انتظار می‌رود عملکرد این ترانزیستور تحت کنترل گیت می‌باشد که به وسیله آن چگالی حامل‌ها در کانال کنترل می‌گردد. در این ترانزیستور اثر میدانی، کانال که مابین گیت پایین و گیت بالا قرار دارد شامل آرایه‌ای متراکم از نانونوارهایی با عرض  $W$  می‌باشد که به فاصله بسیار کم از یکدیگر قرار دارند. کانال در دو انتها به چشمه و دررو متصل است و گیت پایین یک زیر لایه با رسانندگی بزرگ است و گیت بالا جریان سورس-درین را کنترل می‌کند. شمایی ساده از این ترانزیستور در شکل ۱ نمایش داده شده است.

در این مقاله ما از مدل و روش محاسباتی ارائه شده در مرجع ۱۵ برای تعیین منحنی مشخصه ترانزیستور اثر میدانی نانونوار گرافینی استفاده نمود و اثر دما را بر چگالی جریان آن بررسی می‌کنیم. در این پژوهش علاوه بر به دست آوردن تغییرات منحنی مشخصه جریان-ولتاژ با تغییر دما، نقش اندازه ولتاژهای گیت بالا و پایین را در شدت این تغییرات بررسی کرده‌ایم.

در ادامه مطالب این مقاله در بخش ۲، به معرفی نظریه و فرمولبندی ریاضی مورد استفاده در محاسبه چگالی جریان این ترانزیستور می‌پردازیم. ارائه نتایج محاسبات و بحث و بررسی آنها در بخش ۳ انجام می‌گیرد. در نهایت در بخش ۴ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.



شکل ۱. شمایی از ترانزیستور اثر میدانی نانونوار گرافینی

## ۲. نظریه

نانونوارهای گرافینی دارای طیف انرژی منحصراً به فردی هستند به طوری که در آن گاف انرژی بین نوار ظرفیت و رسانش به پهنای نوار بستگی دارد. رابطه پهنای نوار بستگی انرژی در نانونوارهای گرافینی دسته‌بندی به شکل زیر می‌باشد [۱۷]:

$$E_p^\pm(k) = \pm v_F \sqrt{k^2 + \left(\frac{\pi\hbar}{w}\right)^2 p^2} \quad (1)$$

که در آن  $v_F = 10^6 \text{ m/s}$  سرعت فرمی،  $k$  بردار موج در راستای نانونوار (در این جا محور  $x$ ) و  $p$  اندیس زیر نوار است. علامت بالایی مربوط به الکترون‌ها در نوار رسانش و علامت پایینی مربوط به حفره‌ها در نوار ظرفیت است به طوری که گاف انرژی نانونوار از رابطه  $E_g = E_1^+(0) - E_1^-(0)$  به دست می‌آید. در این مقاله ما علاقمند به بررسی ترانزیستور با کانال نوع  $n$  هستیم، بنابراین توجه خود را معطوف به الکترون‌های نوار رسانش می‌کنیم. در این نوع ترانزیستور، چگالی الکترونی در نقاط مختلف کانال در نتیجه این درجه تبهگنی گاز الکترونی بستگی به ولتاژ گیت پایینی دارد. گاز الکترونی در ولتاژهای نسبتاً زیاد گیت پایین، می‌تواند تبهگن باشد. در این جا بررسی خود را به نواحی کاری از ترانزیستور اثر میدانی محدود می‌کنیم که در آن الکترون‌های

موجود در کانال، ناتبهن باشند بطوری که استفاده از تابع توزیع بولتزمن برای الکترون‌ها معتبر باشد. البته این تقریب در محدوده وسیعی از کاربرد ترانزیستورها، اعتبار دارد. همچنین فرض می‌کنیم الکترون‌ها، تنها پایین‌ترین زیرنوار را در نوار رسانش اشغال می‌کنند (یعنی:  $p = 1$ ). ناحیه فعال این ترانزیستور در  $-L/2 \leq x \leq L/2$  و  $-h_{BG} \leq z \leq h_{TG}$  واقع است که در آن  $L$  طول گیت بالا و  $h_{BG}$  و  $h_{TG}$  ترتیب ضخامت ماده عایق بین گرافین و گیت‌های پایین و بالا می‌باشد. در این جا محور  $Z$  را عمود بر نانونوارها و گیت‌ها اختیار کرده‌ایم. چگالی جریان الکتریکی در این ترانزیستور از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۵]

$$J = \left( \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 v_F}{\sqrt{\pi\beta E_g} h_{BG}} \right) [V_{BS} - (V_{BS} - V_{DS})e^{-\beta eV_{DS}}] e^{\beta e\varphi_m} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $V_{BS}$  و  $V_{GS}$  به ترتیب پتانسیل گیت بالا و گیت پایین نسبت به سورس،  $\varepsilon$  ثابت دی الکتریک ماده عایق و  $\beta = (k_B T)^{-1}$  هستند.  $\varphi_m$  مقدار کمینه پتانسیل در طول کانال یعنی  $\varphi(x)$  است که از حل معادله پواسون با تقریب ناجایگزیدی ضعیف به دست می‌آید. [۱۸ و ۱۹]

$$\frac{(h_{BG} + h_{TG})}{3} \frac{d^2 \varphi(x)}{dx^2} - \frac{\varphi(x) - V_{BS}}{h_{BG}} - \frac{\varphi(x) - V_{GS}}{h_{TG}} = \frac{eN}{\varepsilon\varepsilon_0} \quad (3)$$

که در آن  $N$  چگالی صفحه‌ای الکترون‌ها در کانال است. برای گاز الکترونی ناتبهن و با فرض  $1 \gg \beta E_g$ ، چگالی الکترونی در مجاورت سورس و درین ( $N^D$  و  $N^S$ ) به صورت زیر با پتانسیل رابطه دارد [۱۵]:

$$N^S \simeq \frac{\varepsilon\varepsilon_0 V_{BS}}{eh_{BG}} e^{\beta e\varphi(x)} \quad (4)$$

$$N^D \simeq \frac{\varepsilon\varepsilon_0 (V_{BS} - V_{DS})}{eh_{BG}} e^{\beta e(\varphi(x) - V_{DS})} \quad (5)$$

با خطی کردن معادلات (۴) و (۵) و قراردادن آن‌ها در معادله (۳)، دو معادله دیفرانسیل برای  $\varphi(x)$  به دست می‌آید که با حل همزمان آن‌ها و اعمال شرایط مرزی به

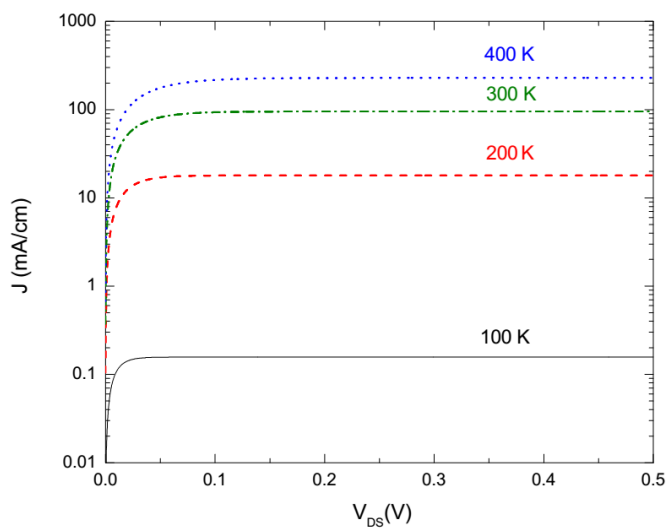
صورت  $\varphi(L/2) = V_{DS}$  و  $\varphi(-L/2) = 0$  و شرط پیوستگی پتانسیل و مشتق اول آن در مکان کمینه، می توان پتانسیل الکتروستاتیکی در داخل کانال را در دو حد ولتاژهای بزرگ و کوچک گیت بالا به دست آورد و سپس از آن جا، پتانسیل کمینه را تعیین نمود. با گنجاندن مقدار  $\varphi_m$  محاسبه شده در معادله (۲)، جریان در واحد طول برای این ترانزیستور اثر میدانی نانونوار گرافینی محاسبه می شود.

### ۳. نتایج و بحث

همان طور که از روابط فوق مشخص است، چگالی جریان به طور قوی به دما بستگی دارد. در این جا به بررسی اثر تغییر دما بر چگالی جریان از چشمه به دررو؛ در شرایطی که ولتاژ گیت بالا از ولتاژ گرمایی یعنی  $K_B T / e$  خیلی بزرگتر ولی هنوز از ولتاژ گیت پایین کوچکتر است، می پردازیم. ترانزیستور اثر میدانی نانونوار گرافینی که در این جا در نظر گرفته ایم دارای مشخصات زیر مطابق با مرجع ۱۵ می باشد:

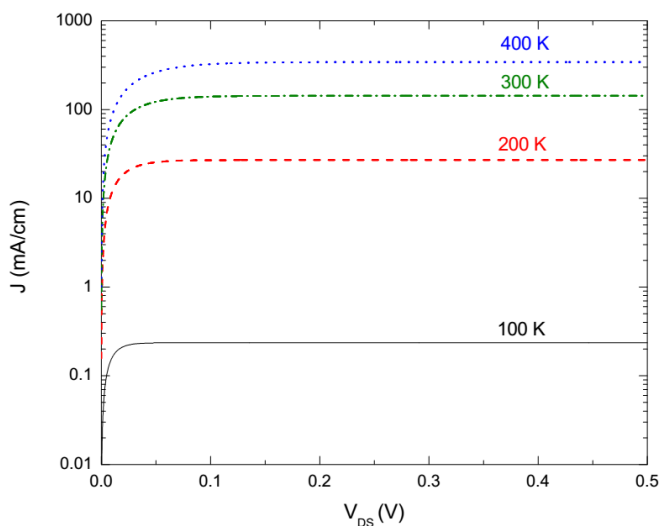
$$h_{TG} = 30 \text{ nm}, h_{BG} = 100 \text{ nm}, L = 300 \text{ nm}, w = 10 \text{ nm}, \varepsilon = 4$$

در شکل ۲ چگالی جریان بر حسب ولتاژ درین در چهار دمای متفاوت  $T = 100, 200, 300, 400 \text{ K}$ ، برای مقادیر ولتاژهای گیت بالا و گیت پایین به ترتیب برابر  $V_{GS} = -0.7 \text{ V}$  و  $V_{BS} = 2 \text{ V}$  نشان داده شده است. همان طور که از این نمودارها مشخص است با افزایش دما، چگالی جریان افزایش می یابد. همچنین در دماهای بالاتر این رشد، شدیدتر می شود. علت فیزیکی این رفتار را می توان اینچنین توضیح داد که گاز الکترونی درون کانال ترانزیستور اثر میدانی نانونوار گرافینی مورد مطالعه در این مقاله، ناتبهنگن است از این رو با بالا رفتن دما، چگالی الکترون های برانگیخته به نوار رسانش افزایش یافته در نتیجه چگالی جریان زیاد می گردد.



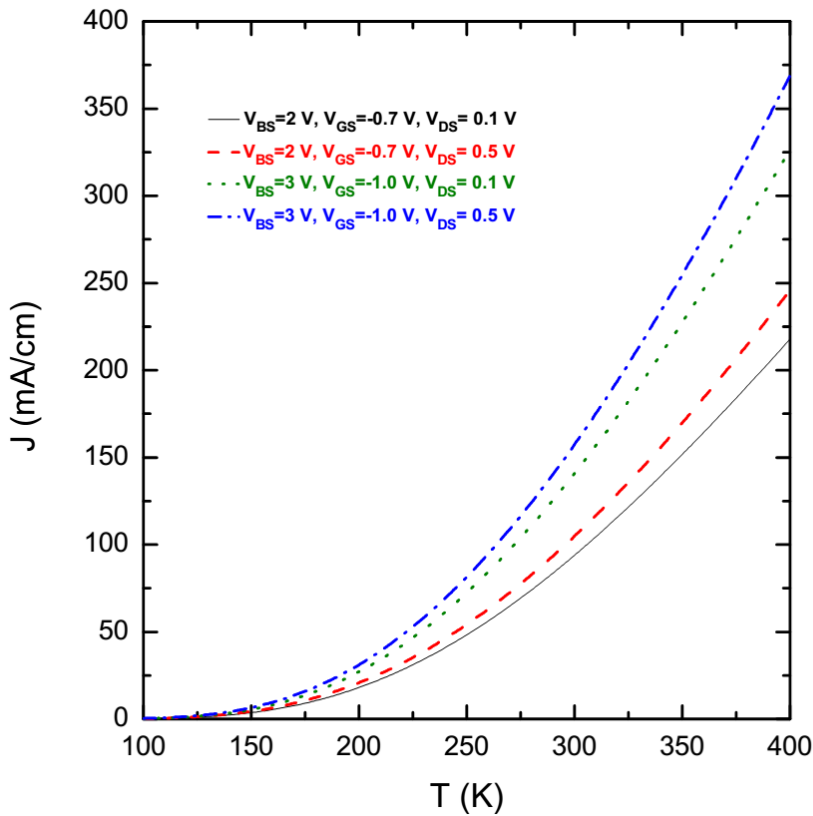
شکل ۲. نمودار چگالی جریان برحسب ولتاژ درین برای  $V_{BS}=2\text{ V}$  و  $V_{GS}=-0.70\text{ V}$

شکل ۳ نیز تغییر منحنی مشخصه چگالی جریان-ولتاژ درین را برحسب دما برای مقادیر دیگری از ولتاژ دو گیت بالا و پایین،  $V_{GS} = -1.0\text{ V}$  و  $V_{BS} = 3\text{ V}$ ، نمایش می دهد که در مقایسه با شکل ۱، رفتار یکسانی مشاهده می شود.



شکل ۳. نمودار چگالی جریان برحسب ولتاژ درین برای  $V_{BS}=3\text{ V}$  و  $V_{GS}=-1.0\text{ V}$

برای بررسی دقیق‌تر و مشاهده واضح‌تر تفاوت رفتار دمایی این ترانزیستور با ایجاد تغییر در ولتاژ گیت‌های آن، چگالی جریان برحسب دما در دو ولتاژ درین در  $V_{DS} = 0.1, 0.5 V$  برای مقادیر فوق  $V_{GS}$  و  $V_{BS}$  در شکل ۴ رسم شده است. مطابق این شکل شیب افزایش جریان برحسب دما در مقادیر بزرگتر ولتاژهای گیت بالا و پایین، تندتر است. علاوه بر آن، در دماهای پایین، حدود ۱۰۰ درجه کلونین، تغییر ولتاژ گیت‌ها اثر ناچیزی بر چگالی جریان دارد و یا به عبارت دیگر  $J$  مستقل از  $V_{GS}$  و  $V_{BS}$  می‌باشد.



شکل M نمودار چگالی جریان برحسب دما



#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله مدلی از ترانزیستور اثر میدانی را بررسی کرده ایم که در آن آرایه ای از نانونوارهای گرافینی دسته صندلی، کانال را تشکیل می دهند. با استفاده از توزیع پتانسیل به دست آمده از حل تقریبی معادله پواسون در رابطه تحلیلی جریان-ولتاژ، رفتار دمایی این ترانزیستور را تحت شرایط ولتاژ گیت بالای بزرگ بررسی نموده ایم. نتایج نشان می دهند که به طور کلی دما نقش مهمی در یزرگی چگالی جریان ترانزیستور دارد. همچنین با بالا رفتن دما، جریان چشمه-درافزایش می یابد و این اثر در مقادیر بزرگتر ولتاژهای گیت بالا و پایین، قویتر است.

#### ۵. منابع

- [1] A. K. Geim and K. S. Novoselov; *Nat. Mater.* **6** (2007) 183.
- [2] X. Li, X. Wang, L. Zhang, S. Lee, and H. Dai; *Science* **319** (2008) 1229.
- [3] I. Meric, M. Y. Han, A. F. Young, B. Ozyilmaz, P. Kim, and K. L. Shepard; *Nat. Nanotechnol.* **3** (2008) 654.
- [4] F. Schwierz; *Nat. Nanotechnol.* **5** (2010) 487.
- [5] B. Zhan, C. Li, J. Yang, G. Jenkins, W. Huang, and X. Dong; *Small* **10** (2014) 4042.
- [6] M. C. Lemme, T. J. Echtermeyer, M. Baus, and H. Kurz; *IEEE Electron Device Letters* **28** (2007) 282.
- [7] S. Kim, J. Nah, I. Jo, D. Shahrjerdi, L. Colombo, Z. Yao, E. Tutuc, and S. K. Banerjee; *Appl. Phys. Lett.* **94** (2009) 062107.
- [8] V. Ryzhii, M. Ryzhii, and T. Otsuji; *Appl. Phys. Express* **1** (2008) 013001.
- [9] V. Ryzhii, M. Ryzhii, and T. Otsuji; *Phys. Stat. Sol. (a)* **205** (2008) 1527.
- [10] F. Xia, D. B. Farmer, Y. M. Lin, and P. Avouris; *Nano Lett.* **1** (2010) 715.
- [11] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, and V. Mitin; *J. Appl. Phys.* **109** (2011) 064508.

- [12] B. Obradovic, R. Kotlyar, F. Heinz, P. Matagne, T. Rakshit, M. D. Giles, M.A. Stettler, and D. E. Nikonov; *Appl.Phys.Lett.* **88** (2006) 142102.
- [13] B. Huang, Q. Yan, G. Zhou, J. Wu, B. L. Gu, W. Duan, and F. Liu; *Appl. Phys. Lett.* **91** (2007) 253122.
- [14] Q. Yan, B. Huang, J. Yu, F. Zheng, J. Zang, J. Wu, B. L. Gu, F. Liu, and W. Duan; *Nano Lett.* **7** (2007) 1469.
- [15] V. Ryzhii, M. Ryzhii, and A. Satou, and T.Otsuji; *J. Appl. Phys.* **103** (2008) 094510.
- [16] Y. Ouyang, X. Wang, H. Dai, and J. Guo; *Appl. Phys. Lett.* **92** (2008) 243124.
- [17] T. Fang, A. Konar, H. L. Xing, and D. Jena; *Appl. Phys. Lett.* **91** (2007) 0921109.
- [18] A. A. Sukhanov and Yu. Ya. Tkach; *Sov. Phys. Semicond.* **18** (1984) 797.
- [19] V. I. Ryzhii and I. I. Khmyrova; *Sov. Phys. Semicond.* **22** (1988) 807.