



بررسی نظری عملکرد آشکارسازهای نوری نانونوار گرافنی در گستره طیف فروسرخ و تراهرتز

قاسم انصاری پور* | نوار داوود

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

چکیده: آشکارسازهای نوری برای طیف‌های فروسرخ دور (FIR) و تراهرتز (THz) به طور متعارف از نیم‌رساناهای گاف باریک و ساختارهای چاه کوانتومی ساخته می‌شوند. عملکرد این آشکارسازها بر اساس ساختارهای چاه کوانتومی با گذارهای درون نواری (بین نواری) الکترون یا حفره همراه است. امروزه با استفاده از ترانزیستور اثر میدان نانونوار گرافنی، آشکارسازهایی مؤثر در محدوده FIR و THz طیف نوری طراحی و ساخته می‌شود. توانایی تغییر گاف انرژی نانونوار گرافنی با تغییر عرض نانونوار به ساخت آشکارسازهای نوری چند رنگ کمک کرده است. در این مقاله عملکرد یک فوتوترانزیستور نانونوار نیم‌رسانای گرافنی، بررسی شده و همچنین، بعضی مشخصات آن مانند جریان فوتونی، جریان تاریک و پاسخ‌دهی آن محاسبه و رسم شده است. نسبت جریان فوتونی به جریان تاریک به دست آمده برای ولتاژهای دروازه پایینی بین ۰/۵، ۱ و ۱/۵ ولت به بیش از یک مرتبه می‌رسد. بازده کوانتومی، پاسخ‌دهی و جریان نوری محاسبه شده این آشکارسازها مقادیر بالاتری از آشکارسازهای سنتی نظیرشان را نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: آشکارساز نوری، گرافن، نانونوار، چگالی جریان، تابع پاسخ دهی

*gansaripour@basu.ac.ir

شفاف بزرگ مساحت تولید کرده و همچنین آرایه‌های عمودی یا افقی منظم بسازد [۹-۱۵]. این پیشرفت برای توسعه نانواپارته‌های مجتمع بزرگ مقیاس^۳ بسیار امیدوارکننده و نشان دهنده گامی مهم به سوی کاربردهای عملی است.

آشکارسازهای فوتوالکتریک بخشی کلیدی از سیستم فوتوالکترونیک است که به طور گسترده در زمینه‌های نظامی، پزشکی و مدنی استفاده می‌شود. الزامات گسترش بیشتر محدوده پاسخ طیفی، گسترش ویژگی، و همچنین کاهش هزینه در فرآیند تولید، انگیزه توسعه ساختارهایی مانند چاه کوانتومی، نقطه کوانتومی و آشکارسازهای نوری فروسرخ IR نیمه هادی با نوار باریک شده است [۱۶، ۱۷]. در فرآیند توسعه، پتانسیل گرافن در زمینه دستگاه‌های فوتوالکتریک به دلیل ویژگی‌های الکترونیکی و نوری منحصر به فرد مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از گرافن، چشم‌انداز جذابی را در ساخت

۱- مقدمه

نانوسیم‌های نیم رسانا، نانولوله‌های گرافن و کربن (CNTs) سکوهای اساسی برای ساخت افزاره‌های نانوالکترونیکی و اپتوالکترونیکی هستند [۱-۴]. با توجه به اشکال یک یا دو بعدی آنها، یکنواختی دوربرد و مدولاسیون کنترل شده خواص الکترونیکی، جفت شدگی دستگاه کوچک مقیاس مانند سلول‌های خورشیدی پشت سرهم و مدارهای منطقی در راستای نانو ساختارهای منفرد ساخته شده است [۵، ۶]. فیلم‌های گرافنی را می‌توان به صورت نانوتئیده^۱ الگوسازی نموده یا آن‌ها به صورت نانونوارهایی برای تشکیل فیلم‌های نیمه هادی و ترانزیستورهای با کارایی بالا طراحی کرد [۷، ۸]. علاوه بر این، سنتز و فناوری‌های خودهم‌گذار^۲ اخیراً توسعه یافته می‌تواند نانوسیم‌ها/نانولوله‌های پیوسته به طول سانتی متر و فیلم‌های گرافنی

² Self-assembly techniques

³ Large-scale integrated

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۱/۱۶

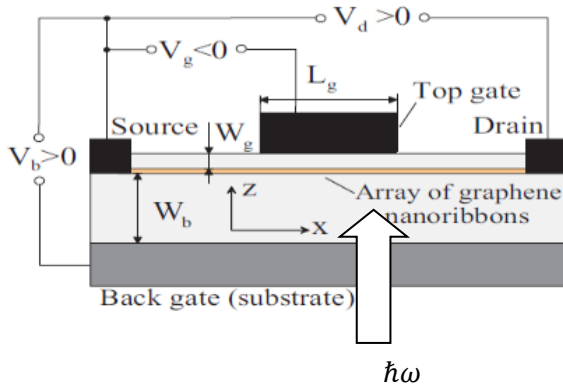
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۶/۴

¹ Nanomesh

۲- ملاحظات نظری

با توجه به شکل ۱ منطقه آشکارساز از یک بخش چند لایه ای تشکیل شده است. جذب فوتون های فرودی در چند لایه A-GNR می تواند حامل هایی را تولید کند که از ناحیه آشکارساز خارج شده و سیگنال خروجی را تولید می کند. به لحاظ قطعیت، نور ورودی را از پایین در نظر گرفته و فرض می شود بستر و لایه جاداده شده آرایه GNR شفاف هستند.



شکل(۱): نمای طرحوار از ساختار آشکارساز نوری نانونوار گرافنی.

۲-۱- طیف انرژی در نانونوار گرافن

رابطه طیف انرژی نانونوار گرافنی به صورت زیر داده می شود [۳۲]:

$$\varepsilon_n^\pm(p) = \pm v \sqrt{p^2 + (\pi \hbar / d)^2 n^2} \quad (1)$$

که در آن $v = 10^8 \text{ cm/s}$ سرعت مشخصه طیف الکترون و حفره، p تکانه، \hbar ثابت بلانک کاهش یافته و $n = 1, 2, 3, \dots$ شاخص زیرنوار و d عرض نانونوار است.

گاف نواری Δ بین نوار ظرفیت و نوار رسانش در GNR به صورت زیر داده می شود [۳۱]:

$$\Delta = 2\pi \hbar / d \quad (2)$$

از این رابطه متوجه می شویم که گاف نواری در GNR ها را می توان با تغییر عرض نانونوار d مهندسی کرد.

۲-۲- چگالی جریان چشمه-دررو در GNR

این جریان با انتشار الکترون ها از چشمه به دررو و عبور از سد در بخش مرکزی کانال حاصل می شود و به شکل زیر داده می شود [۳۱]:

دستگاه های میکرو و نانوالکترونیک، مانند، آشکارسازهای نوری باز می کند. ساخت و تحقیقات تجربی و همچنین تحلیل های نظری آشکارساز فوتوالکتریک گرافن و عملکرد G-FET ها با تشکیل پیوند جانبی n-p-n یا p-n-p در زیر دروازه کنترل کننده بالا و سد پتانسیل اخیراً گزارش شده است [۲۷-۱۸]. جریان عبوری از این سد را می توان با هر دو فرآیند گرما یونی و تونل زنی مرتبط کرد [۶-۱۰]. استفاده از گرافن طرح دار که مجموعه ای از نانونوارهای گرافن به اندازه کافی باریک را تشکیل می دهد، فرصتی برای مهندسی ساختار نواری جهت دستیابی به پارامترهای بهینه دستگاه را فراهم می کند [۳۱-۲۸].

لایه گرافن، نیمه فلز و رسانای الکتریکی است، چیزی که آن را برای کاربردهای الکترونیکی جذاب می کند این واقعیت است که گاف نواری آن را می توان با تحمیل محدودیت کوانتومی در یک جهت باز کرد. (به طور خاص، با انتخاب مناسب پهنای نانونوارها، می توان ساختارهای گرافنی با گاف نواری نسبتاً وسیع اما با تحرک الکترونی (حفره ای) نسبتاً زیاد ساخت [۳۵-۳۲]. نوارهای شبه یک بعدی گرافن دسته صندلی^۴، A-GNR، به شدت برای کاربرد بالقوه دستگاه های الکترونیک نوری مانند آشکارساز نور مادون قرمز، ترانزیستور اثر میدانی و نوسانگرهای تراهرتز کاوش شده است [۴۰-۳۶]. مطالعات گاف انرژی نشان می دهد که A-GNR ها می توانند فوتون ها را از مرئی تا مادون قرمز دور و تراهرتز جذب کند، بنابراین نامزد خوبی برای استفاده در آشکارسازهای نوری IR می باشد [۴۶-۴۱]. همچنین، به دلیل گذار بین نواری بالا، آشکارسازهای نوری IR گرافنی کارایی کوانتومی بالا نشان می دهند. مزیت اصلی آشکارسازهای نوری مادون قرمز مبتنی بر A-GNR در مقایسه با آشکارسازهای نوری سنتی مبتنی بر گاف باریک و بدون گاف مواد انبوهه مانند HgCdTe، کارکرد در دمای بالاتر به دلیل نرخ تولید حرارت کمتر آنهاست [۴۹-۴۷].

در این مقاله با استفاده از یک مدل توسعه یافته متشکل از آشکارساز نوری GNR کارایی آن را ارزیابی می کنیم [۳۱]. در این افزاره آرایه ای از نانونوارهای گرافنی با پایانه های اتصالی (به هر نانونوار) چشمه و دررو بین بستر با رسانندگی بالا و دروازه بالایی جاداده شده^۵ است (شکل ۱ را ببینید). عملکرد دستگاه هایی با ساختار مشابه اخیراً مورد بررسی قرار گرفته اند [۳۵، ۳۰، ۲۸]. مقادیر نسبت جریان فوتونی به جریان تاریک و پاسخ دهی به دست آمده در آشکارساز نوری مبتنی بر این مدل بالاتر از مقادیر نظیرشان در آشکارسازهای نوری چاه کوانتومی بین زیر نواری، نانوسیم و نقطه کوانتومی برای محدوده IR و THz است [۵۰].

⁵ Sandwiched

⁴ Armchair graphene nanoribbons

$$G_{\omega} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\beta \Delta \Theta (\hbar \omega - n \Delta) I_{\omega}}{\sqrt{\hbar^2 \omega^2 - n^2 \Delta^2} \hbar \omega} \quad (9)$$

که در آن $\beta \Delta / \sqrt{\hbar^2 \omega^2 - \Delta^2}$ بازده کوانتومی موثر و Θ تابع پله است.

۲-۵- تابع توزیع الکترون و حفره

با توجه به اینکه گاز الکترون (حفره) ناتهنگ است، تابع توزیع الکترون (حفره) در زیر نوار $n=1$ در نزدیکی چشمه و دررو به شکل زیر داده می‌شود [۳۲]:

$$f_p^{\pm} = \exp\left(\frac{\pm e \phi \pm \varepsilon_F - \sqrt{v^2 p^2 + \Delta^2/4}}{k_B T}\right) \quad (10)$$

ε_F انرژی فرمی و $\Delta = \varepsilon_{0.1}^+ - \varepsilon_{0.1}^- = 2\pi v \hbar / d$ گاف نواری است.

انرژی فرمی در چشمه آشکار ساز نانو نوار گرافنی برابر است با [۵۲]:

$$\varepsilon_F = \frac{k_B T}{[1 + (a_B/8W)]} \ln \left[\exp\left(\frac{a_B e V_b}{8W k_B T}\right) - 1 \right] \quad (11)$$

در اینجا چگالی الکترون در چشمه $\Sigma_S^- = \kappa V_b / 4\pi e W$ در نظر گرفته شده است. انرژی فرمی در چشمه تابعی خطی از V_b بوده و مستقل از دما است، و به شکل زیر داده می‌شود:

$$\varepsilon_F \approx e V_b \frac{\left(\frac{a_B}{8W}\right)}{\left[1 + \left(\frac{a_B}{8W}\right)\right]} \approx e V_b \left(\frac{a_B}{8W}\right) \gg k_B T \quad (12)$$

فوتوالکترون‌ها^۶ به سرعت توسط میدان الکتریکی جانبی (در امتداد نانو نوارها) از بخش مرکزی کانال خارج می‌شوند، در حالی که حفره‌های نوری در این بخش گیر می‌افتند، چگالی حفره را می‌توان با در نظر گرفتن تعادل بین تولید فوتونی و نشت آنها به مناطق چشمه و دررو پیدا کرد. لذا معادله حاکم بر تعادل حفره‌های نوری و حفره‌های حرارتی در ناحیه تهی کانال به صورت زیر داده می‌شود [۳۱]:

$$v_T \Sigma_g \exp\left(\frac{\Delta_B}{k_B T}\right) \left[1 + \exp\left(-\frac{e V_d}{k_B T}\right)\right] = G_{\omega} L_g \quad (13)$$

که در آن Σ_g چگالی حفره‌های فوتونی کانال زیر دروازه بالایی، G_{ω} نرخ تولید حفره‌های فوتونی و L_g طول دروازه بالایی است. قسمت سمت چپ این معادله نرخ حفره‌هایی است که از منطقه تهی شده خارج می‌شوند در حالی که سمت راست این معادله نرخ خالص حفره‌های فوتونی این منطقه است.

با در نظر گرفتن معادله (۱۳) و با توجه به اینکه در تقریب کانال تدریجی^۷ $\phi_m \propto \Sigma_g$ [۳۲]، تفاوت ارتفاع سد در بخش مرکزی کانال Δ_B و ارتفاع همان سد در شرایط تاریکی Δ_B^{dark} را می‌توان به شکل زیر بدست آورد [۳۱]:

$$J = e \sum_b v_T \exp\left(-\frac{\Delta_B}{k_B T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{e V_d}{k_B T}\right)\right] \quad (3)$$

که در آن $\Sigma_b = (a e V_b / 4\pi e W b)$ چگالی الکترون القا شده در کانال توسط ولتاژ دروازه پایین، e بار الکترون، T دمای مطلق و k_B ثابت بولتزمن، v_T سرعت گرمایی الکترون و Δ_B ارتفاع سد در بخش مرکزی کانال، V_b و V_g به ترتیب ولتاژهای دروازه پایین و بالا است.

با افزایش ولتاژ دروازه پایین، جریان چشمه - دررو به دلیل افزایش در چگالی الکترون در طول کانال افزایش می‌یابد [۳۲]

۲-۳- چگالی جریان تاریکی

در غیاب تابش، جریان الکتریکی کوچکی به نام جریان تاریک وجود دارد که به صورت زیر است:

$$j^{\text{dark}} = v \left(\frac{a e V_b}{2\pi^{3/2} W b}\right) \sqrt{\frac{k_B T}{\Delta}} \times \exp\left(\frac{\Delta_B^{\text{dark}}}{k_B T}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{e V_d}{k_B T}\right)\right] \quad (4)$$

که در آن

$$\Delta_B^{\text{dark}} = -e \left[\frac{W_b W_g}{(W_b + W_g)}\right] \left(\frac{V_b}{W_b} + \frac{V_g}{W_g}\right) \quad (5)$$

ارتفاع در بخش مرکزی کانال در شرایط تاریکی و a ثابت دی الکتریک است.

۲-۴- جریان فوتونی

این جریان را می‌توان با کم کردن معادله (۴) از معادله (۳) به دست آورد

$$\Delta J = J - J^{\text{dark}}$$

و یا:

$$\Delta J \approx \frac{[1 - \exp(-e V_d / k_B T)]}{[1 + \exp(-e V_d / k_B T)]} \left(\frac{W}{W_b}\right) L_g G_{\omega} \left(\frac{e^2 V_b}{k_B T}\right) \quad (6)$$

که در آن $G_{\omega} = \alpha_{\omega} I_{\omega}$ نرخ تولید فوتونی، I_{ω} شدت تابش، c سرعت نور و α_{ω} برابر است با:

$$\alpha_{\omega} = \left(\frac{4\pi}{c \omega \hbar}\right) \text{Re} \sigma_{\omega}^{\text{inter}} \quad (7)$$

که در آن $\text{Re} \sigma_{\omega}^{\text{inter}}$ قسمت حقیقی رسانایی بین نواری و به صورت زیر داده می‌شود [۱۳]:

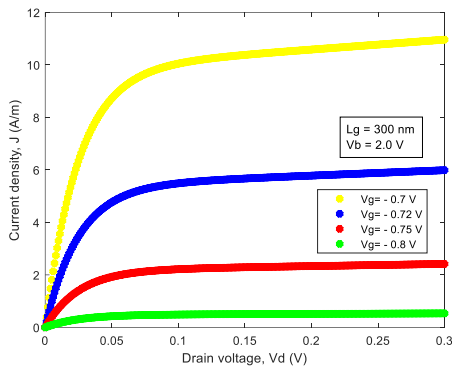
$$\text{Re} \sigma_{\omega}^{\text{inter}}(\omega) = \left(\frac{e^2}{2\hbar}\right) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta \Theta(\hbar \omega - \Delta_n)}{\sqrt{\hbar^2 \omega^2 - \Delta_n^2}} \quad (8)$$

و از معادلات (۷) و (۸) G_{ω} نرخ تولید فوتونی برابر است با:

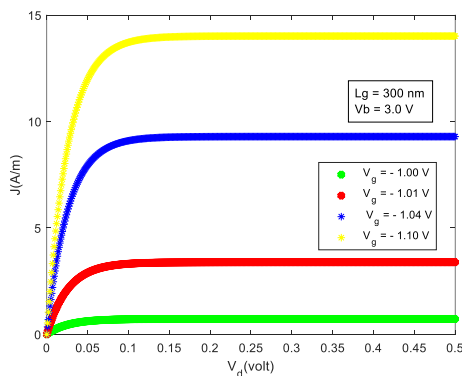
⁷ Gradual channel approximation

⁶ Photo electrons

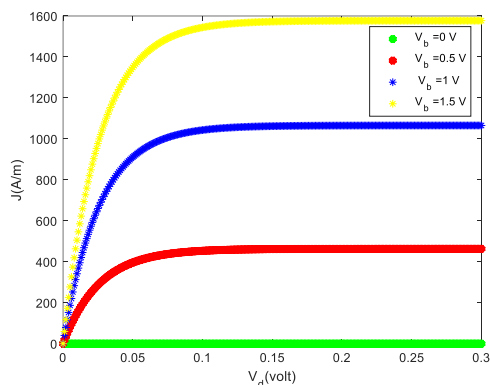
تولید جفت‌های الکترون و حفره منجر میشود. تعداد جفت‌های الکترون - حفره تولید شده متناسب با مقدار انرژی انتقالی از تابش به نانونوار گرافنی است.



شکل (۲): نمودار تغییرات چگالی جریان J در یک GNR-PT بر حسب ولتاژ دررو V_d برای مقادیر مختلف ولتاژ دروازه بالا V_g در $V_b = 2V$ و $L_g = 300 \text{ nm}$



شکل (۳): نمودار تغییرات چگالی جریان J در یک GNR-PT بر حسب ولتاژ دررو V_d برای مقادیر مختلف ولتاژ دروازه بالا V_g در $V_b = 3V$ و $L_g = 300 \text{ nm}$



شکل (۴): نمودار تغییرات چگالی جریان J در یک GNR-PT بر حسب ولتاژ دررو V_d برای مقادیر مختلف ولتاژ دروازه پایین V_b و در $V_g = -0.7 \text{ V}$

چگالی جریان چشمه - دررو در کانال GNR ناشی از انتشار الکترون‌ها از چشمه به دررو و عبور از سد پتانسیل در بخش مرکزی کانال است. از

$$\Delta_B - \Delta_B^{\text{dark}} \approx -\frac{4\pi e^2 W}{\epsilon} \Sigma_g \approx -\frac{4\pi e^2 L_g W}{\epsilon v_T} \times \frac{\exp(\Delta_B^{\text{dark}}/k_B T)}{[1 + \exp(-eV_d/k_B T)]} G_\omega \quad (14)$$

که در آن $W = W_b W_g / (W_b + W_g)$. معادله بالا در صورتی معتبر است که چگالی الکترون در بخش کانال زیر دروازه بالایی کوچک باشد.

پتانسیل الکتریکی Φ ، چگالی الکترون Σ^d و Σ^s و انرژی فرمی در ناحیه چشمه و دررو توسط معادلات زیر به یکدیگر مرتبط هستند [۳۲]:

$$\Sigma_{\mp}^s = \frac{2\sqrt{\Delta k_B T}}{\sqrt{\pi \hbar} dv} \exp\left(\pm \frac{\epsilon_F^s + e\phi}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{\Delta}{2k_B T}\right)$$

$$\Sigma_{\mp}^d = \frac{2\sqrt{\Delta k_B T}}{\sqrt{\pi \hbar} dv} \exp\left(\pm \frac{\epsilon_F^d + e(\phi - V_d)}{k_B T}\right) \exp\left(-\frac{\Delta}{2k_B T}\right) \quad (15)$$

۲-۶- پاسخ دهی فوتوترانزیستور

پاسخ‌دهی به عنوان نسبت جریان الکتریکی به وجود آمده به توان

نور فرودی تعریف می‌شود، و به شکل زیر داده می‌شود [۳۱، ۵۳]:

$$R = \Delta J / L_g I_\omega$$

$$R \approx \left(\frac{W}{W_b}\right) \left(\frac{eV_b}{k_B T}\right) \left[\frac{1 - \exp(-eV_d/k_B T)}{1 + \exp(-eV_d/k_B T)}\right] \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{e\beta\Delta\theta(\hbar\omega - n\Delta)}{\hbar\omega\sqrt{\hbar^2\omega^2 - n^2\Delta^2}} \quad (16)$$

این معادله نشان می‌دهد که پاسخ دهی GNR-PT مستقل از Δ_B^{dark} است.

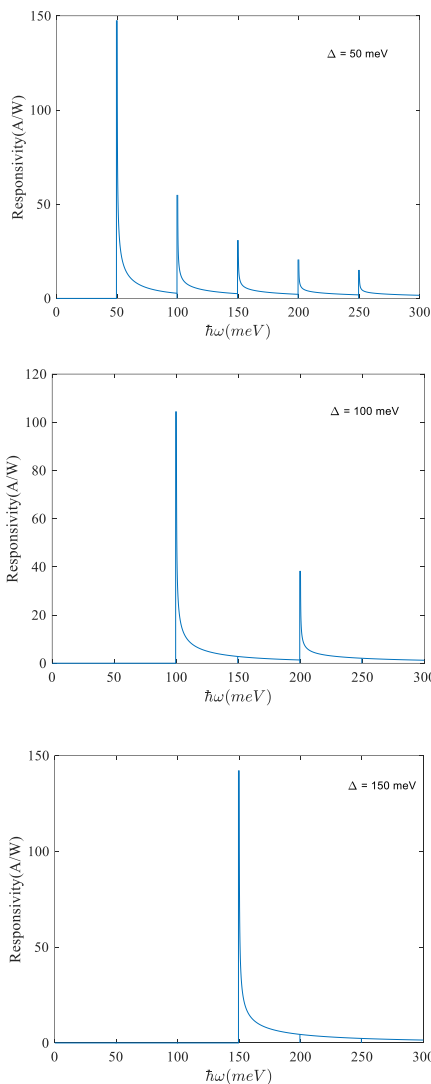
۳- نتایج و بحث

۳-۱- محاسبه و رسم شکل‌ها

در تمام محاسبات زیر کد نوشته شده برای ترانزیستور GNR-PTs با استفاده از نرم افزار متلب می باشد. شکل (۲) منحنی تغییرات چگالی جریان J بر حسب ولتاژ دررو V_d برای مقادیر مختلف ولتاژ دروازه بالا $V_g = -0.7, -0.72, -0.75, -0.8 \text{ V}$ در ولتاژ دروازه پایین $V_b = 2 \text{ V}$ محاسبه و رسم شده است. شکل (۳) مانند شکل (۲) ولی برای مقادیر مختلف ولتاژ دروازه بالایی

$V_b = 3 \text{ V}$ و ولتاژ دروازه پایین $V_g = -1, -1.01, -1.04, 1.10 \text{ V}$ می‌باشد. روند تغییرات نتایج شکل‌های ۳ و ۲ شبیه منابع [۳۱، ۳۲، ۵۴] می‌باشند.

هم چنین در شکل (۴) نمودار تغییرات چگالی جریان J در یک GNR-PT بر حسب ولتاژ دررو V_d برای مقادیر مختلف ولتاژ دروازه پایین V_b و در مقدار ثابت $V_g = -0.7 \text{ V}$ رسم شده است. جریان چشمه - دررو J در GNR-PT از جفت الکترون - حفره های تولید شده توسط فوتون‌ها ناشی می‌شود. آن جایی که نور با انرژی کافی به مواد نیم رسانا یا نانونوار گرافنی برخورد میکند، منجر به انتقال الکترون‌ها از نوار ظرفیت به نوار رسانا میشود، که به



شکل (۶): نمودار تغییرات پاسخدهی R بر حسب انرژی نور فرودی $\hbar\omega$ و گاف انرژی از بالا به پایین به ترتیب $\Delta = 50, 100, 150$ meV در یک ترانزیستور GNR-PT

GNR-PT را نمایش می دهد. در یک افزاره نوری نانونوار گرافنی $\Delta = 50, 100, 150$ meV

پاسخدهی بیشینه در $\Delta \leq \hbar\omega$ و نسبت آن به پاسخ دهی کمینه در $\hbar\omega \geq 2\Delta$ می توان به ترتیب به صورت به دست آورد:

$$\frac{\max R}{\min R} \approx \sqrt{\frac{6\Delta}{\Gamma}}$$

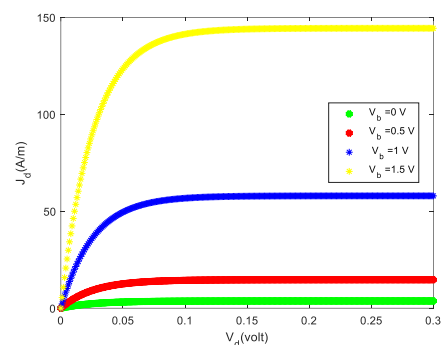
$$\max R \approx \frac{e\beta}{2\sqrt{2}\Gamma\Delta} \left(\frac{eV_b}{k_B T}\right) \propto \Delta^{-\frac{1}{2}} T^{-1} \quad (17)$$

بیشینه پاسخ دهی به دست آمده برای مقادیر

$$V_b = 4.5 \text{ V}, \Delta = 0.1 \text{ eV}, \Gamma = 2 \times 10^{-3} \text{ eV}, T = 300 \text{ K}, k_B = 0.8625 \times 10^{-4} \text{ eV mole}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

نمودارهای (۳-۴)، متوجه می شویم که در ناحیه فعال، تابع J با افزایش ولتاژ V_d افزایش می یابد و در ناحیه اشباع، تابع J با وجود افزایش V_d ثابت مانده و اینکه جریان اشباع دررو از ولتاژهای دررو نسبتاً پایینی شروع می شود. این نتیجه حساسیت بسیار ضعیف سد پتانسیل برای الکترون هایی است که از چشمه به ولتاژ دررو پخش می شوند. از شکل (۴) ملاحظه می شود که با افزایش ولتاژ دروازه پایینی V_b ، جریان چشمه - دررو به دلیل افزایش چگالی الکترون در طول کانال افزایش می یابد [۳۲، ۳۱].

در شکل (۵) چگالی جریان تاریک J_{dark} را بر حسب ولتاژ چشمه - دررو V_d رسم و نشان داده شده است.



شکل (۵): نمودار تغییرات چگالی جریان تاریک J_{dark} در یک GNR-PT بر حسب ولتاژ دررو V_d برای مقادیر مختلف ولتاژ دروازه پایین V_b

در غیاب تابش، جریان الکتریکی کوچکی به نام جریان تاریک وجود دارد. جریان تاریک مربوط به حرارت ایجاد شده و تونل زنی بین نواری است [۴۹]. متوجه می شویم که در ناحیه فعال، تابع J با زیاد شدن ولتاژ V_d افزایش می یابد و در ناحیه اشباع، تابع J با وجود افزایش V_d ثابت مانده و در ناحیه قطع هیچ جریانی عبور نمی کند. با تغییر ولتاژ دروازه V_b ، منحنی نیز تغییر می کند. با مقایسه این شکل با شکل (۴)، متوجه می شویم که مقادیر J_{dark} بسیار کوچکتر از J است به گونه ای که برای ولتاژ دروازه پایینی بین ۰.۵ تا ۱.۵ ولت نسبت جریان فوتونی به جریان تاریک در گستره ۱۰-۲۷ تغییر می کند. شکل های (۶) منحنی های تغییرات تابع پاسخدهی R بر حسب انرژی نور فرودی $\hbar\omega$ و گاف های انرژی از بالا به پایین به ترتیب برابر

doi: [10.1126/science.1158877](https://doi.org/10.1126/science.1158877)

[4] Q. Cao, J. A. Rogers, "Ultrathin films of single-walled carbon nanotubes for electronics and sensors: A review of fundamental and applied aspects," *Advanced materials*, 21, 29–53, 2009. doi: [10.1002/adma.200801995](https://doi.org/10.1002/adma.200801995)

[5] T. J. Kempa, B. Z. Tian, D. R. Kim, J. S. Hu, X. L. Zheng, C. M. Lieber, "Single and tandem axial p-i-n nanowire photo voltaic devices," *Nano letters*, 8, 3456–3460, 2008. doi: [10.1021/nl8023438](https://doi.org/10.1021/nl8023438)

[6] Z. H. Chen, J. Appenzeller, Y. M. Lin, J. Sippel-Oakley, A. G. Rinzier, J. Y. Tang, S. J. Wind, P. M. Solomon, P. Avouris, "An integrated logic circuit assembled on a single carbon nanotube," *Science*, 311, 1735, 2006.

doi: [10.1126/science.1122797](https://doi.org/10.1126/science.1122797)

[7] J. W. Bai, X. Zhong, S. Jiang, Y. Huang, X. F. Duan, "Graphene nanomesh," *Nature nanotechnology*, 5, 190–194, 2010.

doi: [10.1038/nindia.2010.187](https://doi.org/10.1038/nindia.2010.187)

[8] X. L. Li, X. R. Wang, L. Zhang, S. W. Lee, H. J. Dai, "Chemically derived, ultra smooth graphene nanoribbon semiconductors," *Science*, 319, 1229–1232, 2008. doi: [10.1126/science.1150878](https://doi.org/10.1126/science.1150878)

[9] T. Y. Zhai, H. M. Liu, H. Q. Li, X. S. Fang, M. Y. Liao, L. Li, H. S. Zhou, Y. Koide, Y. Bando, D. Goberg, "Centimeter-long V2O5 nanowires: From synthesis to field emission, electrochemical, electrical transport, and photoconductive properties," *Advanced materials*, 22, 2547–2552, 2010. doi: [10.1002/adma.200903586](https://doi.org/10.1002/adma.200903586)

[10] Q. Wen, W. Z. Qian, J. Q. Nie, A. Y. Cao, G. Q. Ning, Y. Wang, L. Hu, Q. Zhang, J. Q. Huang, F. Wei, "100 mm Long, semiconducting triple-walled carbon nanotubes," *Advanced materials*, 22, 1867–1871, 2010. doi: [10.1002/adma.201090053](https://doi.org/10.1002/adma.201090053)

[11] X. S. Wang, Q. Q. Li, J. Xie, Z. Jin, J. Y. Wang, Y. Li, K. L. Jiang, S. S. Fan, "Fabrication of ultralong and electrically uniform single-walled carbon nanotubes on clean substrates," *Nano letters*, 9, 3137–3141, 2009. doi: [10.1021/nl901260b](https://doi.org/10.1021/nl901260b)

[12] S. Bae, H. Kim, Y. Lee, X. F. Xu, J. S. Park, Y. Zheng, J. Balakrishnan, T. Lei, H. R. Kim, Y. I. Song, Y. J. Kim, K. S. Kim, B. Ozyilmaz, J. H. Ahn, B. H. Hong, S. Iijima, "Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes. *Nature nanotechnology*, 5, 574–578, 2010. doi: [10.1038/nnano.2010.132](https://doi.org/10.1038/nnano.2010.132)

[13] X. S. Li, W. W. Cai, J. H. An, S. Kim, J. Nah, D. X. Yang, R. Piner, A. Velamakanni, I. Jung, E. Tutuc, S. K. Banerjee, L. Colombo, R. S. Ruoff, "Large-area synthesis of high-quality and uniform graphene films on copper foils," *Science*, 324, 1312–1314, 2009. doi: [10.1126/science.1171245](https://doi.org/10.1126/science.1171245)

[14] L. G. De Arco, Y. Zhang, C. W. Schlenker, K. Ryu, M. E. Thompson, C. W. Zhou, "Continuous highly flexible, and transparent graphene films by chemical

برابر $R = 207$ می باشد. پاسخ دهی به دست آمده به طور قابل توجهی بالاتر از مقادیر نظیرشان در آشکارسازهای نوری چاه کوانتومی بین زیر نوری، نانوسیم کوانتومی و نقطه کوانتومی برای محدوده IR و THz است [۵۰]. پدیده جالب توجه در نمودارهای شکل ۶ مشاهده تشدید در فوتونهای فرودی است که انرژی شان مضرب درستی از گاف نوری کانال افزاره است. بیشینه پاسخدهی GNR-PT ها می تواند از میزان پاسخدهی آشکارسازهای فوتونی معمول ساخته شده از نیمه هادی های با شکاف باریک مانند CdHgTe و PbSnTe فراتر بروند زیرا آنها می توانند بازده کوانتومی نسبتاً بالایی با تشدید در انرژیهای $\hbar\omega = n\Delta$ ناشی از کوانتس افقی نشان دهند (شکل ۶ را ببینید).

۴- نتیجه گیری

مشاهده شد که پرتوهای FIR و THz فرودی بر روی افزاره نانونوار گرافنی دسته صندلی (A-GNR) منجر به تولید چگالی جریان الکتریکی J بین چشمه و دررو می شود. این جریان با تغییر ولتاژ دررو V_d در ناحیه فعال ترانزیستور تغییر می کند و در ناحیه اشباع ثابت می ماند. این دستگاه به دلیل گاف انرژی قابل تنظیم با تغییر عرض نانونوار گرافنی و اینکه قادر به جذب فوتون ها از مرئی تا مادون قرمز دور و تراهرتز هستند نامزدهای برتر برای استفاده در آشکارسازهای نوری IR و THz به شمار می روند. با استفاده از یک مدل، مشخصه یابی دستگاه GNR-PT شامل ارزیابی نسبت جریان فوتونی به جریان تاریکی و پاسخ دهی انجام شد. نشان داده شد که-GNR PT ها می توانند از انواع دیگر آشکارسازهای IR و THz ساختارهای کوانتومی (به ویژه، ردیاب های چاه کوانتومی نوری، سیمی و نقطه ای) پیشی گیرند. این GNR-PT ها می توانند بهره وری های فناورانه قابل توجهی از جمله ادغام با مدارهای بازخوانی، بر روی آشکارسازهای متشکل از نیمه هادی های با گاف باریک نشان دهند.

مراجع

[1] P. D. Yang, R. X. Yan, M. Fardy, "Semiconductor nanowire: What's next?," *Nano letters*, 10, 1529–1536, 2010.

doi: [10.1016/j.nxmate.2023.100014](https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2023.100014)

[2] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, A. A. Firsov, "Electric field effect in atomically thin carbon films," *Science*, 306, 666–669, 2004. doi: [10.1126/science.1102896](https://doi.org/10.1126/science.1102896)

[3] A. K. Geim, "Graphene: Status and prospects," *Science*, 324, 1530–1534, 2009.

- [27] B. Huard, J. A. Sulpizio, N. Stander, K. Todd, B. Yang, and D. G. Gordon, "Transport measurements across a tunable potential barrier in graphene," *Physical review letters*, 98, 236803, 2007. doi.org/10.1103/PhysRevLett.98.236803
- [28] V. V. Cheianov and V. I. Falko, "Selective transmission of Dirac electrons and ballistic magnetoresistance of $n - p$ junctions in graphene," *Physical review B*, 74, 041403, 2006. doi: [10.1103/physrevb.74.041403](https://doi.org/10.1103/physrevb.74.041403)
- [29] A. Ossipov, M. Titov, and C. W. J. Beenakker, "Excitation gap of a graphene channel with superconducting boundaries," *Physical review B*, 75, 241401, 2007. doi: [10.1103/physrevb.75.045417](https://doi.org/10.1103/physrevb.75.045417)
- [30] L. M. Zhang and M. M. Fogler, "Nonlinear Screening and Ballistic Transport in a Graphene $p - n$ Junction," *Physical review letters*, 100, 116804, 2008. doi: [10.1103/physrevlett.100.116804](https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.116804)
- [31] V. Ryzhii, V. Mitin, M. Ryzhii, N. Ryabova, T. Otsuji, "Device model for graphene nanoribbon phototransistor," *Applied physics express*, 1, 063002, 2008. doi: [10.1143/apex.1.063002](https://doi.org/10.1143/apex.1.063002)
- [32] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, "Current-voltage characteristics of a graphene-nanoribbon field-effect transistor," *Journal of applied physics*, 103, 094510, 2008. doi: [10.1063/1.2917284](https://doi.org/10.1063/1.2917284)
- [33] B. Obradovic, R. Kotlyar, F. Heinz, P. Matagne, T. Rakshit, M. D. Giles, M. A. Stettler, and D. E. Nikonov, "Analysis of graphene nanoribbons as a channel material for field-effect transistors," *Applied physics letters*, 88, 142102, 2006. doi: [10.1063/1.2191420](https://doi.org/10.1063/1.2191420)
- [34] J. Hass, R. Feng, T. Li, X. Li, Z. Zong, W. A. de Heer, P. N. First, E. H. Conrad, C. A. Jeffrey, and C. Berger, "The growth and morphology of epitaxial multilayer graphene," *Applied physics letters*, 89, 143106, 2006. doi: [10.1088/0953-8984/20/32/323202](https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/32/323202)
- [35] Z. Chen, Y.-M. Lin, M. J. Rook, and P. Avouris, "Graphene nano-ribbon electronics," *Physica E Amsterdam*, 40, 228, 2007. doi: [10.1016/j.physe.2007.06.020](https://doi.org/10.1016/j.physe.2007.06.020)
- [36] L. Ju, et al., "Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials," *Nature nanotechnology*, 6, 630–634, 2011. doi: [10.1038/nnano.2011.146](https://doi.org/10.1038/nnano.2011.146)
- [37] M. Cheli, G. Fiori, and G. Iannaccone, "model of bilayer graphene field-effect Semi analytical transistor," *IEEE Transaction electronic devices* 56, 2979–2986, 2009. doi: [10.1109/ted.2009.2033419](https://doi.org/10.1109/ted.2009.2033419)
- [38] B. Chitara, L. S. Panchakarla, S. B. Krupanidhi, and C. N. R. Rao, "Infrared photodetectors based on reduced graphene oxide and graphene nanoribbons," *Advanced materials*, 23, 5419–5424, (2011). doi: [10.1002/adma.201101414](https://doi.org/10.1002/adma.201101414)
- vapor deposition for organic photovoltaics," *ACS Nano*, 4, 2865–2873, 2010. doi: [10.1021/nn901587x](https://doi.org/10.1021/nn901587x)
- [15] L. Zhang, L. Fan, Z. Li, E. Shi, X. Li, H. Li, A. Cao, "Graphene-CdSe nanobelt solar cells with tunable configurations," *Nano research*, 4, 891-900, 2011. doi: [10.1007/s12274-011-0145-6](https://doi.org/10.1007/s12274-011-0145-6)
- [16] J. Wu, S. M. Chen, A. Seeds, and H. Y. Liu, Quantum dot optoelectronic devices: "Lasers, photodetectors and solar cells," *Journal of physics D: Applied physics*, 48, 363001, 2015. doi: [10.1088/0022-3727/48/36/363001](https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/36/363001)
- [17] C. Franke, M. Walther, M. Helm, and H. Schneider, "Two-photon quantum well infrared photodetectors below 6 THz," *Infrared physics & technology*, 70, 30, 2015. doi: [10.1016/j.infrared.2014.08.012](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2014.08.012)
- [18] A. Tomadin, A. Tredicucci, V. Pellegrini, M. S. Vitiello, and M. Polini, "Photocurrent-based detection of terahertz radiation in graphene," *Applied physics letters*, 103, 211120 (2013). doi: [10.1063/1.4831682](https://doi.org/10.1063/1.4831682)
- [19] Y. P. Hsieh, C. H. Yen, P. S. Lin, S. W. Ma, C. C. Ting, C. I. Wu, and M. Hofmann, "Ultra-high sensitivity graphene photosensors," *Applied physics letters*, 104, 041110 (2014). doi: [10.1063/1.4863441](https://doi.org/10.1063/1.4863441)
- [20] M. Zhu, X. Li, Y. Guo, X. Li, P. Sun, X. Zang, and H. Zhu, "Vertical junction photodetectors based on reduced graphene oxide/silicon Schottky diodes," *Nanoscale* 6, 4909 (2014). doi: [10.1039/c4nr00056k](https://doi.org/10.1039/c4nr00056k)
- [21] M. Zhu, L. Zhang, X. Li, Y. He, X. Li, F. Guo, and B. J. Wei, "TiO₂ enhanced ultraviolet detection based on a graphene/Si Schottky diode," *Material Chemistry A*, 3, 8133, 2015. doi: [10.1039/c5ta00702j](https://doi.org/10.1039/c5ta00702j)
- [22] J. Wang, Z. Cheng, Z. Chen, J. B. Xu, H. K. Tsang, and C. Shu, "Graphene photodetector integrated on silicon nitride waveguide," *Journal of applied physics*, 117, 144504, 2015. doi: [10.1063/1.4917378](https://doi.org/10.1063/1.4917378)
- [23] T. J. Echtermeyer, P. S. Nene, M. Trushin, R. V. Gorbachev, A. L. Eiden, S. Milana, and A. C. Ferrari, "Photo thermoelectric and photoelectric contributions to light detection in metal-graphene-metal photodetectors," *Nano letters*, 14, 3733-3742, 2014. doi: [10.1021/nl5004762](https://doi.org/10.1021/nl5004762)
- [24] H. Liu, Y. Niu, Y. Yin, S. Liu, "Modeling of the photodetector based on the multilayer graphene nanoribbons," *AIP advances*, 6, 075205, 2016. doi: [10.1063/1.4958879](https://doi.org/10.1063/1.4958879)
- [25] Z.X. Chen, J.H. Chen, Z.J. Wu, W. Hu, X.J. Zhang, and Y.Q. Lu, "Tunable Fano resonance in hybrid graphene-metal gratings," *Applied physics letters*, 104, 161114, 2014. doi: [10.1063/1.4873541](https://doi.org/10.1063/1.4873541)
- [26] B. Zhao, J. M. Zhao, and Z. M. Zhang, "Enhancement of near-infrared absorption in graphene with metal gratings," *Applied physics letters*, 105, 031905 (2014). doi: [10.1063/1.4890624](https://doi.org/10.1063/1.4890624)

- [51] L. A. Falkovsky, A. A. Varlamov, "Space-time dispersion of graphene conductivity," *The european physical journal b*, 56, 281-284, 2007. [doi: 10.1140/epjb/e2007-00142-3](https://doi.org/10.1140/epjb/e2007-00142-3)
- [52] V. Ryzhii, M. Ryzhii, A. Satou, T. Otsuji, N. Kirova, "Device model for graphene bilayer field-effect transistor," *Journal of applied physics*, 105, 104510, 2009. [doi: 10.1063/1.3131686](https://doi.org/10.1063/1.3131686)
- [53] A. Candini, L. Martini, Z. Chen, N. Mishra, D. Convertino, C. Coletti, M. Affronte, "High photoresponsivity in graphene nanoribbon field-effect transistor devices contacted with graphene electrodes," *Journal of physical chemistry C*, 121, 10620-10625, 2017. [doi: 10.1021/acs.jpcc.7b03401](https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b03401)
- [54] V. Ryzhii, I. Khmyrova, M. Ryzhii, V. Mitin, "Comparison of dark current, responsivity and detectivity in different intersubband infrared photodetectors," *Semiconductor science technology*, 19, 8, 2003. [doi: 10.1088/0268-1242/19/1/002](https://doi.org/10.1088/0268-1242/19/1/002)
- [39] V. Ryzhii, M. Ryzhii, V. Mitin, and M. S. Shur, "Graphene tunneling transit-time terahertz oscillator based on electrically induced p-i-n Junction," *Applied physics express*, 2, 034503, 2009. [doi: 10.1143/apex.2.034503](https://doi.org/10.1143/apex.2.034503)
- [40] V. Ryzhii and M. Ryzhii, "Graphene bilayer field-effect phototransistor for Terahertz and infrared detection," *Physical review B*, 79, 245311, 2009. [doi: 10.1103/physrevb.79.245311](https://doi.org/10.1103/physrevb.79.245311)
- [41] F. Xia et al., "Photocurrent imaging and efficient photon detection in a graphene transistor," *Nano letters* 9, 1039-1044, 2009. [doi: 10.1021/nl8033812](https://doi.org/10.1021/nl8033812)
- [42] T. Mueller, F. Xia, M. Freitag, J. Tsang, and Ph. Avouris, "Role of contacts in graphene transistors: A scanning photocurrent study," *Physical review B*, 79, 245430, 2009. [doi: 10.1103/physrevb.79.245430](https://doi.org/10.1103/physrevb.79.245430)
- [43] T. Mueller, F. Xia, and P. Avouris, "Graphene photodetectors for highspeed optical communications," *Nature photonics* 4, 297-301, 2010. [doi: 10.1038/nphoton.2010.40](https://doi.org/10.1038/nphoton.2010.40)
- [44] M. Ryzhii and V. Ryzhii, "Electrically induced n-i-p junctions in multiple graphene layer structures," *Physical review B*, 82, 075419, 2010. [doi: 10.1103/physrevb.82.075419](https://doi.org/10.1103/physrevb.82.075419)
- [45] V. Ryzhii, M. Ryzhii, N. Ryabova, V. Mitin, I. Otsuji, "Graphene Nanoribbon phototransistor: properties and analysis," *Japanese journal of applied physics*, 48, 04C144, 2009. [doi: 10.1143/jjap.48.04c144](https://doi.org/10.1143/jjap.48.04c144)
- [46] E. Ahmadi and A. Asgari, "Theoretical calculation of optical absorption spectrum for armchair graphene nanoribbon," in *Proceeding of I-SEEC Conference*, Nakhon Phanom, Thailand, 2010. [doi: 10.1016/j.proeng.2011.03.005](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.03.005)
- [47] W. D. Hu, X. S. Chen, Z. H. Ye, and W. Lu, "A hybrid surface passivation on HgCdTe long wave infrared detector with in-situ CdTe deposition and high-density hydrogen plasma modification," *Applied physics letters*, 99, 091101, 2011. [doi: 10.1063/1.3633103](https://doi.org/10.1063/1.3633103)
- [48] W. D. Hu, X. S. Chen, Z. H. Ye, J. Z. F. Yin, C. Lin, Z. Li, and W. Lu, "Accurate simulation of temperature-dependent dark current in HgCdTe infrared detectors assisted by analytical modeling," *Journal of electronic materials*, 39, 981-985, 2010. [doi: 10.1007/s11664-010-1121-8](https://doi.org/10.1007/s11664-010-1121-8)
- [49] E. Ahmadi, A. Asgari, "Modeling of the infrared photodetector based on multilayer armchair graphene nanoribbons," *Journal of applied physics*, 113, 093106, 2013. [doi: 10.1063/1.4794494](https://doi.org/10.1063/1.4794494)
- [50] V. Ryzhii, "Intersubband Infrared Photodetectors," *World Scientific*, Singapore, 2003. doi.org/10.1142/5223



Theoretical investigation of operation of graphene nanoribbon photodetectors in the range of infrared and terahertz

Ghassem Ansaripour*, Nawar Daood

Department of Physics, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan 65174, I. R. Iran

Abstract: For far infrared (FIR) and terahertz (THz) spectrum, the photodetectors conventionally are made from narrow gap semiconductors and quantum well structures. These detectors operate by electron (hole) transition via intra-band (inter-subband) on the basis of quantum well structures. Nowadays using the graphene nanoribbon field effect transistors effective detectors in the range FIR and THz optical spectrum designed and fabricated. The ability to change the bandgap of graphene nanoribbon by altering nanoribbon width has aided multicolor optical detectors to be made. In this paper the operation of a graphene semiconductor nanoribbon phototransistor has been investigated and also some of its characteristics like photonic current, dark current and responsivity has been calculated and plotted. The obtained ratio of the photonic current to dark current for the back gate voltages at 0.5, 1, and 1.5 V reaches to more than one order. The calculated quantum efficiency, responsivity and photonic current of these photodetectors show higher quantities than that of conventional photodetectors.

Keywords: Photodetector, Graphene, Nanoribbon, Current density, Responsivity function