بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

بررسی تاثیر برخورد یونیزه کننده در ترانزیستور نوری مبتنی بر نانو روبان گرافن

محسن حیدری، عباس ظریفکار و محمد حسین شیخی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز

چکیده – ما دراین مقاله برای نخستین بار، تاثیر برخورد یونیزه کننده بر افزایش بهره نوری ترانزیستور نوری مبتنی بر نانو روبان گرافن را بررسی می کنیم. ترانزیستوری نوری که بررسی می کنیم، بر پایه آرایه ای از نانو روبان های گرافن شکل گرفته و گیت زبرین و گیت زیرین، افزایش بهره نوری ناشی از تکثیر حامل ها را به شدت کنترل می کند. مشاهده می شود که تکثیر حامل ها به ازای ولتاژ معمولی درین نیز، رخ می دهد. بنابراین صرفنظر کردن از برخورده یونیزه کننده، خطای بزرگی در محاسبه جریان نوری به همراه خواهد داشت.

کلید واژه- برخورد یونیزه کننده، ترانزیستور نوری، تکثیر حامل ها، نانو روبان گرافن.

Investigation of the Impact Ionization Effect In Graphene Nanoribbon-based Phototransistor

Mohsen Heidari, Abbas Zarifkar, and Mohammad Hossein Sheikhi

The School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University, Shiraz.

Abstract- In this paper we investigate the effect of impact ionization in graphene nanoribbon-based phototransitor for the first time.We consider a phototransistor based on an array of graphene nanoribbons in which the top gate and the back gate control the carrier multiplication and optical gain. Impact ionization and carrier multiplication occur in moderate drain voltages. So, elimination of the impact ionization in photocurrent calculation causes a big error.

Keywords: Carrier Multiplication, Graphene Nanoribbon, Impact Ionization, Phototransistor.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۱- مقدمه

گرافن با توجه به ویژگی های الکترونیکی و نوری منحصر به فردی که دارد، پژوهش های گسترده ای را در سال های اخیر به خود اختصاص داده است. گرافن لایه ای کربنی با ضخامت یک اتم است. گرافن بیشترین تحرک حامل ها را در بین نیمه هادی ها داراست و تحرک حامل ها در آن به بیش از $۲۰۰۰۰۰ \ cm^2v^{-1}s^{-1}$ می رسد. همچنین گرافن تک لایه در حدود ۲.۳٪ از نور فرودی را در بازه وسیعی از طیف الکترومغناطیسی جذب می کند که بیش از ۵۰ برابر گالیم-آرسناید با ضخامت مشابه است[۱].

در سال های اخیر، گرافن را به صورت نوارهای باریکی در آورده اند که در بعضی موارد، خواص متفاوتی از خود نشان می دهد. خواص الکترونیکی نانو روبان از جمله گاف انرژی آن، به عرض نانو روبان و بردار کایرال آن وابسته است. خواص نوری نانو روبان نیز، متاثر از گاف انرژی است[۲].

برخورد یونیزه کننده در گرافن که در اثر برهمکنش بین باندی حامل ها در حضور میدان الکتریکی روی می دهد، نشان می دهد که آستانه ی انرژی برای شروع برخورد یونیزه کننده وجود ندارد و حتی در حضور میدان الکتریکی نه چندان قوی، برخورد یونیزه کننده و تکثیر حامل ها بر رفتار ادوات گرافنی، تاثیری عمده می گذارد. نانو روبان گرافن دارای گاف انرژی است. بنابراین برخورد یونیزه کننده در نانو روبان گرافن نیازمند انرژی آستانه می باشد. بنابراین در مقایسه با گرافن، شروع پدیده برخورد یونیزه کننده در نانو روبان گرافن نیازمند میدان الکتریکی قوی تر می باشد[۳].

پدیده برخورد یونیزه کننده در ادوات الکترونیکی مانند ترانزیستور های اثر میدانی، افزایش جریان گیت و زیرلایه را به همراه دارد و این به معنی افزایش جریان نشتی و درنتیجه تلفات می باشد[۴].

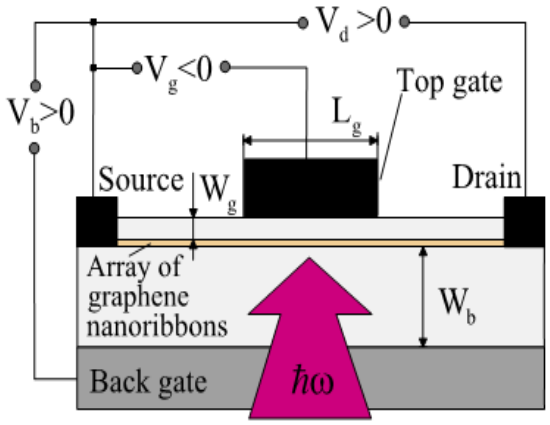
در برخی ادوات نوری همچون آشکارسازهای نوری بهمنی از برخورد یونیزه کننده بهره می گیرند تا حامل های ایجاد شده توسط تابش نور، افزایش یافته و بهره نوری بهبود یابد.

ما دراین مقاله، یک ترانزیستور نوری مبتنی بر نانو روبان گرافن را در نظر می گیریم و برای نخستین بار، تاثیر برخورد یونیزه کننده را در آن بررسی می کنیم. ساختار این مقاله به ترتیب زیر تنظیم شده است: در بخش ۲ مدل ترانزیستور نوری ارائه شده و توزیع پتانسیل در طول کانال محاسبه می گردد. در بخش ۳ ضریب برخورد یونیزه کننده در نانو روبان گرافن بدست می آید. در بخش ۴ با استفاده از روابط مربوط به آشکارساز نوری بهمنی، ضریب افزایش جریان در ترانزیستور نوری مبتنی بر نانو روبان گرافن محاسبه شده و نهایتا نتیجه بحث در بخش ۵ ارائه می گردد.

۲- مدل ترانزیستور نوری

در شکل (۱) ساختار یک ترانزیستور نوری نشان داده شده است. این ساختار همانند ترانزیستور اثر میدانی است که کانال آن از جنس نانو روبان گرافن و دارای دو گیت زیرین و زبرین می باشد و از ناحیه زیرین به آن نور تابیده می شود[۵-۶].

V_b، V_g، V_d، L_g، W_g و W_b به ترتیب ولتاژ گیت زیرین، ولتاژ گیت زبرین، ولتاژ درین، طول گیت زبرین، ضخامت اکسید گیت زبرین و ضخامت اکسید گیت زیرین می باشد.



شکل ۱: ساختار ترانزیستور نوری که شامل دو گیت زیرین و زبرین است و نور از پایین به آن تابانده می شود.

به دلیل هدایت بسیار زیاد نانو روبان ذاتی، فرض می شود که نانو روبان در سمت چپ گیت زبرین و در طرف سورس قرار دارد دارای ولتاژ صفر است و نانو روبان در سمت راست گیت زبرین و در طرف درین، با درین

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

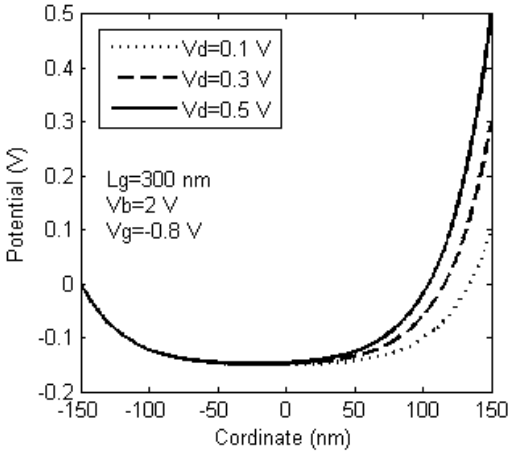
همپتانسیل باشد[۷].

به منظور به دست آوردن تغییرات مکانی پتانسیل الکتریکی از معادله ذیل استفاده می کنیم:

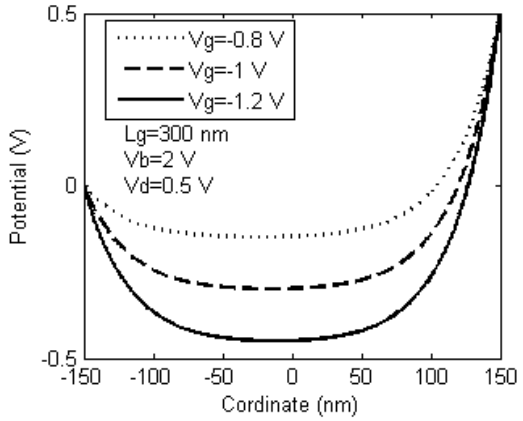
$$\frac{W_b + W_g}{3}\frac{d^2\varphi}{dx^2} - \frac{\varphi - V_b}{W_b} - \frac{\varphi - V_g}{W_g} = \frac{4\pi q}{\epsilon}\rho \qquad (۱)$$

ε، q، ρ و φ به ترتیب ضریب گذردهی الکتریکی، بار الکتریکی الکترون، چگالی صفحه ای الکترون ها و پتانسیل الکتریکی است.

با استفاده از رابطه (۱)، در شکل (۲) تغییرات پتانسیل الکتریکی کانال را به ازای ولتاژ ۰.۸- گیت زبرین و مقادیر مختلف ولتاژ درین و در شکل (۳)، تغییرات پتانسیل الکتریکی کانال به ازای ولتاژ ۰.۷ درین و مقادیر مختلف ولتاژ گیت زبرین رسم شده است. مقادیر طول گیت زبرین، ضخامت اکسید گیت زبرین و ضخامت اکسید گیت زیرین به ترتیب ۳۰۰ نانو متر، ۳۰ نانو متر و ۱۰۰ نانو متر می باشد. همانطور که شکل های (۲) و (۳) نشان می دهد، افزایش ولتاژ درین و گیت زبرین، شیب تغییرات مکانی پتانسیل در طرف درین که بیانگر شدت میدان الکتریکی است را به شدت افزایش می دهد. در نتیجه انرژی جنبشی الکترونها افزایش می یابد و احتمال رسیدن به انرژی آستانه شروع پدیده برخورد یونیزه کننده افزایش می یابد.



شکل ۲: تغییرات مکانی پتانسیل الکتریکی در طول کانال به ازای مقادیر مختلف ولتاژ درین.



شکل ۳: تغییرات مکانی پتانسیل الکتریکی در طول کانال به ازای مقادیر مختلف ولتاژ گیت زبرین.

۳- محاسبه ضریب یونیزاسیون نانو روبان گرافن

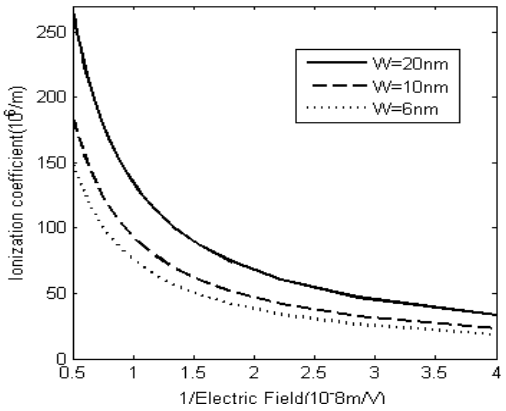
در سال ۲۰۱۲ مدلی نیمه تحلیلی برای محاسبه ضریب برخورد یونیزه کننده در نانو روبان گرافن ارائه و نشان داده شد که مدل های مرسوم محاسبه ضریب برخورد یونیزه کننده در سیلیکن، در مورد نانو روبان گرافن صادق نیست [۴]. در پژوهش مذکور، احتمال رسیدن حامل ها به انرژی آستانه ی شروع برخورد یونیزه کننده برای دو نوع حرکت رانشی و حرکت بالستیک[1] بدست آمده و بر اساس مدل رانشی محتمل[2]، انرژی آستانه و ضریب یونیزه کننده محاسبه شده است. رابطه (۲) ضریب یونیزاسیون نانو روبان گرافن را بیان می دارد.

$$\alpha_{e,h} \propto \left(\frac{qF}{E_t}\right)\exp\left(\frac{E_t^2}{qF v_d}\right) \qquad (۲)$$

F، E_t و v_d به ترتیب شدت میدان الکتریکی، انرژی آستانه برخورد یونیزه کننده و سرعت رانشی[3] الکترون می باشد. در شکل (۴) ضریب یونیزاسیون بر مبنای مدل ارائه شده در مرجع [۴] برای سه نانو روبان با عرض مختلف رسم شده است. مطابق این شکل مشاهده می شود که با افزایش عرض روبان و در نتیجه کاهش گاف انرژی، ضریب یونیزاسیون افزایش می یابد. W عرض نانو روبان است.

[1] Ballistic Motion
[2] Lucky Drift
[3] Drift Velocity

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]



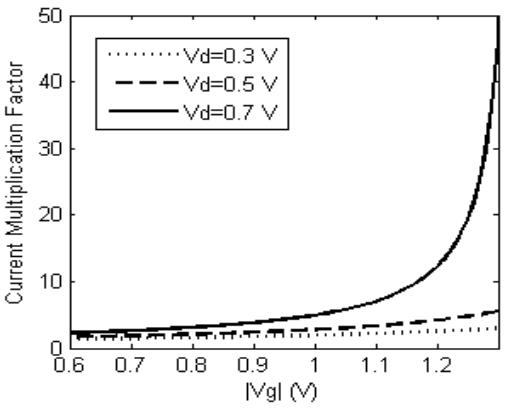
شکل ۴: ضریب یونیزاسیون نانو روبان گرافن با سه عرض مختلف بر حسب معکوس میدان الکتریکی.

۴- محاسبه ضریب افزایش جریان نوری ناشی از برخورد یونیزه کننده

پس از محاسبه ضریب برخود یونیزه کننده و با در نظر گرفتن ساختاری مشابه آشکارساز نوری بهمنی، می توان ضریب افزایش جریان را بدست آورد. ضریب افزایش جریان M_I به صورت رابطه (۳) است[۸].

$$M_I = \frac{1}{1 - \int_0^L \alpha_e dx} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، L طول کانال می باشد. در شکل (۵) ضریب افزایش جریان نوری ناشی از تکثیر حامل ها، به ازای سه مقدار مختلف ولتاژ درین و بر حسب قدر مطلق ولتاژ اعمالی به گیت زبرین نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود، با افزایش ولتاژ درین، تاثیر ولتاژ گیت زبرین بر ضریب افزایش جریان به شدت افزایش می یابد.



شکل ۵: ضریب افزایش جریان نوری ناشی از برخورد یونیزه کننده.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از مدل ترانزیستور نوری مبتنی بر نانو روبان گرافن، تغییرات میدان الکتریکی را در امتداد کانال به ازای مقادیر مختلفی از ولتاژ گیت زبرین و ولتاژ درین محاسبه کردیم. سپس با استفاده از مدل ارائه شده برای ضریب یونیزاسیون نانو روبان گرافن، ضریب افزایش بهره جریان الکتریکی را بدست آوردیم و مشاهده کردیم به ازای مقادیر معمول ولتاژ درین و گیت زبرین، پدیده برخورد یونیزه کننده رخ می دهد و بهره جریان را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد. صرفنظر کردن از پدیده برخورد یونیزه کننده می تواند خطای قابل توجهی در محاسبه جریان نوری پدید آورد.

مراجع

[1] Q. Bao and K. P. Loh, "Graphene Photonics, Plasmonics and Broadband Optoelectronic Devices", *ACS Nano*, vol. 6, pp. 3677-3694, 2012.

[2] M. Pourfath and H. Kosina, "Computational Study Of Carbon-Based Electronics", *Comput Electron*, vol. 8, pp. 427-440, 2009.

[3] A. Girdhar and J. P. Leburton, "Impact Ionization and Carrier Multiplication in Graphene", *Appl. Phys. Lett*. vol. 112, pp. 093707-093716, 2012.

[4] M. Ghadiry, A. B. A. Manaf,M. Nadi, M. Rahmani, and M. T. Ahmadi, "Ionization coefficient of monolayer graphene nanoribbon", *Microelectronics Reliability*,vol. 52, pp. 1396-400, 2012.

[5] V. Ryzhii, M. Ryzhi, N. Ryabova, V. Mitin, and T. Otsuji, "Graphene Nanoribbon Phototransistor: Proposal and Analysis", *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 48, num. 04C144, pp. 1-5, 2009.

[6] V. Ryzhii, M. Ryzhi, N. Ryabova, V. Mitin, and T. Otsuji, "Device Model for Graphene Nanoribbon Phototransistor", *Appl. Phys. Express*, vol. 1, num. 063002, pp. 1-3, 2008.

[7] V. Ryzhii, M. Ryzhi, A. Satou, and T. Otsuji, "Current-voltage Charactristics of a Graphene Nanoribbon Field-effect Transistor", *Applied Physics*, vol. 103, num. 094510, pp. 1-8, 2008.

[8] P. Bhattacharya, *Semiconductor Optoelectronic Devices*, Prentice Hall, 2003.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]