



لیف
پوتوکنیک
اسپا

بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز



بهبود بازده کوانتمومی آشکارساز نوری مبتنی بر نانو روبان گرافن با اعمال میدان الکتریکی عرضی

محسن حیدری، عباس ظریفکار و محمد حسین شیخی

بخش مخابرات و الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شیراز، شیراز

چکیده - در این مقاله، باند انرژی، طیف جذب نوری و بازده کوانتمومی در آشکارساز مبتنی بر نانوروبان گرافن را تحت تاثیر اعمال میدان الکتریکی ثابت و مدوله شده عرضی بررسی می کنیم. محاسبات ما نشان می دهد که اعمال میدان الکتریکی عرضی بر نانو روبان گرافن با ایجاد عدم تقارن در ساختار اتمی، آثاری از جمله تغییر باند انرژی، کاهش تبهمگنی ترازها، تغییر فاصله ترازها از یکدیگر، تغییر طیف جذبی و بازده کوانتمومی را به همراه دارد. نشان می دهیم که شدت میدان الکتریکی و تناوب آن، تاثیر عمده ای بر جذب نوری و بازده کوانتمومی دارد و می تواند منجر به بهبود آن شود.

کلید واژه- بازده کوانتمومی، میدان الکتریکی عرضی، نانو روبان گرافن.

Improvement of Quantum Efficiency In Graphene Nanoribbons-Based Photodetector by External Transverse Electric Field

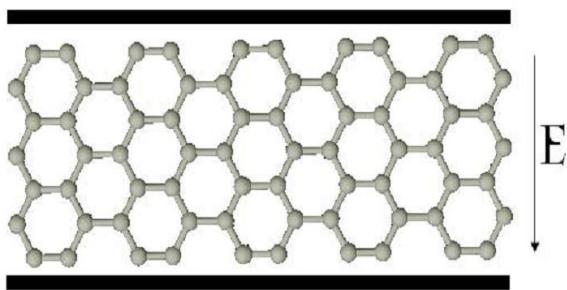
M. Heidari, A. Zarifkar, and M. H. Sheikhi

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

Abstract- In this paper, the band structure, optical absorption spectra and quantum efficiency of graphene nanoribbons photodetector at both modulated and constant external transverse electric field have been investigated. Our calculations show that applying the electric field would modify the band gap, remove the states degeneracy, alter the sub-band spacing, cause the changes in the optical absorption spectra, and affect the quantum efficiency. We show that the strength and the period of the electric field have important effects on the adsorption coefficient and quantum efficiency peaks.

Keywords: Quantum Efficiency, Graphene Nanoribbon, Transverse Electric Field.

شود و به نانو روبان اتصال ندارند.



شکل ۱: اعمال میدان در جهت عرضی توسط دو الکترود در لبه بالا و پایینی نانو روبان گرافن. میدان می‌توان ثابت و یا مدوله شده باشد.

ساختار این مقاله به ترتیب زیر تنظیم شده است: در بخش ۲ ضریب جذب نوری نانو روبان گرافن محاسبه می‌شود. در بخش ۳ بازده کوانتموی در آشکارساز نوری مبتنی بر نانو روبان گرافن تحت تاثیر میدان الکتریکی ثابت و مدوله شده محاسبه می‌شود و نهایتاً نتیجه بحث در بخش ۴ ارائه می‌گردد.

۲- محاسبه ضریب جذب نوری نانو روبان گرافن

نرخ جذب فوتون‌ها در نانو روبان گرافن را می‌توان با استفاده از قانون طلایی فرمی و جمع بر روی همه ترازهای باند والانس و هدایت محاسبه کرد. معادله (۱) قانون طلایی فرمی را برای گذار از یک حالت کوانتموی ابتدایی k_i به حالت کوانتموی نهایی k_f نمایش می‌دهد:

(۱)

$$\alpha(\omega) \propto \sum_{c,v,n,n'} \sum_k |\langle \Psi_c(n, k_f) | \frac{\partial H}{\partial k} | \Psi_v(n', k_i) \rangle|^2 \\ [f_v(n, k) - f_c(n', k)] \delta[E_f(k_f) - E_i(k_i) + \hbar\omega]$$

در این معادله $\alpha(\omega)$ ضریب جذب، Ψ تابع موج باند هدایت، f_v تابع موج باند والانس، n شماره تراز در باند هدایت، n' شماره تراز در باند والانس، H ماتریس همیلتونی نانو روبان، δ تابع دلتای دیراک، $f_{c,v}$ تابع فرمی باند هدایت و والانس، k بردار منتم، E_i انرژی ابتدایی الکترون و E_f انرژی نهایی الکترون بعد از جذب فوتون می‌باشد.

گرافن با توجه به ویژگی‌های الکترونیکی و نوری منحصر به فردی که دارد، پژوهش‌های گسترشده ای را در سال‌های اخیر به خود اختصاص داده است. گرافن لایه ای کربنی با ضخامت یک اتم است. گرافن بیشترین تحرک حامل‌ها را در بین نیمه‌های داراست و تحرک حامل‌ها در آن به بیش از $20000 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ می‌رسد. همچنین گرافن تک لایه در حدود ۲۰٪ از نور فروندی را در بازه وسیعی از طیف الکترومغناطیسی جذب می‌کند که بیش از ۵۰ برابر گالیم-آرسناید با ضخامت مشابه است [۱].

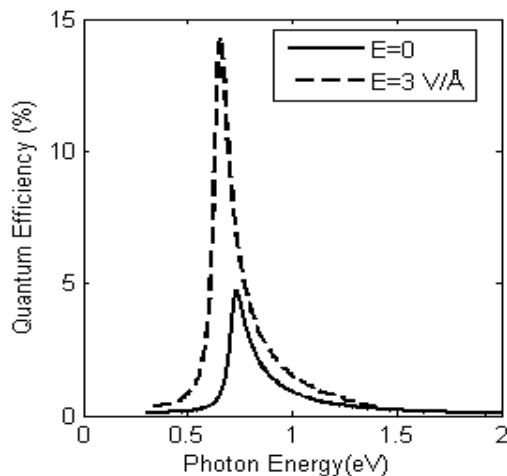
در سال‌های اخیر، گرافن را به صورت نوارهای باریکی در آورده اند که در بعضی موارد، خواص متفاوتی از خود نشان می‌دهد. خواص الکترونیکی نانو روبان از جمله گاف انرژی آن، به عرض نانو روبان و بردار کایرال آن وابسته است. خواص نوری نانو روبان نیز، متأثر از گاف انرژی است [۲].

هر عاملی که موجب برهم زدن تقارن اتم‌ها در ساختار شبکه شود، گاف انرژی و در نتیجه طیف جذبی نانو روبان گرافن را تحت تاثیر قرار می‌دهد [۳]. برخی عوامل مانند نقص کریستالی به صورت طبیعی در حین فرآیند ساخت ایجاد می‌شود. اما می‌توان اختلال‌هایی را به صورت عمده در نانوروبان گرافن ایجاد کرد تا گاف انرژی و طیف جذبی آن را تحت کنترل قرار داد. اخیراً مطالعاتی در مورد اعمال میدان الکتریکی طولی و عرضی بر نانو روبان گرافن انجام شده است و همگی بر این نکته تأکید دارند که باند انرژی و طیف جذبی نانو روبان گرافن وابستگی شدیدی به میدان الکتریکی اعمالی دارد [۴-۵].

در این مقاله تاثیر اعمال میدان الکتریکی عرضی بر نانو روبان گرافن آرمچیر و زیگزاگ را با استفاده از روش تنگ بست بررسی می‌کنیم و نشان می‌دهیم که می‌توان بازده کوانتموی آشکارساز نوری مبتنی بر نانو روبان گرافن را با اعمال میدان الکتریکی عرضی ثابت و مدوله شده باشد و تناوب مناسب، بهبود داد.

مطابق شکل (۱)، میدان الکتریکی توسط دو الکترود که در امتداد لبه بالا و پایینی نانو روبان قرار دارند اعمال می-

بازده کوانتموی برای نانو روبان آرمچیر با عرض ۱۲ اتم مربوط به شکل ۲ (الف) و (ب) در شکل (۳) رسم شده است. همانطور که مشاهده می شود، با اعمال میدان الکتریکی عرضی می توان بازده کوانتموی را بیش از ۲۰۰٪ بهبود داد و پیک جذبی را به ناحیه مادون قرمز با طول موج بزرگتر انتقال داد.



شکل ۳: بازده کوانتموی نانو روبان گرافن با عرض ۱۲ اتم در غیاب میدان الکتریکی عرضی (—) و در حضور میدان الکتریکی عرضی مادوله شده (---) با تنابع $w/2$.

در ادامه تاثیر میدان الکتریکی ثابت بر طیف جذبی نانو روبان زیگزاگ را بررسی می کنیم. همانطور که در شکل ۴ (الف) و (ب) مشاهده می شود، اعمال میدان الکتریکی ثابت، تبعیگنی ترازها را کاهش و فاصله ترازها از یکدیگر را افزایش داده و بر خلاف میدان الکتریکی عرضی مدوله شده، طیف جذبی را به طول موج های کوچکتر انتقال می دهد. نمای نزدیکتر شکل ۴ (الف) و (ب) به ترتیب، در شکل (ج) و (د) مشاهده می شود.

بازده کوانتموی نانو روبان زیگزاگ در بازه مادون قرمز در حضور میدان الکتریکی عرضی ثابت در شکل (۵) رسم شده است. مشاهده می شود که نانو روبان زیگزاگ در ناحیه مادون قرمز دارای بازده کوانتموی بسیار کوچکی در حدود ۵٪ است. با توجه به توضیحات ذکر شده در مورد شکل (۴)، اعمال میدان الکتریکی عرضی ثابت بازده کوانتموی را به بیش از ۱۲٪ ارتقا می دهد و با تغییر شدت میدان الکتریکی می توان اندازه پیک جذبی و طول موج آن را تنظیم کرد.

۳- بازده کوانتموی

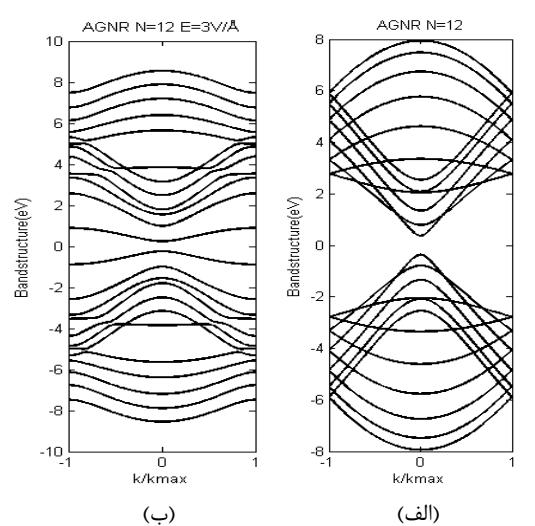
یکی از شاخص هایی که برای مقایسه عملکرد آشکارسازها بکار می رود، بازده کوانتموی است که بیانگر نسبت تعداد الکترون هایی است که در اثر تابش نوری، در جریان الکتریکی شرکت می کنند، به تعداد فوتون هایی که بر سطح آشکارساز فرود می آیند. هر چه بازده کوانتموی بزرگتر باشد، آشکارساز عملکرد بهتری دارد.

مرجع [۷] بازده کوانتموی را برای آشکارساز مادون قرمز مبتنی بر نانو روبان آرمچیر بر مبنای محاسبات عددی بدست آورده است. رابطه تقریبی بازده کوانتموی به صورت رابطه (۲) می باشد.

$$\eta = 1 - \exp(-\alpha(\omega)d) \quad (2)$$

در معادله (۲)، η بازده کوانتموی، $\alpha(\omega)$ ضریب جذب و d ضخامت تک لایه نانو روبان گرافن می باشد [۷].

شکل (۲) باند انرژی نانو روبان آرمچیر را نشان می دهد. همانطور که در شکل ۲ (ب) مشاهده می شود، اعمال میدان الکتریکی عرضی مدوله شده با تنابع $w/2$ ، فاصله ترازها را کاهش داده و ترازها را صاف می کند. مشاهده می شود که به ازای میدان الکتریکی با تنابع $w/2$ نسبت به دیگر تنابع ها، ترازها مسطحتر می شوند. w تعداد اتم ها در عرض نانو روبان است.



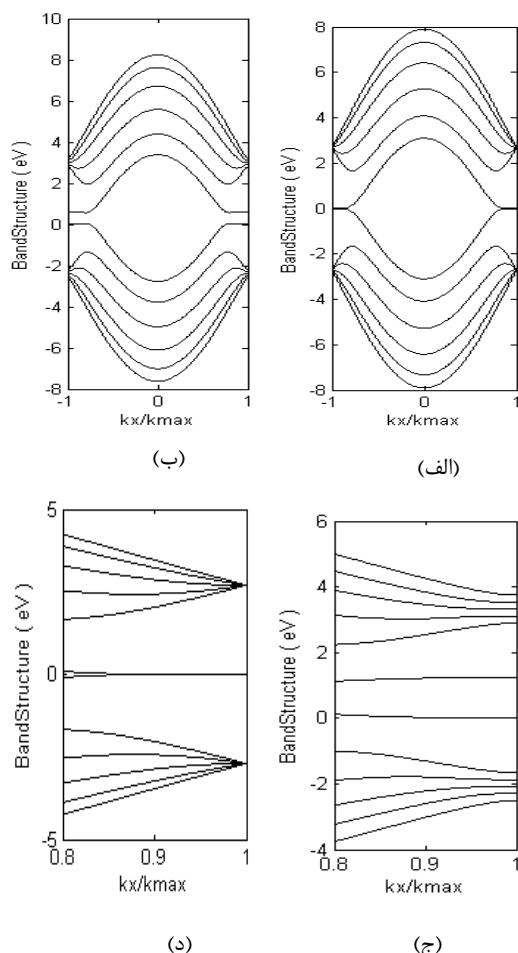
شکل ۲: باند انرژی نانو روبان آرمچیر با عرض ۱۲ اتم. (الف) بدون اعمال میدان الکتریکی عرضی. (ب) با اعمال میدان الکتریکی عرضی مدوله شده.

۴- نتیجه‌گیری

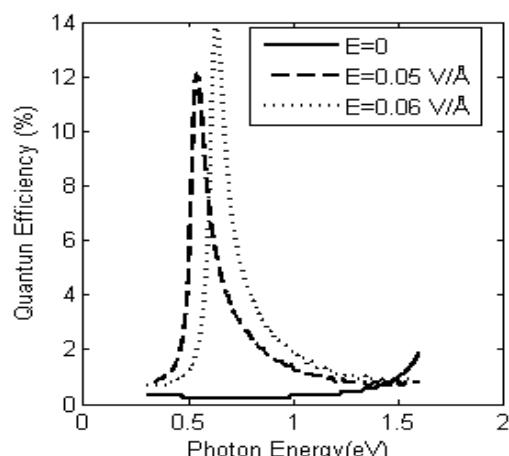
باند انرژی و بازده کوانتومی نانو روبان آرمچیر و زیگزاگ تحت تاثیر میدان الکتریکی عرضی ثابت و مدوله شده با تنابو های مختلف بر مبنای روش تنگ بست بررسی شده است. همچنین طیف جذبی با استفاده از قانون طلایی فرمی بدست آمده است. میدان الکتریکی عرضی همانند اختلال، تقارن نانو روبان را حول محور طولی از بین می برد. میدان الکتریکی عرضی منجر به تغییراتی از جمله تغییر باند انرژی، کاهش تبهگنی ترازها، تغییر فاصله ترازها از یکدیگر، تغییر طیف جذبی و بازده کوانتومی می شود. اعمال میدان الکتریکی عرضی ثابت بر نانو روبان زیگزاگ تبهگنی ترازها را از بین می برد و طیف جذبی آن را به طول موج های کوچکتر انتقال می دهد. در مقابل، با اعمال میدان الکتریکی مدوله شده با تنابو $w/2$ در نانو روبان آرمچیر، ترازها مسطح شده و به هم نزدیک می شوند و طیف جذبی به طول موج های بزرگتر انتقال یافته و بازده کوانتومی افزایش می یابد.

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] M. Berahman, M. Asad, and M. H. Sheikhi, "Optical Properties of Chiral Graphene Nanoribbons: a First Principal Study", *Arxiv*, pp. 1-9, 2012.
- [4] M. Berahman and M. H. Sheikhi, "Optical Excitations of Finite Length Graphene Nanoribbons", *Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 8, pp. 90-96, 2011.
- [5] K. Gundra and A. Shukla, "Theory of Electro-optical Properties of Graphene Nanoribbons", *Phys. Rev. B*, vol. 83, pp. 1-6, 2011.
- [6] P. T. Yu and M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties*, Springer, Fourth Edition, 2010.
- [7] E. Ahmadi, A. Asgari, and K. Ahmadiniar, "The Optical Responsivity In IR Photodetector Based On Armchair Graphene Nanoribbon With P-I-N Structure", *Superlattices and Microstructures*, vol. 52, pp. 605-611, 2012.



شکل ۴: باند انرژی نانو روبان زیگزاگ با عرض ۱۲ اتم. (الف) بدون اعمال میدان الکتریکی عرضی. (ب) با اعمال میدان الکتریکی عرضی ثابت. (ج) نمای نزدیک شکل (الف). (د) نمای نزدیک شکل (ب).



شکل ۵: بازده کوانتومی نانو روبان زیگزاگ به ازای مقادیر مختلف میدان الکتریکی اعمالی ثابت.