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

بهبود بازده کوانتومی 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 کوانتومی 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 تبهگنی ترازها، تغییر فاصله ترازها از یکدیگر، تغییر طیف جذبی و بازده کوانتومی را به همراه دارد. نشان می دهیم که شدت میدان الکتریکی و تناوب آن، تاثیر عمده ای بر جذب نوری و بازده کوانتومی دارد و می تواند منجر به بهبود آن شود.

کلید واژه- بازده کوانتومی، 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.

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

۱- مقدمه

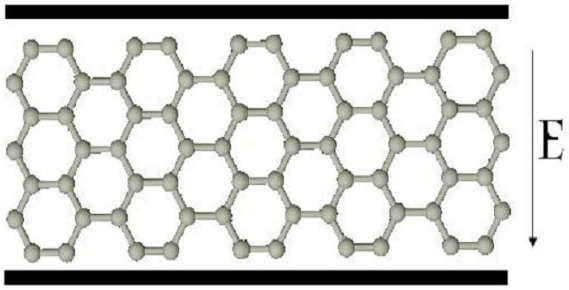
گرافن با توجه به ویژگی های الکترونیکی و نوری منحصر به فردی که دارد، پژوهش های گسترده ای را در سال های اخیر به خود اختصاص داده است. گرافن لایه ای کربنی با ضخامت یک اتم است. گرافن بیشترین تحرک حامل ها را در بین نیمه هادی ها داراست و تحرک حامل ها در آن به بیش از $۲۰۰۰۰۰ \ cm^2v^{-1}s^{-1}$ می رسد. همچنین 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].

هر عاملی که موجب برهم زدن تقارن اتم ها در ساختار شبکه شود، گاف انرژی و در نتیجه طیف جذبی نانو روبان گرافن را تحت تاثیر قرار می دهد[۳]. برخی عوامل مانند نقص کریستالی به صورت طبیعی در حین فرآیند ساخت ایجاد می شود. اما می توان اختلال هایی را به صورت عمدی در نانوروبان گرافن ایجاد کرد تا گاف انرژی و طیف جذبی آن را تحت کنترل قرار داد. اخیرا مطالعاتی در مورد اعمال میدان الکتریکی طولی و عرضی بر نانو روبان گرافن انجام شده است و همگی بر این نکته تاکید 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 می کنیم و نشان می دهیم که می توان بازده کوانتومی آشکارساز نوری مبتنی بر نانو روبان گرافن را با اعمال میدان الکتریکی عرضی ثابت و مدوله شده با شدت 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 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 می توان 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 می شود. در بخش ۳ بازده کوانتومی در آشکارساز نوری مبتنی بر نانو روبان گرافن تحت تاثیر میدان الکتریکی ثابت و مدوله شده محاسبه می شود و نهایتا نتیجه بحث در بخش ۴ ارائه می گردد.

۲- محاسبه ضریب جذب نوری نانو روبان گرافن

نرخ جذب فوتون ها در نانو روبان گرافن را می توان 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 کوانتومی ابتدایی k_i به حالت کوانتومی نهایی k_f نمایش می‌دهد [۶]:

(۱)

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

در این معادله $\alpha(\omega)$ ضریب جذب، ψ_c تابع موج باند هدایت، ψ_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 ممنتم، E_i انرژی ابتدایی الکترون و E_f انرژی نهایی الکترون بعد از جذب فوتون می باشد.

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

۳- بازده کوانتومی

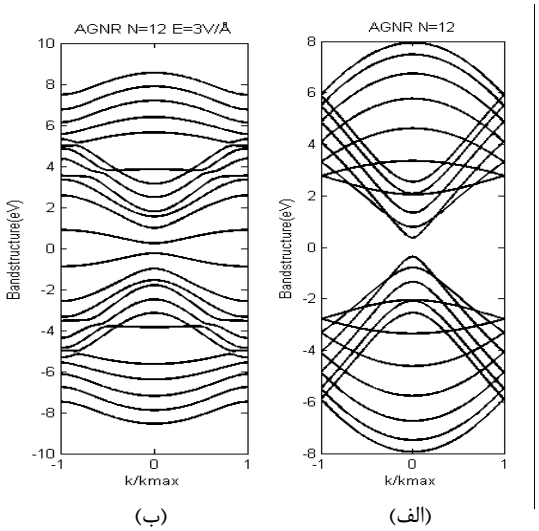
یکی از شاخص هایی که برای مقایسه عملکرد آشکارساز ها بکار می رود، بازده کوانتومی است که بیانگر نسبت تعداد الکترون هایی است که در اثر تابش نوری، در جریان الکتریکی شرکت می کنند، به تعداد فوتون هایی که بر سطح آشکارساز فرود می آیند. هر چه بازده کوانتومی بزرگتر باشد، آشکارساز عملکرد بهتری دارد.

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

$$\eta = 1 - \exp(-\alpha(\omega)d) \qquad (۲)$$

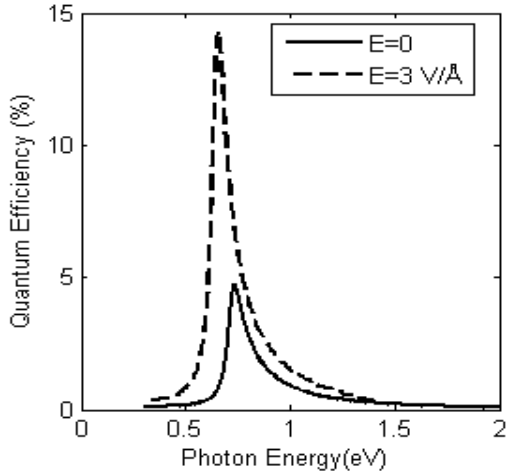
در معادله (۲)، η بازده کوانتومی، $\alpha(\omega)$ ضریب جذب و d ضخامت تک لایه نانو روبان گرافن می باشد [۷].

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 تناوب w/2، فاصله ترازها را کاهش داده و ترازها را صاف می کند. مشاهده می شود که به ازای میدان الکتریکی با تناوب w/2 نسبت به دیگر تناوب 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.

بازده کوانتومی 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 کوانتومی را بیش از ۲۰۰٪ بهبود داد و پیک جذبی را به ناحیه مادون قرمز با طول موج بزرگتر انتقال داد.



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

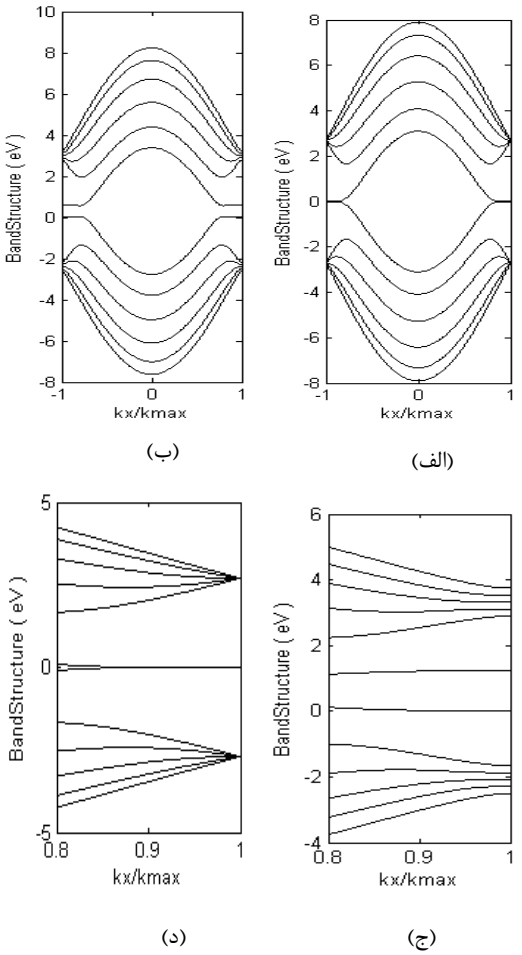
در ادامه تاثیر میدان الکتریکی ثابت بر طیف جذبی نانو روبان زیگزاگ را بررسی می کنیم. همانطور که در شکل ۴ (الف) و (ب) مشاهده می شود، اعمال میدان الکتریکی ثابت، تبهگنی ترازها را کاهش و فاصله ترازها از یکدیگر را افزایش داده و بر خلاف میدان الکتریکی عرضی مدوله شده، طیف جذبی را به طول موج های کوچکتر انتقال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

بازده کوانتومی 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 کوانتومی بسیار کوچکی در حدود ۰.۵٪ است. با توجه به توضیحات ذکر شده در مورد شکل (۴)، اعمال میدان الکتریکی عرضی ثابت بازده کوانتومی 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.

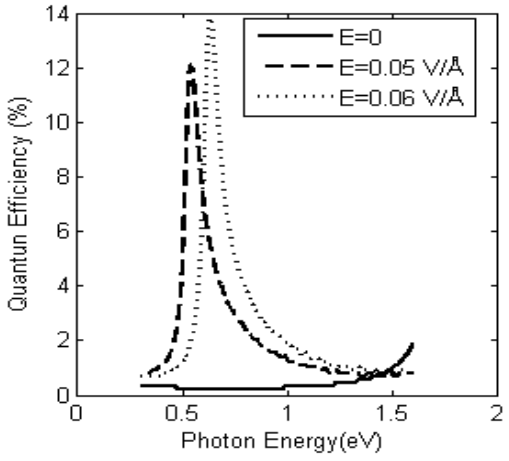
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۴- نتیجه‌گیری

باند انرژی و بازده کوانتومی نانو روبان آرمچیر و زیگزاگ تحت تاثیر میدان الکتریکی عرضی ثابت و مدوله شده با تناوب 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 تراز ها 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 تناوب 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.



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.

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.

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