

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین مقاله نویسی IEEE و ISI ویژه فنی و مهندسی

پارادوکس کلین در سدهای چندگانه‌ی ناهمگن گرافن

رشیدی^۱، اکبر^۱؛ فیروزنیا، آرش^۲؛ لطفی^۳، حسین^۳

^۱ گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب

^۲ گروه فیزیک، دانشگاه شهیدمدنی آذربایجان، تبریز

^۳ گروه مهندسی اپتیک و لیزر، دانشگاه بناب

چکیده

در این تحقیق، پارادوکس کلین را در گرافن، با استفاده از معادله‌ی دیراک مطالعه کرده‌ایم. برای این منظور مجموعه‌ای از تعدادی سد الکترواستاتیکی، در دو حالت همگن و ناهمگن مشتمل بر دو شکل از پتانسیل افزایشی خطی و گاوسی که ارتفاع سدها و عرض چاه‌ها ثابت است را در نظر می‌گیریم. با استفاده از روش ماتریس انتقال، احتمال عبور و رسانندگی تمام حالت‌ها بصورت عددی محاسبه شده‌اند. در هر دو مورد، در زاویه فرود مایل، میزان عبور و رسانندگی با افزایش تعداد سدها کاهش می‌یابد. در حالی که در زاویه فرود عمود، عبور کامل بدون امواج ناپایدار وجود دارد، که نتیجه‌ای از عدم وجود پراکندگی رو به عقب بر اساس پایستگی شبه‌اسپین است. در نهایت در می‌یابیم که احتمال عبور و رسانندگی به نحوی چیدمان و ارتفاع سدها وابسته است.

Klein Paradox in Graphene Based Nonhomogeneous Multibarriers

Rashidii, Akbar¹; phirouznia, Arash²; lotfi, hoosein³

¹ Department of Optics and Laser Engineering, University of Bonab, Bonab

² Department of Physics, Shahid madani University, Tabriz

³ Department of Optics and Laser Engineering, University of Bonab, Bonab

Abstract

In this work we have studied the Klein paradox by using the Dirac equation in Graphene. We consider two types of one-dimensional electrostatic profiles: A sequence of N homogeneous barriers, and a sequence of inhomogeneous (Gaussian and Linear increasing) barriers, where both barriers height and well width are constant. Using the transfer matrix method, the transmission probability of the electrostatic structures, and associated conductance have been computed numerically. In both cases, at oblique incident angle transmission and conductance decreases by increasing the number of barriers (N). Meanwhile at normal incident angle, there is a perfect transmission without evanescent waves. This is a consequence of the absence of backscattering due to pseudo-spin conservation. Finally we find that the transmission probability and conductance are depend on the configuration and height of barriers.

PACS No.

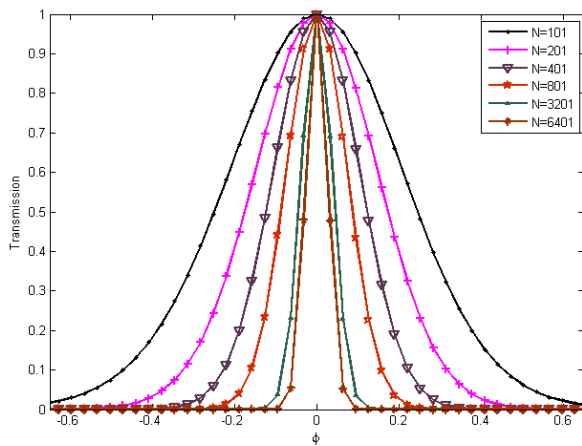
ویژه‌ی گرافن با استفاده از مدل بستگی قوی در تقریب نزدیکترین همسایه بدست می‌آید [۶۳]. برای اولین بار در سال ۱۹۲۹، فیزیکدان سوئدی اسکار کلین، با اعمال معادله‌ی دیراک به مسئله‌ی پراکندگی الکترون از سد پتانسیل، نتیجه جالبی به دست آورد. نتایج کلین نشان داد که اگر یک ذره‌ی نسبیته‌ی، بر سد پتانسیلی به ارتفاع بی‌نهایت برخورد کند بدون میرایی از آن سد عبور می‌کند، که این خلاف پیشگویی‌های مکانیک غیرنسبیته است [۷].

مقدمه

کربن ساختارهای هندسی مختلفی را به خود می‌گیرد، شکل دو بعدی آن (گرافن) به تازگی به دست آمده است و به سرعت توجه زیادی را به خود جلب کرده است [۱]. در گرافن الکترون‌ها از رابطه‌ی پاشندگی خطی تبعیت کرده و شبیه ذرات نسبیته بدون جرم رفتار می‌کنند، این امر به مشاهده‌ی خواص الکترونی بسیار عجیب در این اولین ماده‌ی دوبعدی منجر می‌شود. نوارهای انرژی

تحلیل نتایج احتمال عبور برای حالت‌های پتانسیل همگن، ناهمگن افزایشی خطی و گاوسی

در این بخش برای انجام محاسبات انرژی حامل‌های بار را $E = 50meV$ و ارتفاع سد پتانسیل را $\langle V \rangle = 200meV$ در نظر گرفته‌ایم. برای وضعیت همگن که در آن ارتفاع سدها ثابت نگه داشته شده‌اند، احتمال عبور الکترون‌ها برحسب زاویه‌ی فرود با تعداد متفاوت از نواحی شبکه N در شکل ۱، رسم شده است. از نمودار پیداست در زاویه‌های دورتر از فرود عمودی احتمال عبور کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش تعداد سدها، بیشترین میزان عبور در زاویه‌های کوچک و نزدیک زاویه صفر مشاهده می‌شود.



شکل ۱: احتمال عبور به عنوان تابعی از زاویه فرودی، در سدهای چندگانه‌ی همگن در دستگاه مختصات دکارتی.

برای حالت پتانسیل افزایشی خطی که تابع آن بصورت

$$V = i \times \langle V \rangle \quad i=(1,2,\dots) \quad (3)$$

تعریف شده است احتمال عبور الکترون‌ها نسبت به زاویه‌ی فرود برای تعداد مختلفی از سدها مطابق شکل ۲، بدست آمده است. مشاهده می‌شود که با زیاد شدن تعداد سدها احتمال عبور و بازه‌ی زاویه‌ای عبور کاهش می‌یابد. علت این است که در این ساختار گرافنی، وجود تعدادی از سدهای با پتانسیل کمتر از انرژی ذره فرودی باعث می‌شود که تعداد سدهای موثر در فرآیند تونل‌زنی کاهش بیابد.

ما پارادوکس کلین نسبیتی و امکان‌پذیری آن در گرافن را بررسی کرده‌ایم.

روش محاسبات

برای بدست آوردن احتمال انتقال الکترون‌ها از سدهای چندگانه‌ی گرافنی روش ماتریس انتقال استفاده شده است. در حد انرژی‌های کم، حامل‌های بار نزدیک نقاط دیراک در مدل تنگ‌بست بوسیله‌ی هامیلتونی غیر برهمکنشی زیرتوصیف می‌شوند:

$$H = \hbar v_F (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{k}) \quad (1)$$

در نتیجه تابع موج فرمیونهای دیراک در نقاط دیراک (تابع موج گرافن در نواحی مختلف سدهای پتانسیلی) بدست می‌آیند:

$$\psi(r) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ \pm e^{i\theta} \end{pmatrix} e^{ik \cdot r} \quad (2)$$

که $v_F = 10^6 m/s$ سرعت فرمی و $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y)$ ماتریس های پائولی می باشند [۲].

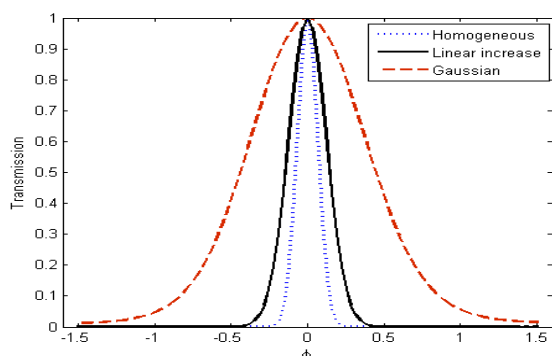
حال با استفاده از رابطه‌ی $T(E, \phi) = \frac{1}{|P_{22}|^2}$ که در آن

$P = M_{N,1}$ می‌توان احتمال عبور الکترون را برای سدهای چندگانه و پتانسیل‌های مختلف در گرافن را بدست آورد. همچنین با بکار بردن فرمول لاندائو-بوتیکر رسانندگی را بدست خواهیم آورد [۵ و ۶]. با توجه به این که ماتریس‌های تولید شده برای فصل مشترک نواحی به آسانی به روش تحلیلی قابل محاسبه نیستند. به همین دلیل، از محاسبات عددی برای تفسیر نتایج استفاده شده و برای این کار از نرم افزار متلب استفاده کرده‌ایم.

داده‌ها

در این کار برای انجام محاسبات عددی واحد طول را برابر ثابت شبکه‌ی گرافن $a = 2.46 \times 10^{-10} m$ و یکای انرژی را برابر $\frac{\hbar v_F}{a} = 2.7 eV$ در نظر گرفته‌ایم. لازم به ذکر است در تمام موارد، عرض سدها و چاه‌ها به ترتیب $D = 34 nm$ و $L = 25 nm$ در نظر گرفته شده است.

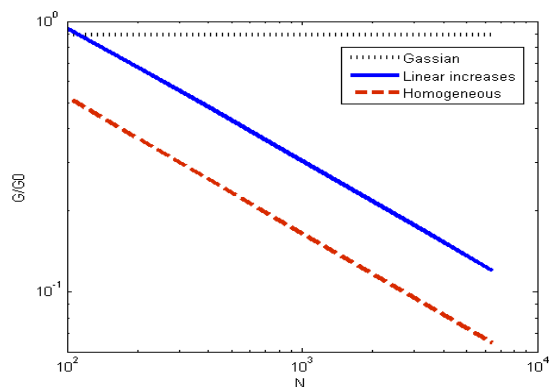
سایر زوایای فرودی بیشترین احتمال عبور برای حالت گاوسی است.



شکل ۴: احتمال عبور به عنوان تابعی از زاویه فرودی، در سدهای چندگانه در ساختارهای پتانسیلی همگن و ناهمگن مشتمل بر حالت‌های گاوسی و افزایشی خطی در دستگاه دکارتی با $E = 50\text{meV}$ و $\langle V \rangle = 200\text{meV}$ ، تعداد مناطق ثابت و برابر $N = 1001$ در نظر گرفته شده است.

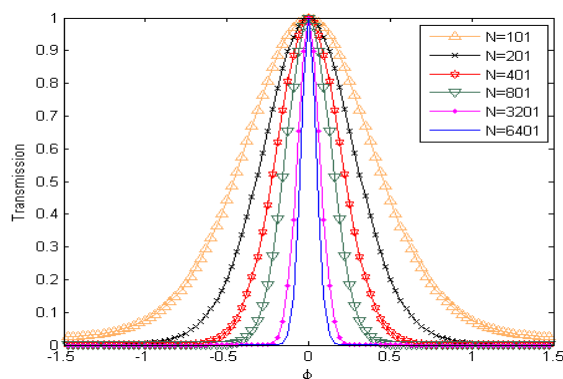
مقایسه‌ی رسانندگی برای سدهای چندگانه در پتانسیل‌های مختلف

در این بخش میزان رسانندگی را برای حالت‌های مختلف پتانسیلی سه گانه‌ی همگن و ناهمگن محاسبه کرده‌ایم. مطابق نمودار بدست آمده در شکل ۵، میزان رسانندگی به غیر از ساختار ناهمگن گاوسی با افزایش تعداد سدهای الکترواستاتیکی کاهش می‌یابد.



شکل ۵: رسانندگی بر حسب تعداد نواحی

می‌توان نتیجه گرفت از آنجائیکه این تابع وابستگی به تعداد سدهای اختیار شده در حالت گاوسی ندارد، رسانندگی به دست آمده از آن نیز تابعی از تعداد این سدها نخواهد بود. همچنین با توجه به این که در ساختار گاوسی تمامی زوایای فرودی سهم

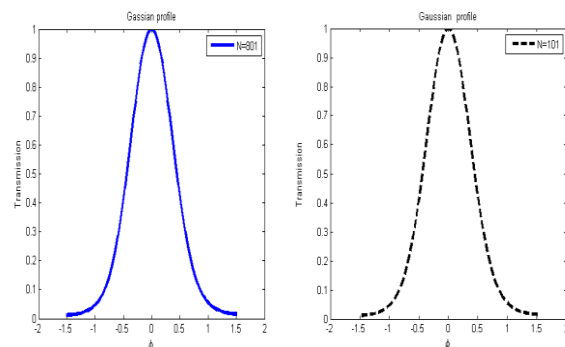


شکل ۶: احتمال عبور بر حسب زاویه فرودی در ساختار ناهمگن افزایشی خطی برای نواحی با تعداد متفاوت.

برای حالت پتانسیل ناهمگن گاوسی تعریف شده با تابع

$$V(i) = e^{-i-(N-1)/2} / 100 \times \langle V \rangle \quad (4)$$

که در آن i یک عدد صحیح است، نتایج میزان عبور نسبت به زاویه‌ی فرود در شکل ۳، رسم شده است. مشاهده می‌کنیم که مانند حالت‌های همگن و افزایشی خطی نه تنها برای فرود عمودی عبور مستقل از ارتفاع و تعداد سدها است بلکه در زوایای فرودی غیر عمود نیز میزان عبور مستقل از تعداد سدها است.



شکل ۳: مقایسه‌ی وابستگی احتمال عبور به تعداد سدها در پتانسیل گاوسی چندگانه بر حسب زاویه‌ی فرود

مقایسه‌ی احتمال عبور در حالت‌های مختلف پتانسیل

بر حسب زاویه‌ی فرودی

در شکل ۴، میزان عبور بر حسب زاویه فرود برای تعدادی ثابت از سدهای پتانسیل را بدست آورده‌ایم. در ساختار گاوسی تقریباً در تمام زاویه‌ها عبور حاصل می‌شود. و به استثنای فرود نرمال، در

توصیف‌کننده‌ی گرافن حول نقاط دیراک در شبکه‌ی وارون به شکل مؤثر همان هامیلتونی دیراک است، این امکان برای بازتاب صفر در این ماده فراهم خواهد شد.

زمانی که الکترون‌ها با زاویه‌ی صفر به سدهای گرافنی برخورد می‌کنند علیرغم تغییر تعداد نواحی، بیشترین عبور حاصل می‌شود و این مسئله هماهنگ با پارادوکس کلین است. که نتیجه‌ای از نبود پراکندگی رو به عقب بر حسب پایستگی شبه‌اسپین در راستای محور فرود است. با توجه به اینکه در حالت گاوسی تمامی زوایای فرودی سهم رسانندگی غیر صفر دارند می‌توان گفت در بازه‌ی بیشتری از زوایای فرودی احتمال عبور قابل توجهی بدست می‌دهند. اما عبور مؤثر در حالت‌های افزایشی خطی و همگن فقط در محدوده‌ی کوچکی از زوایای فرودی است. کمترین بازه‌ی زاویه‌ای برای عبور، مربوط به ساختار همگن است که علت آن به ثابت بودن ارتفاع سدها برمی‌گردد. چون در حالت افزایشی خطی، برخی از سدها که ارتفاع آن‌ها کمتر از انرژی ذره‌ی فرودی است در میزان عبور دخالتی ندارند.

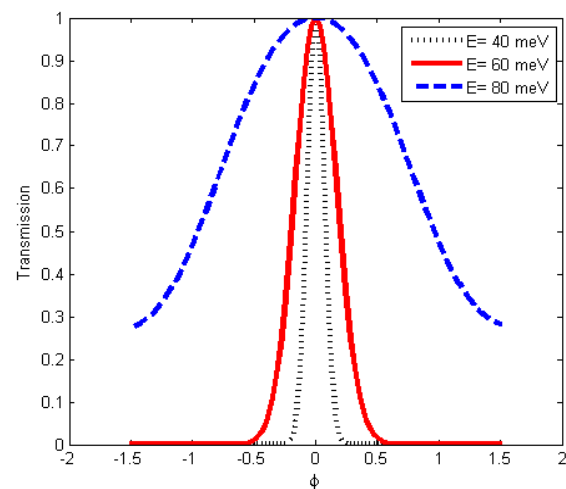
مرجع‌ها

- [۱] M. I. Katsnelson; "Graphene: carbon in two dimensions"; *Materials today* **13**, (2007).
 [۲] Z. Wu, K. Chang, J. T. Liu, X. J. Li, and K. S. Chan; "The Hartman effect in grapheme"; *J. Appl. Phys* **105**, (2009).
 [۳] D. S. L. Abergela, V. Apalkov, J. Berashevicha, K. Ziegler, and T. Chakrabort; "Properties of graphene: a theoretical perspective"; *Advances in Physics* **59**, (2010).
 [۴] P. E. Allain and J. N. Fuchs; "Klein tunneling in graphene: optics with massless electrons"; *Eur. Phys. J. B* **83**, (2011).
 [۵] H. Cheragchi, A. H. Irani, S. M. Fazli, and R. Asgari; "Metallic phase of disordered graphene superlattices with long-range correlations"; *Phys. Rev. B* **83**, (2011).
 [۶] H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim; "The electronic properties of Graphene"; *Rev. Mod. Phys.* **81**, (2009).
 [۷] T. Tudorovskiy, K. J. A. Reijnders, and M. I. Katsnelson; "Chiral tunneling in single and bilayer graphene"; *Phys. Scr. T* **146**, (2010) Graphite Composite Actuators, *Polymer*, **45**, (2004).

رسانندگی غیر صفر دارند، رسانندگی حالت گاوسی که جمع تمام سهم زاویه‌ها می‌باشد نسبت به حالت‌های همگن و افزایشی خطی بیشتر خواهد بود.

تحلیل نتایج احتمال عبور برای حالت پتانسیل همگن در انرژی‌های متفاوت برای ذرات فرودی

در شکل ۶، نتایج محاسبات انجام یافته نشان می‌دهند به غیر از فرود نرمال با افزایش انرژی ذرات فرودی بر سد پتانسیل، میزان عبور و بازه‌ی زاویه‌ای عبور افزایش می‌یابد. اگر انرژی ذره‌ی فرودی به اندازه کافی بزرگ باشد ضریب عبور صفر در تمام زاویه‌ها از بین می‌رود و شبکه‌ی گرافنی کاملاً شفاف می‌شود. شفافیت کامل شبکه‌ی گرافن، مشکل اساسی کاربرد گرافن در صنعت نانو الکترونیک است و برای رفع آن گاف انرژی در طیف گرافن القا می‌گردد.



شکل ۶: احتمال عبور به عنوان تابعی از زاویه فرودی، در سدهای چندگانه‌ی همگن بر حسب انرژی‌های متفاوت برای ذرات فرودی با $N = 801$ و $\langle V \rangle = 200 \text{ meV}$

نتیجه گیری

از آنجایی که خواص هامیلتونی نسبیتی در حالات خاص و با در نظر گرفتن فاز بری منجر به ایجاد احتمال بازتاب صفر از سد پتانسیل برای الکترونی‌هایی با انرژی حتی کمتر از انرژی سد می‌گردد و با در نظر گرفتن این نکته که هامیلتونی

SID



سرویس های ویژه



سرویس ترجمه تخصصی



کارگاه های آموزشی



بلاگ مرکز اطلاعات علمی



عضویت در خبرنامه



فیلم های آموزشی

کارگاه های آموزشی مرکز اطلاعات علمی جهاد دانشگاهی



کارگاه آنلاین آشنایی با پایگاه های اطلاعات علمی بین المللی و ترند های جستجو



مباحث پیشرفته یادگیری عمیق؛ شبکه های توجه گرافی (Graph Attention Networks)



کارگاه آنلاین مقاله نویسی IEEE و ISI ویژه فنی و مهندسی