

## بررسی اثر هارتمن در گرافین گاف دار

نرگس شرفی<sup>۱</sup>، دکتر ایوب اسماعیل پور<sup>۲</sup>، دکتر مهدی سعادت<sup>۳</sup>، آزاده نظری<sup>۴</sup>، علی اکبر نعیمی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه پیام نور واحد پرند

<sup>۲</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

<sup>۳</sup> دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

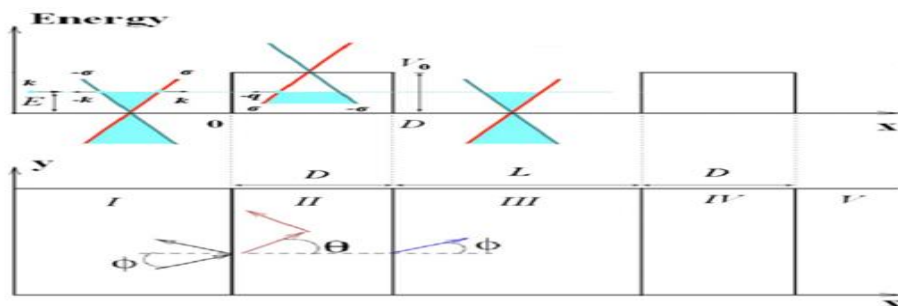
<sup>۴</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی

<sup>۵</sup> دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم آباد

### چکیده

در این مقاله به بررسی اثر هارتمن در یک سد گرافین گاف دار تک لایه می پردازیم. نتایج محاسبات نشان می دهد که در گرافین گاف دار اثر هارتمن در تابش نورمال فقط برای انرژی های بیشتر از انرژی بحرانی دیده می شود.

زمان تاخیر گروهی  $\tau_g$  یکی از کمیت های مهم مربوط به جنبه دینامیکی فرآیند تونل زنی است. هارتمن زمان تاخیر گروهی را با تجزیه رفتار بسته موج محاسبه کرد و دریافت که زمان تاخیر  $\tau_g$  می تواند به صورت مشتق تغییر فاز با در نظر گرفتن انرژی بیان شود [1]. زمان تاخیر گروهی  $\tau_g$  برای ذره در حال تونل زنی از میان یک سد مستطیلی مستقل از طول سد است، این پدیده به عنوان اثر هارتمن شناخته می شود. مطالعه اثر هارتمن تنها به ساختارهای ساده ای که شامل یک تک سد مستطیلی هستند محدود نمی شوند، این اثر در ساختارهای دارای دو یا چند سد از نظر تئوری و آزمایشگاهی بررسی شده است. گرافین ماده ای تخت و تک لایه متشکل از اتم های کربن است، این اتمها در یک شبکه دو بعدی و کندو مانند به هم متصل شده اند باید توجه نمود که همه مواد گرافینی (با هر ابعادی) از این ساختار تبعیت میکنند. در نقطه  $K(K')$  ناحیه بریلوئن طیف انرژی الکترون یک انتشار خطی ارائه می دهد که به خوبی می تواند توسط معادله دیراک بدون جرم با سرعت موثر توصیف شود [2]. برای بررسی این اثر ابتدا لازم است تونل زنی از میان یک سد گرافین را بررسی کنیم. با توجه به شکل، یک فرمیون دیراک با انرژی  $E$  و تکانه  $\hbar k$  و زاویه فرودی  $\phi$  از سمت چپ بر روی یک سد پتانسیل با ارتفاع  $V$  و طول  $D$  فرود می آید. (شکل ۱) معادله هامیلتونی گرافین دار را نشان میدهد.



شکل ۱: تونل زنی الکترون از میان یک سد پتانسیل

$$H = \hbar v_f |k| \begin{pmatrix} \Delta & e^{-i\theta(k)} \\ e^{i\theta(k)} & -\Delta \end{pmatrix} = \hbar v_f \sigma \cdot k + \Delta \sigma_z \quad (1)$$

تکانه الکترون،  $\sigma_i$  ماتریس پائولی و  $v_f$  سرعت فرمی است که نقش سرعت نور را ایفا میکند. تابع موج الکترون توسط معادله دیراک بدون جرم دوبعدی داده می شود. [2,4]

$$\hat{H}\psi(\vec{r}) = \hbar v_f \vec{\sigma} \cdot \nabla \psi(\vec{r}) = E\psi(\vec{r}) \quad (2)$$

اگر ترکیبی از سدوچاه پتانسیل را در نظر بگیریم، مشخصات ناحیه ها به این صورت می باشند:

$$s_i = \text{sgn}((E - V(x))), \quad \rho_r = \sin \frac{\alpha'_k}{\gamma}, \quad \eta_r = \cos \frac{\alpha'_k}{\gamma}, \quad \rho_l = \cos \frac{\alpha_k}{\gamma}, \quad \eta_l = \sin \frac{\alpha_k}{\gamma}$$

$$q_x^r = \frac{(E^r - v_f^r) - \Delta^r}{\hbar^r v_f^r} - k_y^r, \quad k_x^r = \frac{(E^r - \Delta^r)}{\hbar^r v_f^r} - k_y^r, \quad \varphi = \arctan(k_y / k_x), \quad \theta = \arctan(k_y / q_x)$$

که در آن اندیس  $i$  در چاه ها او در سدها ۲ می باشد. و ضرایب  $a$  و  $b$  با استفاده از شرایط مرزی و ماتریس انتقال محاسبه می شود [5]

$$\psi_l(x, y) = \rho_l (a_l e^{ik_{lx} \cdot x} + b_l e^{-ik_{lx} \cdot x}) e^{ik_{ly} \cdot y} \quad (3)$$

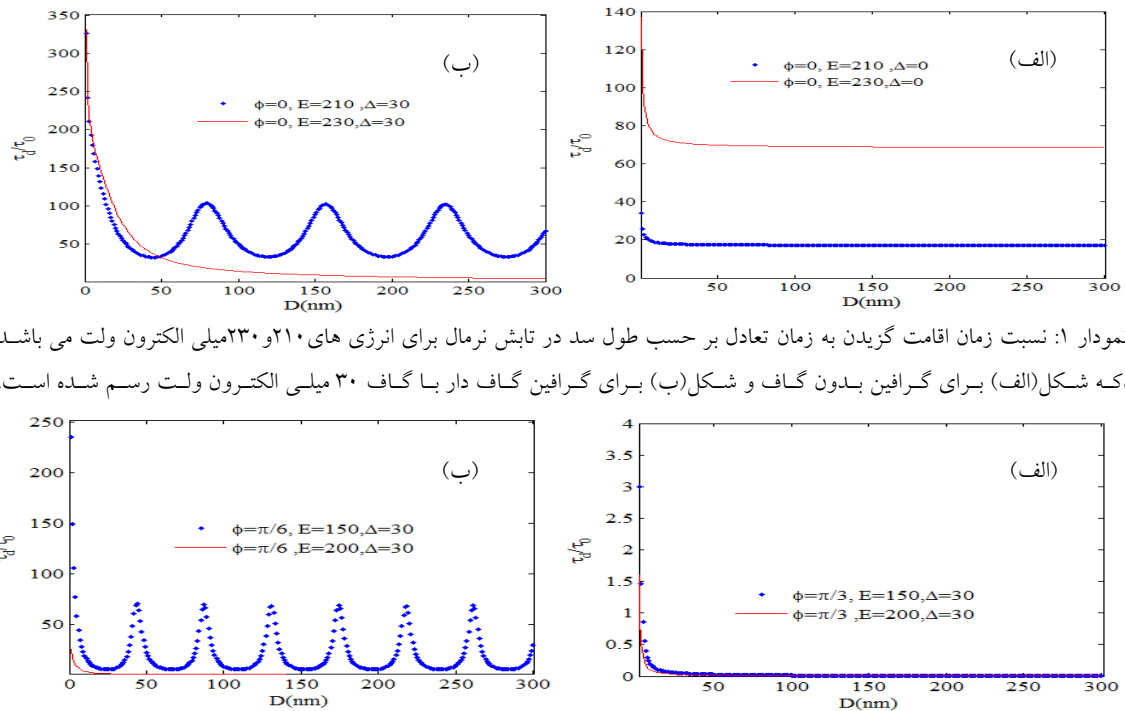
$$\psi_r(x, y) = \eta_l s_i (a_i e^{ik_{ix} \cdot x + i\varphi_i} - b_i e^{-ik_{ix} \cdot x - i\varphi_i}) e^{ik_{iy} \cdot y}$$

در سدهای متقارن  $\tau_g = \tau_{gt} = \tau_{gr}$  خواهد بود. به همین دلیل در این مقاله برای رسم نمودارها از زمان اقامت گزیدن استفاده شده است. در مفهوم تونل زنی زمان اقامت گزیدن توسط بوتیکر به شکل معادله (۴) است [3, 6]

$$\tau_d = \frac{\int_0^D |\psi(x)|^2 dx}{j_{in}} \quad (4)$$

$j_{in}$  شار ذرات فرودی است و مقدار آن  $\psi^+ \sigma \psi$  می باشد. بنابراین مطابق با مفاهیم بالا زمان اقامت گزیدن، زمانی است که یک ذره در ناحیه سد ( $0 < x < D$ ) سپری می کند. برای بررسی وجود اثر هارتمن رفتار تابع  $\tau_d / \tau$  را برای پارامترهای مختلف فیزیکی رسم می کنیم. برای رسم نمودارها از نرم افزار متلب استفاده شده است، در تمام

نمودارها  $V = 25 \text{ meV}$  در نظر گرفته شده است.  $\tau$  زمان تعادل است که برابر است با  $\frac{D}{v_f}$



نمودار ۱: نسبت زمان اقامت گزیدن به زمان تعادل بر حسب طول سد در تابش نرمال برای انرژی های ۲۱۰ و ۲۳۰ میلی الکترون ولت می باشد، که شکل (الف) برای گرافین بدون گاف و شکل (ب) برای گرافین گاف دار با گاف ۳۰ میلی الکترون ولت رسم شده است.

نمودار ۲: نسبت زمان اقامت گزیدن به زمان تعادل بر حسب طول سد برای یک سد پتانسیل درگرافین گاف دار با گاف ۳۰ میلی الکترون ولت برای انرژی های فرودی ۱۵۰ و ۲۰۰ میلی الکترون ولت است، در شکل الف زاویه فرودی ۶۰ درجه و در شکل ب زاویه فرودی ۳۰ درجه است

## نتیجه گیری

نمودار ( ۱ الف) نشان می دهد اثر هارتمن برای تابش نرمال در گرافین بدون گاف برای تمام انرژی ها وجود دارد زیرا سدهای الکترو استاتیک به دلیل نداشتن گاف نمی توانند حامل های بار را محدود کنند. با اعمال گاف مطابق نمودار (۱ب) نه تنها محدوده انرژی بحرانی تغییر می کند بلکه در تابش نرمال در انرژی های بزرگتر از انرژی بحرانی اثر هارتمن دیده می شود و در انرژی های کوچکتر از انرژی بحرانی این اثر وجود ندارد با مشاهده نمودار (۲ الف) و مقایسه آن با نمودار (۲ب) تأثیر زاویه فرودی را در تعیین زاویه بحرانی مشاهده می کنیم ، می توان دریافت که زاویه فرودی ، انرژی فرودی بحرانی را تعیین می کند. وقتی انرژی فرودی بزرگتر از انرژی فرودی بحرانی است با افزایش طول سد زمان اقامت گزیدن اشباع می شود. اما زمانی که انرژی فرودی کوچکتر از انرژی فرودی بحرانی است ، زمان اقامت گزیدن با افزایش طول سد نوسان می کند و این نوسان به دلیل تداخل امواج بازتابیده در دو طرف سد است در

زاویه فرودی  $\phi = \frac{\pi}{6}$  انرژی بحرانی افزایش یافته است و رفتار تابع از میرا به نوسانی تغییر کرده است.

## مراجع

- [1] T.E.Hartman, *phys.Rev.* **B27,6178**(1983)
- [2] A.H.Castro Neto, F.Guinea, N.M.R.Peres, K.S.Novoselov, and A.K.Geim, *Rev.Mod.Phys.* **81,109**(2009); *arXiv:cond-mat/0709.1163*
- [3] *Physics Reports* **436** (2006) 1 – 69
- [4] A.K.Geim and K.S.Novoselov, *Nature Mater.* **6,183**(2007)
- [5] *Solid State communication* **50**(2010)655-659
- [6] *journal of applied physics* **105,043702**(2009)