

تأثیر شکست تقارن پتانسیل زوج ابررسانایی بر ترابرد کوانتومی بار در پیوندگاه گرافینی

فرومغناطیس/ابررسانا

حاجتی، یاسر

گروه فیزیک، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز

چکیده

با بکارگیری فرمول‌بندی بلوندر-تینکهام-کلپویچک، ترابرد کوانتومی بار در یک پیوندگاه گرافینی فرومغناطیس/سد عایق/ابررسانای موج موهمی ($d_x^2 - y^2 + is$) به صورت نظری مورد بررسی قرار گرفته است. در تحقیق انجام شده به طور مشخص نقش شکست تقارن وارون زمان در پتانسیل زوج ابررسانا بر رسانش کوانتومی بار پیوندگاه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند پارامتر شکست تقارن وارون زمان (X) تأثیر بسیار زیادی روی رسانش تونلی پیوندگاه دارد و با افزایش X ارتفاع قله رسانش پیوندگاه در انرژی صفر به شدت کاهش می‌یابد. همچنین دریافتیم اثر مجاورت ابررسانایی در پیوندگاه به مقدار X حساس بوده و با افزایش آن دامنه نوسانات رسانش بار نسبت به زاویه چرخش گاف ابررسانایی β کاهش پیدا می‌کند. در انتها نشان داده شد که در بیشینه زاویه چرخش ابررسانایی $\beta = \frac{\pi}{4}$ ، با افزایش X رسانش پیوندگاه بر حسب سد عایق χ_G رفتار نوسانی از خود نشان می‌دهد که این رفتار در پیوندگاه مشابه بدون شکست تقارن دیده نمی‌شود.

Broken time reversal symmetry of superconducting pairing state on charge transport in ferromagnetic/superconductor graphene junction

Hajati, Yaser

Department of Physics, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz

Abstract

We investigate the charge transport through a graphene-based ferromagnetic-insulator-superconductor junction with broken time reversal symmetry (BTRS) of $d_x^2 - y^2 + is$ superconductor using the extended Blonder-Tinkham-Klapwijk formalism. Our analysis has shown several characteristics in this junction, providing a useful probe to understand the role of the order parameter symmetry in the superconductivity. We find that the presence of the BTRS (X) state in the superconductor region has a strong effect on the tunneling conductance curves which leads to a decrease in the height of the zero-bias conductance peak (ZBCP). In particular, we show that the magnitude of the superconducting proximity effect depends to a great extent on X and by increasing X , the zero-bias charge conductance oscillations with respect to the rotation angle β are suppressed. In addition, we find that at the maximum rotation angle $\beta = \pi/4$, introducing BTRS in the FIS junction causes oscillatory behavior of the zero-bias charge conductance with the barrier strength (χ_G) by a period of π .

PACS No. 73, 72

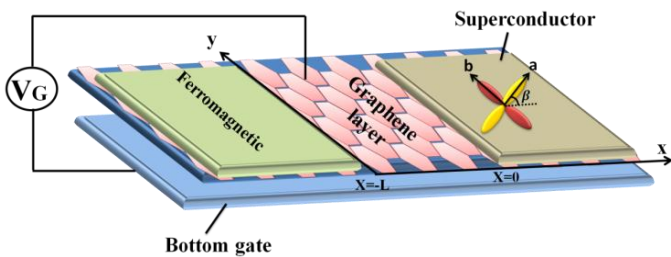
معادله‌ی دیراک برای توصیف حرکت شبه ذرات آن می‌شود.

گرافین در حالت عادی نه ویژگی ابررسانا دارد نه ویژگی فرومغناطیسی ولی مطالعات تجربی و نظری بسیاری نشان داده‌اند که ویژگی‌های مذکور در این ماده از طریق اثر مجاورت با یک فیلم ابررسانا یا فرومغناطیس قابل القا شدن هستند [۳ و ۲]. تاکنون مطالعات بسیاری روی پیوندگاه‌های گرافینی فرومغناطیس و ابررسانا با تقارن موج s و موج $d_x^2 - y^2$ صورت گرفته است [۴]. یکی از مهم‌ترین نشانه‌های وجود ابررسانای با تقارن موج d وجود قله‌ی رسانش الکترونیکی در انرژی صفر است که شکل‌گیری این قله به اثرات تداخلی فاز درونی پتانسیل زوج ابررسانا مربوط می‌شود. در ابررسانای موج $d_x^2 - y^2$ بر خلاف ابررسانای موج s

مقدمه

گرافین، یک لایه‌ی دو بعدی تک اتمی کربن است که این اتم‌ها در شبکه‌های شش ضلعی شبیه به لانه زنبور قرار گرفته‌اند. گرافین به دلیل ویژگی‌های منحصر بفردش تنها مدت کوتاهی پس از ساخت در سال ۲۰۰۴، توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۱]. گرافین آرایش نشده یک نیم‌رسانای بدون گاف است که رابطه‌ی پاشندگی آن در انرژی‌های کم خطی است که این امر منجر به صفر شدن جرم موثر الکترون‌ها و حفره‌ها در آن می‌شود. حامل‌های بار در گرافین با سرعتی نزدیک به سرعت نور حرکت می‌کنند که این امر منجر به اثرات نسبیتی و بکارگیری

در این فرمول σ_x و σ_y ماتریس‌های پاولی در فضای شبه اسپینی زیر شبکه هستند و Θ تابع پله‌ای هویساید است. در رابطه ۳، $\Delta_1 = \Delta_0 = 1$ است (که Δ_0 پتانسیل زوج ابررسانایی در ابررسانای موج S است) و $X = \frac{\Delta_2}{\Delta_1}$ به صورت پارامتر قدرت شکست تقارن وارون زمان تعریف می‌شود و در محاسبات وارد می‌شود. پارامترهای H_0 ، $U(x)$ ، $H(x)$ و $\Delta(\theta, x)$ به ترتیب هامیلتونی دیراک، انرژی‌های پتانسیل پیوندگاه، انرژی تبادلی فرومغناطیس و پارامتر نظم ابررسانایی در نواحی فرومغناطیس، سد عایق و ابررسانا هستند. با حل معادله ۱ توابع موج در هر ناحیه



شکل ۱. پیوندگاه فرومغناطیس/سد عایق/ابررسانای موج $d_x^2 - y^2 + is$ گرافینی به شکل شماتیک.

شامل فرومغناطیس $\psi_F(x)$ ، سد عایق $\psi_I(x)$ و ابررسانا $\psi_S(x)$ به صورت دقیق حاصل می‌شوند. با بررسی پیوستگی توابع موج در مرزها دامنه‌ی بازتاب آندریو $r_{A,\sigma}$ و بازتاب عادی r_σ از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} \psi_F(x = -L) &= \psi_I(x = -L), \\ \psi_I(x = 0) &= \psi_S(x = 0) \end{aligned} \quad (4)$$

با بکارگیری فرمول‌بندی بلوند-تینکهام-کلپیچک (BTK) رسانش بار الکتریکی $G(eV)$ به شکل رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$G(eV) = \frac{2e^2}{h} N \sum_{\sigma=\uparrow, \downarrow} \int_0^{\pi/2} d\theta \cos \theta \left(1 + \frac{\cos \theta \Delta \bar{\sigma}}{\cos \theta_\sigma} |r_{A\sigma}|^2 - |r_\sigma|^2 \right) \quad (5)$$

در رابطه‌ی بالا $N(E) = \frac{|E + E_F|W}{\pi \hbar v_F}$ چگالی حالت‌ها و W پهنای صفحه‌ی گرافین است.

نتایج و بحث

در شکل ۲ نمودار بهنجار شده‌ی رسانش الکتریکی $G(eV)/G_0$ بر حسب انرژی $\frac{eV}{\Delta_0}$ برای مقادیر مختلف قدرت شکست تقارن وارون زمان، X برای $\beta = 0$ (نمودار ۲ الف) و $\beta = \pi/4$ (نمودار ۲ ب)، رسم شده است. همان‌طور که از این شکل‌ها آشکار است شکست تقارن وارون زمان پارامتر نظم، تاثیر بسیاری روی رسانش

پارامتر نظم ابررسانایی به زاویه‌ی β وابسته است، $\Delta(\theta) = \Delta_0 \cos(2\theta - 2\beta)$ ، که این زاویه، زاویه بین پارامتر نظم ابررسانایی نسبت به سطح ابررسانا است. جدانشدگی قله انرژی صفر در آزمایشات تجربی انجام شده روی ابررسانای YBCO در دماهای پایین پیشنهاد دهنده‌ی پتانسیل زوج (تقارن موج) موهمی ابررسانا است که وجود این پتانسیل زوج موهمی منجر به شکست تقارن وارون زمان می‌شود. پتانسیل زوج موهمی می‌تواند به شکل‌های $d_x^2 - y^2 + is$ و $d_x^2 - y^2 + id_{xy}$ باشد. در سال‌های اخیر اثر مجاورت در پیوندگاه گرافینی فرومغناطیس-ابررسانای با تقارن موج S و موج d به شدت مورد توجه قرار گرفته است. لذا در تحقیق حاضر قصد داریم رسانش بار الکتریکی در پیوندگاه گرافینی فرومغناطیس/سد عایق/ابررسانای موج موهمی $(d_x^2 - y^2 + is)$ را بصورت تئوری مورد بررسی قرار دهیم و نتایج بدست آمده را با پیوندگاه گرافینی مشابه با تقارن موج $d_x^2 - y^2$ و ابررسانای موج S مورد مقایسه قرار دهیم.

فرمول‌بندی رسانش الکتریکی

در شکل ۱ پیوندگاه گرافینی فرومغناطیس/سد عایق/ابررسانا در صفحه‌ی xy نشان داده شده است. در این شکل ناحیه فرومغناطیس در $x \leq -L$ ، سد عایق $-L < x < 0$ و ناحیه‌ی ابررسانای با تقارن موج موهمی در $x > 0$ قرار دارند. ناحیه‌ی سد عایق توسط اعمال یک ولتاژ گیت خارجی V_G به ناحیه گرافین وسط پیوندگاه ایجاد می‌شود. برای مدل‌بندی این پیوندگاه معادله‌ی دیراک بوگولیوبوف دوژن (DBdG) وابسته به اسپین بکار گرفته شده است که به شکل زیر است:

$$\begin{pmatrix} H_0 - U(x) - \eta_\sigma H(x) & \Delta_k(\theta, x) \\ \Delta_k^*(\theta, x) & \eta_\sigma H(x) + U(x) - H_0 \end{pmatrix} \psi = E\psi \quad (1)$$

$$H_0 = -i\hbar v_F (\sigma_x \partial_x \pm \sigma_y \partial_y)$$

$$U(x) = E_F \theta(-x - d) + (E_F + V_G) \theta(x + d) \theta(-x) + E_{FS} \theta(x)$$

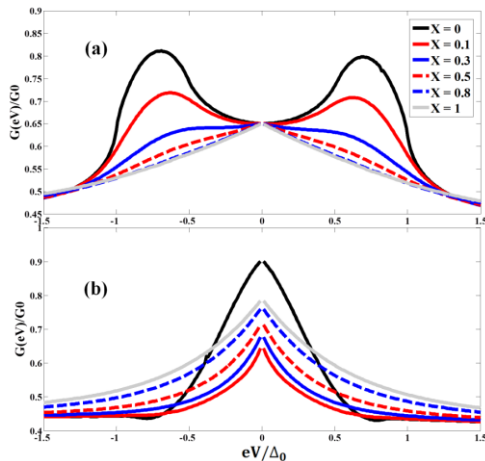
$$H(x) = E_{exc} \theta(-x - d)$$

$$\Delta(\theta, x) = \Delta(\theta) e^{-i\varphi} \theta(x) \quad (2)$$

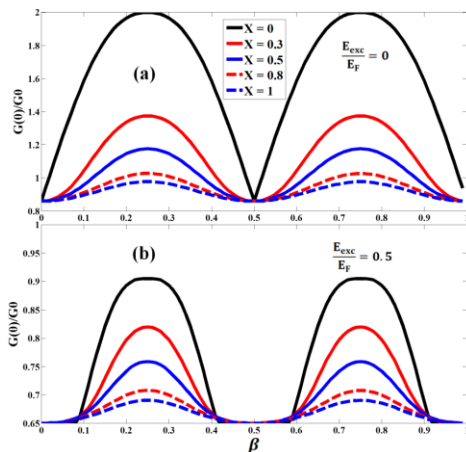
جمله $\Delta(\theta)$ در رابطه‌ی (۲) برای ابررسانای موج $d_x^2 - y^2 + is$ به صورت زیر است:

$$\Delta(\theta) = \Delta_1 \cos(2(\theta_S - \beta)) + i\Delta_2 \quad (3)$$

دوره تناوب $(\pi/2)$ برای تمام مقادیر X دیده می‌شود و با افزایش X دامنه نوسانات به شدت کاهش می‌یابد ولی دامنه نوسانات در تمام نمودارها در $\beta = \pi/4$ بیشینه هستند. با افزایش $\frac{E_{exc}}{E_F}$ از صفر به 0.5 به دلیل کاهش چگالی حالت‌های اسپین اقلیت، دامنه‌ی نوسانات $G(0)$ در شکل ۳ ب کمتر از ۳ الف است. در پیوندگاه‌های گرافینی FIS و NIS نشان داده شده است که تفاوت سطوح فرمی، زاویه چرخش



شکل ۲. رسانش الکتریکی بهنجار شده بر حسب انرژی $\frac{eV}{\Delta_0}$ برای مقادیر مختلف $X = \frac{\Delta_2}{\Delta_1}$ (الف) $\beta = 0$ و (ب) $\beta = \frac{\pi}{4}$ در این شکل $E_F = 100\Delta_0$, $G_0 = G_{\uparrow} + G_{\downarrow}$ و $U_0 = 0$, $\chi_G = \frac{\pi}{2}$, $E_{exc} = 0.5E_F$



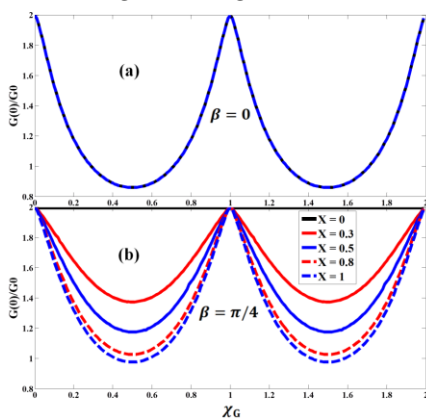
شکل ۳. رسانش الکتریکی بهنجار شده انرژی صفر بر حسب β برای مقادیر مختلف X برای الف) $E_{exc}/E_F = 0$ و ب) $E_{exc}/E_F = 0.5$

و انرژی تبدلی فرومغناطیس منجر به کاهش رسانش پیوندگاه می‌شود. به عنوان یک نتیجه مهم ما دریافتیم که شکست تقارن وارون زمان پارامتر نظم نیز منجر به کاهش دامنه نوسانات رسانش الکتریکی پیوندگاه می‌شود. در واقع با شکست تقارن وارون زمان

الکتریکی پیوندگاه دارد. در ابررسانای موج d_{x-y}^2 بدون در نظر گرفتن شکست تقارن ($X=0$) فاز پارامتر نظم π یا 0 است [۵]. ولی با ایجاد شکست تقارن، فاز پارامتر نظم ابررسانایی $\varphi_{S\pm}$ دیگر π یا 0 نیست که این فاز منجر به تغییرات بسیار زیاد رسانش الکتریکی می‌شود. در شکل ۲ الف نمودار رسانش الکتریکی برای $X=0$ و $\beta = 0$ مشابه با ابررسانای موج s است زیرا در این حالت شرایط شکل‌گیری حالت انرژی صفر برقرار نیست [۶]. از شکل ۲ الف آشکار است که با اعمال X رسانش الکتریکی در تمام انرژی‌ها به جز در انرژی $eV=0$ ، به شدت تغییر می‌کند. با اعمال شکست تقارن برای حالت $X=0.1$ (نمودار قرمز) قله‌ی رسانش کاهش می‌یابد و با نزدیک شدن X به مقدار ۱

ارتفاع قله‌ی رسانش کاهش بیشتری می‌یابد و در نهایت نمودار رسانش الکتریکی خطی می‌شود (نمودار خاکستری). در حالت $X=1$ فاز پارامتر نظم ابررسانایی $\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{\cos(2\theta_s)}{\sqrt{\cos(2\theta_s)^2+1}}\right)$ است که این مقدار با ابررسانای موج d_{x-y}^2 متفاوت است. در شکل ۲ ب پیوندگاه برای حالت $X=0$ یک قله‌ی تیز در انرژی صفر از خود نشان می‌دهد. این قله انرژی صفر به دلیل وجود حالت‌های مقید در سطح ابررسانا است که این حالت‌ها ناشی از تداخل فاز سازنده‌ی شبه ذرات عبوری به ابررسانا است. با افزایش X به مقدار 0.1 ، ارتفاع قله‌ی انرژی صفر رسانش الکتریکی کاهش می‌یابد که دلیل این امر تضعیف اثر مجاورت به دلیل بازتاب آندریو در پیوندگاه است. با افزایش X از 0.1 تا 1 ، قله‌ی نمودار انرژی صفر افزایش می‌یابد ولی با افزایش انرژی eV نمودارهای رسانش الکتریکی برای مقادیر مختلف X کاهش می‌یابند و به یکدیگر نزدیک می‌شوند. قابل ذکر است که افزایش X منجر به جداشدگی قله‌ی رسانش الکتریکی انرژی صفر نمی‌شود که این امر یکی از تفاوت‌های پیوندگاه حاضر با پیوندگاه‌های مشابه غیرگرافینی است [۷]. در شکل ۳ رسانش بار بایاس صفر $G(0)/G_0$ بر حسب زاویه چرخش β برای مقادیر مختلف X برای مقادیر $\frac{E_{exc}}{E_F} = 0$ (نمودار ۳ الف) و $\frac{E_{exc}}{E_F} = 0.5$ (نمودار ۳ ب) رسم شده است. لازم به ذکر است که نمودار $X=0$ در شکل ۳ با مرجع [۸] در توافق است. رفتار نوسانی رسانش الکتریکی (با

دامنه و فاز رسانش پیوندگاه ندارد. در شکل ۵ب ($\beta = \pi/4$) رسانش پیوندگاه برای مقدار $X=0$ به تغییرات χ_G حساس نیست ($G(0)=2G_0$) و که این رفتار در مراجع [۸و۵] نیز گزارش شده است. نکته جالب این است که در حضور X رسانش پیوندگاه رفتار نوسانی با دوره تناوب π از خود نشان می‌دهد و با افزایش X دامنه نوسانات رسانش پیوندگاه به شدت افزایش می‌یابد. به دلیل حضور شکست تقارن فاز پارامتر نظم دیگر π و 0 نیست لذا شبه ذرات عبوری به ابررسانا زوایای فاز متفاوتی را تجربه می‌کنند که این امر منجر به رفتار نوسانی رسانش می‌شود.



شکل ۵ رسانش الکتریکی بهنجار شده انرژی صفر بر حسب χ_G برای مقادیر مختلف X برای الف) $\beta = 0$ و ب) $\beta = \frac{\pi}{4}$

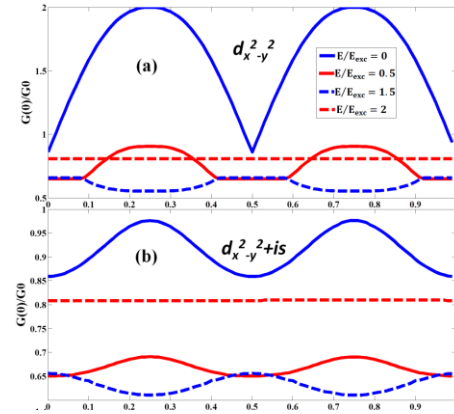
نتیجه گیری

رسانش تونلی پیوندگاه گرافینی FIS فرومغناطیس/سد عایق/ابررسانای موج موهمی ($d_x^2 - y^2 + is$) به صورت تئوری بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند شکست تقارن وارون زمان ابررسانا تاثیر بسیاری روی رسانش پیوندگاه دارد به گونه‌ای که با افزایش X دامنه نوسانات رسانش کاهش می‌یابد. همچنین نشان داده شد که در بیشینه زاویه چرخش ابررسانایی $\beta = \frac{\pi}{4}$ ، با افزایش X رسانش پیوندگاه بر حسب سد عایق χ_G رفتار نوسانی از خود نشان می‌دهد که این رفتار در پیوندگاه مشابه بدون شکست تقارن دیده نمی‌شود.

مرجع ها

[1] K. S. Novoselov, et al, Science **306** (2004) 666.
 [2] C. W. J. Beenakker, "Phys. Rev. Lett", **97** (2006) 067007.
 [3] H. Haugen, et al, Phys. Rev. B **77**, 115406 (2008).
 [4] J. Linder, et al, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 147001.
 [5] J. Zou, et al, Europe. Phys. Lett. **87** (2009) 27008.
 [6] G. Deutscher, Rev. Mod. Phys. **77**, 109 (2005).
 [7] Y. Hajati, et al, J. Magn. Magn. Mater. **362**, 36-41 (2014).
 [8] M. Zareyan, et al, Phys. Rev. B **78** (2008) 193406.
 [9] N. Stefanakis, J. Phys.: Condens. Matter **13**, 1265 (2001).

ابررسانا، کانال‌های عبوری برای تونل‌زنی الکترون‌ها کاهش می‌یابند که این امر منجر به تضعیف اثر مجاورت (به دلیل کاهش بازتاب آندریو) در پیوندگاه می‌شود. لذا اثر مجاورت ابررسانایی برای مقدار $X=0$ بیشترین مقدار و برای $X=1$ کمترین مقدار است.



شکل ۴ رسانش الکتریکی بهنجار شده انرژی صفر بر حسب β برای مقادیر مختلف E_{exc} در شکل الف) ($X=0$) $d_x^2 - y^2$ و ب) ($X=1$) $d_x^2 - y^2 + is$

در شکل ۴ رسانش بار بایاس صفر $G(0)/G_0$ بر حسب زاویه چرخش β برای مقادیر مختلف میدان تبدالی فرومغناطیس $\frac{E_{exc}}{E_F}$ برای پیوندگاه‌های $FID_{d_x^2 - y^2} + is$ و $FID_{d_x^2 - y^2}$ (با مقدار $X=1$) رسم شده است. همان‌طور که از این شکل آشکار است برای $E_{exc} < E_F$ دامنه نوسانات رسانش الکتریکی پیوندگاه با افزایش E_{exc} کاهش می‌یابد و در حالتی که $E_{exc} = E_F$ است رسانش الکتریکی صفر می‌شود (که در این شکل نشان داده نشده است). با افزایش انرژی تبدالی فرومغناطیس برای مقادیر $E_{exc}^c > E_{exc} > E_F$ دامنه نوسانات رسانش افزایش می‌یابد و تقعر منحنی‌ها نیز معکوس می‌شود. علت افزایش رسانش به دلیل پدیده بازتاب آندریو کلاین است که بازتاب آندریو شبه ذرات بدون جرم دیراک با پدیده تونل‌زنی کلاین همراه می‌شود [۹]. برای انرژی تبدالی $E_{exc} = E_{exc}^c = 2E_F$ رسانش الکتریکی دیگر به زاویه چرخش پارامتر نظم β وابسته نیست و مقدار ثابت $\pi/8$ را دارد.

در شکل ۵ رسانش تونلی پیوندگاه بر حسب مقادیر قدرت سد عایق وسط χ_G برای مقادیر مختلف X برای هر دو حالت $\beta = 0$ (نمودار ۵الف) و $\beta = \pi/4$ (نمودار ۵ب)، رسم شده است. همان‌طور که در شکل ۵ الف دیده می‌شود رسانش الکتریکی رفتار نوسانی با دوره تناوب π دارد و افزایش X تاثیری