

اثر سبیک وابسته به اسپین در گرافین اسپین جفت شده

بیرانوند، راضیه؛ حمزه پور، حسین

دانشگاه فیزیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در این مطالعه، اثرات ترموالکتریک وابسته به بار و اسپین را با استفاده از فرمالیسم بوگولیووف-دژن در اتصال گرافینی شامل فرومغناطیس و ابررسانا در حضور و عدم حضور اسپین-مدار راشبا مورد مطالعه قرار داده ایم. نتایج حاصل شده نشان می‌دهد که علیرغم اتصال نرمال-ابررسانا در گرافین، در یک اتصال فرومغناطیس-ابررسانا ($F-S$) و همچنین در اتصال فرومغناطیس-اسپین مدار راشبا-ابررسانا ($F-RSO-S$)، ضریب توان-گرمایی (سبیک) اسپینی وابسته به دما وجود دارد. علاوه بر این، معیار شایستگی نسبتاً بزرگی در حضور اثر اسپین-مدار در اتصال دیده می‌شود و ضریب سبیک بار و اسپین در این اتصال به ترتیب تا بیشترین مقادیر خود یعنی $3/5$ و $2/5$ ($k_B e$) افزایش می‌یابند. این ضرایب با تغییر پتانسیل شیمیایی و بردار مغناطش فرومغناطیس قابل تنظیم هستند. اثرات دیده شده در اتصال با حذف اسپین-مدار راشبا از بین می‌روند. نتایج حاصل شده می‌تواند کاربرد اتصالات گرافینی شامل ابررسانا را در ابزارهای الکتروگرمایی وابسته به اسپین افزایش دهد.

Spin Seebeck effect in spin-orbit coupled graphene

Razieh, Beiranvand; Hamzhepour, Hossein

Department of Physics, KNT University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract

Using the Bogoliubov de-Gennes formalism, we investigate the charge and spin-dependent thermoelectric effects in ferromagnetic-superconductor graphene junctions with and without Rashba spin-orbit coupling. Results demonstrate that despite normal-superconductor junctions of graphene, there is a temperature dependent spin Seebeck both in the graphene-based ferromagnetic-superconductor ($F-S$) and ferromagnetic-Rashba spin-orbit region-superconductor ($F-RSO-S$) junctions. Furthermore, we obtain significantly large figure of merit for spin thermopower in the presence of Rashba spin-orbit interaction and the charge and spin Seebeck coefficients can reach to their maximum up to $3.5 k_B e$ and $2.5 k_B e$, respectively. Remarkably, these coefficients are tunable with respect to magnetic exchange field and chemical potential. These observed effects disappear when the Rashba coupling is absent. These results suggest that graphene-based superconductors can be used in spin-caloritronics devices.

PACS No. 72.80.Vp, 73.50.Lw, 85.75.-d, 72.25.-b, 47.78.-w.

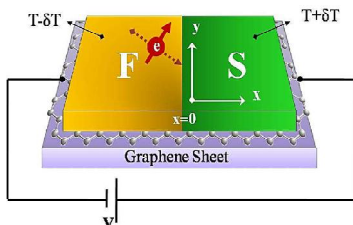
مقدمه

فرومغناطیسی، ابررسانایی و اسپین-مدار می‌تواند از طریق اثر مجاورت در گرافین القا شود [۹-۱۱]. ساختار نواری گرافین متقارن و خطی شکل است و در گرافین فرومغناطیس، تقارن زیرنوارهای اسپینی شکسته می‌شود. از آنجایی که وجود عدم تقارن در چگالی اسپینی حامل‌های بار در مجاورت سطح فرمی مهمترین عامل ایجاد اثرات الکتروگرمایی وابسته به اسپین است، طراحی اتصالات گرافینی شامل فرومغناطیس می‌تواند راهگشای مناسبی برای دستیابی به بازدهی بالاتر در ابزارهای الکتروگرمایی اسپینی باشد. از طرف دیگر، فرومغناطیس و ابررسانایی دو پدیده‌ی بسیار متضاد هستند و بدیهی است که مجاورت این دو فاز متفاوت در یک سامانه منجر به اثرات مهمی خواهد شد. علاوه بر آن، از

در سال‌های اخیر، گرافین به دلیل داشتن خواص منحصر به فرد در رسانندگی الکتریکی و گرمایی حجم وسیعی از تحقیقات را در فیزیک ماده چگال به خود اختصاص داده است [۱،۲] و کاندید مناسبی برای جای‌گزینی سیلیکان در قطعات فوتونیک و الکترونیک به شمار می‌آید [۳-۶]. گرافین طبیعی یک شبه فلز با گاف نواری صفر است که دارای تحرک‌پذیری الکترونی بسیار بالا در دمای اتاق می‌باشد. خواص تراپردی حامل‌های بار در گرافین که فرمیون‌های دیراک نامیده می‌شوند ویژگی‌های جالبی از قبیل اثر هال کوانتومی غیرعادی [۴]، تونل‌زنی کایرال [۷]، پارادوکس کلاین [۸] و غیره را ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، خاصیت

الف- اتصال گرافینی فرومغناطیس-ابرسانا

برای داشتن تحلیل درستی از نحوه حضور و عملکرد ناحیه اسپین-مدار در یک اتصال، در بخش نخست، اتصالی از دو ناحیه فرومغناطیس و ابرسانا با مرز مشترکی در $x = 0$ بدون حضور ناحیه اسپین-مدار مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است که الکترونی با جهت گیری اسپینی مشخص (اسپین بالا) به مرز مشترک اتصال برخورد می‌کند. از آنجایی که محاسبه اثرات ترموالکتریک وابسته به محاسبه رسانندگی بار و گرمای اسپینی است و رسانندگی نیز تابعی از ضرایب بازتاب و عبور حامل‌های بار در اتصال است، کافی است ضرایب ترابرد کوانتومی در مرز اتصال را با به دست آوردن توابع موج هر ناحیه و اعمال شرایط مرزی مناسب محاسبه کنیم.



شکل ۱: اتصال F-S گرافینی که دو انتهای آن در اختلاف دمای کوچکی نگهداشته شده است. به طور شماتیکی، الکترونی با اسپین بالا به فصل مشترک اتصال در $x = 0$ برخورد می‌کند.

هامیلتونی توصیف کننده حامل‌های بار در این اتصال از طریق فرمالیزم بوگلیوبوف-دوژن به صورت زیر نوشته می‌شود [۱۳، ۱۴]:

$$\begin{pmatrix} H - \mu^i & \Delta \\ \Delta^* & \mu^i - \mathbb{T}[H]\mathbb{T}^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \varepsilon \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \quad (6)$$

که در آن عملگر تقارن وارونی زمانی، μ^i پتانسیل شیمیایی ناحیه فرومغناطیس یا ابرسانا و H مجموع هامیلتونی ناحیه فرومغناطیس ابرسانا $(H_F = (s_z \otimes \sigma_0)h)$ به ازای $(x \leq 0)$ ، ابرسانا $(H_S = -U_0 s_0 \otimes \sigma_0)$ به ازای $(x \geq 0)$ و هامیلتونی دیراک $(H_D = s_0 \otimes \hbar v_F (\sigma_x k_x + \sigma_y k_y))$ است. پارامترهای u و v نیز نشان دهنده بخش‌های الکترونی و حفره‌ای توابع موج و σ_i ها ماتریس‌های پائولی هستند. در ناحیه فرومغناطیس مقدار گاف ابرسانایی برابر صفر در نظر گرفته می‌شود و در ابرسانا $\Delta(T) = \Delta_0 \tanh(1.76\sqrt{Tc/T} - 1)$ است که در آن Δ_0 گاف ابرسانایی در دمای صفر است. با قطری کردن هامیلتونی فوق، ویژه مقادیر نواحی فرومغناطیس و ابرسانا به دست می‌آیند:

دیدگاه تجربی، اثر اسپین مدار راشبا و درسلهوس نیز می‌تواند از طریق مجاورت در گرافین القا شود. معمولاً، حضور همزمان فرومغناطیسی و اثر اسپین-مدار در یک سامانه زمینی مناسبی برای ترابرد کوانتومی و گرمایی حامل‌های بار و اسپین فراهم می‌کند که می‌تواند منجر به اثرات شگفت انگیزی شود.

نتایج و بررسی

برای توصیف اثرات ترموالکتریک در یک اتصال، از فرمالیزم BTK تعمیم یافته استفاده می‌شود [۱۲]. در این روش، جریان بار و گرما با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$\begin{pmatrix} I_{ch} \\ I_{th} \end{pmatrix} = \frac{w}{\pi^2 \hbar} \int d\varepsilon \begin{pmatrix} G \\ \kappa \end{pmatrix} N_\sigma(\varepsilon) [f_L(\varepsilon) - f_R(\varepsilon)] \quad (1)$$

که بر حسب رسانندگی بار $(G = G_\sigma + G_{\bar{\sigma}})$ و رسانندگی گرمای $(\kappa = \kappa_\sigma + \kappa_{\bar{\sigma}})$ وابسته به اسپین $(\sigma = \pm, \bar{\sigma} = -\sigma)$ داده می‌شوند. در رابطه‌ی بالا $f_{L,R}(\varepsilon)$ تابع توزیع فرمی دیراک در سمت چپ و راست اتصال و $N_\sigma = |\varepsilon + \mu + \sigma h|$ چگالی حالت‌های وابسته به اسپین است. رسانندگی الکتریکی و گرمایی نیز از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$G_\sigma = g_0 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos \alpha d\alpha \left(1 - \sum_{\sigma'=\pm} \left(|r_N^{\sigma'}|^2 - |r_A^{\sigma'}|^2 \right) \right) \quad (2)$$

$$\kappa_\sigma = g_0 \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} \cos \alpha d\alpha \left(1 - \sum_{\sigma'=\pm} \left(|r_N^{\sigma'}|^2 + |r_A^{\sigma'}|^2 \right) \right)$$

که در آن $|r_N^{\sigma'}|^2$ و $|r_A^{\sigma'}|^2$ به ترتیب احتمال بازتاب عادی و آندریو وابسته به اسپین و $g_0 = 2e^2/\hbar$ کوانتای رسانندگی است. اگر دو انتهای اتصال در اختلاف دمای δT در نظر گرفته شده باشد، اثر سیبک وابسته به اسپین (مقدار ولتاژی که به ازای آن جریان باری از اتصال عبور نکند) از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$S_\sigma = - \left(\frac{V}{\delta T} \right)_{I_{ch}=0} \quad (3)$$

برای محاسبه‌ی ضریب سیبک بار (S_{ch}) و ضریب سیبک وابسته به اسپین (S_{sp}) رابطه‌ی فوق را به کار می‌گیریم:

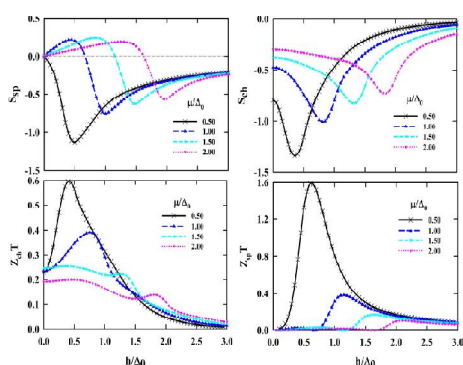
$$S_{ch} = \frac{S_\sigma + S_{\bar{\sigma}}}{2} \quad \text{و} \quad S_{sp} = S_\sigma - S_{\bar{\sigma}} \quad (4)$$

علاوه بر این، معیار شایستگی (Z) را برای تعیین میزان کارایی اتصال در دستگاه‌های خنک کننده از رابطه زیر محاسبه می‌کنیم:

$$Z_{ch} T = \frac{G_{ch} S_{ch}^2 T}{\kappa} \quad \text{و} \quad Z_{sp} T = \frac{G_{sp} S_{sp}^2 T}{\kappa_{sp}} \quad (5)$$

که در آن $G_{sp} = |G_\sigma - G_{\bar{\sigma}}|$ و $\kappa_{sp} = |\kappa_\sigma - \kappa_{\bar{\sigma}}|$ است.

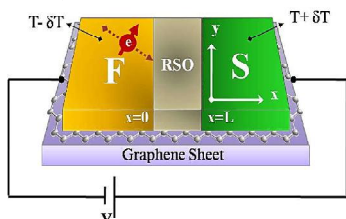
مقدار خود می‌رسند. همان طور که از ساختار نواری گرافین برمی‌آید، با مساوی هم قرار دادن پتانسیل شیمیایی و مغناطش، الکترون با اسپین بالا و حفره اسپین پایین از هم جدا می‌شوند و هر یک در یک زیرنوار اسپینی قرار می‌گیرند. (ب) رژیم مغناطش قوی ($h > \Delta_0$): با افزایش هر چه بیشتر مقدار پتانسیل شیمیایی و یا پتانسیل تبدالی مغناطیسی، شکافتگی ترازها تا حدی زیاد می‌شود که حامل‌های بار دیگر انرژی لازم برای حضور در ترازهای بالاتر را به دست نخواهند آورد و به همین علت دامنه‌ی ترابرد گرمایی افت می‌کند.



شکل ۳: ضریب سبیک بار (S_{ch}) و اسپین (S_{sp}) و معیار شایستگی بار و اسپین بر حسب پتانسیل شیمیایی در اتصال F-S.

ب- اتصال فرومغناطیس - اسپین - مدار راشبا - ابرسانا:

در حالت دوم، ترابرد گرمایی در حضور اثر اسپین-مدار راشبا را در اتصال F-RSO-S مورد مطالعه قرار می‌دهیم (شکل ۴).



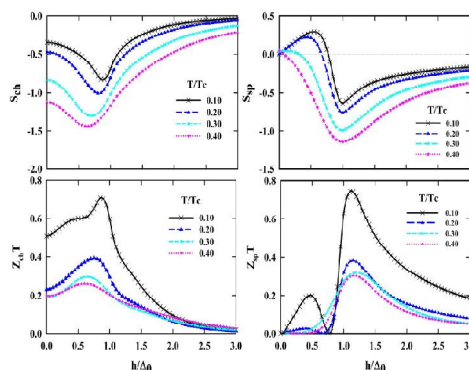
شکل ۴: اتصال فرومغناطیس-ناحیه اسپین-مدار راشبا-ابرسانا در زمینه‌ی گرافینی که دو انتهای آن در اختلاف دمای کوچکی نگهداشته شده است.

در حضور اثر اسپین-مدار، هامیلتونی نوشته شده در رابطه‌ی (۶) شامل دو بخش هامیلتونی دیراک (H_D) و هامیلتونی ناحیه اسپین-مدار راشبا ($H_{RSO} = -\lambda(s_y \otimes \sigma_x - s_x \otimes \sigma_y)$) برای $(0 \leq x \leq L)$ خواهد بود. هامیلتونی ناحیه فرومغناطیس برای $(x \leq 0)$ و ناحیه ابرسانا برای $(x \geq L)$ نیز مانند روابط ارائه شده در اتصال F-S نوشته می‌شوند. باقطری کردن هامیلتونی ویژه مقادیر

$$\varepsilon = \pm \mu^F \pm \left((k_x^F)^2 + (k_y^F)^2 \right)^{1/2} \pm h \quad (7)$$

$$\varepsilon = \left(|\Delta|^2 + \left(\mu^S + U_0 \pm \sqrt{(k_x^S)^2 + (k_y^S)^2} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

با اعمال شرایط مرزی در $x = 0$ می‌توان ضرایب بازتاب نرمال و آندریو را محاسبه کرد (حزئیات بیشتر محاسبات در مرجع [۱۵]). شکل ۲ و ۳ تغییرات ضریب سبیک بار و اسپین و نمودار معیار شایستگی بار و اسپین را بر حسب مغناطش ناحیه فرومغناطیس به ترتیب با تغییر دما و پتانسیل شیمیایی اعمال شده نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل برمی‌آید، در غیاب میدان تبدالی مغناطیسی در ناحیه فرومغناطیس، اثر سبیک اسپینی صفر است.



شکل ۵: ضریب سبیک بار (S_{ch}) و اسپین (S_{sp}) و معیار شایستگی بار و اسپین بر حسب مغناطش در اتصال F-S در تمام نمودارها مقدار $\mu = 1.0 \Delta_0$ و اختلاف دمای دو سر اتصال $T/Tc = 0.1$ در نظر گرفته شده است.

با افزایش پتانسیل فرومغناطیس h ، مقدار ضرایب سبیک بار و اسپین افزایش می‌یابد. این اثر به دلیل شکافتگی زیر نوارهای اسپینی در ناحیه فرومغناطیس است که چگالی حامل‌های بار در مجاورت سطح فرمی را تغییر می‌دهد. در میدان‌های تبدالی بزرگ تر از Δ_0 ترابرد گرمایی افزایش می‌یابد، به همین علت معیار شایستگی متناظر آن دارای روند کاهشی بوده و به صفر میل می‌کند. برای مقادیر $h \leq \Delta_0$ ترابرد گرمایی و الکتریکی کم می‌شود و در نتیجه‌ی آن معیار شایستگی روند افزایشی خواهد داشت. از آن‌جایی که در گرافین، مقدار پتانسیل شیمیایی μ قابل تغییر و تنظیم است، می‌توان رژیم‌هایی یافت که در آن مقدار و علامت ضریب سبیک بهینه باشد: الف) رژیم مغناطش ضعیف ($h \leq \Delta_0$): در این رژیم در صورتی که گرافین آلابیده شده باشد به ازای مقادیر $\mu = h = 1.0 \Delta_0$ معیار شایستگی به بیشترین

در برهم‌کنش اسپین-مدار راشبا نوسان‌های محدودی ناشی از اسپین-میکسینگ در منحنی‌های خود نشان می‌دهند.

نتیجه گیری

در این پژوهش نشان دادیم که حضور برهم‌کنش اسپین-مدار راشبا می‌تواند در اتصال‌های فرومغناطیس و ابررسانا موجب افزایش بازده ضرایب توان-گرما می‌گردد در حالی که معیار شایستگی مقدار قابل قبول خود را همچنان حفظ می‌نماید. این ضرایب با تغییر پتانسیل شیمیایی و بردار مغناطش فرومغناطیس قابل تنظیم هستند. نتایج حاصله کاربرد اتصالات گرافینی شامل ابررسانا را در ابزارهای الکتروگرما می‌وابسته به اسپین افزایش می‌دهد.

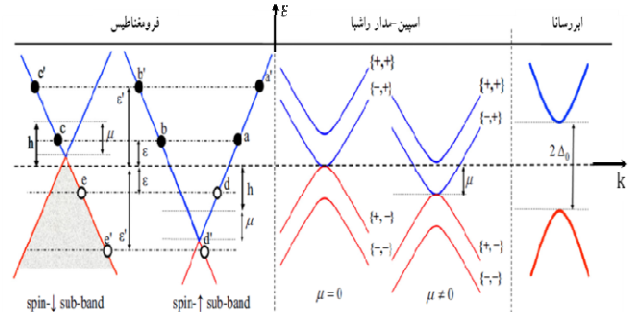
مرجع ها

- [1] A. K. Geim and K. S. Novoselov, Nat Mater 6, 183 (2007).
- [2] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, Reviews of Modern Physics 81, 109 (2009).
- [3] K. S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov, D. Jiang, Y. Zhang, S. V. Dubonos, I. V. Grigorieva, and A. A. Firsov, Science 306, 666 (2004).
- [4] Y. Zhang, Y.-W. Tan, H. L. Stormer, and P. Kim, Nature 438, 201 (2005).
- [5] K. S. Novoselov *et al.*, Science 315, 1379 (2007).
- [6] S. V. Morozov, K. S. Novoselov, M. I. Katsnelson, F. Schedin, D. C. Elias, J. A. Jaszczak, and A. K. Geim, Physical Review Letters 100, 016602 (2008).
- [7] M. I. Katsnelson, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, Nat Phys 2, 620 (2006).
- [8] C. W. J. Beenakker, Reviews of Modern Physics 80, 1337 (2008).
- [9] N. Tombros, C. Jozsa, M. Popinciuc, H. T. Jonkman, and B. J. van Wees, Nature 448, 571 (2007).
- [10] C. T. Z. Wang, R. Sachs, Y. Barlas, and J. Shi, Physical Review Letters 114, 016603 (2015).
- [11] O. A. S. J. B. S. Mendes, L. M. Meireles, R. G. Lacerda, F. L. A. M. L. H. Vilela-Leo, R. L. Rodriguez-Surez, A., and a. S. M. R. Azevedo, Physical Review Letters 115, 226601 (2015).
- [12] G. E. Blonder, M. Tinkham, and T. M. Klapwijk, Physical Review B 25, 4515 (1982).
- [13] C. W. J. Beenakker, Physical Review Letters 97, 067007 (2006).
- [14] P. G. deGennes, Superconductivity of Metals and Alloys (Westview Press, 1966).
- [15] R. Beiranvand, H. Hamzeshpour, and M. Alidoust, Physical Review B 94, 125415 (2016).
- [16] R. Beiranvand and H. Hamzeshpour, arXiv:1612.01461 (2016).

انرژی در ناحیه اسپین-مدار به دست می‌آید:

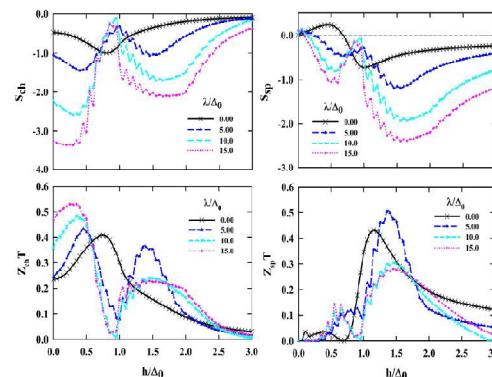
$$\varepsilon = \mu^{RSO} + \zeta \left[(k_x^{RSO})^2 + (k_y^{RSO})^2 + \lambda^2 \right]^{1/2} + \eta\lambda \quad (9)$$

ساختار نواری نواحی مختلف مطابق شکل ۵ ترسیم می‌شود:



شکل ۵- ساختار نواری اتصال ابررسانا-اسپین-مدار راشبا- فرومغناطیس. در حضور فرومغناطیس ساختار خطی گرافین به دو زیر نوار اسپینی شکافته شده که منجر به غیرصفر شدن بازتاب های آندریو و نرمال غیرعادی می‌گردد.

در حضور ناحیه اسپین-مدار راشبا، احتمال بازتاب غیرعادی آندریو و بازتاب غیرعادی نرمال نیز غیر صفر می‌شود (رابطه ۲) و حضور اسپین-مدار در فصل مشترک فرومغناطیس و ابررسانا با شکافتن مجدداً زیرنوارهای اسپینی، تولید یک ناحیه اسپین میکسینگ می‌کند که چگالی حامل‌های بار را تغییر می‌دهد [۱۵]. از این رو، ضرایب سبیک بار و اسپین نوسانات ظریفی متناسب با پارامتر راشبا (λ) از خود نشان می‌دهند.



شکل ۶: ضریب سبیک بار (S_{Ch}) و اسپین (S_{Sp}) و معیار شایستگی بار و اسپین بر حسب پتانسیل شیمیایی در اتصال F-RSO-S.

با توجه به شکافتگی ترازها در ناحیه اسپین-مدار، چگالی حامل‌های بار در سطح فرمی عدم توازن بیشتری پیدا خواهد کرد که این امر موجب افزایش ضریب توان-گرما می‌گردد و اسپین تا مقادیر ۳/۵ و ۲/۵ k_B خواهد شد [۱۶]. معیار شایستگی و ضریب توان‌گرما می‌