

اثر میدان الکتریکی خارجی بر ترابرد ترموالکتریکی سیلیسن

سعیده نوروز^۱، روح اله فرقدان^۱

^۱ دانشگاه کاشان؛ دانشکده فیزیک

چکیده

در این مقاله خواص ترموالکتریکی و اسپینترونیکی سیلیسن فرومغناطیسی بر مبنای معادله دیراک، در حضور میدان الکتریکی خارجی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر میدان الکتریکی و پتانسیل شیمیایی می‌توان جریان اسپینی و الکتریکی عبوری را کنترل کرده و جریان خالص اسپینی تولید کرد. همچنین نشان می‌دهیم افزایش میدان الکتریکی جهت جریان‌های اسپین-گرمایی و نوع حامل‌های بار را به شدت تغییر می‌دهد که اهمیت استفاده از سیلیسن در نانو قطعات اسپین-کالریترونیکی را بیان می‌کند.

درگرافن و سیلیسن گرادیان گرمایی می‌تواند سبب ایجاد جریان خالص اسپینی شود. مقدار و بزرگی این جریان با میدان الکتریکی خارجی و میدان تبادل ناشی از حضور مواد فرومغناطیسی می‌تواند کنترل شود [۱، ۲، ۳]. در مقایسه با گرافن سیلیسن دارای جفت شدگی اسپین-مدار ذاتی بزرگتری است که نقش مهمی را در ترابرد اسپینی ایفا می‌کند [۱]. در این مقاله برای اعمال اثر طول ناحیه فرومغناطیس بر تولید جریان اسپین-قطبیده ساختار سیلیسن نرمال-سیلیسن فرومغناطیس-سیلیسن نرمال را در نظر گرفته ایم. همچنین با اعمال میدان الکتریکی خارجی به ناحیه سیلیسن فرومغناطیسی هامیلتونی انرژی‌های پایین دیراک را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$H = \hbar v_f (\sigma_x q_x - \eta \sigma_y q_y) - \Delta_{\eta s} \sigma_z - s V_{ex} + V_g \quad (1)$$

که در آن v_f سرعت فرمی، σ_i ماتریس‌های پائولی در زیرفضای شبه اسپین، $q_{x,y}$ بردارهای موج، $\Delta_{\eta s} = \eta s \Delta_{so} - \Delta_z$ پارامتر جفت‌شدگی اسپین-مدار و Δ_z اختلاف پتانسیل زیر شبکه‌های A و B است که با استفاده از میدان الکتریکی خارجی قابل تنظیم است. V_{ex} میدان تبادل در ناحیه فرومغناطیسی، V_g میدان الکتریکی خارجی، $\eta = \pm 1$ علامت نقاط K و K' و $s = \pm 1$ اسپین بالا و اسپین پایین را نشان می‌دهد [۴]. پراکنندگی الکترون‌های بدون جرم دیراک با انرژی E و با اتصال سیلیسن نرمال-سیلیسن فرومغناطیس-سیلیسن نرمال مطابق با یک سد پتانسیل مربعی می‌باشد بنابراین دامنه عبور موج فرودی به سد پتانسیل را می‌توان به صورت زیر بدست آورد [۵]:

$$t = \frac{4q_x k_x E_F E_N e^{-iq_x L}}{E_F E_N \left[k_+ (k'_+ e^{-iq_x L} + k'_- e^{iq_x L}) + k_- (k'_- e^{-iq_x L} + k'_+ e^{iq_x L}) \right] + E_F^2 k^2 (e^{-iq_x L} - e^{iq_x L}) + k'^2 E_N^2 (e^{-iq_x L} - e^{iq_x L})} \quad (2)$$

با استفاده از دامنه عبور موج فرودی می‌توان احتمال عبور $\text{Tr}(\rho)$ را برای سیلیسن بدست آورد. در ترابرد همدوس ضرایب جنبشی \mathcal{L}_s^α متناسب با ضرایب ترموالکتریک برابر است با [۶]:

$$\mathcal{L}_s^\alpha = \frac{1}{\hbar} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\varphi \cos \varphi \times \int_{-\infty}^{\infty} d\varepsilon \left(-\frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \right) (\varepsilon - \mu)^\alpha \rho_s(\varepsilon) \text{Tr}(\rho) \quad (3)$$

با استفاده از ضرایب جنبشی و رابطه $s_s = -\frac{1}{T} \frac{\mathcal{L}_s^1}{\mathcal{L}_s^0}$ ، ضریب سبک بار $S_{ch} = (S_\uparrow + S_\downarrow)/2$ و اسپین $S_{sp} = (S_\uparrow - S_\downarrow)$ بدست می‌آید [۶]. عملکرد یک سیستم برای تولید اثر ترموالکتریک با پارامتر بدون بعد به

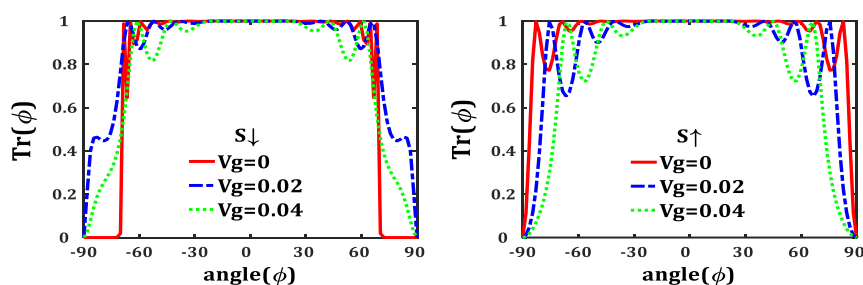
نام بازدهی ترموالکتریکی معرفی می شود. به طور کلی در اسپین-کالریترونیک می توان با ایجاد اختلاف دما این مفهوم را به صورت جداگانه برای بار و اسپین به صورت زیر تعریف کرد [۷]:

$$Z_{ch(sp)} = \frac{G_{ch(sp)} S_{ch(sp)}^2 T}{K} \quad (۴)$$

رسانندگی بار برابر با $G_{ch} = G_{\uparrow} + G_{\downarrow}$ و رسانندگی اسپینی برابر با $G_{sp} = |G_{\uparrow} - G_{\downarrow}|$ است که G_{\uparrow} و G_{\downarrow} با رابطه $G_s = e\mathcal{L}_0$ بیان می شود. $K = K_{\uparrow} + K_{\downarrow}$ رسانندگی گرمایی و با رابطه (۵) نشان داده می شود.

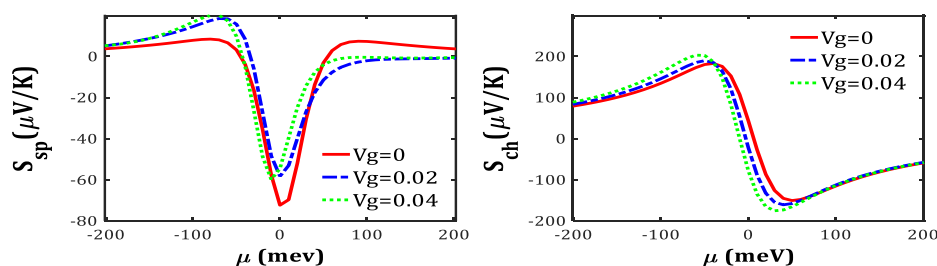
$$K = \frac{e}{T} \left[\mathcal{L}_s^2 - \frac{(\mathcal{L}_s^1)^2}{\mathcal{L}_s^0} \right] \quad (۵)$$

شکل ۱ نشان دهنده احتمال عبور برای حامل های بار اسپین بالا و اسپین پایین در حضور میدان الکتریکی می باشد و همانطور که مشاهده می شود مقادیر بدست آمده برای اسپین بالا و اسپین پایین متفاوت است اما در زوایای بین حدود ۳۰ تا -۳۰ درجه این تفاوت بسیار کمتر است. در شکل ۱ می بینیم که در نبود میدان الکتریکی ضریب عبور برای حامل های بار اسپین پایین در زوایای حدود ۷۰ تا ۹۰ درجه صفر است، در حالی که ضریب عبور اسپین بالا در این بازه مقادیر قابل توجهی دارد که نتیجه آن ایجاد جریان خالص اسپین بالا است. در این بازه از زوایا با اعمال پتانسیل



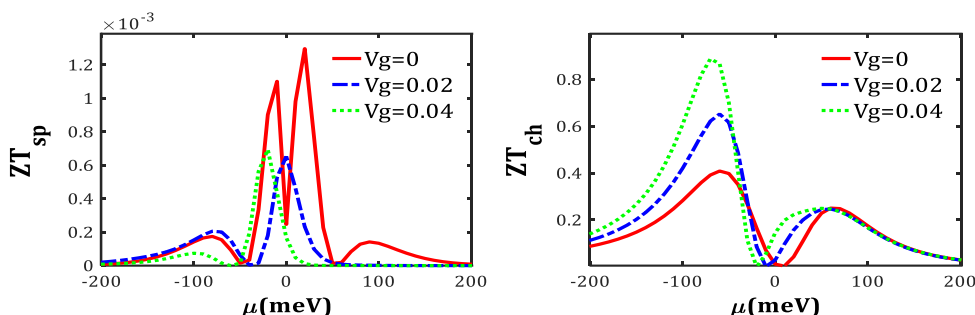
شکل ۱: احتمال عبور برای اسپین بالا و اسپین پایین در حضور میدان الکتریکی خارجی در سیلیسن

الکتریکی ضریب عبور اسپین پایین مقادیر غیر صفری خواهد داشت و جریان خالص اسپین بالا از بین می رود. نمودارهای شکل ۲ رفتار ضریب سبیک اسپینی و بار را در میدان های الکتریکی مختلف، بر حسب پتانسیل شیمیایی نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود در حضور و غیاب میدان های الکتریکی ضریب سبیک بار اطراف پتانسیل صفر به سمت صفر میل می کند، در حالی که ضریب سبیک اسپینی به بیشترین مقدار خود می رسد و به این معنی است که اطراف $\mu = 0$ می توان جریان اسپینی خالص داشت. از آنجا که علامت ضریب سبیک به نوعی نشان دهنده جریان ایجاد شده در سیستم است، جهت جریان اسپینی ذکر شده اطراف $\mu = 0$ منفی است. در نقاطی که ضریب سبیک بار به مقدار بیشینه خود می رسد ضریب سبیک اسپینی به صفر میل می کند که نشان دهنده وجود جریان بار بدون جریان اسپینی است.



شکل ۲: نمودار ضریب سبیک اسپین و بار در دمای ۳۰۰ K و بر حسب پتانسیل شیمیایی و در حضور میدان الکتریکی خارجی در سیلیسن

شکل ۳ نمودار ضریب بازدهی ترموالکتریکی بار و اسپین برحسب پتانسیل شیمیایی و با اعمال میدان الکتریکی خارجی در سیلیسن نشان داده شده است. بازدهی ترموالکتریکی اسپینی در غیاب میدان الکتریکی خارجی در بازه $\mu = -50\text{meV}$ تا $\mu = 50\text{meV}$ مقدار بیشتری دارد در حالی که با اعمال میدان الکتریکی خارجی کاهش می یابد در مقابل بیشینه مقادیر بازدهی ترموالکتریکی بار با افزایش میدان الکتریکی افزایش می یابد. بنابراین با اعمال میدان الکتریکی خارجی می توان بیشینه مقدار بازدهی را در پتانسیل شیمیایی دلخواه تنظیم نمود. با افزایش میدان الکتریکی بیشینه مقادیر بازدهی ترموالکتریکی اسپینی و بار به سمت چپ نمودار یعنی مقادیر منفی پتانسیل شیمیایی جابه جا می شود. افزایش مقادیر بازدهی در جهت منفی پتانسیل شیمیایی در نمودار نشان دهنده افزایش اثرات حفره ها در خواص ترموالکتریکی می باشد.



شکل ۳: نمودار ضریب بازدهی ترموالکتریکی بار و اسپین برحسب پتانسیل شیمیایی و در حضور میدان الکتریکی خارجی در سیلیسن

نتیجه گیری

نتایج نشان می دهد که سیلیسن فرومغناطیسی در حضور گرادیان های گرمایی نسبت به تغییرات میدان الکتریکی بسیار حساس هستند به صورتیکه ضرایب احتمال عبور برای الکترون های با اسپین بالا و اسپین پایین در حضور میدان الکتریکی خارجی رفتار متفاوتی را نشان می دهند. در نتیجه جریان های عبوری از سیلیسن فرومغناطیسی می تواند تغییر کند. همچنین با افزایش میدان الکتریکی خارجی رفتار کیفی نمودارهای سبیک اسپین و بار و ضریب بازدهی اسپین و بار تغییری نمی کند و همچنان مرتبه بزرگی ضرایب ترموالکتریکی اندازه قابل توجهی دارند اما افزایش میدان الکتریکی جهت جریان های اسپین-گرمایی و نوع حامل های بار را به شدت تغییر می دهند. قابل توجه آنکه سیستم طراحی شده می تواند با کنترل میدان الکتریکی و پتانسیل شیمیایی جریان های خالص اسپینی ایجاد نماید. این موضوع اهمیت استفاده از سیلیسن در نانو قطعات اسپین-کالیترونیک را افزایش می دهد.

مرجع ها

- [1] Ping Niu, Zhi, and Shihao Dong. "Valley and spin thermoelectric transport in ferromagnetic silicene junctions." *Applied Physics Letters* 104.20 (2014): 202401.
- [2] Napitu, B. D. "Charge, spin and valley pumping in silicene junction." *The European Physical Journal B* 90.9 (2017): 168.
- [3] Rameshti, Babak Zare, and Ali G. Moghaddam. "Spin-dependent Seebeck effect and spin caloritronics in magnetic graphene." *Physical Review B* 91.15 (2015): 155407.
- [4] Yokoyama, Takehito. "Controllable valley and spin transport in ferromagnetic silicene junctions." *Physical Review B* 87.24 (2013): 241409.
- [5] Yokoyama, Takehito. "Controllable valley and spin transport in ferromagnetic silicene junctions." *Physical Review B* 87.24 (2013): 241409.
- [6] Rameshti, Babak Zare, and Ali G. Moghaddam. "Spin-dependent Seebeck effect and spin caloritronics in magnetic graphene." *Physical Review B* 91.15 (2015): 155407.
- [7] Shirdel-Havar, Majid, and Rouhollah Farghadan. "Spin caloritronics in spin semiconducting armchair graphene nanoribbons." *Physical Review B* 97.23 (2018): 235421.