

قطبش وادی و اسپین در سوپاپ اسپینی ابرسانی تک لایه MoS₂

لیلا مجیدی فردوطن، رضا عسگری

پژوهشکده فیزیک، پژوهشگاه دانشهای بنیادی (IPM)، تهران ۱۹۳۹۵-۵۵۳۱

چکیده

یک سوپاپ اسپینی ابرسانا (F/S/F) برپایه مولیبدن دی سولفاید تک لایه پیشنهاد می کنیم که ترابرد امواج فرودی با بازه مشخصی از پتانسیل شیمیایی ناحیه فرومغناطیس توسط فرآیند تونل زنی الاستیک (CT) در پیکربندی موازی و فرآیند بازتاب اندرید عبوری (CAR) در پیکربندی پادموازی از بردارهای مغناطش صورت می گیرد و جریان غیر موضعی با قطبش وادی و اسپین ایجاد می کند، به طوریکه نوع قطبش با تغییر نوع پیکربندی عوض می شود. همچنین حضور جمله توپولوژیکی β و برهم کنش اسپین-مدار منجر به بلندبرد بودن فرآیندهای CT و CAR در ساختار پیشنهاد شده می شود.

یکی از روش های ایجاد الکترون های درهم تنیده در فیزیک ماده چگال فرآیند بازتاب اندرید عبوری (CAR) در ساختارهای هیبریدی ابرسانی s-wave است. اخیرا نشان داده شده است که کریستال های دوبعدی مانند گرافین و سیلیسن، مواد مناسبی برای ایجاد فرآیندهای CAR هستند [1]. در این مقاله ساختار سوپاپ اسپینی ابرسانا (F/S/F) بر پایه مولیبدن دی سولفاید (MoS₂) را پیشنهاد می کنیم که فرآیند بازتاب اندرید عبوری (CAR) بدون هیچ گونه آلاشی از فرآیند تونل زنی الاستیک الکترون (CT) در آن ایجاد می شود. تک لایه MoS₂ نمونه دیگری از کریستال های دو بعدی است که دارای خواص فیزیکی متمایزی نسبت به بالک است. تک لایه MoS₂ دارای گاف نواری مستقیم 1.9 الکترون ولت و یک برهم کنش قوی اسپین-مدار است که باعث جدایی زیرنوارهای اسپینی با اسپین بالا و پایین در نوار ظرفیت و قطبش اسپینی آن می شود [2]. این ساختار MoS₂ برخلاف ساختارهای گرافینی و سیلیسنی، جریان با قطبش وادی و اسپین را برای محدوده مشخصی از پتانسیل شیمیایی ناحیه فرومغناطیس (F) و بدون ثابت نگه داشتن پارامتری خاص ایجاد می کند. رسانش فرآیندهای CT و CAR نیز برای طول های مختلف از ناحیه ابرسانا (S) مقدار متناهی دارند. این نتایج نشان دهنده مزیت ساختار MoS₂ در اندازه گیری رسانش است. یک اتصال پهن F/S/F برپایه MoS₂ با دوپینگ نوع p در نظر می گیریم که یک سوپاپ اسپینی ابرسانا را تشکیل می دهد (شکل 1(a)). نواحی ابرسانا و فرومغناطیس، به ترتیب، به واسطه مجاورت با الکترو ابرسانی s-wave و فرومغناطیس ایجاد شده اند. میدان تبدلی القا شده در ناحیه F سمت چپ $\vec{h}_L = h\hat{z}$ و در ناحیه F سمت راست $\vec{h}_R = \pm\vec{h}_L$ برای پیکربندی موازی (پادموازی) است. برای محاسبه به روش پراکندگی، از معادله دیراک-بوگولیوبوف-دوژن (DBdG) [3,4] استفاده می کنیم:

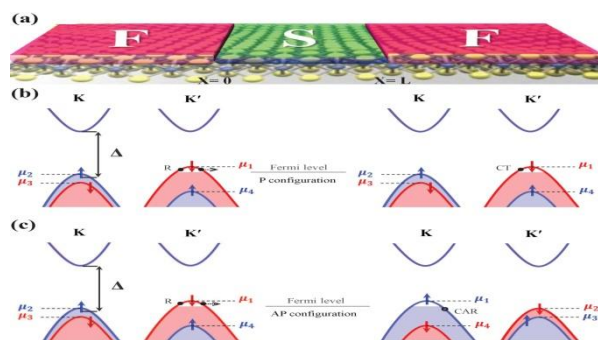
$$\begin{pmatrix} H_\tau - sh & \Delta_s \\ \Delta_s^* & -(H_\tau - \bar{s}h) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_{s,\tau} \\ v_{\bar{s},\bar{\tau}} \end{pmatrix} = (\mu + \varepsilon) \begin{pmatrix} u_{s,\tau} \\ v_{\bar{s},\bar{\tau}} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$H_\tau = v_F(\vec{\sigma}_\tau \cdot \vec{p}) + \frac{\Delta}{2}\sigma_z + \lambda s\tau \left(\frac{1-\sigma_z}{2} \right) + \frac{p^2}{4m_0}(\alpha + \beta\sigma_z) + U(r)$$

MoS₂ [5] با اسپین $s = \pm 1$ ($\bar{s} = -s$) و از وادی $\tau = \pm 1$ ($\bar{\tau} = -\tau$) است. گاف انرژی $\Delta = 1.9 \text{ eV}$ ، ثابت برهم کنش اسپین-مدار $\lambda = 0.08 \text{ eV}$ ، $\alpha = 0.43$ و $\beta = 2.21$ است. در ناحیه ابرسانا، میدان تبدلی $h=0$ است و پتانسیل الکتروستاتیکی $U(r)$ در نواحی S و F، به ترتیب $-U_0$ و صفر است. ε انرژی برانگیختگی است و توابع موج الکترون و حفره $u_{s,\tau}$ و $v_{\bar{s},\bar{\tau}}$ اسپینورهای دومولفه ای مربوط به نوار رسانش و ظرفیت هستند.

یک الکترون با اسپین s از وادی τ در نظر می گیریم که از ناحیه F چپ تزریق می شود. این الکترون می تواند انعکاس نرمال (R) به صورت یک الکترون داشته باشد و یا به واسطه فرآیند CT از نمونه تونل زنی انجام دهد. همچنین می تواند به واسطه فرآیند بازتاب اندرید (AR) از مرز اول S وارد ناحیه F چپ و یا به واسطه فرآیند CAR وارد ناحیه

F راست شود. با در نظر گرفتن دامنه فرآیندهای R، AR، CAR و CT، به صورت $r_e^{s,\tau}$ ، $t_e^{s,\tau}$ ، $r_h^{s,\tau}$ و $t_h^{s,\tau}$ ،



شکل ۱: (a) شمای ساختار سوپاپ اسپینی (b-c) روابط پاشندگی در فضای تکانه برای پیکربندی موازی و پادموازی.

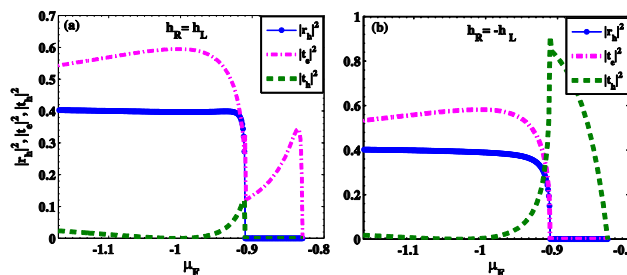
اسپینی مختلف از دو وادی هستند. $\mu_3 = -\Delta/2 - \lambda - h$ و $\mu_3 = -\Delta/2 - \lambda + h$ ، $\mu_2 = -\Delta/2 + \lambda - h$ ، $\mu_1 = -\Delta/2 + \lambda + h$ انرژی لبه های نوار ظرفیت برای زیرنوارهای

نوشتن توابع موج در نواحی S و F و اعمال شرط مرزی پیوستگی توابع موج در دو مرز، دامنه های پراکندگی به دست می آیند [6] و می توانیم با استفاده از فرمول BTK رسانش متناظر این فرایندها را به صورت زیر محاسبه کنیم:

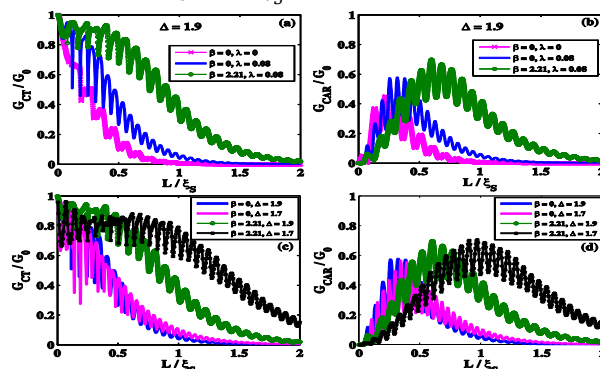
$$G_{AR} = \sum_{s,\tau=\pm 1} G_0^{s,\tau} \int_0^{\theta_{AR}} (1 - |r_e^{s,\tau}|^2 + |r_h^{s,\tau}|^2) \cos \theta_e d\theta_e, \quad (2)$$

$$G_{CT(CAR)} = \sum_{s,\tau=\pm 1} G_0^{s,\tau} \int_0^{\theta_{CT(CAR)}} |t_{e(h)}^{s,\tau}|^2 \cos \theta_e d\theta_e, \quad (3)$$

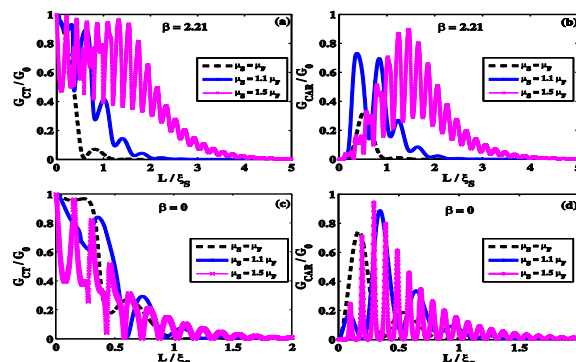
$G_0^{s,\tau}$ رسانش مربوط به سیستم نرمال با اسپین S از وادی τ است. θ_{CT}, θ_{AR} نیز به ترتیب زوایای بحرانی فرود برای فرایندهای AR، CT و CAR هستند. همچنین در دمای صفر $\varepsilon = eV$ قرار می دهیم. با بررسی احتمال فرایندهای مختلف بدست می آوریم که برای همه الکترون های فرودی با پتانسیل شیمیایی $\mu_2 < \mu_F - \varepsilon \leq \mu_1$ فرایند AR حذف می شود و رسانش عبوری به ناحیه F سمت راست به پیکربندی بردارهای مغناطش نواحی F بستگی دارد. ترابرد در پیکربندی موازی تماماً توسط فرایند CT با عبور یک الکترون با اسپین $s = -1$ و از وادی $\tau = -1$ و در پیکربندی پادموازی تماماً توسط فرایند CAR و با عبور یک حفره با اسپین مخالف ($s = 1$) و از وادی مخالف ($\tau = 1$) صورت می گیرد (شکل های (b-c) 1 و 2). این نوع خاص ترابرد اثر سوئیچ کردن وادی و اسپین را بین فرایند CT محض و CAR محض و برای تمامی ولتاژهای بایاس کوچکتر از گاف ابررسانایی پیشنهاد می کند. علاوه براین، جریان غیرموضعی در ناحیه F سمت راست نیز دارای قطبش وادی و قطبش اسپینی خواهد بود، به طوری که نوع قطبش را می توان با معکوس کردن جهت بردار مغناطش ناحیه F سمت راست تغییر داد. شکل 3 رسانش فرایندهای CT (ستون چپ) و CAR (ستون راست) را که به ترتیب در پیکربندی موازی و پادموازی وجود دارند، به عنوان تابعی از طول ناحیه ابررسانا L / ξ_S (که به طول همدوسی ابررسانایی ξ_S بهنجار شده است) برای ساختار گرافینی گاف دار و MoS2 وقتی که گاف انرژی $\Delta = 1.9, 1.7 \text{ eV}$ است، نشان می دهد. فرایند CT برای اتصال کوتاه $L \ll \xi_S$ غالب است، در حالی که فرایند CAR در این رژیم متوقف می شود. رسانش فرایند CT با افزایش طول L کاهش می یابد و رسانش CAR به یک قله در $L < \xi_S$ می رسد. همچنین یک رفتار نوسانی برحسب طول L دارند. حضور برهم کنش اسپین-مدار و جمله توپولوژیکی β در هامیلتونی تعمیم یافته، رسانش فرایندهای CT و CAR را نسبت به ساختار متناظر گرافینی گاف دار افزایش می دهد و باعث می شود که این فرایندها برای طول های بزرگ از ناحیه S حضور داشته باشند. علاوه براین، رسانش این فرایندها با کاهش اندازه گاف انرژی (مثلاً به واسطه اعمال کشش) و افزایش پتانسیل شیمیایی ناحیه ابررسانا μ_S ، افزایش می یابد و این فرایندها در طول های بزرگتری از ناحیه ابررسانا حضور دارند. در حالی که اندازه رسانش برای μ_S های بزرگ در حالت $\beta = 0$ شدیداً وابسته به طول L است و می تواند برای طول های مختلف صفر باشد، برای حالت $\beta = 2.21$ مقدار متناهی دارد و می تواند اندازه آن برای طول های مختلف کنترل شود. این ویژگی ساختار پیشنهاد شده برخلاف ساختارهای گرافینی و سیلیسینی است و نشان دهنده مزیت ساختار MoS2 در اندازه گیری های تجربی رسانش عبوری است.



شکل ۲: احتمال فرآیندهای AR، CT و CAR بر حسب μ_F برای (a) پیکربندی موازی و (b) پادموازی، وقتی $h_L = 0.5\lambda$.
 $\frac{eV}{\Delta_S} = 0$ و $\frac{L}{\xi_S} = 0.5, \mu_S = -1 eV$ است.



شکل ۳: رسانش فرآیندهای CT و CAR محض بر حسب $\frac{L}{\xi_S}$ برای گرافین گاف دار ($\lambda = 0, \beta = 0$) و MoS2 ($\lambda = 0$) وقتی $\alpha = 0$.
 $\Delta_S = 0.01 eV, \mu_F = \mu_2 + eV + 0.001, \mu_S = -1 eV, h = 0.5\lambda, \beta = 0$ و (a-b) $\beta = 0$ و (c-d) $\beta = 2.21$ است.



شکل ۴: رسانش فرآیندهای CT و CAR محض بر حسب $\frac{L}{\xi_S}$ برای μ_S های مختلف در ساختار MoS2 وقتی $\alpha = 0, \Delta_S = 0.05 eV$.
 $\mu_F = \mu_2 + eV + 0.001, \mu_S = -1 eV, h = 0.5\lambda, \beta = 0$ و (a-b) $\beta = 0$ و (c-d) $\beta = 2.21$ است.

نتیجه گیری

سوپاپ اسپینی ابرسانی بر پایه تک لایه MoS2 پیشنهاد کرده ایم که فرآیند CAR محض (CT محض) بدون ثابت نگه داشتن پارامتر خاصی در پیکربندی پادموازی (موازی) از بردارهای مغناطش نواحی فرومغناطیس اتفاق می افتد. با بررسی اثر پارامترهای مختلف نشان داده ایم که ساختار آزمایشگاهی مناسب برای اندازه گیری جریان غیر موضعی با قطبیدگی وادی و اسپین به واسطه فرآیند CAR (CT) محض، ساختار MoS2 با دوپینگ نوع p است که دارای گاف انرژی کوچکتر و پتانسیل های شیمیایی بزرگتر در نواحی فرومغناطیس و ابرسانا باشد.

مرجع ها

1. J. Cayssol, Phys. Rev. Lett. **100**, 147001 (2008); J. Linderet. al, Phys. Rev. B **80**, 014513 (2009); J. Wang, et. al, Phys. Rev. B **85**, 035402 (2012).
2. K. F. Mak, et. al, Phys. Rev. Lett. **105**, 136805 (2010); D. Xiao, et. al, Phys. Rev. Lett. **108**, 196802 (2012).
3. C. W. J. Beenakker, Phys. Rev. Lett. **97**, 067007 (2006);
4. L. Majidi, H. Rostami and R. Asgari, Phys. Rev. B **89**, 045413 (2014).
5. H. Rostami, A. G. Moghaddam, and R. Asgari, Phys. Rev. B **88**, 085440 (2013).
6. L. Majidi and R. Asgari, arXiv:1402.1840.