مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

چگالی اسپین و الکتردن در عایق‌های توپولوژیک با لایه فرومغناطیسی نامتقارن

کرم بهاری[۱]، رستم مرادیان[۲]

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه رازی، کرمانشاه

چکیده

عایق توپولوژیک دو بعدی با یک لایه فرومغناطیسی در نظر گرفته شده است. برای لایه مغناطیسی با اندازه بردار مغناطش غیر یکنواخت چگالی الکترون و چگالی اسپین الکترون حالت های مقید به عدد موج عرضی و نایکنواختی اندازه بردار مغناطش بستگی دارد. نایکنواختی بردار مغناطش و افزایش عدد موج عرضی اثراتی عکس یکدیگر روی چگالی‌های الکترون و اسپین دارند.

عایق‌های توپولوژیک قوی سه بعدی که Bi_2Se_3 یک نمونه مهم آن می باشد اخیرا کشف شده است [۱]. یکی از مشخصه های اصلی عایق‌های توپولوژیک برهم کنش قوی اسپین–مدار در آنها می باشد [۲].

فرومغناطیس القایی که پارامتر نظم تابع زمان باشد منجر به پدیده مگنتوترابرد می‌شود [۳–۵]. ترابرد فرمیونهای دیراک در دیواره مغناطیسی در گرافن بررسی شده است [۶].

آرایشی که در آن یک لایه فرومغناطیس بین دو پایانه با پتانسیل های متفاوت قرار گرفته باشد مطالعه شده است [۷]. در حالتی که میدان مغناطیسی در جهت خارج از صفحه می باشد، هدایت به صورت نوسانی با پهنای لایه تغییر می کند.

در این مقاله به مطالعه اثر یک لایه فرومغناطیس که در آن اندازه میدان مغناطیسی متغیر است بر روی چگالی الکترون و چگالی اسپین در عایق توپولوژیک می پردازیم.

عایق توپولوژیک دو بعدی را در صفحه $x-y$ در نظر می گیریم و فرض می کنیم جهت بردار مغناطش لایه فرومغناطیس نیز در همین صفحه باشد. بردار مغناطش را به صورت زیر در نظر می گیریم

$$\boldsymbol{m}=\begin{pmatrix} m_0+\cos\theta(x) \\ sin\theta(x) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \cos\theta(x)=\tanh(\frac{x}{w}) \qquad (1)$$

از این معادله مشاهده می‌شود که در لایه ناهمگنی در $x=0$ علاوه بر جهت بردار مغناطش اندازه آن نیز تغییر می‌کند.

هامیلتونی دو بعدی الکترون های سطحی به صورت

$$H = ihv\boldsymbol{\sigma}.(\hat{e}_z\times\nabla) - M\boldsymbol{m}(\boldsymbol{r}).\boldsymbol{\sigma} \qquad (2)$$

در اینجا جمله اول مربوط به پاشندگی حالت های سطحی دیراک و جمله دوم حاصل برهم کنش الکترونها با میدان مغناطیسی لایه مغناطیسی با قدرت برهم کنش ثابت M است. این هامیلتونی را می توان به صورت زیر ساده کرد

$$H=\begin{pmatrix} 0 & (q-\Delta m_0)-\Delta tanhx+\partial_x \\ (q-\Delta m_0)-\Delta tanhx-\partial_x & 0 \end{pmatrix} \qquad (3)$$

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)

در اینجا ما به بررسی حالت های مقید می پردازیم بنابراین حالت هایی را که در آن $x \to \pm\infty$ در نظر نمی گیریم. این حالت ها در مطالعه هدایت عایق توپولوژیک اهمیت دارند. تابع موج و انرژی حالت های مقید با حل معادله دیفرانسیل زیر بدست می آید

$$H\begin{pmatrix}\varphi_\uparrow\\ \varphi_\downarrow\end{pmatrix}=\varepsilon\begin{pmatrix}\varphi_\uparrow\\ \varphi_\downarrow\end{pmatrix} \qquad (4)$$

مولفه های تابع موج با استفاده از تغییر متغیر $z=1/2(1-\tanh x)$ به صورت زیر است[۶]

$$\varphi_\uparrow(z)=\frac{e^{-\frac{i}{2}(\gamma_R-\frac{\pi}{2})}}{\sqrt{k_R}}(1-z)^{-\frac{i}{2}k_L}z^{-\frac{i}{2}k_R}\,{}_2F_1(1+\Delta-ik_0,-\Delta-ik_0,1-ik_R,z) \qquad (5)$$

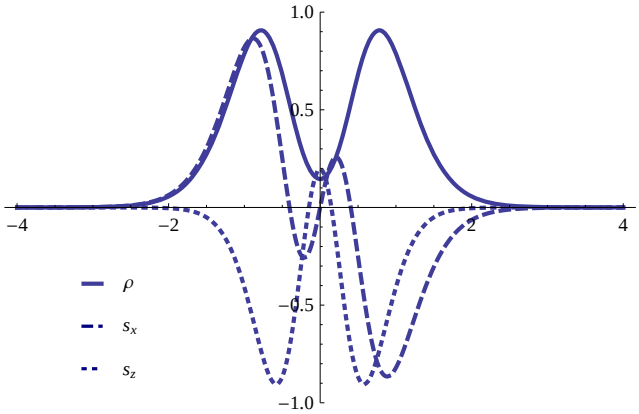
$$\varphi_\downarrow(z)=\frac{e^{\frac{i}{2}(\gamma_R-\frac{\pi}{2})}}{\sqrt{k_R}}(1-z)^{-\frac{i}{2}k_L}z^{-\frac{i}{2}k_R}\,{}_2F_1(1-\Delta-ik_0,\Delta-ik_0,1-ik_R,z) \qquad (6)$$

در این روابط همه متغیر ها همانند [۷] تعریف شده اند با این تفاوت که همه آنها غیر از Δ از طریق k_R و k_L به ثابت m_0 بستگی دارند $k_{L/R}=\varepsilon^2-(q-\Delta m_0\pm\Delta)^2$. وجود ثابت m_0 در بردار مغناطش موجب عدم تقارن و متغیر بودن اندازه بردار مغناطش می‌شود. توابع موج مربوط به حالت های مقید باید در فاصله های دور از $x=0$ صفر شود، با این شرط انرژی حالت های مقید به صورت زیر بدست می آید

$$\varepsilon_{n,q}=\sqrt{(2\Delta-n)n}\sqrt{1-\frac{q^2}{(\Delta-n)^2}},\quad n=1,2,3,\ldots,n_{\max} \qquad (7)$$

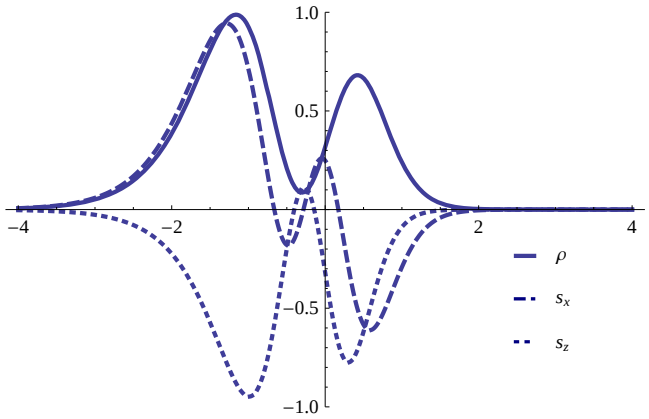
مقدار بیشینه n در رابطه بالا با توجه به مقدار q و Δ مشخص می شود. با جاگذاری انرژی از معادله (۷) در روابط (۵) و (۶) می توان چگالی الکترون و چگالی اسپین را برای حالت های مختلف بدست آورد.

در شکل (۱) چگالی الکترون و اسپین برای لایه مغناطیسی متقارن نشان داده شده است. شکل (۲) چگالی الکترون و اسپین برای لایه مغناطیسی نامتقارن نشان می‌دهد.



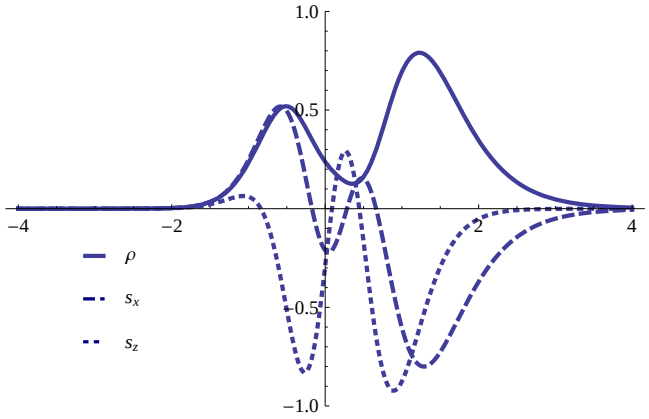
شکل ۱ چگال الکترون، و چگالی اسپین در لایه مغناطیسی به صورت تابعی از x با پارامترهای $\Delta=3.9,\ q=0,\ m_0=0$

مقاله‌نامه بیست و سومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۰-۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۵)



شکل ۱ چگال الکترون، و چگالی اسپین در لایه مغناطیسی به صورت تابعی از x با پارامترهای $\Delta = 3.9,\ q = 0,\ m_0 = 0.1$

شکل (۳) چگالی الکترون و اسپین را برای لایه مغناطیسی متقارن با عدد موج عرضی غیر صفر نشان می دهد.



شکل ۱ چگال الکترون، و چگالی اسپین در لایه مغناطیسی به صورت تابعی از x با پارامترهای $\Delta = 3.9,\ q = 0.39,\ m_0 = 0$

نتایج بالا نشان می دهد عدم تقارن بردار مغناطش یا متغیر بودن اندازه آن باعث می شود: اولا تقارن نمودارهای پاشندگی در عرضی از بین برود به گونه‌ای که تاثیر عدم تقارن مغناطش در چگالی الکترونی همانند افزایش اندازه حرکت عرضی است، ثانیا تعداد حالت های مقید کاهش یابد و ثالثا تقارن بین حالت های مقید با انرژی مثبت و منفی از بین می‌رود.

در آینده می توان به بررسی حالت های آزاد پرداخت و رسانایی عایق توپولوژیک را در حضور لایه مغناطیسی نامتقارن مطالعه کرد.

1. Karam.Bahari@gmail.com
2. Moradian.Rostam@gmail.com

[1] D. Hsieh, D. Qian, L. Wray, Y. Xia, Y. S. Hor, R. J. Cava, and M. Z. Hasan, *Nature* **452, 970** (2008).
[2] H. Zhang, C.-X. Liu, X.-L. Qi, X. Dai, Z. Fang, and S.-C. Zhang, *Nat Phys* **5, 438** (2009).
[3] S. Mondal, D. Sen, K. Sengupta, and R. Shankar, *Phys. Rev. Lett.* **104, 046403** (2010).
[4] I. Garate and M. Franz, *Phys. Rev. Lett.* **104, 146802** (2010).
[5] T. Yokoyama, *Phys. Rev. B* **84, 113407** (2011).
[6] T. Yokoyama and J. Linder, *Phys. Rev. B* **83, 081418** (2011).
[7] C. Wickles and W. Belzig, *Phys. Rev. B* **86, 035151** (2012)