

انعکاس متقاطع آندریف در ساختار عایق توپولوژیک در مجاورت ابررسانا-فرومغناطیس

پورعلی، فرزانه^۱؛ خضرلو، مریم^۱؛ گودرزی، هادی^۱؛ کسانی، هادی^۳

^۱ گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

^۲ بنیاد ملی نخبگان

^۳ گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه تبریز

چکیده

اثر همزیستی خاصیت فرومغناطیس و ابررسانایی بر پایه حالات سطحی عایق توپولوژیک سه بعدی در اتصال نرمال/ابررسانای فرومغناطیس/نرمال به صورت تئوری مورد مطالعه قرار می‌گیرد. در منطقه ابررسانای فرومغناطیس، گاف ابررسانایی توسط فاکتور $\eta(m_{\text{eff}})$ که وابسته به مغناطش ناحیه ابررسانا است بازبهنجارش می‌شود. از اینرو احتمال انعکاس متقاطع در فرآیند آندریف به مقادیر مغناطش ناحیه ابررسانا وابسته است. رسانندگی زیرگاف در ساختار، به فرآیند تونل‌زنی همزمان ناحیه میانی ابررسانایی بستگی دارد.

Crossed Andreev reflection in ferromagnetic-superconductor topological insulator

Pourali, Farzaneh¹; Khezerlou, Maryam^{1,2}; Goudarzi, Hadi¹; Kasani, Hadi³

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Urmia University, Urmia

² National Elites foundation

³ Faculty of physics, University of Tabriz

Abstract

We theoretically investigate the effect of coexistence of proximity-induced ferromagnetism and superconductivity on the surface states of 3-dimensionanl topological insulator in a normal/ferromagnetic superconductor/normal junction. In ferromagnetic superconductor region, the effective superconductor subgap is renormalized by magnetization with a factor $\eta(m_{\text{eff}})$. It is found that the crossed Andreev reflection is sensitive to the magnitude of magnetization in FS region. The subgap conductance of the structure depends on co-tunneling into the middle region process.

PACS No. 61,68

توجه زیادی بخود جلب کرد [۴-۱]. طبق نتایج بیناکر^۱ در رسانندگی این اتصالات درکنار پدیده ی انعکاس معمول آندریف، انعکاس آینه ای آندریف^۲ هم اتفاق می افتد که باعث تغییر قابل توجهی در نمودارهای رسانندگی می شود. البته نوع جفت شدگی

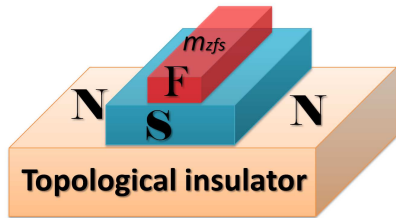
مقدمه

سالها قبل رسانندگی برای اتصالات فلز ابررسانا و فلز نرمال بر پایه انعکاس آندریف مورد بحث و بررسی قرار گرفته بود. در سالهای اخیر رسانندگی همین اتصالات اما با پایه‌ی مواد دیراک

^۱ Beenakker

^۲ Andreev

نمایی از اتصال NSFN در شکل ۱ نشان داده شده است. دقت داشته باشیم که طول پهنای ابررسانا d می باشد و فلز نرمال اولی به ولتاژ V_{01} و دومی به V_{02} وصل شده است.



شکل ۱: نمایی از ساختار اتصال NSFNS بر پایه عایق توپولوژیک حرکت شبه ذرات در این ساختار توسط هامیلتونی بوگولیوبوف-دوژن توصیف میشود:

$$H_{SF} = \begin{pmatrix} h(k) + M & \Delta(K) \\ -\Delta^*(-K) & -h^*(-k) - M \end{pmatrix} \quad (1)$$

بردار مغناطش به صورت $|M| = \sqrt{m_x^2 + m_y^2 + m_z^2}$ برای ناحیه ابررسانا تعریف می شود. $h(k)$ و $\Delta(k)$ در این رابطه، به ترتیب هامیلتونی دیراک آزاد و پتانسیل جفت شدگی ابررسانا می باشند. پتانسیل جفت شدگی ابررسانا را از نوع معمول S و با مقدار ثابت در نظر میگیریم.

انرژی پراکندگی ناحیه ابررسانای فرومغناطیس به صورت زیر بدست می آید:

$$\varepsilon_{FS} = \xi \sqrt{\left(-\mu_{fs} + \sqrt{m_{zs}^2 + |K_{FS}|^2 + |\Delta_0|^2 \left(\frac{m_{zs}}{\mu_{fs}} \right)^2} \right)^2 + |\Delta_0|^2 \left(1 - \left(\frac{m_{zs}}{\mu_{fs}} \right)^2 \right)},$$

همانطور که مشاهده می شود گاف ابررسانایی تحت مغناطش بازبهنجارش می گردد [۶].

از حل معادله دیراک با گالیویاف دی جنیس ویژه توابع برای سه ناحیه ابررسانای فرومغناطیس، نرمال سمت چپ و نرمال سمت راست به صورت زیر بدست می آید:

هم توسط ابررسانای بکار رفته در اثر مجاورت تاثیر بسزایی در نتایج اتصالات دارد.

می دانیم که انعکاس آندریف در فصل مشترک یک فلز نرمال و یک ابررسانا اتفاق می افتد. این پدیده متناسب است با آمدن الکترون به سمت فلز نرمال که در اثر رسیدن به فصل مشترک یک حفره از آن به سمت فلز عادی منعکس شده و به موجب آن یک جفت کوپر تشکیل می شود که در داخل ابررسانا حرکت می کنند. علاوه بر این انعکاس، کایسول^۳ در مقاله خود انعکاس متقاطع آندریف را نیز بر پایه گرافن مطالعه نمود [۵]. در انعکاس متقاطع اتصال نرمال/ابررسانا/نرمال (N/S/N)، الکترونی که به سمت فصل مشترک NS حرکت می کند تحت انعکاس آندریف به صورت یک حفره منعکس می شود در نتیجه جفت کوپر در داخل ابررسانا حرکت می کند. در سمت دیگر اتصال یعنی SN، پدیده تونل زنی همزمان و انعکاس متقاطع اتفاق می افتد. بطوری که یک الکترون و یک حفره با ضرایب بخصوصی به سمت فلز نرمال آخری حرکت می کنند که به ترتیب ضرایب تونل زنی همزمان و انعکاس متقاطع خوانده می شوند.

حامل های بار در سطح یک عایق توپولوژیکی سه بعدی بصورت فرمیونهای دیراک که تحت تبدیل انعکاس زمانی متقارن عمل می کنند، رفتار می کنند. اثر مجاورت ابررسانایی در حالت های سطحی عایق توپولوژیک بطور تجربی مشاهده شده است. اثر مجاورت فرومغناطیس با بردار مغناطش عمود بر سطح، باعث ایجاد یک گاف انرژی در نقاط دیراک می شود. لذا مطالعه همزیستی فاز ابررسانایی و فرومغناطیس هیچ تضادی با یکدیگر ندارند. در مقاله حاضر، اثر مجاورت همزمان خاصیت ابررسانایی و فرومغناطیس بر روی احتمال انعکاس متقاطع بر پایه عایق توپولوژیک مورد بررسی قرار می گیرد.

همچنین رسانندگی ناشی از انعکاس متقاطع برای اتصال دو پیوندی فلز نرمال-ابررسانای فرومغناطیس-فلز نرمال (NSFN) محاسبه می شود.

تئوری و مدل

$$\begin{aligned}
& ae^{i\beta} (e^{-i\alpha} + e^{i\theta_s}) + be^{i\beta} (e^{-i\alpha} - e^{-i\theta_s}) + \\
& ce^{-i\beta} (e^{-i\alpha} + e^{i\theta_s}) + de^{-i\beta} (e^{-i\alpha} - e^{-i\theta_s}) = 2 \cos \alpha \\
& ae^{-i\gamma^e} e^{-i\phi_2} (-e^{i\theta_s} e^{-i\alpha'} - 1) + be^{-i\gamma^e} e^{-i\phi_1} (e^{-i\theta_s} e^{-i\alpha'} - 1) + \\
& ce^{-i\gamma^h} e^{-i\phi_1} (-e^{i\theta_s} e^{-i\alpha'} - 1) + de^{-i\gamma^h} e^{-i\phi_2} (e^{-i\theta_s} e^{-i\alpha'} - 1) = 0 \\
& ae^{i\beta} e^{ik_s d} (e^{i\theta_s} - e^{i\delta}) - be^{i\beta} e^{-ik_s d} (e^{-i\theta_s} + e^{i\delta}) + \\
& ce^{-i\beta} e^{ik_s d} (e^{i\theta_s} - e^{i\delta}) - de^{-i\beta} e^{-ik_s d} (e^{-i\theta_s} + e^{i\delta}) = 0 \\
& ae^{-i\gamma^e} e^{-i\phi_2} e^{ik_s d} (1 - e^{i\delta'} e^{i\theta_s}) + be^{-i\gamma^e} e^{-i\phi_1} e^{-ik_s d} (1 + e^{i\delta'} e^{-i\theta_s}) + \\
& ce^{-i\gamma^h} e^{-i\phi_1} e^{ik_s d} (1 - e^{i\delta'} e^{i\theta_s}) + de^{-i\gamma^h} e^{-i\phi_2} e^{-ik_s d} (1 + e^{i\delta'} e^{-i\theta_s}) = 0
\end{aligned}$$

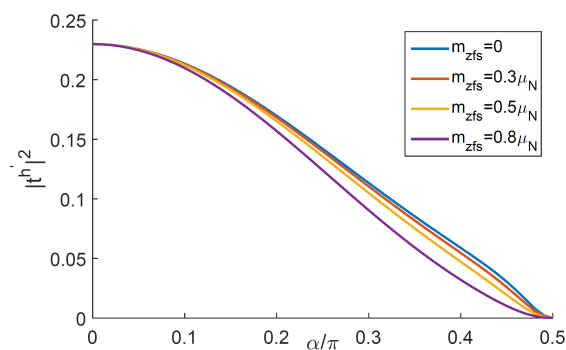
از حل این معادلات ضریب انعکاس متقاطع محاسبه می‌شود که محاسبه رسانندگی ساختار را از رابطه

$$G_{CAR} = \frac{e^2}{h} N(eV) \int_{-\pi/2}^{\pi/2} d\alpha \cos \alpha T^{h'} \quad (8)$$

ممکن می‌سازد..

انعکاس متقاطع آندریف

در نمودار ۱ رفتار انعکاس متقاطع آندریف بر حسب زاویه تابش مشاهده می‌کنیم. این نمودار به ازای مقادیر مختلف مغناطش ناحیه ابرسانا رسم شده است. از آنجایی که گاف موثر ابرسانایی با افزایش مغناطش کاهش می‌یابد کاهش احتمال انعکاس متقاطع قابل پیش بینی است. البته در این نمودار برای افزایش مقدار انعکاس متقاطع پتانسیل شیمیایی را در دو ناحیه نرمال متفاوت در نظر گرفته ایم. ناحیه سمت چپ از نوع ناخاصی p و ناحیه سمت راست از نوع ناخاصی نوع n می‌باشد.



$$\begin{aligned}
\Psi_{SF} = & a \begin{pmatrix} e^{i\beta} \\ e^{i\beta} e^{i\theta_s} \\ -e^{i\theta_s} e^{-i\gamma^e} e^{-i\phi_2} \\ e^{-i\gamma^e} e^{-i\phi_2} \end{pmatrix} e^{ik_s x} + b \begin{pmatrix} e^{i\beta} \\ -e^{i\beta} e^{-i\theta_s} \\ e^{-i\theta_s} e^{-i\gamma^e} e^{-i\phi_1} \\ e^{-i\gamma^e} e^{-i\phi_1} \end{pmatrix} e^{-ik_s x} + \\
& c \begin{pmatrix} e^{-i\beta} \\ e^{i\theta_s} e^{-i\beta} \\ -e^{i\theta_s} e^{-i\gamma^h} e^{-i\phi_1} \\ e^{-i\gamma^h} e^{-i\phi_1} \end{pmatrix} e^{ik_s x} + d \begin{pmatrix} e^{-i\beta} \\ -e^{-i\theta_s} e^{-i\beta} \\ e^{-i\theta_s} e^{-i\gamma^h} e^{-i\phi_2} \\ e^{-i\gamma^h} e^{-i\phi_2} \end{pmatrix} e^{-ik_s x},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\Psi_N^L = & (1, e^{i\alpha}, 0, 0)^T e^{ik_1 x} + r^e (1, -e^{-i\alpha}, 0, 0)^T e^{-ik_1 x} + \\
& r^h (0, 0, 1, e^{-i\alpha'})^T e^{-ik_1' x},
\end{aligned}$$

$$\Psi_N^R = t^{e'} (1, e^{i\delta}, 0, 0)^T e^{ik_4 x} + t^{h'} (0, 0, 1, -e^{i\delta'})^T e^{ik_4' x}.$$

(۲)

که پارامترهای موجود در اسپینورها به صورت زیر حاصل شده است:

$$\beta = \cos^{-1} \frac{\frac{E}{\Delta}}{\sqrt{1 - \left(\frac{m_s / \mu_F}{\mu_S / \mu_F} \right)^2}}$$

$$\gamma = \sin^{-1} \left(\frac{K_{F1} \sin \alpha}{K_S} \right)$$

$$\delta = \sin^{-1} \left(\frac{K_{F1} \sin \alpha}{K_{F2}} \right)$$

$$\theta_s = \sin^{-1} \left(\frac{K_{F1} \sin \alpha}{K_S} \right)$$

$$K_S = \sqrt{\mu_s^2 - m_s^2}$$

در روابط مربوط به اسپینورهای نواحی نرمال، r^e ، r^h ، $t^{e'}$ و $t^{h'}$ به ترتیب ضرایب انعکاس نرمال، انعکاس آندریف، تونل زنی همزمان الاستیک و انعکاس متقاطع هستند. با استفاده از اعمال شرایط مرزی در مرز سه ناحیه، می‌توان این ضرایب را بدست آورد. با اعمال این شرایط و محاسبات تحلیلی چهار معادله زیر حاصل می‌شود:

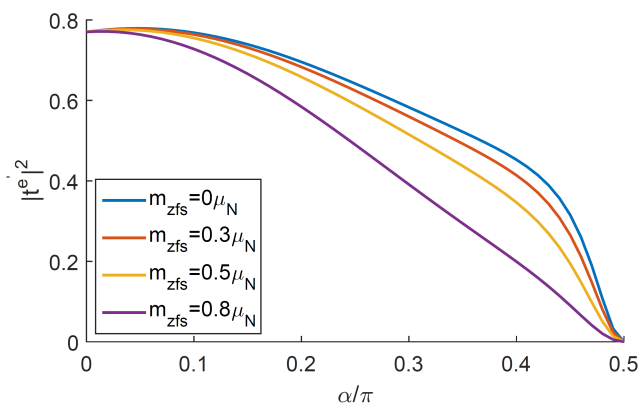
حاصل می‌شود:

پرداخته شد. همانطور که میدانیم امکان این همزیستی در حالت عادی دارای محدودیت می باشد. اما با توجه به اثرگذاری متفاوت القای فرومغناطیس در عایق توپولوژیک این موضوع امکان بررسی به صورت تجربی را نیز دارد. لذا این نتایج می تواند مبنایی برای مطالعات تجربی باشد.

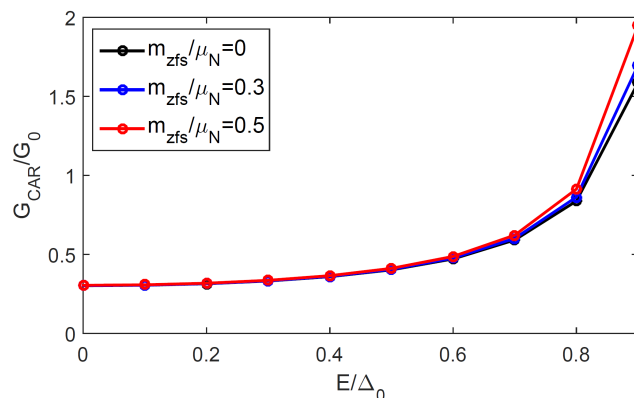
مراجع:

- [۱] L. Fu, C. L. Kane, Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 096407.
 [۲] J. Linder, Y. Tanaka, T. Yokoyama, A. Sudbo, N. Nagaosa, Phys. Rev. Lett. **104** (2010) 067001.
 [۳] M. Khezerlou, H. Goudarzi, Physica C **508** (2015) 6.
 [۴] H. Goudarzi, M. Khezerlou, J. Alilou, J. Super. Nov. Mag. **26** (2013) 3355.
 [۵] J. Cayssol, phys. Rev. Lett. **100** (2008) 147001.
 [۶] H. Goudarzi, M. Khezerlou, S. Asgarifar, Physica E **87** (2017) 155.

نمودار ۱: احتمال انعکاس متقاطع آندریف بر حسب زاویه تابش در نمودار ۲ رفتار احتمال تونل زنی همزمان الاستیک مشاهده می- شود که مشابه انعکاس آندریف با افزایش مغناطش ناحیه ابررسانا کاهش میابد.



نمودار ۲: احتمال تونل زنی همزمان الاستیک بر حسب زاویه تابش رفتار رسانندگی بر حسب ولتاژ بیاس در نمودار ۳ نشان داده شده است. به علت کاهش گاف موثر ابررسانایی اعمال ولتاژ بیاس نیز دارای محدودیت است. از طرف دیگر افزایش مغناطش ناحیه ابررسانا در بیاس های بالاتر رسانندگی را افزایش می دهد.



نمودار ۳: رسانندگی حاصل از انعکاس متقاطع آندریف بر حسب ولتاژ بیاس

نتیجه گیری:

در کار حاضر به بررسی اثر همزیستی فاز فرومغناطیس و ابررسانایی در انعکاس آندریف متقاطع بر پایه عایق توپولوژیک