

بررسی تحلیلی چگالی حالت‌های موضعی در پیوندگاه جوزفسون بین ابررساناهای دمای بالا (D-I-D)

غلامرضا راشدی

گروه فیزیک دانشگاه اصفهان

چکیده

در این مقاله چگالی حالت‌های مربوط به پیوندگاه دو ابررسانای دمای بالا با تقارن پارامتر نظم d-wave که توسط لایه عایق با ضریب عبور متناهی از یکدیگر جدا شده‌اند را به صورت تحلیلی بررسی می‌کنیم. محورهای C دو انباره ابررسانای دمای بالا موازی با یکدیگر و موازی با لایه عایق هستند در حالی که محورهای ab آنها دارای زاویه‌ای اختیاری نسبت به یکدیگر می‌باشند. برای بررسی سیستم فوق معادلات شبه کلاسیک آیلنبرگر را به صورت تحلیلی حل کرده، چگالی حالتها را برحسب انرژی رسم می‌کنیم و سپس اثر ضریب عبور لایه عایق، فاز جوزفسون و زاویه بین محورهای دو ابررسانا روی چگالی حالتها را بررسی می‌کنیم. مشاهده شده است که نمودارها با نمودارهای مربوط به پیوندگاه بین دو ابررسانای دمای پایین و همچنین با نمودارهای مربوط به دو ابررسانای دمای بالا با ضریب عبور کامل متفاوت است. به علاوه حالت‌های بین گافی در انرژی $\Delta < E < \Delta$ که در حکم اثر انگشت ابررسانایی دمای بالا است نیز مشاهده شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: پیوندگاه جوزفسون، ابررسانای دمای بالا، چگالی حالتها

۱. مقدمه

پارامتر نظم ابررسانای دمای بالا در انعکاس از لایه عایق می‌باشد. پیوندگاه بین ابررساناهای دمای بالا از طریق یک لایه عایق به حالت‌های بین گافی در چگالی حالتها منجر می‌شود که آن نیز رسانندگی دیفرانسیلی (dI/dV) در پتانسیلهای کمتر از گاف را ایجاد می‌کند. این پدیده ناشی از تقارن ناهمسانگرد d-wave و بدون گاف^۱ بودن آن برای بعضی از جهت‌ها می‌باشد و به نظر می‌رسد که این برای دیگر شکلهای ابررسانایی ناهمسانگرد نامتعارف نیز می‌تواند وجود داشته باشد.

در این مقاله اثر ضریب عبور سد پتانسیل لایه بین ابررساناها، اختلاف فاز جوزفسون بین دو انباره ابررسانا و جهت‌گیریهای متفاوت پارامتر نظم ابررسانا روی چگالی

محاسبه چگالی حالت‌های موضعی برای سیستمهای مورد نظر در فیزیک ماده چگال بسیار مهم است زیرا اکثر خواص مهم و کاربردی سیستم مانند انتقال بار، حرارت و اسپین، خواص مغناطیسی سیستم، پیوندگاهات و هندسه‌های متنوع مانند نانو ساختارها جملگی با مطالعه چگالی حالتها به طور دقیق بررسی می‌شوند. در این مقاله چگالی حالت‌های یک پیوندگاه بین دو ابررسانای دمای بالا را بررسی می‌کنیم. می‌دانیم که امروزه دلایل قوی وجود دارد مبنی بر اینکه پارامتر نظم ابررسانایی دمای بالا (HTS) در فضای وارون (تکانه) دارای تقارن d-wave است [۱-۴]. در مراجع [۵ و ۶] مشاهده شده بود که بر خلاف ابررسانایی متعارف (BCS) با پارامتر نظم s-wave، در ابررسانایی دمای بالا حالت‌های بین گافی در انرژیهای $\Delta < E < \Delta$ وجود دارد که ناشی از تغییر علامت

۱. gapless

معادله خود سازگار حل شوند. برای ساده‌سازی، از معادله خود سازگاری صرف نظر می‌کنیم. شرط مرزی موجود در [۸ و ۹] که در [۱۰] توسط نویسنده مقاله حاضر مورد بررسی مجدد قرار گرفته است، سد پتانسیل لایه عایق بین انباره‌های ابررسانا را توصیف می‌کند. این شرط مرزی مهم به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} \hat{d}_{1,r} &= \hat{G}(\mathbf{v}_F, 0^m) - \hat{G}(\mathbf{v}'_F, 0^m), \\ \hat{s}_{1,r} &= \hat{G}(\mathbf{v}_F, 0^m) + \hat{G}(\mathbf{v}'_F, 0^m), \\ \hat{d}_1 &= \hat{d}_r = \hat{d}, \end{aligned} \quad (2)$$

در اینجا R ضریب انعکاس الکترونها از سطح لایه عایق و \mathbf{v}'_F انعکاس یافته \mathbf{v}_F نسبت به لایه است. ضمناً پارامتر نظم در فواصل دور از لایه عایق به شکل

$$\Delta_{1,r} = \Delta_0(T) \text{Exp}(\mathbf{ni}\Phi/2) \cos 2(q - a_{1,r})$$

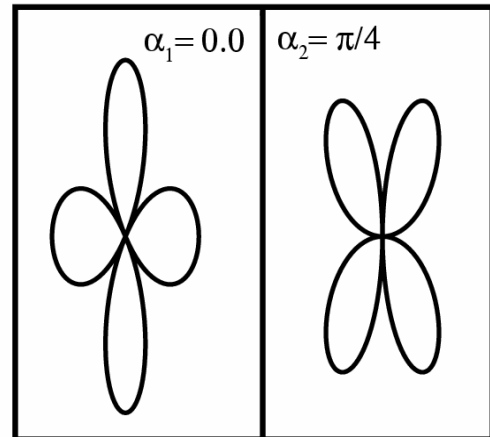
است که Φ اختلاف فاز جوزفسون بین دو انباره ابررسانا، q زاویه بردار سرعت فرمی نسبت به خط عمود بر لایه عایق، $\alpha_{1,r}$ زاویه پارامتر نظم نسبت به خط عمود و Δ_0 وابستگی پارامتر نظم به دما را نشان می‌دهد. فرمول شبه کلاسیک چگالی حالتها به شکل

$$N(E) = N_0 \text{Re}[\langle g_w(w \rightarrow iE + d) \rangle]$$

نوشته می‌شود که در این رابطه $N(0)$ چگالی حالتها فلز عادی (غیرابررسانا) در سطح فرمی و $N(E)$ چگالی حالتها الکترونی ابررسانا و E انرژی ابرالکترونها است و $\langle \dots \rangle$ میانگین‌گیری روی همه جهتهای سرعت فرمی است. (در اینجا طبق معمول متون فیزیک ماده چگال $\mathbf{h} = \mathbf{k} = 1$).

۳. تایج تحلیلی و عددی

ابتدا تابع گرین مناسب را به کمک شرط مرزی، شرط بهنجارش و معادله آیلنبرگر به دست آورده و چگالی حالتها الکترونی را در سطح تماس بین ابررساناها محاسبه کرده‌ایم که به شکل زیر می‌باشد:



شکل ۱. پیوندگاه جوزفسون بین دو ابررسانای دمای بالا با پارامتر نظم d-wave. کریستال سمت راست نسبت به کریستال سمت چپ به اندازه $\frac{P}{4}$ حول محور c موازی با لایه عایق چرخیده است. صفحه d-wave صفحه اکسید مس در ابررسانایی مانند YBaCuO است.

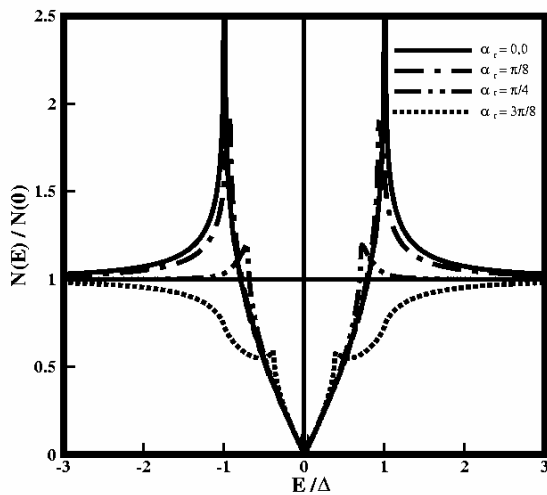
حالتهای ابررسانا را بررسی می‌کنیم. در شکل ۱ سیستم مورد نظر رسم شده است که عبارت از دو ابررسانای دمای بالا جدا شده با یک لایه عایق است. برای محاسبه چگالی حالت، ابتدا ساختار ریاضی مورد نظر را معرفی کرده و تابع گرین مربوطه را به صورت دقیق و تحلیلی محاسبه می‌کنیم. سپس نتایج عددی چگالی حالتها برحسب انرژی بررسی می‌شوند و در پایان نتیجه‌گیری کوتاهی خواهیم داشت.

۲. ساختار ریاضی

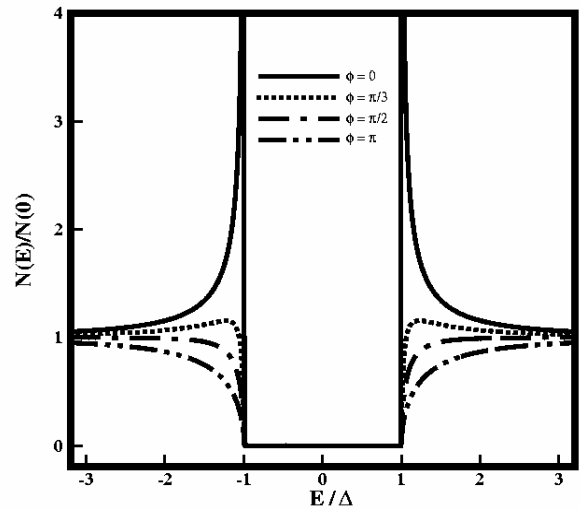
برای محاسبه چگالی حالتها ساختار مورد نظر باید معادلات شبه کلاسیک آیلنبرگر که از معادلات دایسون استخراج می‌شوند را حل کنیم [۷-۵]. معادله آیلنبرگر برای ابررسانای با حالت اسپینی یکتایی به شکل زیر است.

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_F \nabla \hat{G}_w(\mathbf{v}_F, \mathbf{r}) + [\omega \mathbf{f}_3 + \hat{\Delta}(\mathbf{v}_F, \mathbf{r}), \hat{G}_w(\mathbf{v}_F, \mathbf{r})] = 0, \\ \hat{G}_w = \begin{pmatrix} g_w & f_w \\ f^+ & -g_w \end{pmatrix}, \quad \hat{\Delta} = \begin{pmatrix} 0 & \Delta \\ \Delta^+ & 0 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

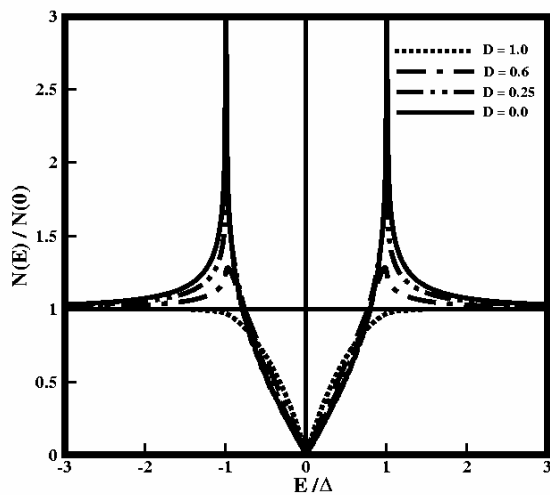
که در این رابطه، Δ پارامتر نظم ابررسانایی، \mathbf{v}_F سرعت فرمی الکترون $w = (2n + 1)pT$ بسامد ماتسوبارا، T دمای سیستم، f_w^+ وارونی زمان f_w ، n یک عدد صحیح و \mathbf{r} بردار مکان الکترونها می‌باشد. معادلات فوق باید همراه با یک شرط بهنجارش،



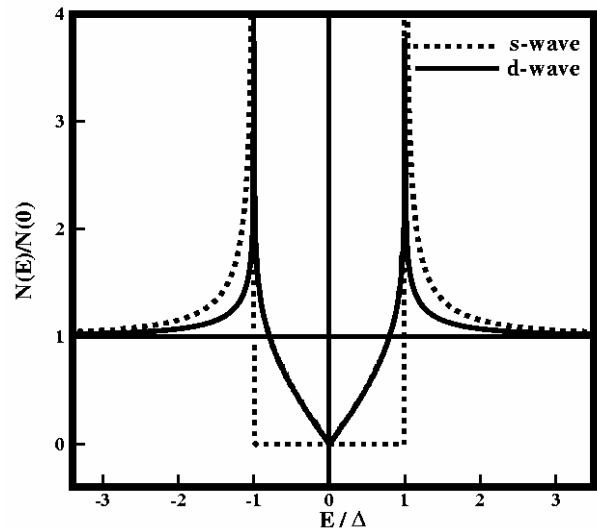
شکل ۴. چگالی حالت‌های پیوندگاه جوزفسون ابرسانای دمای بالا برحسب انرژی برای ضریب عبور بالای $D=1$ ، فاز $\Phi = \frac{\pi}{4}$ دمای $T/T_c = 0/01$ و چرخشهای a_r مختلف.



شکل ۵. چگالی حالت‌ها برحسب انرژی برای ابرسانای متعارف در دمای $T/T_c = 0/01$ ، $D=1/0$ و اختلاف فازهای متفاوت ابرساناها.



شکل ۶. چگالی حالت‌ها برحسب انرژی برای ابرسانای دمای بالا در دمای $T/T_c = 0/01$ ، $a_r = \frac{\pi}{4}$ ، $a_l = 0$ و ضرایب عبور متفاوت.



شکل ۷. چگالی حالت‌ها برحسب انرژی برای ضریب عبور $D=1$ ، دمای $T/T_c = 0/01$ ابرسانای دمای بالا ناچرخیده $a_l = a_r = 0$ و ابرسانای دمای پایین.

$$\frac{N(E)}{N(0)} = \frac{E\sqrt{E^2 - \Delta^2}}{E^2 - \Delta^2(\cos^2(\frac{\Phi}{2}) + R \sin^2(\frac{\Phi}{2}))}$$

$$R=0 \Rightarrow \frac{N(E)}{N(0)} = \frac{E\sqrt{E^2 - \Delta^2}}{E^2 - \Delta^2 \cos^2(\frac{\Phi}{2})}$$

در حالت انعکاس کامل نتیجه‌ای به دست می‌آید که منطبق بر نظریه BCS است.

$$\frac{N_{l,r}(E)}{N(0)} = \left\langle \frac{E[Df_{l,r} + (2-D)f_{r,1}] + i\hbar D\Delta_l\Delta_r \sin \Phi}{D[E^2 - \Delta_l\Delta_r \cos \Phi] + (2-D)f_l f_r} \right\rangle$$

$$D=1-R, h = \frac{|\cos q|}{\cos q}, f_{l,r} = \sqrt{E^2 - \Delta_{l,r}^2}$$

و برای ابرساناهای s-wave با پارامتر نظم همسانگرد $\Delta_l = \Delta_r = \Delta$ ، چگالی حالت‌ها به شکل زیر است:

برای اولین بار انجام شده‌اند که به دلیل محاسبات طولانی مربوط به ناپیوستگی تابع گرین و شرط مرزی زایتسلف [۸] می‌باشد. در پایان لازم به ذکر است که محاسبه جریانهای الکتریکی این سیستم را در مرجع [۱۲] به چاپ رسانده‌ایم.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله نمودارهای چگالی حالت بر حسب انرژی رسم شده‌اند. زیبایی این کار در سهم محاسبات تحلیلی این مقاله می‌باشد زیرا برای مطالعه خواص مختلف هر سیستم به چگالی حالت‌های آن سیستم نیاز داریم و این کار با در اختیار داشتن چگالی حالتها به صورت تحلیلی و دقیق راحتتر انجام می‌شود. حالت‌های بین گافی را در اینجا مشاهده کرده‌ایم که این حالتها مؤید وجود ابررسانایی ناهمسانگرد d-wave در ابررساناهای دمای بالا (HTS) می‌باشند. همچنین مشاهده شده است که با افزایش ضریب عبور از لایه عایق و افزایش زاویه چرخش بین کریستالهای چپ و راست باعث کاهش چگالی حالتها در مجاورت گاف می‌شود. در تمامی حالات با افزایش انرژی به چگالی حالت فلز نرمال می‌رسیم. به نظر می‌رسد که در نمودار جریان-ولتاژ باید در اثر حضور حالت‌های بین گافی در پتانسیلهای کوچک شیب منتهای داشته باشیم. نتایج این مقاله را می‌توان برای محاسبه جریانهای حرارتی، اسپینی و الکتریکی به کار گرفت.

$$R = 1 \Rightarrow \frac{N(E)}{N(0)} = \frac{E}{\sqrt{E^2 - \Delta^2}}$$

مشاهده می‌شود که قله‌های چگالی حالت برای پیوندگاه ابررساناهای دمای پایین دقیقاً در $E = \Delta$ اتفاق می‌افتند. به نظر می‌رسد در پیوندگاه کاملاً شفاف باید تکینگی در انرژی $E = \Delta \cos(\frac{\Phi}{2})$ حاصل شود ولی در شکل ۲ مشاهده شده است که برای فازهای متفاوت در ناحیه بین گافی $|E| < \Delta$ حالت مجاز وجود ندارد. نکته جالبی که در پیوندگاه ابررساناهای دمای بالا در شکل ۳ مشاهده می‌شود، حضور چگالی حالتها در انرژیهای بین گافی ($|E| < \Delta$) است که نتیجه ناهمسانگردی است. در شکل‌های ۴ و ۵ ابررساناها دارای چرخش پارامتر نظم نسبت به یکدیگر هستند. چگالی حالتها به صورت تحلیلی محاسبه شده و بر حسب انرژی رسم شده است. در شکل‌های ۴ و ۵ برای ابررسانای دمای بالا چگالی حالت‌های بین گافی وجود دارد که منجر به رسانندگی در پتانسیلهای نزدیک به انرژی فرمی (صفر) می‌شوند. در شکل ۳ چگالی حالتها برای ابررسانای دمای بالا و ابررسانای دمای پایین با یکدیگر مقایسه شده است. برای ابررسانای دمای بالا حالت‌های بین گافی وجود دارد در حالی که برای ابررسانای دمای پایین این چنین نیست. در شکل‌های ۴ و ۵ با کاهش زاویه چرخش و با کاهش ضریب عبور، ارتفاع چگالی حالتها در مجاورت گاف افزایش پیدا می‌کند. نتایج مشابه با بخشی از نتایج این مقاله به صورت محاسبات عددی در [۱۱] آمده است ولی این محاسبات تحلیلی

مراجع

1. C R Hu, *Phys. Rev. Lett.* **72** (1994) 1526.
2. D A Wollman, D J van Harlingen, W C Lee, D M Ginsberg, and A J Leggett, *Phys. Rev. Lett.* **71** (1993) 2134.
3. D J Van Harlingen; *Rev. Mod. Phys.* **67** (1995) 515.
4. M Fogelstrom, and S K Yip, *Phys. Rev. B* **57** (1998) R14060.
5. V B Geshkenbein, A I Larkin and A Barone, *Phys. Rev. B* **36** (1987) 235.
6. M H S Amin, A Omelyanchouk, S ashkeev, M Coury and A. Zagoskin, *Physica B* **318**, (2002) 62.
7. G Eilenberge, *Z. Phys.* **214** (1968) 195.
8. A V Zaitsev, *JETP* **59** (1984) 1015.
9. W Belzig, F Wilhelm, G Schön, C Bruder, and A Zaikin, *Superlatt and Microstruct* **25** (1999) 251.
10. G Rashedi, *Superlatt and Microstruct* **35** (2004) 155.
11. Lofwander, V S Shumeiko and G Wendin, *Supercond. Sci. Technol.* **14** (2001) R53.
12. G Rashedi, *J. Phys.: Conf. Ser.* **97**(2008) 012334.