

hamdipur@theor.jinr.ru :

مشخصه جریان - ولتاژ شاخه‌ای را تأیید کرده‌اند[۵].

در این مقاله برای بررسی رفتار جریان- ولتاژ اتصالات جوزفسون از مدل جفتیدگی خازنی با جریان پخشی استفاده شده که شامل جریان اهمی، جریان جوزفسون و جریان جابه‌جایی نیز می‌باشد. همین طور جریان بسیار کوچکی به صورت نوفه به سیستم اضافه می‌گردد،  $I_n$ . معادله توصیف کننده سیستم در این مدل به صورت زیر است،

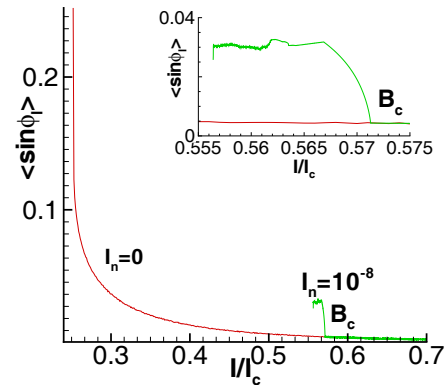
$$\frac{d^2 \phi_l}{dt^2} = (I - \sin \phi_l - \beta \frac{d\phi_l}{dt}) + \alpha (\sin \phi_{l+1} + \sin \phi_{l-1}) - \gamma \sin \phi_l + \alpha \beta \left( \frac{d\phi_{l+1}}{dt} + \frac{d\phi_{l-1}}{dt} - \gamma \frac{d\phi_l}{dt} \right), \quad (1)$$

$\alpha$  ضریب جفتیدگی خازنی و  $\beta = \frac{1}{\sqrt{\beta_c}}$  که در آن  $\beta_c$  پارامتر

امروزه بررسی نانو آرایه‌های جوزفسون به خاطر گسیل امواج قدرتمند همدوس THz از این آرایه‌ها که گاف موجود در تولید امواج الکترومغناطیسی را می‌پوشانند، بسیار مورد توجه قرار گرفته است [۱-۳]. این نانو آرایه‌ها مدلی برای ابررساناهای دمایی بالا، HTSC هستند. به عنوان مثال در نمونه تک کریستال  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ ، (BSCCO)، لایه‌های  $\text{CuO}_2$  مثل لایه‌های ابررسانا هستند و لایه‌های  $\text{BiO}$  و  $\text{SrO}$  با هم لایه‌های عایق سیستم را تشکیل می‌دهند [۱]. مشخصه جریان- ولتاژ این نانو آرایه‌ها که ساختار شاخه‌ای دارد نیز به طور گسترده‌ای با مدل‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۴]، همچنین مشخص شده که هر یک از این شاخه‌ها متناظر با تعداد معینی از اتصالات نوسان کننده است (که در حالت ابررسانایی هستند). همچنین آزمایش‌های تجربی نیز این مدل‌ها و نتایج شبیه سازی

کل، برای سیستم شامل  $N=9$  لایه نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اگر سیستم دارای نوفه نباشد،  $I_n=0$ ، تقارن سیستم شکسته نمی‌شود و سیستم بر روی تعادل ناپایدار خود می‌ماند. چگالی بار در این حالت روی همه لایه‌های ابر رسانا صفر است. رفتار سیستم در این حالت دقیقاً برابر رفتار ۹ اتصال جوزفسون جفت نشده است. شبیه سازی ما جریان برگشت را برابر  $I_r/I_c=0/2517$  به دست می‌دهد. در مدل RCSJ برای  $\beta \ll 1$  داریم  $I_r/I_c = \frac{4\pi}{\beta}$  که برای  $\beta=0/2$  می‌شود  $I_r/I_c=0/2564$  که توافق خوبی است.

اما با اضافه کردن کمترین نوفه، مستقل از مقدار نوفه رفتار سیستم عوض می‌شود. اگر نوفه قبل از نقطه  $B_c$  اضافه شود، اثر نوفه به سرعت میرا شده و رفتار سیستم مثل حالت بی نوفه می‌شود. (نوفه به صورت اختلال کوچکی در جریان عبوری از اتصال تعریف می‌شود که باعث می‌شود سیستم به مقداری اندک از حالت تعادل خود جا به جا شود). ولی اگر بعد از نقطه  $B_c$  کمترین نوفه‌ای به سیستم اضافه گردد به علت تشدید پارامتری اثر نوفه تقویت می‌شود و باعث ایجاد بار الکتریکی خالص بر روی لایه‌های ابرسنانا می‌گردد. تغییر این بارها به خاطر جفت‌بندی اتصال‌ها به صورت همبسته است. بنابراین حرکت این بارها یک حرکت جمعی است که به صورت مدهای پلاسمای طولی در سیستم مشاهده می‌شود (شکل ۳b). این ناحیه که از  $B_c$  شروع می‌شود منطقه شکست نامیده می‌شود. کلمه شکست به خاطر شکسته شدن ختثایی الکتریکی لایه‌های ابرسنانا به کار رفته است. این ناحیه، که در شکل داخلی بزرگ شده تا حدود جریان  $I_r/I_c=0/555$  ادامه دارد. پس از این تعدادی از لایه‌ها، یا حداقل یک لایه به حالت ابررسانشی می‌رود. واضح است که ولتاژ فقط از سهم جریان اهمی ایجاد می‌شود. بنابراین اگر جریان ابررسانشی را از جریان کل کم کنیم، (میانگین بقیه جریان‌ها صفر است)، می‌توانیم یک رابطه اهمی برای آرایه اتصال‌ها به صورت  $V = \frac{N}{\beta} (I - \langle \sin \phi \rangle)$  بنویسیم. به خاطر این رابطه هماهنگی خاصی بین مشخصه جریان - ولتاژ و نمودار جریان ابررسانشی دیده می‌شود. به طور

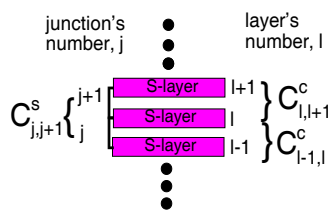


شکل ۱. میانگین زمانی جریان ابررسانشی برای سیستمی شامل ۹ اتصال با  $\beta=0/2, \alpha=1$  و شرایط مرزی تناوبی. محور افقی جریان ورودی dc است.

مک کامبر است.  $\phi_l$  اختلاف فاز ناوردای پیمانه‌ای بین لایه  $l$  و  $l+1$  است.  $\phi_l = \theta_{l+1}(t) - \theta_l(t) - \frac{2e}{h} \int_l^{l+1} dz A_z(z, t)$ . پارامتر نظم در لایه ابررسانای  $l$  ام  $\theta_l$  و پتانسیل برداری در سد  $A_z$  است. جزئیات مربوط به این مدل و روش شبیه سازی در مراجع ۶ تا ۸ آورده شده است. شبیه سازی با سیستم دارای  $N=9$  اتصال جوزفسون جفت شده متوالی با  $\alpha=1$  و  $\beta=0/2$  و شرایط مرزی تناوبی است. با استفاده از این معادلات و معادله تعمیم یافته جوزفسون ولتاژ لایه‌ها را به دست می‌آوریم. چگالی بار روی هر لایه با استفاده از قانون گاوس به دست می‌آید که پس از ساده سازی به  $Q_l = Q_0 \alpha (V_{l+1} - V_l)$  تبدیل می‌شود که در آن  $V_0 = \frac{\hbar \omega}{2e}$  طول پوشش دبای و  $Q = \epsilon \epsilon_0 V_0 / r_D^2$  است. جریان، ولتاژ و زمان به ترتیب به صورت  $V/V_0$ ،  $I/I_c$  و  $\omega_p t = \sqrt{2eI_c / \hbar C}$  فرکانس پلازما و ظرفیت تک پیوندگاه است. برای محاسبه ولتاژ، در هرگام جریان، از ولتاژ، میانگین زمانی می‌گیریم، یعنی

$$V/V_0 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{T_m - T_i} \int_{T_i}^{T_m} V_i(I/I_c, \omega_p t) / V_0 dt. \quad (2)$$

شکل ۱ میانگین زمانی جریان ابررسانشی را بر حسب جریان



شکل ۳. این شکل اندیس گذاری لایه‌ها و اتصالات و تعریف توابع همبستگی را به طور شماتیک نشان می‌دهد.

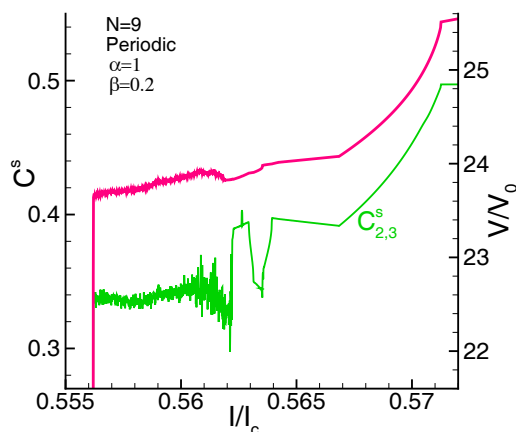
سینوسی با  $k = \frac{\lambda}{9} \pi D$  است. مشاهده می‌شود که با تقریب بسیار خوبی این نقاط روی منحنی رسم شده قرار دارند که این دلیلی بر وجود مد پلاسمای طولی در سیستم است. به طور کلی در سیستمی با تعداد فرد نانو اتصال جوزفسون مد پلاسمای  $k = \frac{N-1}{N} \pi D$  برانگیخته می‌شود که در آن  $D$  طول کل یک نانو اتصال است. (مجموع طول یک لایه ابررسانا و یک لایه عایق).

شکل ۴b تبدیل فوریه چگالی بار بر روی لایه اول را نشان می‌دهد. بقیه لایه‌ها نیز رفتار مشابهی دارند غیر از یکی از لایه‌ها که ما آن را لایه مشخصه می‌گوییم. چگالی بار روی لایه مشخصه تا شروع منطقه نامنظم یا آشوبناک صفر باقی می‌ماند.

مؤلفه‌های موجود در نمودار تبدیل فوریه، FFT، مد پلاسمای طولی و هارمونیک‌های آن هستند. فرکانس جوزفسون از رابطه  $\frac{\omega_J / \omega_p}{2\pi} = \frac{V / V_0}{2\pi N} = 0.4512$  به دست می‌آید. فرکانس مد اصلی پلاسمای طولی نصف فرکانس جوزفسون است. چون این نقطه شروع منطقه تشدید پارامتری است، می‌توان گفت که شرط تشدید

پارامتری به صورت  $\omega_{LPW} = \frac{\omega_J}{2}$  است. LPW مخفف معادل لاتین مد پلاسمای طولی است. همین طور می‌توان همبستگی بین بار روی لایه‌های مجاور را که با رابطه‌ای مشابه رابطه ۱ محاسبه شده بررسی نمود. با بررسی نتایج حاصل می‌توان به رابطه  $C_{4+1,4+1+1}^c = C_{4-1,4-1}^c$  رسید. این فقط به خاطر تقارن مد پلاسمای طولی ایجاد شده حول لایه مشخصه است.

در قسمت نامنظم چون هیچ ارتباط فازی طویل المدتی بین فاز گردشی پیوندها وجود ندارد، (هر چند همبستگی نسبی در



شکل ۲. محور سمت چپ همبستگی جریان ابررسانشی در اتصالات ۲ و ۳. محور سمت راست ولتاژ سیستم. محور افقی جریان ورودی dc. منحنی بالا ولتاژ دو سر سیستم و منحنی پایین همبستگی ابرجریان بین لایه ۲ و ۳ است.

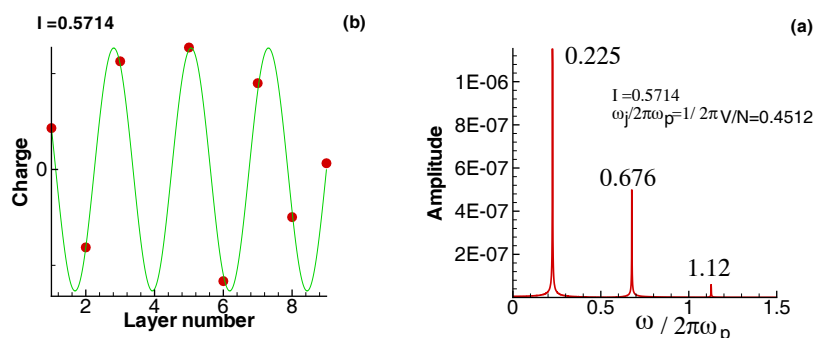
ریاضی نیز با استفاده از معادلات اولیه به همین رابطه می‌رسیم. این رابطه فقط برای بیرونی‌ترین شاخه که در آن همه اتصالات در حالت چرخشی هستند صادق است.

ناحیه شکستی دارای ساختاری می‌باشد که در شکل ۲ با نمایش همبستگی جریان ابررسانشی بین اتصال ۲ و اتصال ۳ به همراه منحنی جریان ولتاژ نشان داده شده است (شکل ۳ را برای تعاریف ببینید). برای محاسبه همبستگی بین جریان‌های ابررسانشی بین لایه  $j$  و  $j+1$  از رابطه زیر استفاده شده است،

$$C_{j,j+1}^s = \langle \sin \phi_j(\tau) \sin \phi_{j+1}(\tau) \rangle = \lim_{(T_m - T_i \rightarrow \infty)} \frac{1}{T_m - T_i} \int_{T_i}^{T_m} \sin \phi_j(\tau) \sin \phi_{j+1}(\tau) d\tau. \quad (3)$$

بین جریان‌های ۰/۵۶۲ و ۰/۵۷۰ ساختاری که مشاهده می‌شود نمایانگر وجود مد پلاسمایی طولی در سیستم است. و از ۰/۵۶۲ تا انتهای شاخه که در آن تعدادی از پیوندها از حالت چرخشی خارج شده و به حالت نوسانی می‌روند، رفتاری غیر منظم مشاهده می‌شود. پس منطقه شکست به دو ناحیه دارای مد پلاسمای طولی و ناحیه نامنظم یا آشوبناک تقسیم می‌شود.

شکل ۴a توزیع بار در لایه‌های ابررسانا را نشان می‌دهد. نقطه‌ها بار روی لایه‌ها هستند و منحنی رسم شده نیز موج



شکل ۴. (a) تبدیل فوریه تغییرات بار بر حسب زمان. (b) توزیع بار بر روی لایه‌های ابرسانا و موج سینوسی با  $k = \frac{\Delta}{9} \pi D$ .

ابرساناهاى دماى بالا، تطابق بين رفتار جريان - ولتاژ و رفتار جريان ابرسانشى را در ناحیه شکستی ارائه کردیم و نشان دادیم که ناحیه‌ای به نام ناحیه شکست وجود دارد که در آن بار خالص روی لایه‌های ابرسانا صفر نیست. تغییرات بار روی لایه‌ها را بررسی کردیم و به این نتیجه رسیدیم که تغییرات بار روی لایه‌های ابرسانا می‌تواند به صورت مد پلاسما و یا به صورت نامنظم باشد و دیدیم که تحلیل همبستگی‌ها ابزار قدرتمندی برای بررسی مشخصه جريان - ولتاژ و متمایز نمودن رفتار آشوبی و مد پلاسماى طولی در نانو پیوندهای جوزفسون است.

این کار تحقیقاتی با حمایت مادى آزمایشگاه فیزیک نظری بوگالیووف در روسیه و دانشکده فیزیک دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان و با پشتیبانی معنوی انجمن فیزیک ایران انجام شده است.

مقیاس زمانى کوچک وجود دارد، توابع همبستگی برای تمام مقادیر  $l$  برابر مقدار یکسانی می‌شود. همین که این مقدار صفر نیست خود گویای این است که در این ناحیه نیز هرچند تغییرات زمانى نامنظم یا آشوبناک است ولی تغییرات فضایی به خاطر جفت شدگی اتصالات همبستگی نسبی دارند.

تابع دیگری که می‌تواند به خوبی ناحیه آشوبی و ناحیه دارای مد پلاسماى طولی را از هم متمایز کند، تابع خود همبستگی بار روی لایه‌های ابرسانا است. این تابع نیز تعریفی مشابه رابطه ۱ دارد. در ناحیه دارای مد پلاسماى طولی هرچند این تابع دارای دامنه نوسانی است ولی بعد از مدتی به همان مقدار خود در  $\tau_1=0$  می‌رسد. بدین معنی که برای یک مقدار معین  $T$  داریم  $Q(\tau \pm T) \approx Q(\tau)$ . ولی در منطقه آشوبی این تابع به صفر نزول می‌کند. با محاسبه نمای لیاپانف آشوبناک بودن این دینامیک را نشان داد.

با بررسی دینامیک فاز اتصالات جوزفسون ذاتی در

5. Irie, Y M Shukrinov and G Oya, *Appl. Phys. Lett.* **93** (2008) 152510.
6. Y M Shukrinov, M Hamdipour and M R Kolahchi, *Phys. Rev. B*, **80** (2009) 014512.
7. Y M Shukrinov, F Mahfouzi and M Suzuki, *Phys. Rev. B* **78** (2008) 134521.
8. Y M Shukrinov and F Mahfouzi, *Phys. Rev. Lett.* **98** (2007) 157001.

1. L Ozyuzer, A E Koshelev, C Kurter, N Gopalsami, Q Li, M Tachiki, K Kadowaki, T Yamamoto, H Minami, H Yamaguchi, T Tachiki, K E Gray, 2W-K Kwok, U Welp, *Science* **318** (2007) 1291.
2. J Orenstein, *Nature Phys.* **2** (2006) 503–504.
3. S Savel'ev, A L Rakhmanov, V A Yampol'skii and F Nori, *Nature Phys.* **2** (2006) 521–525.
4. Y M Shukrinov, F Mahfouzi and N F Pedersen, *Phys. Rev. B*, **75** (2007) 104508.