

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

دانشگاه یزد  
دانشکده فیزیک  
گروه حالت جامد

پایان نامه  
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
فیزیک حالت جامد

بررسی مشخصه‌های جریان - ولتاژ نانواسکوئیدهای DC

استاد راهنما:  
دکتر محمد اعتصامی

استادان مشاور:  
دکتر محمد مهدی حسینی،  
دکتر محمدرضا هوشمند اصل

پژوهش و نگارش:  
خاطره بلوچ رودباری

اسفند ۹۲

تقدیم به همسر و دختر عزیزم کیانا

که در تمام مراحل تحصیل مرا همراهی نمودند.

با تشکر فراوان از جناب آقای دکتر اعتصامی که در مسیر این پژوهش چراغ راه اندیشه بودند و صبورانه این پایان‌نامه را هدایت نمودند. همچنین از همکاری صمیمانه آقایان دکتر حسینی و هوشمند اصل کمال تشکر و قدردانی را داشته و برای ایشان از درگاه خداوند منان ، توفیق روزافزون در کلیه مراحل زندگی را خواستارم. ضمناً از راهنمایی‌های آقای دکتر صبور در پیشبرد این پایان نامه نهایت سپاس را دارم.

## چکیده

در چند سال اخیر انواعی از نانو اسکوئیدهای DC ساخته و مورد بررسی قرار گرفته‌اند. دو موضوع مهم در مورد چنین قطعه‌هایی آثار نوفه‌ها در دو پیوندگاه آنها و انحراف رابطه جریان-فاز پیوندگاه‌ها از شکل ساده سینوسی می‌باشد. ما آثار افت‌وخیزها را با در نظر گرفتن دو جریان تصادفی (نوفه‌ای) مستقل در دو پیوندگاه که میانگین زمانی هر یک صفر و همبستگی زمانی آن متناسب با تابع دلتای دیراک می‌باشد منظور کرده‌ایم. رابطه جریان-فاز به ازای مقادیر مختلف نسبت طول پیوندگاه (نانوپل دیوم) به طول همدوسی فیلم‌های ابررسانا ( $L/\xi$ ) را از حل عددی دو معادله حاصل از معادلات گینزبورگ-لاندائو بدست آورده‌ایم، در این چارچوب با حل عددی دستگاه معادله لنجوینی حاکم بر دینامیک نانو اسکوئید متقارن، مشخصه‌های مهم جریان-ولتاژ-شار آن را بدست آورده و مورد بحث قرار داده‌ایم.

برای بدست آوردن رابطه جریان-فاز از زیر برنامه  $f_{zero}$  متلب و برای حل دستگاه معادله لنجوینی از روش اویلر یا رونگ کوتا و برای محاسبه نوفه ولتاژ و نوفه شار از روش ولج از زیر برنامه Pwelch متلب بهره برده‌ایم.

منحنی جریان-فاز برای نسبت  $L/\xi = 1$  به صورت سینوسی است و هر چه این نسبت بزرگتر می‌شود، این منحنی از حالت سینوسی منحرف می‌گردد تا آنجا که برای  $L/\xi \geq 3.5$  چندمقداری می‌شود و با افزایش نسبت  $L/\xi$  مقدار بیشینه نمودار کاهش می‌یابد. نتایج بدست آمده نشان دهنده رابطه خطی میان نوفه شار ( $S_{\Phi}$ ) و  $(L/\xi)^{4/3}$  است.

در انتها مشخصه‌های جریان-ولتاژ-شار نانو اسکوئیدهای DC نامتقارن را به طور مختصر بررسی می‌کنیم. در مواردی از بسط فوریه سینوسی که فقط شامل هماهنگ اول و دوم باشد به-عنوان رابطه جریان-فاز استفاده کرده‌ایم. ما پیوندگاه‌ها را تندمیرا و تنها عدم تقارن مقاومتی و جریانی را برای آنها منظور کرده‌ایم.

## فهرست مطالب

فصل اول.....	۱
مروری بر برخی مباحث اولیه.....	۱
مقدمه.....	۲
۱-۱: ابرسانایی.....	۲
۱-۱-۱: نظریه گینزبورگ- لاندائو.....	۳
۱-۱-۲: طولهای مشخصه ابرسانایی.....	۳
۱-۱-۳: ابرساناهای یک بعدی.....	۵
۱-۱-۴: ابرسانایی ضعیف.....	۵
۲-۱: مدل RCSJ.....	۶
۱-۲-۱: اتصالات جوزفسونی.....	۶
۲-۲-۱: آثار جوزفسون.....	۷
۳-۲-۱: ابرجریان جوزفسونی.....	۸
۴-۲-۱: جریان عادی (شبه ذره).....	۱۰
۵-۲-۱: جریان جابه‌جایی.....	۱۱
۶-۲-۱: جریان افت و خیز.....	۱۱
۷-۲-۱: مدل RCSJ.....	۱۲
فصل دوم.....	۱۵
قطعات تداخل کوانتومی ابرسانایی دوپیوندگاهی.....	۱۵
۱-۲: اسکویید DC.....	۱۶
۲-۲: نانواسکوئیدهای ساخته شده بوسیله پل دیم.....	۱۷
۱-۲-۲: نانواسکوئیدها و چشم‌اندازهای نو.....	۱۷
۲-۲-۲: نانواسکوئیدهای DC مبتنی بر نانو پل‌های دیم.....	۱۸

۱۹	..... ۳-۲-۲: نوفه دمایی و آثار افت و خیز
۲۱	..... ۴-۲-۲: معادلات اساسی حاکم بر دینامیک نانو اسکوئید
۲۲	..... ۳-۲: سیر تحول نانو اسکوئیدها
۲۲	..... ۱-۳-۲: چگونگی پیشرفت نانو اسکوئیدها
۲۳	..... ۳-۳-۲: برخی کاربردهای نانو اسکوئیدها
۲۵	..... فصل سوم
۲۵	..... روش‌های عددی در حل معادله دیفرانسیل
۲۶	..... مقدمه
۲۶	..... ۱-۳: معادله دیفرانسیل معمولی با شرایط اولیه
۲۷	..... ۲-۳: روش‌های حل معادله دیفرانسیل معمولی
۲۷	..... ۱-۲-۳: روش اویلر
۲۹	..... ۲-۲-۳: الگوریتم اویلر
۲۹	..... ۳-۲-۳: روش رونگ-کوتا مرتبه ۴
۳۰	..... ۴-۲-۳: الگوریتم رونگ-کوتا ۴
۳۱	..... ۵-۲-۳: روش رونگ-کوتا-فلبرگ
۳۲	..... ۶-۲-۳: الگوریتم رونگ-کوتا-فلبرگ
۳۴	..... ۳-۳: پایداری
۳۴	..... ۴-۳: معادلات دیفرانسیل مرتبه بالاتر
۳۶	..... ۵-۳: نتایج عددی مشخصه‌های جریان-ولتاژ-شار یک اسکوئید DC
۳۷	..... فصل چهارم
۳۷	..... نظریه نوفه نانو اسکوئیدهای DC ساخته شده از نانوپیل‌های دیم
۳۸	..... مقدمه

- ۳۹.....۱-۴: بررسی CPR نانواسکوئید.....
- ۳۹.....۱-۱-۴: دستگاه معادله ناخطی بی بعد حاصل از معادله های GL.....
- ۴۰.....۲-۱-۴: تحلیل نتایج CPR به ازای مقادیر مختلف.....
- ۴۲.....۲-۴: بررسی مشخصه جریان - ولتاژ.....
- ۴۲.....۱-۲-۴: مشخصه جریان - ولتاژ.....
- ۴۵.....۲-۲-۴: روش رسم نمودار جریان - ولتاژ.....
- ۴۸.....۳-۲-۴: تحلیل نتایج حاصل از مشخصه های جریان - ولتاژ.....
- ۴۹.....۳-۴: بررسی مشخصه جریان - ولتاژ - شار.....
- ۴۹.....۱-۳-۴: بررسی مشخصه ولتاژ - شار.....
- ۵۰.....۲-۳-۴: بررسی مشخصه جریان - شار.....
- ۵۱.....۳-۳-۴: بررسی مشخصه تابع تبدیل شار به ولتاژ بر حسب جریان بایاس.....
- ۵۳.....۴-۳-۴: بررسی نوفه ولتاژ بر حسب بسامد.....
- ۵۴.....۵-۳-۴: بررسی مشخصه نوفه ولتاژ بر حسب جریان.....
- ۵۶.....۶-۳-۴: بررسی مشخصه نوفه ولتاژ بر حسب جریان.....
- ۵۷.....۷-۳-۴: نوفه شار بر حسب  $(L/\xi)^{4/3}$ .....
- ۵۸.....۸-۳-۴: نوفه شار بر حسب چگالی نوفه.....
- ۶۰.....۴-۴: مقایسه نتایج بدست آمده با نتایج دیگران.....
- ۶۰.....۱-۴-۴: مقایسه با نتایج عددی.....
- ۶۲.....۲-۴-۴: مقایسه با نتایج تجربی.....
- ۶۵.....فصل پنجم.....
- ۶۵.....مهارت در استفاده از دستورات متلب.....
- ۶۶.....۱-۵: صفرهای توابع fzero.....



۶۷	۵-۱-۱: برنامه حل عددی دستگاه حاصل از معادلات GL (نمودار جریان- فاز).....
۶۸	۵-۱-۲: تحلیل برنامه نمودار جریان- فاز.....
۶۹	۵-۲: دنباله اعداد تصادفی با توزیع نرمال(نوفه گوسی).....
۷۱	۵-۲-۱: برنامه حل عددی دستگاه معادله لنجوینی.....
۷۲	۵-۲-۲: تحلیل برنامه حل معادله لنجوینی با عامل تصادفی.....
۷۲	۵-۳: چگالی توان طیفی (PSD).....
۷۵	۵-۳-۱: برنامه حل عددی نوفه شار بر حسب جریان بایاس.....
۷۷	۵-۳-۲: تحلیل برنامه نوفه ولتاژ بر حسب جریان.....
۷۸	۵-۳-۳: تحلیل برنامه تابع تبدیل شار به ولتاژ بر حسب جریان.....
۷۹	فصل ششم.....
۷۹	آثار عدم تقارن در نانو اسکوئیدهای DC.....
۸۰	۶-۱: آثار عدم تقارن.....
۸۱	۶-۱-۱: بررسی مشخصه جریان- ولتاژ.....
۸۲	۶-۱-۲: بررسی مشخصه ولتاژ- شار.....
۸۴	۶-۱-۳: بررسی مشخصه تابع تبدیل شار به ولتاژ بر حسب جریان بایاس.....
۸۵	۶-۱-۴: بررسی مشخصه نوفه ولتاژ بر حسب بسامد.....
۸۷	بحث و نتیجه گیری.....
۸۸	پیشنهادات.....
۸۹	پیوست.....
۹۱	منابع و مآخذ.....

## فصل اول

مروری بر برخی مباحث اولیه

## مقدمه

در سال ۱۹۶۲، جوزفسون<sup>۱</sup> در یک مقاله‌ی نظری دو اثر جالب را پیش‌بینی کرده بود [۱] که می‌توان آن‌ها را در پیوندگاه‌های تونلی ابررسانشی مشاهده کرد. پی‌آمد اصلی اثر نخست این بود که پیوندگاه تونلی باید بتواند یک جریان (ابررسانشی) ولتاژ صفر را برقرار کند. مقدار بحرانی این جریان به روشی بسیار نامعمول به میدان مغناطیسی خارجی بستگی دارد چنانچه جریان از مقدار بحرانی، که مشخصه‌ی هر پیوندگاه خاص است، تجاوز کند پیوندگاه آغاز به تولید امواج الکترومغناطیسی با بسامد بسیار بالا می‌کند که این اثر دوم جوزفسون است.

کوتاه زمانی پس از انتشار این مقاله [۱] هر دو اثر به طور تجربی کاملاً به تایید رسید. افزون بر آن، به زودی معلوم شد که اثرهای جوزفسون نه تنها در پیوندگاه‌های تونلی، بلکه در انواع دیگر پیوندگاه‌ها به نام اتصال‌های ضعیف نیز دیده می‌شوند، که بخش‌های کوتاهی از مدارهای ابررسانا هستند که در آن‌ها از شارش جریان بحرانی به طور چشمگیری جلوگیری می‌شود.

### ۱-۱: ابررسانایی

در سال ۱۹۱۱ اچ. کامرلینگ<sup>۲</sup> اونس به هنگام مطالعه دمایی مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ای از جیوه مشاهده نمود که در دمای ۴K، مقاومت نمونه ناگهان به صفر سقوط کرد. آشکار بود که نمونه باید دستخوش گذاری به حالت جدید با مقاومت الکتریکی صفر شده باشد. این پدیده ابررسانایی نامیده شد.

مدت زمانی پس از این کشف معلوم شد که نه تنها با گرم کردن نمونه بلکه با قرار دادن آن در میدان مغناطیسی نسبتاً ضعیف می‌توان ابررسانایی را از بین برد. این میدان،  $H_{cm}$ ، میدان بحرانی ماده کپه‌ای نامیده می‌شود [۲].

---

1. Josephson  
2. H. kamerling

### ۱-۱-۱: نظریه گینزبورگ - لاندائو

نخستین نظریه کوانتومی ابررسانایی، نظریه گینزبورگ - لاندائو<sup>۱</sup> (GL) است. در یک نظریه کوانتومی دو نکته باید به حساب آورده شوند، نخست این که حالت ابررسانایی از حالت عادی به مراتب منظم تر است و دوم اینکه گذار از یک حالت به حالت دیگر (بدون حضور میدان مغناطیسی) گذار مرتبه دوم است. یعنی برای ابررسانا یک پارامتر نظم وجود دارد که در  $T < T_c$  غیر صفر و در  $T > T_c$  صفر است. (دمای گذار از حالت عادی به ابررسانایی را دمای بحرانی می نامند)

برای بسط یک نظریه کوانتومی، لازم است تابع موج موثری برای الکترونهای ابررسانایی به صورت  $\psi(r) = |\psi| \exp(i\theta)$  تعریف شود. گینزبورگ و لاندائو  $\psi(r)$  را به عنوان پارامتر نظم در نظر گرفتند. نظریه GL بر مبنای نظریه گذار فاز مرتبه دوم پی ریزی شده و گذار فاز مرتبه دوم هنگامی رخ می دهد که حالت یک جسم به تدریج تغییر کند، در حالی که تغییر تقارن آن در دمای گذار ناپیوسته باشد. نظریه GL فقط در دماهای نزدیک به دمای بحرانی  $T_c - T \ll T_c$  دارای اعتبار است [۲].

با فرض آنکه تابع موج الکترونهای ابررسانایی  $\psi(r)$  همان پارامتر نظم باشد، بهنجارش این تابع موج چنان انتخاب می شود که  $|\psi(r)|^2$  برابر است با  $n_s/2$  که همان چگالی زوج های کوپر است،  $\nabla\theta$  به سرعت آنها مربوط می گردد و  $\theta$  فاز پارامتر نظم ابررسانایی است که در روابط مهمی ظاهر می شود و در تعیین بسیاری از رفتارها و پدیده های مربوط به ابررساناها (وابرشاره ها) نقش عمده دارد.

همچنین نظریه GL دو طول مشخصه وابسته به دما به نام های طول همدوسی  $\xi(T)$  و عمق نفوذ  $\lambda(T)$  را معرفی می کند که در تعیین نوع ابررسانا و رفتارهای آن خیلی مهم است [۳ و ۴].

### ۱-۱-۲: طولهای مشخصه ابررسانایی $(\lambda, \xi)$

فیلم نازکی از یک فلز عادی را در نظر بگیرید که روی سطح صاف و تمیز یک ابررسانا نشانده شده است. این فرایند موجب کاهش موضعی در چگالی الکترون ابررسانایی در نقاط نزدیک به

---

3. Ginzburg - Landau

سطح ابررسانا می‌شود. به عبارت دیگر، پارامتر نظم  $|\psi|$  در سطح از مقدار تعادلی آن در عمق ابررسانا، جایی که  $|\psi|=1$  است، تا اندازه‌ای تغییر می‌کند. اکنون سوال این است که اندازه طول سرشتی که پارامتر نظم در آن طول به مقدار واحد باز می‌گردد، چقدر است؟

محور  $x$  را عمود بر سطح ابررسانا (در سطح  $x=0$ ) انتخاب می‌کنیم. بنابراین  $\psi$  فقط در راستای محور  $x$  تغییر می‌کند، یعنی  $\psi = \psi(x)$ . افزون بر آن، می‌توان فرض کرد که  $\psi$  حقیقی است و بدین ترتیب معادله اول GL به شکل زیر نوشته می‌شود

$$-\xi^2 \frac{d^2 \psi}{dx^2} - \psi + \psi^3 = 0 \quad (1-1)$$

فرض کنید که لایه عادی در سطح آنچنان نازک باشد که بزرگی  $\psi$  در سطح تفاوت چندانی

با ۱ (یک) نداشته باشد، یعنی

$$\psi = 1 - \varepsilon(x) \quad , \quad \varepsilon(x) \ll 1 \quad (2-1)$$

با نشان دادن این رابطه در (۱-۱) و انتخاب فقط جملات خطی بر حسب  $\varepsilon(x)$ ، داریم

$$\xi^2 \frac{d^2 \varepsilon(x)}{dx^2} - 2\varepsilon(x) = 0 \quad (3-1)$$

با توجه به این واقعیت که وقتی  $x \rightarrow \infty$  پارامتر نظم  $\psi \rightarrow 1$ ، داریم  $\varepsilon(\infty) = 0$ . بنابراین

پاسخ آشکار (۳-۱)، به قرار زیر است

$$\varepsilon = \varepsilon(0) e^{-\sqrt{2}x/\xi} \quad (4-1)$$

نتیجه این که  $\xi$  به راستی مقیاس سرشتی است که در طول آن پارامتر نظم  $\psi$  تغییر می‌کند.

این طول را طول همدوسی می‌نامند [۲].

کمیت دیگر،  $\lambda$ ، است این کمیت عمق نفوذ میدان‌های مغناطیسی ضعیف است. هر دو پارامتر

$\lambda, \xi$  به قرار زیر به دما وابسته‌اند

$$\lambda^2 = \frac{mc^2 \beta}{8\pi |\alpha| e^2} \quad (5-1)$$

$$\xi^2 = \frac{\hbar^2}{4m |\alpha|} \quad (6-1)$$

نزدیک به  $T_c$ ، داریم:  $|\alpha| = (T_c - T)$ . بنابراین، در گستره دمایی نزدیک به  $T_c$

$$\lambda \propto (T_c - T)^{-1/2}, \quad \xi \propto (T_c - T)^{-1/2} \quad (7-1)$$

در همه گستره‌های دمایی، فرمول تجربی زیر برای  $\lambda(T)$  تقریب خوبی است

$$\xi(T) = \xi(0)(1 - T/T_c)^{-1/4}, \quad \lambda(T) = \lambda(0)(1 - T/T_c)^{-1/4} \quad (8-1)$$

### ۳-۱-۱: ابررساناهای یک بعدی

در سالهای اخیر بواسطه توسعه فناوری نانو، نانوسیم‌ها، نانوحلقه‌ها و امثال آنها در راس پژوهش‌های علمی دنیا دیده می‌شوند. به چند دلیل عمده این گونه ابررساناها مورد توجه خاص قرار گرفته‌اند. نخست این که کمیت‌هایی مانند پارامترنظم، میدان مغناطیسی و سایر کمیت‌هایی وجود دارند که می‌توان در مقطع عرضی از آنها صرف‌نظر کرد تا معادلات ما فقط تابع مختصه مکانی در راستای سیم باشند. دوم این که در دستگاه‌های با ابعاد کمتر می‌توان هر چه بیشتر به وقوع ابررسانایی نزدیک شده و ماهیت و چگونگی نظم ابررسانایی را بررسی کنیم [۵-۹]. سوم این که پدیده‌های فیزیکی مهمی که در سیم‌های نازک روی می‌دهند خیلی مشابه فرایندهایی هستند که در پیوندگاه‌های جوزفسون و اتصال‌های ضعیف دیده می‌شوند و بررسی برخی پدیده‌های مربوط به ابررسانایی همچون لغزش فاز، بازتاب آندریو و... در دستگاه‌های کم‌بعد امکان پذیرتر می‌باشد [۱۰-۱۳]. مورد چهارم که گویای اهمیت موضوع است، توجه جهانی به فناوری نانو و علوم در مقیاس نانو می‌باشد.

### ۴-۱-۱: ابررسانایی ضعیف

برخلاف آنچه عموم از ابررسانا متصورند، یک ابررسانا در بعضی شرایط حتی در مقابل یک جریان مستقیم کوچک و در غیاب میدان مغناطیسی ممکن است از خود مقاومت نشان‌دهد. این وضعیت در ابررساناهای یک‌بعدی مخصوصاً در دماهای نزدیک دمای گذار به‌طور معمول دیده می‌شود. پیوندگاه‌های جوزفسون و اتصال‌های ضعیف نمونه جالبی از ابررسانایی ضعیف می‌باشند. درمورد یک سیم ابررسانای نازک، از معادله‌های GL نتیجه می‌شود که برای چگالی جریان‌های کوچکتر از یک حد معین (چگالی جریان بحرانی که به دما و جنس ابررسانا بستگی دارد)، میدان

الکتریکی و مقاومت در ابررسانا صفر است و با افزایش جریان، در جریان بحرانی گذار تیزی به حالت عادی روی می‌دهد.

## ۱-۲: مدل RCSJ<sup>۱</sup>

### ۱-۲-۱: اتصالات جوزفسونی

اتصال جوزفسونی شامل دو الکتروود ابررسانای جفت‌شده ضعیف است. انواع مختلف اتصالات جوزفسونی در عمل بررسی و استفاده شده‌اند. به طور مثال اتصالات ضعیف شده نوع SNS و SIS. در اتصالات SIS جریان انتقالی توسط جفت‌های کوپر و شبه ذرات رخ می‌دهد. در حالت عمومی اگر جفت‌شدگی به اندازه کافی ضعیف باشد، ابرجریان  $I_s$  عبوری از اتصال با اختلاف فاز ثابت تابع موج ماکروسکوپی دو الکتروود ابررسانا به صورت یک تابع  $(f(\theta))$  با دوره تناوب  $2\pi$  ارتباط دارد و می‌تواند به صورت یک سری فوریه بسط داده شود [۱۴]. آثار ابررسانایی ضعیف ریشه در ماهیت کوانتومی حالت ابررسانایی که اساس آن برحالت چگالیده بوز بنا شده دارد. دو قطعه ابررسانا با دمای یکسان را به صورت جدا از هم در نظر می‌گیریم. الکترون‌های ابررسانایی هر قطعه تابع موج مخصوص خود را دارند

$$\psi_1(r) = |\psi_1| \exp(i\theta_1) \quad (9-1)$$

$$\psi_2(r) = |\psi_2| \exp(i\theta_2) \quad (10-1)$$

با فرض یکسان بودن دما و ماده ابررسانا دامنه توابع موج یکسان است اما فازها یکسان نمی-

باشند

$$|\psi_1| = |\psi_2| \quad (11-1)$$

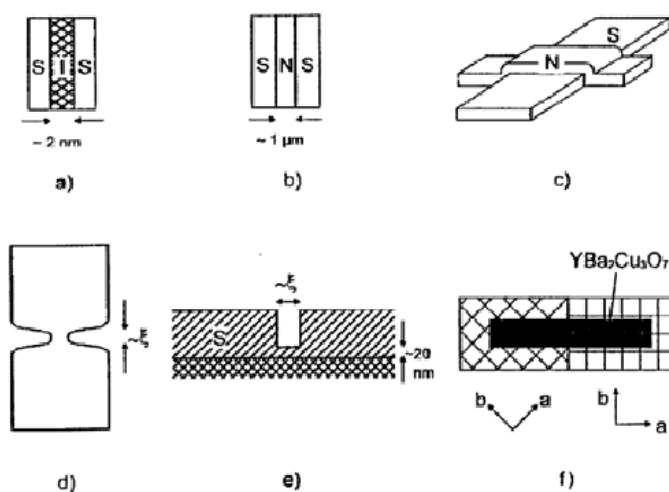
$$\theta_1 = \theta_2 \quad (12-1)$$

هنگامیکه اتصال ضعیفی میان دو قطعه ابررسانا برقرار می‌گردد، با تداخل توابع موج دو قطعه تابع موج جدیدی شکل خواهد گرفت که هم‌دوسی فاز نتیجه مستقیم تشکیل اتصال ضعیف و تداخل توابع موج ابررسانایی است. پس از برقراری یک اتصال ضعیف میان دو ابررسانا

1. resistively- and capacitively-shunted junction

شارمغناطیسی منجمد شده درچنین حلقه‌ای مقادیر کوانتیده اختیار می‌کند زیرا ابرجریانی که حلقه را دور می‌زند و این میدان را می‌سازد، خود کوانتیده است. درست مانند کوانتش مدارهای اتم بور.

در شکل (۱-۱) انواع مختلف اتصال‌های ضعیف با ضخامت لایه عایق نوعاً در حدود  $1-2\text{nm}$  به تصویر کشیده شده است [۲].



شکل ۱-۱: انواع مختلف اتصالات ضعیف [۲]

### ۱-۲-۲: آثار جوزفسون

هنگامیکه جریان نسبتاً کوچکی بدون اتلاف از اتصال ضعیف (پیوندگاه جوزفسون) گذر کند در دو سر پیوندگاه ولتاژ تولید نمی‌شود و به‌دلیل کوچکی جریان از میدان مغناطیسی تولید شده توسط آن می‌توان صرف‌نظر کرد.

مشخصه مهم اتصال ضعیف این است که گرادیان فاز  $(\nabla\theta)$  در مقایسه با گرادیان فاز در ابررسانای کپه‌ای بسیار بزرگ است و از این رو حتی درجریان کم نیز با استفاده از نظریه گینزبورگ-لاندائو می‌توان چگالی جریان را با توجه به گرادیان فاز قابل توجه اتصال ضعیف تعیین نمود. پس همواره اختلاف فاز دو سر اتصال ضعیف به‌صورت زیر خواهد بود

$$\varphi = \theta_2 - \theta_1 \quad (13-1)$$



که  $\theta_1, \theta_2$  فازهای توابع موج الکترون ابررسانشی در هر یک از دو سر پیوندگاهها می باشد. برای جریان بایاس صفر دوابررسانا با انرژی جفت شدگی جوزفسونی  $E_j = I_0 \Phi_0 / 2\pi$  جفت خواهند شد. طبق رابطه (۱-۱۷) در حالت ولتاژ صفر اختلاف فاز با زمان ثابت است [۱۴].

### ۱-۲-۳: ابرجریان جوزفسونی ( $I_s$ )

جالبترین مولفه جریان  $I$  در یک پیوندگاه ابررسانایی، که جلوه آشکاری از همدوسی ماکروسکوپی هم می باشد، ابرجریان جوزفسونی است. این جریان که جفت های کوپر آن را انتقال می دهند، تابعی از اختلاف فاز پارامتر نظم ابررسانایی در دو پایه پیوندگاه می باشد. معمولاً در حد ابرجریان ضعیف و در تعریف یک اتصال ضعیف ابررسانایی که بوسیله لیخاریو داده شد، یک پیوندگاه جوزفسونی سه ویژگی باید داشته باشد:

۱. رابطه ابرجریان - فاز اتصال جوزفسونی با دوره  $2\pi$  تناوبی است .

$$I_0(\varphi) = I_0(\varphi + 2\pi) \quad (1-14)$$

۲. ابرجریان در اتصال جوزفسونی زمانی که اختلاف فاز  $\varphi$  میان اتصال به صورت

$$\varphi = n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

باشد صفر است.

۳. رابطه ابرجریان - فاز اتصال جوزفسونی متقارن است.

$$I_0(-\varphi) = -I_0(\varphi) \quad (1-15)$$

چنانچه برای یک پیوندگاه تونلی بدست خواهد آمد

$$I_s = I_0 \sin \varphi \quad (1-16)$$

که  $I_0$  جریان بیشینه است که از پیوندگاه می گذرد (جریان بحرانی). رابطه (۱-۱۶) به عنوان اولین رابطه جوزفسونی شناخته شده است و در عمل برای انواع زیادی از اتصالات مورد استفاده قرار می گیرد. ما بحث خود را محدود به اتصال های کوچک با چگالی جریان بحرانی  $j_0 = I_0 / A_j$  ، با

مساحت سطح مقطع  $A_j$  می‌کنیم. اگر اختلاف فاز با زمان تغییر کند ولتاژ  $V$  از میان اتصال‌ها بوجود خواهد آمد که به صورت رابطه دوم جوزفسون خوانده می‌شود

$$\dot{\varphi} = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2e}{\hbar} V = \frac{2\pi}{\Phi_0} V \quad (17-1)$$

که  $\Phi_0 = h/2e \approx 2.07 \times 10^{-15} \text{ vs}$  کوانتوم شار است [۱۶ و ۱۵ و ۲].

ابرجریان به اختلاف فازهای پارامتر نظم در دو طرف پیوندگاه وابسته است  $I_s(\varphi)$ . این وابستگی (تابعی) رابطه جریان-فاز (CPR) نامیده می‌شود.

ما در فصل ۴ چند جمله‌ای متناظر با هر یک از نمودارهای جریان-فاز شکل (۴-۲) را به عنوان رابطه جریان-فاز در معادله لنجورین وارد نمودیم، در اکثر موارد بسط فوریه سینوسی را می‌توان جایگزین رابطه جریان-فاز نمود.

$$I_s(\varphi) = \sum_{n \geq 1} I_n \sin(n\varphi) \quad (18-1)$$

تا آنجا که طول پیوندگاه کوچکتر از طول همدوسی باشد، انحراف CPR از شکل سینوسی کوچک خواهد بود اما با افزایش طول پیوندگاه آثاری که ظاهر می‌شود که اساساً برای  $T > T_c'$  و  $T < T_c'$  متفاوت است.

برای  $T > T_c'$ ، ماده پیوندگاه ضعیف در حالت عادی است. همبستگی ابررسانایی که پایه‌ها القاء می‌کنند با افزایش طول پیوندگاه به طور نمایی کاهش می‌یابد. در نتیجه تابع  $I_s(\varphi)$  تقریباً سینوسی باقی می‌ماند.

برای  $T < T_c'$ ، ماده پیوندگاه ضعیف در حالت ابررسانایی است. با افزایش طول پیوندگاه گذاری از اثر جوزفسون به اثر واجفت‌شدگی روی می‌دهد. در نتیجه ابتدا جریان بحرانی با افزایش طول پیوندگاه، کاهش می‌یابد ولی در صورتیکه طول پیوندگاه به بیش از حدود ۸٪ برسد به مقدار ثابتی مجانب می‌شود. همزمان شکل  $I_s(\varphi)$  هم بطور اساسی تغییر می‌نماید و با افزایش طول پیوندگاه به بیش از ۳.۵٪،  $I_s(\varphi)$  چند مقداری می‌شود.

به هر حال CPR اتصال‌های ضعیف و سیم‌های یک‌بعدی (پل‌ها) هم در دمای پایین و هم در دمای نزدیک دمای گذار شکل‌های مختلفی به خود می‌گیرند و انحراف شکل سینوسی ایده‌آل

پدیده معمول و متداول است که ما آنرا در فصل ۴ بررسی و در شکل (۴-۲) به وضوح نشان داده-ایم.

### ۴-۲-۱: جریان عادی (شبه ذره) ( $I_N$ )

حامل‌های بار در ابررسانا دارای انرژی گرمایی از مرتبه  $K_B T$  هستند و حرکت‌های گرمایی آن‌ها شکسته شدن بعضی از جفت‌های کوپر را به دنبال دارد. در نتیجه در یک ابررسانا، الکترون-های جفت نشده عادی که تحت تاثیر چگاله ابررسانا ویژگی‌های خاص خود را دارند (از این رو شبه ذره نامیده می‌شوند) هم بطور محسوسی حضور دارند. اگر  $\phi$  ثابت، یعنی  $V = 0$  باشد، این شبه ذرات سهمی در جریان پیوندگاه نخواهند داشت. در غیر اینصورت یک مولفه جریان شبه ذره یا جریان عادی هم در پیوندگاه برقرار خواهد بود و پیوندگاه دچار حالت مقاومتی خواهد شد. جریان عادی  $I_N$  دو ویژگی دارد. اول اینکه اگر دمای  $T$  نزدیک ولی کوچک‌تر از دمای گذار  $T_c$  باشد، انرژی پیوند  $\Delta$  (انرژی گاف) جفت کوپر خیلی کوچکتر از  $K_B T$  و در نتیجه رابطه  $I_N - V$  به قانون اهم معمولی

$$I_N = G_N V \quad (۱۹-۱)$$

که در آن رسانندگی  $G_N = R_N^{-1}$  عادی پیوندگاه است، نزدیک خواهد بود. دوم اینکه اگر ولتاژ بین دو سر پیوندگاه خیلی بیشتر از مقدار مربوط به گاف، یعنی

$$V_g \equiv [\Delta_1(T) + \Delta_2(T)]/e \quad (۲۰-۱)$$

باشد، شکسته شدن جفت کوپر در یک الکتروود و تونل‌زنی تک الکترونی روی خواهد داد، بطوریکه برای  $|V| > V_g$  در تمام دماها، رابطه  $I - V$  به قانون اهم نزدیک خواهد بود. با در نظر گرفتن مطالب فوق متوجه اهمیت

$$V = R_N I_N \quad (۲۱-۱)$$

که ولتاژ ویژه پیوندگاه نام دارد، می‌شویم.

### ۵-۲-۱: جریان جابه‌جایی ( $I_D$ )

در مواقعی که نه تنها  $V$  بلکه  $\dot{V}$  هم مخالف صفر باشد، جریان جابه‌جایی  $I_D$  می‌تواند خیلی مهم باشد. اگر چه  $I_D$  مستقیماً از درون پیوندگاه نمی‌گذرد، اما با این حال بطور موثر با مولفه‌های جریان جمع می‌شود. در اکثر موارد می‌توان طبق معمول این جریان را با رابطه

$$I_D = C \dot{V} \quad (۲۲-۱)$$

توصیف کرد که در آن ظرفیت پیوندگاه  $C$  دقیقاً برابر ظرفیت آن در حالت عادی می‌باشد. در عمل بزرگی نسبی  $I_D$  مهم است نه مقدار مطلق  $C$ .

### ۶-۲-۱: جریان افت و خیز ( $I_n$ )

در همه پیوندگاه‌ها افت‌وخیزها و نوفه‌ها، می‌توانند آثار مهمی داشته باشند. معمولاً در هر پیوندگاه، فرآیندهای کاتوره‌ای چشمه‌های مختلف، ساز و کارهای متعددی دارند و بررسی دقیق آثار آن‌ها مشکل می‌باشد. در اغلب موارد برای منظور کردن آثار افت‌وخیزها از روش لنج‌وین<sup>۱</sup> (در ادامه بطور مفصل توضیح داده می‌شود) استفاده می‌شود. معادله پیوندگاه از جمع مولفه‌های جریان بدست می‌آید. جریان افت‌وخیز به عنوان نماینده چشمه‌های افت‌وخیز به شکل مناسبی انتخاب و به این معادله اضافه می‌شود.

مولفه‌های جریان ماهیت برگشت‌کنندگی دارند و در نتیجه در افت‌وخیز مشارکت نمی‌کنند. در مقابل جریان شبه ذره دارای پراکنندگی است و حداقل مسؤل دو نوع افت‌وخیزهای کلاسیکی، یعنی نوفه گرمایی و نوفه تیز می‌باشد.

نوفه‌های خارجی ( $I_L$ ) که از امواج رادیویی و تلویزیونی، منبع تغذیه و سیم‌های ارتباطی نشات می‌گیرند نیز می‌توانند در  $I_F$  سهیم باشند. بسامد این نوفه‌ها نوعاً خیلی کوچک‌تر از بسامد ویژه پیوندگاه می‌باشد.

می‌توان شرایط تجربی را طوری ترتیب داد که دامنه موثر نوفه خارجی خیلی کوچک‌تر از دامنه نوفه‌های ذاتی باشد، طوریکه آثار این نوفه‌های خارجی قابل صرف‌نظر باشد.

---

1.Lanjvin