

دانشگاه یزد

دانشکده فیزیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

فیزیک حالت جامد

بررسی تأثیر تابش ریزموج بر روی منحنی‌های جریان – ولتاژ اسکوئیدهای

DC دمای بالای متقارن

استاد راهنما: دکتر محمد اعتصامی

استاد مشاور: دکتر محمدرضا هوشمند اصل

پژوهش و نگارش: آتیه محرابی پور

اسفند ۱۳۹۱

تقدیم

این پایان‌نامه را ضمن تشکر و سپاس بیکران و در کمال افتخار و امتنان به محضر ارزشمند پدرم و وسعت بی‌انتهای دست‌های آسمانی‌اش و به مادر عزیزم، اسطوره مهربانی، که بر فراز قله‌های آرامش ایستادگی را به من آموخت، به خاطر همه تلاش‌های محبت‌آمیزی که هر دو در دوران مختلف زندگی‌ام انجام داده‌اند و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند و به همه کسانی که نفس خیرشان و دعای روح‌پرورشان بدرقه راهم بوده است تقدیم می‌کنم.

تقدیر و تشکر

سپاس و ستایش مر خدای را جل و جلاله که آثار قدرت او بر چهره روز روشن و تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درخشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید. شکر شایان نثار او که توفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. همچنین از باب «من لم یشکر المخلوق لم یشکر الخالق» بسی شایسته است از استادان فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر محمد اعتصامی و جناب آقای دکتر محمدرضا هوشمند اصل اساتید راهنما و مشاورم: که با کرامتی چون خورشید، سرزمین دل را روشنی بخشیدند و گلشن سرای علم و دانش را با راهنمایی های کار ساز و سازنده بارور ساختند؛ تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین از اساتید گرامی جناب آقایان دکتر حسن ربانی و دکتر قاسم انصاری پور که امر داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند تشکر و قدردانی می نمایم.

و اما تشکر بیکران می کنم از خانواده عزیزم که همیشه و در تمام عرصه های زندگی یار و یابوری بی چشم داشت برای من بوده اند.

چکیده

ساختارهای پله‌ای-جهشی در مشخصه‌های جریان - ولتاژ قطعات تداخل کوانتومی ابررسانایی به ویژه پله‌های معروف شاپیرو هم از نظر کاربردی هم از نظر پدیده شناسی مدت‌هاست که مورد توجه پژوهشگران بوده‌اند. ساختارهایی که در نتیجه تابش ریزموج بر اسکویید DC تولید می‌شوند ظرفیت‌های پژوهشی جدیدی را معرفی نموده‌اند. بررسی آثار تابش ریزموج بر مشخصه جریان - ولتاژ اسکوییدهای DC متقارن و مقایسه این مشخصه‌ها در حضور و غیاب تابش در موارد عملی مانند اسکوییدهای دمای بالای دارای هر مقدار پارامتر بدون بعد القائیدگی (β) و در رژیم غیر بی‌دررو برای $\omega \gg \omega_c$ ، که در آن ω بسامد میدان ریزموج اعمالی و ω_c بسامد جوزفسون اسکوییداست، موضوع مورد توجه این پایان‌نامه می‌باشد.

برای اسکوییدهای با پارامتر کوچک (β) صرف نظر از افت‌وخیزهای گرمایی، ما به نقد و بررسی مدل تداخل سنج دوپیوندگامی کاهیده می‌پردازیم. در حضور افت‌وخیزهای گرمایی، ابتدا یک تحلیل مبتنی بر معادله فوکر- پلانک دو بعدی را در تقریب مرتبه اول نسبت به پارامتر $\theta = \omega_c / \omega$ که کوچک در نظر گرفته می‌شود مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم. سپس برای حالت‌هایی که شرایط پتانسیل برقرار است عبارتی برای تابع توزیع احتمال اسکویید تحت تابش ریزموج بدست آورده که بر اساس آن یک عبارت برای مشخصه‌های جریان - ولتاژ قطعه بدست می‌آید. در پایان نتایج بدست آمده را گزارش می‌دهیم.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	فصل اول : پیوندگاه جوزفسون -----
۳	۱-۱: مقدمه -----
۳	۲-۱: پیوندگاه جوزفسون -----
۴	۳-۱: آثار جوزفسون -----
۵	۱-۳-۱: اثر DC جوزفسون -----
۶	۲-۳-۱: اثر AC جوزفسون -----
۷	۴-۱: معادله اساسی حاکم بر دینامیک پیوندگاه جوزفسون -----
۹	۱-۴-۱: الگوی RSJ -----
۱۰	۲-۴-۱: ابر جریان جوزفسونی -----
۱۱	۳-۴-۱: جریان عادی (شبه ذره) -----
۱۲	۵-۴-۱: جریان جابجایی -----
۱۳	۶-۴-۱: جریان افت و خیز -----
۱۳	۵-۱: مشخصه جریان - ولتاژ پیوندگاه جوزفسون در غیاب افت و خیز -----
۱۶	۶-۱: پاسخ پیوندگاه جوزفسون به میدان مغناطیسی -----
۱۹	۷-۱: جریان بیشینه در یک پیوندگاه جوزفسون در ولتاژ صفر -----
۲۱	۸-۱: ویژگی‌های پیوندگاه جوزفسون تحت تابش ریزموج -----
۲۱	۱-۸-۱: سیگنال کوچک ریزموج -----
۲۱	۱-۸-۱-۱: اثر خطی در حالت ولتاژ صفر -----

۲۲	۱-۸-۲: اثر خطی در حالت ولتاژ غیر صفر
۲۴	۱-۸-۲: پله جریان جوزفسون (پله‌های شاپیرو)
۲۵	۱-۸-۲: سیگنال بزرگ
۲۷	۱-۸-۳: اثر تابش ریزموج بر پیوندگاه جوزفسون در رژیم بایاس ولتاژ
۲۹	فصل دوم: اسکوئیدها
۳۱	۲-۲: معرفی اسکوئید
۳۳	۱-۲-۲: اسکوئید تک پیوندگاهی (RF SQUID)
۳۴	۲-۲-۲: اسکوئید دو پیوندگاهی (DC SQUID)
۳۸	۳-۲: کاربردهای اسکوئید
۴۰	۴-۲: اسکوئید دو پیوندگاهی تحت تابش ریزموج (شاپیرواسکوئید)
۴۰	۱-۴-۲: شاپیرواسکوئید دو پیوندگاهی
۴۳	۵-۲: مبنای فیزیکی و اهمیت پله‌ها
۴۹	فصل سوم: معادله فوکر - پلانک و حل آن
۵۰	۱-۳: مقدمه
۵۲	۲-۳: معرفی معادله فوکر - پلانک
۵۴	۱-۲-۳: معادله‌های لنجوبین غیرخطی و ضرایب بسط کرامرز-موپال
۵۶	۲-۲-۳: حل معادله فوکر - پلانک با استفاده از روش شرط پتانسیل
۵۸	۳-۳: بدست آوردن معادله فوکر - پلانک از معادلات دینامیکی اسکوئید
۶۳	۴-۳: بررسی آماری تابع چگالی احتمال

فصل چهارم: بررسی تأثیر تابش ریزموج بر روی منحنی‌های جریان - ولتاژ
اسکوئیدهای DC دمای بالای متقارن----- ۶۷

۱-۴: مقدمه ----- ۶۹

۲-۴: اثر تابش ریزموج بر مشخصه جریان-ولتاژ در رژیم بایاس ولتاژ ----- ۶۹

۳-۴: اثر تابش ریزموج بر مشخصه جریان- ولتاژ در رژیم بایاس جریان ----- ۷۷

۱-۳-۴: رابطه تحلیلی مشخصه جریان - ولتاژ با استفاده از روش پارامترهای کوچک ----- ۸۵

فصل پنجم: مشخصه جریان - ولتاژ اسکوئید DC دمای بالای متقارن تحت تابش ریزموج

با استفاده از حل معادله فوکر- پلانک و بررسی و تحلیل نتایج آن ----- ۹۱

۱-۵: رابطه تحلیلی مشخصه جریان - ولتاژ با استفاده از حل مستقیم معادله فوکر- پلانک ---- ۹۳

۲-۵: نتیجه گیری ----- ۹۷

مراجع ----- ۱۰۰

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴-----	شکل (۱-۱): به ترتیب از بالا سمت راست: پیوندگاه SIS و SNS و HTS و SFS
۵-----	شکل (۲-۱): تونل‌زنی جفت‌های کوپر در پیوندگاه جوزفسون
۵-----	شکل (۳-۱): اثر AC جوزفسون
۸-----	شکل (۴-۱): آونگ کلاسیک
۱۰-----	شکل (۵-۱): مدل RSCJ برای پیوندگاه جوزفسون
۱۴-----	شکل (۶-۱): الگوی RSJ برای پیوندگاه جوزفسون
۱۶-----	شکل (۷-۱): ذره کلاسیکی در سطح پتانسیل شیب‌دار موجی
۱۷-----	شکل (۸-۱): پیوندگاه جوزفسون در میدان مغناطیسی [۳]
۳۳-----	شکل (۱-۲): نمودار یک اسکوئید تک پیوندگاهی [۳]
۳۵-----	شکل (۲-۲): اسکوئید دو پیوندگاهی
	شکل (۳-۲): الف) اسکوئید دو پیوندگاهی در مدار الکتریکی. ب) مشخصه جریان - ولتاژ اسکوئید.
۳۷-----	ج) وابستگی تناوبی ولتاژ به شار
۳۹-----	شکل (۴-۲): نمایی از دستگاه مغزنگاری
۴۰-----	شکل (۵-۲): نمایی از دستگاه قلب‌نگاری
۴۱-----	شکل (۶-۲): الگوی RCSJ

فهرست جداول:

عنوان	صفحه
جدول (۱-۱): تشابه میان آونگ مکانیکی و خواص الکتریکی پیوندگاه جوزفسون	۹
جدول (۱-۳): سه مرحله از بررسی یک دستگاه	۵۳

فهرست نمودارها:

عنوان	صفحه
نمودار (۱-۱): نمودار ولتاژ بر حسب زمان پیوندگاه جوزفسون	۱۵
نمودار (۲-۱): مشخصه جریان - ولتاژ دو سر پیوندگاه جوزفسون در غیاب افتوخیز	۱۵
نمودار (۳-۱): بیشینه ابرجریان شارشی در پیوندگاه جوزفسون بر حسب میدان مغناطیسی خارجی موازی با صفحه پیوندگاه	۲۰
نمودار (۴-۱): مشخصه جریان - ولتاژ اسکوئید: نمودار الف) برای دامنه کوچک جریان ریزموج و ب) برای دامنه‌های بزرگ است. نمودارهای خطچین نیز مشخصه جریان - ولتاژ در غیاب ریزموج را نشان می‌دهند. [۷]	۲۶
نمودار (۵-۱): مشخصه جریان - ولتاژ پیوندگاه جوزفسون تحت تابش ریزموج در ترازهای انرژی متفاوت	۲۸
نمودار (۱-۲): مشخصه ولتاژ - جریان RF اسکوئید تک پیوندگاهی	۳۴
نمودار (۲-۲): وابستگی جریان بیشینه به شار مغناطیسی کل	۳۶
نمودار (۳-۲): مشخصه جریان - ولتاژ اسکوئید تحت تابش ریزموج	۴۳

- نمودار(۲-۴): طرح سه بعدی از سطح پتانسیل موجی شیبدار منطبق بر دینامیک اسکوئید تحت تابش-----۴۶
- نمودار(۴-۱): مشخصه جریان- ولتاژ برای شارهای مختلف در رژیم بایاس ولتاژ. الف) $\phi'_x = 1/2$
- ب) $\phi'_x = 1/4$ و ج) $\phi'_x = 0$ -----۷۴
- نمودار(۴-۲): دامنه جریان بر حسب پارامتر $a = V_1 / \Phi_0 v$ -----۷۷
- نمودار(۴-۳): مشخصه جریان- ولتاژ اسکوئید در حضور و در غیاب تابش ریزموج-----۸۴
- نمودار(۴-۴): اثر شار اعمالی بر ارتفاع پله اول شاپیرو-----۸۴
- نمودار(۴-۵): نمودار الف) مشخصه جریان- ولتاژ و نمودار ب) بزرگ شده پله اول در نمودار الف) است-----۸۶
- نمودار(۴-۶): مشخصه جریان - ولتاژ با استفاده از رابطه (۴-۹۳)-نمودار ب) مقیاس کوچکتری از نمودار الف) است.-----۸۷
- نمودار(۴-۷): بررسی اثر دامنه ریزموج بر پله اول شاپیرو-----۸۸
- نمودار(۴-۸): بررسی اثر بسامد ریزموج بر پله اول شاپیرو-----۸۸
- نمودار(۴-۹): بررسی اثر دما بر پله‌های شاپیرو-----۸۹
- نمودار(۵-۱): مشخصه جریان- ولتاژ اسکوئید در غیاب و در حضور تابش ریزموج-----۹۶
- نمودار(۵-۲): بررسی اثر دامنه ریزموج بر مشخصه جریان- ولتاژ اسکوئید تحت تابش ریزموج-----۹۶
- نمودار(۵-۳): بررسی اثر بسامد ریزموج بر مشخصه جریان- ولتاژ اسکوئید تحت تابش ریزموج-----۹۷

نمادگذاری

عبارت پارامتر	نام	نماد
	اختلاف فاز ناوردای پیمانه‌ای	θ_i
	القایدگی حلقه	L
	کوانتوم شار	Φ_0
	مقاومت (Ω)	R
	جریان بحرانی پیوندگاه جوزفسون	I_c
	بسامد ریزموج	ω
	دما (K)	T
	ثابت بولتزمن	k_B
$L/4L_F$		α
$2LI/\Phi_0$	پارامتر استتار	β
$2R/\omega L$		ρ
$2\pi k_B T / I_c \Phi_0$	پارامتر نوفه	Γ
$2\pi R I_c / \Phi_0$	بسامد مشخصه اسکوئید	ω_c
$(\Phi_0/2\pi)^2 / k_B T$	القایدگی آستانه	L_F
ω_c / ω		θ
$\pi\Phi_x / \Phi_0$	شار عبوری از حلقه	ϕ_x

فصل اول

پیوندگاه جوزفسون

۱-۱: مقدمه

در سال ۱۹۶۲، جوزفسون 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.

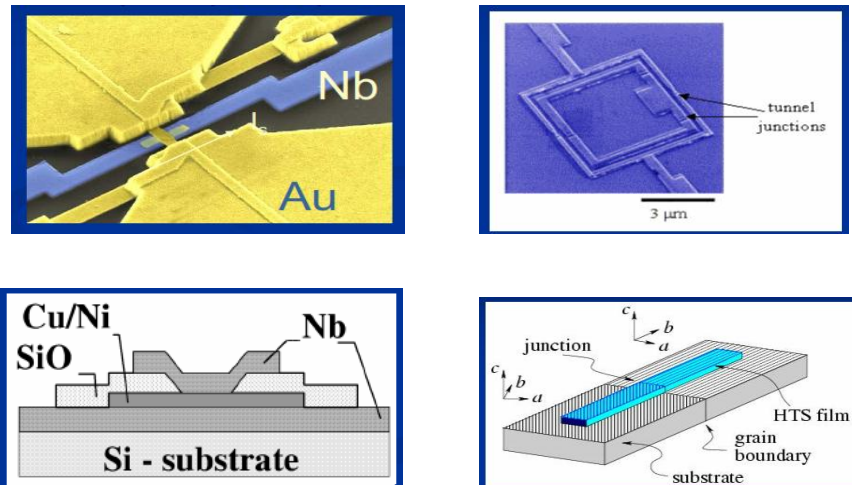
کوتاه زمانی پس از انتشار این مقاله [۲] هر دو اثر به طور تجربی کاملاً به تأیید رسید. افزون بر آن، به زودی معلوم شد که اثرهای جوزفسون نه تنها در پیوندگاه‌های تونلی، بلکه در انواع دیگر پیوندگاه‌ها به نام اتصال‌های ضعیف نیز دیده می‌شوند، که بخش‌های کوتاهی از مدارهای ابررسانا هستند که در آن‌ها از شارش جریان بحرانی به طور چشمگیری جلوگیری می‌شود.

۱-۲: پیوندگاه جوزفسون

پیوندگاه جوزفسون نوعی از یک اتصال ضعیف ابررسانایی است که فیزیک آن ریشه در ماهیت کوانتومی حالت ابررسانشی دارد. وقتی دو ابررسانا با هم تماس داده می‌شوند، بطوریکه جریان بحرانی در ناحیه تماس خیلی کمتر از مشخصه‌های اصلی ابررساناها است، این تماس یک اتصال ضعیف نامیده می‌شود. در واقع هنگامی که دو قطعه از یک ابررسانا، در دمای یکسان به صورت مجزا از یکدیگر قرار دارند، در حالت ابررسانایی الکترون‌های ابررسانایی هر قطعه، تابع موج مخصوص به خود را دارند. از آنجایی که دما و ماده‌ی هر دو قطعه یکسان است، دامنه توابع موج باید یکسان باشد. اما این شرط برای فاز ابررسانایی صادق نیست. تا موقعی که این دو قطعه مجزا باشند وضعیت به همین صورت می‌ماند. اما با برقراری یک اتصال ضعیفی که نتواند در حالت‌های الکترونی دو قطعه تغییر چشمگیری ایجاد کند در عین حال دارای نقش پریشیدگی باشد، تابع موج جدید برای ابررسانا به شکل یکپارچه ظاهر خواهد شد، که می‌توان آن را به عنوان نتیجه‌ای از تداخل توابع موج دو قطعه در نظر گرفت، که دامنه آن همان دامنه توابع ولی فاز همدوسی آن

نتیجه مستقیم تشکیل اتصال ضعیف می‌باشد. یعنی همدوسی فاز در ابررساناهای با اتصال ضعیف برقرار می‌شود [۳].

انواع پیوندگاه‌های جوزفسون در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل (۱-۱): به ترتیب از بالا سمت راست: پیوندگاه SIS و SNS و HTS و SFS [۴].

به ترتیب SISها ساندویچ‌های ابررسانا - عایق - ابررسانا هستند که پیوندگاه‌های تونلی بدون تراکم جریانند، ضخامت لایه‌ی عایق آنها در حدود ۱-۲nm و چگالی جریان بحرانی آنها به مراتب کمتر از چگالی جریان بحرانی در ابررسانای کپه‌ای است. SNSها ساندویچ‌های ابررسانا - فلز عادی - ابررسانا هستند و ضخامت لایه‌ی عادی می‌تواند به بزرگی 10^{-4} cm باشد. توابع موج الکترون‌های ابررسانشی به خاطر تقارب در فلز عادی نفوذ می‌کنند. HTSها مختص به ابررسانای گرم هستند این پیوندگاه‌ها به نام پیوندگاه مرزدانه‌ای (یا دو - بلوری) خوانده می‌شود. به علت طول همدوسی بسیار کوتاه در مواد با T_C بالا ($1 \text{ nm} \sim \xi$)، ناراستی‌های موجود در ساختار بلوری آنها می‌توانند نقش اتصال‌های ضعیف را بازی کنند و SFSها که به پیوندگاه‌های π مربوط می‌شوند [۳ و ۴].

۱-۳: آثار جوزفسون

اثر جوزفسون یک پدیده مکانیک کوانتومی است و هنگامی رخ می‌دهد که دو ابررسانا خیلی