

طراحی و شبیه‌سازی دیود سالیتمانی مبتنی بر پیوند جوزفسون گسسته

آیلار خوشه مهری^۱، علیرضا عرفانیان^۲، فرشید رئیسی^۳

^۱دانشجوی دکتری الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر erfani@mut.ac.ir
^۲دانشیار مجتمع برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر koooshehmehri@mut.ac.ir
^۳دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی raissi@kntu.ac.ir

چکیده

دیود سالیتمانی یک افزاره ابررسانای جوزفسونی است. در این افزاره سالیتمانها و آنتی سالیتمانها نقش حامل های الکتریکی را بر عهده دارند و بر حسب تعداد، سرعت و جهت حرکت آنها در طول پیوند جوزفسون، نقطه کار دیود سالیتمانی تعیین می شود. در این مقاله دیود سالیتمانی مبتنی بر پیوند جوزفسون گسسته پیشنهاد و با طراحی یک دیود سالیتمانی گسسته پدیدار یکسوسازی مشاهده شده است. به این منظور ابتدا رفتار حامل ها در یک پیوند گسسته مورد بررسی قرار گرفته و سپس افزاره پیشنهادی بر اساس معادله سینوسی گوردن گسسته مدل سازی و طبق آن پارامترهای طراحی پیوند تعیین می شود. با بررسی روابط حاکم بر پیوندهای جوزفسون نشان داده می شود که کمینه میدان مغناطیسی لازم برای تولید حامل و نیز ابعاد قطعات گسسته نسبت به قطعات پیوسته متناظر تا چندین برابر کاهش دارد. همچنین نتایج شبیه سازی ها نشان می دهد که با توجه به قابلیت تنظیم مشخصه دیود بر اساس طراحی پارامتر گسستگی و همچنین سادگی ساخت افزاره های پیچیده مبتنی بر پیوند گسسته، این ساختار می تواند برای استفاده در ادوات الکترونیک ابررسانایی مانند ترانزیستور سالیتمانی و فرستنده فرکانس بالای ابررسانا پیشنهاد شود.

کلیدواژه

پیوند جوزفسون، دیود سالیتمانی، ابررسانایی، پیوند گسسته، معادله سینوسی گوردن.

مقدمه

می شود [۵]، [۶]. معادله سینوسی گوردن^۴ پیوسته به عنوان یک مدل برای پیوند جوزفسون بلند شناخته شده است و کوانتوم شار مغناطیسی که با نام فلاکسون و یا همان سالیتمان شناخته می شود، یک پاسخ برای آن معادله است [۷]، [۸]. حرکت فلاکسون ها درون پیوند یک اختلاف پتانسیل ایجاد کرده و نقشی مانند الکترون در افزاره های نیمه رسانا را ایفا می کند [۹]. همچنین معادله سینوسی گوردن، دینامیک فلاکسون ها را در پیوند تحت شرایط بایاس مختلف و ساختار و هندسه مختلف توصیف می نماید. بنابراین، شبیه سازی های عددی و تحلیلی انواع ساختارهای مبتنی بر پیوند جوزفسون امکان پذیر است [۷]، [۸].

پیوندهای جوزفسون با توجه به اتلاف بسیار کم و سرعت بالای حامل ها، می تواند در حوزه الکترونیک دیجیتال و همچنین در حوزه حسگرهای بسیار حساس میدان مغناطیسی به عنوان حسگر سیگنال های مغناطیسی قلب و مغز در زمینه پزشکی و

از زمان پیش بینی تئوری اثر جوزفسون توسط برایان دیوید جوزفسون^۱ [۱] و اولین مشاهده عملی آن توسط فیلیپ اندرسون^۲ و جان راول^۳ فیزیک پیوندهای جوزفسون به طور گسترده مورد تحقیق، شبیه سازی و آزمون قرار گرفته است. پیوندهای جوزفسون با توجه به خواص فیزیک پایه منحصر به فرد و طیف گسترده ای از کاربردهای موجود و آتی همواره توجه زیادی را به خود جلب نموده است [۲]–[۴]. از نقطه نظر فیزیک پایه، پیوندهای جوزفسون کارایی ویژه ای دارند زیرا خواص مکانیک کوانتومی پیوند از طریق پارامترهای ماکروسکوپی ظاهر می شود. اختلاف فاز بین دو تابع موجی که الکترون های ابررسانشی در هر الکتروود را توصیف می کنند توسط جریان عبوری از پیوند و افت ولتاژ دوسر پیوند ظاهر

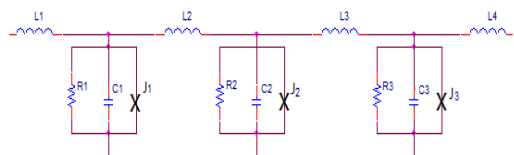
^۱ Brian David Josephson^۲ Philip Anderson^۳ John Rowell^۴ Sine Gordon equation (SGE)

پایه سازی چندراهی های جوزفسونی با این نوع پیوندها منجر به کاهش تعداد پشته ها^۷ و سادگی فناوری ساخت خواهد بود.

در مقاله پیش رو ابتدا ساختار پیوند گسسته و معادله حاکم بر آن بر اساس مدل سینوسی گوردن گسسته (DSGM) تشریح و سپس جایابی و دینامیک سالیتمانها در این نوع پیوند بررسی می شود. همچنین در محیط نرم افزار متلب پیوند جوزفسون گسسته تحت جریانهای کنترلی مختلف شبیه سازی شده و منحنی مشخصه آن استخراج خواهد شد. در بخش بعدی ساختار افزاره پیشنهادی با عنوان دیود سالیتمانی گسسته معرفی می گردد و با بهره گیری از DSGM، منحنی مشخصه یک دیود سالیتمانی گسسته با قابلیت یکسوسازی ارائه می شود. سپس با بررسی روابط حاکم بر پیوندهای پیوسته و گسسته نشان داده می شود که ابعاد و توان مصرفی دیود در ساختار گسسته نسبت به ساختار پیوسته کاهش می یابد. در نهایت جمع بندی بحث در قالب نتیجه گیری ارائه خواهد شد.

ساختار پیوند جوزفسون گسسته و مدلسازی آن بر اساس معادله سینوسی گوردن گسسته

پیوند جوزفسون پایه، واحد کوچکی از پیوند است که در مدل الکتریکی با یک پیوند ایده آل، یک خازن و یک مقاومت مدل می شود. هر یک از این پیوندهای پایه با خودالقای به یکدیگر کوپل می شوند [۱۶]، [۲۱]–[۲۳] و مطابق شکل ۱ مدل الکتریکی یک پیوند جوزفسون طولی را می سازند.



شکل ۱. مدل الکتریکی پیوند جوزفسون طولی

همچنین مدل مکانیکی یک پیوند جوزفسون طولی، آونگهایی به جرم m و طول l است که مطابق شکل ۲ توسط فنرهایی با ثابت سختی فنر k به یکدیگر متصل شده اند. در این ساختار چرخش هر آونگ به دور خود از طریق فنر کوپلاژ سبب چرخش آونگ کناری شده و به همین ترتیب چرخش آونگها در طول خط منتشر می شود [۸]، [۲۴].

هنگامی که در طول N پیوند کوتاه یک دوره تناوب کامل ایجاد شود به این معنی است که یک سالیتمان N پیوند را در بر گرفته

مطالعات زمین شناسی و آزمونهای غیرمخرب نیز به کار رود. کاربردهای مهم دیگر افزاره های جوزفسونی، نوسان سازهای محلی، تقویت کننده ها و همچنین آشکارسازی سیگنالهای بسیار ضعیف است که امواج میلی متری و زیر میلی متری را نیز پوشش می دهد.

دیود سالیتمانی^۵ به عنوان افزاره ی پایه ی ادوات فلاکسونیک جوزفسونی^۶ توسط فرشید رئیسی طراحی و ساخته شد و ترانزیستور سالیتمانی که متشکل از دیود سالیتمانی است، توسط ایشان معرفی گردید [۱۰]، [۱۱]. پیوند جوزفسون هسته اصلی یک دیود سالیتمانی می باشد و نحوه طراحی و ساخت پیوند جوزفسون، ساختار و مشخصات دیود سالیتمانی و ترانزیستور سالیتمانی را تحت تأثیر قرار می دهد. در این مقاله ایده دیود سالیتمانی مبتنی بر پیوند جوزفسون گسسته ارائه و با طراحی یک دیود سالیتمانی گسسته پدیده یکسوسازی مشاهده شده است.

تا اواخر قرن ۲۰م در ساختارهای متنوع ابرسانایی، پیوندهای پیوسته مورد استفاده قرار می گرفت و مشخصات الکتریکی و کاربردهای فیزیکی آن مورد بررسی قرار گرفته است [۱۲]، [۱۳]. از اواخر قرن بیستم پیوندهای گسسته معرفی شدند؛ شبکه هایی شامل پیوندهای جوزفسون کوچک که با باریکه هایی از جنس ابرسانا به هم متصل شده اند [۱۲]، [۱۴]. برای مدلسازی این آرایه تک بعدی از پیوندهای جوزفسون کوچک، شبکه سینوسی گوردن گسسته (مدل فرنکل - کنترولا) استفاده می شود. همچنین دینامیک شار مغناطیسی در یک پیوند گسسته می تواند توسط یک حالت گسسته از معادله سینوسی گوردن بیان شود [۷]، [۱۵]–[۱۷]. اخیراً بررسی های بسیاری بر روی پیوند گسسته انجام گرفته است [۱۸]–[۲۰]. با توجه به اینکه در این ساختار، خودالقای میان هر دو پیوند کوتاه همراه با ظرفیت خازنی، طول معادل پیوند پایه را نسبت به حالت پیوسته کاهش می دهد یکی از مزایای این چنین پیوندهایی امکان کوچک سازی افزاره های مبتنی بر این پیوندها در مقایسه با پیوند بلند است [۲۱]. بر اساس همین اصل پیشینه سرعت انتشار موج الکترومغناطیس در طول پیوند گسسته بیش از پیوند پیوسته مشابه خواهد بود. این مسئله فرکانس عملکرد پیوند گسسته را نسبت به پیوند بلند افزایش می دهد [۷]. از طرفی به علت ساختار شبکه ای پیوند گسسته،

^۵ Stacks

^۶ Josephson Fluxonic Diode (JFD)

^۷ Discrete Sine Gordon Model (DSGM)

^۸ Josephson Fluxonic Device

این ساختار بسیار دشوار است. باید به دنبال طرح دیگری بود که با روش های عملی به ساختار دقیق و تکرارپذیر برسد.

یک پیشنهاد مناسب می تواند استفاده از یک بعد دیگر برای افزایش اندازه خودالقا باشد. شکل ۴ نمای ساده ای از یک پیوند گسسته را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود در میان هر دو پیوند جوزفسون با استفاده از بُعد دوم، فاصله قابل توجهی بین دو الکتروود ایجاد می شود که منجر به افزایش اندازه خودالقا در این نواحی خواهد شد.



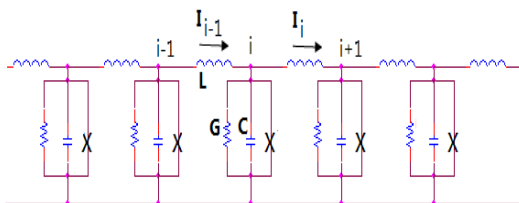
شکل ۴. یک زنجیره از پیوندهای جوزفسون کوچک با ایجاد کوپلاژ ضعیف در بُعد دیگر

در پیوند گسسته اندازه خودالقا طبق رابطه زیر به فاصله پیوندها از یکدیگر وابسته است.

$$L = K\mu_0 p \quad (1)$$

در رابطه (۱) L اندازه خودالقای کوپلاژ در پیوند گسسته، μ_0 ضریب نفوذپذیری میدان مغناطیسی، p ثابت شبکه پیوند گسسته و وابسته به ابعاد شبکه و K ضریب ثابتی است که برای پیوندهای جوزفسون مورد نظر ما حدود ۰٫۸ تا ۱٫۱ است [۲۸].

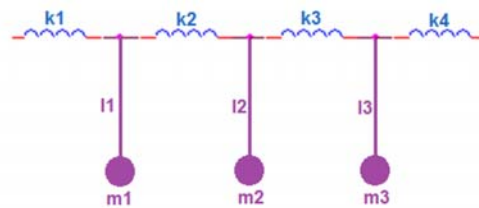
در ساختار یک پیوند گسسته یک سری از پیوندهای جوزفسون کوچک را در نظر بگیرید که با باریکه هایی از جنس ابررسانا به یکدیگر متصل شده اند. فرض می کنیم پیوندهای مورد نظر به اندازه کافی کوچک هستند که بخش محسوسی از یک کوانتای شار مغناطیسی در آنها جای نگیرد و همچنین برای سادگی فرض می کنیم که مشخصه های الکتریکی از جمله جریان بحرانی (I_C)، ظرفیت خازنی (C)، هدایت الکتریکی (G)، و ضریب خودالقا (L) برای تمامی پیوندهای کوتاه که در شکل ۵ قابل مشاهده است یکسانند.



شکل ۵. مدار معادل الکتریکی پیوند گسسته

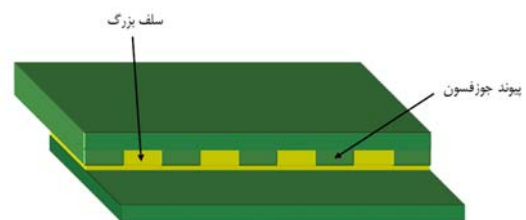
معادله حاکم بر این ساختار، طبق نامگذاری انجام شده برای گره ها و جریان عبوری از هر شاخه در شکل ۵ استخراج شده

است [۲۵]. در مدل الکتریکی و مکانیکی پیوند به ترتیب اندوکتانس خودالقاها یا ضریب سختی فنرها میزان کوپلاژ واحدها را به یکدیگر تعیین می کند و اختلاف فاز میان هر دو واحد وابسته به میزان کوپلاژ آنهاست [۲۱]، [۲۲]. به عبارت دیگر این خودالقاها یا فنرها می تواند آنقدر کوچک باشد که به حالت اتصال کوتاه نزدیک شود و اختلاف فاز قابل توجهی بین هر دو واحد ایجاد نشود. در این حالت برای ایجاد اختلاف فاز 2π (که برای تولید سالیتان لازم است)، پیوند جوزفسونی با طول بسیار بلند شامل پیوندهای پایه بسیار زیاد نیاز است.



شکل ۲. مدل مکانیکی پیوند جوزفسون طویل

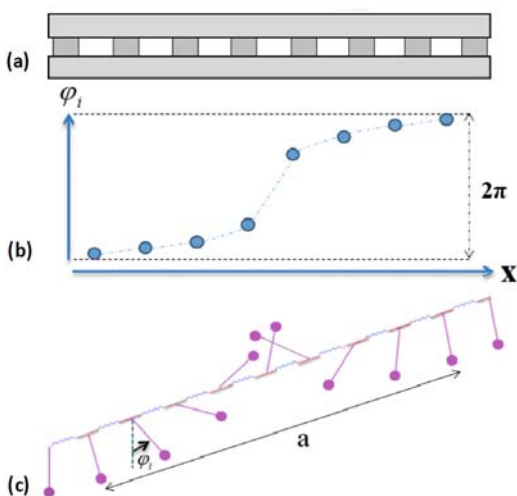
به این ترتیب برای اینکه خط پیوند تعداد بیشتری سالیتان را در خود جای دهد، باید کوپلاژ هر پیوند با پیوند کناری ضعیف تر شود به عبارت دیگر اندوکتانس خودالقا یا ضریب سختی فنر بین هر دو پیوند پایه بزرگتر شود. حال فرض کنید که اندوکتانس خودالقاها یا ضریب سختی فنرها به حدی بزرگ باشد که برای مثال بین هر دو سلول اختلاف فاز 2π فراهم شود این بدان معنی خواهد بود که در هر دو سلول مجاور یک سالیتان می تواند وجود داشته باشد. اندوکتانس خودالقا در مدل ارائه شده وابسته به d ضخامت اکسید میانی در پیوند جوزفسون است. البته این در حالی است که با افزایش بیش از حد ضخامت عایق میانی، خاصیت جوزفسونی پیوند از بین می رود [۲۶]، [۲۷].



شکل ۳. یک زنجیره از پیوندهای جوزفسون کوچک با کوپلاژ ضعیف

اگر پیوند مطابق شکل ۳ ساخته شود خودالقاها کوپلاژ بین پیوندها افزایش خواهند یافت. در این حالت خاصیت جوزفسونی در محلهایی که با پیوند جوزفسون مشخص شده است حفظ می شود و در محلهایی که با سلف بزرگ نامگذاری شده است کوپلاژ ضعیف ایجاد خواهد شد. اما ساخت پیوندی با

مقدار $1/\Lambda_r$ بزرگتر از ۱ شود، یک کوانتای شار تقریباً در یک حلقه شامل ۲ پیوند جای می‌گیرد [۳۱].



شکل ۶. (a) یک پیوند جوزفسون گسسته شامل یک رشته پیوند جوزفسون کوتاه موازی در یک بعد، (b) اختلاف فاز برای یک سالیسان با مدل سینوسی گردن گسسته، (c) مدل مکانیکی: آونگ‌هایی که با اتصالات فنی به یکدیگر کوپل شده‌اند.

طراحی دیود سالیسانی گسسته

چنانکه در مقدمه آمده است پیوندهای گسسته از اواخر قرن بیستم معرفی شدند [۱۲] و به خصوص در سال‌های اخیر مورد مطالعه فراوان و استفاده بسیار قرار گرفته‌اند [۳۲]–[۳۹]. در این مقاله پیوند جوزفسون گسسته به عنوان هسته اصلی دیود سالیسانی پیشنهاد، طراحی و شبیه‌سازی شده است.

Λ_r یک پارامتر مهم در پیوند گسسته یک بعدی است که میزان گسستگی سیستم و اندازه سالیسان را تعیین می‌کند. به ازای $\Lambda_r < 1$ سالیسان‌ها جایگزیده می‌شوند و به ازای $\Lambda_r \geq 1$ سالیسان‌ها در سلول‌های مختلف منتشر می‌شوند [۳۱]. میزان گسستگی یک پیوند گسسته برای طراحی یک دیود سالیسانی بسیار حائز اهمیت است. اندازه چگالی جریان بحرانی پیوند، ثابت شبکه پیوند گسسته و ابعاد هر پیوند کوتاه طوری تنظیم شده است که پارامتر گسستگی در محدوده مناسب قرار گیرد. ثابت شبکه پیوند یکی از مهمترین پارامترهای طراحی این افزاره است. این پارامتر مقدار خودالقایی را که بین هر دو پیوند کوتاه قرار می‌گیرد تعیین می‌کند و مقدار آن وابسته به محدودیت‌های لیتوگرافی^۹ نیز می‌باشد [۲۱]، [۲۲]، [۳۱]. از

است. طبق مدار معادل ارائه شده اختلاف فاز φ_{i-1} ، φ_i و φ_{i+1} به مقادیر زیر محدود می‌شود:

$$\varphi_i - \varphi_{i+1} = 2\pi\Phi_{i,i+1}/\Phi_0 = 2\pi LI_i/\Phi_0 \quad (2)$$

$$\varphi_{i-1} - \varphi_i = 2\pi\Phi_{i-1,i}/\Phi_0 = 2\pi LI_{i-1}/\Phi_0 \quad (3)$$

دو پیوند $\Phi_{i-1,i}$ و $\Phi_{i,i+1}$ شار مغناطیسی گره در حلقه‌های مستقل شامل دو پیوند است و Φ_0 کوانتای شار است. به این ترتیب معادلات برای I_i و $\Phi_{i,i+1}$ به شکل زیر خواهد شد:

$$I_i = I_{i-1} - \frac{\Phi_0}{2\pi} C \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2} - \frac{\Phi_0}{2\pi} G \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} - I_C \sin(\varphi_i) \quad (4)$$

معادله دیفرانسیل مشتق جزئی برای φ_{i-1} ، φ_i و φ_{i+1} را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{\Phi_0}{2\pi LI_C} (\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}) - \frac{C\Phi_0}{2\pi I_C} \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2} - \frac{G\Phi_0}{2\pi I_C} \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = \sin(\varphi_i) \quad (5)$$

در حالیکه واحدهای زمانی τ_r بوده و جریان بایاس I_B کمتر از جریان بحرانی به تمام پیوندها اعمال شود [۲۳].

$$\tau_r = (C\Phi_0/2\pi I_C)^{0.5} \quad (6)$$

معادله ۵ به صورت زیر قابل بازنویسی خواهد بود.

$$\frac{\Phi_0}{2\pi LI_C} (\varphi_{i+1} - 2\varphi_i + \varphi_{i-1}) - \frac{\partial^2 \varphi_i}{\partial t^2} - \Gamma \frac{\partial \varphi_i}{\partial t} = \sin(\varphi_i) - \gamma_i \quad (7)$$

در حالیکه Γ ضریب دمپینگ و γ_i جریان بایاس نرمالیزه برای پیوند گسسته به صورت زیر تعریف می‌شوند [۲۹]، [۳۰]:

$$\Gamma = G(\Phi_0/2\pi CI_C)^{0.5} \quad (8)$$

$$\gamma_i = I_{Bi}/I_C \quad (9)$$

$$1/\Lambda_r = (2\pi LI_C/\Phi_0)^{0.5} \quad (10)$$

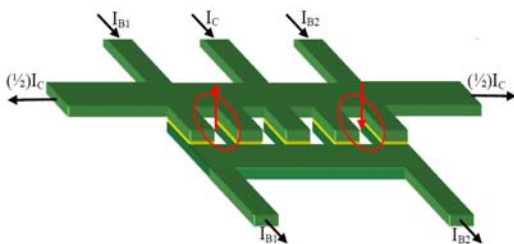
$1/\Lambda_r$ را پارامتر گسستگی می‌نامند [۱۶]، [۳۱].

جایابی یک سالیسان در طول یک پیوند گسسته را می‌توان به صورت شکل ۶ نمایش داد. با فرض $\gamma_i = 0$ و با محاسبات عددی معادله بالا، نتایج حاصل برای یک کوانتای شار به صورت شکل ۶ خواهد بود [۲۵]. دایره‌های توپر در شکل اختلاف فاز هر پیوند مستقل را در مسیر پیوند گسسته نمایش می‌دهد. با افزایش مقدار $1/\Lambda_r$ ، تعداد پیوندهایی که یک کوانتای شار در آن قرار می‌گیرد کاهش می‌یابد. هنگامی که

^۹Lithography

ديود ساليستاني گسسته شامل يك پيوند گسسته و مسيره‌هاي است كه براي اعمال جريان كنترلي و جريان باياس طراحی مي‌شود. با اعمال جريان كنترلي I_C شكل مطابق شكل ۷ در يك نيمه از پيوند، ساليستان و در نيمه ديگر، آنتي‌ساليستان توليد مي‌شود. در اين حالت با باياس افزاره، ساليستان‌ها و آنتي‌ساليستان‌ها در خلاف جهت يكديگر در طول پيوند حرکت مي‌كنند. هنگامي كه حامل‌ها از دو سوي پيوند به هم نزديك مي‌شوند دو سر پيوند ولتاژ افت مي‌كند و ديود در باياس مستقيم قرار مي‌گيرد و هنگامي كه حامل‌ها از يكديگر دور مي‌شوند و به دو انتهاي پيوند مي‌روند ولتاژ دو سر پيوند صفر خواهد بود و در اين حالت ديود در باياس معكوس قرار گرفته‌است [۱۰]، [۴۰].

ديود ساليستاني مورد بررسي، مبتني بر پيوند گسسته بوده و هندسه پيوند و ابعاد پنجره‌ها نقش اساسي در تعيين مشخصه‌هاي ديودي دارند. شماتيك ساده‌اي از يك ديود ساليستاني مبتني بر يك پيوند گسسته در شكل ۷ ارائه شده‌است. مسيره‌هاي جريان باياس با I_{B1} و I_{B2} و مسير جريان كنترلي با I_C در شكل ۷ مشخص شده‌است.



شكل ۷. طرح يك ديود ساليستاني با پيوند گسسته و نحوه اعمال جريان‌هاي باياس و كنترل

چنانكه در شكل ۷ قابل مشاهده است ديود ساليستاني گسسته شامل يك پيوند گسسته است و مسيره‌هاي جريان كنترلي و باياس مشابه نمونه پيوسته مي‌باشد. آرايه‌هاي پيوندهاي جوزفسون كوچك با باياس موازي با شبكه سينوسي‌گوردن گسسته مدل مي‌شود و ديناميك حامل‌ها در ديود ساليستاني گسسته با استفاده از معادله سينوسي گوردن بيان شود.

شبيه‌سازي پيوند و ديود ساليستاني گسسته

به منظور بررسي رفتار پيوند گسسته و ديود پيشنهادهي مبتني بر اين پيوند، شبيه‌سازي‌ها بر اساس معادلات سينوسي‌گوردن گسسته و در محيط متلب انجام گرفته‌است. مشخصات كامل پيوند طراحی شده و مورد استفاده در شبيه‌سازي در جدول ۱ آمده‌است. ابتدا منحنی مشخصه پيوند جوزفسون گسسته بدون حضور ساليستان‌ها در خط پيوند محاسبه شد و در ادامه با

ديگر پارامترهاي طراحی پيوند، ظرفيت خازني و خودالقاي ميان هر دو پيوند پايه است كه سرعت انتشار امواج الكترومغناطيس در خط پيوند را تعيين مي‌كند [۳۱].

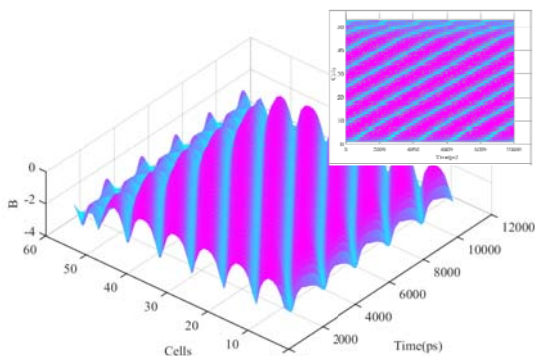
با توجه به كارکرد پيوند در ديود ساليستاني، نحوه انتشار ساليستان‌ها در طول پيوند و ديگر پارامترهاي كه پيش‌تر ذكر شد از جمله جريان بحراني پيوند و پارامتر گسستگی به نحوی طراحی شدند كه از سویی هر ساليستان در يك جفت پيوند جای گیرد و از سوي ديگر با توجه به نرخ اكسيداسيون نايوبوم به عنوان الكترومدتداول پيوندهاي جوزفسون از نظر عملي قابل پياده‌سازي باشد [۲۷]. برای استفاده از پيوند گسسته به جای پيوند پيوسته در ساختار ديود ساليستاني كه در اين مقاله مورد بررسي قرار گرفته علاوه بر منحنی مشخصه پيوند جوزفسون طوليل، پديده فلاكس‌فلو^{۱۰} و نحوه وابستگی اين پديده به تغييرات باياس و كنترل پيوند كه برای بروز خاصيت ديودي در اين ساختار الزامي است [۴۰]، [۴۱] در طراحی و شبيه‌سازي مورد توجه بوده‌است. طول نهايي پيوند با توجه به فضای مورد نیاز برای ناحیه تخلیه، منطقه توليد ساليستان‌ها و منطقه توليد آنتي‌ساليستان‌ها محاسبه و با در نظر گرفتن محدوديت‌هاي ليتوگرافي در مجموع ديود ساليستاني گسسته شامل ۵۴ سلول طراحی شد. با شبيه‌سازي‌هاي انجام گرفته و محاسبه موازي پارامترهاي موثر، مشخصات پيوند متناسب با ساختار ديود ساليستاني مطابق جدول ۱ بدست آمده‌است.

جدول ۱. پارامترهاي پيوند گسسته

پارامتر	مقدار	توضیح
N	54	تعداد پيوندهاي کوتاه
A	$9 \mu m^2$	سطح مقطع هر پيوند کوتاه
P	$10 \mu m$	ثابت شبكه پيوند گسسته
I_C	$10 \mu A$	جريان بحراني هر پيوند کوتاه
C	$300 fF$	ظرفيت خازني هر پيوند کوتاه
R	100Ω	مقاومت الكتريكي هر پيوند کوتاه
L_S	$25 pH$	خودالقاي ميان هر دو پيوند کوتاه
$a = 1/\Lambda_J$	1.0918	ضريب گسستگی
Γ	0.1048	ضريب دمپینگ

Flux Flow^{۱۰}

وارد خط پیوند می‌شود. به این ترتیب چگالی شار مغناطیسی B در درون پیوند یکنواخت نخواهد بود و شار عبوری از هر کوانتای شار Φ_0 است. با اعمال جریان بایاس، بر روی هر سالیتهان نیروی لورنتس^{۱۲} وجود خواهد داشت که بر جهت شار مغناطیسی و جریان بایاس عمود است و سالیتهانها تحت تأثیر این نیرو در طول خط پیوند حرکت می‌کنند.



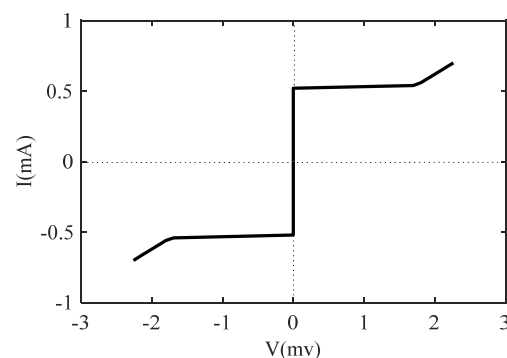
شکل ۱۰. چگالی شار مغناطیسی در خط پیوند گسسته در ساختار VFT. جریان کنترلی ۰/۰۵mA و ۱۲ns.

در شکل ۱۰ شار مغناطیسی در طول خط پیوندی شامل ۵۴ پیوند و برای مدت ۱۲ نانو ثانیه نمایش داده شده است. مطابق شکل با عبور جریان کنترلی و اعمال میدان مغناطیسی به پیوند سالیتهانها در طول خط پیوند تولید و از لحظه $t = 0$ با اعمال جریان بایاس سالیتهانهای تولید شده در جهت مشخصی در طول خط پیوند حرکت می‌کند و از انتهای خط خارج می‌شود. مطابق شکل ۱۰ در هر لحظه، هر دوره تناوب چگالی شار مغناطیسی معادل یک سالیتهان در خط می‌باشد و تعداد آنها وابسته به مقدار میدان اعمالی به پیوند می‌باشد و جریان بایاس سرعت جابه‌جایی آنها در طول خط پیوند را تعیین می‌کند. منحنی مشخصه I-V این پیوند تحت تأثیر جریان کنترلی و با اعمال جریان بایاس در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. افزایش جریان بایاس باعث افزایش سرعت انتشار حاملها در طول پیوند و در نتیجه افزایش ولتاژ دوسر پیوند می‌شود و پله‌های ولتاژی فلاکس‌فلو در منحنی ایجاد شده است. این پدیده در پیوند گسسته به ازای جریانهای کنترلی مختلف نیز بررسی شد و مطابق شکل ۱۱ در پیوند گسسته با افزایش جریان کنترلی، مقادیر ولتاژ بیشتری دو سر پیوند افت می‌کند اندازه پله‌های ولتاژی افزایش می‌یابد. این رفتار در پیوند جوزفسون پیوسته و گسسته مشابه است. در واقع افزایش جریان کنترلی موجب افزایش تعداد حاملها در طول پیوند گسسته و در نتیجه افت ولتاژ بیشتر در جریانهای بایاس

اعمال جریان کنترلی پله‌های ولتاژی در منحنی مشخصه پیوند مشاهده شد. سپس پیوند مورد نظر در ساختار دیودی و با اعمال جریانهای کنترلی در شرایط مورد نظر بررسی شد.

پیوند جوزفسون گسسته بدون حضور سالیتهان

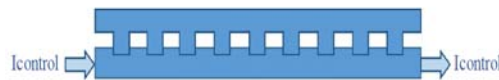
پیوند جوزفسون گسسته با مشخصاتی که در جدول ۱ آمده است تحت جریان بایاس قرار گرفت و منحنی مشخصه مطابق شکل ۸ بدست آمد. مطابق شکل ۸ بدون اعمال جریان کنترلی، با افزایش جریان بایاس افت ولتاژی دو سر پیوند مشاهده نمی‌شود و با رسیدن جریان بایاس به مقدار بحرانی به حالت ولتاژی پرش می‌کند، در واقع رفتار پیوند گسسته در این حالت مشابه پیوند جوزفسون پیوسته است [۱].



شکل ۸. منحنی جریان بایاس - ولتاژ دو سر پیوند جوزفسون گسسته شامل ۵۴ پیوند کوتاه بدون اعمال جریان کنترلی. با اعمال جریان بایاس تا جریان بحرانی پیوند (۰/۵۴mA) ولتاژی دو سر پیوند افت نمی‌کند و با افزایش بیشتر جریان بایاس، منحنی به حالت ولتاژی پرش می‌کند.

پیوند جوزفسون گسسته با اعمال جریان کنترلی و حضور سالیتهان در خط پیوند

پیوند جوزفسون گسسته با مشخصاتی که در جدول ۱ آمده است پس از اعمال جریان کنترلی، تحت جریان بایاس قرار گرفت. نحوه اعمال جریان کنترلی در این حالت مطابق با ساختار^{۱۱} VFT بوده است که در شکل ۹ آمده است.



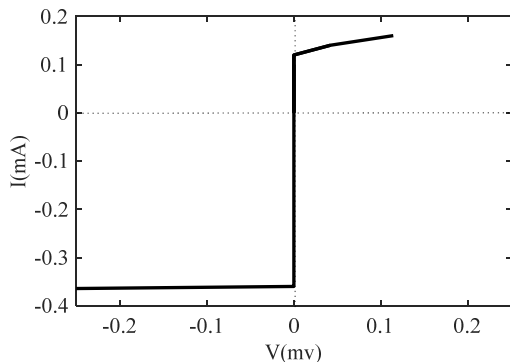
شکل ۹. نحوه جریان دهی به خطوط کنترلی. جریان کنترلی به صورت نقطه ای از سمت چپ پیوند وارد و به همین صورت از سمت چپ خارج می‌شود.

در این حالت با اعمال جریان کنترلی، پیوند تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد و شار مغناطیسی به صورت کوانتیده

^{۱۲} Lorentz Force

^{۱۱} Vortex Flow Transistor

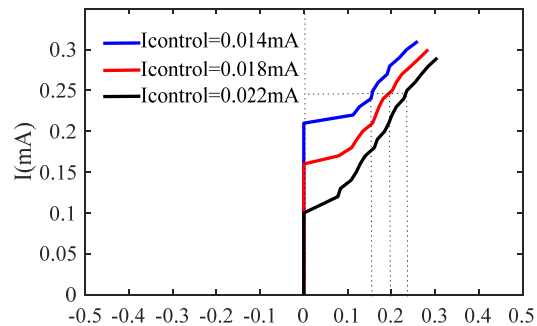
دیود سالیسانی به این علت است که در اطراف پیوند جوزفسون مسیره‌های جریانی به صورتی در نظر گرفته می‌شود که دو نوع حامل (سالیسان و آنتی‌سالیسان) به طور متقارن در دو سوی پیوند ایجاد شوند. البته تعداد هر نوع حامل مستقل از دیگری و با تعیین مقدار جریان در هر مسیر قابل تنظیم است. اگر جهت جریان بایاس طوری انتخاب شود که حامل‌ها به هم نزدیک شوند، دیود در بایاس مستقیم قرار گرفته است و ولتاژی دو سر پیوند افت خواهد کرد. در صورتی که جهت جریان بایاس و یا کنترل تغییر کند حامل‌های تولید شده در کناره‌های پیوند می‌خکوب شده، تغییرات فاز نسبت به زمان صفر می‌شود و ولتاژی دوسر پیوند افت نمی‌کند و در این حالت پیوند به صورت معکوس بایاس شده است [۱۰]، [۴۰]، [۴۱]. این رفتار در منحنی مشخصه دیود سالیسانی گسسته که در شکل ۱۳ آمده است قابل مشاهده است.



شکل ۱۳. منحنی جریان بایاس-ولتاژ دو سر پیوند جوزفسون گسسته شامل ۵۴ پیوند کوتاه با اعمال جریان کنترلی دیودی ۰/۰۴ mA با اعمال جریان بایاس منحنی مشخصه در جریانی حدود ۰/۱۴ mA به حالت ولتاژی پرش می‌کند و از طرفی در بایاس معکوس در جریان بایاس معادل ۰/۳۸ mA به حالت ولتاژی پرش کرده و وارد ناحیه شکست خود می‌شود.

با تغییر جهت جریان بایاس افزاره وارد بایاس معکوس می‌شود که در منحنی مشخصه ارائه شده معادل جریان‌های بایاس منفی خواهد بود. بدیهی است که پیوند تحت جریان بایاس ابتدایی در بایاس مستقیم قرار می‌گیرد. عدم تقارن در بایاس مستقیم و معکوس این افزاره در شکل ۱۳ قابل مشاهده است. چنانکه در شکل ۱۴ قابل مشاهده است در منحنی مشخصه پیوند جوزفسون گسسته با ساختار VFT با اعمال جریان کنترلی سرتاسری ۰/۰۲ میلی‌آمپر، جریان آستانه ولتاژ صفر در جریان‌های مثبت و منفی به طور متقارن به مقدار حدود ۱۳۰ میلی‌آمپر کاهش یافته است و در منحنی مشخصه دیود سالیسانی گسسته تحت جریان کنترلی با مقدار متناظر، عدم تقارن و خاصیت یکسوسازی آشکار است. به طوری که در بایاس معکوس جریان آستانه در حدود ۰/۳۸ میلی‌آمپر است.

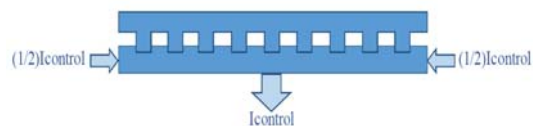
یکسان می‌شود. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که مقدار ولتاژ دوسر پیوند در حالت فلاکس‌فلو در پیوند گسسته نیز مانند پیوند بلند به مقدار جریان کنترلی وابسته است. به این ترتیب وجود پدیده فلاکس‌فلو به عنوان شرط لازم برای استفاده از پیوند گسسته در ساختار دیود سالیسانی برقرار است.



شکل ۱۱. منحنی جریان بایاس-ولتاژ دو سر پیوند جوزفسون گسسته شامل ۵۴ پیوند کوتاه در ساختار VFT. به ازای جریان‌های کنترلی مختلف که با افزایش جریان کنترلی ولتاژ دو سر پیوند افزایش یافته است.

دیود سالیسانی گسسته^{۱۳}

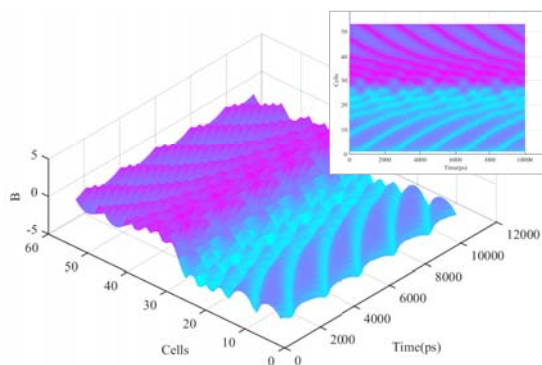
در این مرحله رفتار پیوند گسسته در معرض جریان کنترلی دیودی بررسی شده است. در واقع با مشاهدات صورت گرفته در قسمت قبل و ایجاد پله‌های ولتاژی فلاکس‌فلو، ایده دیود سالیسانی گسسته قوت بیشتری گرفت اما رفتار سالیسان‌ها و آنتی‌سالیسان‌ها در هنگام برخورد به یکدیگر در وسط پیوند باید بررسی می‌شد. پیوند جوزفسون گسسته که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است، پس از اعمال جریان کنترلی دیودی (Tشکل) تحت جریان بایاس قرار گرفت.



شکل ۱۲. نحوه جریان دهی به خطوط کنترلی. نیمی از جریان کنترلی به صورت نقطه‌ای از سمت راست پیوند وارد و نیمی از آن به همین صورت از سمت چپ وارد می‌شود و مجموع جریان از چند سلول میانی خارج می‌شود.

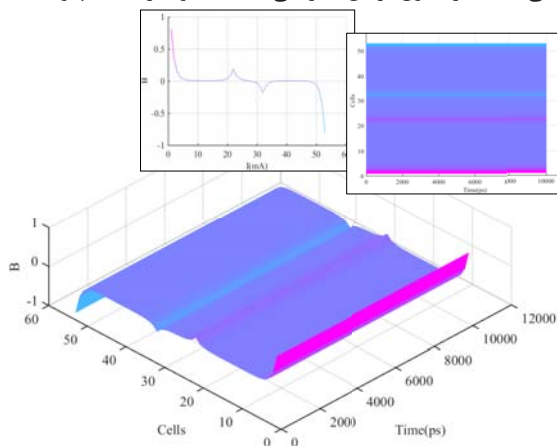
مطابق شکل ۱۲ برای اعمال جریان کنترلی دیودی به پیوند گسسته نیمی از جریان کنترلی از سمت راست پیوند و نیمی از جریان کنترلی از سمت چپ پیوند وارد می‌شود و مجموع این جریان از میان پیوند خارج می‌شود. اما مسیر خروج جریان باید از تعدادی سلول در میان پیوند طراحی شود به طوری که مجموع جریان عبوری (بایاس و کنترل) از هیچ یک از سلول‌ها به جریان بحرانی پیوند نرسد. این نحوه جریاندی در ساختار

^{۱۳} Discrete Josephson Fluxonic Diode (DJFD)



شکل ۱۶. چگالی شار مغناطیسی در خط پیوند گسسته در بایاس مستقیم دیود سالیتمانی گسسته. جریان کنترلی 0.4 mA و 12 ns .

از سوی دیگر در ناحیه‌ای که منحنی مشخصه در بایاس معکوس قرار دارد اکثر حامل‌ها از خط پیوند خارج و تعداد باقی‌مانده در طول زمان حرکتی نداشته و در خط پیوند



شکل ۱۷. نمایش میدان مغناطیسی در پیوند معادل با بایاس معکوس دیود سالیتمانی گسسته، جریان کنترلی 0.4 mA و 12 ns .

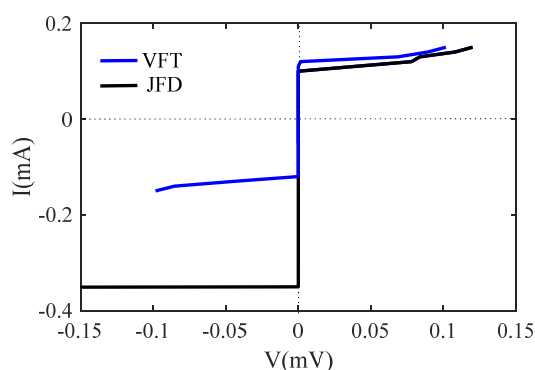
میخکوب شوند. مطابق شکل ۱۷ که مربوط به رفتار میدان مغناطیسی در طول پیوند در ناحیه بایاس معکوس دیود سالیتمانی گسسته می‌باشد، سالیتمان‌های محدودی که در خط مانده‌اند با پیشروی در نمودار زمان حرکتی نداشته و در جای خود میخکوب شده‌اند.

مقایسه DJFD و JFD

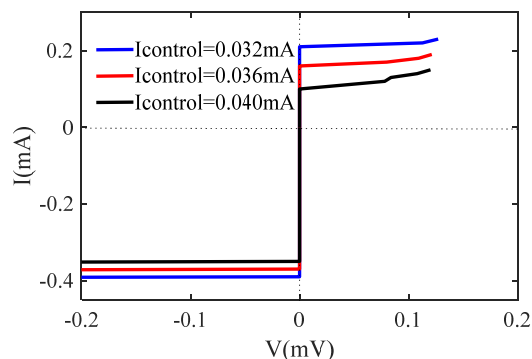
رأ عمق نفوذ جوزفسون نامیده می‌شود و برابر با مقدار نفوذ میدان مغناطیسی از لبه‌های پیوند به داخل آن است و برای پیوند پیوسته از رابطه (۱۱) قابل محاسبه است:

با تغییر مقدار جریان کنترلی دیود، مقدار جریان آستانه در بایاس مستقیم و معکوس نیز مطابق شکل ۱۵ تغییر می‌کند. در واقع مقدار جریان کنترلی تعداد حامل‌ها در هر سو از پیوند را تعیین می‌کند و به این ترتیب مقدار ولتاژ دوسر پیوند را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

برای نمایش عملکرد افزاره‌ی طراحی شده، میدان مغناطیسی در طول پیوند در هر یک از نواحی بایاس دیود مورد بررسی قرار گرفت. در ناحیه‌ای که افزاره در بایاس مستقیم قرار دارد چنانکه گفته شد انتظار می‌رود حامل‌ها متناسب با مقدار جریان کنترلی تولید و به سمت میانه پیوند حرکت کنند. چنانکه در شکل ۱۶ قابل مشاهده است با اعمال جریان کنترلی T شکل، حامل‌ها در طول خط پیوند تولید و تحت تأثیر جریان بایاس به سمت میانه پیوند حرکت می‌کنند.



شکل ۱۴. منحنی جریان بایاس-ولتاژ دو سر پیوند جوزفسون گسسته شامل 54 p پیوند کوتاه با اعمال جریان کنترلی. منحنی آبی رنگ جریان کنترلی 0.4 mA و منحنی مشکی رنگ جریان کنترلی دیودی 0.2 mA .



شکل ۱۵. منحنی جریان بایاس-ولتاژ دو سر پیوند جوزفسون گسسته شامل 54 p پیوند کوتاه با اعمال جریان کنترلی دیودی 0.36 mA ، 0.32 mA و 0.26 mA و 0.4 mA .

شروع به توليد ساليانها در خط پيوند کند، بايد بيش از مقدار $2J_c\lambda_J$ باشد [۴۶].

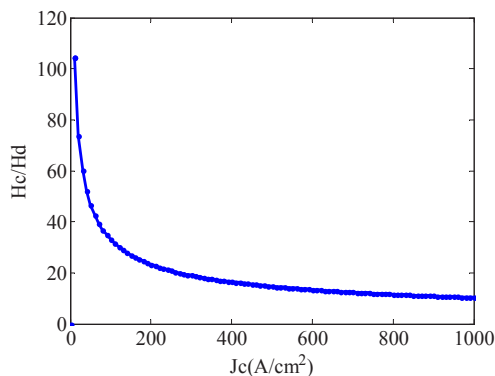
در پيوند گسسته، هنگامي که ميدان مغناطيسي به پيوند اعمال مي شود، اختلاف فاز سلول ها برابر خواهد بود با [۷]:

$$\frac{\varphi_n - \varphi_{n-1}}{a} = \frac{H_d}{\lambda_J J_c} \quad (14)$$

H_d کمينه ميدان مغناطيسي براي ورود اولين ساليان به پيوند گسسته است که برابر خواهد بود با:

$$H_d = \frac{2\pi\lambda_J J_c}{Na} \quad (15)$$

بنابراين نسبت کمينه ميدان مغناطيسي لازم براي ورود ساليانها در خط پيوند پيوسته به پيوند گسسته در چگالي جريانهاي بحراني مختلف به صورت شکل ۱۸ قابل ارائه است.



شکل ۱۸. نسبت «کمینه میدان مغناطیسی لازم برای ورود اولین سالیان به خط پیوند پیوسته» به «کمینه میدان مغناطیسی لازم برای ورود اولین سالیان به خط پیوند گسسته» در چگالی جريان بحراني های مختلف.

چنانکه مشاهده می شود در دیود سالیانی گسسته علاوه بر کاهش ابعاد قطعه تا بیش از ۳ برابر، مقدار میدان مغناطیسی و در نتیجه جريان کنترلی لازم برای راه اندازی قطعه دهها برابر کاهش می یابد. این مزایا در DJFD نسبت به JFD بهره بالاتر، توان مصرفی پایین تر، توان خنک سازی پایین تر و سرعت بالاتر را مهیا می کند.

نتیجه گیری

در این مقاله برای اولین بار ساختار دیود سالیانی گسسته معرفی شده است و طراحی و شبیه سازی این افزاره بر اساس معادله سینوسی گوردن گسسته انجام گرفته است. در پیوند گسسته تعداد و سرعت حرکت کوانتومهای شار مغناطیسی تابعی از هندسه پیوند، ابعاد پنجره ها و مقدار چگالی جريان

$$\lambda_J = \left(\frac{\Phi_0}{2\pi J_c \mu_0 d'} \right)^{1/2} \quad (11)$$

که در آن $d' = d + 2\lambda$ و λ عمق نفوذ لاندن^۴ است.

عمق نفوذ جوزفسون برای پیوند گسسته معادل رابطه (۱۲) است [۷]:

$$\lambda_J = \frac{D}{a} \quad (12)$$

D معادل طول یک سلول از خط پیوند گسسته است و a پارامتر گسستگی پیوند است که در بخش ۳ معرفی شده است. برای مثال برای دو پیوند پیوسته و گسسته که با فناوری Nb/Al₂O₃/Nb و تحت شرایط یکسان با چگالی جريان بحرانی 11.0 A/cm^2 ساخته شده اند، λ_J به ترتیب برابر با $38 \mu\text{m}$ و $11.8 \mu\text{m}$ خواهد بود. هرگاه یک میدان مغناطیسی به اندازه کافی بزرگ به پیوند اعمال شود، سالیانها وارد خط پیوند می شوند. هنگامي که میدان مغناطیسی و عمق نفوذ پیوند در رابطه زیر صدق کنند، سالیانها به صورت ذراتی مستقل از هم تولید می شوند [۳]:

$$\frac{2\pi d' \mu_0}{\Phi_0} H_y \lambda_J \leq 1 \quad (13)$$

از شرط بالا نتیجه می شود که مراکز سالیانهای تولید شده در خط پیوند حداقل $2\pi\lambda_J$ از یکدیگر فاصله خواهند داشت. بنابراین در پیوند جوزفسون فاصله قرارگیری سالیانها در خط پیوند متناسب با عمق نفوذ میدان در آنهاست. برای مثال در یک پیوند پیوسته که برای استفاده در ساختار دیود سالیانی و با چگالی جريان بحرانی 11.0 A/cm^2 طراحی شده است، فاصله بین هر دو سالیان بیش از $239 \mu\text{m}$ خواهد بود. در حالیکه در یک پیوند گسسته با همین چگالی جريان بحرانی، فاصله بین هر دو سالیان حدود $74 \mu\text{m}$ خواهد بود. یعنی فضای لازم برای جایابی تعداد معینی سالیان در قطعه گسسته نسبت به نمونه پیوسته بیش از ۳ برابر کوچکتر است. به این ترتیب ابعاد DJFD نسبت به JFD کوچکتر بوده و با استفاده از آن در مدارات مجتمع سالیانی علاوه بر افزایش تراکم سطحی قطعات، جابه جایی حامل ها تسريع و سرعت مدارات افزایش می یابد.

پارامتر مهم دیگری که در اینجا به مقایسه آن در دو پیوند پیوسته و گسسته پرداخته شده است، میدان مغناطیسی لازم برای ورود سالیان در خط پیوند است. مقدار میدان مغناطیسی H_c لازم که باید به پیوند پیوسته اعمال شود تا

^۴ London penetration depth

- [10] F. Raissi and J. E. Nordman, "Josephson fluxonic diode," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 14, pp. 1838–1840, 1994.
- [11] F. Raissi, "Soliton transistor," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 26, p. 263503, 2005.
- [12] K. Nakajima and Y. Onodera, "Logic design of Josephson network. II," *J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 5, pp. 2958–2963, 1978.
- [13] V. Semenov, S. Vasenko, and K. Likharev, "Dynamics of the long Josephson junctions," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 17, no. 1, pp. 800–803, 1981.
- [14] J. J. Mazo and A. V. Ustinov, "The sine-Gordon Equation in Josephson-Junction Arrays," in *The sine-Gordon Model and its Applications*, Springer, 2014, pp. 155–175.
- [15] O. M. Braun and Y. Kivshar, *The Frenkel-Kontorova model: concepts, methods, and applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [16] H. S. J. der Zant, E. H. Visscher, D. R. Curd, T. P. Orlando, and K. A. Delin, "Vortex dynamics in one-dimensional parallel arrays of underdamped Josephson junctions," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 3, no. 1, pp. 2658–2661, 1993.
- [17] S. Watanabe, S. H. Strogatz, H. S. J. van der Zant, and T. P. Orlando, "Whirling modes and parametric instabilities in the discrete sine-Gordon equation: experimental tests in Josephson rings," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 74, no. 3, p. 379, 1995.
- [18] G. F. Kuate and P. Woafu, "I--V Characteristics of an array of discrete Josephson junction and effect of a localized defect," *Phys. C Supercond.*, vol. 440, no. 1, pp. 59–65, 2006.
- [19] N. Vogt *et al.*, "One-dimensional Josephson junction arrays: Lifting the Coulomb blockade by depinning," *Phys. Rev. B*, vol. 92, no. 4, p. 45435, 2015.
- [20] A. Ergül, J. Lidmar, J. Johansson, Y. Azizoğlu, D. Schaeffer, and D. B. Haviland, "Localizing quantum phase slips in one-dimensional Josephson junction chains," *New J. Phys.*, vol. 15, no. 9, p. 95014, 2013.
- [21] C. Urano *et al.*, "A new coding technique in serial data transmission and demodulation with Josephson junctions array," in *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, vol. 234, no. 4, p. 42037.
- [22] H. S. J. der Zant, K. A. Delin, R. D. Bock, D. Berman, J. R. Phillips, and T. P. Orlando, "Resonance modes in one-dimensional parallel arrays of Josephson junctions," *Phys. B Condens. Matter*, vol. 194, pp. 1779–1780, 1994.
- بحرانی می‌باشد. با طراحی مناسب این پارامترها، پدیده فلاکس فلو و در نهایت مشخصه یکسوسازی در یک دیود سالیتمانی گسسته مشاهده شد. با توجه به اینکه در این ساختار خودالقای میان هر دو پیوند کوتاه، طول معادل پیوند پایه را نسبت به حالت پیوسته کاهش می‌دهد، یکی از مزایای این چنین پیوندهایی امکان کوچک‌سازی افزاره‌های مبتنی بر این پیوند در مقایسه با پیوند بلند است. همچنین در دیود سالیتمانی گسسته علاوه بر کاهش ابعاد قطعه، مقدار میدان مغناطیسی و در نتیجه جریان کنترلی لازم برای راه اندازی قطعه ده‌ها برابر کاهش می‌یابد. این مزایا در DJFD نسبت به JFD بهره بالاتر، توان مصرفی پایین‌تر و سرعت بالاتر را مهیا می‌کند. از سوی دیگر به منظور ساخت افزاره‌های پیچیده‌تر که نیاز به پیوندهای جوزفسون پیوسته به صورت پشته‌ای (چند لایه روی هم) دارند، استفاده از پیوند گسسته به عنوان پایه این افزاره‌ها نیاز به ساختارهای چند لایه را مرتفع نموده و منجر به سادگی فرآیند ساخت خواهد شد و راه را برای رسیدن به ترانزیستور سالیتمانی در ابعاد کوچک نزدیک‌تر خواهد کرد.

مراجع

- [1] B. D. Josephson, "Possible new effects in superconductive tunnelling," *Phys. Lett.*, vol. 1, no. 7, pp. 251–253, 1962.
- [2] C. Kittel and D. F. Holcomb, "Introduction to solid state physics," *Am. J. Phys.*, vol. 35, no. 6, pp. 547–548, 1967.
- [3] K. K. Likharev, *Dynamics of Josephson junctions and circuits*. Gordon and Breach science publishers, 1986.
- [4] T. Van Duzer and C. W. Turner, "Principles of superconductive devices and circuits," 1981.
- [5] T. P. Orlando, K. A. Delin, and C. J. Lobb, "Foundations of applied superconductivity," *Phys. Today*, vol. 44, p. 109, 1991.
- [6] M. Tinkham, *Introduction to superconductivity*. Courier Corporation, 1996.
- [7] A. V. Ustinov, M. Cirillo, B. H. Larsen, V. A. Oboznov, P. Carelli, and G. Rotoli, "Experimental and numerical study of dynamic regimes in a discrete sine-Gordon lattice," *Phys. Rev. B*, vol. 51, no. 5, p. 3081, 1995.
- [8] A. C. Scott, F. Y. F. Chu, and S. A. Reible, "Magnetic-flux propagation on a Josephson transmission line," *J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 7, pp. 3272–3286, 1976.
- [9] A. M. Kadin, "Duality and fluxonics in superconducting devices," *J. Appl. Phys.*, vol. 68, no. 11, pp. 5741–5749, 1990.

- 780–786, 2011.
- [35] K. K. Likharev, “Superconductor digital electronics,” *Phys. C Supercond.*, vol. 482, pp. 6–18, 2012.
- [36] I. Georgescu and F. Nori, “Quantum technologies: an old new story,” *Phys. World*, vol. 25, no. 5, p. 16, 2012.
- [37] J. Clarke and F. K. Wilhelm, “Superconducting quantum bits,” *Nature*, vol. 453, no. 7198, pp. 1031–1042, 2008.
- [38] J. Q. You and F. Nori, “Atomic physics and quantum optics using superconducting circuits,” *Nature*, vol. 474, no. 7353, pp. 589–597, 2011.
- [39] M. H. Devoret and R. J. Schoelkopf, “Superconducting circuits for quantum information: an outlook,” *Science (80-.)*, vol. 339, no. 6124, pp. 1169–1174, 2013.
- [40] F. Raissi, “Modeling of the Josephson fluxonic diode,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, no. 3, pp. 3817–3820, 2003.
- [41] F. Raissi, *Josephson fluxonic devices*. University of Wisconsin--Madison, 1995.
- [42] F. Faló, P. J. Martínez, J. J. Mazo, and S. Cilla, “Ratchet potential for fluxons in Josephson-junction arrays,” *EPL (Europhysics Lett.)*, vol. 45, no. 6, p. 700, 1999.
- [43] E. Trias, J. J. Mazo, F. Faló, and T. P. Orlando, “Depinning of kinks in a Josephson-junction ratchet array,” *Phys. Rev. E*, vol. 61, no. 3, p. 2257, 2000.
- [44] F. Faló, P. J. Martínez, J. J. Mazo, T. P. Orlando, K. Segall, and E. Trías, “Fluxon ratchet potentials in superconducting circuits,” *Appl. Phys. A*, vol. 75, no. 2, pp. 263–269, 2002.
- [45] J. Pfeiffer, M. Schuster, A. A. Abdumalikov Jr, and A. V Ustinov, “Observation of soliton fusion in a Josephson array,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 96, no. 3, p. 34103, 2006.
- [46] J. E. Nordman, “Superconductive amplifying devices using fluxon dynamics,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 9, p. 681, 1995.
- [23] T. G. Zhou *et al.*, “Nonlinear inductance of intrinsic Josephson junction arrays and its application to tunable filters,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, pp. 586–589, 2007.
- [24] T. A. Fulton and R. C. Dynes, “Single vortex propagation in Josephson tunnel junctions,” *Solid State Commun.*, vol. 12, no. 1, pp. 57–61, 1973.
- [25] T. A. Fulton and L. N. Dunkleberger, “Experimental flux shuttle,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 22, no. 5, pp. 232–233, 1973.
- [26] R. F. Broom, S. I. Raider, A. Oosenbrug, R. E. Drake, and W. Walter, “Niobium oxide-barrier tunnel junction,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 27, no. 10, pp. 1998–2008, 1980.
- [27] J. H. Greiner, “Josephson tunneling barriers by rf sputter etching in an oxygen plasma,” *J. Appl. Phys.*, vol. 42, no. 12, pp. 5151–5155, 1971.
- [28] K. Likharev, “Dynamics of some single flux quantum devices: I. Parametric qantron,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 13, no. 1, pp. 242–244, 1977.
- [29] A. V Ustinov and V. K. Kaplunenko, “Rapid single-flux quantum logic using π -shifters,” *J. Appl. Phys.*, vol. 94, no. 8, pp. 5405–5407, 2003.
- [30] E. Trías, J. J. Mazo, A. Brinkman, and T. P. Orlando, “Discrete breathers in Josephson ladders,” *Phys. D Nonlinear Phenom.*, vol. 156, no. 1, pp. 98–138, 2001.
- [31] H. S. J. der Zant, D. Berman, T. P. Orlando, and K. A. Delin, “Fiske modes in one-dimensional parallel Josephson-junction arrays,” *Phys. Rev. B*, vol. 49, no. 18, p. 12945, 1994.
- [32] V. K. Semenov, “Digital SQUIDs: new definitions and results,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 13, no. 2, pp. 747–750, 2003.
- [33] V. K. Semenov, G. V Danilov, and D. V Averin, “Classical and quantum operation modes of the reversible Josephson-junction logic circuits,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 17, no. 2, pp. 455–461, 2007.
- [34] J. Ren and V. K. Semenov, “Progress with physically and logically reversible superconducting digital circuits,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp.

