

طراحی اسکوئید های سه و چهار پیوندگاهی و بررسی وابستگی جریان عبوری به شار مغناطیسی و

ساختار هندسی

افزلی، رضا؛ بابامخانی، مهسا

گروه فیزیک دانشکده علوم، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

چکیده

در این مقاله ابتدا به طراحی دو نوع اسکوئید DC پرداخته شده و حالت های مختلف آنان مورد بررسی قرار گرفته است. برای آگاهی از روند کارکرد یک اسکوئید لازم است وابستگی بیشینه جریان عبوری (I_{Max}) به شار مغناطیسی محصور در حلقه اسکوئید مشخص شود. هر چقدر اندازه جریان بیشینه عبوری از یک اسکوئید بیشتر باشد حالت ابررسانشی پایدارتری وجود دارد و سیستم مورد نظر، اسکوئید، مختل نشده و خطای اندازه گیری ها توسط آن کمتر خواهد بود. بنابراین سیستم با جریان بیشینه بیشتر برای استفاده مناسب تر است. نتایج اینگونه بررسی ها در این جا نشان میدهد که اسکوئید سه پیوندگاهی مناسبتر از اسکوئید دو پیوندگاهی است.

Designing of SQUID with tree and four junctions and investigating the dependence of current to magnetic flux and geometrical structure of SQUID

Afzali, Reza; Babamkhani, M, Mahsa

Physics Department, Faculty of Science, K.N.Toosi University of Technology, Tehran

Abstract

In this paper, the two DC SQUIDS are designed and their various states are investigated. Then, to understand the circumstance of function of the SQUID, the dependence of maximum transmitted current with respect to the magnetic flux, which restricted in the ring of the SQUID, should be determined. The higher the magnitude of the maximum current, is the higher the super current state of SQUID. Therefore, the SQUID do not disturbed and the error of the measurement, which done by the SQUID, will be less than the other cases. So the system associated with the greater maximum current is the more suitable for using in experimental application. The results of this paper are shown that the SQUID with three junctions is better than of SQUID with two junctions.

PACS No. 74,70,72

حساسیت انرژی از مرتبه 10^{-34} ژول بر هرتز شده است. محدوده

حساسیت یک اسکوئید مهمترین مساله می باشد [1]. این دستگاه ها مخصوصا اسکوئیدهای RF و DC کاربرد های زیادی دارند. در ژئوفیزیک اسکوئید های مغناطوسنج و شیب سنج برای اندازه گیری نوسان میدان مغناطیسی سطح زمین، ثبت تغییرات پذیرفتاری مغناطیسی و تغییرات بسیار کوچک میدان مغناطیسی که با قلب و مغز انسان به وجود می آیند، ساخت تجهیزات آزمایشگاهی از جمله ولتمترها و آمپرمترهای بسیار حساس و اندازه گیری مقاومت از جمله کاربرد های این وسیله هستند. یک مثال برجسته، استفاده به عنوان یک مبدل فوق حساس در آنتن آشکارسازهای موج های گرانشی است. همچنین در اختلالات دماسنجی برای اندازه گیری

مقدمه

برای اولین بار زمانی از تداخل سنج دو پیوند گاهی برای اندازه گیری میدان مغناطیسی استفاده شد که اختلالات کوانتمی به صورت ماکروسکوپی در ابر رسانا ها مشاهده شد. بعد از آن اسکوئید AC به دلیل ساخت آسان اسکوئید تک پیوند گاهی با تکنولوژی تماس نقطه ای از اواخر سال 1960 تا اواسط 1970 رواج یافت. حساسیت یک اسکوئید AC استاندارد نزدیک 10^{-28} ژول بر هرتز است. در سال 1975 کلارک و کوارکرز استفاده از پیوندگاه های موازی با حساسیت انرژی از مرتبه 10^{-29} ژول بر هرتز را شرح می دهند که نشان می دهد این حالت بهتر از اسکوئید AC است. پیشرفت های اسکوئید DC منجر به

از طرفی نقاط شماره گذاری شده، به پیوندگاه های هم جوارشان بسیار نزدیک اند و پتانسیل برداری \mathbf{A} نزدیک به پیوند گاه ها هیچ ویژگی خاصی ندارد بنابراین می توانیم انتگرال سمت راست رابطه 3 را روی خم بسته در نظر بگیریم و به چنین روابطی برسیم:

$$-\theta_1 + \theta_7 - \theta_8 + \theta_2 = \frac{2e}{h} \oint \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l}$$

$$\varphi_a - \varphi_d = \frac{2\pi\Phi}{\Phi_0} \quad (4)$$

در اینجا Φ شارمغناطیسی کل، $\Phi = nhc/e$ کوانتم شار مغناطیسی، $\varphi_a = \theta_2 - \theta_1$ و $\varphi_d = \theta_8 - \theta_7$ است. با تکرار این کار برای پربند هایی که به ترتیب فقط ناحیه 1، 2 و 3 را در بر می گیرند به روابط زیر می رسیم.

$$\varphi_b - \varphi_c = \frac{2\pi\Phi_1}{\Phi_0} \quad (5)$$

$$\varphi_a - \varphi_b = \frac{\pi\Phi_2}{\Phi_0} \quad (6)$$

$$\varphi_c - \varphi_d = \frac{\pi\Phi_2}{\Phi_0} \quad (7)$$

که در این روابط $\varphi_b = \theta_4 - \theta_3$ و $\varphi_c = \theta_6 - \theta_5$ می باشند.

همچنین جریان شارشی از پیوند گاه a عبارت است از [3]

$$I_a = I_c \sin \varphi_a \quad (8)$$

با فرض بر این که پیوندگاه ها یکسان و جریان بحرانی مشخصه تمامی پیوندگاه ها I_c باشد و تعمیم رابطه 8 برای پیوند گاه های دیگر، جریان کل شارشی بدین صورت خواهد بود

$$I = I_c [\sin \varphi_a + \sin \varphi_b + \sin \varphi_c + \sin \varphi_d]$$

که با استفاده از روابط بین توابع مثلثاتی و استفاده از روابط 6 و 7 و انجام عملیات ریاضی رابطه این بدین گونه می شود:

$$I = 4I_c \cos\left(\frac{\pi\Phi_2}{2\Phi_0}\right) \left[\sin\left(\frac{\varphi_a + \varphi_b + \varphi_c + \varphi_d}{4}\right) \cos\left(\frac{\varphi_a + \varphi_b - \varphi_c - \varphi_d}{4}\right)\right]$$

و در نهایت با جایگذاری روابط 4 و 5 و انجام عملیات ریاضی جریان کل شارشی، با در نظر گرفتن شار محصور ثابت برای هر ناحیه، وابسته به پارامتر φ_a به دست می آید.

$$I = 4I_c \cos\left(\frac{\pi\Phi_2}{2\Phi_0}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2\Phi_0}(2\Phi_1 + \Phi_2)\right) \sin\left(\varphi_a - \frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right) \quad (9)$$

در نتیجه جریان بیشینه ای که بدون اتلاف از قطعه میگذرد چنین است (10)

$$I_{Max} = 4I_c \cos\left(\frac{\pi\Phi_2}{2\Phi_0}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2\Phi_0}(2\Phi_1 + \Phi_2)\right) \quad (10)$$

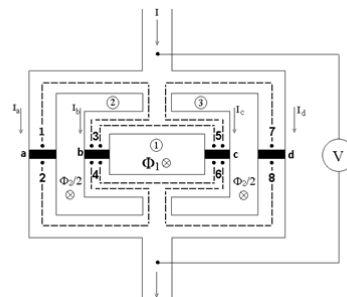
$$I_{Max} = 2I_c \left[\cos\left(\frac{\pi\Phi}{\Phi_0}\right) + \cos\left(\frac{\pi\Phi_1}{\Phi_0}\right) \right] \quad (11)$$

در این قسمت حالت های موجود را مورد بررسی قرار می دهیم.

دما در رنج میکروکلون استفاده میشوند [2]. ما در این مقاله ابتدا به طراحی و بررسی اسکویید چهار پیوند گاهی و سه پیوند گاهی پرداخته و بعد با استفاده از آنان و مقایسه اسکویید ها بهترین ساختار برای اسکویید از بین آنان را معرفی می کنیم.

اسکویید چهار پیوند گاهی

در این جا قطعه ای متشکل از چهار پیوندگاه جوزفسون در نقاط a, b, c, d و دو ابرسانای کپه ای که توسط این پیوند گاه ها به یکدیگر متصل شده اند را مورد بررسی قرار می دهیم (شکل 1).



شکل 1: اسکویید چهار پیوندگاهی با چهار پیوندگاه جوزفسون موازی، شار Φ_1 از ناحیه شماره 1 و شار $\Phi_2/2$ به طور مساوی از نواحی 2 و 3 عبور می کنند.

برای این که چگونگی کارکرد اسکوییدی که طراحی کرده ایم را بدانیم لازم است وابستگی I_{Max} به شار مغناطیسی محصور در حلقه های اسکویید، Φ_1 ، Φ_2 و شار عبوری کل Φ را مشخص کنیم.

$$\Phi = \Phi_2 + \Phi_1 \quad (1)$$

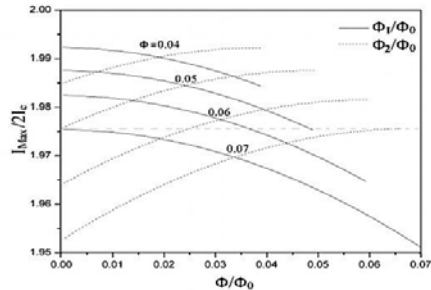
برای پیدا کردن این وابستگی تکانه تعمیم یافته زوج کوپر در دستگاه SI را در نظر می گیریم [3].

$$h\nabla\theta = 2m\mathbf{v}_s + 2e\mathbf{A} \quad (2)$$

در این رابطه θ فاز تابع موج، \mathbf{v}_s سرعت زوج، m جرم الکترون، e بار الکترون و \mathbf{A} پتانسیل برداری است. تمام زوج نقاطی که درون ابر رسانا در شکل 1 شماره گذاری شده اند بیرون از ناحیه ای است که ابر جریان به آن نفوذ کرده است بنابراین $\mathbf{v}_s = 0$ است. با انتگرال گیری از رابطه 2 در طول پربند خط چین (شکل 1) به طوری که کل شار عبوری را در بر گیرد، به رابطه زیر می رسیم.

$$\hbar \left[\int_1^3 \nabla\theta \cdot d\mathbf{l} + \int_3^5 \nabla\theta \cdot d\mathbf{l} + \int_5^7 \nabla\theta \cdot d\mathbf{l} + \int_7^8 \nabla\theta \cdot d\mathbf{l} + \int_8^6 \nabla\theta \cdot d\mathbf{l} + \int_6^4 \nabla\theta \cdot d\mathbf{l} \right] = 2e \left[\int_1^3 \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} + \int_3^5 \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} + \int_5^7 \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} + \int_7^8 \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} + \int_8^6 \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} + \int_6^4 \mathbf{A} \cdot d\mathbf{l} \right] \quad (3)$$

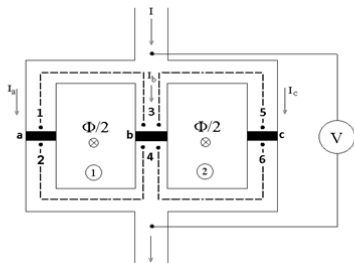
متفاوت بوده است. مثلا در مقدار شار صفر پایدار ترین حالت ابررسانشی نسبت به جریان خارجی، برخلاف حالت مورد بررسی ما، وجود ندارد.



شکل 3: وابستگی ابر جریان بیشینه تداخل سنج چهار پیوندگاهی به شار مغناطیسی برای نسبت های مختلف تغییرات Φ_1 و Φ_2 باشد.

اسکونید سه پیوندگاهی

در این قسمت قطعه ای متشکل از سه پیوندگاه جوزفسون در نقاط a، b و c را مورد بررسی قرار می دهیم (شکل 4).



شکل 4: اسکونید سه پیوندگاهی با سه پیوندگاه جوزفسون موازی و شار کل Φ شار $\Phi/2$ به طور مساوی از نواحی 1 و 2 عبور می کنند. در این جا شار عبوری کل مقدار Φ است و این مقدار به طور مساوی بین نواحی 1 و 2 تقسیم شده است. با انجام دادن عملیاتی کاملا مشابه حالت چهار پیوندگاهی به روابط زیر با مفاهیم مشابه می رسیم.

$$\varphi_a - \varphi_c = \frac{2n\Phi}{\Phi_0}, \varphi_a - \varphi_b = \frac{n\Phi}{\Phi_0}, \varphi_b - \varphi_c = \frac{n\Phi}{\Phi_0} \quad (12)$$

جریان شارشی کل نیز به این صورت می باشد

$$I = I_c [\sin \varphi_a + \sin \varphi_b + \sin \varphi_c]$$

با استفاده از روابط 1 و 2 انجام عملیت ریاضی به معادله زیر میرسیم

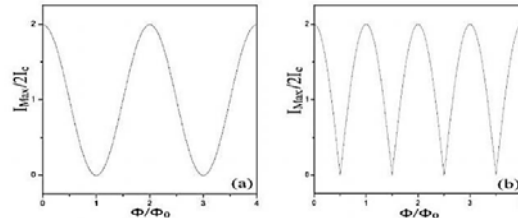
$$I = 4I_c \left[\cos^2 \left(\frac{n\Phi}{2\Phi_0} \right) - \frac{1}{4} \right] \sin \left(\varphi_a - \frac{n\Phi}{\Phi_0} \right) \quad (13)$$

بنابراین جریان بیشینه که بدون اتلاف ازقطعه میگذرد چنین است

$$I_{Max} = 4I_c \left(\cos^2 \left(\frac{n\Phi}{2\Phi_0} \right) - \frac{1}{4} \right) \quad (14)$$

می توان اندازه تغییرات جریان بیشینه بر حسب شار عبوری کل،

ابتدا حالتی که در آن Φ_2 را ثابت در نظر می گیریم و Φ وابسته به تغییرات Φ_1 تغییر دهیم. حالت دیگر این است که Φ_1 ثابت باشد و Φ متناسب با تغییرات Φ_2 تغییر کند در این صورت اندازه تغییرات جریان بیشینه بر حسب Φ طبق شکل 2 به ترتیب نمودار های (a) و (b) خواهند بود.

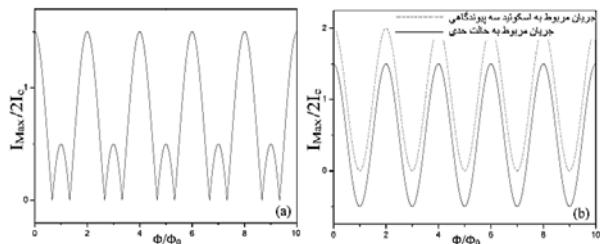


شکل 2: وابستگی اندازه ابر جریان بیشینه تداخل سنج چهار پیوندگاهی به شار مغناطیسی، (a): مقدار Φ_2 ثابت و تغییرات Φ وابسته به تغییرات Φ_1 می باشد. (b): مقدار Φ_1 ثابت و تغییرات Φ وابسته به تغییرات Φ_2 می باشد.

مشاهده میشود که در نمودار (a) پایدار ترین حالت ابررسانشی نسبت به جریان خارجی وقتی است که تعداد درستی کوانتم شار در ناحیه مورد نظر محصور شده باشد و حالت ابررسانشی ناپایدار حالتی با تعداد نیم درست کوانتم شار است. در نمودار (b) پایدار-ترین حالت در مضارب زوج و صحیح شار و حالت ابررسانشی ناپایدار در مضارب فرد و صحیح به وجود می آید. به عبارت دیگر، جریان بسیار ناچیز I میتواند قطعه را به حالت مقاومتی با ولتاژ معین (شکل 1) در دو سر پیوندگاه ببرد. حال تغییرات Φ را در حالت های مختلف تغییرات Φ_1 و Φ_2 در نظر می گیریم. بدین صورت که با یک واحد افزایش Φ مقادیر مختلف Φ_1 و Φ_2 ، با شرط برقراری رابطه 1، داشته باشیم. نتایج حاصل در نمودارهای شکل 3 قابل مشاهده هستند. طبق نمودار مثلا در $\Phi = 0.07$

زمانی که $\Phi_2 = 0.07$ و $\Phi_1 = 0$ است، $\frac{I_{Max}}{2I_c} = 1.976$ می باشد و پایدارترین حالت ابر رسانشی در حالت در نظر گرفته شده است یا در حالت دیگر که $\Phi_2 = 0$ و $\Phi_1 = 0.07$ است، مقاومت ظاهر می شود و حالت ابررسانشی ناپایدار در مقدار شار 0.07 وجود دارد. لازم به ذکر است که با تغییر دادن جایگاه پیوندگاه ها نتایج تغییر میکنند. برای مثال در مرجع [4] با طراحی متفاوتی برای اسکونید چهار پیوندگاهی و با در نظر گرفتن جزئیات بیشتر از جمله مقاومت، وابستگی تغییرات جریان و شار با توجه به مقاومت داخلی بررسی شده است و نتایج حاصل

در مقایسه با رابطه 13 مشاهده می شود که فازها مساوی هستند و جریان های بیشینه با هم تفاوت دارند. مطابق شکل 6-b مشاهده میشود که این دو جریان هیچ وقت با هم برابر نمی شود اما اسکویید سه پیوندگاهی دارای جریان بیشینه بیشتری نسبت به حالت حدی سه پیوندگاهی دارد.



شکل 6: (a) وابستگی اندازه ابرجریان بیشینه تداخل سنج سه پیوندگاهی به شار مغناطیسی، (b) مقایسه وابستگی ابرجریان بیشینه تداخل سنج به شار مغناطیسی کل Φ برای تداخل سنج چهار پیوندگاهی در حالت حدی $\Phi_1 \rightarrow 0$ و تداخل سنج سه پیوندگاهی

نتیجه گیری

با توجه به شکل 3 هر چقدر مقدار شار عبور کل کمتر باشد حالت ابررسانشی پایدارتر وجود دارد پس استفاده از اسکوییدی با شار کمتر مناسب است. همچنین در این شکل مشاهده می شود که اگر کل شار از نواحی 2 و 3 عبور کند حالت ابررسانشی پایدارتر است. بنابراین حالت حدی اسکویید سه پیوندگاهی مناسب تر از حالت حدی اسکویید دو پیوندگاهی می باشد. علاوه بر این مشاهده نمودیم که حالت حدی اسکویید دو پیوندگاهی بهتر از خود آن است و اسکویید سه پیوندگاهی بهتر از حالت حدی آن است. در نهایت از این مقایسه ها می توان نتیجه گرفت که اسکویید سه پیوندگاهی مناسب تر از اسکویید دو پیوندگاهی است.

مرجع ها

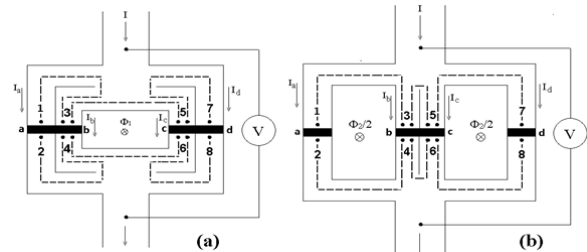
- [1] Konstantin K. Likharev; "Dynamics of Josephson Junctions and Circuits"; Gordon and Breach Science; Amsterdam. (1986) 208
- [2] Antonio Barone; "Physics and Applications of the Josephson Effect"; Wiley-Interscience. (1982) 434
- [3] و. و. اشویت «فیزیک ابررساناها آشنایی با مبانی و کاربرد ها»؛ موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، چاپ سوم پاییز 1390، صفحات 88، 105.
- [4] D. G. McDonald; "Amplification by the phase-locking mechanism in a four-junction SQUID"; Appl. Phys. Lett. 45, 1243. (1984) 2

Φ ، در شکل 6-a مشاهده نمود.

بررسی حالات حدی اسکویید چهار پیوندگاهی

در اسکویید چهار پیوندگاهی حالتی که در آن ها Φ_1 و Φ_2

به مقدار صفر میل میکنند را بررسی می کنیم .



شکل 5: اسکویید چهار پیوندگاهی با چهار پیوندگاه جوزفسون موازی (a).

در حالتی که $\Phi_1 \rightarrow 0$ ، (b) در حالتی که $\Phi_2 \rightarrow 0$

حالت اول: در اینجا Φ_2 را به مقدار صفر میل می دهیم و در نتیجه $\Phi \approx \Phi_1$ می شود. در این صورت به حالت حدی اسکویید دو پیوندگاهی می رسم (شکل 5-a). جریان شارشی کل این گونه است

$$I = 4I_c \cos\left(\frac{n\Phi}{\Phi_0}\right) \sin\left(\varphi_a - \frac{n\Phi}{\Phi_0}\right) \quad (15)$$

تفاوت این سیستم با اسکویید دو پیوندگاهی در این است که اسکویید دو پیوندگاهی یک ابررسانای واحد در قسمت های 1 و 2 و در دو قسمت مشابه سمت راست تشکیل شده است حال آن که حالت حدی از دو ابررسانای به هم چسبیده تشکیل شده است و این باعث تفاوت در جریان میشود. جریان اسکویید دو پیوندگاهی بدین صورت میباشد [3]:

$$I = 2I_c \cos\left(\frac{n\Phi}{\Phi_0}\right) \sin\left(\varphi_a + \frac{n\Phi}{\Phi_0}\right)$$

شرط تساوی جریان حالت حدی اسکویید چهار پیوندگاهی و اسکویید دو پیوندگاهی این گونه به دست می آید

$$\varphi_a = \text{Arctan}\left(3 \tan\left(\frac{n\Phi}{\Phi_0}\right)\right) \quad (16)$$

همچنین مشاهده میشود که جریان بیشینه حالت حدی بیشتر از اسکویید دو پیوندگاهی است بنابراین حالت حدی مناسب تر است.

حالت دوم: این بار Φ_1 را به مقدار صفر میل می دهیم و در نتیجه $\Phi \approx \Phi_2$ می شود. در این صورت به حالت حدی اسکویید سه-

پیوندگاهی می رسم. (شکل 5-b). در این حالت جریان شارشی کل

$$I = 4I_c \cos\left(\frac{n\Phi}{2\Phi_0}\right)^2 \sin\left(\varphi_a - \frac{n\Phi}{\Phi_0}\right) \quad \text{این گونه است}$$

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop