

اندازه‌گیری‌های DC-SQUID با حساسیت بالا

محمدرضا برپور

دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

mrpb200@yahoo.com

محمد غلامی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

m.gholamy.2005@gmail.com

ندا زاده کالانتر

دانشگاه پیام نور دزفول

mrpb400@yahoo.com

چکیده:

بازبینی مختصری در مورد صنعت ابراز تداخل کوانتوم ابر رسانا DC دارای حساسیت بالا در اینجا آورده شده که البته به ابزار دمای پایین محدود شده است. این ابزار می‌تواند به شار مغناطیسی خارجی نزدیک به محدوده‌ای که نظریه کوانتوم مطرح کرده است، حساسیت داشته باشند. پیشرفتهایی که در سالهای اخیر انجام شده‌اند تا ابزار و وسایل را قادر به دستیابی به چنین محدوده‌ای بکنند هم توضیح داده خواهند شد.

کلید واژه ها : SQUID، ابزار ابررسانا، اثر جوزفسون

مقدمه:

مغناطیس دو قطبی، ارزیابی بدون اثر تخریبی و دیگر کاربردهای SQUID استاندارد چشم پوشی خواهیم کرد. در همین حین، تصمیم گرفتیم پیشرفتهای انجام شده در مدارهای الکترونیکی دمای محفظه که به طور همزمان صورت گرفته‌اند را تحت پوشش قرار ندهیم. هنوز هم بسیاری کاربردهای DC-SQUID های دارای حساسیت بالا همانهایی هستند که در کتاب کالوپ شرح داده شده بودند، در طول کنفرانس LT-22 پیشرفت در بعضی از این کاربردها مورد توجه و توضیح قرار گرفت. تعدادی ایده جدید هم اخیراً ارائه

این مقاله سعی دارد بازبینی مختصری بر پیشرفتهایی باشد که در سالهای اخیر در خلق و توسعه DC-SQUID های دارای حساسیت بالا انجام شده‌اند. توجه و تمایل به توسعه چنین ابزارهایی عمدتاً در آزمایشهای فیزیکی پایه است. به همین دلیل ما هم کانون توجه خود را در این زمینه بخصوص قرار خواهیم داد و از بسیاری میدین در زمینه‌های دیگری که در سالهای اخیر پیشرفتهای قابل ملاحظه‌ای در آنها صورت گرفته، مثل DC-SQUID های دمای بالا،

شده‌اند. فقط برای یادآوری تعدادی از این آزمایش‌های پایه، تعدادی را نام می‌بریم: جستجو برای موجهای گرانشی با موج یاب‌های تشدید کننده، آزمایشات نسبت کلی مثل STEP یا GP-B جستجو برای تک قطبی‌ها، اکسیون‌ها و نوترون‌ها، پیشرفت موج یاب‌های تشعشعی بر پایه تقاطعات تونل ابررسانا و میکروساسپکترومترها. یک DC-SQUID ایده آل شامل یک حلقه ابررسانا است که می‌توان آن را با خود القایی L شناسایی کرد که با دو پیوند جوزفسون که ترجیحا مشابه هستند قطع می‌شود. مقادیر مشخص هر تقاطع جریان بحرانی I_0 ، ظرفیت C (ناشی از فرآیند تولید) و مقاومت موازی R است که باید برای اجتناب از حرکات هیستریک منظور شوند. یکی دیگر از اجزاء القای ورودی L_{in} است که باید خوب به بدنه SQUID جفت شود (با ضریب اتصال بزرگ α به L)

دینامیک درونی برای خواص SQUID ضروری است. هر دو پیوند جوزفسون نوسانگرهای غیر خطی هستند؛ اگر جریان تاثیر گذار DC مناسبی برای ابزار استفاده شود، شار مغناطیسی خارجی رفتار دینامیک آنها را کنترل می‌کند. به علت رابطه جوزفسون، فرکانس نوسان در ابزار به ولتاژ DC میانگین تغییر می‌یابد. به دلیل این مکانیسم درونی، ولتاژ درون ابزار که تحت تاثیر یک جریان ثابت است، عملکرد متناوب جریان درون سیم‌پیچ ورودی می‌شود، نویز نایکویست محدوده‌ای برای خواص ابزار قائل می‌شود. یکی از پارامترهای مفید برای توصیف ابزار، حساسیت آن به انرژی است یعنی حداقل انرژی مغناطیسی که در واحد عرض نوار تحت تاثیر سیم‌پیچ ورودی قرار می‌گیرد:

$$S_{\varepsilon} = \frac{S\phi}{2\alpha^2 L}$$

با حل عددی معادلات با توضیح مدار SQUID و اضافه کردن نویز نایکویست مقاومت موازی، عبارت

پدیده‌شناسی حساسیت به انرژی یک DC-SQUID را بعنوان تابعی از مقادیر اولیه می‌توان به دست آورد:

$$S_{\varepsilon} = \gamma_1 KT \frac{L}{R} + \gamma_2 \frac{h}{2}$$

که در آن y_1, y_2 پارامترهای بدون ابعادی هستند که به نقطه تاثیر گذار و خواص SQUID بستگی دارند. جمله اول ناشی از بخش قدیمی و کلاسیک نویز نایکویست است و نشان می‌دهد که برای کاهش آن، SQUID باید در دمای پایین، با القای کم و مقاومت زیاد عمل کند. جمله دوم ناشی از بخش کوانتوم نویز نایکویست است. ابزار با حساسیت بالایی که توسعه یافته‌اند سعی دارند به شرایطی دست یابند که در آن جمله دوم غالب باشد. شبیه سازیهای عددی نشان می‌دهند که می‌توان پارامتر y_1 را بهینه ساخت؛ اگر پارامترهای ابزار به درستی انتخاب شوند حداقل مقداری که به دست می‌آید، از مرتبه هشت است. در القای کاهش یافته، یک مینیمم مانع وجود دارد:

$$\beta = \frac{2\pi LI_0}{\phi_0} \approx \pi$$

و در مورد هیستریس که باید تا حد قابل ملاحظه‌ای پایین تر از مقدار محدود شده نگاه داشته شود:

$$\beta_c = \frac{2\pi I_0 R^2 C}{\phi_0} \approx 0.7$$

شرایط دیگر، در انرژی جوزفسون $I_0 \phi_0$ رخ می‌دهد که باید مرتبه بزرگی آن، بزرگتر از تغییر انرژی حرارتی KT باشد. ضریب y_2 را می‌توان از مرتبه ۱ با موانع مشابه پارامترهای ابزار ساخت. دستورالعملی برای یک SQUID خوب شامل پیوندهای ظرفیت پایین، القای ابزار کوچک و اتصال بزرگ با القای ابزار بزرگ است که در عین حال از تأثیرات پارازیتی

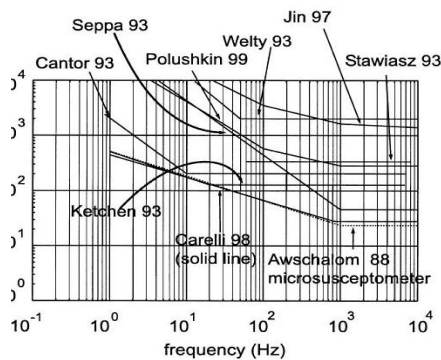
سیم پیچ ورودی بر عملکرد کلی جلوگیری می‌کند. رفتار دینامیک و عملکرد کلی در یک ابزار حقیقی همچنین تحت تأثیر ظرفیت اتفاقی در بدنه SQUID و بین سیم پیچ ورودی و SQUID قرار می‌گیرند. علاوه بر این، تشدید خط قطعه قطعه شده می‌تواند از طرح سیم پیچ ورودی و از ساختار هندسی SQUID بوجود بیاید. البته، باید با محافظ گذاری درست یا هندسه خاص خود ابزار، از تأثیر نویز خارجی جلوگیری کرد.

SQUID بعنوان یک آمپلی فایر (تقویت کننده) خطی را بیشتر با دو ژنراتور نویز در ورودی می‌شناسند: نویز جریان که به سادگی توسط نویز شار قابل اندازه گیری است و نویز ولتاژ که حداقل برای فرکانس پایین به سختی قابل اندازه گیری است چون مقدار کمی دارد. هر دو منبع نویز که یک خاستگاه دارند، تاحدی به هم مربوط شده‌اند. اندازه گیری‌های اخیر که از یک مدار Q بالای دارای تن بر یک ابزار تجارتي تبلیغاتی استفاده کرده‌اند، نشان دادند که نویز ولتاژ به طریق خطی با واکنش ورودی به نویز جریان متصل شده است.

ابزار خودگردانی که چنین رفتار ایده آلی داشته باشند در شروع دهه ۱۹۸۰ درست شدند، اما ده سال بعد از آن بود که به حساسیت مشابهی در ابزاری که سخت به سیم پیچ ورودی که نسبتاً بزرگ بود، متصل شده بود دست پیدا کردیم، همانطوری که در اغلب کاربردها به آن نیاز است. حساسیت به انرژی $1/\sqrt{h}$ هم در دمای پایین در سال ۱۹۸۸ در ساسپتومتری که حساسیت بالا داشت، به دست آمد که البته سیم پیچ ورودی کوچکی ($2/5 \text{ nH}$) داشت. بعد از همه اینها، ابزارهای دیگری هم بوجود آمدند، که از طرحها و نقشه‌های متفاوتی استفاده می‌کردند تا به محدوده کوانتوم برسند. بسیاری از آنها با هندسه به اصطلاح واشر ساخته شدند که این هندسه اجازه اتصال سفت و سختی میان SQUID و سیم پیچ ورودی آن را می‌داد. ویژگی

ساده دیگری برای دستیابی به بهترین عملکرد استفاده از یک DC-SQUID ثانویه بعنوان پیش تقویت کننده بود. بعضی نتایج مطرح شده در شکل ۱ جمع آوری شده‌اند، جایی که حساسیت به انرژی اتصال ابزار مختلف هم نشان داده شده و برای مقایسه با اندازه گیری‌هایی که در دماهای مختلف انجام شده‌اند به آن وزن $4/2K$ داده‌اند. ما نتایجی را که در شش سال اخیر منتشر شده‌اند، همراه با بهترین نتیجه که حساسیت به انرژی اتصال در منطقه نویز سفید پایین تر از h 2000 داشت را منظور کرده‌ایم.

باید یادآوری کنیم که این شکل و نمودار تنها راهی است برای ارائه اطلاعات گروههای مختلفی که در این زمینه فعال هستند



و نباید به آن به چشم رقابتی برای دستیابی به بهترین عملکرد نگاه کرد. این مطلب بخصوص از آنجایی درست است که اطلاعات گزارش شده برای تحقیق در مورد تأثیرات دیگر یا ایده‌های جدید انجام می‌شوند تا دستیابی به آخرین حد حساسیت.

در نمودار نتایج خوب نویز را که توسط دو گروه مختلف با استفاده از مجموعه‌ای از DC-SQUID 100 به دست آمده‌اند تا سیگنال نویز پایین DC-SQUID را تقویت کنند، اضافه کرده‌ایم. تفاوت اصلی میان این دو شیوه در سیم پیچ ورودی است، در حقیقت ابزار NIST از القای ورودی $25\mu\text{H}$ استفاده می‌کند و برای کاربرد از فرکانس

پایین مناسب است، و ابزار IBM، 10 nH کوچکتر، اما القای ورودی با اتصال بهتر دارد و برای کاربرد از فرکانس بالا مناسب است.

گروههای بسیاری توجه خود را بر مشکل تشدید متمرکز کرده‌اند. راه اولیه برای پیشروی، متعلق به گروه آکسفورد است که برای اینکه حداکثر استفاده از تشدید سیم پیچ ورودی با تطابق فرکانس تشدید $1/4$ میکروویو بر فرکانس پلاسمای SQUID برای آرام کردن شرایط هیستریزس و برای داشتن ابزاری که پاسخ‌دهی بسیار بالای ولتاژ به شار داشته باشد ببرند، تلاش کرده‌اند. برای حصول چنین نتیجه‌ای، یک القای ورودی کوچک مستقیماً به SQUID متصل شده و یک ترانسفورماتور ابررسانا القای ورودی کوچک را با سیم پیچ ورودی بزرگتر مطابقت می‌دهد. ضریب اتصال کلی حول و حوش 0.5 است.

نمودار نویزی که در شکل گزارش شده، با ترانسفورماتور دوبله به دست نمی‌آید بلکه با همان ابزاری که تنها به SQUID ثانویه به عنوان تقویت کننده متصل شده، حاصل می‌شود. گروه IBM ظرفیت ساختگی سیم پیچ ورودی را که خطوط طرح سیم پیچ ورودی را به مقدار زیر $1 \mu\text{m}$ محدود می‌کنند، کاهش دادند، که تشدیدهای خاص را به فرکانس بالاتر رساندند و اجازه دادند خصوصیات ولتاژ-شار یکدست و رفتار ابزار منظم شوند؛ نویز پایین $1/f$ شاید بیشتر ناشی از کیفیت فرآیند تولید باشد تا خطوط محدود شده برای دستیابی به همان تأثیر، دیگر گروهها باید به دقت با استفاده از مقاومتهای مناسب، تشدیدها را به ورودی تغییر جهت دهند.

با توجه به نتایجی که [14] Seppa و دیگران به دست آورده‌اند، یادآوری می‌شویم که اطلاعات از مقاله‌ای اقتباس شده اند که بر تأثیر چگالی جریان بحرانی بر نویز $1/f$ متمرکز شده بود، این مقاله همچنین اطلاعاتی را از یک ابزار مشابه با چگالی جریان بحرانی پایین تر و سطح $1/f$ بهتر و نویز سفید بالاتر نشان داد.

اندازه‌گیریهای نویزی با حساسیت بالای DC-SQUID و کمترین دما در دانشگاه ماری لند انجام شده است. مولفین به حساسیت به انرژی 35 h در 35 mk دست یافتند. مولفین روی یک تراشه یک ترانسفورماتور ابررسانای دوبله را ترکیب کردند که سیم پیچ ورودی و SQUID بازخوانی شده را جایگزین می‌کند.

گروهی نیز از یک هندسه چند و اشری که ترکیبی از چندین و اش به طور موازی، با القای ورودی $0.5 \mu\text{H}$ بود و به سختی و شدت به القای ورودی ابزار متصل شده بود (15 pH) استفاده کرد. حساسیت به انرژی اتصال یافته اندازه گیری شده از قرار $5/5 \text{ h}$ در 0.8 k کمی کوچکتر از مقداری است که در تئوری انتظار آن می‌رفت. شاید هندسه پیچیده آن این نتیجه را توضیح بدهد. در حقیقت القای ابزار از دو بخش در سری ساخته شده که توسط ظرفیت تغییر جهتی مقاوم ساز موازی بزرگی جدا شده است که در فرکانس جوزفسون کوچک است و القای موثر ابزار را کاهش داده و عملکرد را بهبود می‌بخشد: که شاید توضیحی برای این باشد که چرا y_1 که به طریق تجربی به دست آمده، از 8 کوچکتر است. ظرفیتی که برای جلوگیری از تشدیدهای بالا در اجزای برجسته (یکی شده) ابزار، تغییر جهت داده شده، شاید همچنین تأثیر کارآمدی در جدا کردن اتصال تشدیدها در ورودی داشته باشد.

عملکرد درونی یک DC-SQUID به آسانی تحت تأثیر عوامل بسیاری خراب می‌شود. یکی از مطالعات اخیر نشان داده که نویز اضافی در DC-SQUID ها می‌تواند ناشی از وصل و جداسازی و رتکس ها (گرداب ها) باشد. این تأثیر را می‌توان با انجام تکنیک مغناطیس زدایی فرکانس بالا یا حداقل در زمینه‌هایی با مغناطیس بالا، با احاطه پیوندهای جوزفسون با سوراخ‌های بلند و باریک، همانطوری که در مورد مدارهای دیجیتالی آزمایش شده، کاهش داد.

417.

- [8] P. Falferi, M. Bonaldi, M. Cerdonio, A. Vinante, S. Vitale, Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 3859 and this conference.
- [9] D.D. Awschalom, J.R. Rozen, M.B. Ketchen, W.J. Gallager, A.W. Kleinsasser, R.L. Sandstrom, B. Bumble, Appl. Phys. Lett. 53 (1988) 2108.
- [10] M.B. Ketchen, J.M. Jaycox, Appl. Phys. Lett. 40 (1982) 736.
- [11] R.P. Welty, J.M. Martinis, IEEE Trans. Appl. Supercond. 3 (1993) 2605.
- [12] M. Ketchen, D.J. Pearson, K. Stawiasz, C.-K. Hu, A.W. Kleinsasser, M. Bhushan, IEEE Trans. Appl. Supercond. 3 (1993) 1795.
- [13] K.G. Stawiasz, M.B. Ketchen, IEEE Trans. Appl. Supercond. 3 (1993) 1808.
- [14] H. Seppa, M. Kiviranta, A. Satrapinski, L. Grobner, J. Salmi, I. Suni, IEEE Trans. Appl. Supercond. 3 (1993) 1816.
- [15] R. Cantor, K. Enpuku, T. Ryhonen, H. Seppa, IEEE Trans. Appl. Supercond. 3 (1993) 1800.
- [16] I. Jin, A. Amar, T.R. Stevenson, F.C. Wellstood, A. Morse, W.W. Johnson, IEEE Trans. Appl. Super. 7 (1997) 2742.
- [17] P. Carelli, M.G. Castellano, R. Leoni, G. Torrioli, Appl. Phys. Lett. 72 (1998) 115.
- [18] V. Polushkin, D. Glowacka, R. Hart, John Lumley, Rev. Sci. Instr. 70 (1999) 1713.
- [19] J. Gail, M. Muck, C. Heiden, Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 2663.
- [20] M. Jelery, T. Van Duzer, J.R. Kirtley, M.B. Ketchen, Appl. Phys. Lett. 67 (1995) 1769.

بعنوان جمع بندی ، یادآور می شویم که در طول سالهای اخیر ، پیشرفت ابزارهای بسیاری را دیده ایم که برای کاربردهای محدود کوانتوم مناسب هستند. برای دستیابی به این نتیجه ، تمام گروهها باید از یک SQUID ثانویه یا یک مجموعه SQUID بعنوان مرحله آغازین تقویت کنندگی استفاده کنند. میکروسوسپتومترهای محدود کوانتوم تاکنون به دلیل محدودیتهای نه چندان جدی مربوط به سیم پیچ ورودی وارد عمل شده اند. کاربردهای دیگر به پیشرفت های بیشتری نیاز دارند. آزمایشات انجام شده در هر مورد نشان می دهند که ساخت SQUID هایی را که به خوبی با سیم پیچ ورودی متصل شده باشند و حساسیت به انرژی از قرار h کم به دست بیاورند، امکان پذیر است.

منابع:

- [1] J.C. Gallop, SQUIDS, the Josephson Effect and superconducting Electronics, Bristol, Philadelphia and New York, Adam Hilger, 1991.
- [2] E. Coccia, Proceedings of XXII International Conference on Low Temperature Physics, August 4-11, 1999.
- [3] S. Buchman, Proceedings of XXII International Conference on Low Temperature Physics, August 4-11, 1999.
- [4] M. Muck, J. Gail, C. Heiden, M. AndreH , J. Clarke, Proceedings of XXII International Conference on Low Temperature Physics, August 4-11, 1999.
- [5] J. Clarke, in SQUID sensors: Fundamental, Fabrication and Applications, H. Weinstock (Ed.), Kluwer Academic Publishers, the Netherlands, 1996.
- [6] R.H. Koch, D.J. Van Harlingen, J. Clarke, Appl. Phys. Lett. 38 (1981) 380.
- [7] J.C. Gallop, B.W. Petley, J. Phys. E: Sci. Instrum. 9 (1976)