

اسکوئید dc، انکوئید و نانواسکوئید "پیش بینی رفتارها با استفاده از حل تحلیلی معادله فوکر - پلانک"

محمد اعتصامی^۱ و محمدعلی شاهزمانیان^۲

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه یزد، خیابان پژوهش، یزد
۲. گروه فیزیک، دانشگاه اصفهان، خیابان هزارگریب، اصفهان

چکیده

ما با تعریف القابیدگی حلقه انکوئید، در نظر گرفتن بسط فوریه سینوسی برای رابطه جریان - فاز هر نانوسیم آن، و جایگزین کردن یک معادله فوکر - پلانک دو بعدی به جای دو معادله لاجون، روابط تحلیلی برای رفتارهای انکوئید نامتقارن به دست آورده ایم. از طرف دیگر علاوه بر مورد انکوئید، در مورد اسکوئیدهای dc و نانواسکوئید هم، در نظر گرفتن همزمان آثار انحراف رابطه جریان - فاز از شکل سینوسی، آثار افت و خیزها و نوفه‌ها و آثار مربوط به یکسان نبودن دو ارتباط (دو پیوندگاه یا دو اتصال) ضعیف روی رابطه جریان - ولتاژ قطعه لازم می‌باشد و واقعیتهای متعددی ارائه روابط تحلیلی دقیقتر و استفاده از آنها را در پیش بینی رفتارها طلب می‌نمایند.

واژه‌های کلیدی: اسکوئید dc، انکوئید، نانو اسکوئید، معادله فوکر - پلانک

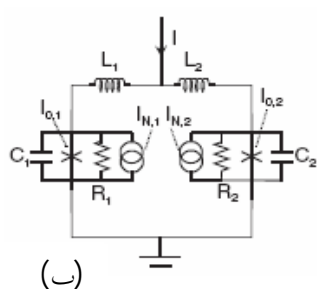
۱. مقدمه

قطعات تداخل کوانتومی ابررسانایی، به ویژه قطعه‌های دو پیوندگاهی از جالبترین و مفیدترین دستگاه‌ها می‌باشند [۱] و لازم است که بیش از پیش در اولیتهای پژوهشی ما قرار گیرند. دو نوع جدید قطعه‌های دو پیوندگاهی (دو نانو قطعه جدید) که از نظر علم مقیاس نانو و فناوری نانو هم جالب توجه‌اند، انکوئید [۲ و ۴] و نانواسکوئید [۵ و ۶] می‌باشند. در شکل ۱ اسکوئید dc، انکوئید و نانو اسکوئید با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

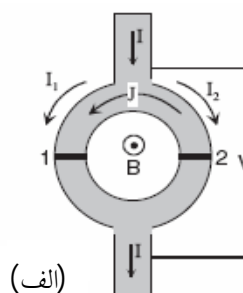
هرچند انواع و اشکال متعددی از ارتباطهای ضعیف ابررسانایی [۷ و ۸] ساخته و بررسی شده‌اند، منطقی به نظر می‌رسد که جریان کل هر پیوندگاه مطابق شکل ۱ ب شامل چهارسهم: ابرجریان، جریان عادی (شبه ذره)، جریان جا به جایی و جریان افت و خیز در نظر گرفته شود [۹]. حتی در مورد هر یک از ارتباطهای ضعیف انکوئید [۱۰ و ۱۲] و اسکوئید نانولوله

کربنی هم این فرض قابل قبولی می‌باشد. در این خصوص در نظر گرفتن رابطه مناسب برای هر یک از سهمهای جریان [۹] و اعمال تقریبهایی که بر اساس آنها بتوان روابط تحلیلی [۱۰ و ۱۵] برای مشخصه جریان - ولتاژ قطعه و دیگر مشخصه‌های آن به دست آورد، دو اقدام اساسی می‌باشند. در این راستا مسائل زیادی وجود دارد.

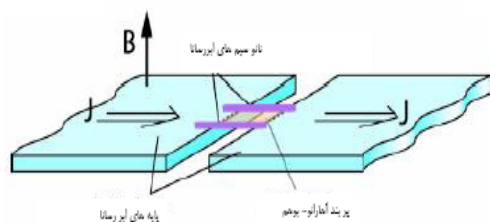
رابطه هر یک از سهمهای جریان در نانوسیمهای انکوئید بسته به طول، قطر و شرایط فیزیکی نانوسیمها متفاوت است [۱۰]. در مورد نانواسکوئید، محصورسازی کوانتومی در هر ارتباط، مشابه وضعیت مربوط به یک نقطه کوانتومی، ساختاری از ترازهای انرژی گسسته ایجاد می‌کند که می‌توان آن را با ولتاژهای الکتروستاتیکی درجه‌ها، یعنی V_{G1} و V_{G2} تنظیم کرد. به علاوه الکتروود دیگری که در پشت قرار گرفته است می‌تواند شفافیت سدهای نقطه کوانتومی را تغییر دهد. به این ترتیب پیوند بین حالت‌های هر نقطه کوانتومی با ابررساناهای



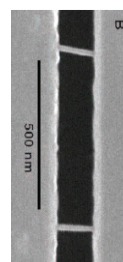
(ب)



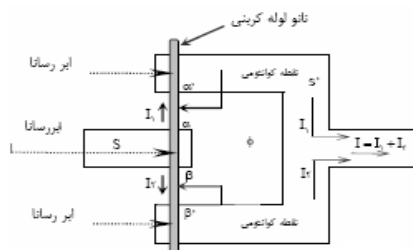
(الف)



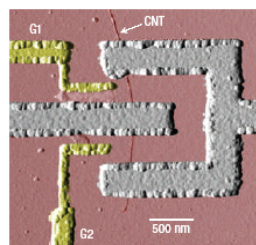
(ت)



(پ)



(ج)



(ث)

شکل ۱. (الف) شکل یک اسکویید dc. (ب) مدار معادل آن [۱]. (پ) تصویر میکروسکوپی SEM انکوئید که در آن دو مولکول DNA روی دو پایه دارای ابعاد مزوسکوپی قرار گرفته و مولکولها و سطح پایه‌ها با آلیاژ ابررسانای $\text{Mo}_{78}\text{Ge}_{21}$ روکش داده شده‌اند [۲]. (ت) طرحی از انکوئید که در آن اتصال نانوسیمهای ابررسانا (دارای ابررسانایی ضعیف و یک‌بعدی) به فیلمهای نازک ابررسانا (دارای ابررسانایی دو‌بعدی) نشان داده شده است [۳]. از این قطعه به‌عنوان یک شیب‌سنج فاز برای بررسی چگالی موضعی ابرشاره استفاده شده است [۴]. (ث) تصویر AFM یک اسکویید نانولوله کربنی (CNT-SQUID یا نانواسکویید) دارای دو دریچه جانبی G_1 و G_2 که ارتباطهای ضعیف آن را دو نانولوله کربنی تک‌دیواره (قطر هر کدام حدود ۱ nm و طول هر کدام حدود ۲۰۰ nm) ایجاد می‌کنند. حلقه ابررسانای این قطعه از A1 می‌باشد [۵]. (ج) طرحی از اسکویید نانولوله کربنی که نشان می‌دهد در این نانواسکویید دو ارتباط ضعیف نقش دو نقطه کوانتومی را دارند که هر یک بین دو ابررسانا واقع شده است [۵] و [۶].

بهره‌گیری از دریچه‌ها می‌توان به‌طور مستقیم تداخل فاز کوانتومی جفتهای کوپری که در حلقه ابررسانای قطعه می‌چرخند را تنظیم نمود. مدولاسیون بهینه جریان قطع و وصل با شار مغناطیسی در شرایطی به دست می‌آید که هر دو اتصال نقطه کوانتومی در حالت روشن یا خاموش باشند، به‌ویژه طراحی نانواسکویید این امکان را فراهم می‌کند که این ارتباطهای جوزفسونی نانولوله کربنی را به‌عنوان اتصالاتی π

متصل به آن کنترل می‌شود، به‌گونه‌ای که روابط جریانهای مذکور با تغییر دادن V_{G1} و V_{G2} و ولتاژ دوسر قطعه V_{sd} به‌طور انتخابی تغییر داده می‌شوند [۵] و [۶].

در انکوئید جریانهای چرخشی که میدان مغناطیسی در پایه‌ها ایجاد می‌کند، اختلاف فاز پارامتر نظم در دو سر هر نانوسیم را تغییر می‌دهد، و در نتیجه افت‌وخیزها در نانوسیمها توسط میدان مغناطیسی مدوله می‌شوند [۳]. در نانواسکویید با

تحت کنترل دریاچه به کار برد. یعنی علامت رابطه جریان - فاز در اتصالهای نانولوله کربنی را می‌توان توسط ولتاژ دریاچه تنظیم نمود [۵].

انکویید و نانواسکویید دو نانو قطعه جدید حساس برای اندازه‌گیری میدانهای مغناطیسی موضعی هستند. از انکویید به عنوان شیب‌سنج فاز استفاده شده است [۴] و امید زیادی هست که اسکویید نانولوله کربنی را برای مطالعهٔ وارون شدن مغناطش یک مولکول یا یک ذره مغناطیسی که روی یکی از دو ارتباط نانولوله کربنی قرار گرفته باشد به کار رود [۵].

۲. فرمول‌بندی

ما معادلهٔ فوکر - پلانک زیر

$$\begin{aligned} & \frac{L}{R_1 + R_2} \frac{\partial}{\partial t} I + \left(\frac{pL}{\Phi_0} \bar{I} + r f_x \right) \frac{\partial}{\partial j} I - \frac{\partial}{\partial f} \left[(f - f_x^*) I \right] - r f \frac{\partial}{\partial j} I - \\ & a \left(\frac{\partial^2}{\partial f^2} + \frac{\partial^2}{\partial j^2} \right) I = \frac{p}{2\sqrt{2}} \sum_{n=1}^N b_n \left\{ \cos \left(nj + q_n - \frac{p}{4} \right) \frac{\partial}{\partial f} \left[I \sin \left(nf + \frac{p}{4} \right) \right] + \right. \\ & \left. \cos \left(nj - q_n + \frac{p}{4} \right) \frac{\partial}{\partial f} \left[I \sin \left(nf - \frac{p}{4} \right) \right] + \cos \left(nf + \frac{p}{4} \right) \times \right. \\ & \left. \frac{\partial}{\partial j} \left[I \sin \left(nj + q_n - \frac{p}{4} \right) \right] + \cos \left(nf - \frac{p}{4} \right) \frac{\partial}{\partial j} \left[I \sin \left(nj - q_n + \frac{p}{4} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن $I(t, f, j)$ چگالی احتمال یافتن قطعهٔ دوپیوندگاهی در حالت (f, j) در لحظه t ، L القاییدگی حلقهٔ قطعه، R_i مقاومت معمولی پیوندگاه i ام $(i=1, 2)$.

$$\begin{aligned} f &= (q_1 - q_2)/2, j = (q_1 + q_2)/2, a = L/4L_F, L_F = (\Phi_0/2p)^2/k_B T, \\ f_x^* &= f_x + (pL/2\Phi_0)(rI + I_1 - I_2), q_n = \tan^{-1} \left[\frac{(1-r)I_n^{(2)}}{(1+r)I_n^{(1)}} \right] \\ r &= (R_1 - R_2)/(R_1 + R_2), \bar{I} = [I + r(I_1 - I_2)]/2, I_1 + I_2 = I, \\ b_n &= (\sqrt{2}L/\Phi_0) \left\{ \left[(1+r)I_n^{(1)} \right]^2 + \left[(1-r)I_n^{(2)} \right]^2 \right\}^{1/2}, f_x = p(2ab)B/\Phi_0 \end{aligned}$$

هستند. q_i ، اختلاف فاز پارامتر نظم ابررسانایی در دو طرف پیوندگاه i ام و $I_n^{(i)}$ ها، ضرایب بسط رابطهٔ جریان - فاز، را جایگزین دو معادلهٔ لنگوین قطعه نموده و روابط تحلیلی تقریبی برای مشخصه جریان - ولتاژ، مقاومت ایستایی، تابع انتقال، تابع حساسیت انرژی و رابطهٔ حداکثر تغییر ولتاژ در اثر اعمال میدان را به دست می‌آوریم [۱۰ و ۱۲]. به دلیل بزرگ بودن روابط به دست آمده، علاقه‌مندان به این فرمول‌بندی را به مرجع

[۱۱] ارجاع می‌دهیم.

۳. بحث‌ها

فرمول‌بندیها تحلیلی برای بررسی رفتارهای قطعات دوپیوند-گاهی و بهینه‌سازی آنها مهم و ضروری شناخته شده‌اند [۱۳] و [۱۵] و فرمول‌بندی ما کلی‌ترین فرمول‌بندی تحلیلی تقریبی است که تاکنون ارائه شده است. روابط ما آثار عدم تقارنی و تقارنی مورد انتظار را برآورده می‌کنند و در موارد خاص هم به صورت‌های مورد انتظار درمی‌آیند. انکویید، نانواسکویید و اسکویید معمولی هر کدام روابط خاص خودشان برای توابعی که در این فرمول‌بندی وارد می‌شوند، را دارند. روابط جریان - فاز، مقاومت طبیعی، جریان بحرانی پیوندگاهها، همچنین القاییدگی و عامل بهنجارش تابع توزیع احتمال و پارامترهایی مانند دماهای بحرانی و طولهای همدوسی و جریان بایاس در تعیین رفتار قطعه مهم می‌باشند. شکل روابط جریانهای افت‌وخیز و مقاومت‌های عادی با توجه به شرایط قطعه و اهمیت هر نوع از افت و خیزها یا نوفه‌ها تعیین می‌شود. القاییدگی L و عامل بهنجارش را برای بازه‌های وسیع از شرایط تجربی، نمی‌توان ثابت فرض کرد. در تقریب مرتبهٔ اول عامل $\sum_{s=1}^N (pb_s/2 + d_{s,n})$ از روابط ما خارج می‌شود، در نتیجه در این تقریب سهم‌های هماهنگ‌های مختلف در مشخصه‌های قطعه به طور ساده با هم جمع می‌شوند. انحراف رابطهٔ جریان - فاز از شکل سینوسی ایده‌آل کاملاً رایج و معمول است و در نظر گرفتن سهم هماهنگ‌های مرتبهٔ بالاتر در بسیاری از موارد لازم می‌باشد. نکتهٔ جالب در مورد فرمول‌بندی ما فرض وجود هماهنگ‌های مستقل در رابطهٔ جریان - فاز و همچنین امکان بررسی سهم هر هماهنگ در مشخصه‌های قطعه (ارتباط یا پیوندگاه) حداقل تحت شرایط معینی می‌باشد. از طرف دیگر مسائل فیزیکی مهمی مانند بازتاب‌های متوالی شبه‌ذرات بین دو مرز، حالت‌های مقید آندریو، بلوکه‌شدن کولمبی و اثر کاندو در نانوپیوندگاهها مطرح هستند، [۵، ۶ و ۸]، که فرمول‌بندی ما در بررسی آنها ممکن است مفید باشد.

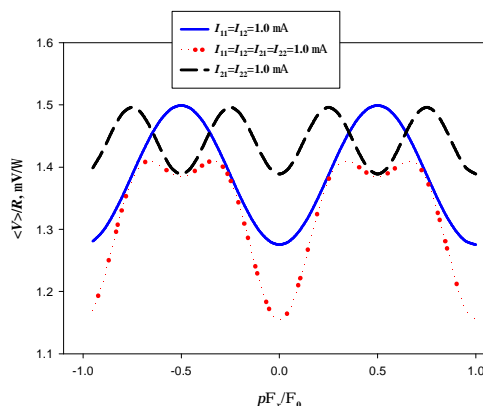
که در آن آثار تداخلی قابل بررسی است و همچنین چگونگی تأثیر میدان روی نمودار مقاومت بر حسب دما با قطعه‌های تداخل کوانتومی دیگر اختلافهای برجسته‌ای دارد. نتایج فرمول‌بندی ما با نتایج مذکور همخوانی دارد [۱۱].

طبق فرمول‌بندی ما، در یک قطعه متقارن هماهنگهای زوج و فرد در تابع تبدیل و تغییر ولتاژ نقشهای متفاوتی دارند. در تقریب مرتبه اول هماهنگهای زوج نقشی ندارند. و این ابلاغی به گرینبرگ و همکاران [۱۵] است که در ادامه کارهای خود فقط به هماهنگ اول و دوم فکر نکنند. حداقل یک بررسی روی نقش هماهنگ اول و سوم هم داشته باشند.

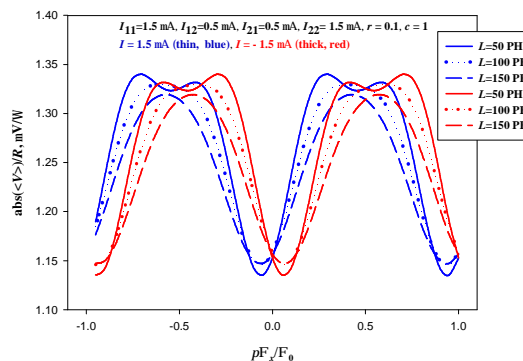
در مورد اثر حضور هماهنگ دوم برای قطعه متقارن فرمول‌بندی گرینبرگ و همکاران [۱۵] حتی بر خلاف انتظار خودشان منحنی خط‌چین در شکل ۲ را به دست نمی‌دهد. به طور کلی فرمول‌بندی ما از نظر توضیح در مورد سهم هماهنگهای مختلف کارآمدتر می‌باشد.

جا به جایی منحنی ولتاژ بر حسب شار تحت معکوس کردن جهت جریان بایاس (شکل ۳)، بررسی و اندازه‌گیری پارامترهای عدم تقارن را علی‌الاصول امکان‌پذیر می‌سازد.

با افزایش القایدگی میزان تغییر ولتاژ کاهش می‌یابد. افزایش القایدگی می‌تواند تغییر شکل نمودار ولتاژ بر حسب شار را هم به دنبال داشته باشد. این دو مورد برای قطعه متقارن هم مصداق دارد. بررسی و تشخیص دقیق و بدون ابهام نقش عواملی که مشخصه‌های قطعه دو پیوندگاهی را کنترل می‌کنند، به هماهنگ کردن این بررسی‌های نظری با یک مجموعه کارهای تجربی جهت‌مند نیاز دارد.



شکل ۲. آثار حضور هماهنگ دوم در رابطه جریان- فاز پیوندگاههای یک اسکویید DC متقارن روی منحنی ولتاژ بر حسب شار آن. برای هر سه مورد $L = 20$ PH، $I = 1/5 \mu A$ ، $c_1 = 1$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. اثر معکوس کردن جهت جریان بایاس روی منحنی ولتاژ بر حسب شار برای اسکویید نامتقارن. در این شکل کاهش دامنه تغییر ولتاژ و حتی تغییر شکل منحنی ولتاژ بر حسب شار در اثر افزایش القایدگی هم مشاهده می‌شود.

۳. نتیجه‌گیری

در مراجع [۲] و [۳] تأکید شده‌است که انکویید از نظر دوره تناوب تغییرات مغناطو مقاومت با میدان مغناطیسی، بازه دمایی

مراجع

- 53.
6. S Duhot and R Melin, *Phys. Rev. B* **77** (2008) 014525.
7. K K Likharev, *Rev. Mod. Phys.* **51** (1979) 101.
8. A A Golubov et al., *Rev. Mod. Phys.* **76** (2004) 411.
9. K K Likharev, *Dynamics of Josephson Junctions and Circuits*, OPA (1986).
1. J Clarke and A I Braginski (eds), “*The SQUID Handbook*” Wiley-VCH (2004).
2. D S Hopkins et al., *Science* **308** (2005) 1762.
3. D Pekker et al., *Phys. Rev. B* **72** (2005) 104517.
4. D S Hopkins et al., *Phys. Rev. B* **76** (2007) 220506(R).
5. J P Cleuziou et al., *Nature Nanotechnology*, **1** (2006)

- Chesca, *IEEE, Trans. App. Superconductivity*, **9** (1999) 2955.
14. Ya S Greenberg, *physica C* **371** (2002) 156; Ya S Greenberg, *physica C* **383** (2003) 354; Ya S Greenberg and I L Novikov, *physica C* **433** (2006) 212.
15. Ya S Greenberg et al. , *Eur. J. Phys. B* **44** (2005) 57.
10. M A Shahzamanian, M Eatesami, and H Yavary, *Supercond. Sci. Technol.* **20** (2007) 640.
11. M A Shahzamanian, M Eatesami and H Yavary, *Ann. Phys.* **322** (2007) 2501.
12. M A Shahzamanian, M Eatesami and H Yavary, proceeding of *MSM07 conference*, Khiva, Uzbekistan (2007).
13. B Chesca, *J. Low Tem. Phys.* **112** (1998) 165; B