

коэффициента распыления при малых эквивалентных плотностях тока. Наблюдаемый коэффициент распыления близок к величине, найденной в работе [6] для системы $SiO_2/Ar^+/XeF_2$, что указывает на близость механизмов стимулированных процессов травления двуокиси кремния, в которых используются для доставки фтора на поверхность фторсодержащие радикалы и молекулы XeF_2 .

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Ивановский Г.Ф., Петров В.И. Ионно-плазменная обработка материалов. М.: Радио и связь, 1986. 232 с.
- [2] Mizutani T., Nishimatsu S. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1988. V. 6. N 3. P. 1417-1420.
- [3] Gerlach - Meyer U., Coburn T.W., Kay E. // Surf. Sci. 1981. V. 103. N 1. P. 177-188.
- [4] Oostrad J., Haring A., de Vries A.E., Sanders F.H.M., Miyake K. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 46. N 12. P. 1166-1168.
- [5] Picard A., Turban G., Grollean B. // J. Phys. D. Appl. Phys. 1986. V. 19. N 6. P. 991-1005.
- [6] Tu Y.Y., Chuang T.J., Winters H.F. // Phys. Rev. B. 1981. V. 23. N 2. P. 823-835.

Институт проблем технологии
микроэлектроники и особочистых
материалов АН СССР

Поступило в Редакцию
3 мая 1989 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 15

12 августа 1989 г.

05.4; 09

БЕЗГИСТЕРЕЗИСНЫЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ВЧ-СКВИДА
ИЗ $YBa_2Cu_3O_x$ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 4.2 К

В.М. Закосаренко, Е.В. Ильичев,
В.А. Тулин

В работах [1, 2] была показана возможность создания высокочастотного (ВЧ) сквида на основе керамики $YBa_2Cu_3O_x$, работающего при температуре кипения жидкого азота. Это стимулировало дальнейшие исследования свойств керамических датчиков однодюрной [3] и шиммермановской конструкции [4, 5], в которых роль слабой связи играло механически изготовленное сужение макроско-

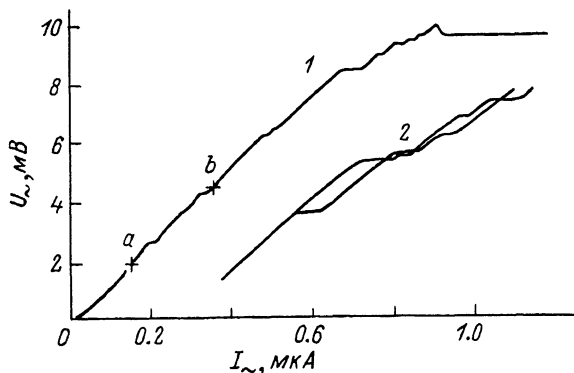


Рис. 1. ВЧ ВАХ сквида на промежуточной стадии утоньшения перемычки. Кривые (2) соответствуют участку (а, в) кривой (1), увеличенному на 10 дБ, и записаны при разных значениях постоянного магнитного потока в отверстии датчика.

пических размеров. В данной статье представлены результаты исследования работы керамического сквида в безгистерезисном режиме в жидком гелии.

Исследовались однодырочные цилиндрические датчики длиной 4–6 мм с отверстием $\varnothing 1.2$ мм, толщиной стенки 0.5–1 мм с прорезью по образующей, в которой формировалась перемычка. В отверстие помещалась катушка связи, диаметром 1 мм, намотанная медным проводом $\varnothing 0.1$ мм в один слой, включенная в контур с резонансной частотой 20–30 МГц, ненагруженной добротностью $Q \approx 70$. Записывались зависимости амплитуды высокочастотного напряжения на контуре U_{\sim} от амплитуды тока накачки I_{\sim} (ВЧ ВАХ) и зависимости U_{\sim} от постоянного тока через катушку связи I_{\pm} при фиксированной I_{\sim} (сигнальная характеристика сквида). Схема измерений подробнее изложена в [1]. Все измерения проводились в жидком гелии в сверхпроводящих экранах.

Мы начинали записывать ВЧ ВАХ керамического датчика при характерных размерах перемычки ~ 120 мкм. После измерений проводилось утоньшение перемычки на $\sim 20\%$. В результате последовательности этих действий мы получили ВЧ ВАХ датчика, изображенную на рис. 1. Как видно из рисунка, при больших токах накачки (для данного сквида – больше 0.9 мкА) на ВЧ ВАХ наблюдается плато, а при меньших токах виден ряд особенностей. Как было показано ранее [3], плато соответствует возникновению в перемычке критического состояния, которое формируется под воздействием ВЧ-токов, поэтому положение плато не зависит от постоянного магнитного потока Φ , в то время как особенности ВАХ при меньших токах возникают в результате движения отдельных вихрей магнитного потока в материале перемычки. Положение этих особенностей зависит

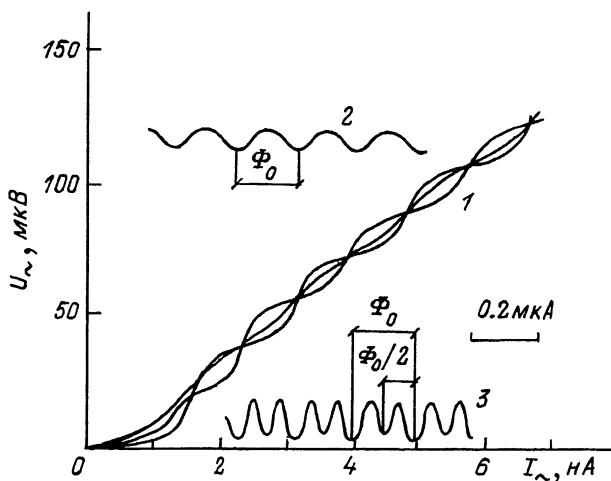


Рис. 2. ВЧ ВАХ сквида в безгистерезисном режиме (1) при расстройке $\xi = 0.002$, записанные при магнитном потоке в отверстии датчика $h\Phi_0$, $(n + \frac{1}{2})\Phi_0$, $(n + \frac{1}{4})\Phi_0$. Сигнальные характеристики даны при уровне накачки $I_n = 6.5$ нА (2) и $I_n = 1.5$ нА (3). Масштаб I_n по горизонтальной оси указан отрезком.

от постоянной составляющей циркулирующего тока, наведенного в датчике сквида.

После дальнейшего утоньшения перемычки были получены характеристики, представленные на рис. 2. ВЧ ВАХ записаны при целом и полуполом числе квантов магнитного потока в кольце датчика. На этом же рисунке показаны сигнальные характеристики, записанные при различных I_n .

Представленные на рис. 2 зависимости характерны для безгистерезисного режима работы ВЧ-сквида, когда критический ток слабой связи (I_c) достаточно мал, так что $I \equiv 2\pi L_S I_c / \Phi_0 < 1$, где L_S - индуктивность кольца сквида, а $\Phi_0 = \pi \hbar / e \approx 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вб}$ - квант магнитного потока. В частности, в безгистерезисном режиме из-за изменения параметрической индуктивности джозефсоновского контакта при частоте накачки f вблизи резонансной частоты контура f_0 и при малых токах накачки период сигнальной характеристики становится равным $\Phi_0/2$, что и наблюдается в наших экспериментах (рис. 2, кривая 3). Аналогичные результаты при исследовании ниобиевых сквидов с точечными контактами были получены в [6]. При увеличении расстройки $\xi = f/f_0 - 1$ сигнальная характеристика периодична с периодом Φ_0 .

Для количественных оценок характеристик сквида мы использовали решения уравнений, предложенных в [7] для описания дат-

чика сквида, индуктивно связанного с резонансным контуром:

$$2\delta = \frac{1}{Q} + \frac{k^2}{1+g^2} \left[g - \lg \frac{2J_1(z)}{z} \cos \varphi \right], \quad (1)$$

$$2\xi = 2\xi_0 + \frac{k^2}{1+g^2} \left[-g^2 - \lg \frac{2J_1(z)}{z} \cos \varphi \right]. \quad (2)$$

Здесь δ - затухание с учетом влияния сквида, $g = 2\pi f L_S / R_n$ - добротность датчика на частоте накачки, R_n - сопротивление слабой связи, ξ_0 - расстройка контура при разомкнутом кольце сквида. $J_1(z)$ функция Бесселя первого рода, аргумент которой $z = a/\sqrt{1+g^2}$, а $\varphi = 2\pi\Phi/\Phi_0$, где $a = 2\pi\mu_n M/L\Phi_0$ - нормированная амплитуда колебаний в контуре, M - коэффициент взаимной индукции. Коэффициент связи k определяется из соотношения $M = k\sqrt{L_S L}$, где L - индуктивность резонансного контура.

Экспериментальное определение параметров сквида в соответствии с уравнениями (1), (2) проводилось следующим образом. Сначала при большой амплитуде накачки, когда вторым членом в квадратных скобках (1) можно пренебречь ($2J_1(z)/z \rightarrow 0$ при $z \rightarrow \infty$) измерялась резонансная частота и добротность контура со сквидом. Измеренная добротность контура со сквидом менее чем на 10% отличается от добротности ненагруженного контура, т.е. из (1) следует либо $g \gg 1$, либо $g \ll 1$. В нашем эксперименте реализуется второй случай, т.к. в первом случае в соответствии с (2) наблюдалась бы деградация сигнальной характеристики. Поэтому в дальнейшем мы пренебрегали g . Резонансная частота контура $f_0 = 20.54$ МГц в соответствии с (2) определяет ξ_0 . Относительно этой частоты затем и измерялась расстройка ξ .

Для определения l и k измерялись резонансные частоты контура с датчиком при различных значениях I_{\pm} и при малой накачке $z < 0.1$, когда можно считать $2J_1(z)/z \simeq 1$. Максимальная расстройка $|\xi|$ наблюдается для целого и полуцелого числа квантов потока в кольце датчика сквида ($\cos \varphi = \pm 1$). Соответствующие частоты оказались: $f_1 = 21.16$ МГц, $f_2 = 19.50$ МГц. Отметим, что $|f_1 - f_0| \neq |f_2 - f_0|$, т.е. в (2) необходимо учесть следующий член разложения решения по функциям Бесселя. С учетом $g \ll 1$, $a \ll 1$ это было проделано в [8] и были получены следующие формулы:

$$\frac{f_1 - f_0}{f_0 - f_2} = \frac{1-l}{1+l}; \quad \frac{f_1 - f_2}{f_0} = \frac{k^2 l}{1-l^2},$$

из которых получаем $l = 0.25$, $k^2 = 0.32$. M определяется экспериментально, считая $M\Delta I_{\pm} = \Phi$, где $\Delta I_{\pm} = 0.19$ мкА - период сигнальной характеристики сквида (см. рис. 2, кривая 2). Отсюда, зная k и l , получаем $L_S = 3 \cdot 10^{-10}$ Г и из l определяем $I_C = 0.25$ мкА. Коэффициент преобразования $\eta \equiv d\mu_n/d\Phi$ опре-

деленный из сигнальных характеристик, составляет $\gamma = 0.9 \cdot 10^{11} \text{ В/Вс}$, что превосходит лучшие коммерческие сквиды с точечным контактом. Уровень шумов, измеренный на частоте 430 Гц, оказался $\sim 10^{-5} \phi_0 / \sqrt{I_c}$, причем шумы определяются электроникой. Таким образом, полученные датчики оказались просты в изготовлении и вполне конкурентноспособны в качестве измерительных приборов в жидком гелии.

Следует отметить, что исходя из резистивной модели [7], для безгистерезисного режима следует ожидать формально бесконечно большого γ . В специальных исследованиях ниобиевых сквидов с точечным контактом [8] было получено $\gamma \approx 2 \cdot 10^{12} \text{ В/Вс}$. То, что в нашем случае не удалось получить такой величины γ , может свидетельствовать о несунусоидальной токо-фазовой зависимости для слабой связи.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Закосаренко В.М., Ильичев Е.В., Никифорова Т.В., Тулин В.А. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 1389.
- [2] Заварицкий Н.В., Заварицкий В.Н., Петров С.В. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. С. 469.
- [3] Закосаренко В.М., Ильичев Е.В., Тулин В.А. // Письма в ЖЭТФ. 1988. Т. 48. С. 140.
- [4] Шнырков В.И., Цой Г.М., Козырь А.Г., Глянцев В.Н. // ФНТ. 1988. Т. 7. С. 770.
- [5] Веркин Б.И., Карцовник В.В., Павлов Т.П., Павлюк В.А., Таврин Ю.А. // ФНТ. 1988. Т. 7. С. 774.
- [6] Odental M., Petricek V., Tishny R. // J. Low Temp. Phys. 1976. V. 24. P. 187.
- [7] Данилов В.В., Лихарев К.К. // ЖТФ. 1975. Т. 5. С. 1110.
- [8] Шнырков В.И. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. Харьков, 1985.

Институт проблем технологии
микроэлектроники и обособистых
материалов АН СССР

Поступило в Редакцию
6 мая 1989 г.