

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 1

1993

УДК 621.317.4

Н. В. Голышев, Р. Л. Зеленкевич, В. А. Комашко, С. В. Моторин,
В. Л. Носков, Б. М. Рогачевский

(Киев — Новосибирск)

ШУМЫ NbN—Nb₂O₅—Nb-СКВИДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Представлены результаты экспериментального исследования шумовых свойств нового варианта ПТ-сквидов с туннельными переходами NbN—Nb₂O₅—Nb. Шум на частоте 400 Гц — $(1,1-1,4) \cdot 10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$, на частоте 0,1 Гц — $(9 \cdot 10^{-6} - 3 \cdot 10^{-5}) \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$. Созданные сквиды имеют повышенную стабильность к многократному термоциклированию, влиянию влажности и электростатическим разрядам; пригодны для построения высокочувствительных многоканальных систем, например для биомагнитных исследований.

Введение. Сквиды являются основным узлом сверхпроводниковых (СП) средств измерения, определяющим метрологические характеристики этих средств. Среди различных типов сквидов очень малым уровнем собственных шумов (менее $10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$, Φ_0 — квант магнитного потока) обладают сквиды постоянного тока (ПТ-сквиды) на Nb—Al_xO_y—Nb туннельных переходах [1, 2 и др.]. Тем не менее существует интерес к ПТ-сквидам на основе NbN туннельных переходов [3, 4 и др.]. Это связано со стремлением получить ПТ-сквиды с повышенной стабильностью к многократному термоциклированию, влиянию влажности и умеренным электростатическим разрядам. Однако собственные шумы NbN ПТ-сквидов пока заметно выше шумов Nb ПТ-сквидов. Так, белый шум NbN—MgO—NbN ПТ-сквидов, детально исследованных в [4], был порядка $(6 + 8) \cdot 10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ с началом шума вида 1/f на частоте около 100 Гц.

В настоящей работе сообщается о создании и исследовании шумовых свойств еще одного варианта NbN ПТ-сквидов — с туннельными переходами NbN—Nb₂O₅—Nb.

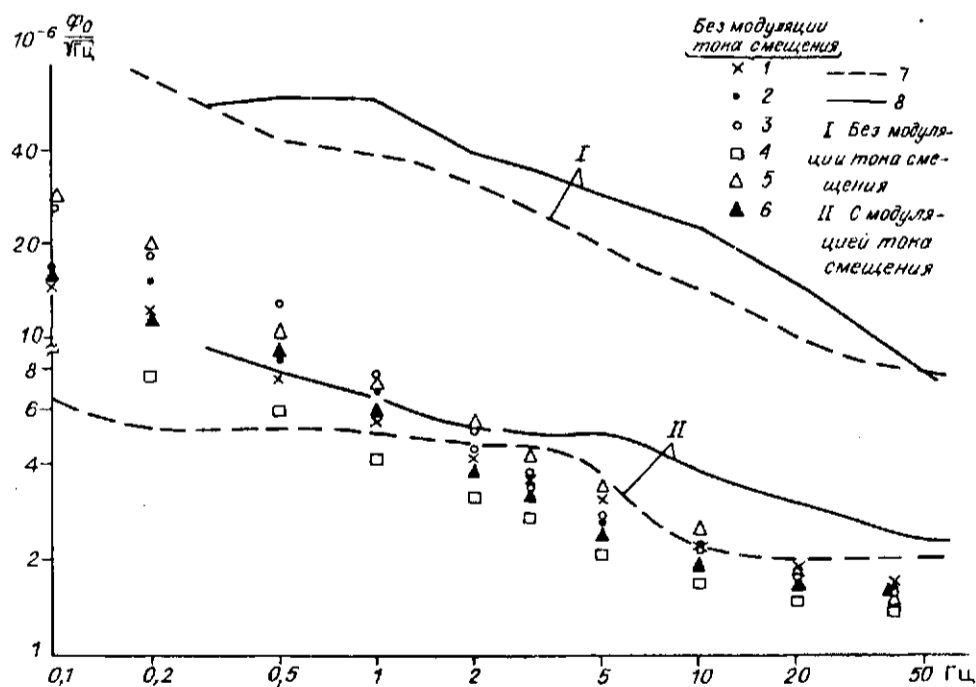
Конструктивно-технологические особенности и параметры NbN—Nb₂O₅—Nb ПТ-сквидов. Пленки NbN получались методом реактивного магнетронного распыления на подложку из окисленного кремния. Барьер (Nb₂O₅) формировался методом ВЧ-окисления в плазме тлеющего разряда. Верхний электрод (Nb) наносился также с использованием магнетронного распыления. Для формирования необходимой топологии слоев применялись стандартные методы фотолитографии. Резистор, шунтирующий туннельные переходы, изготавливался из пленок титана. В качестве защитного покрытия использовались пленки SiO₂. Приведем параметры получаемых двухконтактных интерферометров на основе NbN—Nb₂O₅—Nb туннельных переходов: критический ток одного перехода (I_0) 3 + 5 мкА; резистор, шунтирующий переход (R), 7 + 5 Ом; емкость перехода (C) 10^{-12} Ф; площадь перехода (A) 10 мкм²; центральное отверстие интерферометра 70 × 70 мкм; индуктивность интерферометра (L_S) $1,1 \cdot 10^{-10}$ Гн; параметр $\beta_L = \frac{2L_S I_0}{\Phi_0}$ 0,3 + 0,5; параметр $\beta_C = \frac{2\pi R^2 I_0 C}{\Phi_0}$ 0,45 + 0,38.

Входная катушка индуктивностью около 10^{-6} Гн имела 40 витков, намотанных в два слоя изолированным Nb-проводом диаметром 40 мкм. Двухконтактный интерферометр с индуктивно связанной входной катушкой и катушкой обратной связи помещался в Nb-экран диаметром 6 мм и длиной 15 мм. Последний, в свою очередь, устанавливался в специальную капсулу зонда, погружаемого в жидкий гелий, внешний кожух которой диаметром 10 мм и длиной 100 мм также был выполнен из Nb. Внутри капсулы, кроме того, размещались необходимые контактные площадки, резисторы и конденсаторы, а также согласующий трансформатор с коэффициентом трансформации 1:40. Предварительный усилитель (входной каскад выполнен на транзисторе КП903А), схемы модуляции и демодуляции располагались при комнатной температуре.

Результаты экспериментального исследования. На рисунке приведены кривые зависимости спектральной плотности шума NbN—Nb₂O₅—Nb ПТ-сквидов от частоты, снятые в обычном режиме с обратной связью по магнитному потоку и низкочастотной модуляцией магнитного потока. Измерения проводились при наличии входной катушки с СП-закороченными входными зажимами. Кривые 1—6 получены для различных образцов двухконтактных интерферометров, изготовленных по одной и той же описанной выше технологии. Собственный шум предварительного усилителя — $5 \cdot 10^{-7} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ ($0,6 \text{ нВ} / \sqrt{\text{Гц}}$).

Белый шум (на частоте 400 Гц) от образца к образцу изменялся в пределах $1,1 \cdot 10^{-6} + 1,4 \cdot 10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$ (наименьшее значение — у образцов 4 и 5, наибольшее — у 1 и 3). Разброс значений шума, относительно небольшой в области белого шума (всего лишь 27%), с понижением частоты, как видно из рисунка, существенно увеличивается (на частоте 0,1 Гц — в 3 раза), причем наибольшее ($2,86 \cdot 10^{-5} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$) и наименьшее ($9,45 \cdot 10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$) значения имеют соответственно образцы 4 и 5, у которых белый шум наименьший. Следует заметить, что у всех шести образцов не наблюдался случайный телеграфный шум, а применение модуляции тока смещения приводило к некоторому увеличению шума, и лишь на частотах ниже $0,3 + 0,2$ Гц проявлялась тенденция к его уменьшению.

На рисунке представлены также кривые 1, экспериментально снятые для образцов 7 и 8, имевших заметно выраженный случайный телеграфный шум.



Белый шум ($f = 400$ Гц) у образца 7 — $2,5 \cdot 10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$, у образца 8 — $3 \cdot 10^{-6} \Phi_0 / \sqrt{\text{Гц}}$. Использование модуляции тока смещения для этих образцов приводило к существенному уменьшению шума (кривые *II*), если одновременно с изменением полярности тока смещения изменялась на 180° фаза напряжения, управляющего работой синхронного детектора.

Экспериментально исследовался также динамический диапазон *D* СП-всберметра на базе NbN—Nb₂O₅—Nb ПТ-сквидов. Оказалось, что $D = 20 \times \lg \frac{\Phi_m}{\Phi_{ш}}$ (Φ_m — максимальный магнитный поток на частоте 1 кГц, при котором коэффициент гармоник не превосходит 0,1 %; $\Phi_{ш}$ — белый шум) может быть получен более 130 дБ, если использовать интегратор второго порядка астатизма.

Все исследованные образцы подвергались многократному термоциклированию. За время работы с ними не было ни одного выхода из строя или скольконибудь заметного изменения их параметров. При хранении особых мер предосторожности не требовалось.

ВЫВОДЫ

Созданные ПТ-сквиды на туннельных переходах NbN—Nb₂O₅—Nb обладают приемлемыми шумовыми свойствами для использования их в многоканальных биомагнитных системах, а динамический диапазон таких ПТ-сквидов позволяет применять их и в неэкранированных помещениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Foglietti V., Gallagher W. J., Ketchen M. B. et al. Low frequency noise in $1/f$ noise dc squids // Appl. Phys. Lett.—1986.—49.—P. 1393.
2. Ryhänen T., Seppä H., Cantor R. et al. Noise studies of Uncoupled and Coupled dc squids // SQUID'91.—Berlin, 1991.
3. Kuriki S., Matsuda M., Matachi A. Effects of alternating bias current on the low-frequency noise in dc squids // J. Appl. Phys.—1988.—64(1).—P. 239.
4. Dössel O., David B., Grundler D. et al. Noise properties of NbN—MgO—NbN squids // SQUID'91.—Berlin, 1991.

Поступила в редакцию 26 ноября 1992 г.