

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

05; 12

Журнал технической физики, т. 61, в. 4, 1991

© 1991 г.

## ГИБРИДНЫЙ ПТ РЕСКВИД

С. А. Буш, Р. Л. Зеленевич, В. А. Комашко, Г. С. Кривой, А. М. Чернин

Двухконтактный сверхпроводящий интерферометр, в котором часть сверхпроводящего кольца заменена резистивным участком, называется ПТ ресквидом [1]. ПТ ресквид может быть использован в качестве альтернативного одноконтактному резистивному сквиду [2] датчика в вольтметрах [3], болометрах [4] и шумовых термометрах [5]. В настоящее время известны две работающие конструкции ПТ ресквида: объемная конструкция, в которой точечные контакты настраиваются в жидком гелии, а резистивный участок выполнен в виде пластинки из меди или нейзильбера [6], и ресквид, который выполнен по тонкопленочной технологии с контактами типа мостика переменной толщины и резистивным участком из алюминиевой проволоочки [1].

Обе конструкции неудобны для исследования ресквида. Первая — из-за необходимости настраивать датчик *in situ* и невоспроизводимости характеристик джозефсоновских контактов, вторая — из-за невозможности изменения параметров ресквида. Кроме того, обе эти конструкции требуют дополнительного экранирования.

В данной работе описываются конструкция и результаты экспериментального исследования гибридного ПТ ресквида.

Основой ресквида является многослойный тонкопленочный чип, выполненный на окисленной кремниевой подложке размерами  $1.5 \times 2$  мм. На подложке методом реактивного геттерного магнетронного распыления ниобия на постоянном токе [7] сформированы два туннельных джозефсоновских контакта. В качестве базовых электродов туннельных джозефсоновских контактов служат пленки нитрида ниобия толщиной 0.3 мкм. Материалом для изолирующего барьера является слой окисла ниобия, образованный после предварительной высокочастотной очистки поверхности базовых электродов методом высокочастотного окисления в рабочей смеси, состоящей из 93 % аргона и 7 % кислорода. Необходимая топология контактов сформирована стандартными методами фотолитографии, химического или плазмохимического травления. Каждый из контактов имеет площадь 20 мкм и шунтирован алюминиевым резистором. Чип защищен слоем окиси кремния. Переходы имеют одну общую и две отдельные контактные площадки, при замыкании которых резистивной закороткой образуют ПТ ресквид с контуром квантования  $100 \times 300$  мкм. В качестве резистивного участка использовались пластинки из индия, меди, шунтированной ниобием, и индия, шунтированного свинцом. Сверхпроводящий токоподвод к чипу обеспечивается с помощью пластинок толщиной около 20 мкм из сверхпроводящего сплава, содержащего по 50 % индия и олова. Крепление и экранировка чипа осуществляются с помощью ниобиевой пластинки, прижимающей через майларовую прокладку сверхпроводящие токоподводы к контактным площадкам чипа. Исследуемый ресквид был построен на основе джозефсоновских контактов с параметрами  $I_{c1} = 4.8$  мкА,  $R_{n1} = 5.2$  Ом;  $I_{c2} = 6.7$  мкА,  $R_{n2} = 4.7$  Ом, где  $I_{c1, 2}$  и  $R_{n1, 2}$  — критические токи и нормальные сопротивления первого и второго джозефсоновских контактов.

Для обеспечения рабочего режима ресквида используются два источника тока. Источник тока смещения подключен к первому джозефсоновскому контакту ресквида, второй источник задает ток через резистивный участок. При превышении током смещения некоторой величины  $I_{c \max}$  (называемой нами максимальным критическим током ПТ ресквида) и протекании через резистивный участок тока  $I_r$ , создающего на нем напряжение  $U_r = I_r \cdot R$ , где  $R$  — сопротивление резистивного участка ( $R \ll R_n$ ), на ресквиде появляется напряжение сигнала  $U_b$ . Низкочастотная (по сравнению с частотой генерации контактов) компонента этого сигнала может быть представлена [6] гармонической аппроксимацией вида

$$U_b = U_b + U_q \cos \left[ (2\pi/\Phi_0) \left( \int U_r dt + \text{const} \right) \right].$$

Таким образом, выходной сигнал с амплитудой  $U_q$  будет осциллировать с частотой  $f = U_r/\Phi_0$ ,  $U_b$  — среднее значение напряжения на ресквиде,  $\Phi_0$  — квант магнитного потока.

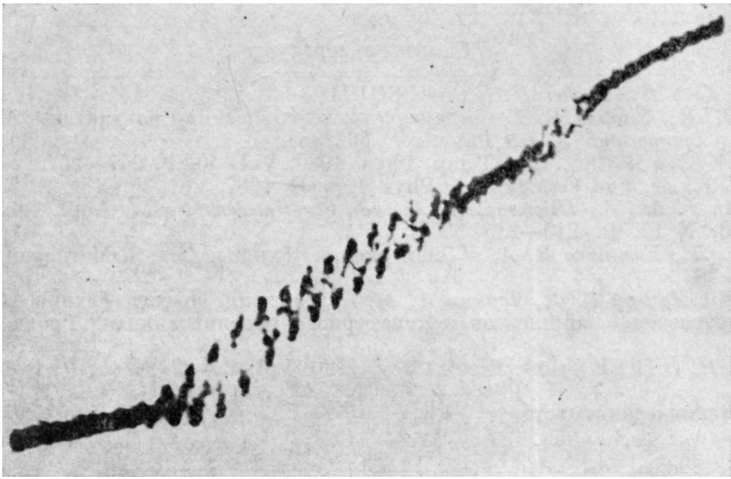


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика ресквида.

Выходной сигнал снимается со второго контакта; для согласования импедансов ресквида и усилителя используются трансформаторы Unipan 233-7-1 (2), в качестве усилителя применен селективный нановольтметр Unipan 237.

При использовании резистивного участка из индия вид вольт-амперной характеристики показан на рис. 1. ПТ ресквид имеет параметры  $I_{c \min} = 5$  мкА,  $I_{c \max} = 9$  мкА,  $R_n = 2.5$  Ом, максимальная амплитуда сигнала около 5 мкВ. На рис. 1 видно немотонное изменение амплитуды сигнала ПТ ресквида. Подобные явления наблюдались в экспериментах [6], но не были поняты. Мы считаем, что они связаны с резонансными явлениями, происходящими в цепи, образуемой емкостями джозефсоновских контактов и индуктивностью контура квантования ресквида. Это предположение ранее было проверено на электронной аналоговой модели [8].

Была оценена индуктивность контура квантования ресквида из соображений геометрии [9] и по глубине модуляции криттока с учетом несимметрии контактов, эта оценка составляет  $40 \pm 15$  пГн. Результаты исследования зависимости частоты сигнала с ресквида

от тока смещения через резистивный участок при различных значениях тока смещения представлены на рис. 2. В различных модификациях конструкций ресквида сопротивление резистивного участка, выполненного из индия, изменялось в диапазоне  $0.34 \dots 1.6$  мкОм. Параметры ресквида оставались неизменными (в пределах  $3 \dots 5\%$ ) при многократных термоциклированиях. Сопротивление резистивного участка из десятимикронной медной фольги, покрытой слоем ниобия, составляет 10 фОм. Для оценки сопротивления резистивного участка измерялось приращение частоты джозефсоновской генерации, вызванное заданным приращением тока  $I_r$ . Сопротивление рассчитывалось из нестационарного соотношения Джозефсона [2].

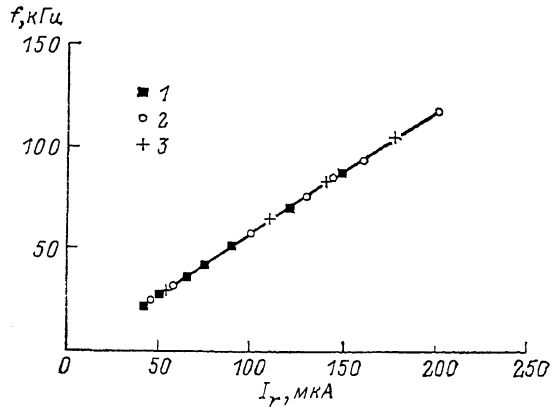


Рис. 2. Зависимость частоты сигнала с ресквида от тока  $I_r$  при различных значениях  $I_b$ .

1 — 15, 2 — 16, 3 — 17 мкА.

Предполагается использовать данный ресквид в качестве датчика шумового термометра от единиц милликельвин. Исследования дисперсии частоты генерации сигнала показали необходимость оптимизации усилительного тракта с целью снижения его шумовой температуры.

В целом предлагаемый датчик оказался не только удобным инструментом для исследований электродинамики ресквидов, но и пригодным для практических применений.

### Список литературы

- [1] Erne S., Koch H., Luther H. // Proc. SQUID's 85. 1985. P. 165—170.
- [2] Лихарев К. К., Ульрих Б. Т. Системы с джозефсоновскими контактами. М., 1978. 447 с.
- [3] Silver A., Zimmerman J. US Patent. N 3622881.
- [4] Park J., Vaidya A. // J. Low Temp. Phys. 1980. Vol. 40. P. 247—257.
- [5] Soulen R. J., Jr, Van Vechten D. // Phys. Rev. B. 1987. Vol. 36. N 1. P. 239—265.
- [6] Verschueren J. M. V., Uiterwaal A. A., van der Heijden et al. // Appl. Phys. Lett. 1983. Vol. 43. N 15. P. 210—215.
- [7] Носков В. Л., Комашко В. А. // Электронная техника. Сер. 6. Материалы. 1981. № 4. С. 33—36.
- [8] Буш С. А., Кривой Г. С., Чернин А. М. // Тез. докл. совещ. «Техническое и программное обеспечение комплексов полунатурного моделирования». Гродно, 1988. Ч. 1. С. 40.
- [9] Zarpe H. H. // IEEE Trans. Electr. Dev. 1980. Vol. ED-27. N 10. P. 1870—1882.

Омский политехнический институт

Поступило в Редакцию  
3 февраля 1990 г.

01; 12

Журнал технической физики, т. 61, в. 4, 1991

© 1991 г.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАСС-АНАЛИЗАТОРА СО СКРЕЩЕННЫМИ ПОЛЯМИ

А. В. Губин

В работе [1] сообщается о масс-спектрометре со скрещенными полями, созданном на базе серийного прибора МИ 1201. Для этого был увеличен зазор магнитного анализатора и в нем размещена многоэлектродная фокусирующая система (МЭФС), выполненная в виде концентрических электродов, нанесенных симметрично на две параллельные диэлектрические пластины (см. рисунок). Учитывая перспективность подобных конструкций анализатора со скрещенными полями, и с целью их численного моделирования была разработана математическая модель анализатора.

Принимая во внимание геометрические особенности МЭФС и соотношения между параметрами ( $L/r_0 \ll 1$ ,  $H/r_0 \ll 1$ ,  $G/r_0 \ll 1$ ,  $g/r_0 \ll 1$ ,  $l_0/r_0 \ll 1$ ,  $l_k/r_0 \ll 1$ ,  $(R_{r_0}^* - R_{r_0})/r_0 \ll 1$ ,  $(R_{r_k}^* - R_{r_k})/r_0 \ll 1$ ), распределение потенциала внутри системы можно представить в виде

ряда  $V(\eta, \zeta) = \sum_{k, l=0}^{\infty} a_{k, l} \eta^k \zeta^{2l}$ , где  $\eta = (r - r_0)/r_0$ ,  $\zeta = z/r_0$ . При этом коэффициенты  $a_{k, l}$

определяются из рекуррентного соотношения

$$a_{k, l+1} = \frac{1}{(2l+2)(2l+1)} \left[ (-1)^k \sum_{m=1}^{k+1} (-1)^m m a_{m, l} - (k+2)(k+1) a_{k+2, l} \right],$$

где  $k=0, 1, 2, \dots$ ;  $l=0, 1, 2, \dots$ ; коэффициенты  $a_{k, 0}$  являются независимыми и связаны с распределением поля в средней плоскости.

Ввиду нарушения аксиальной симметричности поля МЭФС на краях его потенциальную функцию представим в виде  $V(\eta, \varphi, \zeta) = \sum_{k, l=0}^{\infty} b_{k, l}(\eta, \varphi, \zeta) \eta^k \zeta^{2l}$ . Предполагаем при этом, что  $b_{k, l}(\eta, \varphi, \zeta)$  на плоскостях, где расположены верхние и нижние электроды, принимают