

15
Процессы тепловыделения в криогенной системе и их влияние на функционирование сверхпроводникового интегрального приемника

© Н.В. Кинев, В.П. Кошелец

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009 Москва, Россия
e-mail: nickolay@hitech.cplire.ru

(Поступило в Редакцию 27 марта 2012 г.)

Исследованы процессы тепловыделения в криогенной системе сверхпроводникового интегрального приемника субтерагерцового диапазона при температуре $T \approx 4.2$ К, оценено влияние выделяемого тепла на основные характеристики сверхпроводникового устройства. Микросхема приемника смонтирована на кремниевой линзе и соединена с платой смещения алюминиевыми проволоками толщиной $25 \mu\text{m}$, установленными методом ультразвуковой сварки. Эти проволоки необходимы для задания тока смещения через рабочие элементы приемника и являются неотъемлемой частью системы. Проведены измерения контактного сопротивления между проволоками и контактными площадками микросхемы интегрального приемника. Установлено, что контактное сопротивление существенно превосходит сопротивление алюминиевой проволоки и, следовательно, вносит основной вклад в тепловыделение системы. Предложена и успешно испытана методика „многоточечного контакта одной проволокой“, в результате которой контактное сопротивление значительно уменьшилось по сравнению со стандартной методикой.

Введение

Детекторы на основе сверхпроводниковых элементов за последние несколько десятилетий зарекомендовали себя как наиболее чувствительные из всех существующих в диапазоне от долей герца до рентгена. В частности, супергетеродинные приемники субтерагерцового диапазона электромагнитных волн на основе туннельных переходов сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник (СИС) активно используются во многих как наземных, так и космических радиоастрономических миссиях (ALMA, Hershel, др.) [1], а также в проектах по исследованию атмосферы (TELIS [2,3]). Такие приемники обладают шумовой температурой, близкой к квантовому пределу $hf/2k$ [4,5]. Это обусловлено чрезвычайно высокой нелинейностью сверхпроводниковых элементов, а также их предельно низкими собственными шумами и низкой рабочей температурой. Все это требует применения низких ($T \sim 1\text{--}4.2$ К) рабочих температур, при этом сверхпроводниковые приемные устройства весьма чувствительны к изменениям рабочей температуры. Даже незначительный нагрев системы приводит к уменьшению целевого напряжения и ухудшению параметра качества перехода R_j/R_n , а при перегреве системы значительно увеличивается шумовая температура приемника.

Сверхпроводниковый интегральный приемник (СИП) разработан учеными Института им. В.А. Котельникова РАН [3,6,7] совместно с Институтом космических исследований Голландии (SRON) и доведен до уровня реализации в практических задачах. Работы по созданию, исследованию и оптимизации прибора длились более 10 лет; в рамках международного проекта TELIS

в 2009–2011 гг. были совершены три успешных запуска приемника на борту высотного аэростата в г. Кируна, Швеция [2]. В результате полетов было собрано большое количество научной информации, зарегистрированы спектры газовых составляющих атмосферы в диапазоне высот 12–36 km. Следует отметить, что в криостате TELIS установлены три различных сверхпроводниковых гетеродинных приемника, их охлаждение осуществлялось с помощью специально разработанных хладопроводов. За счет различных источников тепловыделения в системе (усилители промежуточной частоты (ПЧ), теплоподвод через кабели ПЧ, приток тепла из-за неидеальности тепловых фильтров в оптическом тракте, а также генерация тепла в каналах задания токов) рабочая температура криогенного модуля интегрального приемника составляет 4.4–4.5 К. В интегральном приемнике используется сверхпроводниковый генератор гетеродина [6–10] (СГГ, англ. FFO от flux-flow oscillator), частота которого однозначно определяется напряжением на переходе в соответствии с соотношением Джозефсона $f_{FFO} = (1/\Phi_0)V_{FFO}$ [11,12]. Поскольку вольт-амперная характеристика (ВАХ) СИС-перехода зависит от его температуры, то даже незначительная нестабильность рабочей температуры приводит к заметному изменению частоты генерации, что заметно усложняет работу приемника в целом, а при сильных колебаниях температуры или перегреве работа прибора становится невозможной. Поэтому столь важно контролировать как значение установившейся рабочей температуры в системе, так и ее стабильность.

В настоящей работе исследовано тепловыделение в системе, вызванное неотъемлемой технической частью — обеспечением контактов элементов прибора с

внешней системой измерения и управления посредством алюминиевых проволок, монтируемых в систему посредством ультразвуковой сварки (методом „бондирования“).

1. Конструкция СИП и методика измерений

Основным элементом СИП является микросхема размером $4 \times 4 \text{ mm}$, на которой компактно расположены все необходимые элементы гетеродинного приемника: двойной СИС-смеситель размерами порядка $0.8 \mu\text{m}^2$ каждый с квазиоптической планарной антенной, СГГ на основе СИС-перехода размерами $16 \times 400 \mu\text{m}$, дополнительный гармонический СИС-смеситель размером порядка $1 \mu\text{m}^2$, использующийся в петле обратной связи гетеродина для частотной и фазовой стабилизации, а также согласующие элементы и структуры. Блок-схема управления основными элементами СИП изображена на рис. 1: цифрами обозначены собственно элементы, буквами — каналы управления и измерения значений параметров схемы. Все элементы на основе СИС-переходов изготовлены из трехслойной структуры Nb/AlN/NbN [13]. Конструктивно контактные площадки элементов СИП соединяются с платой задания и измерения токов смещения (платой смещения) посредством тонких проволок диаметром $25 \mu\text{m}$ и длиной порядка 1–2 мм (рис. 2, а), изготовленных из алюминия с малой примесью кремния. Соединение обеспечивается при помощи специального прибора, осуществляющего ультразвуковую сварку проволоки к поверхности, такой метод

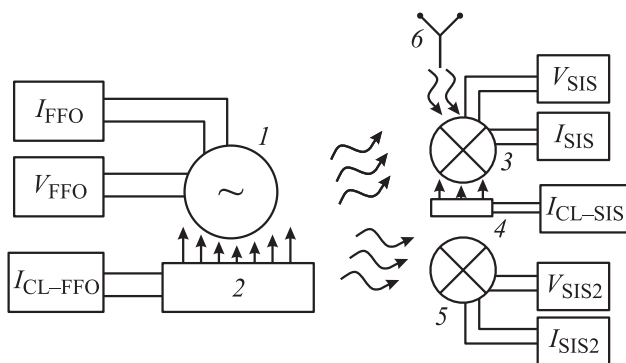


Рис. 1. Блок-схема основных элементов интегрального приемника: 1 — СГГ, I_{FFO} — канал управления током смещения СГГ, V_{FFO} — канал измерения напряжения СГГ, 2 — линия управления магнитным полем через СГГ, I_{CL-FFO} — канал задания тока через линию управления магнитным полем, 3 — СИС-смеситель, V_{SIS} — канал управления напряжением смещения СИС-смесителя, I_{SIS} — канал измерения тока через СИС-смеситель, 4 — линия управления магнитным полем через СИС-смеситель, I_{CL-SIS} — канал задания тока через линию управления магнитным полем, 5 — гармонический СИС-смеситель, V_{SIS2} и I_{SIS2} аналогичны V_{SIS} и I_{SIS} соответственно, 6 — приемная антенна. Волнистыми стрелками обозначен СВЧ-сигнал 500–700 GHz, прямыми стрелками обозначено постоянное магнитное поле.

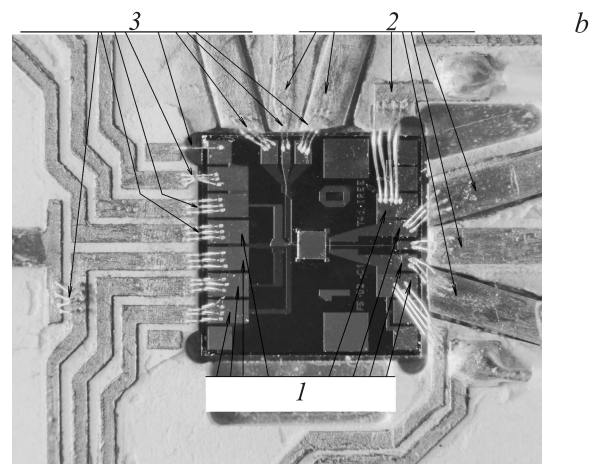
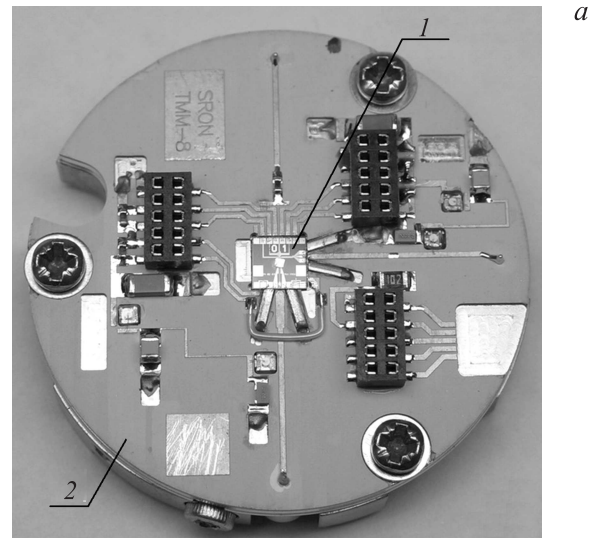


Рис. 2. а — фотография микросхемы сверхпроводящего интегрального приемника (1), установленного на плате смещения (2). б — фотография микросхемы сверхпроводящего интегрального приемника, позолоченные контактные площадки (1) которой соединены с медными площадками (2) платы смещения при помощи алюминиевых проволок (3).

называют „бондированием“ (англ. *bonding* — соединение сваркой). Для надежного обеспечения контакта и уменьшения сопротивления (а в канале ПЧ и индуктивности) большинство соединений осуществляется сразу тремя параллельными проволоками (рис. 2, б). Контактные площадки элементов СИП и платы смещения покрыты золотом.

Для успешного функционирования как СИС-смесителя, так и СГГ спроектированы линии управления магнитным полем через переход (англ. CL, от Control Line), которые конструктивно представляют собой сверхпроводящую пленку из ниобия. Таким образом, в системе управления приемником имеется 5 независимых каналов управления токами и напряжениями элементов: ток смещения СГГ, ток линии управления магнитным полем через СГГ, напряжение СИС-смесителя, ток линии

управления магнитным полем через СИС-смеситель, напряжение дополнительного гармонического СИС-смесителя. Помимо каналов задания имеются независимые каналы измерения всех необходимых параметров системы: ток через СИС-смеситель, напряжение на СГГ, ток через гармонический смеситель. В рамках данного исследования гармонический смеситель не использовался. Ниже приведена табл. 1 характерных значений токов и напряжений через основные элементы СИП в рабочем режиме.

Щелевое напряжение V_{gap} СИС-смесителя на основе туннельной структуры Nb/AlN/NbN составляет 3.65 mV и измеряется с точностью лучше $1\mu\text{V}$. Энергетическая щель сверхпроводника, а следовательно, и щелевое напряжение СИС-перехода обратным образом зависят от температуры [4,5]. При пропускании рабочих токов через любой элемент СИП, а также через линию управления магнитным полем происходит видимое уменьшение щелевого напряжения на величины порядка нескольких μV . При изменении формы ВАХ меняются и параметры рабочей точки на ВАХ, при этом происходит изменение частоты генерации СГГ, пропорциональной напряжению. Это говорит об ощутимом тепловыделении в системе вследствие лишь пропускания рабочего тока через любой рабочий элемент, именно поэтому вопрос о тепловыделении представляется актуальным.

Поскольку линия управления магнитным полем является пленкой из сверхпроводника и не имеет сопротивления, тепловыделение вследствие пропускания тока через линию вызвано падением напряжения либо на проволоке вблизи микросхемы, либо на контактном сопротивлении „проволока–площадка“. Непосредственное измерение тепловыделения, вносимого проволоками, а также измерение контактного сопротивления при данной конструкции не представляется возможным. Это потребовало бы интегрирования в систему дополнительной комплексной системы, имеющей, в свою очередь, собственные контактные подводы, сопротивление которых снова представлялось бы невозможным учесть. Объективным и наиболее чувствительным параметром температуры системы, а значит, и индикатором выделяемой мощности является щелевое напряжение СИС-перехода.

Таблица 1. Характерные параметры элементов приемника в рабочем режиме

Ток смещения СГГ, I_{FFO} (mA)	20–30
Ток линии управления магнитным полем через СГГ, I_{CL-FFO} , mA	30–70
Напряжение СГГ, V_{FFO} , mV	0.8–1.3
Напряжение смещения СИС-смесителя, V_{SIS} , mV	2–3
Ток через СИС-смеситель, I_{SIS} , mA	0.01–0.3
Ток управления магнитным полем через СИС-смеситель, I_{CL-SIS} , mA	25–35

Таким образом, определение сопротивления, вносимого проволоками, осуществляется косвенным методом посредством измерения уменьшения щелевого напряжения.

При протекании через СГГ тока смещения I_{FFO} и наличии на переходе напряжения V_{FFO} выделяется мощность $P_{FFO} = I_{FFO}V_{FFO}$, основная часть которой выделяется в виде тепла в переходе. Небольшая часть мощности покидает переход в виде микроволнового излучения P_{MW} порядка 0.5–1 μW [6,9] вследствие Джозефсоновской генерации, которая затем поглощается в согласующих структурах и СИС-смесителе. Оценка величины P_{FFO} дает $I_{FFO}V_{FFO} \approx 30\text{ mA} \cdot 1\text{ mV} = 30\mu\text{W}$, что почти на 2 порядка превосходит мощность P_{MW} , поэтому последней в данном случае можно пренебречь ($P_{MW} \ll P_{FFO}$) и считать, что вся мощность, падающая на СГГ, выделяется в виде тепла в переходе. Кроме того, вследствие внесения в систему дополнительных проволок, обеспечивающих электрический контакт, при пропускании тока смещения I_{FFO} выделяется тепловая мощность $P_{\text{bond},FFO} = I_{FFO}^2 R_{\text{bond,eff}}$, где $R_{\text{bond,eff}}$ — некоторое эффективное сопротивление, вносимое системой проволок. Следует учесть, что измерение ВАХ-параметров СГГ происходит по 4-точечной схеме (см. рис. 1), при этом через канал измерения напряжения V_{FFO} текут токи, пренебрежимо малые по сравнению с I_{FFO} . Таким образом, когда через СГГ протекает ток I_{FFO} и на переходе имеется напряжение V_{FFO} , в системе выделяется суммарная тепловая мощность

$$P_1 = P_{FFO} + P_{\text{bond},FFO} = I_{FFO}V_{FFO} + I_{FFO}^2 R_{\text{bond,eff}}. \quad (1)$$

Теперь пусть ток смещения через СГГ отсутствует ($I_{FFO} = 0$), при этом приложен ток через линию управления магнитным полем $I_{CL} \neq 0$. В таком случае вся тепловая мощность выделяется исключительно вследствие эффективного сопротивления $R_{\text{bond,eff}}$, вносимого проволоками в линию управления магнитным полем, и равняется

$$P_2 = P_{\text{bond},CL-FFO} = I_{CL-FFO}^2 R_{\text{bond,eff}}. \quad (2)$$

Поскольку в качестве индикатора выделяемой тепловой мощности в системе используется непосредственно измеряемое щелевое напряжение СИС-перехода V_{gap} , при одинаковых изменениях V_{gap} , вызванных независимым пропусканием тока $I_{FFO} \neq 0$ при $I_{CL-FFO} = 0$ и тока $I_{CL-FFO} \neq 0$ при $I_{FFO} = 0$, можно приравнять выделяемые мощности $P_1 = P_2$ или

$$I_{FFO}V_{FFO} + I_{FFO}^2 R_{\text{bond,eff}} = I_{CL-FFO}^2 R_{\text{bond,eff}}, \quad (3)$$

откуда находится формула для определения эффективного сопротивления $R_{\text{bond,eff}}$:

$$R_{\text{bond,eff}} = \frac{I_{FFO}V_{FFO}}{I_{CL-FFO}^2 - I_{FFO}^2}. \quad (4)$$

Это выражение справедливо при каждом отдельно взятом и фиксированном щелевом напряжении СИС-перехода.

Следует отметить, однако, что равенство (3) записано в предположении того, что мощность, выделяемая в СГГ, и мощность, выделяемая в области контактных площадок при пропускании тока через линию управления магнитным полем, в одинаковой степени влияют на температуру СИС-смесителя. В действительности мощность СГГ оказывает большее влияние, поскольку СГГ пространственно расположен ближе к СИС-смесителю, чем контактные площадки микросхемы. Различную степень влияния тепловых источников на СИС-смеситель можно учесть, например, посредством введения некоторого поправочного коэффициента при члене P_{FFO} , который заведомо больше единицы, тогда (4) переписывается в виде

$$R_{\text{bond,eff}} = \frac{KI_{FFO}V_{FFO}}{I_{\text{CL-FFO}}^2 - I_{FFO}^2}, \quad (5)$$

где $K > 1$. Для точного определения параметра K и его зависимости от параметров системы необходимо решать двумерное стационарное уравнение теплопроводности вида

$$\Delta T(\mathbf{r}) = -\frac{f(\mathbf{r})}{D} \quad (6)$$

с заданными граничными условиями, где $f(\mathbf{r})$ — функция, описывающая источники тепла, D — коэффициент теплопроводности, а $\Delta \equiv \nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$ — двумерный оператор Лапласа. Решение такой задачи не представляется возможным по ряду причин. Во-первых, крайне сложна постановка граничных условий, описывающих столь комплексную многоэлементную распределенную систему. Во-вторых, коэффициенты теплопроводности используемых материалов при температуре порядка 4.2 К неизвестны. В переносе тепла возможно участие двух каналов: через подложку микросхемы на основе кремния либо через электрод на основе ниобия. Мы полагаем, что подавляющая часть тепла от СГГ и области контактных площадок микросхемы до СИС-смесителя поступает через подложку, поскольку сверхпроводящий ниобий должен обладать заметно меньшим коэффициентом теплопроводности, чем высокоомный кремний, который имеет высокую теплопроводность при гелиевых температурах. Общий вид решения уравнения типа (6) в двумерном случае с одним источником тепла и простейшим граничным условием $T(x_0, y_0) = T_0$ известен:

$$T(\mathbf{r}) \sim T_1 \exp\left(-\frac{|\mathbf{r}|^2}{a^2}\right), \quad (7)$$

где коэффициент a зависит от коэффициента теплопроводности D , а величина T_1 , кроме того, от граничного условия и функции источника тепла $f(\mathbf{r})$.

В настоящей работе поправка к определению $R_{\text{bond,eff}}$ с учетом различного влияния тепловых источников была учтена посредством введения в правой части выражения (3) некоего отрицательного члена, не влияющего на щелевое напряжение СИС-смесителя и компенсирующего разницу в степени влияния различных тепловых

источников на СИС-смеситель. Таким образом, выражение (4) является оценкой снизу искомого сопротивления. Величина необходимой поправки к приближению (3), а также оценка величины $R_{\text{bond,eff}}$ сверху будут определены из эксперимента.

Для определения вклада контактного сопротивления в общее эффективное сопротивление $R_{\text{bond,eff}}$, вносимое системой проволок в каналы задания токов смещения и управления магнитным полем, необходимо его пересчитать в эффективное сопротивление, вносимое единичной проволокой $R_{\text{bond,single}}$, а также знать сопротивление самой проволоки $R_{\text{wire,single}}$. Из фотографий на рис. 2 видно, что проволоки практически идентичны по длине, следовательно, вносят одинаковый вклад в сопротивление каналов управления токами. Схема подключения линий управления магнитным полем и током смещения СГГ к плате смещения показана на рис. 3, *a, b*. С учетом того, что ток I_{V-FFO} , идущий в цепи измерения напряжения через переход, много меньше тока $I_{\text{bias-FFO}}$ в цепи задания тока через переход, схемы подключения аналогичны друг другу. Таким образом, эквивалентная схема включения проволок в каналы управления токами представляет собой два последовательно соединенных блока из трех параллельно включенных сопротивлений $R_{\text{bond,single}}$ (см. рис. 3, *c*), что дает результирующее сопро-

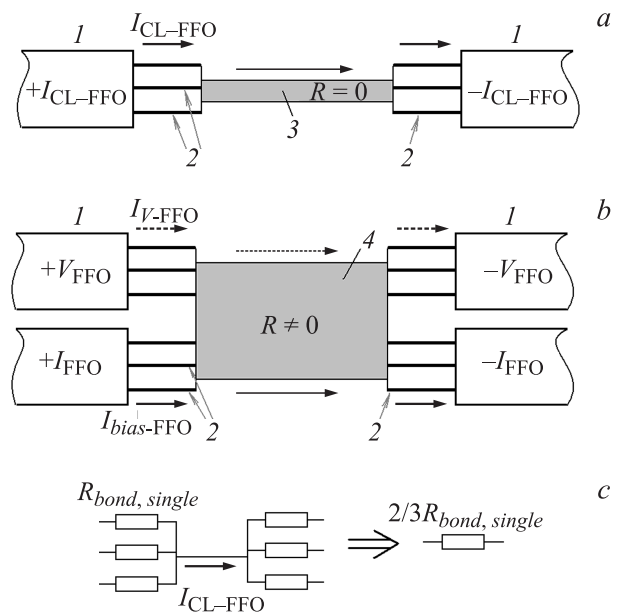


Рис. 3. Схема подключения к плате смещения: *a* — канала линии управления магнитным полем, *b* — каналов управления током и измерения напряжения смещения, *c* — эквивалентная схема системы проволок для обеспечения контакта в канале управления магнитным полем (током смещения); 1 — контактные площадки платы смещения, 2 — проволоки для обеспечения электрического контакта, каждая с сопротивлением $R_{\text{bond,single}}$, 3 — линия управления магнитным полем на основе сверхпроводящей микрополосковой линии, 4 — сверхпроводниковый генератор гетеродина на основе распределенного СИС-перехода, $I_{V-FFO} \ll I_{\text{bias-FFO}}$.

тивление $R_{\text{bond,eff}} = 2R_{\text{bond,single}}/3$, откуда

$$R_{\text{bond,single}} = \frac{3}{2} R_{\text{bond,eff}}. \quad (8)$$

2. Определение сопротивления, вносимого проволоками, обеспечивающими электрический контакт

На рис. 4 показана типичная экспериментальная ВАХ СИС-смесителя (а), а также продемонстрировано уменьшение щелевого напряжения при пропускании тока через линию управления магнитным полем СГГ и тока смещения (b). Далее, на рис. 5,а представлены экспериментально измеренные зависимости щелевого напряжения СИС-смесителя от тока линии управления магнитным полем через СГГ и тока смещения СГГ соответственно. Динамика изменения щелевого напряжения во времени показана на рис. 5, b, стрелкой на графике

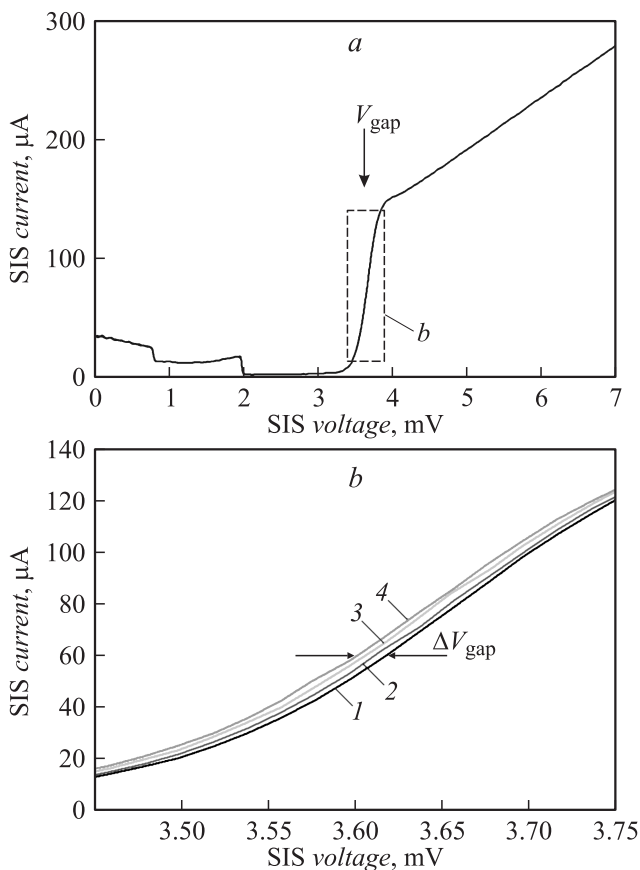


Рис. 4. а — ВАХ СИС-перехода, $V_{\text{gap}} = 3.634 \text{ mV}$ — щелевое напряжение, б — ВАХ в выделенной области большего масштаба при различных параметрах СГГ: 1 — $I_{\text{CL-FFO}} = 0$, $I_{\text{FFO}} = 0$, $V_{\text{FFO}} = 0$, $V_{\text{gap}} = 3.634 \text{ mV}$; 2 — $I_{\text{CL-FFO}} = 90 \text{ mA}$, $I_{\text{FFO}} = 0$, $V_{\text{FFO}} = 0$, $V_{\text{gap}} = 3.631 \text{ mV}$; 3 — $I_{\text{CL-FFO}} = 0 \text{ mA}$, $I_{\text{FFO}} = 90 \text{ mA}$, $V_{\text{FFO}} = 3.4 \text{ mV}$, $V_{\text{gap}} = 3.630 \text{ mV}$; 4 — $I_{\text{CL-FFO}} = 90 \text{ mA}$, $I_{\text{FFO}} = 90 \text{ mA}$, $V_{\text{FFO}} = 3.4 \text{ mV}$, $V_{\text{gap}} = 3.624 \text{ mV}$.

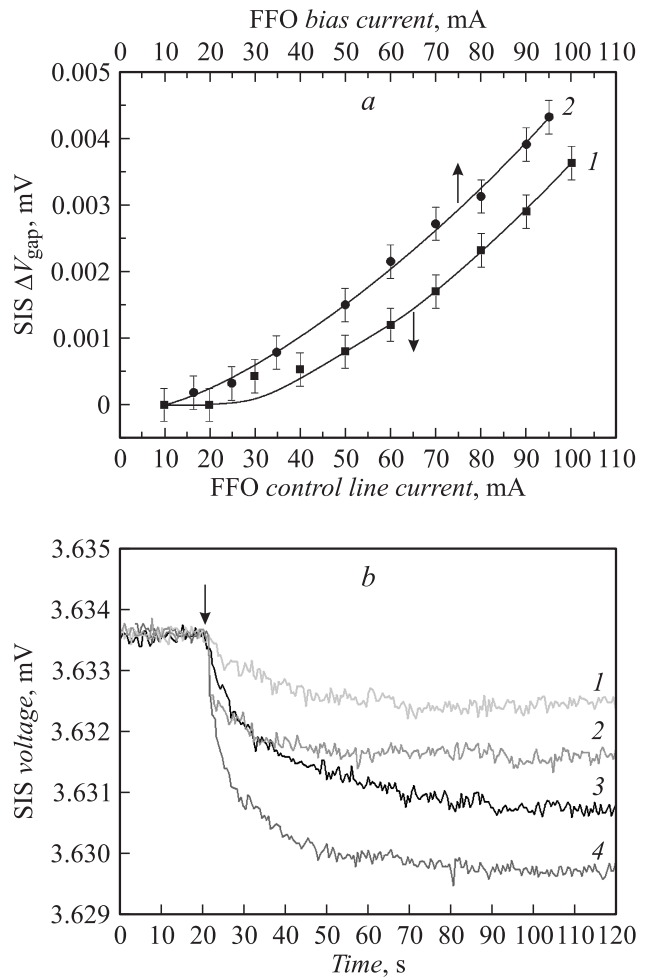


Рис. 5. а — зависимость сдвига щелевого напряжения СИС-смесителя от тока линии управления магнитным полем (1) и тока смещения СГГ (2). Кривые проведены через экспериментальные точки для наглядного представления. б — график изменения щелевого напряжения СИС-смесителя во времени при задании некоторых значений токов в момент, обозначенный стрелкой: 1 — $I_{\text{CL-FFO}} = 60 \text{ mA}$, 2 — $I_{\text{FFO}} = 60 \text{ mA}$, 3 — $I_{\text{CL-FFO}} = 90 \text{ mA}$, 4 — $I_{\text{FFO}} = 90 \text{ mA}$.

обозначен момент включения токов, а величина шума говорит о том, что погрешность измерения напряжения составляет доли μV . Наблюдаемое смещение щелевого напряжения начинается не с нулевого тока линии управления, а с некоторого значения I_{CL0} , приблизительно равного 20 mA (см. рис. 5, а). Это объясняется тем, что тепловая мощность, выделяемая в области контактных площадок микросхемы, не достигает СИС-перехода, рассеиваясь в подложку. Теперь можно оценить величину поправки P_0 к приближению (3) исходя из значения мощности, не влияющей на температуру СИС-смесителя. Поскольку мощность, выделяемая в канале задания тока управления, заметно влияет на температуру СИС-смесителя лишь начиная со значения тока I_{CL0} , то справедливо оценить мощность P_0 при некотором пороговом значении тока I_{CL} как $P_0 = I_{\text{CL0}}^2 R_{\text{bond,eff}}$, тогда (3)

переписывается в виде

$$I_{FFO}V_{FFO} + I_{FFO}^2 R_{\text{bond,eff}} = I_{CL-FFO}^2 R_{\text{bond,eff}} - P_0, \quad (9)$$

что дает поправку в знаменателе в выражении (4)

$$R_{\text{bond,eff}} = \frac{I_{FFO}V_{FFO}}{I_{CL-FFO}^2 - I_{FFO}^2 - I_{CLO}^2}. \quad (10)$$

В диапазоне токов $I_{CL-FFO} = 60-100$ мА изменение щелевого напряжения ΔV_{gap} составляет порядка $1-4$ мВ (см. рис. 5), аналогичный сдвиг наблюдается при токах смещения $I_{FFO} = 40-90$ мА. Это дает возможность оценить искомое сопротивление $R_{\text{bond,eff}}$ при помощи формул (4) и (10), при этом необходимо знать ВАХ СГТ при отсутствии тока через линию управления магнитным полем. ВАХ сосредоточенного СИС-перехода при известных технологических параметрах с высокой степенью точности вычисляется аналитически, однако для распределенного перехода это едва ли представляется возможным вследствие значительного тепловыделения в переходе и резкой зависимости характеристики от температуры. Поэтому в рамках данного исследования использована экспериментально измеренная ВАХ СГТ, представленная на рис. 6. При токах выше 100 мА и щелевом напряжении на ВАХ имеется участок с отрицательным дифференциальным сопротивлением, возникающий вследствие выделяемой тепловой мощности в переходе, т.е. в данном случае „самонагрева“ СГТ. Интересен также тот факт, что щелевое напряжение СГТ, равное приблизительно 3.4 мВ, несколько ниже, чем СИС-смесителя, несмотря на то, что технологически туннельные структуры Nb/AlN/NbN обоих переходов изготавливаются в едином цикле и потому идентичны. Это также объясняется эффектом „самонагрева“ туннельного перехода: характерная мощность, выделяемая в СГТ при щелевом напряжении $P_{FFO,\text{gap}} \approx 100 \text{ мА} \cdot 3.4 \text{ мВ} = 340 \mu\text{W}$, на три порядка превосходит ту же величину для СИС-смесителя $P_{SIS,\text{gap}} \approx 150 \mu\text{А} \cdot 3.6 \text{ мВ} = 540 \text{ нВ}$.

Результат вычисления $R_{\text{bond,eff}}$ представлен в табл. 2. Таким образом, эффективное сопротивление, вносимое в один измерительный канал сверхпроводникового

Таблица 2. Результаты определения вклада в сопротивление каналов управления системой проволок, обеспечивающих электрический контакт. Представлены не все расчетные точки

$SIS\Delta V_{\text{gap}}$, μV	$R_{\text{bond,eff}}$, Ω , прибли- жение (4)	$\langle R_{\text{bond,eff}} \rangle$, Ω , прибли- жение (4)	$R_{\text{bond,eff}}$, Ω , прибли- жение (10)	$\langle R_{\text{bond,eff}} \rangle$, Ω , прибли- жение (10)
2	0.096	0.109 ± 0.014	0.119	0.132 ± 0.016
2.5	0.094		0.113	
3	0.106		0.128	
3.5	0.112		0.132	
4	0.127		0.121	

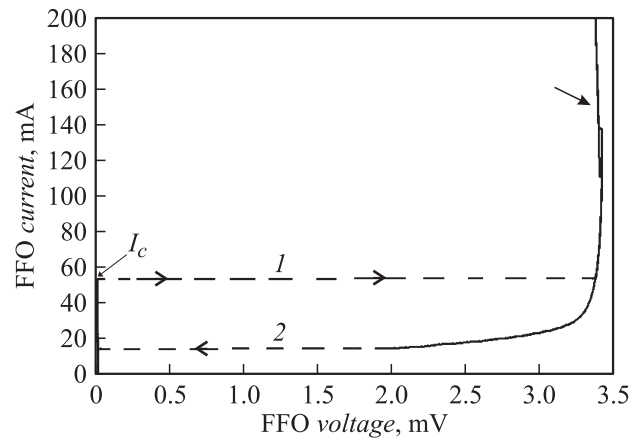


Рис. 6. ВАХ СГТ при нулевом внешнем магнитном поле: 1 — прямая ветвь, 2 — обратная ветвь. Критический ток $I_c = 55$ мА. Штриховыми прямыми обозначены области „скачков“ с ветви критического тока на нормальную ветвь (1) и обратно (2). Стрелкой обозначена область с отрицательным дифференциальным сопротивлением $R_d < 0$.

генератора гетеродина проволоками для обеспечения электрического контакта, составляет по меньшей мере величину порядка 0.1Ω в соответствии с оценкой (4) и достигает 0.13Ω в соответствии с оценкой (10), погрешность результата составляет не более 15%. При таком сопротивлении характерная мощность, выделяемая при рабочих ВАХ СИП (выражения (1) и (2), табл. 1), составляет величину более $100 \mu\text{W}$. Следует отметить также, что при использовании оценки (4) величина $R_{\text{bond,eff}}$ растет с увеличением ΔV_{gap} , чего в действительности быть не может, в то время как оценка (10) дает случайный разброс от постоянной величины, поэтому такой результат качественно достовернее.

Поскольку мы не вычисляем точного значения коэффициента K в выражении (5) в силу сложности постановки задачи теплопроводности, а используем эмпирическое приближение (10), следует обозначить также верхний предел возможной величины $R_{\text{bond,eff}}$. В противном случае, казалось бы, величина $R_{\text{bond,eff}}$ может быть сколь угодно большой в зависимости от значения K . Известно, что ток через линию управления магнитным полем $I_{CLO} = 20$ мА не приводит к сдвигу щелевого напряжения (см. рис. 5), в то время как практически такой же ток смещения через СГТ $I_{FFO,0} = 17$ мА уже приводит к видимому изменению щелевого напряжения. Поэтому мощность, выделяемая в первом случае, заведомо не превосходит мощности, выделяемой во втором случае, а именно

$$I_{CLO}^2 R_{\text{bond,eff}} < I_{FFO,0}^2 R_{\text{bond,eff}} + I_{FFO,0} V_{FFO,0},$$

что дает оценку сверху $R_{\text{bond,eff}} < 0.5 \Omega$. Это в свою очередь определяет ограничение сверху для коэффициента K , исходя из формул (4)–(5) и вычисленных значений (4) из табл. 2: $K < 5$.

Таблица 3. Анализ экспериментальных данных по результатам двух экспериментов

Эксперимент 1. Проволоки для обеспечения контакта в конструкции сверхпроводникового интегрального приемника		Эксперимент 2. Измерение сопротивления образца проволоки		
$R_{\text{bond,eff}}, \Omega$ (табл. 2)	$R_{\text{bond,single}}, \Omega$ (см. выражение (8)),	Сопротивление образца длиной 40 mm $R_{L=40 \text{ mm}}, \Omega$ (см. рис. 7, b)	Сопротивление образца длиной 1–2 mm, $R_{L=1-2 \text{ mm}}, \Omega$	Вклад сопротивления проволоки в сопротивление канала управления током (см. рис. 3, c, выражение (8)). $2/3R_{L=1-2 \text{ mm}}, \Omega$
0.1–0.13	0.15–0.2	0.2086	0.0052–0.01	0.0035–0.0067

3. Измерение сопротивления проволоки вне системы СИП. Анализ полученных результатов

Для определения сопротивления отдельно взятой проволоки вне системы сверхпроводникового интегрального приемника пользоваться табличными значениями сопротивления материалов нельзя, так же как руковод-

ствоваться регламентированным значением производителя. Во-первых, используемая проволока из алюминия имеет 1% примеси кремния, такие полупроводниковые примеси способны на порядки изменять сопротивление чистых материалов. Во-вторых, практически все регламентированные и табличные значения приводятся при температуре 273 К, в то время как при измерении система находится при температуре жидкого гелия 4.2 К. Поэтому было проведено экспериментальное измерение сопротивления идентичной проволоки, использующейся для обеспечения контактов, в жидком гелии. Использовалась 4-точечная схема измерения, контакты между проволокой и измерительной платой производились при помощи токопроводящего клея на основе серебра (см. рис. 7, a). В результате было получено (рис. 7, b), что образец проволоки длиной 40 mm обладает сопротивлением $0.2086 \pm 0.0005 \Omega$. Следует отметить, что при такой схеме подключения необходимо брать в расчет не общую длину образца проволоки, а длину между ближайшими точками подключения, потому как через остальные части (между $-I$ и $-V$, между $+I$ и $+V$) протекающий ток много меньше измеряемого. Таким образом, сопротивление отрезка такой проволоки длиной 1–2 mm составляет 0.0052–0.01 Ω , именно такую характерную длину имеют отрезки проволоки, обеспечивающие контакт элементов микросхемы СИП к плате смещения. Сравнительные данные по результатам двух независимых измерений приведены в табл. 3. Жирным шрифтом выделены значения, подлежащие сопоставлению. Таким образом, вклад сопротивления проволоки в общее сопротивление, вносимое системой проволок для обеспечения контакта (0.0052–0.01 Ω на фоне 0.15–0.2 Ω), составляет не более 5%. Отсюда следует, что по меньшей мере 95% вклада в тепловыделение вносит контактное сопротивление между проволокой и контактными площадками микросхемы приемника. Поэтому основным требованием к обеспечению контактов посредством ультразвуковой сварки является минимизация контактного сопротивления. Попытки такой минимизации и их результаты описаны в разд. 4.

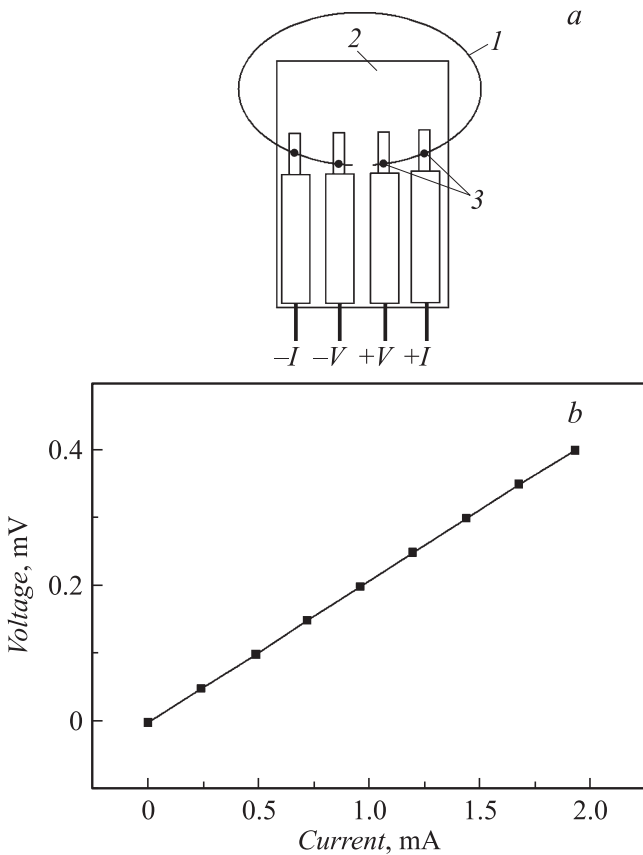


Рис. 7. Схема измерения сопротивления образца проволоки (a) и полученная ВАХ (b): 1 — образец проволоки, 2 — измерительная плата, 3 — точки обеспечения контакта посредством токопроводящего клея.

4. Предложение и испытание модернизированной методики обеспечения контактов

Для уменьшения контактного сопротивления между проволоками и микросхемой необходимо увеличивать площадь контактов посредством использования проволоки большего диаметра либо применения модернизированной методики обеспечения контактов. Предложенный принцип „многоточечного контакта одной проволокой“, увеличивающий площадь контактирования платы смещения с контактными площадками микросхемы, схематично изображен на рис. 8. При таком методе обеспечения контактов было проведен цикл абсолютно аналогичных измерений, описанных в разд. 2, для определения эффективного вклада $R_{\text{multi-bond,eff}}$ системой проволок в сопротивление каналов управления токами. Экспериментальные результаты измерения сдвига щелевого напряжения от токов смещения и линии управления

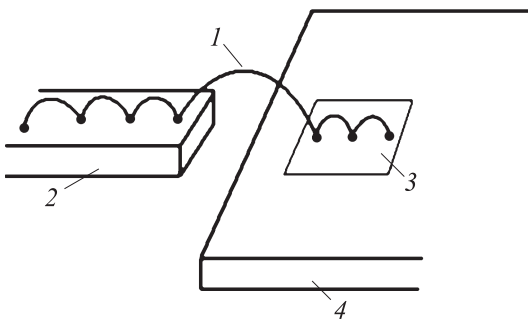


Рис. 8. Методика осуществления множества контактов с использованием одной проволоки: 1 — проволока, 2 — контактная площадка платы смещения, 3 — контактная площадка микросхемы СИП, 4 — микросхема СИП.

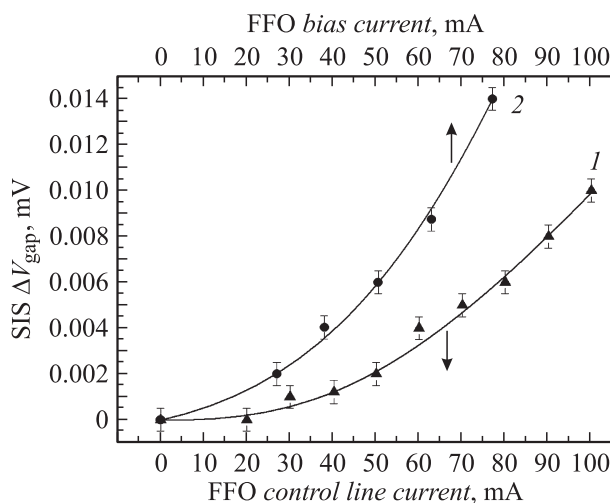


Рис. 9. Зависимость сдвига щелевого напряжения СИП-смесителя от тока линии управления магнитным полем (1) и тока смещения СИП (2) с использованием „многоточечного контакта одной проволокой“. Кривые проведены через экспериментальные точки для наглядного представления.

Таблица 4. Результаты определения вклада в сопротивление каналов управления системой проволок при использовании методики „многоточечного контакта одной проволокой“. Представлены не все расчетные точки

$SIS\Delta V_{\text{gap}}$, μV	$R_{\text{bond,eff}}$, Ω , приближение (4)	$\langle R_{\text{bond,eff}} \rangle$, Ω , приближение (4)	$R_{\text{bond,eff}}$, Ω , приближение (10)	$\langle R_{\text{bond,eff}} \rangle$, Ω , приближение (10)
5	0.0342	0.0302 ± 0.0033	0.039	0.0335 ± 0.046
6	0.0315		0.352	
7	0.0293		0.0321	
8	0.0278		0.0301	
9	0.0267		0.0287	

магнитным полем представлены на рис. 9, а результаты вычисления $R_{\text{multi-bond,eff}}$ сведены в табл. 4, погрешность составляет не более 15%. Общее качество теплового контакта в системе определяется в первую очередь качеством прижатия хладопроводов к основе смесительного блока с одной стороны, и к холодному дну криостата, непосредственно контактирующему с жидким гелием, с другой. Также играет роль степень прижатия кремниевой линзы к основе смесительного блока. Несмотря на то что качество теплового контакта во вновь смонтированной системе СИП оказалось хуже, о чем свидетельствует более резкая зависимость щелевого напряжения от токов (сравн. рис. 5, а и рис. 9), эффективное сопротивление, вносимое системой проволок, уменьшилось в 3–4 раза по разным расчетам (приближения (4), (10)). Этот результат имеет большое практическое значение, поскольку позволяет значительно уменьшить фактор, отрицательно влияющий на характеристики устройства и при некоторых условиях делающий работу прибора невозможной.

Заключение

Результаты, полученные в настоящей работе, имеют большое практическое значение при работе с устройствами, где требуются не только низкие температуры (порядка жидкого гелия и ниже), но и высокая стабильность рабочих температур при различных режимах работы прибора. В большинстве таких устройств неотъемлемой частью системы являются проволоки, монтирующиеся ультразвуковой сваркой и обеспечивающие электрический контакт рабочих элементов к системам измерения и управления, которые неизбежно вносят в систему сопротивления, являющиеся источником тепла. В работе оценена характерная тепловая мощность ($\geq 100 \mu\text{W}$), влияющая на рабочие характеристики СИП, а также вычислено сопротивление, вносимое в систему проволоками для обеспечения контакта (0.1–0.13 Ω). Важным практическим выводом является то, что ос-

новной вклад (более 95%) в это сопротивление вносит контактное сопротивление между проволоками и контактными площадками микросхемы, а не сопротивление самих проволок. Это означает, что на общий результат при обеспечении контактов влияет не длина проволок, а методика осуществления контактов, поэтому именно она требует тщательного изучения и модернизации.

Другим важным результатом является предложенная и успешно апробированная методика установки контактов, при которой одной проволокой осуществляется сразу несколько контактных точек, что увеличивает суммарную эффективную площадь растекания тока. При использовании нового метода удалось понизить тепловой вклад проволок в систему в 3–4 раза по сравнению со стандартной методикой. Предложенное техническое решение не имеет привязки к конкретной криогенной системе и применимо в любой системе, где осуществление контактов производится аналогичным образом.

Авторы выражают благодарности за многократную помощь в осуществлении ультразвуковой сварки инженеру Института космических исследований Голландии Leo de Jong и научному сотруднику Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН П.Н. Дмитриеву.

Работа частично поддержана грантами РФФИ № 11-02-12195-офи_м и № 11-02-12213-офи_м, грантом президента России для ведущих научных школ НШ-2456.2012.2 и государственным контрактом № 02.740.11.0795.

Список литературы

- [1] *Kooi J.W.* Advanced Receivers for Submillimeter and Far Infrared Astronomy. PhD thesis. The Netherlands, Enschede: PrintPartners Ipskamp B.V. 2008. 340 p.
- [2] *de Lange G., Boersma D., Dercksen J., Dmitriev P., Ermakov A.B., Filippenko L.V., Golstein H., Hoogeveen R.W.M., de Jong L., Khudchenko A.V., Kinev N.V., Kiselev O.S., van Kuik B., de Lange A., van Rantwijk J., Sobolev A.S., Torgashin M.Yu., de Vries E., Yagoubov P.A., Koshelets V.P.* // Supercond. Sci. Technol. 2010. Vol. 23. P. 045 016.
- [3] *Коселец В.П., Дмитриев П.Н., Ермаков А.Б., Филиппенко Л.В., Корюкин О.В., Торгашин М.Ю., Худченко А.В.* // Известия вузов. Радиофизика. 2005. Т. XLVIII. № 10–11. С. 947–954.
- [4] *Шмидт В.В.* Введение в физику сверхпроводников. М.: МЦНМО, 2000. 397 с.
- [5] *Лухарев К.К.* Введение в динамику джозефсоновских переходов. М.: Наука, 1985. 320 с.
- [6] *Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Golstein H., de Graauw T., Luinge W., Schaeffer H., van de Stadt H.* // Appl. Phys. Lett. 1996. Vol. 68. P. 1273–1275.
- [7] *Koshelets V.P., Shitov S.V.* // Supercond. Sci. Technol. 2000. Vol. 13. P. R53–R59.
- [8] *Koshelets V.P., Shitov S.V., Filippenko L.V., Baryshev A.M., Luinge W., Golstein H., van de Stadt H., Gao J.-R., de Graauw T.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1997. Vol. 7. P. 2905–2908.
- [9] *Koshelets V.P., Shitov S.V., Baryshev A.M., Lapytskaya I.L., Filippenko L.V., van de Stadt H., Mess J., Schaeffer H., de Graauw T.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1995. Vol. 5. P. 3057.
- [10] *Koshelets V.P., Shitov S.V., Shchukin A.V., Filippenko L.V., Mygind J.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 1997. Vol. 7. P. 3589–3592.
- [11] *Nagatsuma T., Enpuku K., Iri F., Yoshida K.* // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. P. 3302.
- [12] *Nagatsuma T., Enpuku K., Iri F., Yoshida K.* // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 56. P. 3384.
- [13] *Torgashin M.Yu., Koshelets V.P., Dmitriev P.N., Ermakov A.B., Filippenko L.V., Yagoubov P.A.* // IEEE Trans. Appl. Supercond. 2007. Vol. 17. N 2. P. 379–382.