



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013128638/28, 24.06.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
24.06.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 24.06.2013

(43) Дата публикации заявки: 27.12.2014 Бюл. № 36

(45) Опубликовано: 20.03.2015 Бюл. № 8

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2325004 C1, 20.05.2008. RU 2353051 C2, 20.04.2009. US 8179133 B1, 15.05.2012. US 7095227 B2, 22.08.2006. EP 0414426 A1, 27.02.1991

Адрес для переписки:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1,
Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Центр трансфера
технологий, Дьяченко О.Г.

(72) Автор(ы):

СОЛОВЬЕВ Игорь Игоревич (RU),
КОРНЕВ Виктор Константинович (RU),
КЛЕНОВ Николай Викторович (RU),
ШАРАФИЕВ Алексей Владимирович (RU),
КАЛАБУХОВ Алексей Сергеевич (RU),
ЧУХАРКИН Максим Леонидович (RU),
СНИГИРЕВ Олег Васильевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова" (МГУ) (RU)

(54) СВЧ-УСИЛИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СКВИДА С ЧЕТЫРЬМЯ ДЖОЗЕФСОНОВСКИМИ КОНТАКТАМИ

(57) Реферат:

Изобретение направлено на повышение линейности усиления в гигагерцовом диапазоне частот без использования цепей обратной связи. СВЧ-усилитель на основе высокотемпературного СКВИДа включает идентичные и параллельно соединенные первый и второй джозефсоновские контакты, образованные в слое высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) и размещенные вдоль бикристаллической границы подложки, и входной индуктивный элемент, включенный между смежными токопроводами джозефсоновских контактов. Дополнительно введены третий и четвертый джозефсоновские контакты, причем критический ток первого,

второго джозефсоновских контактов совпадает, третьего - меньше этой величины, а четвертого контакта - превышает эту величину. Слой ВТСП имеет форму дорожки, которая дважды пересекает бикристаллическую границу и образует замкнутый контур с упомянутым индуктивным элементом, расположенным по одну сторону бикристаллической границы. Третий и четвертый джозефсоновские контакты размещены в местах пересечений упомянутой дорожки с бикристаллической границей, а ширина дорожки в месте размещения четвертого контакта превышает одноименную для третьего контакта. 4 з.п. ф-лы, 5 ил.

RU 2 544 275 C2

RU 2 544 275 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
H03F 19/00 (2006.01)
H01L 39/22 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2013128638/28, 24.06.2013

(24) Effective date for property rights:
24.06.2013

Priority:

(22) Date of filing: 24.06.2013

(43) Application published: 27.12.2014 Bull. № 36

(45) Date of publication: 20.03.2015 Bull. № 8

Mail address:

119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1,
Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V.
Lomonosova, Tsentr transfera tekhnologij,
D'jachenko O.G.

(72) Inventor(s):

**SOLOVE'V Igor' Igorevich (RU),
KORNEV Viktor Konstantinovich (RU),
KLENOV Nikolaj Viktorovich (RU),
ShARAFIEV Aleksej Vladimirovich (RU),
KALABUKhOV Aleksej Sergeevich (RU),
ChUKhARKIN Maksim Leonidovich (RU),
SNIGIREV Oleg Vasil'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
professional'nogo obrazovanija "Moskovskij
gosudarstvennyj universitet imeni M.V.
Lomonosova" (MGU) (RU)**

(54) **SHF-AMPLIFIER BASED ON HIGH-TEMPERATURE SQUID WITH FOUR JOSEPHSON CONTACTS**

(57) Abstract:

FIELD: electricity.

SUBSTANCE: method includes identical and paralleled first and second Josephson contacts formed in a layer of high-temperature superconductor (HTSC) and placed along bicrystal boundary of the layer and an input inductive element coupled between adjoining current leads of Josephson contacts. There are auxiliary third and fourth Josephson contacts, at that critical current values of the first and second Josephson contacts coincide, the same value of the third Josephson contact is less and the same value of the fourth Josephson contact is more. HTSC layer is shaped as a path that

crosses the bicrystal boundary twice and forms a closed circuit with the above inductive element placed at one side of the bicrystal boundary. The third and fourth Josephson contacts are placed at cross points of the above path with bicrystal boundary, and width of the path at the site of the fourth contact placement exceeds the width for placement of the third one.

EFFECT: increasing amplification linearity in gigahertz band of frequencies without use of feedback circuits SHF-amplifier based on high-temperature SQUID.

5 cl, 5 dwg

RU 2 544 275 C 2

RU 2 544 275 C 2

Область техники

Изобретение относится к криогенной электронике и может быть использовано в измерительной технике, радиотехнических и информационных системах, работающих при низких температурах.

5 Уровень техники

Радиочастотные усилители на основе сверхпроводящих квантовых интерферометров (СКВИД) имеют высокую чувствительность и обладают низкой шумовой температурой, совместимы с другими сверхпроводниковыми устройствами. СКВИД представляет собой сверхпроводящее кольцо, содержащее один или два джозефсоновских контакта, имеет согласующие и измерительные устройства.

10 Описаны различные конструкции и схемотехнические решения сверхпроводниковых усилителей СВЧ-диапазона. В частности, описана схема согласованного усилителя на СКВИДе с нагрузкой для диапазона до 0,1 ГГц (JPS60247311, Noguchi, 07.12.1985). Однако как рабочий диапазон частот, так и линейность преобразования для усилителей на одиночном низкотемпературном СКВИДе недостаточны для современных приложений.

Существуют две проблемы, затрудняющие переход к более высоким частотам сигналов 1-10 ГГц при сохранении характерных для сверхпроводниковых устройств высоких показателей по усилению и шумовой температуре. Во-первых, СКВИД-усилители являются особым видом параметрических усилителей, в которых усиление мощности сигнала на его частоте F_S происходит путем преобразования сигнала на частоту $F_S + F_J$, где F_J - частота джозефсоновской генерации, и последующем преобразовании вниз, снова на частоту сигнала. Исходя из соотношений Мэнли-Роу, коэффициент усиления по мощности, G , такого усилителя не превышает:

$$25 \quad G \approx F_J / F_S. \quad (1)$$

Поэтому джозефсоновские переходы СКВИДа должны обладать высоким характеристическим напряжением - V_C , чтобы характерная частота джозефсоновской генерации

$$30 \quad F_C = V_C / \Phi_0, \quad (2)$$

где Φ_0 - квант магнитного потока, равный $2,07 \times 10^{-15}$ Вб, была на несколько порядков выше частоты сигнала.

Для СКВИДов на основе Nb джозефсоновских контактов типичные значения V_C не превышают 100-200 мкВ, соответственно, значения F_C не превышают 50-100 ГГц. Типичные значения F_J в рабочей точке примерно на порядок меньше F_C и, как видно из формулы (1), усиление исчезает для сигналов с частотой порядка 10 ГГц. Естественно ухудшаются и шумовые характеристики усилителя.

40 Второй проблемой для СВЧ-усилителей на основе классических СКВИДов с многвитковой входной катушкой в частотном диапазоне выше 0,01 ГГц является нелинейный вид отклика на задаваемое извне магнитное поле и невозможность линеаризации отклика с использованием традиционных систем обратной связи на таких высоких частотах, что ведет к невысокому уровню линейности усиления.

45 Решение первой проблемы - повышения характеристического напряжения V_C , лежит в использовании в СКВИДах высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) джозефсоновских контактов, которые демонстрируют значения V_C в милливольтном диапазоне и могут обеспечить значительное усиление на частотах до 10 ГГц. Также для

решения первой проблемы могут использоваться многоэлементные джозефсоновские структуры, в том числе состоящие из N последовательно или параллельно соединенных СКВИДов. Сложение откликов от составляющих такую цепочку СКВИДов как раз и позволяет достигнуть требуемого уровня усиления.

5 В изобретении (US 7095227, Tarutani et. al., 22.08.2006) описан усилитель на последовательной цепочке СКВИДов, позволяющий использовать в качестве источника питания источник постоянного тока и занимающий малую площадь. Однако такое устройство позволяет достичь лишь относительно малую линейность усиления сигнала.

10 Были предложены усилители-драйверы для гигагерцового диапазона (до десятков ГГц) на основе цепочек СКВИДов, разделенных на изолированные от земли пары, для уменьшения паразитных емкостей в системе (US 6486756, Tarutani, 26.11.2002), однако такие усилители пригодны лишь для цифровых применений и не могут быть использованы для усиления аналогового сигнала. Примером усилителя сигналов БОК-логики, преобразующего их на выходе в импульсы напряжения с величиной, достаточной
15 для использования полупроводниковой электроники, является изобретение (US 6917216, Herr Quentin, 14.10.2004), использующее разделение и переотражение выходного БОК-импульса для получения достаточных значений выходных импульсов напряжения. Но это предложение опять же рассчитано исключительно на применения в цифровых устройствах.

20 Для создания усилителя тока с большими значениями выходного тока предлагалось использовать набор параллельно соединенных СКВИДов постоянного тока (JP 2003209299, MOROOKA et al., 25.07.2003). Однако это предложение не рассчитано на работу в гигагерцовом диапазоне.

25 Цепочку СКВИДов переменной площади предлагали использовать в качестве высокочувствительного магнетометра (WO 01/25805, Schopohl et al., 12.04.2001; US 7369093, Oppenlander et al., 06.05.2008), однако описанные структуры не дают необходимой линейности усиления сигнала. Не дают достаточной линейности преобразования входного магнитного сигнала в выходное напряжение и неоднородные параллельные цепочки контактов (US 7369093), не позволяющие ко всему прочему
30 добиться значительных значений выходного сигнала.

Известен сверхпроводящий широкополосный СВЧ усилитель, содержащий подключенную к входной и выходной сверхпроводящим линиям последовательную цепочку двухконтактных СКВИДов, связанных со средствами задания рабочих режимов тока и магнитного поля (JPH10028021, Takeda et al., 27.01.1998). Описана конструкция
35 СВЧ-усилителя на линейных цепочках СКВИДов постоянного тока, имеющего повышенный коэффициент усиления и высокую линейность в полосе частот 1-10 ГГц (RU 2353051, Корнев и др., 06.06.2007). Однако реализация требуемых цепочек СКВИДов на основе ВТСП технологически не решена, что ограничивает область перспективных применений усилителя.

40 Описана структура с тремя джозефсоновскими контактами (US 8179133, Kornev et al, 15.05.2012; S. Berggren, G. Prokopenko et al, "Development of 2D Bi-SQUID Arrays with High Linearity", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.23, Iss.3, p.1400208, 2013). В этом элементе параллельно основной индуктивности двухконтактного сквида предложено включить третий джозефсоновский переход, который находится всегда в сверхпроводящем состоянии и играет роль нелинейной индуктивности. Подключение джозефсоновского контакта параллельно индуктивности СКВИДа образует двойной СКВИД, далее именуемый как би-СКВИД. Такая ячейка позволяет добиться достаточно
45 высокой линейности преобразования входного сигнала в выходное напряжение

усилителя, однако и в данном случае реализовать предложенную структуру на основе высокотемпературных бикристаллических джозефсоновских контактов не представляется возможным.

Наиболее близким к патентуемому усилителю является сверхпроводящий СВЧ-усилитель на высокотемпературном СКВИДе (RU 2325004, Калабухов, Снигирев, 20.05.2008 - прототип). СВЧ-усилитель содержит двухконтактный квантовый интерферометр на основе слоистой структуры (ВТСП)/изолятор/нормальный металл, сформированной на изолирующей бикристаллической подложке, связанный с входной и выходной линиями передачи, средства электрического согласования. Линии передачи выполнены в виде копланарных линий, установленных соосно интерферометру и имеющих протяженный центральный электрод, образованный в слое ВТСП на поверхности подложки, и размещенную с зазором по обе стороны от центрального электрода по меньшей мере одну пару внешних электродов, образованных в слое нормального металла, выполняющих функцию обкладок конденсаторов средств электрического согласования. Однако преобразование магнитного сигнала в напряжение в интерферометре такого усилителя по-прежнему остается нелинейным.

Раскрытие изобретения

Предметом настоящего изобретения является конструкция СВЧ-усилителя на основе высокотемпературного СКВИДа постоянного тока, имеющего повышенную линейность преобразования приложенного магнитного сигнала в отклик напряжения.

Патентуемый СВЧ-усилитель на основе высокотемпературного СКВИДа включает параллельно соединенные первый и второй джозефсоновские контакты, образованные в слое высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) в форме петли и размещенные вдоль бикристаллической границы подложки, и входной индуктивный элемент, включенный между смежными токопроводами упомянутых джозефсоновских контактов.

Отличие состоит в том, что дополнительно введены третий и четвертый джозефсоновские контакты, причем критический ток первого и второго джозефсоновских контактов совпадает, третьего - меньше величины критического тока первого и второго переходов, а четвертого контакта - превышает эту величину.

Петля в слое ВТСП замкнута дорожкой, которая дважды пересекает бикристаллическую границу и образует замкнутый контур с упомянутым индуктивным элементом, расположенным по одну сторону бикристаллической границы.

Третий и четвертый джозефсоновские контакты размещены в местах пересечений упомянутой дорожки с бикристаллической границей, а ширина дорожки в месте размещения четвертого джозефсоновского контакта превышает одноименную для третьего джозефсоновского контакта.

Усилитель может характеризоваться тем, что отношение критического тока упомянутого четвертого джозефсоновского контакта к критическому току остальных джозефсоновских контактов более 4.

Усилитель может характеризоваться и тем, что бикристаллическая подложка выполнена из сапфира с углом разориентации границы 24° , а также тем, что слой ВТСП представляет собой соединение общей формулы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и образован на подслое из SeO_2 .

Технический результат изобретения состоит в обеспечении повышенной линейности отклика без использования цепей обратной связи в гигагерцовом диапазоне частот.

Сущность изобретения поясняется чертежами.

Краткое описание чертежей

На фиг.1 представлена блок-схема СВЧ-усилителя;

На фиг.2 представлена принципиальная схема двухконтактного СКВИДа с дополнительно введенными двумя джозефсоновскими контактами;

На фиг.3 представлена схематическая топология слоя ВТСП на изолирующей бикристаллической подложке с двумя идентичными джозефсоновскими контактами и
5 дополнительным нелинейным джозефсоновским шунтированием индуктивного элемента;

На фиг.4 представлен расчетный вид вольт-потокковой зависимости би-СКВИДа с четырьмя джозефсоновскими контактами в сравнении с вольт-потокковой зависимостью двухконтактного СКВИДа;

На фиг.5 представлены отклики напряжения последовательно соединенных би-СКВИДов в случае номинальной величины критического тока I_C джозефсоновских переходов и в случае $\pm 2\%$ -го отклонения I_C от номинального значения.

Осуществление изобретения

В основе изобретения лежит оптимизация конструкции устройства сверхпроводящего высокотемпературного СВЧ-усилителя на СКВИД: параллельно основной
15 индуктивности двухконтактного СКВИДа подключены два последовательно соединенных джозефсоновских контакта, которые находятся всегда в сверхпроводящем состоянии и играют роль нелинейной индуктивности. Введение дополнительного нелинейного шунтирования индуктивного элемента посредством джозефсоновских
20 контактов обеспечивает нелинейное преобразование входного магнитного сигнала в джозефсоновскую фазу двухконтактного интерферометра, что обеспечивает при надлежащем подборе параметров линейную зависимость выходного напряжения от величины приложенного потока.

СВЧ-усилитель на основе высокотемпературного СКВИДа (фиг.1, 2) содержит
25 входную линию 1, би-СКВИД 2 с четырьмя джозефсоновскими контактами 21, 22, 23 и 24. Входная линия 1 характеризуется внутренним импедансом Z_i (поз.3) и индуктивным элементом 4, задающим магнитный поток Φ через индуктивный элемент би-СКВИДа 2. Схема включает линию 5 задания рабочей точки би-СКВИДа, причем величина протекающего через эту линию тока равна I_B , и выходную линию 6.

Би-СКВИД с четырьмя джозефсоновскими контактами представляет (фиг.3)
30 структуру, размещенную на сапфировой бикристаллической подложке 7 с бикристаллической границей 8. Кристаллофизические параметры подложки и технология образования слоистой структуры (условно обозначена поз.9) в данном описании не приводятся и известны из уровня техники (см., например, E. Stepantsov et al., THz Josephson
35 properties of grain boundary YBaCuO junctions on symmetric, tilted bicrystal sapphire substrates, J. Appl. Phys., v.96, N 6, pp.3357-3361, 2004).

СВЧ-усилитель на основе высокотемпературного би-СКВИДа 2 включает идентичные и параллельно соединенные первый 21 и второй 22 джозефсоновские контакты, образованные в слое 10 высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) в форме
40 петли и размещенные вдоль бикристаллической границы 8 подложки 7.

Высокотемпературный би-СКВИД 2 содержит индуктивный элемент 11, включенный между смежными токопроводами джозефсоновских контактов 21 и 22, который также образован в слое 10. Введены третий 23 и четвертый 24 джозефсоновские контакты, причем критический ток первого и второго контактов 21 и 22 совпадает, третьего
45 контакта - меньше этой величины, а четвертого контакта - превышает эту величину, т.е. $I_{C(24)} > I_{C(21,22)} > I_{C(23)}$.

Слой 10 ВТСП в форме петли соединен с дорожкой 12, которая дважды пересекает бикристаллическую границу 8 и образует замкнутый контур с индуктивным элементом

11, расположенным по одну сторону 13 бикристаллической границы 8. По другую сторону 14 границы 8 размещены части 15, 16 слоя ВТСП.

Третий и четвертый джозефсоновские контакты 23, 24 размещены в местах пересечений упомянутой дорожки 12 с бикристаллической границей 8. Ширина b дорожки 12 в месте 17 размещения четвертого джозефсоновского контакта 24 превышает одноименную a для третьего джозефсоновского контакта, таким образом, что $a < 0,2b$ (снизу величина a ограничена возможностями современной технологии). Это необходимо для того, чтобы обеспечить надлежащий вид преобразования входного магнитного сигнала в джозефсоновскую фазу двухконтактного интерферометра и упомянутой джозефсоновской фазы интерферометра - в выходной отклик напряжения.

Отношение критического тока джозефсоновского контакта 24 к критическому току джозефсоновских контактов 21, 22 более четырех. Это условие выбрано из соображений оптимизации линейности отклика напряжения и его амплитуды. Отношение нормированной индуктивности l индуктивного элемента 11 к нормированной индуктивности дорожки 12 более 10. Принципы подбора оптимального значения l в данном описании не приводятся и известны из уровня техники (см., например, Kornev V., Soloviev I., Klenov N., Mukhanov O., "Bi-SQUID: a novel linearization method for dc SQUID voltage response", Supercond. Sci. Technol., vol.22, p.114011, 2009). Отношение критического тока джозефсоновского контакта 23 к критическому току джозефсоновских контактов 21, 22 может находиться в диапазоне 0,5-1, т.е. $I_{C(23)} = (0,5-1)I_{C(21,22)}$ и выбрано так, чтобы обеспечить надлежащий вид преобразования входного магнитного сигнала в джозефсоновскую фазу двухконтактного интерферометра и упомянутой джозефсоновской фазы интерферометра - в выходной отклик напряжения.

Структура непосредственно самого высокотемпературного би-СКВИДа 2 имеет два слоя: по всей плоскости подложка 7 покрывается подслоем оксида церия CeO_2 , поверх которого без разрыва вакуума наносится пленка ВТСП - соединение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.

Далее при необходимости для формирования входных и выходных линий на подложку со сформированной литографией в слоях CeO_2/YBCO структурой наносится слой изолятора - SiO_2 , и в нем литографией формируют часть элементов согласования. Затем наносится слой золота, в котором формируют остальные элементы СВЧ-усилителя. Толщины пленок составляют: подслой CeO_2 - 30 нм, слой ВТСП (YBCO) - 250 нм, слой SiO_2 - 400 нм, слой золота - 200 нм. Бикристаллические сапфировые подложки с углом разориентации 24° обеспечивают получение значений характерного джозефсоновского напряжения V_C на уровне 0,2 мВ при 77 К (А. Kalabukhov, et al., "Design, fabrication and experimental investigation of high-Tc dc SQUID RF amplifier with a slot-line input circuit" - in Extended Abstract of International Superconductive Electronics Conference (ISEC'05), Noordwijkerhout, The Netherlands, September 5-9, 2005, Report P-H 23).

На фиг.4 представлен расчетный вид вольт-поточковой зависимости би-СКВИДа с четырьмя джозефсоновскими контактами в сравнении с вольт-поточковой зависимостью двухконтактного СКВИДа. Из сравнения представленных результатов видно, что при величине нормированной индуктивности $l=0,5$ двухконтактного интерферометра и отношении критического тока I_C контакта 24 к критическому току I_C контактов 21(22), равному 4, отклик напряжения V би-СКВИДа на магнитный сигнал Φ существенно линеаризуется, обеспечивая достижение технического результата. Для достижения технического результата необходимо также чтобы отношение нормированной индуктивности l индуктивного элемента 11 к нормированной индуктивности дорожки

12 было более 10.

На фиг.5 представлены отклики напряжения V последовательно соединенных би-СКВИДов в случае номинальной величины критического тока I_C джозефсоновских

5 контактов и в случае $\pm 2\%$ -го отклонения критического тока от номинального значения. Видно, что отклонение критического тока от номинального значения приводит в основном к изменению амплитуды откликов, практически не изменяя при этом линейности и формы откликов.

10 Таким образом, представленные данные свидетельствуют о достижении технического результата в гигагерцовом диапазоне частот в части повышения линейности отклика без использования цепей обратной связи.

Формула изобретения

1. СВЧ-усилитель на основе высокотемпературного СКВИДа, включающий параллельно соединенные первый и второй джозефсоновские контакты, образованные
15 в слое высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) в форме петли и размещенные вдоль бикристаллической границы подложки, и входной индуктивный элемент, включенный между смежными токоподводами упомянутых джозефсоновских контактов, отличающийся тем, что

20 дополнительно введены третий и четвертый джозефсоновские контакты, причем критический ток первого и второго джозефсоновских контактов совпадает, третьего - меньше величины критического тока первого и второго переходов, а четвертого контакта - превышает эту величину,

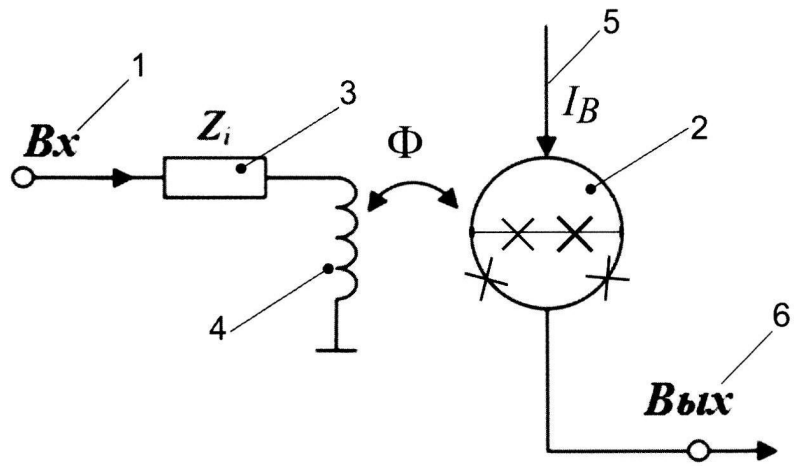
петля в слое ВТСП замкнута дорожкой, которая дважды пересекает бикристаллическую границу и образует замкнутый контур с упомянутым индуктивным
25 элементом, расположенным по одну сторону бикристаллической границы, при этом третий и четвертый джозефсоновские контакты размещены в местах пересечений упомянутой дорожки с бикристаллической границей по обе стороны от первого и второго джозефсоновских контактов, а ширина дорожки в месте размещения четвертого джозефсоновского контакта превышает одноименную для третьего джозефсоновского
30 контакта.

2. СВЧ-усилитель по п.1, отличающийся тем, что ширина дорожки в месте размещения четвертого джозефсоновского контакта превышает одноименную для третьего джозефсоновского контакта.

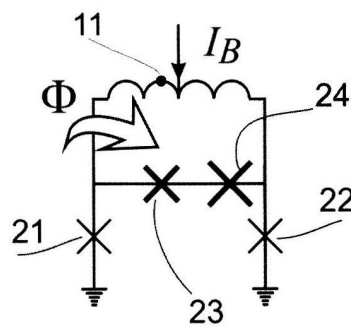
3. СВЧ-усилитель по п.1, отличающийся тем, что отношение критического тока упомянутого четвертого джозефсоновского контакта к критическому току остальных джозефсоновских контактов более 4.

4. СВЧ-усилитель по п.1, отличающийся тем, что бикристаллическая подложка выполнена из сапфира с углом разориентации 24° .

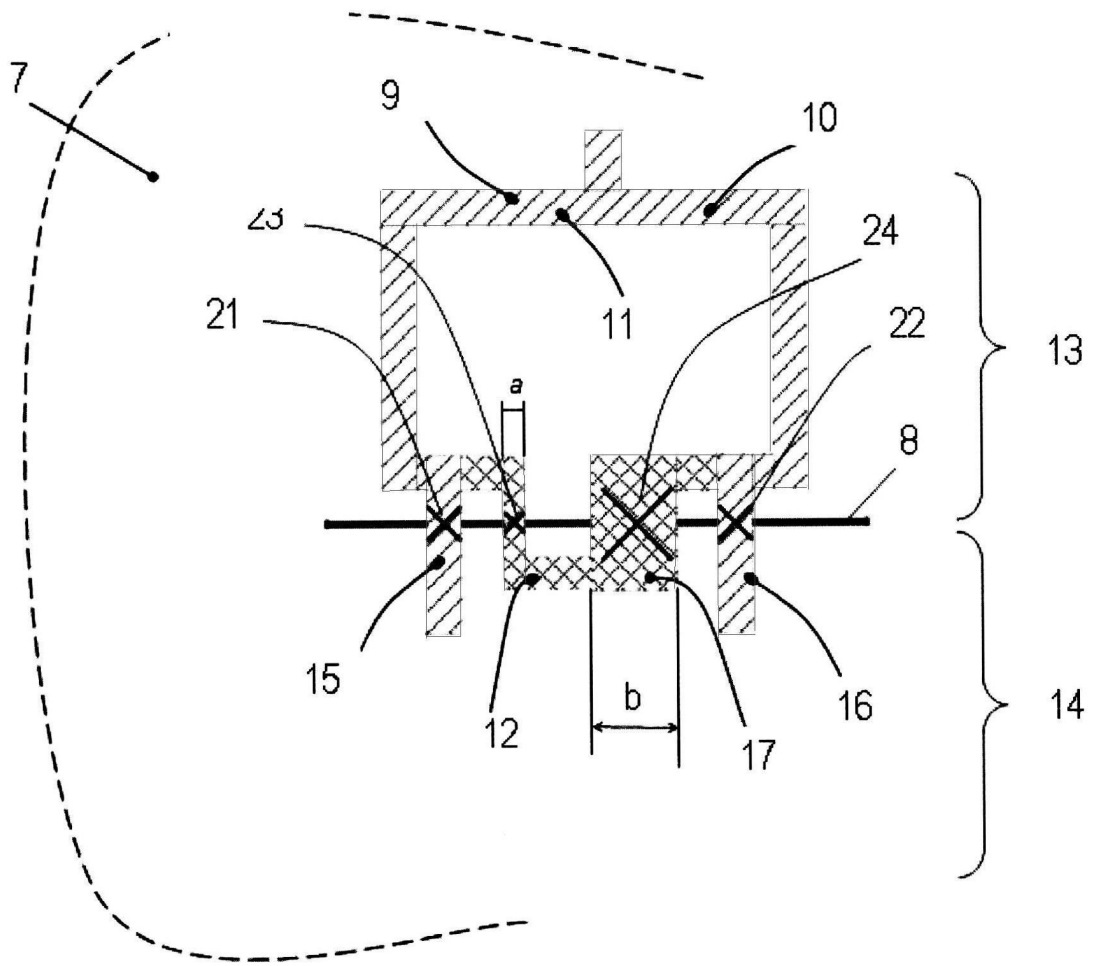
40 5. СВЧ-усилитель по п.1, отличающийся тем, что слой ВТСП представляет собой соединение общей формулы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ и образован на подслое из CeO_2 .



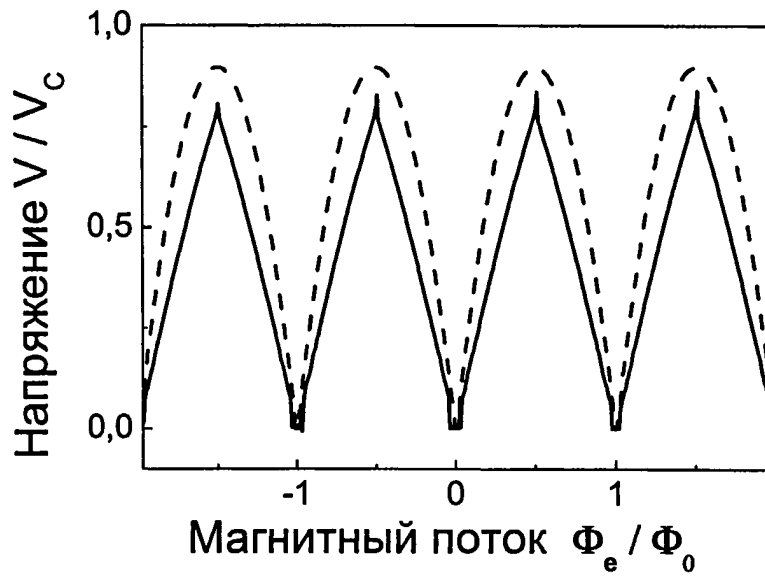
ФИГ. 1



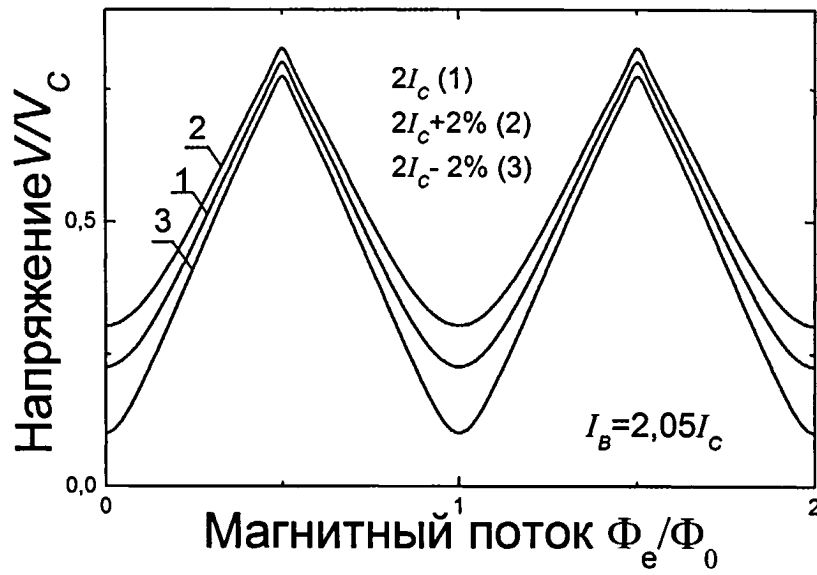
ФИГ. 2



ФИГ. 3



ФИГ. 4



ФИГ. 5