



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2006134451/28, 29.09.2006

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.09.2006

(45) Опубликовано: 20.05.2008 Бюл. № 14

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: И.А.Волков и др., Радиотехника и
электроника, 2001, т.46, № 7, стр.892-896. RU
2133525 C1, 20.07.1999. JP 6232464 A,
19.08.1994. JP 1260868 A, 18.10.1989. JP
5167113 A, 02.07.1993. JP 1041879 A, 14.02.1989.

Адрес для переписки:

119992, Москва, ГСП-2, Ленинские Горы, НИИЯФ
МГУ им. М.В.Ломоносова, проф.М.Ю.Куприянову

(72) Автор(ы):

Волков Иван Александрович (RU),
Куприянов Михаил Юрьевич (RU),
Снигирев Олег Васильевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

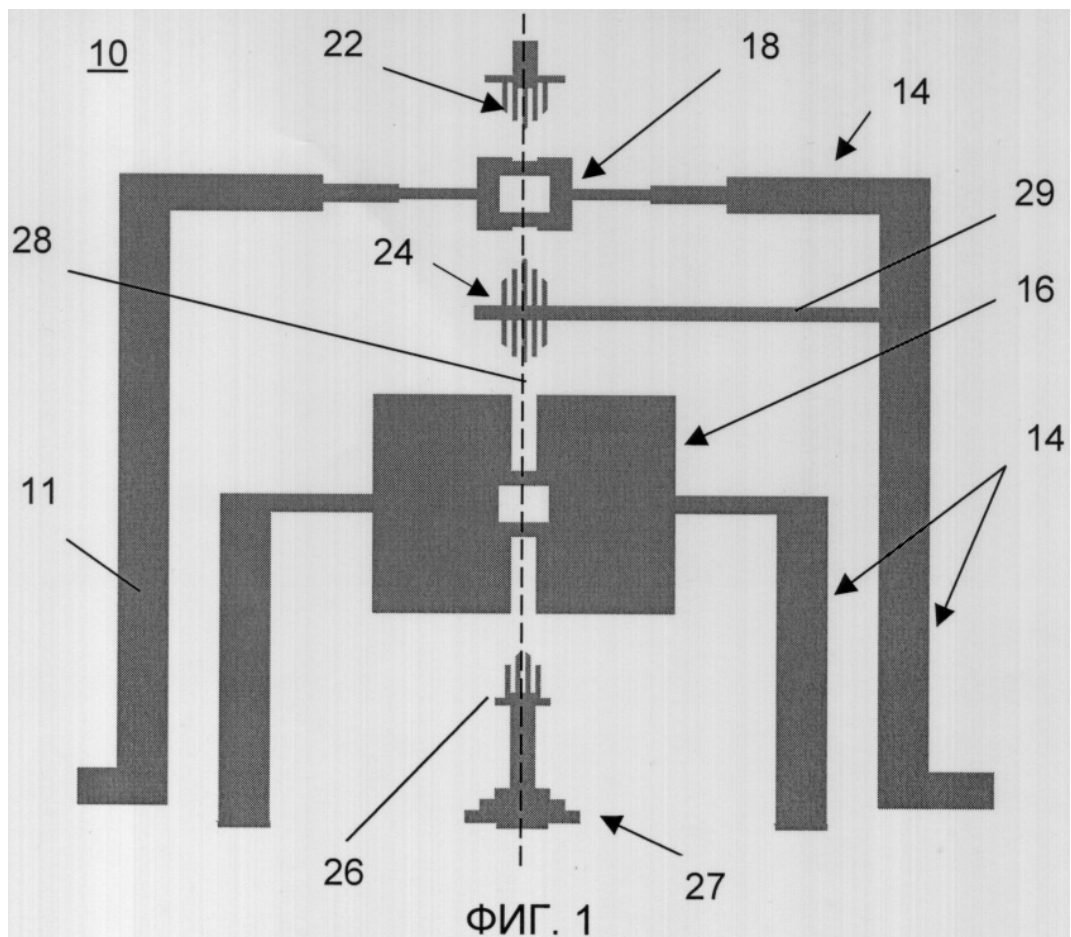
Государственное учреждение Научно-
исследовательский институт ядерной физики
Московского государственного университета им.
М.В. Ломоносова (RU)

(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СКВИДОВ С СУБМИКРОННЫМИ ДЖОЗЕФСОНОВСКИМИ
ПЕРЕХОДАМИ В ПЛЕНКЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДНИКА

(57) Реферат:

Изобретение относится к технологии микроэлектроники. Способ позволяет повысить воспроизводимость и достичь более высоких значений электрофизических параметров формируемых переходов. Сущность изобретения: способ изготовления СКВИДов с субмикронными джозефсоновскими переходами в пленке высокотемпературного сверхпроводника характеризуется тем, что образуют по меньшей мере две промежуточные топологии СКВИД с различающимися внешними размерами контуров, реперные шкалы выполняют гребенчатыми, штыри

которых гальванически связаны через перемычку с одним из токоподводов и основной массой, при этом одну из реперных шкал размещают между промежуточными топологиями, а остальные - снаружи их. Формирование основной топологии начинают с промежуточной топологии СКВИД, имеющей большую площадь, причем размер поля электронной экспозиции в направлении, перпендикулярном бикристаллической границе, устанавливают равным 0,4-0,6, а вдоль бикристаллической границы - 1,0-1,5 от ширины джозефсоновских переходов промежуточной топологии. 7 з.п. ф-лы, 2 табл., 3 ил.





FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) ABSTRACT OF INVENTION(21), (22) Application: **2006134451/28, 29.09.2006**(24) Effective date for property rights: **29.09.2006**(45) Date of publication: **20.05.2008 Bull. 14**

Mail address:

**119992, Moskva, GSP-2, Leninskie Gory, NIIJaF
MGU im. M.V.Lomonosova, prof.M.Ju.Kuprijanovu**

(72) Inventor(s):

**Volkov Ivan Aleksandrovich (RU),
Kuprijanov Mikhail Jur'evich (RU),
Snigirev Oleg Vasil'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe uchrezhdenie Nauchno-
issledovatel'skij institut jadernoj fiziki
Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta im.
M.V. Lomonosova (RU)**

(54) METHOD OF SQUID FORMATION WITH SUBMICRON JOSEPHSON JUNCTIONS MOUNTED IN HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTOR FILM

(57) Abstract:

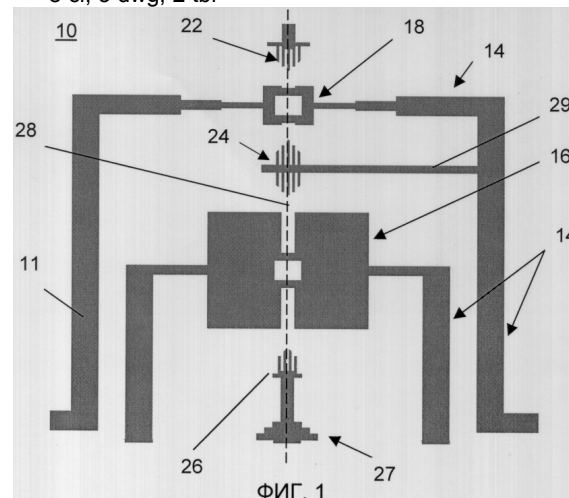
FIELD: microelectronics.

SUBSTANCE: method of SQUID formation with submicron Josephson junctions mounted in high-temperature superconductor film is characterized by forming at least two intermediate SQUID topologies of different external dimensions of circuits. Reference scales are comb with pins galvanically connected through bridge with one of current suppliers and great bulk. One of reference scales is placed between intermediate topologies, and the others are outside. Formation of basic topology is begun by intermediate SQUID topology of greater area. Width of electronic exposure field perpendicular to bicrystal boundary is fixed equal to 0.4-0.6, and parallel to bicrystal boundary - equal to 1.0-1.5 of Josephson junctions width of intermediate topology.

EFFECT: improved reproducibility and enhanced

electrophysical characteristics of formed junctions.

8 cl, 3 dwg, 2 tbl



Изобретение относится к технологии микроэлектроники и может быть использовано при изготовлении электронных приборов, работа которых основана на сверхпроводимости и эффекте Джозефсона.

Тонкопленочные микроэлектронные устройства, работающие при температурах жидкого азота, используют так называемые высокотемпературные сверхпроводники (далее ВТСП). Эти вещества имеют высокую температуру перехода в сверхпроводящее состояние (от 40 К до 120 К), что дает возможность значительно расширить применение сверхпроводниковых приборов, в том числе и СКВИДов. Однако переход на азотные рабочие температуры встречает серьезные проблемы из-за специфических свойств ВТСП материалов, а также по причине увеличения уровня шума СКВИДов с ростом температуры.

Вследствие малой длины когерентности и высокой анизотропии свойств ВТСП материалов возникли трудности в создании джозефсоновских переходов на их основе. Высокую воспроизводимость результатов дает использование тонких эпитаксиальных ВТСП пленок, к которым относится, в частности, соединение $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, иногда указываемое как YBaCuO (далее YBCO). Они выращиваются на бикристаллических подложках, выполненных из двух сросшихся монокристаллов с повернутыми кристаллографическими осями. В этом случае слабая связь формируется по их границе. Ниже описаны некоторые технические решения, направленные на получение ВТСП пленок, которые могут быть использованы для создания джозефсоновских переходов и СКВИДов на их основе. Отметим, что для повышения предельной чувствительности ВТСП СКВИДов по магнитному потоку и для расширения диапазона их работы во внешних магнитных полях необходимо использование в них джозефсоновских переходов субмикронной ширины.

Для формирования YBCO джозефсоновских переходов с шириной от 2 мкм и более применяется стандартная хорошо отработанная технология с использованием фотолитографии и жидкостного травления ВТСП пленки (например, в слабом растворе HNO_3). Однако данную методику нельзя использовать для воспроизводимого изготовления переходов субмикронной ширины. Одним из возможных вариантов изготовления субмикронных YBCO переходов является ионное травление ВТСП пленки через углеродную маску. Выбор именно ионного травления YBCO пленки обусловлен тем, что соединение YBCO является практически инертным ко всем известным на данный момент реактивным газам, используемым для плазмохимического травления.

Известен способ формирования пленок YBCO, выращиваемых на подложках Al_2O_3 , с использованием эпитаксиальных подслоев ZrO_2 , стабилизированного иттрием, MgO , SrTiO_3 (DE 4213432, SCHMIDT, 1993). Однако сложность выполняемых процедур снижает воспроизводимость электрофизических параметров изготавливаемых структур.

Описан способ формирования джозефсоновского перехода на подложке из SrTiO_3 в области зерновой границы в пленке высокотемпературного сверхпроводника YBCO посредством создания двух сверхпроводящих областей с а- и с-ориентациями (JP 4318984, Kurosawa, 1992). Однако воспроизводимость электрофизических параметров таких структур не может быть высокой из-за низкой контролируемости роста данных областей.

Известен также способ изготовления пленок YBCO на подложках из MgO (RU 2055421 C1, Полищук, 1996). Выращивание проводится в вакуумной камере, оснащенной испарителями для YBCO и нагревателями подложек, в присутствии атомарного кислорода, который окисляет растущую пленку. По рекомендованным режимам получения атомарного кислорода в едином вакуумном цикле получены сверхпроводящие пленки YBCO с критической температурой выше 70 К, однако этот способ не раскрывает особенностей формирования джозефсоновских переходов на их основе.

Известен способ изготовления джозефсоновского перехода с использованием пленок YBCO на подложке из SrTiO_3 , в котором слабая связь формируется в зоне контакта двух сверхпроводящих пленок, между которыми методом ионного травления диэлектрической пленки сформирована ступенька (JP 7302935, IENSUPEETAA et al., 1995). Однако использование дополнительного эпитаксиального диэлектрического слоя в процессе формирования таких структур может принципиально снизить воспроизводимость

электрофизических параметров.

Известен способ формирования мостиков в структурах YBCO/CeO₂ методами стандартной фотолитографии и жидкостного химического травления (US 6242387, CUKAUSKAS, 2001). Однако после выполнения указанных технологических процедур
 5 наблюдалась существенная деградация в температуре перехода в сверхпроводящее состояние, в результате чего некоторые образцы становились несверхпроводящими. Во избежание ухудшения сверхпроводящих свойств проводилось механическое скрайбирование пленки с формированием мостиков шириной 1-2 мм, в которых измерялась температурная зависимость плотности критического тока вблизи температуры перехода в
 10 сверхпроводящее состояние. Однако указанный способ не затрагивает технологию формирования сверхпроводящих структур субмикронного масштаба.

Известен также способ формирования джозефсоновских переходов на ступеньке (US 6423473, SUNG GUN YONG, 2002). Он включает следующие операции: (а) изготовление ступеньки на подложке SrTiO₃; (б) напыление тонкой пленки YBCO на подготовленную
 15 подложку; (в) формирование микромостика методами фотолитографии и ионного травления с последующим отжигом. Двухступенчатый процесс отжига проводится после формирования металлических электродов перехода, что позволяет улучшить характеристики джозефсоновских переходов такого типа. Однако воспроизводимость электрофизических параметров формируемых таким образом джозефсоновских переходов,
 20 как правило, ниже, чем в случае использования бикристаллических подложек.

Известен способ формирования пленок YBCO на монокристаллических подложках из SrTiO₃ методом лазерной абляции (RU 2275714 C1, Югай и др., 27.04.2006). Мишень из поликристаллического образца YBCO распылялась с помощью лазера при давлении воздуха 0,1-0,2 торр и стабилизированной температуре 860°C. Для этой цели
 25 использовался импульсный лазер Nd:YAG с длиной волны излучения $\lambda=1,06$ мкм, длительностью импульса от 20 до 40 нс, с частотой повторения импульсов $f=12$ Гц, энергия в импульсе - от 40 до 200 мДж/имп. Однако это техническое решение не затрагивает процесса изготовления собственно СКВИДа, а, кроме того, при использовании длинноволнового излучения для абляции YBCO в осажденной пленке образуется больше
 30 капель, что уменьшает плотность критического тока такой пленки и, соответственно, плотность тока формируемых в ней джозефсоновских переходов.

Известно использование реперов для позиционирования пленок ВТСП относительно линии бикристаллического шва в процессе формирования СКВИД (JP 6232464, HISAGAI et al., 1994).

Наиболее близким по совокупности признаков и назначению является способ изготовления СКВИДов с субмикронными джозефсоновскими переходами, использующий углеродные маски для получения в пленке YBCO субмикронных мостиков и джозефсоновских переходов с использованием вторичной электронной литографии и ионного травления (И.А.Волков и др. Радиотехника и электроника. 2001, т.46, №7, с.892-
 40 896 - ближайший аналог). Технологическая схема инвариантна по отношению к сверхпроводящим параметрам ВТСП пленки. Осаждение углеродных пленок на поверхность ВТСП является одним из наиболее важных этапов в разработанном технологическом процессе. Углерод является химически инертным по отношению к YBCO и обладает очень низкой скоростью ионного распыления, что является немаловажным, так
 45 как скорость ионного травления монокристаллической YBCO пленки также невысока, а, кроме того, углерод является безвредным элементом. Вольтамперные и шумовые характеристики джозефсоновских переходов приведены в последующих публикациях (I.Volkov, et al., Physica C, vol.372-376, pp.72-75, 2002; I.Volkov, et al, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.13, no.2, pp.861-864, 2003).

Анализ аналогов и прототипа показывает, что основной трудностью в создании ВТСП СКВИДов является воспроизводимое изготовление субмикронных джозефсоновских переходов. Для обеспечения высокой чувствительности СКВИДов по магнитному потоку необходимо, чтобы два субмикронных перехода СКВИДа имели высокие несильно

различающиеся значения плотности критического тока ($j_c \sim 10^4$ А/см²).

Задачей настоящего изобретения является усовершенствование технологии изготовления субмикронных джозефсоновских переходов в пленках YBCO на бикристаллических подложках SrTiO₃, который позволит повысить воспроизводимость и

5 достигнуть более высоких значений электрофизических параметров формируемых переходов при реализации на одной подложке по меньшей мере двух СКВИДов, имеющих разные по площади приемные контуры. Такие элементы могут быть использованы в магнитометрии, в частности, для проведения релаксометрической и шумовой диагностики магнитных наночастиц.

10 Технический результат изобретения состоит в обеспечении долговременной стабильности сверхпроводящих свойств пленки ВТСП за счет оптимизации режимов осаждения слоев, экспозиции и травления масочных слоев при температурах, не превышающих температуру полиморфных превращений в ВТСП пленке.

Технический результат обеспечивается тем, что способ изготовления СКВИДов с

15 субмикронными джозефсоновскими переходами в пленке высокотемпературного сверхпроводника включает нанесение пленки высокотемпературного сверхпроводника YBa₂Cu₃O_{7-x} на бикристаллическую подложку методом лазерной абляции, образование методами фотолитографии токоподводов, промежуточной топологии СКВИД и реперных шкал, размещаемых параллельно бикристаллической границе, последовательное

20 нанесение слоев углерода, германия, позитивного электронного резиста и формирование электронной литографией основной топологии СКВИДов путем перемещения поля электронной экспозиции относительно реперных шкал, плазмохимическое травление в ВЧ-разряде с последовательным вскрытием окон в слоях германия и углерода и травление открытых участков пленки YBa₂Cu₃O_{7-x} в пучке положительно заряженных ионов аргона с

25 получением СКВИДов.

Способ характеризуется тем, что образуют по меньшей мере две промежуточные топологии СКВИД с различающимися внешними размерами контуров, реперные шкалы выполняют гребенчатыми, штыри которых гальванически связаны через переключку с

30 одним из токоподводов и основной массой, при этом одну из реперных шкал размещают между промежуточными топологиями, а остальные - снаружи их. Формирование основной топологии начинают с промежуточной топологии СКВИД, имеющей большую площадь, причем размер поля электронной экспозиции в направлении, перпендикулярном бикристаллической границе, устанавливают равным 0,4-0,6, а вдоль бикристаллической границы - 1,0-1,5 от ширины джозефсоновских переходов промежуточной топологии.

35 Способ может характеризоваться тем, что отношение внешних размеров прямоугольных контуров промежуточных топологий составляет 1:(4-6), а также тем, что используют подложки из титаната стронция или подложки из двуокиси циркония, стабилизированной иттрием.

Способ может характеризоваться и тем, что плазмохимическое травление слоя углерода

40 в ВЧ-разряде проводят со скоростью не выше 1.4 нм/с и при давлении $P=(1-3) \cdot 10^{-3}$ мбар в атмосфере кислорода, а слоя германия - 0.4 нм/с и давлении $P=(2-4) \cdot 10^{-2}$ мбар в атмосфере CF₄.

Способ может характеризоваться также тем, что распыление поликристаллической мишени YBa₂Cu₃O_{7-x} проводят при плотности энергии лазерного излучения $F=1,15-1,3$

45 Дж/см², давлении кислорода $P=0,18-0,22$ мбар и температуре подложки $T=730-760^\circ\text{C}$.

Способ может характеризоваться также и тем, что распыление мишени пиролитического углерода проводят при плотности энергии лазерного излучения $F=14,5-15,5$ Дж/см², давлении не выше $1 \cdot 10^{-6}$ мбар и температуре подложки $T=20-25^\circ\text{C}$.

50 Способ может характеризоваться и тем, что термическое осаждение германия проводят при давлении не выше $2 \cdot 10^{-6}$ мбар со скоростью, не превышающей 1 Å/с.

Существо изобретения поясняется на чертежах, где:

на фиг.1 представлена промежуточная топология с двумя СКВИДАми, имеющими

разные по площади приемные контуры;

на фиг.2 показан принцип формирования субмикронных джозефсоновских переходов электронной экспозицией;

на фиг.3 - структура масочных слоев и технологические этапы перед проведением электронной литографии.

Способ изготовления СКВИДов с субмикронными джозефсоновскими переходами в пленке высокотемпературного сверхпроводника предусматривает следующие технологические этапы.

1. Нанесение пленки YBCO толщиной 200-250 нм на подложку 10 методом лазерной абляции с помощью эксимерного KrF лазера при температуре подложки $T=750^{\circ}\text{C}$. Использовались бикристаллические подложки SrTiO_3 , изготовленные методом твердофазного сращивания, имеющие симметричные бикристаллические границы с углом поворота (разориентации) 24° . Перед каждым напылением проводился контроль качества подложек: с помощью рентгеноструктурного анализа определялись углы кручения, вращения и поворота двух половинок бикристаллических подложек друг относительно друга, отклонения которых от требуемых значений не превышали 0.5° . Также анализировалась блочность подложек: максимальные углы разворота блоков составляли 0.5° . Для контроля шероховатости поверхности подложек применялся метод атомно-силовой микроскопии (АСМ). Средняя по подложке шероховатость поверхности после химико-механической полировки, как правило, составляла значения не более 5 нм. Возможно использовать бикристаллические подложки из двуокиси циркония, стабилизированной иттрием.

Для абляции поликристаллической YBCO мишени применялся эксимерный KrF лазер, генерирующий излучение на длине волны $\lambda=248$ нм. Напыление проводилось при плотности энергии лазерного излучения на мишени $F=2$ Дж/см², давлении кислорода $P=0.2$ мбар и температуре подложки $T=750^{\circ}\text{C}$. Толщина полученных пленок составляла около 200 нм, что соответствовало 4000 лазерным импульсам при площади сфокусированного лазерного пучка на мишени, равной 5 мм². Типичные значения температуры T_c перехода в сверхпроводящее состояние и плотности j_c критического тока YBCO пленок составляли значения $87\div 89$ К и $1.5\div 2\cdot 10^6$ А/см², соответственно.

2. Затем на подложке 10 с нанесенной пленкой 11 YBCO, используя фотолитографию и жидкостное травление, формируют подводящие линии 14 с контактными площадками (не показаны) и две промежуточные топологии 16, 18, из которых в дальнейшем будут изготовлены основные топологии - рабочие СКВИД с субмикронными переходами (см. фиг.1). Размеры промежуточной топологии: d - размер внутреннего контура, D - размер внешнего контура.

Структуры 16, 18 (см. фиг.1, 2) содержат джозефсоновские переходы 20 шириной 8 и длиной 10 мкм, соответственно, и реперные шкалы 22, 24, 26, каждая из которых имеет утолщение 27 на конце, противоположном штырям. Штыри имеют цену деления 2 мкм. Реперные шкалы 22-26 располагаются на линии 28 бикристаллической границы по обе стороны структур 16, 18 приемных контуров каждого из СКВИДов. Для исключения накопления заряда при экспонировании электронным лучом, понижающего контраст, штыри реперных шкал 22-26 гальванически связаны через перемины с одним из токоподводов и основной массой. Поз.29 показана перемины, связывающая реперную шкалу 24 с токоподводом 14. Положение границы 28 по указанным реперным шкалам диагностируется с точностью ± 1 мкм с помощью просвечивающего оптического микроскопа. Размеры структур составляют: для топологии поз.16 - (40×250) мкм², для топологии поз.18 - (40×80) мкм².

3. Далее после формирования промежуточных структур 16, 18 на подложку 10 с образованным слоем 11 YBCO последовательно наносятся слои углерода 32, германия 34 и позитивного электронного резиста 36 (фиг.3).

Однородные углеродные пленки, используемые в качестве масок для ионного травления

YBCO, наносились методом лазерной абляции графита. Внутри вакуумной камеры размещались мишень из пиролитического графита и YBCO пленки, выращенные на подложках SrTiO_3 , которые находились при комнатной температуре. В камере поддерживалось давление 10^{-6} мбар. Для абляции углерода использовался KrF лазер.

5 Напыление углеродных пленок проводилось при плотности энергии лазерного излучения на поверхности мишени $F=15$ Дж/см² и площади пятна фокусировки лазерного излучения, равной 3 мм². Толщина углеродных пленок составляла 100 нм, что соответствовало 13000 лазерным импульсам. Подготовленная таким образом подложка со слоем YBCO

10 устанавливалась на столик электронного микроскопа и проводилась электронная литография. При оценке точности совмещения субмикронного перехода со швом учитывается люфт (± 1 мкм перпендикулярно шву) шагового двигателя. Минимальная длина субмикронного перехода, гарантирующая его попадание в шов, составляет 4 мкм.

Совмещение поля электронной экспозиции происходит следующим образом (см. фиг.2).

15 Сначала, используя растр электронного микроскопа размером 1×1 мм², производится фокусировка на вспомогательную метку 27, переходящую в одну из реперных шкал. Затем, перемещая столик электронного микроскопа вдоль этой метки и подстраивая увеличение, производится фокусировка на требуемое место реперной шкалы. Далее по программе, при забланкированном луче, столик смещается на расстояние, равное длине отрезка между

20 концом требуемого штыря или зазора реперной шкалы и центром одного из переходов 20. Выполняется экспонирование боковых участков одного из переходов СКВИДа: поле электронной экспозиции заштриховано и обозначено поз.30. Затем проводят смещение в центр второго перехода 20 этого же СКВИДа при забланкированном луче и экспонируются боковые участки второго перехода СКВИДа (принцип показан для промежуточной

25 топологии 18). Аналогичная процедура продлевается с двумя переходами другого СКВИДа, используя другие реперные шкалы, также размещаемые по обе стороны топологии. Проявление электронного резиста выполняется в смеси изопропилового спирта с толуолом, в результате чего между областями экспонирования остается субмикронный мостик из резиста, служащий маской для шаблонирования нижележащих слоев.

30 4. Далее методом реактивного химического травления в ВЧ-разряде CF_4 через маску резиста формируется маска в слое Ge (фиг.3, в). Затем, используя метод реактивного химического травления в ВЧ-разряде кислорода, проводится формирование углеродной маски через германиевую (фиг.3, г). Процедура ионного травления ВТСП пленки через сформированную углеродную маску выполняется в пучке Ar^+ ионов (фиг.3, д).

35 Конкретные режимы нанесения и обработки слоев при создании СКВИДов представлены в таблице 1, в которой используются следующие обозначения: F - плотность энергии лазерного излучения на мишени, P - давление в камере, T - температура подложки, ν - частота следования лазерных импульсов, η - скорость осаждения вещества на подложку, ξ - скорость травления слоя, E - энергия ионов в пучке, J - плотность потока ионов в

40 пучке, W - мощность разряда, ω - частота вращения центрифуги, t - время.

В таблице 2 представлены электрофизические параметры СКВИДов, сформированных на одной бикристаллической подложке из титаната стронция с углом 24° разориентации кристаллической границы. Используются следующие обозначения: j_c - плотность критического тока, V_c - характеристическое напряжение джозефсоновских переходов, $S_\Phi^{1/2}$

45 - величина эквивалентного шумового потока, $S_B^{1/2}$ - величина эквивалентного шумового поля; $\Phi_0=2 \cdot 10^{-15}$ Вб - квант магнитного потока.

Эксперименты, проведенные на структурах, изготовленных по патентуемому способу, показали, что удается избежать сильной деградации свойств СКВИДов в процессе их формирования, что позволяет обеспечить стабильность свойств и достичь более высоких

50 значений электрофизических параметров джозефсоновских переходов.

Таблица 1.

Режимы нанесения и обработки масочных слоев и ВТСП пленки.

Материал слоев	Толщина, нм	Метод и режим нанесения	Метод и режим обработки
YBCO	250	Лазерная абляция: $F = 2 \text{ Дж/см}^2$, $P = 0.2 \text{ мбар}$, $T = 750^\circ\text{C}$, $\eta = 0.67 \text{ нм/с}$, $\nu = 10 \text{ Гц}$	Ar^+ -ионное травление: $E = 250 \text{ эВ}$, $J = 0.2 \text{ мА/см}^2$, $\xi = 0.5 \text{ \AA/с}$.
Углерод	100	Лазерная абляция: $F = 15 \text{ Дж/см}^2$, $P = 10^{-6} \text{ мбар}$, $T = 20^\circ\text{C}$, $\eta = 0.12 \text{ нм/с}$, $\nu = 15 \text{ Гц}$	Плазмо-химическое травление в ВЧ-разряде O_2 : $P = 2 \cdot 10^{-3} \text{ мбар}$, $W = 50 \text{ Вт}$, $\xi = 1.4 \text{ нм/с}$
Ge	20	Термическое осаждение: $\eta = 1 \text{ \AA/с}$, $P = 2 \cdot 10^{-6} \text{ мбар}$, $T \sim 20^\circ\text{C}$	Плазмо-химическое травление в ВЧ-разряде CF_4 : $P = 10^{-2} \text{ мбар}$, $W = 50 \text{ Вт}$, $\xi = 0.4 \text{ нм/с}$
Электронный резист	20	Центрифугирование: $\omega = 5000 \text{ об/мин}$ ($t = 30 \text{ с}$), сушка при $T = 100^\circ\text{C}$ на "hot-plate" в вакууме (40 мин)	Экспозиция электронным пучком и проявление в смеси ИПС + толуол: C_V (толуол) = 10 об.%

Таблица 2.

Электрофизические параметры СКВИДов, сформированных на одной подложке.

Размеры приемного контура СКВИДа ($d \times D$), мкм^2	j_C , А/см^2	V_C , мкВ	$S_\Phi^{1/2}$, $\Phi_0/\text{Гц}^{1/2}$ (на уровне белого шума)	$S_B^{1/2}$, $\text{пТл/Гц}^{1/2}$ (на уровне белого шума)
40 x 80	$2.5 \cdot 10^4$	125	10^{-5}	6.25
40 x 250	$2 \cdot 10^4$	90	$8 \cdot 10^{-6}$	1.6

Формула изобретения

1. Способ изготовления СКВИДов с субмикронными джозефсоновскими переходами в пленке высокотемпературного сверхпроводника, включающий нанесение пленки высокотемпературного сверхпроводника $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ на бикристаллическую подложку

методом лазерной абляции, образование методами фотолитографии токоподводов, промежуточной топологии СКВИД, и реперных шкал, размещаемых параллельно бикристаллической границе, последовательное нанесение слоев углерода, германия, позитивного электронного резиста и формирование электронной литографией основной

5 топологии СКВИДов путем перемещения поля электронной экспозиции относительно реперных шкал, плазмохимическое травление в ВЧ-разряде с последовательным вскрытием окон в слоях германия и углерода и травление открытых участков пленки $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ в пучке положительно заряженных ионов аргона с получением СКВИДов, отличающийся тем, что образуют по меньшей мере две промежуточные топологии СКВИД с
10 различающимися внешними размерами контуров, реперные шкалы выполняют гребенчатыми, штыри которых гальванически связаны через переключку с одним из токоподводов и основной массой, при этом одну из реперных шкал размещают между промежуточными топологиями, а остальные - снаружи их, формирование основной топологии начинают с промежуточной топологии СКВИД, имеющей большую площадь,
15 причем размер поля электронной экспозиции в направлении, перпендикулярном бикристаллической границе, устанавливают равным 0,4-0,6, а вдоль бикристаллической границы - 1,0-1,5 от ширины джозефсоновских переходов промежуточной топологии.

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что отношение внешних размеров прямоугольных контуров промежуточных топологий составляет 1:(4-6).

20 3. Способ по п.1, отличающийся тем, что используют подложки из титаната стронция.

4. Способ по п.1, отличающийся тем, что используют подложки из двуокиси циркония, стабилизированной иттрием.

5. Способ по п.1, отличающийся тем, что плазмохимическое травление слоя углерода в ВЧ-разряде проводят со скоростью не выше 1,4 нм/с и давлении $P=(1-3) \cdot 10^{-3}$ мбар в
25 атмосфере кислорода, а слоя германия - 0,4 нм/с и давлении $P=(2-4) \cdot 10^{-2}$ мбар в атмосфере CF_4 .

6. Способ по п.1, отличающийся тем, что распыление поликристаллической мишени $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ проводят при плотности энергии лазерного излучения $F=1,15-1,3$ Дж/см², давлении кислорода $P=0,18-0,22$ мбар и температуре подложки $T=730-760^\circ\text{C}$.

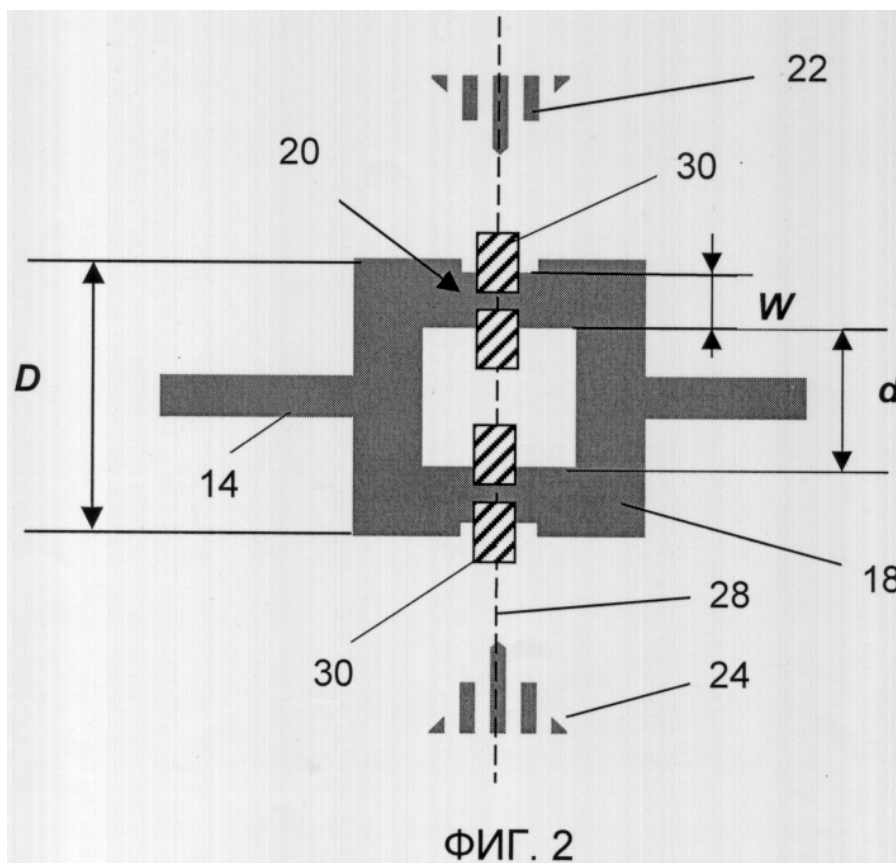
30 7. Способ по п.1, отличающийся тем, что распыление мишени пиролитического углерода проводят при плотности энергии лазерного излучения $F=14,5-15,5$ Дж/см², давлении не выше $1 \cdot 10^{-6}$ мбар и температуре подложки $T=20-25^\circ\text{C}$.

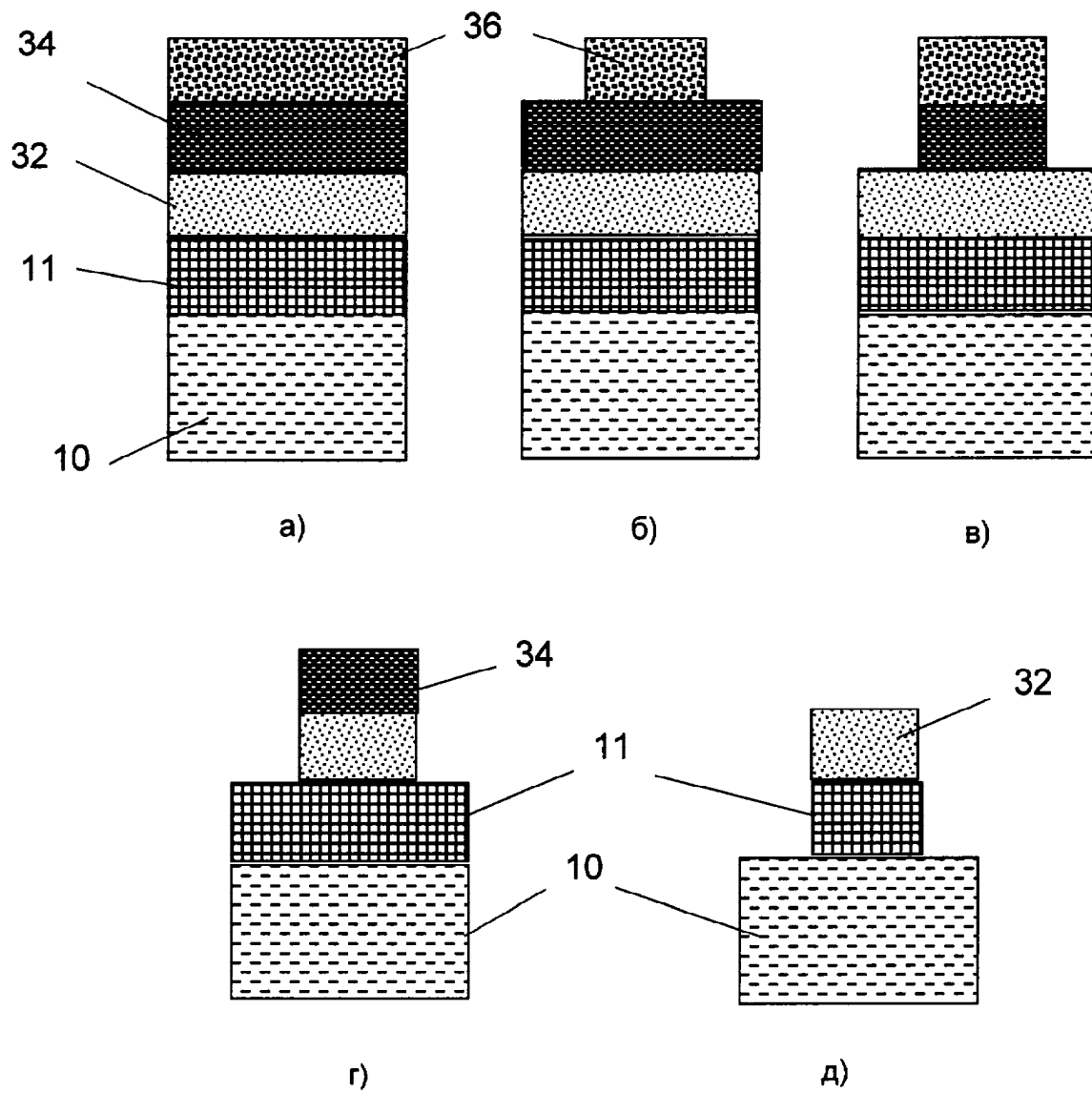
8. Способ по п.1, отличающийся тем, что термическое осаждение германия проводят при
35 давлении не выше $2 \cdot 10^{-6}$ мбар со скоростью, не превышающей 1 Å/с.

40

45

50





ФИГ. 3