



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2008121095/28, 26.05.2008

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.05.2008

(45) Опубликовано: 20.12.2009 Бюл. № 35

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: Bi-Sr-Ca-Cu-O intrinsic Josephson junctions
fabricated by inhibitory ion implantation. K.
Nakajima, et al. IEEE TRANSACTIONS ON
APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL.9,
NO.2, JUNE 1999. p.4515-4518. SU 1819358 A3,
30.05.1993. US 6188919 B1, 13.02.2001. US
4490901 A, 01.01.1985. WO 9917382 A1,
08.04.1999. KR 20030039562 A, 22.05.2003.

Адрес для переписки:

424000, Республика Марий Эл,
г.Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3, ГОУ ВПО
Марийский государственный технический
университет, отдел интеллектуальной
собственности

(72) Автор(ы):

Игумнов Владимир Николаевич (RU),
Большаков Александр Павлович (RU),
Филимонов Виталий Евгеньевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Государственное образовательное
учреждение высшего профессионального
образования Марийский государственный
технический университет (RU)

(54) СПОСОБ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДА ДЖОЗЕФСОНА

(57) Реферат:

Изобретение относится к криоэлектронике
и может быть использовано при изготовлении
ВТСП-структур. Изобретение позволяет
повысить точность и воспроизводимость
переходов Джозефсона. Сущность
изобретения: в способе изготовления перехода
Джозефсона, включающем ионное легирование
перехода примесью, подавляющей
сверхпроводимость, формирование окон для
легирования выполняют с помощью
"протаскивания иглы" атомно-силового
микроскопа, при этом время имплантации
выбирается с учетом свойств имплантанта,

сверхпроводника и параметров обработки по
формуле

$$t = \frac{1}{j} e N_{\text{кр}} \Delta R_x \sqrt{2\pi} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{d_c - h_c - R_x^*}{\Delta R_x^*} \right)^2 \right]$$

где j - плотность ионного тока, d_c -
толщина пленки ВТСП, h_c - толщина мостика
Джозефсона, R_x^* - эффективная проекция
пробега иона, характеризующая глубину
легирования, ΔR_x^* - среднее квадратичное
отклонение от R_x^* , $N_{\text{кр}}$ - концентрация
примеси, подавляющей ВТСП. 5 ил.



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) ABSTRACT OF INVENTION(21), (22) Application: **2008121095/28, 26.05.2008**(24) Effective date for property rights:
26.05.2008(45) Date of publication: **20.12.2009 Bull. 35**

Mail address:

**424000, Respublika Marij Ehl, g.Joshkar-Ola, pl.
Lenina, 3, GOU VPO Marijskij gosudarstvennyj
tekhnicheskij universitet, otdel intellektual'noj
sobstvennosti**

(72) Inventor(s):

**Igumnov Vladimir Nikolaevich (RU),
Bol'shakov Aleksandr Pavlovich (RU),
Filimonov Vitalij Evgen'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Gosudarstvennoe obrazovatel'noe uchrezhdenie
vysshego professional'nogo obrazovanija
Marijskij gosudarstvennyj tekhnicheskij
universitet (RU)**

(54) METHOD OF MAKING JOSEPHSON JUNCTION

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to cryoelectronics and can be used in making high-temperature superconductivity structures. In the method of making a Josephson junction, which involves ion implantation of the junction with a dopant which exhibits superconductivity, doping windows are formed through "sliding the needle" of an atomic-force microscope. Implantation time is chosen taking into account properties of the implant, superconductor and processing parameters using formula

$$t = \frac{1}{j} e N_{cr} \Delta R_X \sqrt{2\pi} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{d_C - h_C - R_X^*}{\Delta R_X^*} \right)^2 \right],$$

where j is ion current density, d_C is thickness of the high-temperature superconductive film, h_C is thickness of the Josephson bridge, R_X^* is the effective projection of the ion path, characterised by doping depth, ΔR_X^* is mean square deviation from R_X^* , N_{cr} is concentration of the dopant which exhibits high-temperature superconductivity.

EFFECT: invention increases accuracy and reproducibility of Josephson junctions.

5 dwg

Изобретение относится к криоэлектронике и может быть использовано при изготовлении приборов с переходами Джозефсона.

Известны способы изготовления переходов Джозефсона в виде мостиков переменной толщины (МПТ), когда на диэлектрическую подложку наносят
5 сверхпроводящую пленку, а на ней формируют электроды [1, с.27]. Таким образом изготавливают переходы Джозефсона из низкотемпературных металлических сверхпроводников.

Наиболее близким техническим решением является способ изготовления перехода
10 Джозефсона (МПТ), при котором на поверхность слоя высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) наносят защитный слой металла (Ag, Au), где методом фотолитографии формируют окна. В эти окна внедряют примесь, угнетающую сверхпроводимость ВТСП слоя (например, Si). Реальная толщина сверхпроводника в этой области уменьшается и образуется МПТ, обладающий эффектом Джозефсона [2].

15 Для получения качественных МПТ необходимо, чтобы тонкий участок мостика имел длину не более 80 нм и длина окна в защитном слое не может быть большей. Такое разрешение лежит на пределе возможностей электронно-лучевой проекционной литографии, т.е. недостаток известного способа заключается в его невысокой
20 воспроизводимости. Кроме того, без учета свойств ВТСП и параметров ионной имплантации невозможно получить удовлетворительные параметры перехода Джозефсона. Примеры: недостаточная или избыточная толщина мостика, проникновение ионов имплантанта под защитный слой и т.д.

25 Техническим результатом изобретения является повышение воспроизводимости и свойств перехода Джозефсона.

Указанный технический результат достигается тем, что окна в защитном покрытии формируют с помощью иглы атомно-силового микроскопа. На глубине окна 5-40 нм
30 длина 10-15 нм. Указанный технический результат достигается также тем, что условия ионной имплантации выбирают с учетом свойств и толщины слоя сверхпроводника, а также с учетом требуемой толщины перехода МПТ.

Известна формула для проекции пробега иона R_X , характеризующая глубину легирования [3],

$$35 \quad R_X = \frac{1}{N_M} \int_0^E \frac{dE}{S_n + S_e}, \quad (1)$$

где N_M - плотность атомов мишени;

S_n, S_e - ядерная, электронная тормозная способность мишени;

40 E - энергия иона в точке X, расположенной на его пути.

В свою очередь ядерная тормозная способность

$$S_n = 0,17 \cdot 10^{-36} \frac{Z_U Z_M}{Z^{1/3}} \frac{MU}{M_U + M_M}, \quad (2)$$

где Z_U, Z_M - атомные номера иона и атома мишени;

$$45 \quad Z^{1/3} = (Z_U^{2/3} + Z_M^{2/3})^{1/2};$$

M_U, M_M - относительные молярные массы иона и материала мишени.

Электронная тормозная способность равна

$$50 \quad S_e = k E^{1/2}, \quad (3)$$

где k - коэффициент, зависящий от природы иона и материала мишени.

Для ионов, энергия которых составляет $1,2 \cdot 10^{-14}$ Дж [2], электронной тормозной способностью можно пренебречь и выражение (1) записать в виде

$$R_x = \frac{5,73 \cdot 10^{-36}}{N_M} \frac{Z^{1/3}}{Z_U Z_M} \frac{M_U + M_M}{M_U} E. \quad (4)$$

Известно, что концентрация примеси на глубине X в мишени, легированной методом ионной имплантации подчиняется гауссовскому закону

$$N_x = \frac{N_s}{\Delta R_x \cdot \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{X - R_x}{\Delta R_x} \right)^2 \right]. \quad (5)$$

где ΔR_x - среднеквадратичное отклонение от R_x ;

N_s - поверхностная концентрация ионов имплантанта.

Для однократно ионизированных атомов можно записать

$$N_s = Q_{обл} / e = j t / e; \quad (6)$$

где $Q_{обл}$ - доза облучения;

e - заряд электрона;

j - плотность ионного тока;

t - время имплантации.

С учетом (6) выражение (5) можно записать в виде

$$N_x = \frac{j t}{\Delta R_x \cdot e \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{d_c - h_c - R_x}{\Delta R_x} \right)^2 \right]. \quad (7)$$

где d_c - толщина пленки ВТСП;

h_c - толщина мостика Джозефсона.

Из выражения (7) можно получить формулу для определения времени ионной имплантации конкретного ВТСП материала ($M_M Z_M$) и имплантанта ($M_U Z_U$) при данной толщине сверхпроводника d_c и необходимой толщине мостика h_c . Формула учитывает также плотность ионного тока j , концентрацию примеси, необходимую для подавления сверхпроводимости ВТСП $N_{кр}$ и энергию ионов (4).

$$t = \frac{1}{j} e N_{кр} \Delta R_x \sqrt{2\pi} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{d_c - h_c - R_x}{\Delta R_x} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Для сложного материала ВТСП необходимо учитывать его стехиометрические коэффициенты X_i ($A_x, B_{x2}, \dots, D_{xi}$). Тогда эффективный заряд и масса ионов мишени будут равны соответственно

$$Z_M^* = \frac{\sum X_i Z_i}{\sum X_i}, \quad (9)$$

$$M_M^* = \frac{\sum X_i M_i}{\sum X_i}. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) подставляем в (4) и в итоге формула (8) принимает следующий вид:

$$t = \frac{1}{j} e N_{кр} \Delta R_x \sqrt{2\pi} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{d_c - h_c - R_x^*}{\Delta R_x^*} \right)^2 \right]. \quad (11)$$

где R_x^* - эффективная проекция пробега иона, характеризующая глубину

легирования;

ΔR_x^* - среднеквадратичное отклонение от R_x^* .

Именно такой способ изготовления перехода Джозефсона позволяет обеспечить его требуемые параметры.

Сопоставительный анализ признаков, изложенных в предложенном техническом решении с признаками прототипа, показывает, что заявленный способ изготовления перехода Джозефсона отличается от прототипа наличием метода формирования окна (протаскивание иглы атомно-силового микроскопа) и выбора времени ионной имплантации, учитывающем характеристики имплантанта, ВТСП а также параметры перехода.

Сравнение заявленного технического решения с другими техническими решениями в данной области техники показало, что переход Джозефсона, который выполняется с помощью атомно-силового микроскопа и подвергается ионной имплантации в соответствии с формулами (11) и (9), (10) и (5) неизвестен. Кроме того, совокупность существенных признаков вместе с ограничительными позволяет обнаружить у заявленного решения иные, в отличие от известных свойства, к числу которых можно отнести следующие:

- повышение воспроизводимости перехода;
- повторение параметров перехода;
- возможность влияния на параметры перехода;
- возможность управления параметрами процесса изготовления перехода с учетом характеристик ВТСП.

Таким образом иные в отличие от известных свойства, присущие предложенному техническому решению, доказывают наличие существенных отличий, направленных на достижение технического результата.

На фиг.1 показан разрез исходного образца. На фиг.2 показан вид образца после обработки на атомно-силовом микроскопе. На фиг.3 показан процесс ионной имплантации примеси в ВТСП материал. На фиг.4 показан вариант с осажденной и внедренной примесью. На фиг.5 показан переход Джозефсона.

Переход Джозефсона может быть изготовлен из пленки 1 ВТСП $\text{Bi}_2\text{Ba}_2\text{SrCu}_2\text{O}_8$, нанесенной на подложку 2 керамики MgO (10×10 мм). Толщина керамики 1 мм, толщина ВТСП покрытия 80 нм, металлического покрытия 3 40 нм (Ag); 4 - пленка Si, 5 - область ВТСП, легированная Si.

В процессе расчетов получим значения Z_M^* и M_M^* , N_M , R_X и ΔR_X . Согласно (9) и (10)

$$Z_M^* = 27,4, M_M^* = 69 \text{ кг/кмоль.}$$

Плотность сверхпроводника d составляет $5 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. Используя известную формулу $N_M = N_A d / M_M^*$,

где N_A - число Авогадро,

найдем концентрацию атомов ВТСП $N_M = 4,3 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Тогда R_X и ΔR_X соответственно составляют $55 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ и $11 \cdot 10^{-9} \text{ м}$. Концентрация примеси (Si) подавляющей ВТСП: 2 атома на элементарную ячейку, т.е. $N_{кр} = 2,7 \cdot 10^{28} \text{ м}^{-3}$.

Подставив полученные результаты в (11), получим соотношение между временем имплантации и плотностью ионного тока:

$$t = \frac{1}{j} 5$$

Если плотность ионного тока (характерная для большинства установок) равна 100 А/м^2 то необходимое время легирования составляет 124 с. После легирования формируется МПТ, в котором работает эффект Джозефсона.

Источники информации

1. Интегральные схемы и микроэлектронные устройства на сверхпроводниках / В.Н.Алфеев и др. - М.: Радио и связь, 1985 - 232 с.

2. Bi-Sr-Ca-Cu-O intrinsic Josephson junctions fabricated by inhibitory ion implantation. K. Nakajima, N. Yamada, et al. IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL.9, NO.2, JUNE 1999. p.4515-4518.

3. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. - М.: ВШ, 1987 - 376 с.

Формула изобретения

Способ изготовления перехода Джозефсона, включающий ионное легирование перехода примесью, подавляющей сверхпроводимость, отличающийся тем, что формирование окон для легирования выполняется с помощью "протаскивания иглы" атомно-силового микроскопа, при этом время имплантации выбирается с учетом свойств имплантата, сверхпроводника и параметров обработки по формуле

$$t = \frac{1}{j} e N_{кр} \Delta R_x \sqrt{2\pi} \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{d_c - h_c - R_x^*}{\Delta R_x^*} \right)^2 \right]$$

где j - плотность ионного тока;

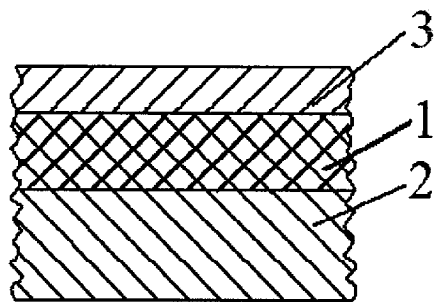
d_c - толщина пленки ВТСП;

h_c - толщина мостика Джозефсона;

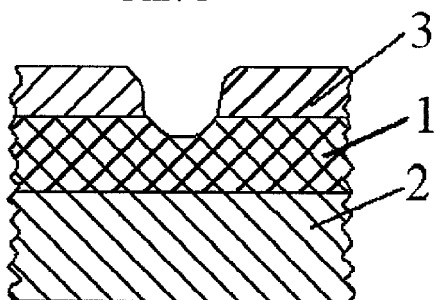
R_x^* - эффективная проекция пробега иона, характеризующая глубину легирования;

ΔR_x^* - среднеквадратичное отклонение от R_x^* ;

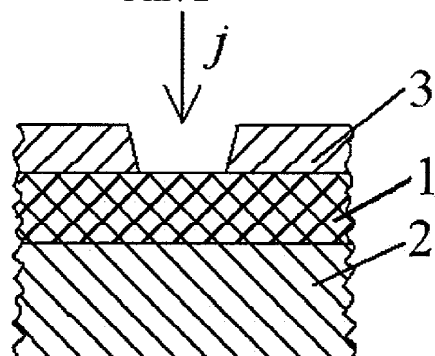
$N_{кр}$ - концентрация примеси, подавляющей ВТСП.



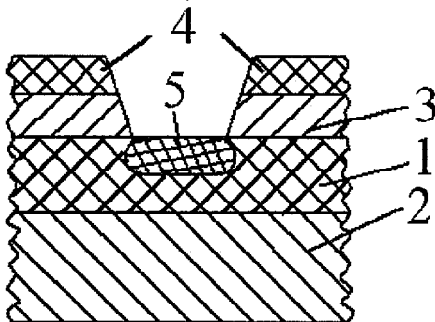
Фиг. 1



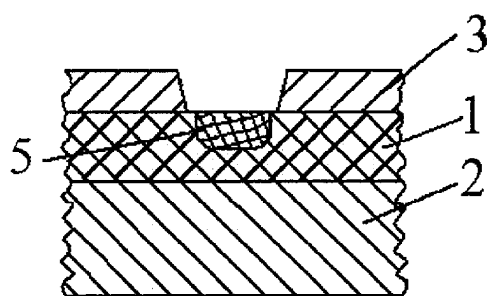
Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5