



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
H10N 60/01 (2025.08)

(21)(22) Заявка: 2024139870, 26.12.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.12.2024

Дата регистрации:
26.11.2025

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 26.12.2024

(45) Опубликовано: 26.11.2025 Бюл. № 33

Адрес для переписки:

105005, Москва, вн.тер.г. Муниципальный
округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, 5, стр.
1, ФГБОУ ВО МГТУ им.Н.Э.Баумана,
Амелина Ксения Евгеньевна

(72) Автор(ы):

Родионов Илья Анатольевич (RU),
Соловьева Анастасия Александровна (RU),
Зикий Евгений Владимирович (RU),
Смирнов Никита Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Московский государственный
технический университет имени Н.Э.
Баумана (национальный исследовательский
университет)" (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (RU)

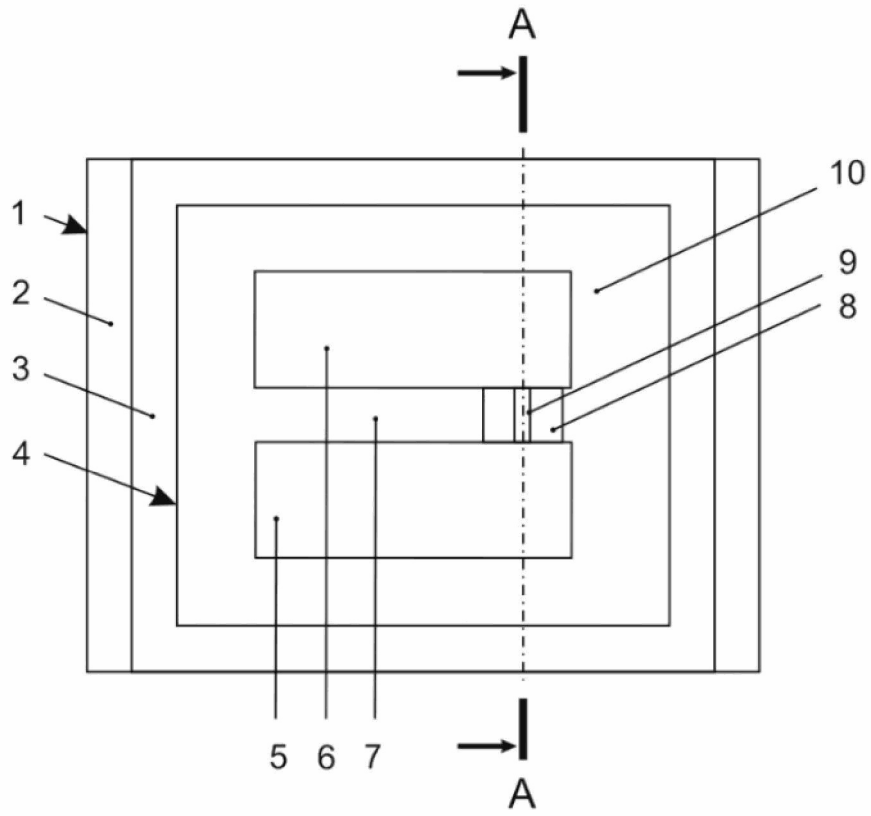
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: US 11289637 B2, 29.03.2022. US
10170681 B1, 01.01.2019. Barends R. et al.
Digitized adiabatic quantum computing with a
superconducting circuit //Nature. - 2016. - Т. 534.
- N. 7606. - С. 222-226. RU 2813743 C1, 16.02.2024.
RU 2795679 C1, 05.05.2023.

(54) Высококогерентный сверхпроводниковый кубит и способ его изготовления

(57) Реферат:

Изобретение относится к области устройств для квантовых вычислений на платформе сверхпроводниковых кубитов. Высококогерентный сверхпроводниковый кубит отличается от прототипа тем, что в подложке, во внутренней полости заземляющего фрагмента вокруг конденсатора и площадки выполнено углубление; туннельный джозефсоновский переход расположен над площадкой с зазором, края джозефсоновского перехода зафиксированы на первой части конденсатора и второй части конденсатора, туннельный джозефсоновский переход выполнен в виде двух фрагментов из алюминия и разделенных фрагментом из оксида

алюминия толщиной менее 5 нм, края сверхпроводящего материала заземляющего фрагмента, частей конденсатора расположены на первой поверхности подложки, при этом параметры туннельного джозефсоновского перехода и конденсатора подобраны таким образом, чтобы эти элементы образовывали слабоангармонический осциллятор с резонансной частотой, находящейся в микроволновом диапазоне. Технический результат - увеличение времени когерентности сверхпроводниковых кубитов, повышение производительности квантовых сверхпроводниковых вычислителей. 2 н. и 15 з.п. ф-лы, 11 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
H10N 60/01 (2025.08)

(21)(22) Application: **2024139870, 26.12.2024**

(24) Effective date for property rights:
26.12.2024

Registration date:
26.11.2025

Priority:

(22) Date of filing: **26.12.2024**

(45) Date of publication: **26.11.2025 Bull. № 33**

Mail address:

**105005, Moskva, vn.ter.g. Munitsipalnyj okrug
Basmannyj, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,
FGBOU VO MGTU im.N.E.Baumana, Amelina
Kseniya Evgenevna**

(72) Inventor(s):

**Rodionov Ilia Anatolevich (RU),
Soloveva Anastasiia Aleksandrovna (RU),
Zikii Evgenii Vladimirovich (RU),
Smirnov Nikita Sergeevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe biudzhethnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniia «Moskovskii gosudarstvennyi
tekhnikeskii universitet imeni N.E. Baumana
(natsionalnyi issledovatel'skii universitet)»
(MGTU im. N.E. Baumana) (RU)**

(54) **HIGH-COHERENCE SUPERCONDUCTING CUBE AND METHOD FOR ITS MANUFACTURE**

(57) Abstract:

FIELD: computing technology.

SUBSTANCE: invention relates to devices for quantum computing on a superconducting qubit platform. The highly coherent superconducting qubit differs from the prototype in that the substrate has a recess in the inner cavity of the grounding fragment around the capacitor and the pad; the Josephson tunnel junction is located above the pad with a gap, the edges of the Josephson junction are fixed on the first part of the capacitor and the second part of the capacitor, the Josephson tunnel junction is made in the form of two aluminium fragments separated by an aluminium oxide

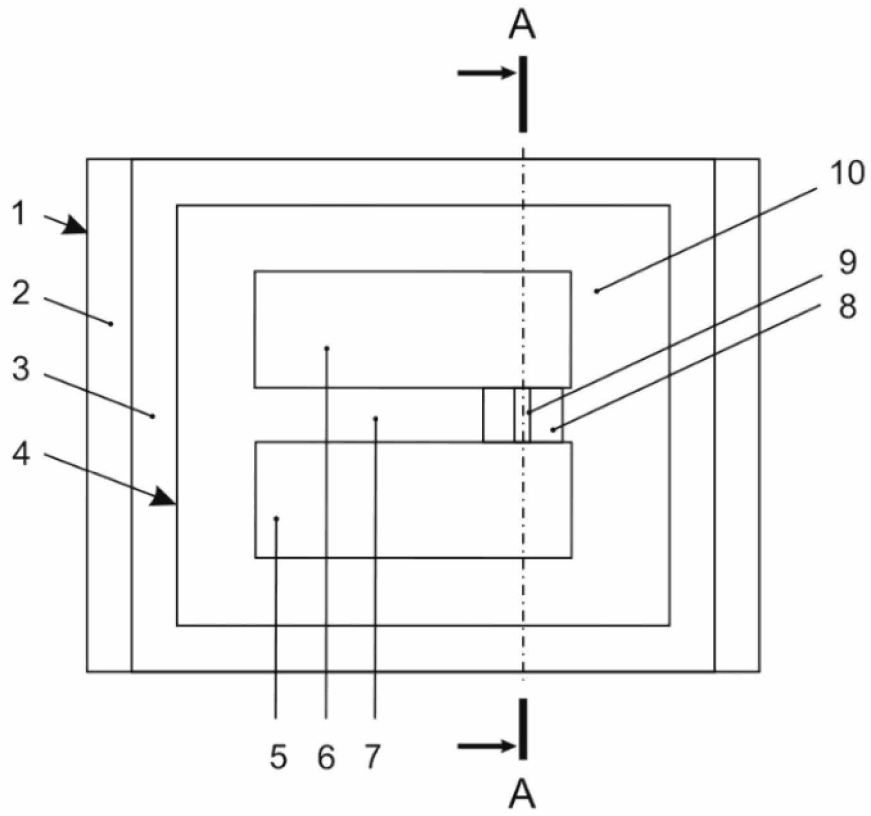
fragment less than 5 nm thick; the edges of the superconducting material of the grounding fragment and the capacitor parts are located on the first surface of the substrate; the parameters of the Josephson tunnel junction and the capacitor are selected so that these elements form a weakly anharmonic oscillator with a resonant frequency in the microwave range.

EFFECT: increased coherence time of superconducting qubits, increased performance of quantum superconducting computers.

17 cl, 11 dwg

RU 2 851 672 C1

RU 2 851 672 C1



Фиг. 1

Область техники

Изобретение относится к области разработки устройств для квантовых вычислений на платформе сверхпроводниковых кубитов, а также способов их изготовления, и может быть использовано при формировании емкостных элементов и джозефсоновских переходов высокого качества в сверхпроводниковых кубитах, например, зарядовый кубит с фиксированной и перестраиваемой частотой, планарный и объемный кубит типа трансмон, потоковый кубит.

Уровень техники

Известна квантовая сверхпроводниковая схема, содержащая джозефсоновский переход, который расположен между первой частью конденсатора и второй частью конденсатора, причем траншейная первая часть конденсатора расположена ниже поверхности подложки и траншейная вторая часть конденсатора расположена ниже поверхности подложки [Патент US 2023/0210024 A1, опубл.29.06.2023].

Недостаток этого устройства заключается в том, что вокруг первой части конденсатора и второй части конденсатора находится поверхность подложки, что приводит к ухудшению качества сверхпроводниковых кубитов в виду значительных диэлектрических потерь как от объема подложки, так и от интерфейса подложка-металл в области с высокой концентрацией электрического поля. Другим недостатком является то, что траншея должна иметь вертикальные стенки, что ограничивает количество методов изготовления, и как следствие, приводит к увеличению сложности технологического процесса, и соответственно, увеличению стоимости сверхпроводниковых кубитов.

Известен также сверхпроводниковый кубит, содержащий подложку, первую конденсаторную структуру, вторую конденсаторную структуру и джозефсоновский переход, расположенный между первой конденсаторной структурой и второй конденсаторной структурой, причем первая и вторая конденсаторные структуры выполнены из сверхпроводящего материала, при этом конденсаторные структуры имеют нижнюю часть, сформированную на поверхности подложки, и, по крайней мере, одну приподнятую часть, расположенную выше поверхности подложки [Патент US 2020/0328338 A1, опубл.15.10.2020].

Недостаток этого устройства заключается том, что вокруг первой конденсаторной структуры и второй конденсаторной структуры находится поверхность подложки, что приводит к ухудшению когерентности сверхпроводниковых кубитов в виду значительных диэлектрических потерь как от объема подложки, так и от интерфейса подложка-металл в области с высокой концентрацией электрического поля, и как следствие, снижению производительности квантовых сверхпроводниковых вычислителей. Другим недостатком является то, что в качестве сверхпроводящего материала используют ниобий и не рассматривают другие материалы высокого качества, такие как тантал и алюминий, что ограничивает качество сверхпроводниковых кубитов.

Это устройство выбрано в качестве прототипа предложенного решения.

Известен способ изготовления высококогерентных сверхпроводниковых кубитов, включающий формирование канавок в подложке, осаждение сверхпроводникового материала в канавки, при чем первое осаждение проводится на первую поверхность канавки, второе осаждение проводится на вторую поверхность канавки и третье осаждение проводится на третью поверхность канавки, при этом вторая поверхность канавки параллельна третьей поверхности канавки, травление сверхпроводящего слоя в области третьей поверхности и формирование электрического контакта между логическими элементами [US 10,068,184 B1, опубл.04.09.2018].

Недостаток этого способа заключается в том, что вокруг первой конденсаторной структуры и второй конденсаторной структуры находится поверхность подложки, что приводит к ухудшению когерентности сверхпроводниковых кубитов в виду
5 подложка-металл в области с высокой концентрацией электрического поля, и как следствие, снижению производительности квантовых сверхпроводниковых вычислителей. Другим недостатком является то, что используется анизотропное травление, что ограничивает количество методов изготовления, и как следствие, приводит к увеличению сложности технологического процесса, и соответственно, увеличению стоимости
10 сверхпроводниковых кубитов.

Известен также способ изготовления квантовых сверхпроводниковых схем, включающий формирование первой канавки и второй канавки в подложке, нанесение сверхпроводящего материала на поверхности первой и второй канавок для
15 формирования первой и второй конденсаторных структур, соответственно, формирование джозефсоновского перехода между первой конденсаторной структурой и второй конденсаторной структурой, и удаление части подложки в области первой и второй конденсаторных структур [Патент US 2020/0328338 A1, опубл.15.10.2020].

Недостаток этого способа заключается в том, что вокруг первой конденсаторной структуры и второй конденсаторной структуры находится поверхность подложки, что
20 приводит к ухудшению когерентности сверхпроводниковых кубитов в виду значительных диэлектрических потерь как от объема подложки, так и от интерфейса подложка-металл в области с высокой концентрацией электрического поля, и как следствие, снижению производительности квантовых сверхпроводниковых вычислителей. Другим недостатком является то, что используется анизотропное травление, что
25 приводит к увеличению сложности технологического процесса, и соответственно, увеличению стоимости сверхпроводниковых кубитов.

Этот способ выбран в качестве прототипа предложенного решения.

Раскрытие изобретения

Технический результат устройства и способа заключается в уменьшении величины
30 диэлектрических потерь, что приводит к увеличению времени когерентности сверхпроводниковых кубитов, и как следствие, повышению производительность квантовых сверхпроводниковых вычислителей.

Сущность изобретения устройства заключается в том, что в высококогерентном сверхпроводниковом кубите, содержащем подложку с первой поверхностью, по
35 периферии которой расположен заземляющий фрагмент с внутренней полостью, выполненный из сверхпроводящего материала, расположены также первая часть конденсатора и вторая часть конденсатора с первым зазором друг относительно друга, находящиеся во внутренней полости заземляющего фрагмента и выполненные из сверхпроводящего материала, при этом в первом зазоре выделена площадка первой
40 поверхности, а между первой частью конденсатора и второй частью конденсатора размещен туннельный джозефсоновский переход, в подложке, во внутренней полости заземляющего фрагмента вокруг первой части конденсатора, второй части конденсатора и площадки выполнено углубление.

Существует вариант, в котором туннельный джозефсоновский переход расположен
45 на площадке.

Существует также вариант, в котором туннельный джозефсоновский переход выполнен в виде первого фрагмента и второго фрагмента, изготовленных из алюминия и разделенных третьим фрагментом из оксида алюминия.

Существует также вариант, в котором туннельный джозефсоновский переход расположен над площадкой со вторым зазором, при этом первый фрагмент закреплен на первой части конденсатора, а второй фрагмент закреплен на второй части конденсатора.

5 Существует также вариант, в котором в качестве материала подложки используют высокоомный кремний, в качестве сверхпроводящего материала используется или алюминий, или тантал, или ниобий, или нитрид ниобия, или нитрид титана.

Существует также вариант, в котором углубление в подложке имеет вертикальные или скругленные стенки.

10 Существует также вариант, в котором края сверхпроводящего материала заземляющего фрагмента, первой части конденсатора и второй части конденсатора расположены на первой поверхности подложки.

Сущность изобретения способа заключается в том, что в способе изготовления высококогерентных сверхпроводниковых кубитов, включающем проведение жидкостной химической обработки подложки, вакуумное осаждение плёнки сверхпроводящего материала на первую поверхность подложки, формирование фоторезистивной маски на поверхности сверхпроводящего материала, первое травление плёнки сверхпроводящего материала через фоторезистивную маску, и осаждение туннельных джозефсоновских переходов через первый слой и второй слой двухслойной маски, после первого травления плёнки сверхпроводящего материала проводят первое травление подложки во внутренней полости заземляющего фрагмента вокруг первой части конденсатора, второй части конденсатора и площадки.

Существует вариант, в котором проводят вакуумное осаждение плёнки сверхпроводящего материала при комнатной температуре подложки.

25 Существует также вариант, в котором вариант, в котором проводят первое вакуумное осаждение плёнки сверхпроводящего материала при нагреве и второе вакуумное осаждение при комнатной температуре подложки.

Существует также вариант, в котором проводят первое травление пленки сверхпроводящего материала методами жидкостного или плазмохимического травления.

30 Существует также вариант, в котором первое травление подложки проводят методами анизотропного травления или изотропного травления.

Существует также вариант, в котором первое травление подложки выполняют через фоторезистивную маску, используемую при первом травлении плёнки сверхпроводящего материала.

35 Существует также вариант, в котором первое травление подложки выполняют через дополнительную фоторезистивную маску, которую повторно формируют на поверхности сверхпроводящего материала после травления пленки сверхпроводящего материала.

40 Существует также вариант, в котором после первого травления подложки проводят второе травление подложки в области площадки.

Существует также вариант, в котором после первого травления подложки проводят ультразвуковую обработку плёнки сверхпроводящего материала.

Существует также вариант, в котором осаждение туннельных джозефсоновских переходов проводят после первого травления пленки сверхпроводящего материала.

45 Существует также вариант, в котором осаждение туннельных джозефсоновских переходов проводят после первого травления подложки.

Существует также вариант, в котором осаждение туннельных джозефсоновских переходов проводят методом теневого осаждения через первый слой и второй слой

двухслойной маски при комнатной температуре подложки.

Существует также вариант, в котором осаждение первого фрагмента туннельных джозефсоновских переходов проводят при нагреве.

5 Существует также вариант, в котором после первого травления подложки проводят обработку туннельных джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком.

Перечень фигур

На фиг.1 изображена схема высококогерентного сверхпроводникового кубита (вид сверху).

10 На фиг.2 изображено поперечное сечение высококогерентного сверхпроводникового кубита (сечение А-А). Представлен вариант, в котором углубление в подложке имеет вертикальные стенки.

На фиг.3 изображено поперечное сечение высококогерентного сверхпроводникового кубита. Представлен вариант, в котором углубление в подложке имеет скругленные стенки.

15 На фиг.4 изображена увеличенная область высококогерентного сверхпроводникового кубита, содержащая туннельный джозефсоновский переход, который расположен на подложке.

На фиг.5 изображена увеличенная область высококогерентного сверхпроводникового кубита, содержащая туннельный джозефсоновский переход, который расположен над подложкой.

На фиг.6 изображена схема изготовления высококогерентного сверхпроводникового кубита, в котором углубление в подложке имеет вертикальные стенки. Представлен вариант, в котором травление подложки проводят через фоторезистивную маску, используемую при первом травлении плёнки сверхпроводящего материала.

25 На фиг.7 изображена схема изготовления туннельного джозефсоновского перехода с использованием метода теневого осаждения через двухслойную маску.

На фиг.8 изображена увеличенная область туннельного джозефсоновского перехода с обозначением дефектов атомарного размера в диэлектрическом слое.

30 На фиг.9 изображена схема изготовления высококогерентного сверхпроводникового кубита, в котором углубление в подложке имеет скругленные стенки. Представлен вариант, в котором травление подложки проводят через фоторезистивную маску, используемую при первом травлении плёнки сверхпроводящего материала.

На фиг.10 изображена схема изготовления высококогерентного сверхпроводникового кубита, в котором углубление в подложке имеет вертикальные стенки. Представлен вариант, в котором травление подложки проводят через дополнительную фоторезистивную маску.

На фиг.11 изображена схема высококогерентного сверхпроводникового кубита с обозначением интерфейса подложка-вакуум и краев сверхпроводящего материала, нависающих над поверхностью подложки.

40 Осуществление изобретения

Высококогерентный сверхпроводниковый кубит содержит подложку 1 (фиг.1) с первой поверхностью 2, по периферии которой расположен заземляющий фрагмент 3 с внутренней полостью 4. В качестве подложки 1 можно использовать высокоомный кремний или сапфир. Заземляющий фрагмент 3 выполнен из сверхпроводящего материала, например, алюминий, или тантал, или ниобий, или нитрид ниобия, или нитрид титана с толщиной пленки от 50 до 500 нм. Во внутренней полости 4 заземляющего фрагмента 3 расположены также первая часть конденсатора 5 и вторая часть конденсатора 6 с первым зазором 7 друг относительно друга. Первая часть

конденсатора 5 и вторая часть конденсатора 6 выполнены из сверхпроводящего материала, например, алюминий, или тантал, или ниобий, или нитрид ниобия, или нитрид титана с толщиной пленки от 50 до 500 нм. Характерные размеры первой части конденсатора 5 и второй части конденсатора 6 составляют от 1 до 500 мкм, ширина первого зазора 7 составляет от 1 до 100 мкм. В первом зазоре 7 выделена площадка 8 первой поверхности 2 подложки 1 площадью от 10 до 1000 мкм². В подложке 1, во внутренней полости 4 заземляющего фрагмента 3 вокруг первой части конденсатора 5, второй части конденсатора 6 и площадки 8 выполнено углубление 10. Углубление 10 в подложке 1 имеет глубину от 0,05 до 100,00 мкм (фиг.2). Между первой частью конденсатора 5 и второй частью конденсатора 6 размещен туннельный джозефсоновский переход 9 (фиг.4), выполненный в виде первого фрагмента 11 и второго фрагмента 12, разделенных третьим фрагментом 13. Первый фрагмент 11 и второй фрагмент 12 туннельного джозефсоновского перехода 9 изготовлены из алюминия толщиной от 20 до 100 нм и имеют ширину от 50 до 5000 нм, третий фрагмент 13 изготовлен из оксида алюминия толщиной до 5 нм. Существует вариант, в котором туннельный джозефсоновский переход 9 расположен на площадке 8 площадью от 10 до 1000 мкм². Туннельный джозефсоновский переход 9 выполнен в виде первого фрагмента 11 и второго фрагмента 12 шириной от 50 до 5000 нм, изготовленных из алюминия толщиной от 20 до 100 нм, и разделенных третьим фрагментом 13 из оксида алюминия толщиной до 5 нм.

Существует также вариант, в котором туннельный джозефсоновский переход 9 расположен над площадкой 8 (фиг.5) со вторым зазором 19 глубиной от 0,5 до 100,0 мкм, при этом первый фрагмент 11 закреплен на первой части конденсатора 5, а второй фрагмент 12 закреплен на второй части конденсатора 6.

Существует также вариант, в котором в качестве материала подложки 1 используют высокоомный кремний с удельным сопротивлением более 10 кОм*см кристаллографической ориентации <100> или <111> или сапфир кристаллографической ориентации c-plane, в качестве сверхпроводящего материала используют или алюминий, или тантал, или ниобий, или нитрид ниобия, или нитрид титана с толщиной пленки от 50 до 500 нм и характерными размерами конденсаторных частей от 1 до 500 мкм.

Существует также вариант, в котором углубление 10 в подложке 1 глубиной от 0,05 до 100,00 мкм имеет вертикальные (фиг.2) или скругленные (фиг.3) стенки.

Существует также вариант, в котором края сверхпроводящего материала заземляющего фрагмента 3, первой части конденсатора 5 и второй части конденсатора 6 расположены на первой поверхности 2 подложки 1.

Способ изготовления высококогерентных сверхпроводниковых кубитов включает проведение жидкостной химической обработки подложки 1 с целью удаления с поверхности подложки 2 крупных механических, а также органических и неорганических загрязнений с использованием воздействия ультразвуковой обработки с частотой до 100 кГц или мегазвуковой обработки с частотой до 3 МГц в деионизованной воде, ацетоне, изопропиловом спирте, растворе 30% перекиси водорода и концентрированной серной кислоты в соотношении 1 к 3, растворе плавиковой кислоты с концентрацией кислоты не более 50%. Далее следует вакуумное осаждение плёнки сверхпроводящего материала 14 (из которой будут сформированы заземляющий фрагмент 3, первая часть конденсатора 5 и вторая часть конденсатора 6), с толщиной от 50 до 500 нм на первую поверхность подложки 2 методами физического осаждения, например, магнетронным распылением, термическим испарением или электронно-лучевым испарением со скоростью осаждения в диапазоне от 0,1 до 10,0 нм/сек и значением давления

остаточного вакуума не выше 1×100 Па. После этого проводят формирование резистивной маски 15 толщиной от 0,5 до 8,0 мкм из позитивного или негативного фоторезиста на поверхности пленки сверхпроводящего материала 14 методом фотолитографии. Может применяться как лазерная, так и проекционная или контактная фотолитография. Далее выполняют первое травление пленки сверхпроводящего материала 14 через фоторезистивную маску 15 с глубиной травления подложки не более 0,1 мкм. Затем проводят первое травление подложки 1 во внутренней полости 4 заземляющего фрагмента 3 вокруг первой части конденсатора 5, второй части конденсатора 6 и площадки 8 методом жидкостного, ионного или плазмохимического травления на глубину от 0,1 до 100,0 мкм. В результате образуется вторая поверхность подложки, называемая границей подложка-вакуум 21 (Фиг.6). Далее выполняют угловое осаждение первого фрагмента 11 и второго фрагмента 12 туннельных джозефсоновских переходов 9 через первый слой 17 и второй слой 18 двухслойной маски (Фиг.7) вакуумным методом термического или электронно-лучевого испарения со скоростью от 0,01 до 1,0 нм/сек и углом осаждения от 0 до 70°. Третий фрагмент 13 туннельного джозефсоновского перехода 9 формируют методом окисления между этапами формирования первого фрагмента 11 и второго фрагмента 12 туннельных джозефсоновских переходов 9 без разрыва вакуумного цикла, при этом сформированный слой оксида алюминия может содержать дефекты атомарного размера 20 (Фиг.8).

Существует вариант, в котором вакуумное осаждение пленки сверхпроводящего материала 14 проводят при комнатной температуре подложки 1 без нагрева, то есть не выше 25°C.

Существует вариант, в котором первое вакуумное осаждение пленки сверхпроводящего материала 14 проводят с нагревом подложки 1 до температуры от 100 до 500°C и второе вакуумное при комнатной температуре подложки 1 не выше 25°C.

Существует вариант, в котором первое травление пленки сверхпроводящего материала 14 проводят методами жидкостного травления, например, для пленки алюминия в растворах, содержащих фосфорную кислоту до 65%, азотную кислоту до 5%, уксусную кислоту до 5%, или плазмохимического травления, например, для пленки алюминия в газовых смесях хлора и аргона со скоростями травления от 1 до 10 нм/сек.

Существует вариант, в котором первое травление подложки 1 проводят методами анизотропного или изотропного травления, в результате чего получают вертикальные (Фиг.6) или скругленные (Фиг.9) стенки углубления 10. Примером анизотропного травления является плазмохимическое травление кремния в газовой смеси на основе фтора и аргона со скоростями травления до 20 нм/сек на глубину до 100 мкм, изотропное травление кремния проводится в газовой смеси на основе фтора и аргона со скоростями до 10 нм/сек на глубину до 3,0 мкм. Анизотропное и изотропное травления кремния могут быть использованы для формирования второго зазора 19 в подложке 1 (Фиг.5).

Существует вариант, в котором первое травление подложки 1 выполняют через фоторезистивную маску 15 с толщиной более 0,5 мкм, используемую при первом травлении пленки сверхпроводящего материала 14, причём оба травления могут быть выполнены в одном вакуумном цикле в установке плазмохимического травления при условии нагрева фоторезистивной маски 15 до температуры не выше 200°C.

Существует вариант, в котором первое травление подложки 1 выполняют через дополнительную фоторезистивную маску 16 (Фиг.10) с толщиной от 1,2 до 8,0 мкм, которую повторно формируют на поверхности пленки сверхпроводящего материала 14 после травления пленки сверхпроводящего материала 14 и полного удаления остатков

фоторезистивной маски 15 в органических растворителях.

5 Существует вариант, в котором после первого травления подложки 1 проводят второе травление подложки 1 в области площадки 8, например, методом плазмохимического изотропного травления на основе газовой смеси фтора и аргона со скоростью травления до 10 нм/сек.

10 Существует вариант, в котором после первого травления подложки 1 проводят ультразвуковую обработку плёнки сверхпроводящего материала 14 в деионизованной воде или изопропиловом спирте в течение от 1 до 30 минут с частотой ультразвуковой обработки не менее 50 кГц и не более 100 кГц. В результате ультразвуковой обработки удаляются края 22 сверхпроводящего материала 14, висящие над поверхностью подложки 1 (Фиг.11).

Существует вариант, в котором осаждение туннельных джозефсоновских переходов 9 проводят в течение не более 24 часов после первого травления пленки сверхпроводящего материала 14.

15 Существует вариант, в котором осаждение туннельных джозефсоновских переходов 9 проводят в течение не более 24 часов после первого травления подложки 1, при этом неравномерность толщины дополнительной фоторезистивной маски 16 не должна превышать 1%.

20 Существует вариант, в котором осаждение туннельных джозефсоновских переходов 9 проводят методом теневого осаждения через первый слой 17 и второй слой 18 двухслойной маски при комнатной температуре подложки 1 не более 25°C.

Существует вариант, в котором осаждение первого фрагмента 11 туннельных джозефсоновских переходов 9 проводят при нагреве подложки 1 до температуры от 100 до 500°C.

25 Существует вариант, в котором после первого травления подложки 1 проводят обработку туннельных джозефсоновских переходов 9 фокусированным ионным пучком с энергией пучка от 10 кэВ до 30 кэВ.

Высококогерентный сверхпроводниковый кубит функционирует следующим образом.

30 Классические вычислители кодируют информацию в битах. Бит может принимать значение или 1 или 0. Нули и единицы выступают в роли переключателей вкл/выкл, управляющих функциями вычислителя.

35 Квантовый вычислитель основывается на кубитах, которые действуют на принципах квантовой механики: суперпозиции и запутанности. Суперпозиция означает, что кубит может принимать значение 0 и 1 одновременно до процесса его измерения. Запутанность означает, что кубиты, находящиеся в суперпозиции, могут коррелировать так, что состояние одного кубита 1 или 0 может зависеть от состояния другого кубита. Таким образом, запутанные кубиты хранят больше информации, чем кубиты по-отдельности.

40 Сверхпроводниковые кубиты являются одной из основных физических платформ, на которых разрабатываются квантовые вычислители. Сверхпроводниковый кубит состоит из джозефсоновского туннельного перехода 9, образующего нелинейную индуктивность и связанного с ним конденсатора из сверхпроводящего материала, состоящего из частей 5 и 6, находящихся во внутренней полости 4 заземляющего фрагмента 3 и разделенных зазором 7. Параметры джозефсоновского туннельного перехода и конденсатора подобраны таким образом, чтобы эти элементы образовывали 45 слабоангармонический осциллятор, с резонансной частотой, находящейся в микроволновом диапазоне. Информация в сверхпроводниковом кубите кодируется в форме энергии электромагнитного поля. Единичное возбуждение электромагнитного поля может находиться в кубите или нет, что соответствует состояниям 1 или 0.

Технические результаты изобретения

То, что в подложке 1, во внутренней полости 4 заземляющего фрагмента 3 вокруг первой части конденсатора 5, второй части конденсатора 6 и площадки 8 выполнено углубление 10 приводит к тому, что поверхность подложки 2 в первом зазоре 7 находится
5 ниже первой части конденсатора 5 и второй части конденсатора 6, при этом электрическое поле конденсатора воздействует на меньший объем материала подложки 1, в результате чего уменьшается величина диэлектрических потерь подложки 1 и границы раздела подложка-вакуум 21, и как следствие, повышается качество сверхпроводниковых кубитов.

10 То, что туннельный джозефсоновский переход 9 расположен на площадке 8 приводит к увеличению механической прочности туннельного джозефсоновского перехода 9, и как следствие, уменьшению дефектности при изготовлении сверхпроводниковых кубитов.

15 То, что туннельный джозефсоновский переход 9 расположен над площадкой 8 со вторым зазором 17, причем края туннельного джозефсоновского перехода 9 зафиксированы на первой части конденсатора 5 и второй части конденсатора 6 приводит к тому, что уменьшается величина диэлектрических потерь подложки и на границе раздела подложка-вакуум 21 (фиг.11), и следовательно, повышается качество сверхпроводниковых кубитов.

20 То, что туннельный джозефсоновский переход 9 выполнен в виде первого фрагмента 11 и второго фрагмента 12, изготовленных из алюминия и разделенных третьим фрагментом 13 из тонкого слоя оксида алюминия толщиной менее 5 нм, приводит к тому, что уменьшается статическая вероятность попадания двухуровневых дефектов атомарного размера 20 (фиг.11), что приводит к тому, что уменьшается величина
25 тангенса диэлектрических потерь материала, и как следствие, повышается качество сверхпроводниковых кубитов.

30 То, что в качестве материала подложки 1 используют высокоомный кремний, в качестве сверхпроводящего материала используют или алюминий, или тантал, или ниобий, или нитрид ниобия, или нитрид титана, приводит к тому, что используется различное технологическое оборудование для изготовления сверхпроводниковых кубитов, что приводит к повышению гибкости и универсальности технологического процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов.

35 То, что углубление 10 в подложке 1 имеет вертикальные или скругленные стенки приводит к тому, что используются различные методы плазмохимического травления, что приводит к повышению гибкости технологического процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов.

40 То, что края сверхпроводящего материала расположены на первой поверхности 2 подложки 1 приводит к тому, что электрическое поле конденсатора воздействует на меньший объем материала подложки 1, в результате чего уменьшается величина диэлектрических потерь подложки 1 и границы раздела подложка-вакуум 21, и как следствие, повышается качество формируемых кубитов.

45 То, что после травления плёнки сверхпроводящего материала 14 проводят первое травление подложки 1 во внутренней полости 4 заземляющего фрагмента 3 вокруг первой части конденсатора 5, второй части конденсатора 6 и площадки 8 приводит к тому, что электрическое поле туннельного джозефсоновского перехода 9 воздействует на меньший объем материала подложки 1, в результате чего уменьшается величина диэлектрических потерь подложки 1 и границы раздела подложка-вакуум 21, и как следствие, повышается качество сверхпроводниковых кубитов.

То, что проводят вакуумное осаждение плёнки сверхпроводящего материала 14 при комнатной температуре подложки 1 приводит к тому, что высококогерентный сверхпроводниковый кубит может быть изготовлен с использованием стандартной техники изготовления, что приводит к универсальности и удешевлению процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов.

То, что проводят вакуумное осаждение плёнки сверхпроводящего материала 14 при двухэтапном нагреве подложки 1 приводит к тому, что улучшается структура сверхпроводящего материала и его оксида, что приводит к тому, что уменьшается количество двухуровневых дефектов атомарного размера, и как следствие, повышается качество изготовления сверхпроводниковых кубитов.

То, что формируют первую часть конденсатора 5 и вторую часть конденсатора 6 посредством жидкостного или плазмохимического травления плёнки сверхпроводящего материала 14 приводит к тому, что повышается гибкость технологического процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов и, как следствие, повышается универсальность процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов.

То, что травление подложки 1 проводят методами анизотропного или изотропного травления приводит к тому, что электрическое поле конденсатора воздействует на меньший объем материала подложки 1, в результате чего уменьшается величина диэлектрических потерь подложки 1 и границы раздела подложка-вакуум 21, и как следствие, повышается качество сверхпроводниковых кубитов.

То, что травление подложки 1 выполняют через фоторезистивную маску 15, используемую при травлении плёнки сверхпроводящего материала 14 приводит к тому, что не требуется повторное формирование рисунка методом фотолитографии, что ведет к удешевлению процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов.

То, что после травления плёнки сверхпроводящего материала 14 формируют дополнительную фоторезистивную маску 16 на поверхности плёнки сверхпроводящего материала 14, а затем проводят травление подложки 1 приводит к формированию защитного слоя, что приводит к сохранению структуры сверхпроводящего материала 5, и как следствие, улучшению качества изготовления сверхпроводниковых кубитов.

То, что проводят дополнительное травление подложки 1 в области площадки 8 приводит к тому, что электрическое поле конденсатора воздействует на меньший объем материала подложки 1, в результате чего уменьшается величина диэлектрических потерь подложки 1 и границы раздела подложка-вакуум 21, и как следствие, повышается качество сверхпроводниковых кубитов.

То, что после процесса травления подложки 1 проводят ультразвуковую обработку плёнки сверхпроводящего материала 14, из которой состоят заземляющий фрагмент 3, первая часть конденсатора 5 и вторая часть конденсатора 6, приводит к тому, что удаляются края 22 (фиг.11) пленки сверхпроводящего материала 14, висящие над углублением 10, а значит, улучшается качество края сверхпроводящего материала, что ведет к снижению дефектности и повышению качества сверхпроводниковых кубитов.

То, что осаждение туннельных джозефсоновских переходов 9 проводят методом теневого осаждения (фиг.10) через двухслойную маску 17, 18 при комнатной температуре подложки 1 приводит к тому, что сверхпроводниковый кубит может быть изготовлен с использованием стандартных техник изготовления, что приводит к универсальности процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов.

То, что осаждение первого фрагмента 11 туннельных джозефсоновских переходов 9 проводят при нагреве подложки 1, приводит к тому, что формируется монокристаллический нижний слой с последующим формированием диэлектрика

высокого качества, что позволяет повысить качество сверхпроводниковых кубитов.

То, что проводят обработку туннельных джозефсоновских переходов 9 фокусированным ионным пучком, приводит к тому, что увеличивается воспроизводимость выходных характеристик джозефсоновских переходов 9, что ведет к повышению воспроизводимости резонансной частоты сверхпроводникового кубита.

Углубление 10 в подложке 1 величиной 2 мкм позволяет уменьшить вклад диэлектрических потерь на интерфейсе подложка-вакуум на 62%, что приводит к значительному увеличению времени когерентности сверхпроводниковых кубитов до 347 мкс.

Вакуумное осаждение плёнки сверхпроводящего материала 14 при двухэтапном нагреве подложки 1, а именно первое вакуумное осаждение плёнки сверхпроводящего материала 14 проводят с нагревом подложки 1 до температуры до 400°C и второе вакуумное осаждение при комнатной температуре подложки 1 не выше 25°C, позволяет сформировать резонаторы с высокой добротностью более $1,5 \times 10^6$, что приводит к повышению качества сверхпроводниковых кубитов.

Обработка туннельных джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком приводит к тому, что уменьшается стандартное среднеквадратическое отклонение комнатного сопротивления до 1,1% для джозефсоновских переходов сопротивлением от 5 до 50 кОм, что ведет к уменьшению разброса резонансной частоты сверхпроводникового кубита не более 17 МГц относительно среднего значения резонансной частоты сверхпроводникового кубита.

(57) Формула изобретения

1. Высококогерентный сверхпроводниковый кубит, содержащий подложку с первой поверхностью, по периферии которой расположен заземляющий фрагмент с внутренней полостью, выполненный из сверхпроводящего материала, расположены также первая часть конденсатора и вторая часть конденсатора с первым зазором друг относительно друга, находящиеся во внутренней полости заземляющего фрагмента и выполненные из сверхпроводящего материала, при этом в первом зазоре выделена площадка первой поверхности, а между первой частью конденсатора и второй частью конденсатора размещен туннельный джозефсоновский переход, отличающийся тем, что в подложке, во внутренней полости заземляющего фрагмента вокруг первой части конденсатора, второй части конденсатора и площадки выполнено углубление; туннельный джозефсоновский переход расположен над площадкой со вторым зазором, причем края туннельного джозефсоновского перехода зафиксированы на первой части конденсатора и второй части конденсатора, при этом туннельный джозефсоновский переход выполнен в виде первого фрагмента и второго фрагмента, изготовленных из алюминия и разделенных третьим фрагментом из тонкого слоя оксида алюминия толщиной менее 5 нм, края сверхпроводящего материала заземляющего фрагмента, первой части конденсатора и второй части конденсатора расположены на первой поверхности подложки, при этом параметры туннельного джозефсоновского перехода и конденсатора подобраны таким образом, чтобы эти элементы образовывали слабоангармонический осциллятор с резонансной частотой, находящейся в микроволновом диапазоне.

2. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что углубление в подложке имеет вертикальные или скругленные стенки.

3. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что в качестве материала подложки использован высокоомный кремний, в качестве сверхпроводящего материала

использован или алюминий, или тантал, или ниобий, или нитрид ниобия, или нитрид титана.

5 4. Способ изготовления высококогерентного сверхпроводникового кубита по п. 1, включающий проведение жидкостной химической обработки подложки, вакуумное
осаждение плёнки сверхпроводящего материала на первую поверхность подложки,
формирование фоторезистивной маски на поверхности сверхпроводящего материала,
первое травление плёнки сверхпроводящего материала через фоторезистивную маску
и осаждение туннельных джозефсоновских переходов через первый слой и второй слой
10 двухслойной маски, отличающийся тем, что после первого травления плёнки
сверхпроводящего материала проводят первое травление подложки во внутренней
полости заземляющего фрагмента вокруг первой части конденсатора, второй части
конденсатора и площадки.

5. Способ по п. 4, отличающийся тем, что проводят вакуумное осаждение плёнки
сверхпроводящего материала при комнатной температуре подложки.

15 6. Способ по п. 4, отличающийся тем, что проводят первое вакуумное осаждение
плёнки сверхпроводящего материала при нагреве и второе вакуумное осаждение при
комнатной температуре подложки.

7. Способ по п. 4, отличающийся тем, что проводят первое травление пленки
сверхпроводящего материала методами жидкостного или плазмохимического травления.

20 8. Способ по п. 4, отличающийся тем, что первое травление подложки проводят
методами анизотропного травления или изотропного травления.

9. Способ по п. 8, отличающийся тем, что первое травление подложки выполняют
через фоторезистивную маску, используемую при первом травлении плёнки
сверхпроводящего материала.

25 10. Способ по п. 8, отличающийся тем, что первое травление подложки выполняют
через дополнительную фоторезистивную маску, которую повторно формируют на
поверхности сверхпроводящего материала после травления пленки сверхпроводящего
материала.

30 11. Способ по п. 4, отличающийся тем, что после первого травления подложки
проводят второе травление подложки в области площадки.

12. Способ по п. 4, отличающийся тем, что после первого травления подложки
проводят ультразвуковую обработку плёнки сверхпроводящего материала.

13. Способ по п. 4, отличающийся тем, что осаждение туннельных джозефсоновских
переходов проводят после первого травления пленки сверхпроводящего материала.

35 14. Способ по п. 4, отличающийся тем, что осаждение туннельных джозефсоновских
переходов проводят после первого травления подложки.

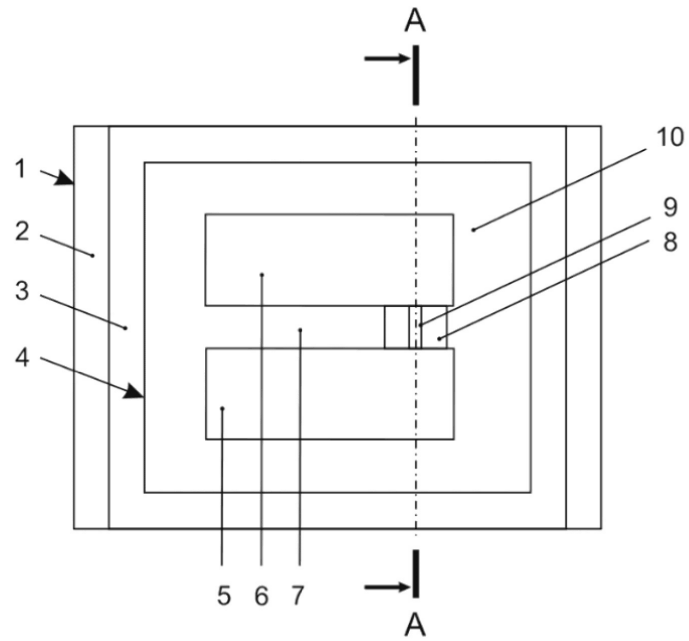
15. Способ по п. 4, отличающийся тем, что осаждение туннельных джозефсоновских
переходов проводят методом теневого осаждения через первый слой и второй слой
двухслойной маски при комнатной температуре подложки.

40 16. Способ по п. 4, отличающийся тем, что осаждение первого фрагмента туннельных
джозефсоновских переходов проводят при нагреве.

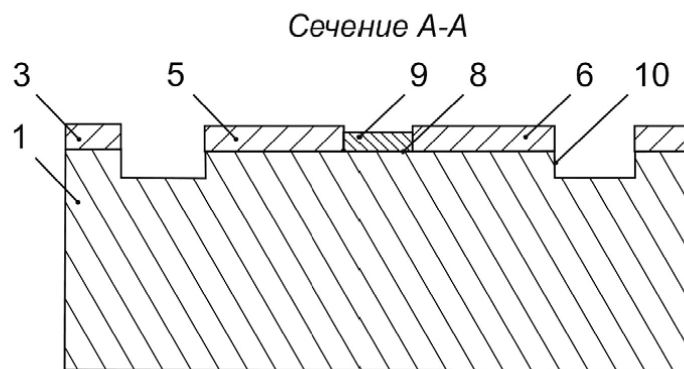
17. Способ по п. 4, отличающийся тем, что после первого травления подложки
проводят обработку туннельных джозефсоновских переходов фокусированным ионным
пучком.

45

1

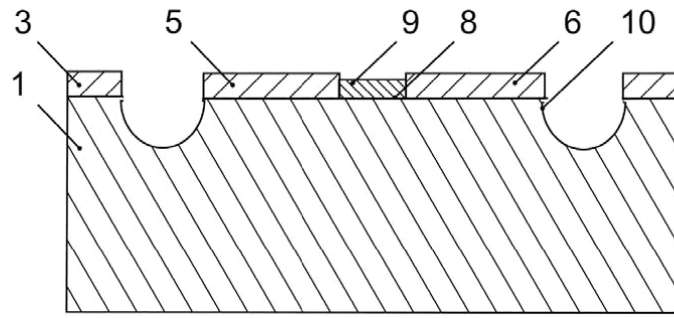


Фиг. 1

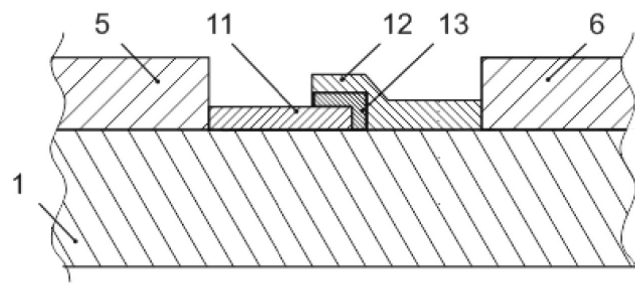


Фиг. 2

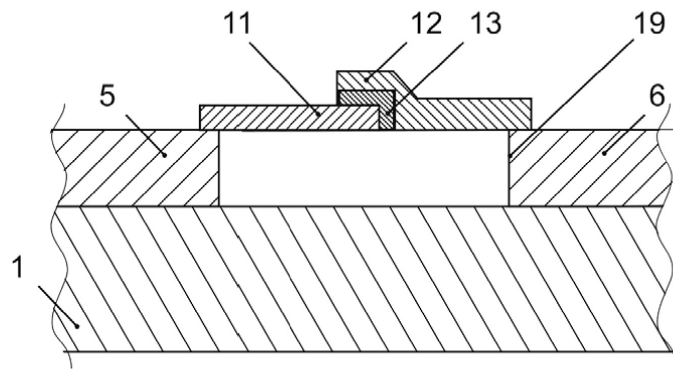
2



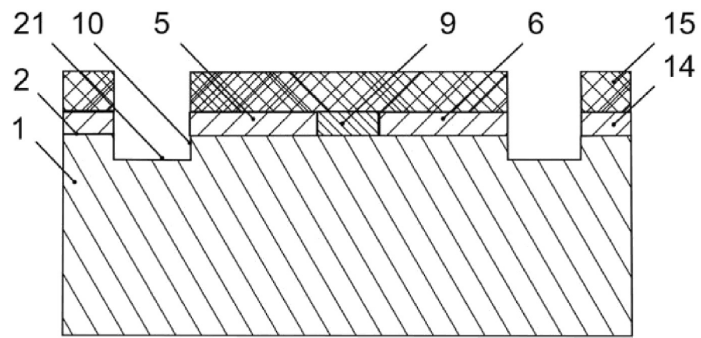
Фиг. 3



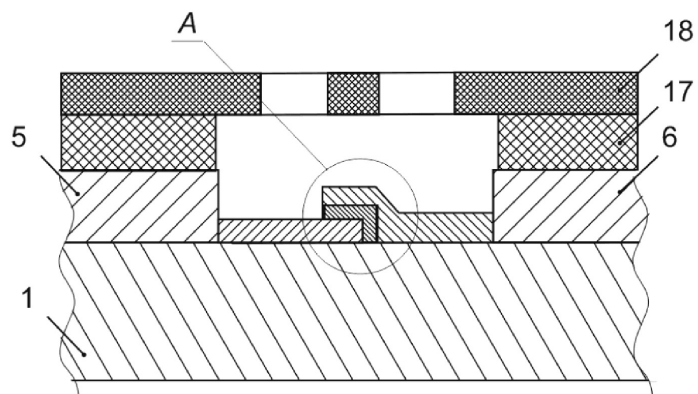
Фиг. 4



Фиг. 5

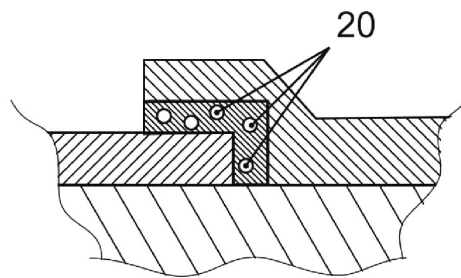


Фиг. 6

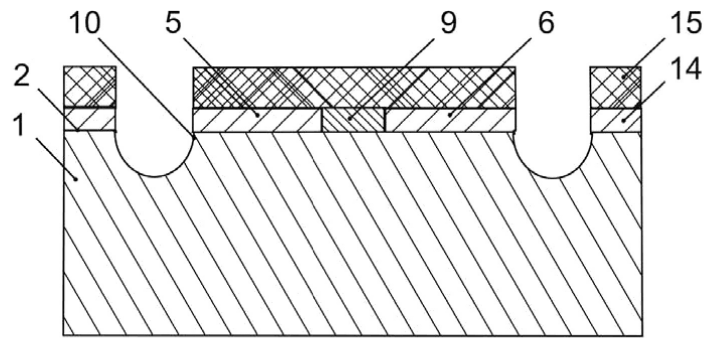


Фиг. 7

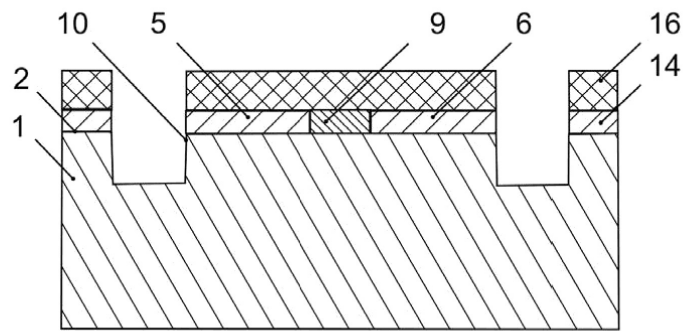
A увеличено



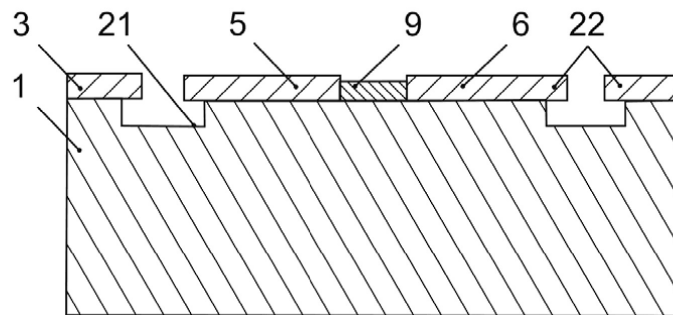
Фиг. 8



Фиг. 9



Фиг. 10



Фиг. 11