



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H10N 60/0912 (2024.01); H10N 60/12 (2024.01)

(21)(22) Заявка: 2023125065, 29.09.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
29.09.2023

Дата регистрации:  
16.02.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 29.09.2023

(45) Опубликовано: 16.02.2024 Бюл. № 5

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦИС для Амелиной  
К.Е.

(72) Автор(ы):

Родионов Илья Анатольевич (RU),  
Москалева Дарья Андреевна (RU),  
Кривко Елизавета Александровна (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)

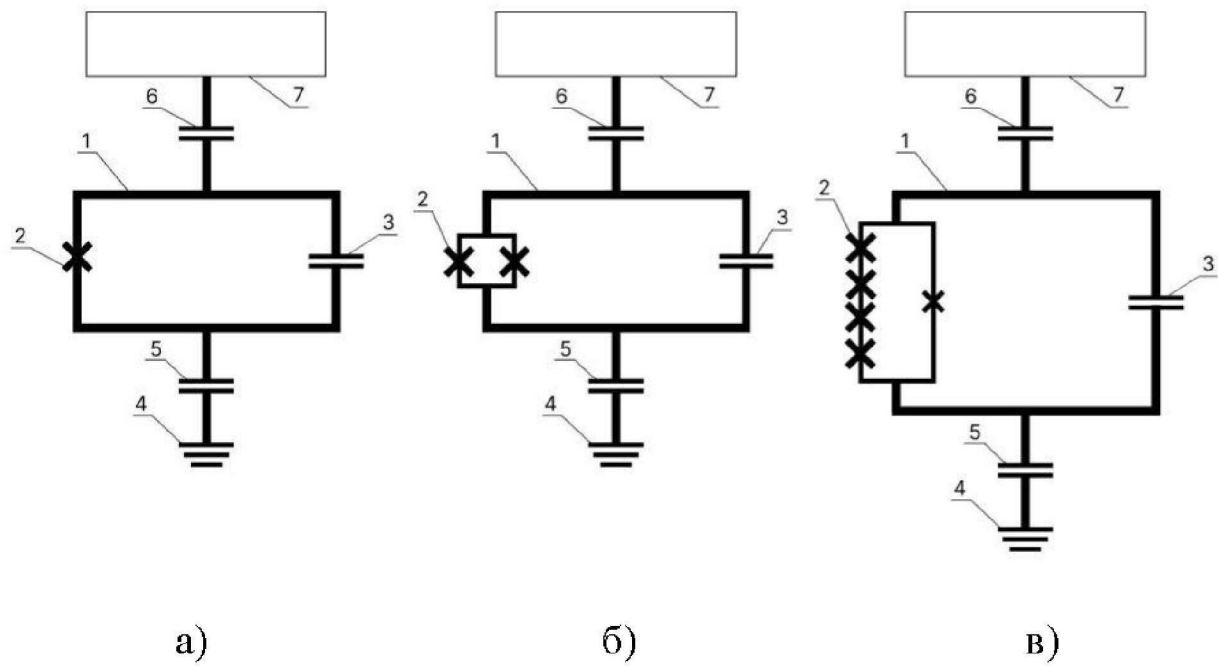
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: US 10424713 B2, 24.09.2019. US  
10170681 B1, 01.01.2019. UA 104982 C2,  
25.03.2014. RU 2716028 C1, 05.03.2020.

(54) Способ изготовления сверхпроводниковых кубитов с отжигом фокусированным ионным пучком

(57) Реферат:

Изобретение относится к области изготовления кубитов и сверхпроводниковых устройств для квантовых компьютеров, а именно к системам на основе тонкопленочных джозефсоновских переходов, и может быть использовано для точной подстройки резонансной частоты сверхпроводниковых кубитов, содержащих тонкопленочные джозефсоновские переходы, после их изготовления, например, перестраиваемых или фиксированных по частоте кубитов, а также криогенных джозефсоновских параметрических усилителей. Сущность изобретения заключается в том, что в способе изготовления сверхпроводниковых кубитов с отжигом фокусированным ионным пучком, включающем изготовление тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов

2 на подложке 8, соединенных с двумя обкладками конденсатора 3, обработку сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2, отжиг сверхпроводниковых кубитов 1 проводят Гауссовым фокусированным ионным пучком 13 посредством локального изменения свойств тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2. Технический результат изобретения заключается в повышении воспроизводимости подстройки резонансной частоты сверхпроводниковых кубитов любого типа, снижении трудоемкости и стоимости технологического маршрута изготовления сверхпроводниковых кубитов и сверхпроводниковых устройств для квантовых компьютеров. 12 з.п. ф-лы, 4 ил.



Фиг. 1

RU 2813743 C1

RU 2813743 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
H10N 60/01 (2023.01)  
H10N 60/12 (2023.01)

(12) ABSTRACT OF INVENTION

(52) CPC

H10N 60/0912 (2024.01); H10N 60/12 (2024.01)

(21)(22) Application: 2023125065, 29.09.2023

(24) Effective date for property rights:  
29.09.2023

Registration date:  
16.02.2024

Priority:

(22) Date of filing: 29.09.2023

(45) Date of publication: 16.02.2024 Bull. № 5

Mail address:

105005, Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,  
MGU im. N.E. Baumana, TSIS dlya Amelinoj  
K.E.

(72) Inventor(s):

Rodionov Ilya Anatolevich (RU),  
Moskaleva Daria Andreevna (RU),  
Krivko Elizaveta Aleksandrovna (RU),  
Smirnov Nikita Sergeevich (RU)

(73) Proprietor(s):

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

(54) METHOD FOR MANUFACTURING SUPERCONDUCTING QUBITS WITH FOCUSED ION BEAM ANNEALING

(57) Abstract:

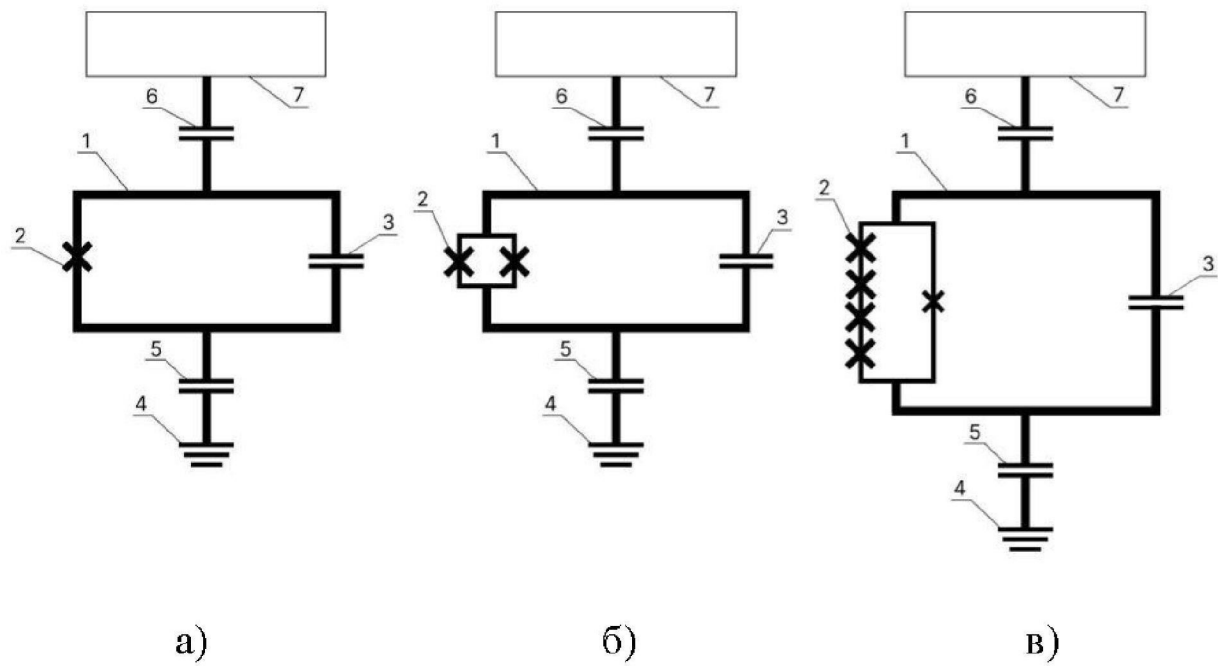
FIELD; superconductors.

SUBSTANCE: manufacturing qubits and superconducting devices for quantum computers, namely systems based on thin-film Josephson junctions, used to fine-tune the resonant frequency of superconducting qubits containing thin-film Josephson junctions after their manufacture, for example, qubits, tunable or fixed by frequency, as well as cryogenic Josephson parametric amplifiers. The method for manufacturing superconducting qubits with annealing by a focused ion beam, including the production of thin-film aluminium/aluminium oxide/aluminium Josephson junctions 2 on a substrate 8 connected to two capacitor plates 3, processing of superconducting qubits 1 by

annealing thin-film aluminium/aluminium oxide/aluminium Josephson junctions 2, annealing of superconducting qubits 1 is carried out with a Gaussian focused ion beam 13 through local changes in the properties of thin-film aluminium/aluminium oxide/aluminium Josephson junctions 2.

EFFECT: increasing the reproducibility of adjusting the resonant frequency of superconducting qubits of any type, reducing the labour intensity and cost of the production route for manufacturing superconducting qubits and superconducting devices for quantum computers.

13 cl, 4 dwg



Фиг. 1

RU 2813743 C1

RU 2813743 C1

Изобретение относится к области изготовления кубитов и сверхпроводниковых устройств для квантовых компьютеров, а именно к системам на основе тонкопленочных джозефсоновских переходов, и может быть использовано для точной подстройки резонансной частоты сверхпроводниковых кубитов, содержащих тонкопленочные джозефсоновские переходы, после их изготовления, например, перестраиваемых или фиксированных по частоте кубитов, а также криогенных джозефсоновских параметрических усилителей.

Известен способ отжига сверхпроводниковых кубитов, заключающийся в позиционировании излучающей антенны непосредственно над первым и вторым тонкопленочными джозефсоновскими переходами в составе сверхпроводниковых кубитов, термическом воздействии на тонкопленочный джозефсоновский переход электромагнитной волной, исходящей из излучающей антенны, последующем перемещении антенны на следующий тонкопленочный джозефсоновский переход [Патент US 11,050,009 B2, опубл.29.06.2021].

Его недостатки заключаются в том, что для отжига сверхпроводниковых кубитов необходимо использовать дополнительную оснастку, содержащую излучающие антенны. Вследствие фиксированного размера оснастки, каждая новая топология сверхпроводниковых кубитов требует изготовления новой оснастки, что накладывает ограничения на гибкость технологического процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов, а также ведет к его удорожанию.

Известен также способ отжига сверхпроводниковых кубитов, заключающийся в формировании множества сверхпроводниковых кубитов на чипе, определении начальной частоты каждого сверхпроводникового кубита, отжиге джозефсоновских переходов в составе сверхпроводниковых кубитов [Патент US 2019/0165244 A1, опубл. 30.05.2019].

Его недостатки заключаются в том, что вследствие большого пятна контакта не удастся располагать сверхпроводниковые кубиты на чипе в непосредственной близости друг от друга, что накладывает ограничения на масштабируемость схем сверхпроводниковых кубитов. Другим недостатком является низкая дискретность значений энергии, использующихся при отжиге сверхпроводниковых кубитов, что не позволяет настраивать резонансную частоту сверхпроводниковых кубитов в широком диапазоне.

Известен также способ лазерного термического отжига сверхпроводниковых кубитов посредством обработки тонкопленочных джозефсоновских переходов лазером с длиной волны 532 нм, включающий изготовление тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов на подложке, соединенных с двумя обкладками конденсатора, отжиг тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов лазером, генерирующим Гауссовый пучок диаметром 20 мкм [Патент US 10,424,713 B2, опубл. 24.09.2019]. Этот способ выбран в качестве прототипа предложенного решения.

Его недостатки заключаются в том, что при лазерном отжиге сверхпроводниковых кубитов посредством обработки тонкопленочных джозефсоновских переходов, лазерный Гауссовый пучок имеет пятно контакта, сопоставимое с размером сверхпроводникового кубита, что не позволяет воздействовать на тонкопленочные джозефсоновские переходы, не затрагивая при этом область подложки. Это приводит к низкой воспроизводимости подстройки резонансной частоты сверхпроводниковых кубитов. Другим недостатком является то, что лазерный отжиг тонкопленочных джозефсоновских переходов подходит только для удаленных друг от друга тонкопленочных джозефсоновских переходов, т.к. вследствие градиента температур, вызванного большим пятном контакта, не удастся

обработать близко расположенные тонкопленочные джозефсоновские переходы с одинаковой энергией. Поэтому, данный способ не позволяет проводить подстройку резонансной частоты перестраиваемых по частоте кубитов, а подходит только для сверхпроводниковых кубитов, фиксированных по частоте. Это приводит к ужесточению требований на этапе изготовления сверхпроводниковых кубитов, удлинению технологического маршрута, вызванному необходимостью дополнительных этапов очистки и, как следствие, удорожанию процесса их изготовления.

Технические результаты изобретения заключаются в повышении воспроизводимости подстройки резонансной частоты сверхпроводниковых кубитов любого типа, снижении трудоёмкости и стоимости технологического маршрута изготовления сверхпроводниковых кубитов и сверхпроводниковых устройств для квантовых компьютеров.

Сущность изобретения заключается в том, что в способе изготовления сверхпроводниковых кубитов с отжигом фокусированным ионным пучком, включающем изготовление тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов на подложке, соединенных с двумя обкладками конденсатора, обработку сверхпроводниковых кубитов посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов, отжиг сверхпроводниковых кубитов проводят Гауссовым фокусированным ионным пучком посредством локального изменения свойств тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов.

Существует вариант, в котором в качестве материала обкладок конденсатора используют или алюминий, или ниобий, или тантал, или молибден.

Существует вариант, в котором Гауссовый фокусированный ионный пучок образован или ионами гелия, или ионами неона, или ионами галлия, или ионами золота, или ионами кремния.

Существует вариант, в котором обработку сверхпроводниковых кубитов посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком проводят Гауссовым фокусированным ионным пучком диаметром от 0,3 до 30 нм.

Существует вариант, в котором обработку сверхпроводниковых кубитов посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком проводят посредством последовательного локального изменения свойств тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов фокусированным пучком.

Существует вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком регулируют глубину проникновения заряженных частиц в объеме тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов посредством изменения дозы облучения в диапазоне от  $1 \times 10^{11}$  до  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>.

Существует вариант, в котором в процессе обработки сверхпроводниковых кубитов посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком воздействуют фокусированным пучком непосредственно на область тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов без нагрева подложки.

Существует вариант, в котором в процессе обработки сверхпроводниковых кубитов посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий

джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком воздействуют фокусированным пучком и на область тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов, и на подложку.

5 Существует вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком площадь области обработки точно соответствует площади тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов.

10 Существует вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком задают площадь области обработки больше площади тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов.

15 Существует вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком задают форму области обработки тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов при помощи полигонов, как простой, так и сложной формы.

20 Существует вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов фокусированным ионным пучком для каждой области обработки задают энергию заряженных частиц, передаваемую в объем тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов.

25 Существует вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов, как фиксированных, так и перестраиваемых по частоте, каждый тонкопленочный алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновский переход в составе сверхпроводникового кубита обрабатывается независимо, без перекрестного влияния от соседних с ним тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов.

30 На фиг. 1 изображена электрическая схема сверхпроводникового кубита, фиксированного по частоте (а), перестраиваемого по частоте (б) и кубита-флаксона (в). Представленные варианты исполнения сверхпроводникового кубита состоят из одного или нескольких тонкопленочных джозефсоновских переходов и параллельно подключенного конденсатора. Джозефсоновский переход и конденсатор могут быть емкостно связаны как со считывающей линией, так и с плоскостью заземления.

35 На фиг. 2 изображена топология тонкопленочного алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновского перехода, соединенного с двумя обкладками конденсатора, а также заземляющей плоскостью. Представлен вариант, когда область обработки больше площади джозефсоновского перехода. Однако существует вариант, в котором область обработки точно соответствует площади джозефсоновского перехода.

40 На фиг. 3 изображено поперечное сечение тонкопленочного алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновского перехода в момент обработки Гауссовым фокусированным ионным пучком. Отмечено, что размер пятна контакта много меньше характерного размера тонкопленочного джозефсоновского перехода. Представлен вариант, в котором глубина проникновения заряженных частиц больше толщины металла верхнего электрода и туннельного барьера. Однако существует вариант, в котором глубина проникновения заряженных частиц меньше или точно соответствует толщине металла верхнего электрода и туннельного барьера.

На фиг. 4 изображена упрощенная схема гелиево-ионного микроскопа,

использующегося для ионного отжига сверхпроводниковых кубитов, позволяющего получить диаметр фокусированного ионного пучка менее 30 нм.

Способ изготовления сверхпроводниковых кубитов (фиг. 1) с отжигом фокусированным ионным пучком может быть реализован одним из ряда известных технологических процессов. Двумя примерами таких процессов могут быть: 1) субтрактивный процесс изготовления сверхпроводниковых кубитов на основе трехслойных тонкопленочных джозефсоновских переходов или 2) процесс на основе технологии моста Долана. Далее в качестве примера приведено описание процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов на основе технологии моста Долана.

На пластине 8 (фиг. 2, фиг. 3) из кремния, или сапфира, или оксида магния с диаметром от 25 мм до 300 мм и толщиной от 430 мкм до 650 мкм методами электронно-лучевой литографии и теневого осаждения формируют сверхпроводниковые кубиты 1 на тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий или ниобий/алюминий-оксид алюминия/ниобий джозефсоновских переходах 2с толщиной нижнего тонкопленочного электрода 9 от 15 до 25 нм и толщиной верхнего тонкопленочного электрода 10 от 35 до 60 нм, а также толщиной туннельного барьера из оксида алюминия 12 от 0,1 до 10 нм. В таких процессах тонкопленочный джозефсоновский переход 2 располагают между обкладками конденсатора 3, которые могут быть емкостно связаны с линией 7 через конденсатор 6 или с заземляющей плоскостью 4 через конденсатор 5. Расположение и геометрию сверхпроводникового кубита 1 выбирают на основании данных моделирования и проектирования. В соответствии с одним из возможных вариантов исполнения емкость конденсатора 3 лежит в диапазоне от 0,1 фФ до 200 фФ. В соответствии с одним из возможных вариантов исполнения сверхпроводникового кубита 1 критический ток тонкопленочных джозефсоновских переходов 2 лежит в диапазоне от 10 до 100 нА. Критический ток связан с комнатным сопротивлением тонкопленочного джозефсоновского перехода 2 через соотношение Амбегаокара-Баратова. В частности, соотношение предсказывает, что сопротивление тонкопленочного джозефсоновского перехода 2 до достижения сверхпроводящего состояния обратно пропорционально критическому току после перехода в сверхпроводящее состояние. Далее в качестве примера приведено описание изготовления сверхпроводникового кубита-трансмона.

В соответствии с одним из возможных вариантов изготовления сверхпроводникового кубита 1 на поверхности подложки 8 формируют двухслойную резистивную маску, нижний слой которой может быть выполнен из сополимера метилметакрилата (ММА), а верхний, более тонкий слой, может быть выполнен из полиметилметакрилата (РММА). Далее проводят электронно-лучевую литографию с целью формирования геометрии тонкопленочных джозефсоновских переходов 2 в двухслойной резистивной маске. Затем, области резистивной маски, подвергшиеся воздействию электронного пучка, удаляют в растворе МІВК:ІРА (метилизобутилкетон : изопропиловый спирт) в концентрации 1:3. Слой ММА более чувствителен к воздействию электронного пучка, что позволяет сформировать подвесной мост из РММА, также называемый мостом Долана. Далее образец помещают в установку электронно-лучевого испарения, где через ранее сформированные отверстия в резистивной маске, под двумя различными углами испаряют алюминий с промежуточным окислением в атмосфере аргона, между этапами испарениями алюминия. В результате испарения в области подвесного моста Долана формируется тонкопленочный джозефсоновский переход 2 (фиг. 3). Затем, оставшийся резист и нежелательный металл удаляют, помещая образец в N-метил-2-пирролидон (NMP). Этот базовый процесс изготовления можно использовать с другими



дополнительными этапами изготовления, такими как плазмохимическое осаждение из газовой фазы (PECVD), оптическая литография, а также плазмохимическое и жидкостное травление, для изготовления более сложных устройств. Далее проводят отжиг сверхпроводниковых кубитов 1 Гауссовым фокусированным ионным пучком 13 посредством локального изменения свойств тонкопленочных джозефсоновских переходов 2 (фиг. 3) в камере 15 гелиево-ионного микроскопа 16 (фиг. 4).

Существует вариант, в котором в качестве материала обкладок конденсатора 3 используют или алюминий, или ниобий, или тантал, или молибден, или нитрид ниобия с толщиной пленки от 80 нм до 130 нм и характерными размерами обкладок конденсатора 3 от 1 мкм до 500 мкм.

Существует также вариант, в котором Гауссовый фокусированный ионный пучок 13 образован или ионами гелия, или ионами неона, или ионами галлия, или ионами золота, или ионами кремния с энергией фокусированного ионного пучка 13 от 10 кэВ до 30 кэВ.

Существует также вариант, в котором обработку сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком проводят Гауссовым фокусированным ионным пучком 13 диаметром от 0,3 до 30 нм, причем диаметр Гауссового фокусированного пучка 13 изменяют посредством варьирования диаметра апертуры, установленной в электронно-оптической колонне гелиево-ионного микроскопа 16.

Тонкопленочные алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновские переходы 2, например, могут быть обработаны фокусированными ионными пучками 13 гелия и неона с энергией пучка от 10 кэВ до 30 кэВ, а также диаметром пучка от 3 нм до 15 нм.

Об изменении диаметра фокусированного ионного пучка 13 может свидетельствовать изменение тока фокусированного ионного пучка для заданной апертуры гелиево-ионного микроскопа 16. Например, диаметр апертуры 70 мкм соответствует току фокусированного ионного пучка 1,5 пА и диаметру пучка 15 нм, а диаметр апертуры 5 мкм соответствует току пучка 0,2 пА и диаметру пучка 3 нм. Область обработки фокусированным ионным пучком 11 может быть задана путем составления топологии обработки в электронном формате. Площадь области обработки 11, например, для каждого тонкопленочного алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновского перехода 2 может составлять 5×5 мкм, при этом, фокусированный ионный пучок 13 будет воздействовать и на область джозефсоновского перехода 2, и на кремниевую подложку 8.

При обработке тонкопленочных джозефсоновских переходов 2 фокусированными ионными пучками 13 высоких энергий может наблюдаться увеличение комнатного сопротивления ( $R_N$ ) джозефсоновских переходов 2, которое может быть вызвано локальным изменением структуры тонкопленочного джозефсоновского перехода 2 вследствие ее нагрева фокусированным ионным пучком 13. Диапазон рассеивания значений  $R_N$  может быть уменьшен посредством уменьшения диаметра (тока) фокусированного ионного пучка 13. Так, для фокусированного ионного пучка 13 диаметром 8 нм (ток 0,6 пА) диапазон рассеивания значений  $R_N$  может соответствовать 8,3%, а для пучка диаметром 3 нм (ток 0,2 пА) -3,5%. Также, диапазон рассеивания может быть уменьшен посредством уменьшения энергии фокусированного ионного пучка, что может быть объяснено снижением степени повреждения подложки за счет уменьшения количества обратно-отраженных ионов. Для пучка с энергией 30 кэВ

диапазон рассеивания может составлять 15%, а для пучка с энергией 10 кэВ - 10 %. На основании выбора варианта исполнения, энергии, а также диаметра фокусированного ионного пучка могут быть протестированы и определены значения сдвига комнатного сопротивления для заданного набора условий с высокой точностью обработки.

Существует также вариант, в котором обработку сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 проводят посредством последовательного локального изменения свойств тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным пучком 13, например, посредством локального последовательного нагрева структуры тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фононами, образующимися в результате неупругих соударений ионов первичного пучка с атомами структуры тонкопленочного джозефсоновского перехода, или последовательного формирования вакансий в структуре туннельного барьера джозефсоновского перехода из оксида алюминия 12.

Существует также вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 регулируют глубину проникновения заряженных частиц 14 в объеме тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 в диапазоне от 20 нм до 70 нм посредством изменения дозы облучения в диапазоне от  $1 \times 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup> до  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> за счет увеличения времени сканирования на точку в диапазоне от 0,5 мкс до 50 мкс и изменения шага сканирования в диапазоне от 20 нм до 0,5 нм.

Тонкопленочные алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновские переходы 2 могут быть обработаны, например, фокусированными ионными пучками 13 гелия и неона при варьировании дозой облучения в диапазоне от  $1 \times 10^{11}$  ион/см<sup>2</sup> до  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> при фиксированной площади области обработки 11. Область обработки фокусированным ионным пучком 11 может быть задана путем составления топологии обработки в электронном формате. Площадь области обработки 11 для каждого тонкопленочного алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновского перехода 2 может точно соответствовать его площади. В качестве примера обработка тонкопленочных джозефсоновских переходов 2 может быть произведена в камере гелиевого-ионного микроскопа Orion NanoFab 16 с энергией пучка 10 кэВ и током пучка ионов 0,2 пА. Однако, другие ионно-оптические системы, с другими параметрами фокусированного ионного пучка могут быть использованы для достижения оптимальных параметров сдвига частоты сверхпроводниковых кубитов.

При изменении дозы облучения фокусированным ионным пучком, например, в диапазоне от  $0,02 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> до  $7,90 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup>, возможно плавно увеличивать комнатное сопротивление тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 в диапазоне от 1 % до 40% для фокусированного пучка, образованного ионами неона, и в диапазоне от 1% до 25% для гелиевого фокусированного ионного пучка 13. Например, при обработке тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 с дозой облучения менее  $4 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup>, возможно контролируемо изменять резонансную частоту сверхпроводниковых кубитов 1 в диапазоне от 50 МГц до 100 МГц, а при дозе облучения больше  $4 \times 10^{13}$  ион/см<sup>2</sup> диапазон изменения

резонансной частоты сверхпроводниковых кубитов 1 может составлять от 100 до 400 МГц.

Существует также вариант, в котором в процессе обработки сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 воздействуют фокусированным пучком 13 непосредственно на область тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 без нагрева подложки 8.

Существует также вариант, в котором в процессе обработки сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 воздействуют фокусированным пучком 13 и на область тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2, и на подложку 8.

Существует также вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 площадь области обработки 11 точно соответствует площади тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 и лежит в диапазоне от  $0,01 \text{ мкм}^2$  до  $1 \text{ мкм}^2$ .

Существует также вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 задают площадь области обработки 11 больше площади тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 в диапазоне от  $1 \text{ мкм}^2$  до  $100 \text{ мкм}^2$ .

Существует также вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 задают форму области обработки 11 тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 при помощи полигонов, как простой, так и сложной формы, например, в виде прямоугольника, окружности, эллипса или полигона, форма которого точно повторяет форму тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2.

Существует также вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 для каждой области обработки 11 задают энергию заряженных частиц, передаваемую в объем тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 в диапазоне от  $1 \times 10^{11} \text{ ион/см}^2$  до  $5 \times 10^{14} \text{ ион/см}^2$ , за счет формирования полигона в области каждого тонкопленочного алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновского перехода 2.

Существует также вариант, в котором при обработке сверхпроводниковых кубитов 1, как фиксированных, так и перестраиваемых по частоте, каждый тонкопленочный алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновский переход 2 в составе сверхпроводникового кубита 1 обрабатывается независимо, без перекрестного влияния от соседних с ним тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 посредством задания для каждого тонкопленочного джозефсоновского перехода области обработки 11 и энергии заряженных частиц.

В качестве примера, фокусированным ионным пучком неона с энергией 10 кэВ и

током пучка 0,2 пА могут быть обработаны сверхпроводниковые кубиты-трансмоны как фиксированные, так и перестраиваемые по частоте. Например, может быть обработан фиксированный по частоте кубит-трансмон, резонансная частота которого составляла 4,2 ГГц, а время релаксации 370 мкс. Данный кубит может быть обработан фокусированным ионным пучком, повторно охарактеризован, в результате чего его резонансная частота может стать равной 4,1 ГГц, а время релаксации 340 мкс. Второй фиксированный по частоте кубит-трансмон с резонансной частотой 4,52 ГГц и временем релаксации 159 мкс может, например, быть обработан с большей дозой воздействия фокусированного ионного пучка, в результате чего его частота станет равной 4,38 ГГц, а время релаксации 320 мкс. Увеличение времени релаксации может быть связано с удалением резонансной частоты кубита от частоты двухуровневого дефекта TLS. Также в качестве примера фокусированным ионным пучком неона могут быть обработаны перестраиваемые по частоте кубиты-трансмоны. Например, их резонансные частоты до обработки могут составлять 4,85 и 4,66 ГГц. Тонкопленочные джозефсоновские переходы в составе каждого из сверхпроводниковых кубитов перестраиваемых по частоте могут быть обработаны фокусированным ионным пучком независимо, без перекрестного воздействия. В результате обработки резонансные частоты данных кубитов могут оказаться равными 4,74 ГГц и 4,57 ГГц. Полученная частота сверхпроводникового кубита может быть определена как применимая к текущему квантовому приложению, в результате чего кубит может быть зафиксирован на этой частоте.

То, что в способе изготовления сверхпроводниковых кубитов с отжигом фокусированным ионным пучком, включающем изготовление тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 на подложке 8, соединенных с двумя обкладками конденсатора 3, обработку сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2, отжиг проводят Гауссовым фокусированным ионным пучком 13 посредством локального изменения свойств тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 приводит к повышению воспроизводимости подстройки резонансной частоты для любого типа сверхпроводниковых кубитов 1 и к снижению трудоёмкости и стоимости технологического маршрута изготовления сверхпроводниковых кубитов 1. Это достигается благодаря ограничению области обработки 11 непосредственно областью тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2, что ведёт к тому, что близко расположенные тонкопленочные алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновские переходы 2 могут быть обработаны каждый в отдельности, как с одинаковой, так и с различной энергией, что позволяет проводить групповую обработку близкорасположенных тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 и снижает требования к качеству изготовления сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что в качестве материала обкладок конденсатора 3 используют или алюминий, или ниобий, или тантал, или молибден приводит к тому, что ионный отжиг тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 можно проводить для любого маршрутного технологического процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов 1, что ведёт к повышению гибкости технологического процесса изготовления сверхпроводниковых кубитов 1 и, как следствие, к повышению качества изготовления сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что Гауссовый фокусированный ионный пучок 13 образован ионами гелия,

или ионами неона, или ионами галлия, или ионами золота, или ионами кремния приводит к тому, что в ходе ионного отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 возможно изменять диаметр фокусированного пучка 13 в диапазоне от 30 нм до 0,3 нм, что ведёт к регулированию диаметра пятна контакта фокусированного пучка 13, а также регулированию степени аморфизации структуры тонкопленочного алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновского перехода 2, и, как следствие, повышению воспроизводимости подстройки резонансной частоты для любого типа сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что обработку сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком проводят Гауссовым фокусированным ионным пучком 13 диаметром от 0,3 до 30 нм приводит к тому, что пятно контакта фокусированного пучка 13 в ходе ионного отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 может быть уменьшено вплоть до 1 нм, что ведёт к адресной передаче энергии от фокусированного пучка заряженных частиц 13 к атомам тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 и, как следствие, повышению воспроизводимости подстройки резонансной частоты для любого типа сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что обработку сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 проводят посредством последовательного локального изменения свойств тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным пучком 13 приводит к повышению или понижению комнатного сопротивления тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2, что ведёт к понижению или повышению резонансной частоты сверхпроводниковых кубитов 1 и, как следствие, снижению требований к качеству изготовления сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что при обработке сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 регулируют глубину проникновения заряженных частиц 14 в объеме тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 посредством изменения дозы облучения в диапазоне от  $1 \times 10^{11}$  до  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup> приводит к тому, что возможно изменять комнатное сопротивление тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 в диапазоне от 1% до 40%, что ведет к изменению резонансной частоты сверхпроводниковых кубитов 1 в диапазоне от 50 МГц до 600 МГц и, как следствие, снижению требований к качеству изготовления сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что в процессе обработки сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 воздействуют фокусированным пучком 13 непосредственно на область тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 без нагрева подложки 8 приводит к тому, что в ходе ионного отжига не происходит изменения структуры подложки 8, что ведёт к минимизации дефектов на интерфейсе подложка 8 - конденсатор 3 и, как следствие, повышению качества изготовления сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что в процессе обработки сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 воздействуют фокусированным пучком 13 и на

область тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2, и на подложку 8 приводит к тому, что область тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 нагревается как непосредственно за счет взаимодействия с фокусированным ионным пучком 13, так и вследствие перекрестного нагрева от подложки 8, что ведёт к увеличению теплового воздействия на область тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 и, как следствие, расширению диапазона подстройки резонансной частоты сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что при обработке сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 площадь области обработки 11 точно соответствует площади тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 приводит к тому, что ионный отжиг каждого из тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 можно проводить отдельно, при индивидуально заданных параметрах, что ведёт к тому, что посредством ионного отжига можно устранить невоспроизводимость электрических параметров тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 в составе сверхпроводникового кубита 1, перестраиваемого по частоте, и, как следствие снижению требований к качеству изготовления сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что при обработке сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 задают площадь области обработки 11 больше площади тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 приводит к тому, что тонкопленочные алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновские переходы 2 в составе сверхпроводникового кубита 1, перестраиваемого по частоте, могут быть обработаны совместно с одинаковой энергией фокусированного пучка 13, что ведёт к минимизации ошибки позиционирования при перемещении между соседними тонкопленочными алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновскими переходами 2 и, как следствие, повышению точности подстройки резонансной частоты для любого типа сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что при обработке сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 задают форму области обработки 11 тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 при помощи полигонов, как простой, так и сложной формы, приводит к ограничению области взаимодействия фокусированного пучка 13 с интерфейсами сверхпроводникового кубита 1, что ведёт к минимизации числа дефектов в объеме тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2, вызванных тепловым воздействием, и, как следствие, повышению качества изготовления сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что при обработке сверхпроводниковых кубитов 1 посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 фокусированным ионным пучком 13 для каждой области обработки 11 задают энергию заряженных частиц, передаваемую в объем тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 приводит к тому, что для каждого тонкопленочного алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновского перехода 2 контролируют число заряженных частиц, как достигающих туннельного барьера

джозефсоновского перехода 12, так и тормозящихся в объеме верхнего тонкопленочного электрода из алюминия 10, что ведёт к тому, что в процессе ионного отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминийджозефсоновских переходов 2 можно контролировать число дефектов типа вакансии, возникающих в объеме тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 и, как следствие, повышению качества изготовления сверхпроводниковых кубитов 1.

То, что при обработке сверхпроводниковых кубитов 1, как фиксированных, так и перестраиваемых по частоте, каждый тонкопленочный алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновский переход 2 в составе сверхпроводникового кубита 1 обрабатывается независимо, без перекрестного влияния от соседних с ним тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов 2 приводит к тому, что тонкопленочные алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновские переходы 2 в составе сверхпроводниковых кубитов 1, перестраиваемых по частоте, могут быть обработаны как с одинаковой, так и с различной энергией, что ведёт к тому, что при ионном отжиге, возможно учитывать асимметричность сверхпроводниковых кубитов 1 и, как следствие, повысить воспроизводимость подстройки резонансной частоты для любого типа сверхпроводниковых кубитов 1.

#### (57) Формула изобретения

1. Способ изготовления сверхпроводниковых кубитов с отжигом фокусированным ионным пучком, включающий изготовление тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) на подложке (8), соединенных с двумя обкладками конденсатора (3), обработку сверхпроводниковых кубитов (1) посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2), отличающийся тем, что отжиг проводят Гауссовым фокусированным ионным пучком (13) посредством локального изменения свойств тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2).

2. Способ по п.1, отличающийся тем, что в качестве материала обкладок конденсатора (3) используют или алюминий, или ниобий, или тантал, или молибден.

3. Способ по п.1, отличающийся тем, что Гауссовый фокусированный ионный пучок (13) образован ионами гелия, или ионами неона, или ионами галлия, или ионами золота, или ионами кремния.

4. Способ по пп.2, 3, отличающийся тем, что обработку сверхпроводниковых кубитов (1) посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) фокусированным ионным пучком проводят Гауссовым фокусированным ионным пучком (13) диаметром от 0,3 до 30 нм.

5. Способ по пп.2-4, отличающийся тем, что обработку сверхпроводниковых кубитов (1) посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) фокусированным ионным пучком (13) проводят посредством последовательного локального изменения свойств тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) фокусированным пучком (13).

6. Способ по пп.3-5, отличающийся тем, что при обработке сверхпроводниковых кубитов (1) посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) фокусированным ионным пучком (13) регулируют глубину проникновения заряженных частиц (14) в объеме тонкопленочных алюминий/

оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) посредством изменения дозы облучения в диапазоне от  $1 \times 10^{11}$  до  $5 \times 10^{14}$  ион/см<sup>2</sup>.

7. Способ по пп.3-6, отличающийся тем, что в процессе обработки сверхпроводниковых кубитов (1) посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) фокусированным ионным пучком (13) воздействуют фокусированным пучком (13) непосредственно на область тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) без нагрева подложки (8).

8. Способ по пп.3-6, отличающийся тем, что в процессе обработки сверхпроводниковых кубитов (1) посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) фокусированным ионным пучком (13) воздействуют фокусированным пучком (13) и на область тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2), и на подложку (8).

9. Способ по пп.7, 8, отличающийся тем, что при обработке сверхпроводниковых кубитов (1) посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) фокусированным ионным пучком (13) площадь области обработки (11) точно соответствует площади тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2).

10. Способ по пп.7, 8, отличающийся тем, что при обработке сверхпроводниковых кубитов (1) посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) фокусированным ионным пучком (13) задают площадь области обработки (11) больше площади тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2).

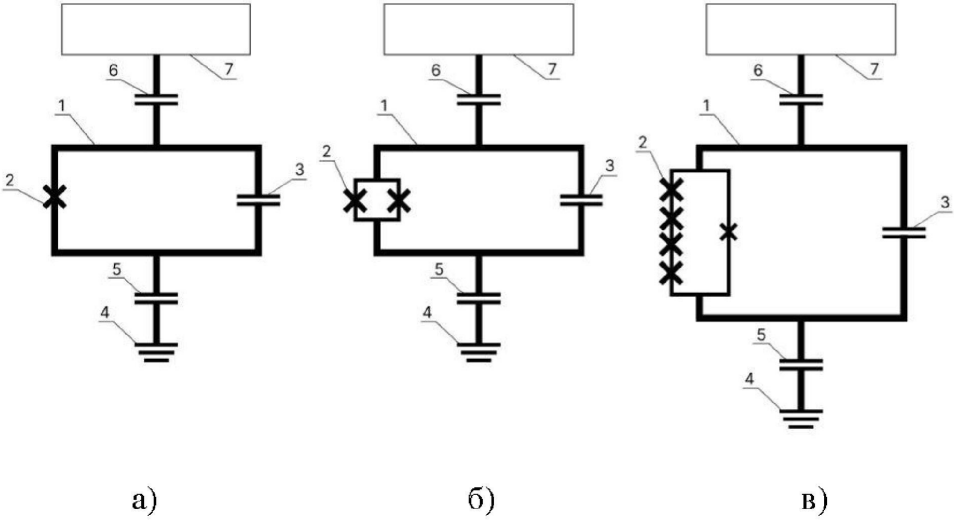
11. Способ по пп.9, 10, отличающийся тем, что при обработке сверхпроводниковых кубитов (1) посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) фокусированным ионным пучком (13) задают форму области обработки (11) тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) при помощи полигонов, как простой, так и сложной формы.

12. Способ по пп.9-11, отличающийся тем, что при обработке сверхпроводниковых кубитов (1) посредством отжига тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2) фокусированным ионным пучком (13) для каждой области обработки (11) задают энергию заряженных частиц, передаваемую в объем тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2).

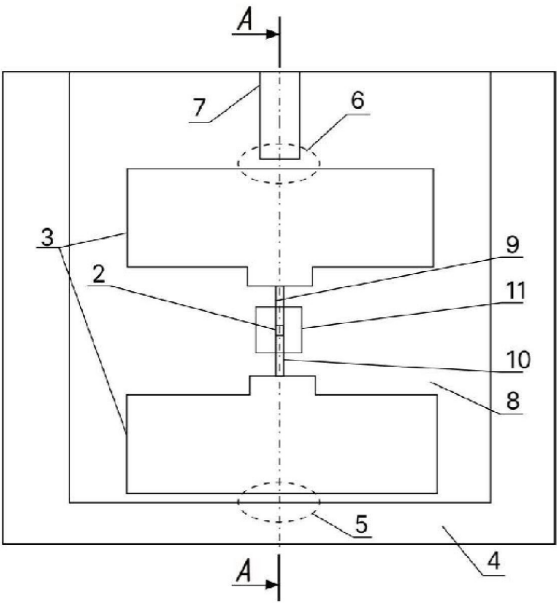
13. Способ по п.12, отличающийся тем, что при обработке сверхпроводниковых кубитов (1), как фиксированных, так и перестраиваемых по частоте, каждый тонкопленочный алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновский переход (2) в составе сверхпроводникового кубита (1) обрабатывается независимо, без перекрестного влияния от соседних с ним тонкопленочных алюминий/оксид алюминия/алюминий джозефсоновских переходов (2).



1

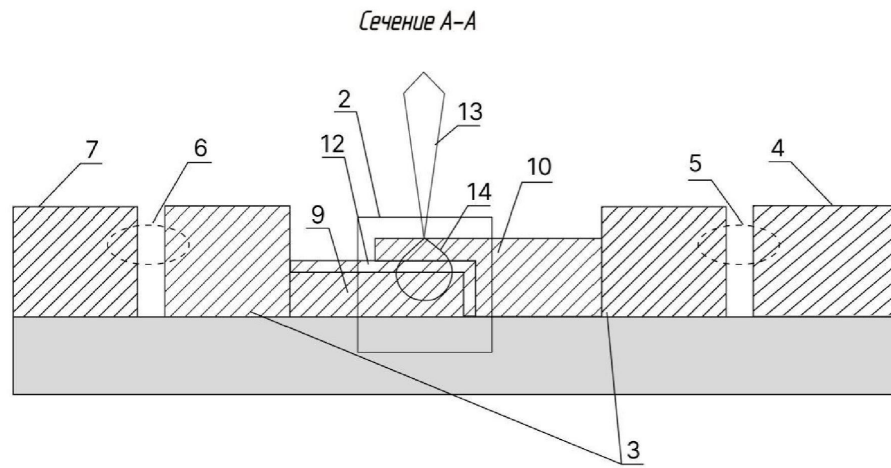


Фиг. 1

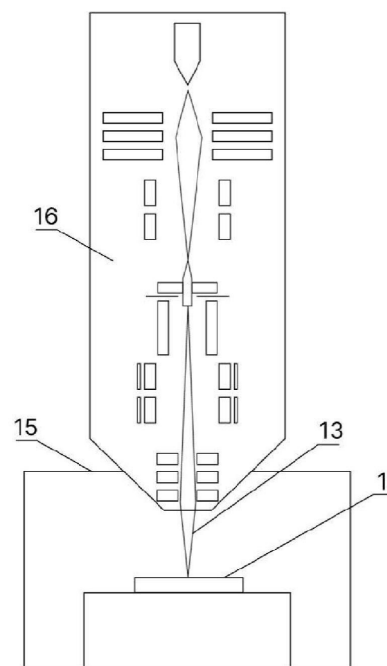


Фиг. 2

2



Фиг. 3



Фиг. 4