



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2016115791, 22.04.2016

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
22.04.2016

Дата регистрации:
22.05.2017

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 22.04.2016

(45) Опубликовано: 22.05.2017 Бюл. № 15

Адрес для переписки:

119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1,
Московский государственный университет
имени М.В. Ломоносова, Фонд "Национальное
интеллектуальное развитие"

(72) Автор(ы):

Куприянов Михаил Юрьевич (RU),
Бакурский Сергей Викторович (RU),
Кленов Николай Викторович (RU),
Соловьев Игорь Игоревич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

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

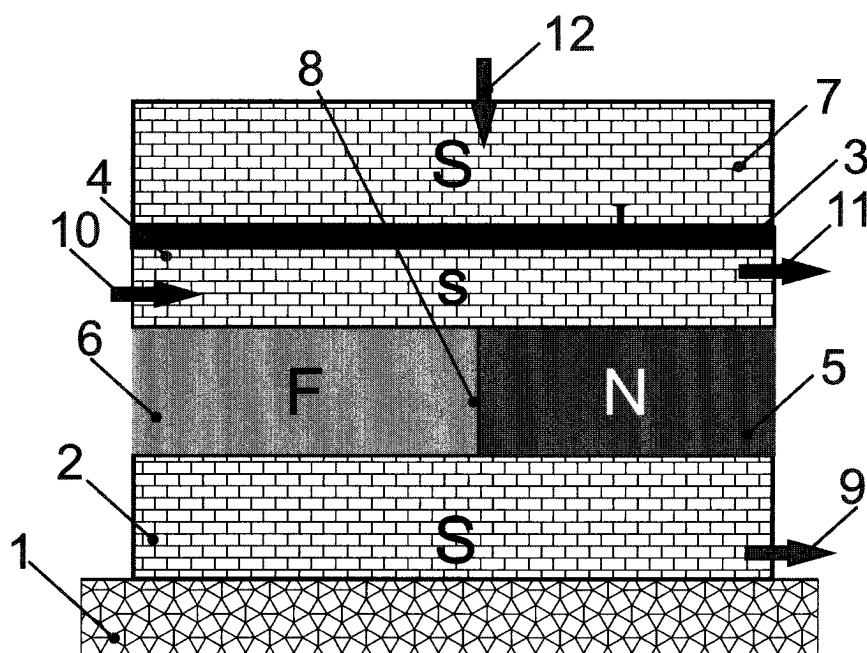
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2442245 C1, 10.02.2012. RU
2554614 C2, 27.06.2015. RU 2439749 C1,
10.01.2012. US 20080051292 A1, 28.02.2008. WO
2012103384 A3, 02.08.2012.

(54) ДЖОЗЕФСОНОВСКИЙ ФАЗОВЫЙ ДОМЕННЫЙ ВЕНТИЛЬ (ВАРИАНТЫ)

(57) Реферат:

Использование: для создания элементов быстрой криогенной памяти. Сущность изобретения заключается в том, что джозефсоновский фазовый доменный вентиль включает два расположенных на подложке друг под другом сверхпроводящих электрода с токоподводами и область слабой связи между ними в виде тонкопленочной слоистой структуры, содержащей: промежуточный слой сверхпроводящего материала с токоподводами, толщина которого лежит в диапазоне от 20 до 60 нм, отделенный от нижнего сверхпроводящего электрода слоем изолятора; нанесенный на часть тонкого промежуточного слоя сверхпроводящего

материала слой нормального металла, толщина которого лежит в диапазоне от 1 до 20 нм; слой магнитного материала, нанесенный на оставшуюся не закрытой слоем нормального металла поверхность тонкого промежуточного слоя сверхпроводящего материала, толщина которого лежит в диапазоне от 1 до 20 нм. Технический результат: обеспечение возможности переключения между устойчивыми состояниями вентиля без изменения намагниченности в слое магнитного материала, что обеспечивает достаточно малое время на реализацию операции записи. 2 н. и 18 з.п. ф-лы, 3 ил.



ФИГ. 2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2016115791, 22.04.2016**(24) Effective date for property rights:
22.04.2016Registration date:
22.05.2017

Priority:

(22) Date of filing: **22.04.2016**(45) Date of publication: **22.05.2017** Bull. № 15

Mail address:

**119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1,
Moskovskij gosudarstvennyj universitet imeni M.V.
Lomonosova, Fond "Natsionalnoe intellektualnoe
razvitie"**

(72) Inventor(s):

**Kupriyanov Mikhail Yurevich (RU),
Bakurskij Sergej Viktorovich (RU),
Klenov Nikolaj Viktorovich (RU),
Solovev Igor Igorevich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhetnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
obrazovaniya "Moskovskij gosudarstvennyj
universitet imeni M.V. Lomonosova" (MGU)
(RU)**

(54) **JOSEPHSON PHASE BLAST VALVE (VERSIONS)**

(57) Abstract:

FIELD: electricity.

SUBSTANCE: josephson phase blast valve comprises two superconducting electrodes with current leads, located on the substrate under each other, and the weak connection area between them in the form of a thin-film layered structure comprising: the intermediate layer of a superconducting material with current leads, the thickness of which ranges from 20 to 60 nm, separated from the lower superconducting electrode by an insulator layer; the normal metal layer applied to the part of the thin intermediate layer of a superconducting material, whose thickness ranges from

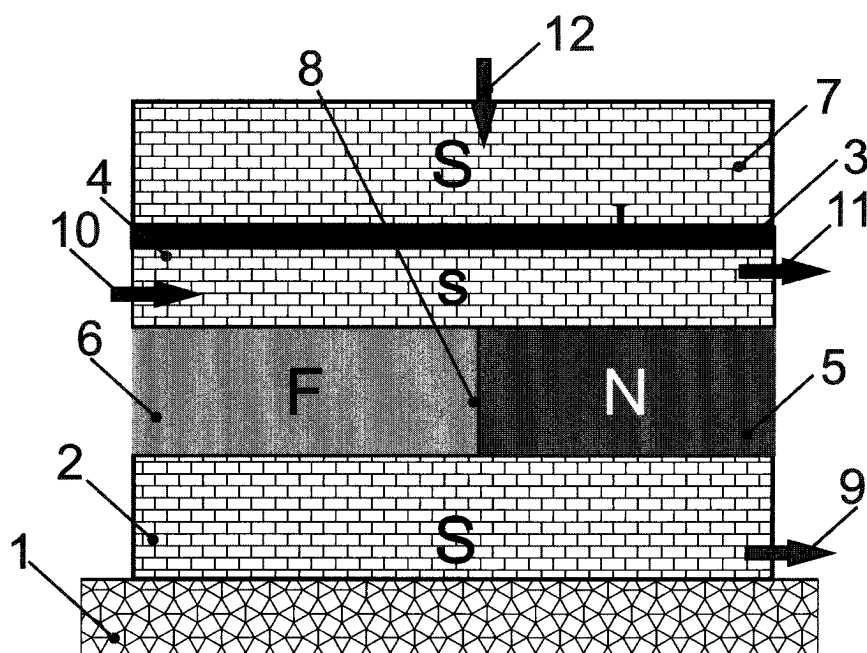
1 to 20 nm; the magnetic material layer applied to the surface of the thin intermediate layer of a superconducting material, remaining not covered by the normal metal layer, the thickness of which ranges from 1 to 20 nm.

EFFECT: providing the possibility of switching between the stable states of the valve without changing the magnetization in the magnetic material layer, that provides a sufficiently short time for the implementation of the write operation.

20 cl, 3 dwg

RU 2 620 027 C1

RU 2 620 027 C1



ФИГ. 2

Уровень техники

Прогресс современных вычислительных комплексов тесно связан с ростом количества транзисторов на кристалле, что требует как уменьшения характерных размеров базовых элементов, так и увеличения степени их интеграции. Это ведет к резкому увеличению

тепла, выделяемого на одном квадратном сантиметре площади микросхемы, что, в свою очередь, требует обеспечения эффективного отведения тепла и делает особенно актуальным вопрос энергоэффективности вычислений. Так, к примеру, энергопотребление современного процессора, содержащего порядка 10^8 транзисторов, составляющее 0.1-1 КВт, обуславливает суммарное энергопотребление суперкомпьютеров петафлопной производительности и центров обработки данных на уровне 10-100 МВт. Энергопотребление машин нового поколения эксафлопных суперЭВМ может составить порядка нескольких ГВт, что сравнимо с мощностью блока атомной электростанции и ставит под сомнение дальнейшее развитие этой области на основе существующих технологий. Альтернативным подходом к развитию вычислительных систем является использование энергоэффективной сверхпроводниковой технологии, позволяющей создавать как подводящие линии (провода), так и логические элементы.

На сегодняшний день сверхпроводниковые логические устройства на основе эффекта Джозефсона характеризуются очень высоким быстродействием: характерная частота F_c джозефсоновских элементов на основе низкотемпературных сверхпроводников лежит в диапазоне от десятков до сотен гигагерц, а при использовании высокотемпературных сверхпроводников может достигать единиц и даже десятков терагерц. Высокое быстродействие, высокая чувствительность, предельно низкая энергия переключения джозефсоновских элементов $E_J = 2 \cdot 10^{-15} \text{ Вб} \cdot 10^{-4} \text{ А} \approx 10^{-19} \text{ Дж}$ открывает большие перспективы для разработки аналоговых и цифровых устройств, которые способны работать в более высоких диапазонах частот сигналов, обеспечивать более высокие скорости обработки информации по сравнению с традиционной полупроводниковой электроникой. Традиционно известные джозефсоновские гетероструктуры (ДГС) представляют собой сформированную на диэлектрической подложке многослойную тонкопленочную структуру, включающую слои сверхпроводника, изолирующие, барьерные и функциональные слои. В зависимости от назначения и конструктивного исполнения осуществляется выбор материалов подложек и самих активных сред.

Прогресс в этой области сильно ограничен отсутствием высокочастотной, энергоэффективной сверхпроводниковой памяти, которая по быстродействию и уровню сигналов соответствовала бы имеющимся сверхпроводниковым логическим элементам. Рекордная емкость сверхпроводникового запоминающего устройства с произвольной выборкой составляет всего 4 кбит. В качестве выхода из сложившейся ситуации на сегодняшний день используется гибридная сверхпроводниковая-полупроводниковая память. Экспериментально была продемонстрирована работа гибридного устройства с произвольной выборкой емкостью 64 кбит. К сожалению, использование гибридного подхода, предполагающее передачу данных между чипами со сверхпроводниковыми логическими схемами и полупроводниковой памятью, заметно ухудшает быстродействие и увеличивает суммарное энергопотребление систем. Ввиду отсутствия подходящей сверхпроводниковой памяти в современных сверхпроводниковых цифровых системах используются гибридные схемы, содержащие как сверхпроводниковые, так и полупроводниковые/магниторезистивные компоненты (US 0244958, Bulzacchelli J.,

01.10.2009). Однако использование такого подхода увеличивает общее энерговыделение и заметно уменьшает быстродействие: тактовая частота цифровой схемы, в которой необходимо осуществлять обмен данными между вычислительным блоком и блоком памяти, будет с необходимостью ограничена ~ 4 ГГц временем, которое потребуется для прохождения сигнала со скоростью света по образующейся петле для характерного размера чипа 1 см.

Для обеспечения возможности интеграции джозефсоновской памяти на магнитных джозефсоновских контактах с цепями сверхбыстрой цифровой сверхпроводниковой электроники исследуемые структуры должны удовлетворять двум требованиям:

1) допускать возможность быстрого перемагничивания ферромагнитной прослойки, включенной в джозефсоновский переход, слабым магнитным полем для обеспечения операции «Запись» и

2) обладать малым временем переключения джозефсоновского перехода (высокой характерной частотой) для реализации операции «Считывание».

Известны различные технические решения, направленные на создание элементов и систем джозефсоновской памяти. В особую группу необходимо выделить решения, найденные и запатентованные на первых этапах развития быстрой одноквантовой логики (БОК-логики), в схемах которой носителем информации является квант магнитного потока. В сверхпроводниковых устройствах памяти на основе схем БОК-логики элементарной ячейкой являлся сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД), причем логическому «нулю»/«единице» в ячейке памяти соответствовало отсутствие/наличие в ячейке кванта магнитного потока и связанного с ним кругового тока (JP 3194796, Suzuki, 22.12.1989; US 5260264, Kurosawa, 26.03.1990). На основе различных СКВИДов были созданы сложные сверхпроводниковые системы с памятью,

- трехтерминальные ячейки для криогенных компьютеров (US 5365476, Mukhanov O.A., 26.02.1993);

- джозефсоновские ячейки памяти с несколькими устойчивыми состояниями (JP 11191294, Chan, 10.10.1997);

- сверхпроводящие элементы памяти со встроенной защитой от ошибок (US 5629889, Chandra P., 14.12.1995).

Особо хотелось бы отметить созданные в рамках такого подхода аналоги запоминающих устройств с произвольным доступом к ячейкам (US 0255987, Nagasawa S., 16.11.2006). Главный недостаток ячейки памяти на основе СКВИЛа - ее чрезвычайно большой по меркам современной электроники размер (несколько микрон).

Необходимость хранения и передачи кванта магнитного потока Φ_0 накладывает ограничение снизу на величину геометрической индуктивности элемента памяти с джозефсоновскими контактами на основе схем БОК-логики. На настоящий момент емкость наибольшего известного из литературы подобного запоминающего устройства составляет всего 4096 бит (протестировано на частоте 620 МГц) [Nagasawa et al., IEEE TAS, Vol.9, No. 2, p.3708, 1999].

Естественным развитием работ по созданию быстрых и функциональных джозефсоновских запоминающих устройств явились попытки создания компактных магнитных сверхпроводниковых элементов памяти, в которых хранение информации связано с различными направлениями устойчивой намагниченности ферромагнитного слоя. Известен прибор на основе джозефсоновского перехода (JP3190175, Yuzurihara et al., 20.08.1991), представляющий собой устройство с четырьмя токоподводами, в котором ток, задаваемый через одну из пар токоподводов, переводит в ферромагнитное состояние

имеющуюся внутри устройства пленку из антиферромагнитного вещества, не находящегося в области джозефсоновского контакта. Возникающий при этом магнитный момент создает магнитное поле, приводящее к подавлению критического тока джозефсоновского элемента, расположенного между двумя другими токоподводами

5 устройства, и к генерации на нем импульса напряжения.

С начала 2000-х годов начали развиваться работы по созданию компактных сверхпроводящих элементов памяти, в которых прикладываемые поля и токи управляют свойствами токового транспорта через гетероструктуру со сверхпроводящими (S) слоями (US 6233171 B1, Youm and Beasley, 15.05.2001).

10 Описан токовый вентиль, предназначенный для управления потоком электронов, имеющий многослойную структуру «сверхпроводник-нормальный металл(N)-сверхпроводник» и не использующий диэлектрические (I) барьерные слои (US 6995390, Tsukui, 07.02.2006). В другом изобретении описана конструкция, позволяющая осуществлять управление критическим током пятислойных двухбарьерных

15 джозефсоновских переходов, в которых расположенный внутри барьеров материал содержит ферромагнитную пленку, обеспечивающую зеемановское расщепления резонансных уровней электронов во внутрибарьерной области. Это необходимо для осуществления контроля величины критического тока структуры посредством управления положением расщепленных уровней относительно энергии Ферми

20 электродов напряжением, приложенным к дополнительным управляющим контактам структуры (US 6344659, Ivanov et al., 05.02.2002).

Известно устройство на джозефсоновском переходе (US 20090233798 A1, Maeda, 17.09.2009), которое состоит из сверхпроводящего слоя, размещенного на подложке, поверх которого через барьер изолятор нанесен слой ферромагнитного материала

25 (который может быть и электропроводным). Однако для всех перечисленных устройств характерен малый масштаб проникновения сверхпроводящих корреляций в магнитную область (или даже отсутствие таковой) и отсутствует возможность эффективного управления критическим током посредством слабого внешнего магнитного поля, что является критически важным недостатком для любого перспективного прототипа

30 элемента джозефсоновской памяти.

Известен сверхпроводниковый спиновый вентиль, включающий размещенную на подложке сверхпроводящую пленку и отделенную от последней слоем изолятора структуру, управляющую критической температурой T_C сверхпроводящей пленки.

Упомянутая структура состоит из двух слоев ферромагнитных (F) материалов, разделенных прослойкой неферромагнитного материала (US 6414870 B1, Johnson et al., 35 02.07.2002). Для реализации вентиль необходимо обеспечить в ферромагнитных пленках большие значения величины магнитных моментов: чтобы созданное этими моментами магнитное поле могло существенным образом изменять характеристики сверхпроводниковой пленки. Соответственно, для управления протекающим током

40 необходимо создавать большие магнитные поля перемангничивания, что является существенным недостатком данного решения.

С недавнего времени известны джозефсоновские переходы и спиновые вентили (RU 2343591, Карминская и др., 10.01.2009; RU 2439749, Карминская и др., 25.10.2010; RU 2442245, Карминская и др., 17.11.2010), в которых на подложке образована область

45 слабой связи в виде многослойной тонкопленочной FNF-структуры, связанной определенным образом с электродами из сверхпроводника S. Слои ферромагнитного материала выполнены с возможностью разворота векторов намагниченности друг относительно друга в плоскости слоистой структуры из антиферромагнитного в

ферромагнитное состояние. В таких магнитных джозефсоновских переходах/спиновых вентильях возможно более эффективное управление критическим током/критической температурой посредством внешнего магнитного поля за счет организации ряда независимых каналов токопереноса, однако характерное напряжение и, как следствие, характерная джозефсоновская частота здесь слишком малы для эффективного использования в качестве ячеек памяти.

Известен джозефсоновский вентиль на основе структур ферромагнетик-сверхпроводник-изолятор-ферромагнетик-сверхпроводник ($F_1SF'SF_2$) с использованием слабого ферромагнетика PdFe в качестве F'-слоя (US 20120302446 A3, Ryazanov et al., 26.01.2012). В таком вентиле можно ожидать возникновения триплетной компоненты сверхтока, слабо подавляемой обменным магнитным полем в гетероструктуре, причем критическим током такого устройства можно управлять, меняя взаимную ориентацию векторов намагниченности в слоях F_1 и F_2 . Недостатком такой структуры будет низкое характерное напряжение, а также малое изменение критического тока при изменении взаимной ориентации векторов намагниченности в слоях F_1 и F_2 .

Известна гетероструктура сверхпроводник-изолятор-ферромагнетик - сверхпроводник (SIFS) с использованием магнитно-мягких материалов (WO 2012103384, Ryazanov et al., 26.01.2011). Здесь приложение относительно малых полей позволяет заметно изменять величину критического тока перехода. Предложены и запатентованы ячейки памяти на основе такого магнитного джозефсоновского SIFS-перехода (US 0184445 A1, Mukhanov et al., 19.07.2012), а также системы памяти с произвольным доступом к ячейкам (US 8270209, Herr et al., 18.06.2012). Использование изолирующей прослойки увеличивает сопротивление джозефсоновского перехода R_N , однако расплатой за это является уменьшение критического тока I_C , и в результате характерная частота элемента $\sim I_C R_N$ остается сравнительно небольшой (1...2 ГГц). Малые значения характерных частот существенно ограничивают возможности применения запатентованных SIFS структур в качестве элементов быстрой джозефсоновской памяти. Кроме того, для существенного изменения величины критического тока необходимо, чтобы в процессе «Записи» эффективный магнитный поток через область слабой связи джозефсоновской структуры был достаточно велик (близок к одному кванту магнитного потока $\Phi_0 = h/2e$, h - постоянная Планка, e - элементарный заряд), что мешает уменьшать геометрические размеры SIFS-перехода.

Ближайшим аналогом является высокочастотный сверхпроводящий элемент памяти (RU 2554612, Куприянов и др., 27.12.2014), включающий образованную на подложке область слабой связи в виде тонкопленочной слоистой структуры, содержащей слой магнитного материала и слой сверхпроводящего материала между ними, два электрода из сверхпроводящего материала и токоподводы для подключения области слабой связи к источнику тока. Такой элемент обладает относительно высокой характерной частотой, однако абсолютная величина критического тока, равно как и абсолютная величина модуляции критического тока при переходе между устойчивыми состояниями, мала из-за наличия двух ферромагнитных слоев.

Общей проблемой известных реализаций магнитной сверхпроводящей памяти является ограниченная скорость записи информации. Для ее осуществления необходим процесс перемагничивания по крайней мере одной из имеющихся в структурах ферромагнитных пленок. В силу этого время записи принципиально ограничено четвертью периода прецессии магнитного момента в ферромагнетике, что, как правило, более чем на два порядка медленнее характерного времени переключения

джозефсоновских элементов в логических цепях. Эта существенная разница характерных времен не позволяет напрямую использовать вырабатываемые логическими элементами информационные импульсы для управления элементами памяти. Таким образом, в то время как характерная длительность процесса считывания информации определяется

5 обратной джозефсоновской частотой, процесс записи требует поворота намагниченности в некоторой области, что занимает не менее нескольких наносекунд.

Раскрытие изобретения

Патентуемое изобретение лишено указанных недостатков и позволяет реализовать переключение между состояниями с существенно различными значениями критического

10 тока I_C джозефсоновской гетероструктуры (ДГС), обладающей высокой характерной частотой, причем не требует перемагничивания ферромагнитного слоя для записи состояний.

Заявляемый джозефсоновский фазовый доменный вентиль (прибор) включает два расположенных друг под другом электрода из сверхпроводящего материала с

15 токоподводами и область слабой связи между ними в виде тонкопленочной слоистой структуры, содержащей: тонкий промежуточный слой сверхпроводящего материала с дополнительными токоподводами, отделенный от нижнего сверхпроводящего электрода слоем диэлектрика; нанесенной на часть сверхпроводящего слоя слой нормального

20 металла; слой магнитного материала, нанесенный на оставшуюся не закрытой слоем нормального металла поверхность тонкого промежуточного слоя сверхпроводящего материала.

Отличие от известных ранее джозефсоновских SFS структур состоит в том, что при протекании тока в тонком промежуточном слое сверхпроводящего материала происходит формирование двух сверхпроводящих фазовых доменов, разделенных

25 областью материала, перешедшего в нормальное состояние (доменной стенкой). Это явление возникает за счет обратного эффекта близости при внесении упомянутого тонкого слоя сверхпроводящего материала с дополнительными токоподводами в пространственно-неоднородную область слабой связи джозефсоновского контакта, содержащую слой магнитного материала и нормального металла. Двум состояниям

30 вентиля соответствует (i) отсутствие и (ii) наличие доменной стенки в тонком промежуточном слое сверхпроводящего материала.

Прибор может характеризоваться тем, что нижний сверхпроводящий электрод нанесен на подложку, а слой магнитного материала и слой нормального металла, промежуточный слой сверхпроводящего материала, слой изолятора, верхний

35 сверхпроводящий электрод в указанной последовательности нанесены поверх него. Также прибор может характеризоваться тем, что в указанной топологии слой нормального металла заменен слоем магнитного материала меньшей толщины. Также прибор может характеризоваться тем, что слой изолятора, промежуточный

40 сверхпроводящий слой, слой магнитного материала и слой нормального металла, а также верхний сверхпроводящий электрод в указанной последовательности нанесены поверх нижнего сверхпроводящего электрода.

Прибор может характеризоваться и тем, что в качестве сверхпроводника использован ниобий или сплав на его основе, в качестве нормального металла - элемент из группы Cu, Au, Al, Pt, а для создания слоя магнитного материала использован Fe, Ni, Co,

45 пермалой или магнитно-мягкие ферромагнитные сплавы на основе этих материалов: Pd_xFe_{1-x} , Pd_xNi_{1-x} , Pd_xCo_{1-x} , Pt_xFe_{1-x} , Pt_xNi_{1-x} , Pt_xCo_{1-x} с содержанием ферромагнитных металлов менее 10 атомных процентов.

Прибор может характеризоваться и тем, что в качестве магнитных слоев

используются слои диэлектрика, например, аморфного кремния, легированные либо только магнитными атомами, Fe, Co, Ni, либо атомами магнитных и немагнитных, Nb, W металлов.

Кроме того, возможен вариант осуществления прибора, в котором граница между
5 слоем нормального металла и слоем магнитного материала образует с поверхностью промежуточного слоя сверхпроводящего материала угол, величина которого лежит в диапазоне от 10° до 90° ; слой нормального металла занимает от 30 до 60 процентов поверхности промежуточного слоя сверхпроводящего материала.

Технический результат изобретения состоит в создании возможности переключения
10 между устойчивыми состояниями вентиля без изменения намагниченности в слое магнитного материала, что обеспечивает достаточно малое время на реализацию операции записи. Дополнительный технический результат состоит в увеличении изменения амплитуды критического тока перехода под действием малого тока по сравнению с предыдущими геометриями, что открывает возможности для
15 миниатюризации сверхпроводящих элементов памяти. Дополнительный технический результат состоит в возможности использовать только один слой магнитного материала для реализации элемента памяти с двумя устойчивыми состояниями, что существенно упрощает технологию его изготовления. Дополнительный технический результат изобретения состоит в возможности обеспечить достаточно высокую характерную
20 частоту джозефсоновской гетероструктуры и, как следствие, достаточно малое время считывания состояния для элемента памяти на ее основе.

Краткое описание чертежей

Существо изобретения поясняется на чертежах, где: на фиг. 1, фиг. 2 представлено два варианта осуществления изобретения - структуры ДГС с одним магнитным слоем,
25 одним слоем нормального металла, одним тонким промежуточным слоем сверхпроводящего материала и одним слоем изолятора между сверхпроводящими электродами в пленарной топологии; на фиг. 3 представлена зависимость энергии джозефсоновского тока в системе, нормированной на характерную джозефсоновскую энергию для области между сверхпроводящим электродом и тонким промежуточным
30 слоем сверхпроводящего материала, E_{JF}, от величины тока, пропускаемого при реализации операции записи между сверхпроводящим электродом и токоподводом в s-слое, локализованным рядом со слоем нормального металла (кривая 13); рядом со слоем магнитного материала (кривая 15) для состояния с доменной стенкой в указанном промежуточном слое сверхпроводящего материала (кривые 13 и 15) и без таковой
35 (кривая 14, в данном случае выбор токоподводов к s-слою не имеет значения); величина пропускаемого тока нормирована на абсолютное значение критического тока области между сверхпроводящим электродом и тонким промежуточным слоем сверхпроводящего материала при локализации токоподвода к s-слою вблизи области магнитного материала, I_{CF}.

Осуществление изобретения

Заявляемое устройство с толщиной тонкого промежуточного слоя сверхпроводящего материала (s-слоя) в диапазоне от 20 до 60 нм может быть использовано в качестве управляющего элемента ячейки памяти, если величина критического тока области
45 между сверхпроводящим электродом и тонким промежуточным слоем сверхпроводящего материала при локализации токоподвода к s-слою вблизи области магнитного материала, I_{CF}, меньше нуля. Для записи состояния с доменной стенкой в тонком промежуточном слое сверхпроводящего материала необходимо инжектировать ток между упомянутым выше s-слоем и сверхпроводящим электродом, используя токоподвод

к s-слою, локализованный рядом со слоем нормального металла. Для записи состояния без доменной стенки в тонком промежуточном слое сверхпроводящего материала необходимо инжектировать ток между упомянутым выше промежуточным слоем и сверхпроводящим электродом, используя токоподвод к s-слою, локализованный рядом со слоем магнитного материала.

Неразрушающее считывание может быть реализовано инъекцией тока между двумя сверхпроводящими электродами. В этом случае область слабой связи локализована на туннельном барьере, который и определяет критический ток при считывании. В случае отсутствия доменов в промежуточном s-слое плотность тока через туннельный барьер распределена равномерно. В случае существования доменов в s-слое ток через разные части туннельного барьера, взаимодействующие со слоем магнитного материала и слоем нормального металла, течет в разные стороны, что приводит к уменьшению полного критического тока.

Важным преимуществом такого подхода к организации памяти является то, что он не требует приложения внешних полей или инъекции сильного спин-поляризованного тока. Все процессы управляются джозефсоновскими токами, а переключение происходит на характерных временах, определяемых характеристиками сверхпроводящего материала.

Джозефсоновская гетероструктура для джозефсоновского фазового доменного вентиля, выполненная в пленарной геометрии (фиг. 1, фиг. 2), образована на подложке 1 и содержит многослойную тонкопленочную структуру, состоящую из нижнего сверхпроводящего слоя 2 (нижнего сверхпроводящего электрода) S; слоя 3 изолятора I; тонкого промежуточного слоя 4 сверхпроводящего материала s толщиной d_s ; единственного слоя 6 магнитного материала F толщиной d_F ; слоя 5 нормального металла, имеющего границу 8 с магнитным слоем 6; токоподводов 9 и 12 для подключения сверхпроводящих электродов к источнику тока; токоподводов 10 и 11 для подключения области слабой связи к источнику тока. Слой магнитного материала 6 занимает от 30 до 70 процентов от поверхности промежуточного слоя сверхпроводящего материала (для топологии, предусматривающей нанесения слоя нормального металла) либо же всю поверхность промежуточного слоя сверхпроводящего материала (для топологии, предусматривающей нанесения слоя магнитного материала переменной толщины).

Толщины слоев магнитного материала 6 (Fe , Co , Ni , $\text{Pd}_x\text{Fe}_{1-x}$, $\text{Pd}_x\text{Ni}_{1-x}$, $\text{Pd}_x\text{Co}_{1-x}$, $\text{Pt}_x\text{Fe}_{1-x}$, $\text{Pt}_x\text{Ni}_{1-x}$, $\text{Pt}_x\text{Co}_{1-x}$) и нормального металла 5 (элемент из группы Cu , Au , Al , Pt) лежат в диапазоне от 1 до 20 нм, причем критического тока области между сверхпроводящим электродом и тонким промежуточным слоем сверхпроводящего материала при локализации токоподвода к s-слою вблизи области магнитного материала, I_{CF} , меньше нуля. Толщина тонкого промежуточного слоя сверхпроводящего материала 4 лежит в диапазоне от 20 до 60 нм, что обеспечивает возможность формирования двух сверхпроводящих фазовых доменов, разделенных областью материала, перешедшего в нормальное состояние (доменной стенкой). В качестве материала для сверхпроводящих электродов 2 и 7 и промежуточного слоя 4 могут быть использованы такие материалы, как ниобий, нитрид ниобия, ванадий, индий, олово, свинец и сплавы на их основе. В качестве сверхпроводника также может быть использовано соединение редкоземельных купратов общей формулы $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, где Re - редкоземельный металл (например, иттрий Y). Тогда в качестве магнитного материала может быть использованы слои легированных двухвалентными элементами

оксидов переходных металлов типа $Ri_{1-x}A_xMnO_3$ (например, манганиты).

На фиг. 3 представлена зависимость энергии джозефсоновского тока в системе, нормированной на критическую энергию области между сверхпроводящим электродом и тонким промежуточным слоем сверхпроводящего материала, E_J , от величины тока, пропускаемого при реализации операции записи между сверхпроводящим электродом и токоподводом в s-слое. При достижении критического тока система перейдет в наиболее энергетически выгодное состояние, в котором и останется после выключения инжектируемого тока. Показано, что без доменных стенок в s-слое энергия от выбора токоподводов (10) или (11) к указанному тонкому промежуточному слою сверхпроводящего материала не зависит. Критический ток всей ДГС при использовании токоподводов (9) и (12) определяет разница между абсолютными величинами критического тока области между сверхпроводящим электродом и тонким промежуточным слоем сверхпроводящего материала при локализации токоподвода к s-слою (10) вблизи области магнитного материала, I_{CF} , и области между сверхпроводящим электродом и тонким промежуточным слоем сверхпроводящего материала при локализации токоподвода (11) к s-слою вблизи области нормального металла (или заменяющего его слоя магнитного материала меньшей толщины), I_{CN} . Показано, что при наличии доменных стенок в s-слое энергия системы при локализации токоподвода (10) к указанному тонкому промежуточному слою сверхпроводящего материала вблизи слоя магнитного материала всегда максимальна, и такой выбор задания токов всегда переводит вентиль в состояние с отсутствием доменной стенки в тонком промежуточном слое сверхпроводящего материала. Показано, что при наличии доменных стенок в s-слое энергия системы при локализации токоподвода (11) к указанному тонкому промежуточному слою сверхпроводящего материала вблизи слоя нормального металла всегда минимальна, и такой выбор задания токов всегда переводит вентиль в состояние с наличием доменной стенки в тонком промежуточном слое сверхпроводящего материала. Критический ток всей ДГС определяет разница между абсолютными величинами I_{CN} и критического тока доменной стенки, I_{CD} , причем в данном случае критический ток ДГС будет больше, чем в случае, когда доменная стенка в s-слое отсутствовала, что позволит реализовать операцию считывания при использовании токоподводов (9) и (12). Для достаточно больших толщин s-слоя (более чем в четыре раза превосходящих длину когерентности в используемом сверхпроводящем материале) доменная стенка не возникает.

Сказанное выше позволяет использовать заявляемую структуру как управляющий элемент высокочастотной сверхпроводящей памяти.

Для реализации заявляемого устройства могут быть использованы материалы, применяемые в криоэлектронной технике и известные специалистам. В качестве подложки 1 могут быть использованы любые стандартные подложки (кремний, сапфир и пр.). В качестве слоя магнитного материала 5 - Ni, Co, Fe и магнитно-мягкие сплавы на их основе: Pt_xFe_{1-x} , Pt_xNi_{1-x} , Pt_xCo_{1-x} , Pd_xFe_{1-x} , Pd_xNi_{1-x} ; в качестве слоя магнитного материала могут использоваться также диэлектрики, например аморфный кремний, легированные магнитными атомами Fe, Co, Ni. В качестве материала для сверхпроводящих электродов 2 и 7 - ниобий, нитрид ниобия, ванадий, индий, олово, свинец, либо высокотемпературные сверхпроводники на основе редкоземельных купратов общей формулы $ReBa_2Cu_3O_{7-x}$, где Re - редкоземельный металл, или других оксидов (см., например, US 6011981, Alvarez et al., 04.01.2000), для которых известна технология нанесения слоев на подложки. Слой изолятора может быть создан за счет

полного или частичного окисления слоя алюминия, толщина которого лежит в диапазоне от 1 до 20 нм. Типичные толщины слоев магнитного материала и нормального металла для заявляемой топологии находятся в диапазоне технологически осуществимых для тонкопленочной электроники.

5

(57) Формула изобретения

1. Джозефсоновский фазовый доменный вентиль, включающий два расположенных на подложке друг под другом сверхпроводящих электрода с токоподводами и область слабой связи между ними в виде тонкопленочной слоистой структуры, содержащей:

10

- промежуточный слой сверхпроводящего материала с токоподводами, толщина которого лежит в диапазоне от 20 до 60 нм, отделенный от нижнего сверхпроводящего электрода слоем изолятора;

- нанесенный на часть тонкого промежуточного слоя сверхпроводящего материала слой нормального металла, толщина которого лежит в диапазоне от 1 до 20 нм;

15

- слой магнитного материала, нанесенный на оставшуюся не закрытой слоем нормального металла поверхность тонкого промежуточного слоя сверхпроводящего материала, толщина которого лежит в диапазоне от 1 до 20 нм.

2. Вентиль по п. 1, характеризующийся тем, что в качестве материала промежуточного слоя из сверхпроводящего материала, нижнего и верхнего сверхпроводящих электродов использован ниобий или сплав на его основе.

20

3. Вентиль по п. 1, характеризующийся тем, что в качестве материала промежуточного слоя из сверхпроводящего материала, нижнего и верхнего сверхпроводящих электродов использовано соединение редкоземельных купратов общей формулы $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, где Re - редкоземельный металл.

25

4. Вентиль по п. 1, характеризующийся тем, что в качестве магнитного материала использован магнитно-мягкий ферромагнетик, например сплавы $\text{Pd}_x\text{Fe}_{1-x}$, $\text{Pd}_x\text{Ni}_{1-x}$, $\text{Pd}_x\text{Co}_{1-x}$, $\text{Pt}_x\text{Fe}_{1-x}$, $\text{Pt}_x\text{Ni}_{1-x}$, $\text{Pt}_x\text{Co}_{1-x}$ с содержанием ферромагнитных металлов менее 10 атомных процентов.

30

5. Вентиль по п. 1, характеризующийся тем, что в качестве магнитного материала использован слой диэлектрика, например аморфного кремния, легированный магнитными атомами Fe, Co, Ni.

6. Вентиль по п. 1, характеризующийся тем, что в качестве магнитного материала использован слой легированного двухвалентными элементами оксидов переходных металлов типа $\text{R}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ (где R - La, Pr, Nd и др., A - Sr, Ca, Bg и др.).

35

7. Вентиль по п. 1, характеризующийся тем, что в качестве нормального металла использован элемент из группы Cu, Au, Al, Pt.

8. Вентиль по п. 1, характеризующийся тем, что в качестве изолятора использован слой полностью или частично окисленного алюминия, толщина которого лежит в диапазоне от 1 до 20 нм.

40

9. Вентиль по п. 1, характеризующийся тем, что граница между слоем нормального металла и слоем магнитного материала образует с поверхностью промежуточного слоя сверхпроводящего материала угол, величина которого лежит в диапазоне от 10° до 90° .

45

10. Вентиль по п. 1, характеризующийся тем, что слой нормального металла занимает от 30 до 60 процентов поверхности промежуточного слоя сверхпроводящего материала.

11. Джозефсоновский фазовый доменный вентиль, включающий два расположенных на подложке друг под другом сверхпроводящих электрода с токоподводами и область слабой связи между ними в виде тонкопленочной слоистой структуры, содержащей:

нанесенный на часть нижнего сверхпроводящего электрода слой нормального металла, толщина которого лежит в диапазоне от 1 до 20 нм;

слой магнитного материала, толщина которого лежит в диапазоне от 1 до 20 нм, нанесенный на оставшуюся не закрытой слоем нормального металла поверхность нижнего сверхпроводящего электрода,

промежуточный слой сверхпроводящего материала с токоподводами, толщина которого лежит в диапазоне от 20 до 60 нм, отделенный от верхнего сверхпроводящего электрода слоем изолятора.

12. Вентиль по п. 11, характеризующийся тем, что в качестве материала промежуточного слоя из сверхпроводящего материала, нижнего и верхнего сверхпроводящих электродов использован ниобий или сплав на его основе.

13. Вентиль по п. 11, характеризующийся тем, что в качестве материала промежуточного слоя из сверхпроводящего материала, нижнего и верхнего сверхпроводящих электродов использовано соединение редкоземельных купратов общей формулы $\text{ReBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$, где Re - редкоземельный металл.

14. Вентиль по п. 11, характеризующийся тем, что в качестве магнитного материала использован магнитно-мягкий ферромагнетик, например сплавы $\text{Pd}_x\text{Fe}_{1-x}$, $\text{Pd}_x\text{Ni}_{1-x}$, $\text{Pd}_x\text{Co}_{1-x}$, $\text{Pt}_x\text{Fe}_{1-x}$, $\text{Pt}_x\text{Ni}_{1-x}$, $\text{Pt}_x\text{Co}_{1-x}$ с содержанием ферромагнитных металлов менее 10 атомных процентов.

15. Вентиль по п. 11, характеризующийся тем, что в качестве магнитного материала использован слой диэлектрика, например аморфного кремния, легированный магнитными атомами Fe, Co, Ni.

16. Вентиль по п. 11, характеризующийся тем, что в качестве магнитного материала использован слой легированного двухвалентными элементами оксидов переходных металлов типа $\text{R}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ (где R - La, Pr, Nd и др., A - Sr, Ca, Ba и др.).

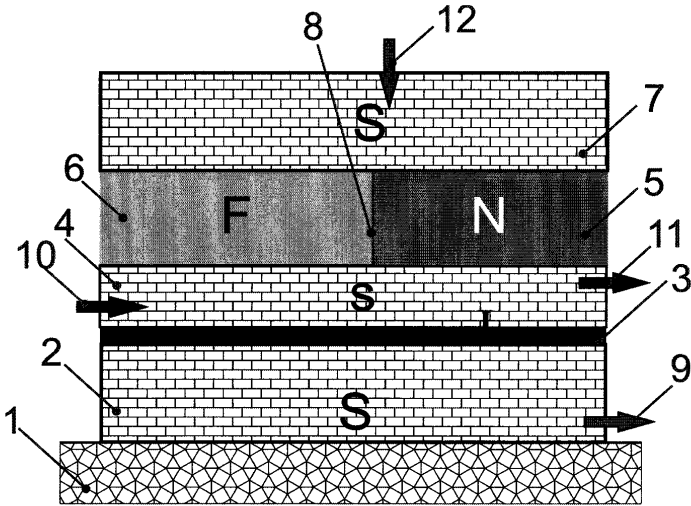
17. Вентиль по п. 11, характеризующийся тем, что в качестве нормального металла использован элемент из группы Cu, Au, Al, Pt.

18. Вентиль по п. 11, характеризующийся тем, что в качестве изолятора использован слой полностью или частично окисленного алюминия, толщина которого лежит в диапазоне от 1 до 20 нм.

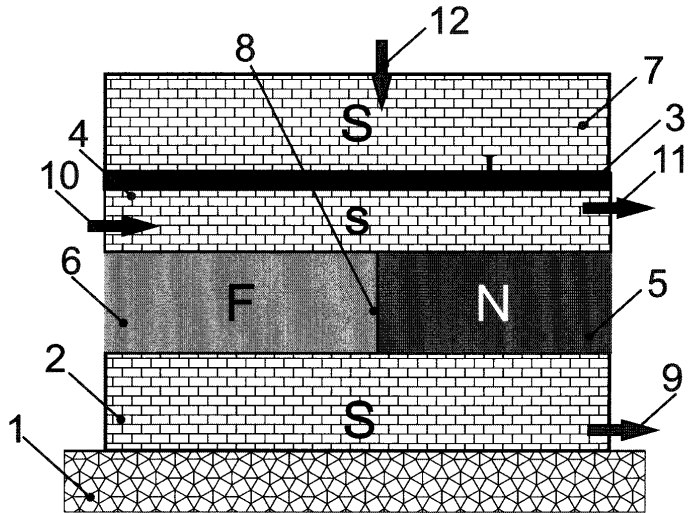
19. Вентиль по п. 11, характеризующийся тем, что граница между слоем нормального металла и слоем магнитного материала образует с поверхностью нижнего сверхпроводящего электрода угол, величина которого лежит в диапазоне от 10° до 90° .

20. Вентиль по п. 11, характеризующийся тем, что слой нормального металла занимает от 30 до 60 процентов поверхности нижнего сверхпроводящего электрода.

ДЖОЗЕФСОНОВСКИЙ ФАЗОВЫЙ
ДОМЕННЫЙ ВЕНТИЛЬ (ВАРИАНТЫ)

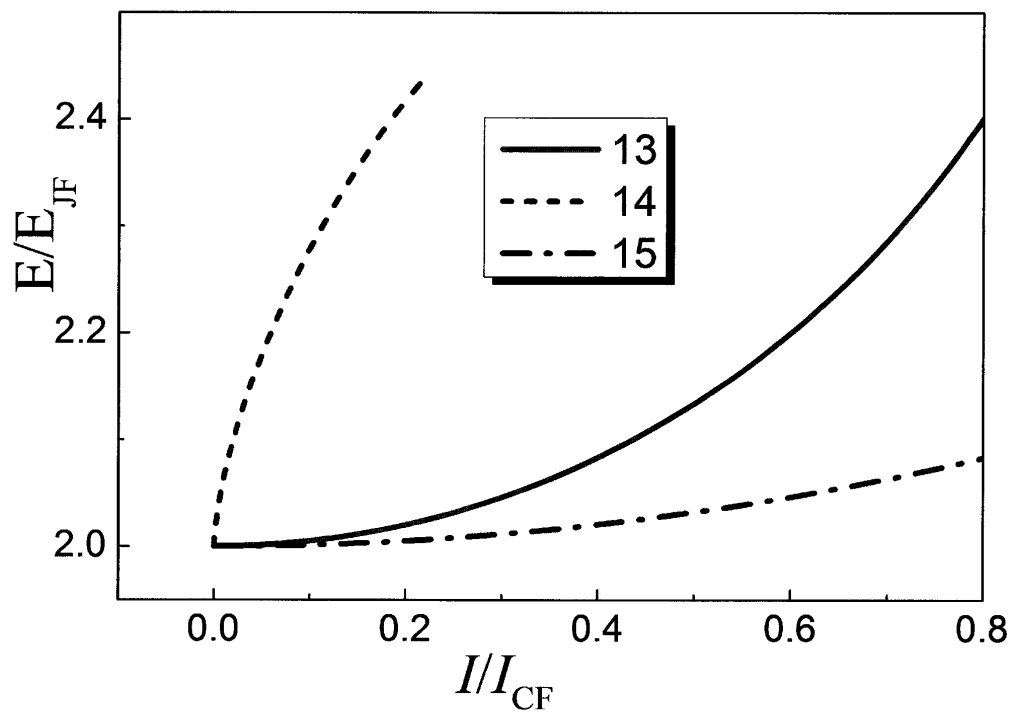


ФИГ. 1



ФИГ. 2

ДЖОЗЕФСОНОВСКИЙ ФАЗОВЫЙ
ДОМЕННЫЙ ВЕНТИЛЬ (ВАРИАНТЫ)



ФИГ. 3