



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01J 11/00 (2022.08)

(21)(22) Заявка: 2022115827, 10.06.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
10.06.2022

Дата регистрации:
29.05.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 10.06.2022

(45) Опубликовано: 29.05.2023 Бюл. № 16

Адрес для переписки:

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

(72) Автор(ы):

Степанов Илья Александрович (RU),
Бабурин Александр Сергеевич (RU),
Родионов Илья Анатольевич (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)

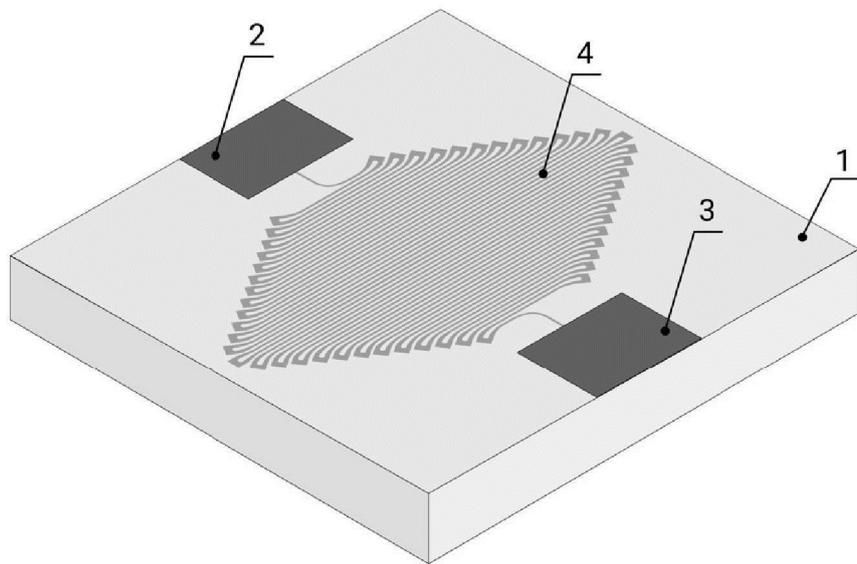
(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2609729 C1, 02.02.2017. RU
2015146821 A, 17.05.2017. CN 102620820 A,
01.08.2012. US 2014299751 A1, 09.10.2014.

(54) Сверхпроводниковый однофотонный детектор

(57) Реферат:

Изобретение относится к области устройств для регистрации видимого и инфракрасного диапазонов излучения в режиме счета отдельных фотонов. Сущность изобретения заключается в том, что центральный участок 5 нанопровода из сверхпроводящего материала 4 имеет наибольшую длину, остальные участки 6 по обе стороны от центрального участка 5 имеют длину, уменьшающуюся по мере отдаления от центрального участка 5, при этом первые зоны поворота 7 на концах центрального участка 5 имеют ширину А, превышающую ширину В центрального участка 5, а радиус поворота R центрального участка 5 превышает половину

расстояния Р между соседними участками, при этом вторые зоны поворота 8 на концах остальных участков 6 расположены под углом α к центральному участку 5, причем вторые зоны поворота 8 на концах остальных участков 6 имеют ширину А, превышающую ширину В остальных участков 6, а радиусы поворота R каждых из остальных участков 6 превышают половину расстояния Р между остальными участками 6. Технический результат изобретения заключается в уменьшении темновых отсчетов на поворотах чувствительного элемента. 7 з.п. ф-лы, 9 ил.



Фиг. 1

RU 2796914 C1 416914 C1

RU 2796914 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01J 11/00 (2022.08)

(21)(22) Application: **2022115827, 10.06.2022**

(24) Effective date for property rights:
10.06.2022

Registration date:
29.05.2023

Priority:

(22) Date of filing: **10.06.2022**

(45) Date of publication: **29.05.2023** Bull. № 16

Mail address:

**105005, Moskva, ul. 2-ya Baumanskaya, 5, str. 1,
MGTU im. N.E. Baumana, TSIS dlya Amelinoj
K.E., Amelina Kseniya Evgenevna**

(72) Inventor(s):

**Stepanov Ilia Aleksandrovich (RU),
Baburin Aleksandr Sergeevich (RU),
Rodionov Ilia Anatolevich (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) **SUPERCONDUCTOR SINGLE PHOTON DETECTOR**

(57) Abstract:

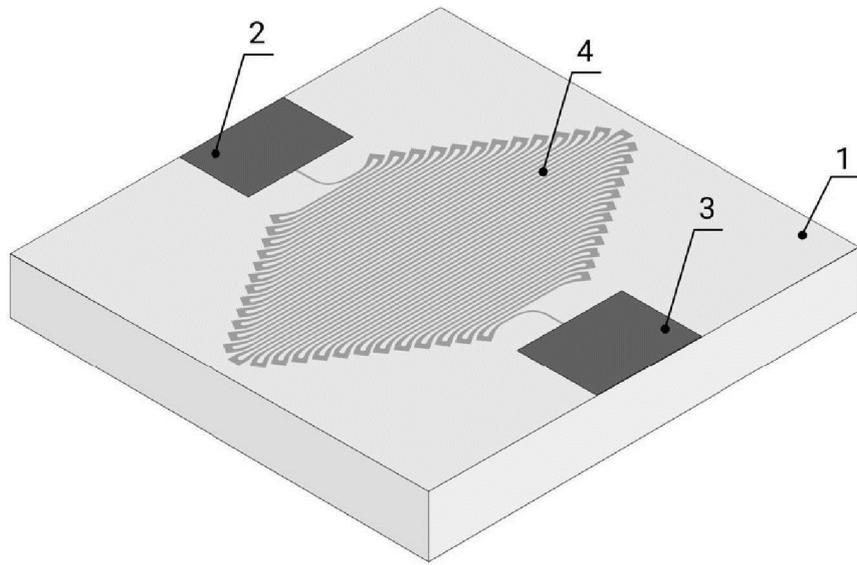
FIELD: visible and infrared ranges of radiation.

SUBSTANCE: devices for recording visible and infrared ranges of radiation counting individual photons. Essence of the invention lies in the fact that central section 5 of the nanowire made of superconducting material 4 is the longest, remaining sections 6 on both sides of central section 5 have a length decreasing with distance from central section 5, while first rotation zones 7 at the ends of central section 5 have width A exceeding width B of central section 5, and turning radius R of central section 5 exceeds half the distance

P between adjacent sections, while second turning zones 8 at the ends of remaining sections 6 are located at an angle α to central section 5, and second turning zones 8 at the ends of remaining sections 6 have width A exceeding width B of remaining sections 6, and turning radius R of each of remaining sections 6 exceed half of distance P between remaining sections 6.

EFFECT: reduction of dark readings at the turns of the sensor element.

8 cl, 9 dwg



Фиг. 1

RU 2796914 C1 416914 C1

RU 2796914 C1

Изобретение относится к области устройств для регистрации видимого и инфракрасного диапазонов излучения в режиме счета отдельных фотонов и может быть использовано в телекоммуникационных технологиях, системах оптической связи, системах квантовой криптографии, медицине, астрономии.

5 Как правило, нанопровод сверхпроводникового однофотонного детектора формируется в виде меандра, конструкция которого подразумевает повороты на 180° в конце каждого прямого участка. Изгибы и повороты нанопровода являются областями с повышенной плотностью тока, и для того, чтобы вывести нанопровод из
10 сверхпроводящего состояния на повороте, требуется плотность тока смещения меньшая, чем плотность тока, требуемая для вывода из сверхпроводящего состояния на прямом участке. Данное явление называется эффектом скопления тока. Таким образом, плотность тока, выводящая нанопровод из сверхпроводящего состояния на повороте, в таком нанопроводе будет являться плотностью критического тока. Наличие областей с повышенной плотностью тока уменьшает максимальную величину тока смещения,
15 который может подаваться через нанопровод в сверхпроводящем состоянии, и для прямого участка, на котором происходит детектирование фотона, может быть невозможно добиться плотности тока смещения, достаточной для достижения высокого значения внутренней эффективности. Кроме того, при увеличении плотности тока на повороте увеличивается число темновых отсчетов детектора. Это явление связано с
20 тем, что увеличение плотности тока смещения ведёт к уменьшению энергетического барьера на вход вихрей в нанопровод, что может привести к срабатыванию детектора в отсутствие фотона. Таким образом, для достижения высокой квантовой эффективности необходима подача высокого тока смещения через нанопровод, однако из-за эффекта скопления тока на поворотах при увеличении тока смещения увеличивается число
25 темновых отсчетов детектора.

Известен сверхпроводниковый однофотонный детектор с изогнутой фрактальной структурой нанопровода. Фрактальная структура нанопровода обеспечивает увеличение поляризационной нечувствительности детектора, причем повороты нанопровода с
30 увеличенным радиусом ослабляют эффект скопления тока в изгибах. Недостатками предлагаемой топологии являются накладываемое геометрической формой нанопровода ограничение радиуса и площади поперечного сечения поворота, не позволяющее добиться существенного ослабления эффекта скопления тока, и ограничивающий эффективность поглощения детектора низкий коэффициент заполнения f , определяемый по формуле $f = w / (w + p)$, где w – ширина полосы, p – расстояние между соседними
35 полосами [Патент CN112345092A, МПК G01J11/00, опубл. 09.02.2021].

Известно об использовании топологии нанопровода сверхпроводникового однофотонного детектора в виде однозаходной и двухзаходной спиралей. Предлагаемые топологии обеспечивают плотное заполнение нанопроводом области детектора, к
40 которой подводится оптоволокно, а также большие радиусы кривизны поворотов и отсутствие острых углов, что ослабляет эффект скопления тока. К недостаткам предлагаемых конструкций относится наличие в центре топологии области с пониженной способностью к детектированию (контактная площадка для однозаходной и соединение витков для двухзаходной спирали), которая снижает внутреннюю эффективность при
45 позиционировании оптоволокна в центр активной области детектора. Недостатком однозаходной спирали является также сложность изготовления, обусловленная наличием контактной площадки в центре, для контакта к которой необходимы дополнительные изолирующий и контактный слои [Charaev I. et al. Current dependence of the hot-spot response spectrum of superconducting single-photon detectors with different layouts //Superconductor

Science and Technology. – 2016. – Т. 30. – №. 2. – С. 025016].

Известен сверхпроводниковый однофотонный детектор, нанопровод которого выполнен с переменной толщиной, где для уменьшения плотности тока на поворотах меандра была увеличена их толщина. Предлагаемая конструкция, идентичная стандартному меандру, обеспечивает плотное заполнение нанопроводом области детектора, к которой подводится оптоволокно, а также уменьшение плотности тока на поворотах за счет увеличения их площади поперечного сечения путем утолщения, что ослабляет эффект скопления тока. Недостаток этого устройства заключается в сложности изготовления, обусловленной необходимостью осуществлять травление ультратонкой пленки, что может привести к низкой воспроизводимости технологии [Baghdadi R. et al. Enhancing the performance of superconducting nanowire-based detectors with high-filling factor by using variable thickness //Superconductor Science and Technology. – 2021. – Т. 34. – №. 3. – С. 035010].

Известен сверхпроводниковый однофотонный детектор, включающий подложку, первую контактную площадку, вторую контактную площадку и соединенный с ними нанопровод из сверхпроводящего материала, расположенные на подложке, при этом нанопровод из сверхпроводящего материала выполнен в виде параллельных друг другу участков с зонами поворота [Патент США №7049593, H01L 39/00 (20060101), опубл. 10.03.2005]. Это устройство выбрано в качестве прототипа предложенного решения.

Недостаток этого устройства заключается в наличии областей с повышенной плотностью тока на поворотах нанопровода, что уменьшает максимальную величину тока смещения, который может подаваться через нанопровод в сверхпроводящем состоянии, из-за чего для прямого участка, на котором происходит детектирование фотона, может быть невозможно добиться плотности тока смещения достаточной для достижения высокого значения внутренней эффективности, а также является причиной темновых отсчетов.

Технический результат изобретения заключается в уменьшении темновых отсчетов, связанных с повышенной плотностью тока на поворотах чувствительного элемента, увеличение диапазона токов и квантовой эффективности без усложнения технической реализации устройства.

Сущность изобретения и достижение указанного технического результата заключается в том, что в сверхпроводниковом однофотонном детекторе, включающем подложку, первую контактную площадку, вторую контактную площадку и соединенный с ними нанопровод из сверхпроводящего материала, расположенные на подложке, при этом нанопровод из сверхпроводящего материала выполнен в виде параллельных друг другу участков с зонами поворота, центральный участок нанопровода из сверхпроводящего материала имеет наибольшую длину, остальные участки по обе стороны от центрального участка имеют длину, уменьшающуюся по мере отдаления от центрального участка, при этом первые зоны поворота на концах центрального участка имеют ширину A , превышающую ширину B центрального участка, а радиус поворота R центрального участка превышает половину расстояния P между соседними участками, при этом вторые зоны поворота на концах остальных участков расположены под углом α к центральному участку, причем вторые зоны поворота на концах остальных участков имеют ширину A , превышающую ширину B остальных участков, а радиусы поворота R каждого остальных участков превышают половину расстояния P между остальными участками.

Существует вариант, в котором центры первых зон поворота и центры вторых зон поворота имеют ширину C , превышающую ширину A .

Существует также вариант, в котором внешние углы каждой первой зоны поворота и каждой второй зоны поворота выполнены со скруглением.

Существует также вариант, в котором внутренний контур каждой первой зоны поворота и каждой второй зоны поворота выполнен в виде выпуклой кривой, где расстояние R_1 между началом и концом кривой превышает расстояние R между соседними участками.

Существует также вариант, в котором между подложкой и нанопроводом из сверхпроводящего материала расположен распределенный брэгговский отражатель.

Существует также вариант, в котором над нанопроводом из сверхпроводящего материала расположен распределенный брэгговский отражатель.

Существует также вариант, в котором между подложкой и нанопроводом из сверхпроводящего материала расположен четвертьволновый резонатор.

Существует также вариант, в котором в зоне нанопровода из сверхпроводящего материала удален слой подложки.

На фиг. 1 изображен сверхпроводниковый однофотонный детектор (аксонометрическая проекция).

На фиг. 2 изображен сверхпроводниковый однофотонный детектор (вид сверху).

На фиг. 3 изображен фрагмент первых зон поворота и вторых зон поворота сверхпроводникового однофотонного детектора.

На фиг. 4 изображен фрагмент первых зон поворота и вторых зон поворота сверхпроводникового однофотонного детектора со скругленными углами каждого поворота.

На фиг. 5 изображен фрагмент первых зон поворота и вторых зон поворота сверхпроводникового однофотонного детектора с внутренним контуром каждого поворота в виде выпуклой кривой.

На фиг. 6 изображено сечение сверхпроводникового однофотонного детектора с внутренним брэгговским отражателем.

На фиг. 7 изображено сечение сверхпроводникового однофотонного детектора с внешним брэгговским отражателем.

На фиг. 8 изображено сечение сверхпроводникового однофотонного детектора с четвертьволновым резонатором.

На фиг. 9 изображено сечение сверхпроводникового однофотонного детектора с удаленным слоем подложки в зоне нанопровода из сверхпроводящего материала.

Сверхпроводниковый однофотонный детектор включает подложку 1 (фиг. 1, фиг. 2), первую контактную площадку 2, вторую контактную площадку 3 и соединенный с ними нанопровод из сверхпроводящего материала 4, расположенные на подложке 1. В качестве материала подложки 1 можно использовать кремний, сапфир, диоксид кремния, нитрид кремния, оксид магния. В качестве сверхпроводящего материала можно использовать NbN, NbTiN, WSi, MoSi, TaN, NbSi, MoGe. Нанопровод из сверхпроводящего материала 4 выполнен в виде параллельных друг другу участков с зонами поворота. Центральный участок 5 нанопровода из сверхпроводящего материала 4 имеет наибольшую длину, остальные участки 6 по обе стороны от центрального участка 5 имеют длину, уменьшающуюся по мере отдаления от центрального участка 5. Длина центрального участка 5 может быть в диапазоне от 5 до 100 мкм. Первые зоны поворота 7 (фиг. 3) на концах центрального участка 5 имеют ширину A , превышающую ширину B центрального участка 5. Ширина A может быть в диапазоне от 25 нм до 6 мкм. Ширина B может быть в диапазоне от 20 нм до 3 мкм. Радиус поворота R центрального участка 5 превышает половину расстояния P между соседними

участками. R может быть в диапазоне от 15 нм до 6 мкм. P может быть в диапазоне от 20 нм до 3 мкм. Вторые зоны поворота 8 на концах остальных участков 6 расположены под углом α к центральному участку 5. Угол α может быть в диапазоне от 10 до 90°. Вторые зоны поворота 8 на концах остальных участков 6 имеют ширину А, превышающую ширину В остальных участков 6. Радиусы поворота R каждых остальных участков 6 превышают половину расстояния P между остальными участками 6.

Существует вариант, в котором центры первых зон поворота 7 и центры вторых зон поворота 8 имеют ширину С, превышающую ширину А. Ширина С может быть в диапазоне от 30 нм до 3 мкм.

Существует также вариант, в котором внешние углы каждой первой зоны поворота 7 и каждой второй зоны поворота 8 выполнены со скруглением 9 (фиг. 4), радиус которого может быть в диапазоне от 10 нм до 1,5 мкм.

Существует также вариант, в котором внутренний контур каждой первой зоны поворота 7 и каждой второй зоны поворота 8 выполнен в виде выпуклой кривой, где расстояние P1 между началом и концом кривой превышает расстояние P между соседними участками (фиг. 5). Расстояние P1 может быть в диапазоне от 15 нм до 6 мкм.

Численные значения указанных выше диапазонов выбраны из следующих соображений. Минимальные размеры назначены исходя из ограничений, накладываемых возможностями электронной литографии. Максимальные размеры назначены исходя из того, что предлагаемое техническое решение может быть применено для создания сверхпроводникового однофотонного детектора с проводом из сверхпроводящего материала шириной от сотен нанометров до нескольких микрометров (микропроводом), который позволяет увеличить быстродействие детектора и понизить требования к точности его изготовления.

Существует также вариант, в котором между подложкой 1 (фиг. 6) и нанопроводом из сверхпроводящего материала 4 расположен распределенный брэгговский отражатель 10, выполненный в виде структуры из чередующихся слоев двух материалов с высоким и низким показателем преломления, например, оксид тантала(V) и диоксид кремния [Zhang W. J. et al. NbN superconducting nanowire single photon detector with efficiency over 90% at 1550 nm wavelength operational at compact cryocooler temperature //Science China Physics, Mechanics & Astronomy. – 2017. – Т. 60. – №. 12. – С. 1-10] или аморфный кремний и диоксид кремния [Reddy D. V. et al. Superconducting nanowire single-photon detectors with 98% system detection efficiency at 1550 nm //Optica. – 2020. – Т. 7. – №. 12. – С. 1649-1653.].

Существует также вариант, в котором над нанопроводом из сверхпроводящего материала 4 (фиг. 7) расположен распределенный брэгговский отражатель 11, выполненный в виде структуры из чередующихся слоев двух материалов с высоким и низким показателем преломления.

Существует также вариант, в котором между подложкой 1 (фиг. 8) и нанопроводом из сверхпроводящего материала 4 расположен четвертьволновый резонатор 12, выполненный в виде структуры из слоя диэлектрика и слоя отражающего материала, например, оксид кремния и золото, диоксид кремния и золото, нитрид кремния и золото [Manova N. N. et al. Superconducting NbN single-photon detector integrated with quarter-wave resonator //Technical Physics Letters. – 2011. – Т. 37. – №. 5. – С. 469-471].

Существует также вариант, в котором под четвертьволновым резонатором 12 (фиг. 9) в зоне нанопровода из сверхпроводящего материала 4 удален слой подложки 1 [Chang J. et al. Detecting Infrared Single Photons with Near-Unity System Detection Efficiency //arXiv

preprint arXiv:2011.08941. – 2020.]

Устройство функционирует следующим образом. Когда нанопровод из сверхпроводящего материала 4 сверхпроводящего однофотонного детектора, находящийся на подложке 1, находится в сверхпроводящем состоянии, через него с помощью первой контактной площадки 2 и второй контактной площадки 3 пропускают электрический ток смещения I величиной, меньшей значения критического тока I_C , при котором нанопровод из сверхпроводящего материала 4 выходит из сверхпроводящего состояния. При попадании фотона на нанопровод из сверхпроводящего материала 4 образуется горячее пятно, то есть область с подавленной сверхпроводимостью, в результате чего плотность тока по краям от горячего пятна увеличивается и в сечении нанопровода из сверхпроводящего материала 4 образуется резистивная перемычка. Возникший в результате этого импульс напряжения фиксируется с помощью первой контактной площадки 2 и второй контактной площадки 3 и свидетельствует о детектировании фотона. Затем происходит релаксация горячего пятна и возвращение нанопровода из сверхпроводящего материала 4 в сверхпроводящее состояние. Чем ближе ток смещения I к критическому I_C , тем меньшей энергии фотона будет достаточно для образования резистивной перемычки, то есть тем выше квантовая эффективность, однако, чем ближе ток смещения I к критическому I_C , тем выше скорость темнового счета, что связано с уменьшением энергетического барьера на вход вихрей в нанопровод из сверхпроводящего материала 4, который может привести к срабатыванию детектора в отсутствие фотона.

То, что центральный участок 5 нанопровода из сверхпроводящего материала 4 имеет наибольшую длину, остальные участки 6 по обе стороны от центрального участка 5 имеют длину, уменьшающуюся по мере отдаления от центрального участка 5, при этом первые зоны поворота 7 на концах центрального участка 5 имеют ширину A , превышающую ширину B центрального участка 5, а радиус поворота R центрального участка 5 превышает половину расстояния P между соседними участками, при этом вторые зоны поворота 8 на концах остальных участков 6 расположены под углом α к центральному участку 5, причем вторые зоны поворота 8 на концах остальных участков 6 имеют ширину A , превышающую ширину B остальных участков 6, а радиусы поворота R каждого остальных участков 6 превышают половину расстояния P между остальными участками 6, приводит к тому, что максимальная плотность тока в первых зонах поворота 7 на концах центрального участка и вторых зонах поворота 8 на концах остальных участков оказывается близка к плотности тока на прямолинейном участке, таким образом, ток смещения практически не ограничивается эффектом скопления тока, что обеспечивает возможность подачи тока смещения достаточного для достижения высокой квантовой эффективности при стремлении к нулю числа темновых отсчетов, обусловленных уменьшением энергетического барьера на вход вихрей в нанопровод из сверхпроводящего материала 4 в первых зонах поворота 7 на концах центрального участка и вторых зонах поворота 8 на концах остальных участков, а также возможность создания нанопровода из сверхпроводящего материала 4 с высоким коэффициентом заполнения, величина которого ограничена лишь возможностями литографии.

То, центры первых зон поворота 7 и центры вторых зон поворота 8 имеют ширину C , превышающую ширину A , позволяет дополнительно увеличить площадь сечения нанопровода из сверхпроводящего материала 4 в первых зонах поворота 7 на концах центрального участка и вторых зонах поворота 8 на концах остальных участков, тем

самым ослабляя эффект скопления тока.

То, что внешние каждой первой зоны поворота 7 и каждой второй зоны поворота 8 выполнены со скруглением 9, позволяет снизить плотность тока на внешних углах в первых зонах поворота 7 на концах центрального участка и вторых зонах поворота 8 на концах остальных участков, тем самым увеличивая энергетический барьер на вход вихрей в нанопровод в этих областях.

То, что внутренний контур каждой первой зоны поворота 7 и каждой второй зоны поворота 8 выполнен в виде выпуклой кривой, где расстояние R_1 между началом и концом кривой превышает расстояние R между соседними участками, позволяет снизить плотность тока на внутренних контурах первых зон поворота 7 на концах центрального участка и вторых зон поворота 8 на концах остальных участков, тем самым увеличивая энергетический барьер на вход вихрей в нанопровод в этих областях.

То, что между подложкой 1 и нанопроводом из сверхпроводящего материала 4 расположен распределенный брэгговский отражатель 10, позволяет обеспечить максимум поглощения в нанопроводе из сверхпроводящего материала 4 за счет конструктивной интерференции на его поверхности на соответствующей длине волны.

То, что над нанопроводом из сверхпроводящего материала 4 расположен распределенный брэгговский отражатель 11, позволяет обеспечить максимум поглощения в нанопроводе из сверхпроводящего материала 4 за счет отражения в его сторону тех фотонов, которые были отражены нижними слоями распределенного брэгговского отражателя 10, но не были поглощены нанопроводом из сверхпроводящего материала 4.

То, что между подложкой 1 и нанопроводом из сверхпроводящего материала 4 расположен четвертьволновый резонатор 12, позволяет обеспечить максимум поглощения в нанопроводе из сверхпроводящего материала 4 за счет конструктивной интерференции на его поверхности на соответствующей длине волны.

То, что под четвертьволновым резонатором 12 в зоне нанопровода из сверхпроводящего материала 4 удален слой подложки 1, позволяет обеспечить максимум поглощения в нанопроводе из сверхпроводящего материала 4 за счет конструктивной интерференции на его поверхности на соответствующей длине волны.

(57) Формула изобретения

1. Сверхпроводниковый однофотонный детектор, включающий подложку, первую контактную площадку, вторую контактную площадку и соединенный с ними нанопровод из сверхпроводящего материала, расположенные на подложке, при этом нанопровод из сверхпроводящего материала выполнен в виде параллельных друг другу участков с зонами поворота, отличающийся тем, что центральный участок нанопровода из сверхпроводящего материала имеет наибольшую длину, остальные участки по обе стороны от центрального участка имеют длину, уменьшающуюся по мере отдаления от центрального участка, при этом первые зоны поворота на концах центрального участка имеют ширину A , превышающую ширину B центрального участка, а радиус поворота R центрального участка превышает половину расстояния P между соседними участками, при этом вторые зоны поворота на концах остальных участков расположены под углом α к центральному участку, причем вторые зоны поворота на концах остальных участков имеют ширину A , превышающую ширину B остальных участков, а радиусы поворота R каждого остальных участков превышают половину расстояния P между остальными участками.

2. Сверхпроводниковый однофотонный детектор по п. 1, отличающийся тем, что

центры первых зон поворота и центры вторых зон поворота имеют ширину C , превышающую ширину A .

3. Сверхпроводниковый однофотонный детектор по п. 1, отличающийся тем, что внешние углы каждой первой зоны поворота и каждой второй зоны поворота
5 выполнены со скруглением.

4. Сверхпроводниковый однофотонный детектор по п. 1, отличающийся тем, что внутренний контур каждой первой зоны поворота и каждой второй зоны поворота выполнен в виде выпуклой кривой, где расстояние R_1 между началом и концом кривой превышает расстояние R между соседними участками.

10 5. Сверхпроводниковый однофотонный детектор по п. 1, отличающийся тем, что между подложкой и нанопроводом из сверхпроводящего материала расположен распределенный брэгговский отражатель.

6. Сверхпроводниковый однофотонный детектор по п. 4, отличающийся тем, что над нанопроводом из сверхпроводящего материала расположен распределенный
15 брэгговский отражатель.

7. Сверхпроводниковый однофотонный детектор по п. 1, отличающийся тем, что между подложкой и нанопроводом из сверхпроводящего материала расположен четвертьволновый резонатор.

8. Сверхпроводниковый однофотонный детектор по п. 6, отличающийся тем, что в
20 зоне нанопровода из сверхпроводящего материала удален слой подложки.

25

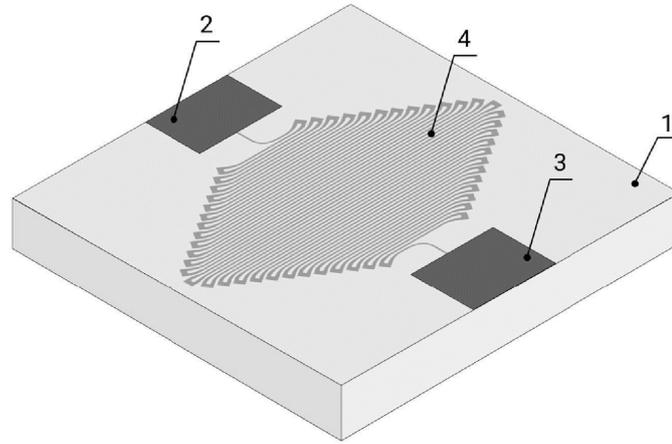
30

35

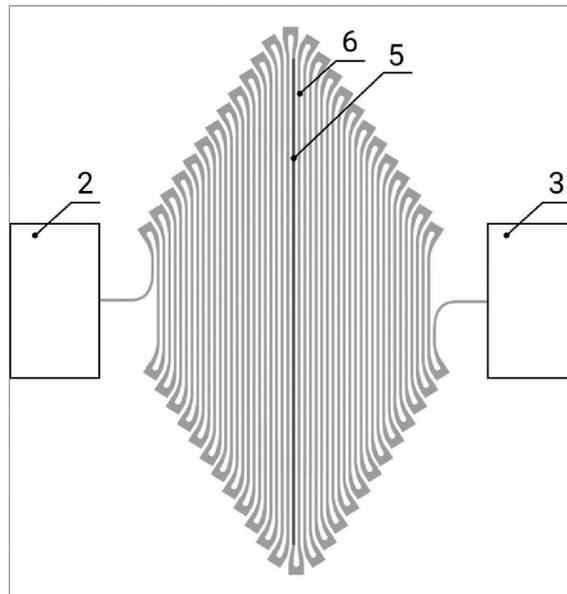
40

45

1

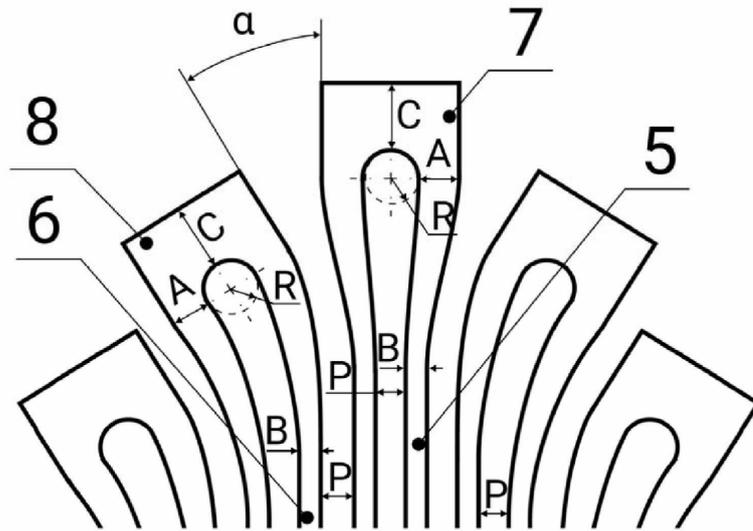


Фиг. 1

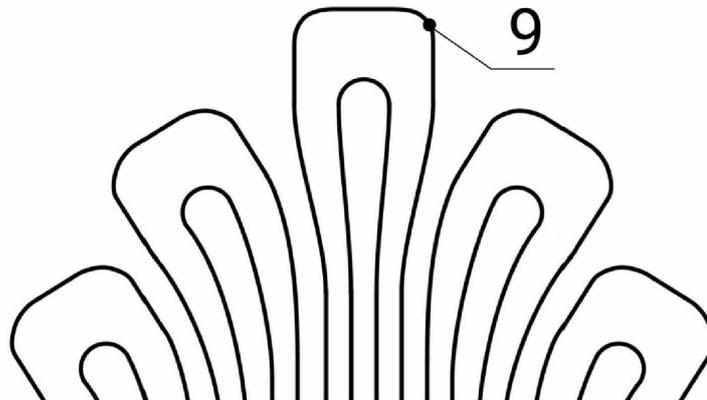


Фиг. 2

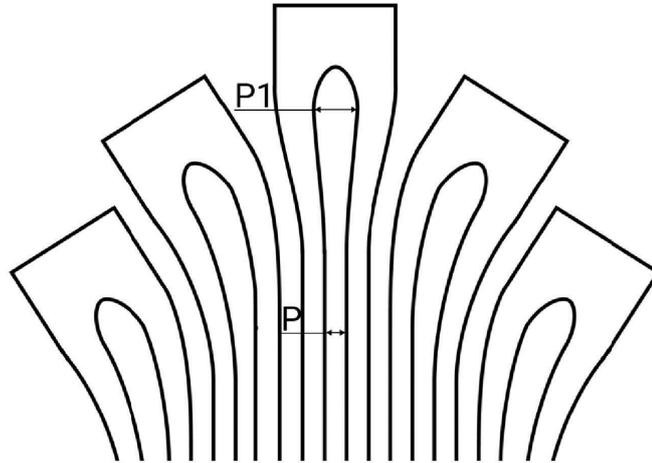
2



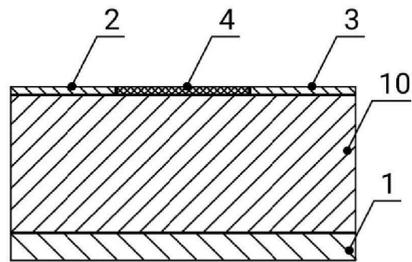
Фиг. 3



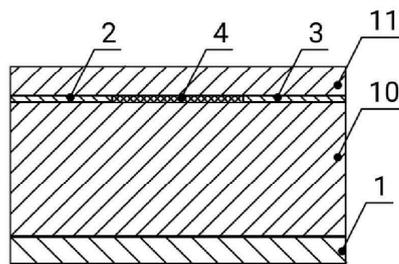
Фиг. 4



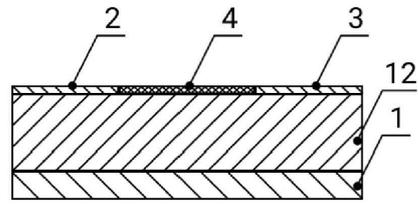
Фиг. 5



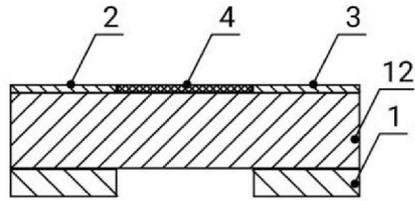
Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8



Фиг. 9