



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2006134740/28, 03.10.2006

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
03.10.2006

(45) Опубликовано: 10.04.2008 Бюл. № 10

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: А.Выставкин и др. Болومتر на горячих электронах в нормальном металле с Андреевским отражением в сверхпроводящих берегах. - ЖЭТФ, 1999, т.115, вып.3, с.1085-1092. SU 1597055 A1, 23.05.1993. SU 747370 A, 23.09.1982. SU 692337 A1, 15.11.1993. US 5090819 A, 25.02.1992. DE 19828088 A1, 30.12.1999.

Адрес для переписки:

125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр.7,  
Институт радиотехники и электроники РАН

(72) Автор(ы):

Тарасов Михаил Александрович (RU),  
Кузьмин Леонид Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Институт радиотехники и электроники  
Российской Академии Наук (RU)

## (54) СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ БОЛОМЕТР

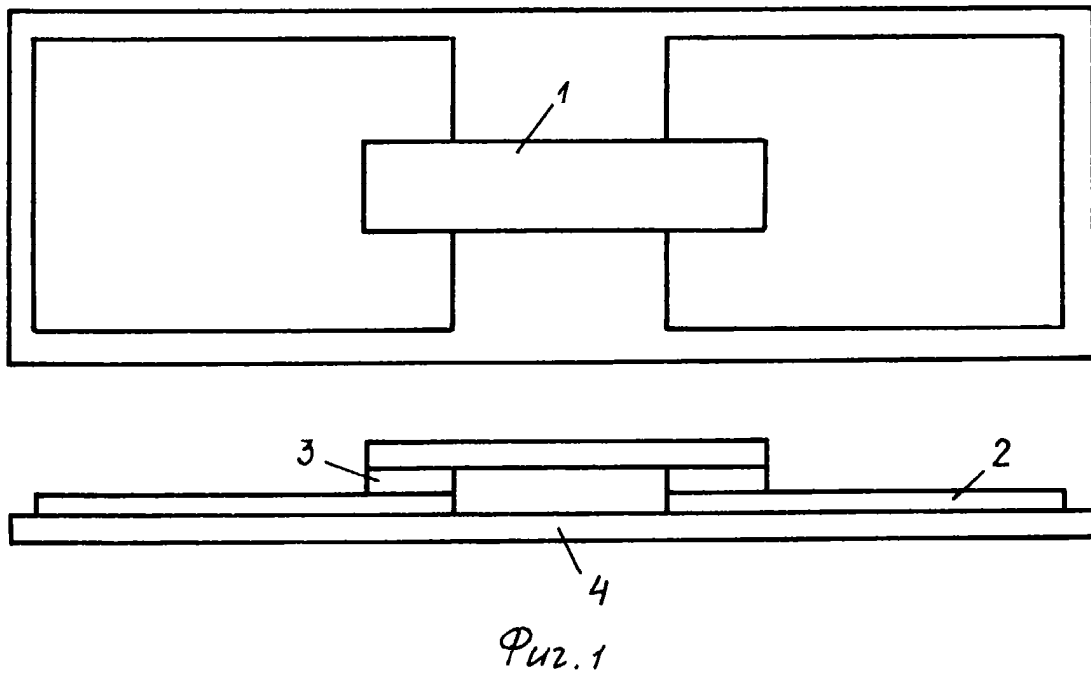
(57) Реферат:

Изобретение относится к тепловым приемникам излучения миллиметровых и субмиллиметровых волн. Техническим результатом изобретения является повышение ампер-ваттной чувствительности болометра, снижение его шумов, расширение на порядок динамического диапазона и мощности насыщения, расширение частотного диапазона более чем на порядок, многократное расширение диапазона рабочих температур. Сущность изобретения: в сверхпроводниковом болометре, содержащем тонкую пленку поглотителя излучения и сверхпроводящие электроды, между пленкой поглотителя и электродами введены сверхпроводниковые туннельные переходы типа сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН) в случае поглотителя из нормального

металла или сверхпроводник-изолятор-слабый сверхпроводник (СИС\*) в случае поглотителя из слабого сверхпроводника, поглотитель выполнен из тонкой пленки нормального металла или сверхпроводника с критической температурой меньше, чем у электродов, объем поглотителя  $v$ , размер туннельных переходов  $S$ , величина задаваемого напряжения смещения  $U$  выбираются исходя из соотношений  $v=(NEP)^2/(20kT^6)$ , где  $NEP$  - мощность, эквивалентная шуму,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура,  $S=P_{bg}e\rho/(kTV_{gap})$ ,  $P_{bg}$  - мощность фонового излучения,  $e$  - заряд электрона,  $\rho=R_n \cdot S$  - произведение нормального сопротивления на площадь,  $V_{gap}$  - напряжение энергетической щели,  $U=V_{gap}-kT/e$ . 5 ил.

RU 2 321 921 C1

RU 2 321 921 C1





FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(21), (22) Application: **2006134740/28, 03.10.2006**

(24) Effective date for property rights: **03.10.2006**

(45) Date of publication: **10.04.2008 Bull. 10**

Mail address:  
**125009, Moskva, ul. Mokhovaja, 11, str.7,  
Institut radiotekhniki i ehlektroniki RAN**

(72) Inventor(s):  
**Tarasov Mikhail Aleksandrovich (RU),  
Kuz'min Leonid Sergeevich (RU)**

(73) Proprietor(s):  
**Institut radiotekhniki i ehlektroniki  
Rossijskoj Akademii Nauk (RU)**

(54) **SUPERCONDUCTOR BOLOMETER**

(57) Abstract:

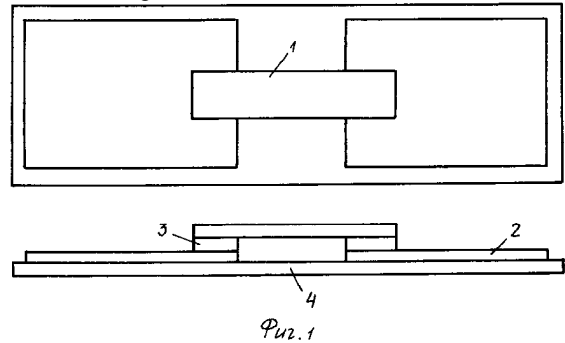
FIELD: thermal-type millimetric- and submillimetric-wave detectors.

SUBSTANCE: proposed superconductor bolometer has thin radiation-absorber film and superconducting electrodes; inserted between absorber film and electrodes are superconductor tunneling junctions of superconductor-insulator-normal metal type in case absorber is made of normal metal or superconductor-insulator-weak superconductor when absorber is made of thin normal-metal film or of superconductor whose critical temperature is below that of electrodes; absorber volume  $v$ , tunneling junction size  $S$ , and given bias voltage  $U$  are chosen from equation  $v = (NEP)^2 / (20kT^6)$ , where NEP is power equivalent to noise;  $k$  is Boltzmann constant;  $T$  is temperature;  $S = P_{bg} e \rho / (kTV_{gap})$ ;  $P_{bg}$  is background radiation power;  $e$  is electron charge;  $\rho = R_n \cdot S$  is product of

normal resistance by area;  $V_{gap}$  is energy gap voltage;  $U = V_{gap} - kT/e$ .

EFFECT: enhanced watt-ampere sensitivity, reduced noise, extended (by order of magnitude) dynamic range and saturation power, enlarged frequency band and operating temperature range (by more than order of magnitude).

1 cl, 5 dwg



RU 2 3 2 1 9 2 1 C 1

RU 2 3 2 1 9 2 1 C 1

Изобретение относится к тепловым приемникам излучения, группе болометрических приемников излучения миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Известно устройство-аналог: болометр на краю сверхпроводящего перехода [1], который представляет собой мостик из тонкой сверхпроводящей пленки, в котором происходит  
5 разогрев сверхпроводника излучением и модуляция сопротивления пленки. Температура пленки поддерживается чуть выше критической за счет пропускания постоянного тока смещения. Недостатком аналога является его инерционность (порядка миллисекунды) и невысокое быстродействие, что определяется сравнительно медленными процессами фононной релаксации.

Известно устройство-аналог: сверхпроводящий болометр на разогреве электронов [2], который состоит из тонкого сверхпроводящего мостика, подсоединенного к электродам из нормального металла. Такие болометры применяют для измерения интенсивности и фазы излучения миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн. Болометр представляет собой тонкую и короткую пленку сверхпроводника, в которой под действием  
15 излучения происходит изменение электронной температуры и сопротивления на резистивном участке. Его быстродействие достигает нескольких гигагерц. Недостатком аналога является перегрев пленки поглотителя выше температуры сверхпроводящего перехода, составляющей около 9 К для ниобия, что приводит к возрастанию шумов.

Известно устройство-аналог электронного охладителя: элемент Пелтье [3], состоящий из двух полупроводниковых рп переходов. Термоэлектрический эффект Пелтье состоит в поглощении или выделении тепла на спае двух различных металлов или полупроводников, когда по этим проводникам протекает электрический ток. Если E1 и E2 - термоэдс первого и второго спаев, то количество тепла, получаемого на спае при температуре T(K), выражается формулой:  $Q=(E1-E2) \cdot T \cdot I$ . Недостатком охладителя Пелтье для  
20 криогенного болометра является сравнительно небольшое охлаждение и невозможность работать при милликельвиновых температурах, при которых в полупроводниковых переходах происходит вымерзание носителей.

Известно устройство-прототип: болометр с Андреевским отражением [4], состоящий из мостика в виде тонкой пленки нормального металла (абсорбера), непосредственно  
30 подключенного к сверхпроводящим электродам, в котором контакт абсорбера со сверхпроводящими электродами осуществляется с Андреевским отражением электронов на границе раздела нормальный металл - сверхпроводник. Недостатком прототипа является ограничение по частоте, определяемое энергетической щелью сверхпроводника и соответствующее 70 ГГц для алюминия, а также невысокая чувствительность, насыщение от фонового излучения, достаточно большие шумы, невысокий динамический диапазон,  
35 узкий диапазон рабочих температур.

Целью предлагаемого изобретения является: повышение ампер-ваттной чувствительности болометра, снижение его шумов, расширение на порядок динамического диапазона и мощности насыщения, расширение частотного диапазона более чем на  
40 порядок, многократное расширение диапазона рабочих температур.

Поставленные цели достигаются тем, что

- между абсорбером и электродами, соединяющими абсорбер с источником сигнала, введены туннельные переходы типа сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН) в случае абсорбера из нормального металла или сверхпроводник-изолятор-слабый  
45 сверхпроводник (СИС\*) в случае абсорбера из слабого сверхпроводника;

- объем поглотителя  $v$ , размер туннельных переходов  $S$ , величина задаваемого напряжения смещения  $U$  выбираются исходя из соотношений:  $v=(NEP)^2/(20kT^6)$ , где NEP - мощность, эквивалентная шуму,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура,  $S=P_{bg}e\rho/(kTV_{gap})$ ,  $P_{bg}$  - мощность фонового излучения,  $e$  заряд электрона, характерная  
50 технологическая константа  $\rho=R_n \cdot S$  - произведение нормального сопротивления  $R_n$  на площадь перехода  $S$ ,  $V_{gap}$  - напряжение энергетической щели,  $U=V_{gap}-kT/e$ .

Согласно изобретению

- На поверхности диэлектрической подложки нанесена тонкая пленка материала поглотителя излучения, который может быть как нормальным металлом, так и слабым

сверхпроводником.

- Поглотитель (абсорбер) сформирован в виде узкого (порядка микрона и меньше) мостика длиной порядка нескольких микрон.

5 - На подложку нанесены сверхпроводящие электроды, подсоединенные к абсорберу через туннельные переходы типа сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН) либо сверхпроводник-изолятор-другой сверхпроводник (СИС\*) размером от субмикронных до единиц микрон.

Перечень фигур графических изображений

10 Фигура 1. Схематическое изображение структуры болометра в плане и в сечении, с абсорбером 1, сверхпроводящими электродами 2, слоем туннельного барьера 3 и подложкой 4.

15 Фигура 2. Изображение в электронном микроскопе конструкции болометра, интегрированного в двойную дипольную планарную антенну. В центре расположена полоска абсорбера длиной 10 мкм и шириной 0.2 мкм, на краях которой расположены уширения 0.3×0.6 мкм, представляющие туннельные СИН переходы.

Фигура 3. Отклик болометра структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (СИНИС) по напряжению на изменение температуры (кривая DVT) и на излучение черного тела (кривая DV249mV).

20 Фигура 4. Электронная температура болометра под действием электронного охлаждения.

Фигура 5. Пример спектра излучения, принятого сверхпроводниковым болометром.

Описание

25 Схематическое изображение конструкции предлагаемого устройства сверхпроводникового болометра представлено на Фиг. 1. На кремниевой или другой диэлектрической подложке стандартными методами тонкопленочной технологии нанесена интегральная структура со сверхпроводниковым болометром. В центре расположена полоска поглотителя излучения (1), которая может быть выполнена как из нормального металла (меди, серебра, хрома и др. и их сплавов), так и из слабого сверхпроводника (титана, ванадия и др. и их сплавов как между собой, так и с нормальными металлами).  
30 Края полоски абсорбера подключены к сверхпроводящим электродам (2) (ниобий, алюминий и др.) через туннельные переходы (3) типа СИН (сверхпроводник-изолятор-нормальный металл) в случае нормального абсорбера либо СИС' (сверхпроводник-изолятор-сверхпроводник) в случае сверхпроводящего абсорбера. В середине полоски абсорбера могут быть расположены дополнительные туннельные переходы, соединенные с  
35 дополнительными электродами, в этом случае можно разделить функции охлаждения и измерения температуры между парами электродов для изучения динамики процессов переноса тепла и для калибровки устройства.

Мощность, эквивалентная шуму (МЭШ, noise equivalent power, NEP) в термодинамическом пределе, определяется электрон-фононным взаимодействием и описывается формулой

$$40 \text{ NEP}^2 = 4k T^2 G \quad (1)$$

где  $G=5\Sigma\nu T^4$  - тепловая проводимость,  $\Sigma$  - постоянная материала,  $\nu$  - объем абсорбера,  $T$  - температура. Для снижения МЭШ следует уменьшать объем абсорбера, но при этом его длина  $l$  не должна быть меньше длины электрон-электронного взаимодействия  $l_{ee}$  и не  
45 должна быть больше длины электрон-фононного взаимодействия  $l_{ep}$ , т.е.

$$l_{ep} \gg l \gg l_{ee} \quad (2)$$

Для медного абсорбера длиной 10 мкм, шириной 0.2 мкм и толщиной 50 нм при температуре 100 мК получим МЭШ= $1.3 \cdot 10^{-18}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>.

50 Крайние СИН переходы болометра подключены к сверхпроводящим электродам, которые в свою очередь подключены к планарной антенне. На Фиг.2 такие элементы антенны расположены сверху и снизу по отношению к полоске абсорбера.

Изменение напряжения на болометре (отклик) на изменение температуры и на излучение представлены на Фиг.3. Такой отклик получен в режиме заданного тока через

болометр. Для реализации электронного охлаждения и расширения динамического диапазона на предлагаемый болометр подается постоянное напряжение смещения исходя из соотношения

$$V_{bias} = V_{gap} - kT / e, \quad (3)$$

5 где  $V_{bias}$  - напряжение смещения,  $V_{gap}$  - напряжение, соответствующее энергетической щели сверхпроводящего электрода,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура,  $e$  - заряд электрона.

В случае режима заданного напряжения на структуре болометра при определенных значениях напряжения может происходить электронное охлаждение и снижение  
10 электронной температуры. Для такого измерения охлаждающее напряжение задается на внешних СИН переходах, а электронная температура измеряется СИН переходами, которые должны быть определенной площади для реализации охлаждения и удаления мощности внешнего фонового излучения. В оптимальном режиме каждый электрон тока смещения ( $I$ ) выносит энергию  $kT$ , и максимальная выносимая мощность составляет  $P =$   
15  $kT/e$ , а эффективная электронная температура определяется по уравнению теплового баланса

$$\left( T_{ph}^5 - T_e^5 \right) \Sigma \nu = P_{cool}(T_e) - P_{bg} - \frac{V^2}{R_s}, \quad (4)$$

20 где  $T_{ph}$  - фононная температура,  $T_e$  - электронная температура,  $V$  - напряжение постоянного смещения,  $P_{bg} = 0.5hf\Delta f$  - мощность фонового излучения,  $\Sigma = 3 \cdot 10^9 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-3} \text{К}^{-5}$  - постоянная материала,  $\nu = 1.8 \cdot 10^{-19} \text{ м}^3$  - объем абсорбера. Значение тока смещения можно оценить примерно как  $I = V_{gap}/R_n$ , а величина нормального сопротивления связана с  
25 характерным технологическим параметром  $\rho = R_n \cdot S \sim 100 \text{ Ом} \cdot \text{мкм}^2$  и площадью перехода  $S$ . В результате получим необходимую площадь СИН перехода

$$S = P_{bg} e \rho / (k T V_{gap}). \quad (5)$$

Увеличение площади выше необходимого значения приводит к возрастанию объема абсорбера, увеличению тепловой проводимости и МЭШ.

30 Пример электронного охлаждения представлен на Фиг.4 для алюминия в качестве сверхпроводящего материала и меди в качестве нормального металла. В качестве примера можно взять снижение температуры с 250 до 90 мК, что приводит к удвоению температурного отклика и снижению МЭШ в 2.5 раза.

В отличие от болометра с непосредственными (Андреевскими) контактами между  
35 сверхпроводником и нормальным металлом, в болометре с туннельными контактами нет ограничения на частоту принимаемого сигнала, тогда как Андреевский болометр ограничен частотой, соответствующей энергетической щели сверхпроводника и составляющей около 70 ГГц для алюминия. На Фиг.5 в качестве примера приведен спектральный отклик СИНИС структуры, включенной в двойную дипольную антенну, рассчитанную на 300 ГГц. Виден  
40 отклик как на основной частоте, так и на ее гармониках, вплоть до 1,8 ТГц, что значительно выше предельной частоты алюминия.

Предлагаемое устройство функционирует следующим образом. На туннельные переходы подается напряжение постоянного смещения несколько меньше энергетической щели, что обеспечивает максимальное электронное охлаждение в материале абсорбера. Происходит снижение электронной температуры до двух раз. При этом многократно  
45 возрастает чувствительность болометра как к изменению температуры, так и к внешнему облучению (нагреву). Внешнее облучение (сигнал) малой мощности подается квазиоптическими методами на планарную антенну, которая вызывает ток сигнала через материал абсорбера и его нагрев. Изменение температуры абсорбера приводит к изменению тока через туннельные переходы, что регистрируется схемой считывания. В  
50 случае нормального металла абсорбера и оптимальных размерах туннельных переходов их сопротивление не превышает 1 кОм и в качестве устройства регистрации (считывания) может быть использован сверхпроводящий квантовый интерферометр (сквид). Если же использовать в качестве абсорбера более слабый сверхпроводник, то можно получить

дифференциальное сопротивление в рабочей точке порядка сотен килоОм и в этом случае использовать усилительный каскад на полевом транзисторе. В обоих случаях удается избавиться от шумов последующего каскада и ожидать предельные характеристики болометра, определяемые термодинамическими шумами. При температуре

5 болометра  $\sim 100$  мК можно достичь мощности, эквивалентной шуму  $MЭШ=10^{-18}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>.

Весьма важным свойством является возможность работать при достаточно высоком уровне внешнего фонового излучения, поскольку за счет электронного охлаждения удается избежать перегрева болометра, а перегрев сильно снижает чувствительность и увеличивает шумы. Электронное охлаждение позволяет отводить мощность фонового

10 излучения и препятствует снижению чувствительности устройства.

Примеры реализации представлены на Фиг.2. Структура напылена методом термического испарения на кремниевую подложку. В центре нанесена полоска абсорбера, которая подключена к двум сверхпроводящим электродам. Электроды, в свою очередь,

15 включены в центре планарной антенны, нанесенной на той же подложке и выполненной из нормального металла с высокой проводимостью, например из золота. В качестве нормального металла использована медь, в качестве сверхпроводника использован алюминий. Длина полоски абсорбера составляет 12 мкм, ширина 0.2 мкм. Размеры туннельных переходов составляли  $0.2 \times 0.2$  мкм<sup>2</sup> для внутренних и  $0.2 \times 0.6$  мкм<sup>2</sup> для

20 внешних СИН переходов. Напряжение смещения в оптимуме на Фиг.4 составляет около 400 мкВ. Электронное охлаждение позволяет снизить температуру с 260 до 100 мК.

#### Литература

1. Г.А.Зайцев, В.П.Коротков, И.А.Хребтов. Сверхпроводящий болометр, SU 622367 А от 02.02.1977.

2. Б.М.Воронов, Е.М.Гершензон, Г.Н.Гольцман, В.Н.Федорец, В.И.Федосов.

25 Сверхпроводниковый электронный болометр. Патент SU 1597055 А1 от 11.04.1989.

3. Физический энциклопедический словарь. М., Сов. Энциклопедия, 1983.

4. А.Выставкин, Д.Шуваев, Л.Кузьмин, М.Тарасов и др. Болометр на горячих электронах в нормальном металле с Андреевским отражением в сверхпроводящих берегах. ЖЭТФ, 1999, т.115, вып.3, стр.1085-1092.

30

#### Формула изобретения

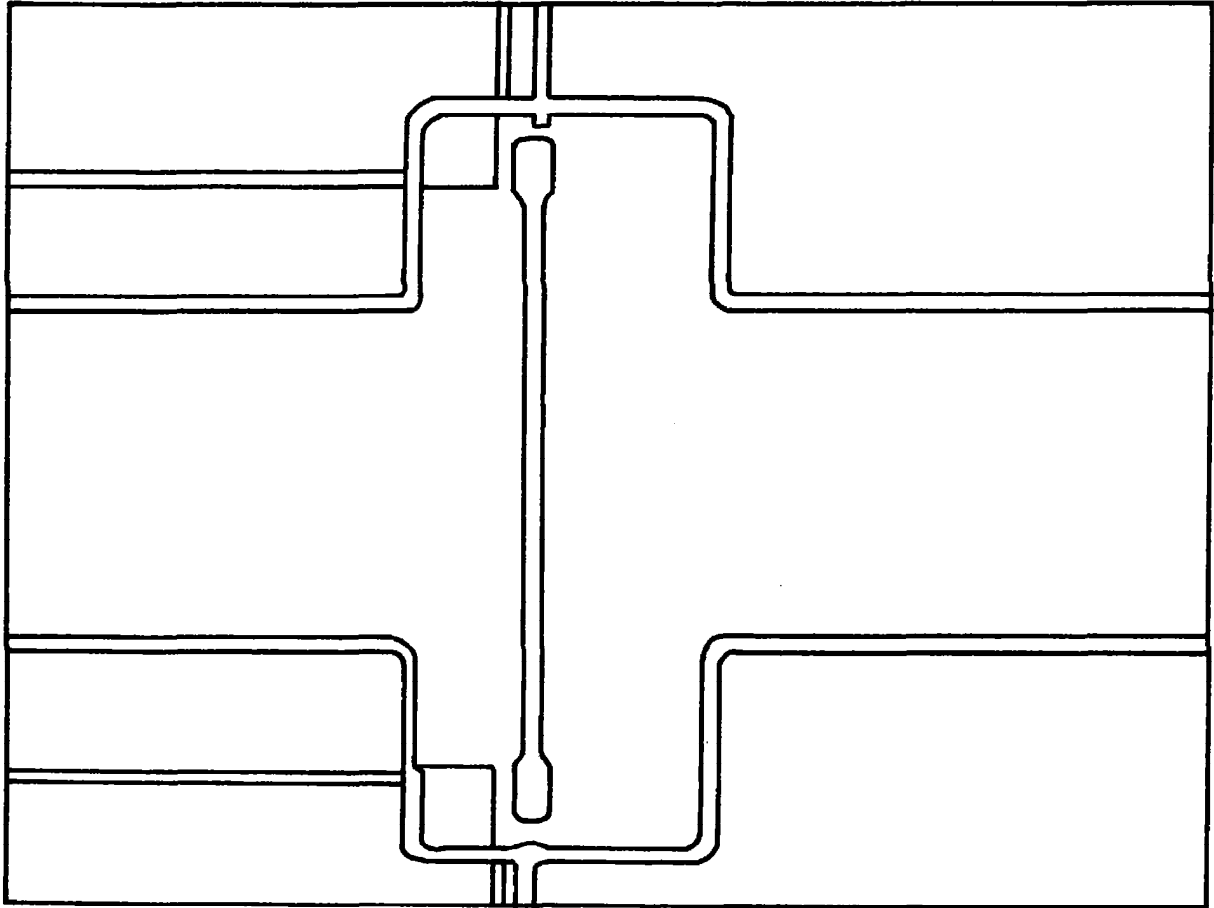
Сверхпроводниковый болометр, содержащий тонкую пленку поглотителя излучения и сверхпроводящие электроды, отличающийся тем, что в нем между пленкой поглотителя и электродами введены сверхпроводниковые туннельные переходы типа сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН) в случае поглотителя из нормального металла или

35 сверхпроводник-изолятор-слабый сверхпроводник (СИС\*) в случае поглотителя из слабого сверхпроводника, поглотитель выполнен из тонкой пленки нормального металла или сверхпроводника с критической температурой меньше, чем у электродов, объем поглотителя  $v$ , размер туннельных переходов  $S$ , величина задаваемого напряжения смещения  $U$  выбираются, исходя из соотношений:  $v=(NEP)^2/(20kT^6)$ , где  $NEP$  - мощность, эквивалентная шуму,  $k$  - постоянная Больцмана,  $T$  - температура,  $S=P_{bg}e\rho/(kTV_{gap})$ ,  $P_{bg}$  -

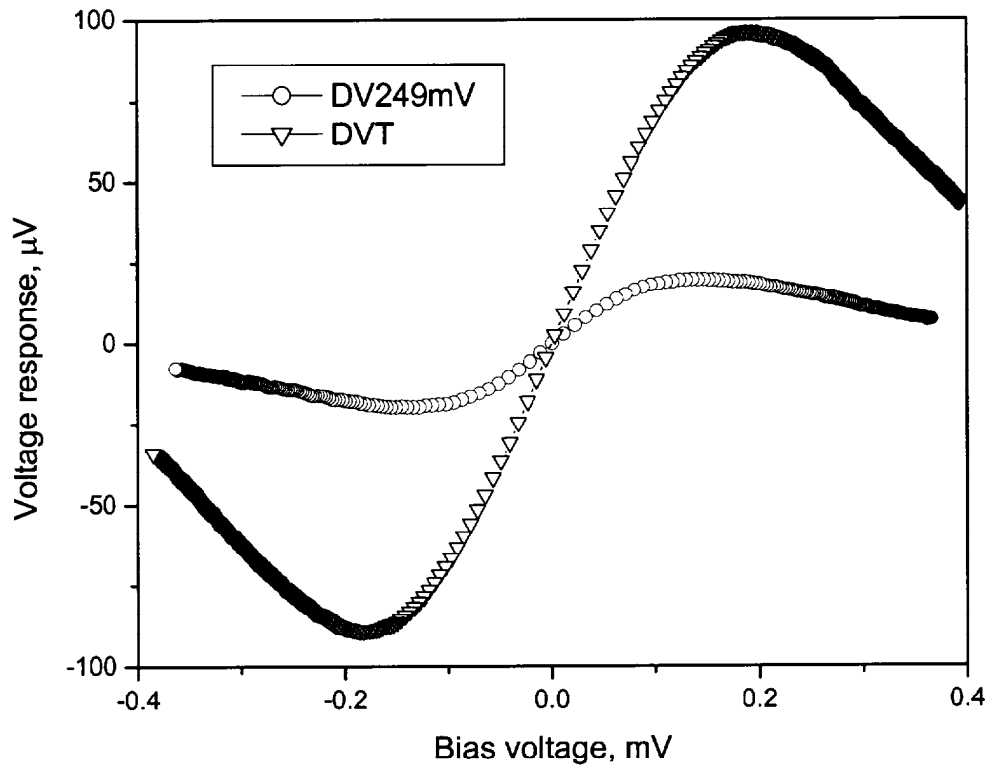
40 мощность фонового излучения,  $e$  - заряд электрона, характерный технологический параметр  $\rho=R_n \cdot S$  - произведение нормального сопротивления  $R_n$  на площадь  $S$ ,  $V_{gap}$  напряжение энергетической щели,  $U=V_{gap}-kT/e$ .

45

50

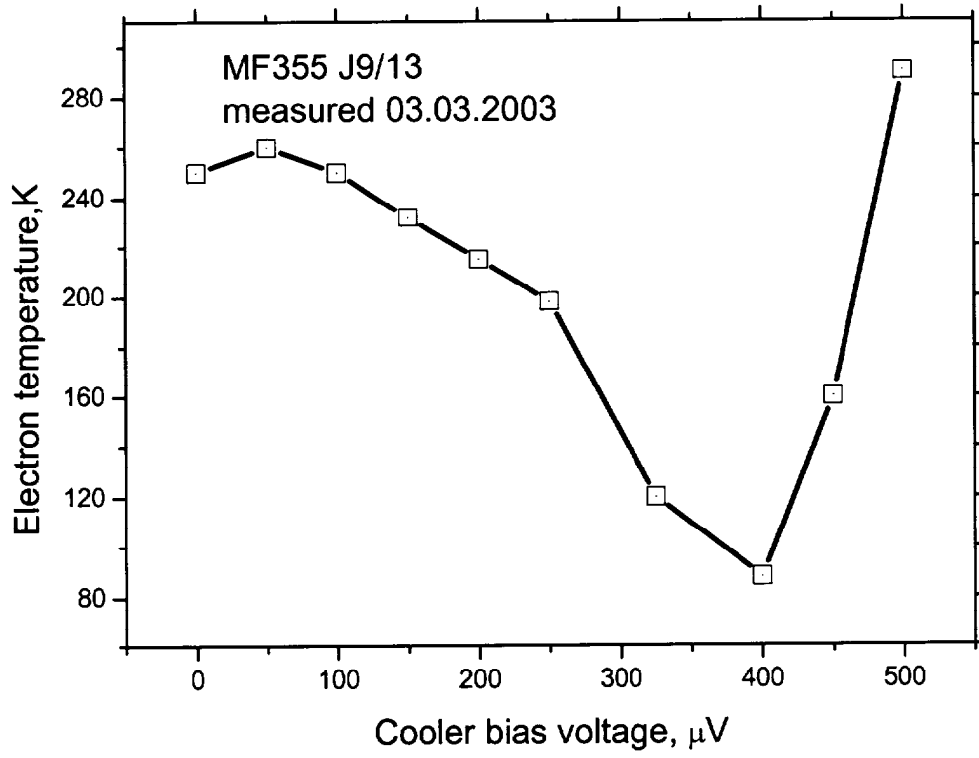


Фиг. 2

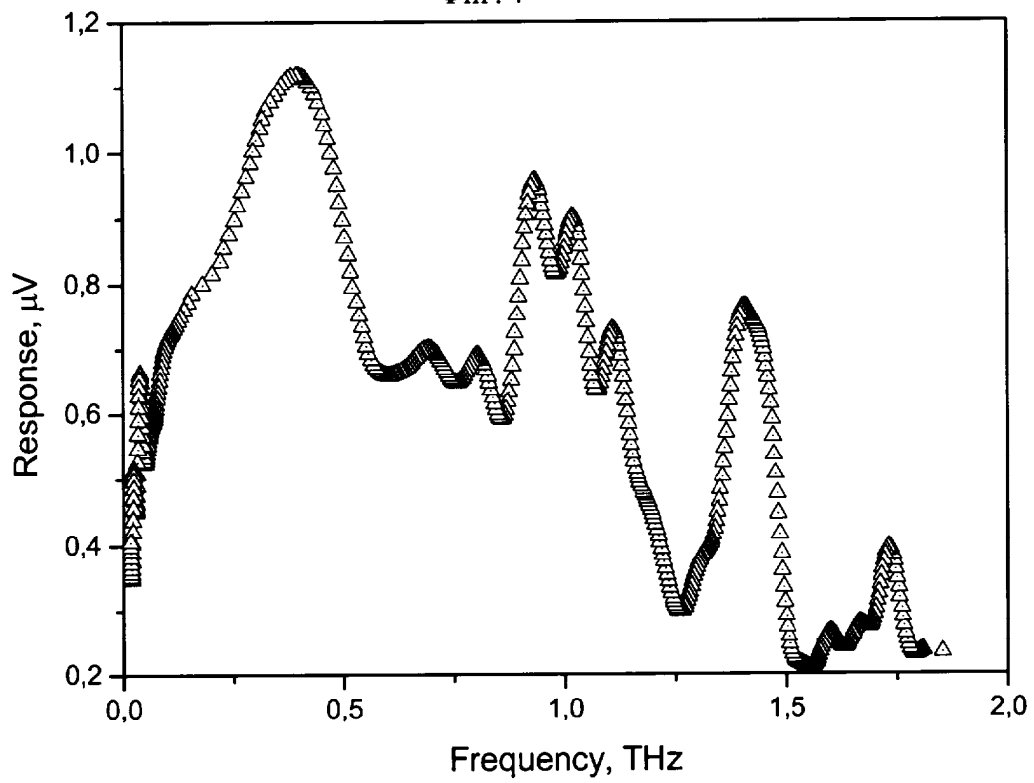


Фиг. 3





Фиг. 4



Фиг. 5