



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**(21)(22) Заявка: **2010137284/28**, **08.09.2010**(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
**08.09.2010**

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: **08.09.2010**(45) Опубликовано: **20.12.2011** Бюл. № 35(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: **WO 2009/101257 A1**, **20.08.2009**. **RU 2325003 C1**, **20.05.2008**. **US 6348699 B1**, **19.02.2002**. **US 7610071 B2**, **27.10.2009**. **JP 11274585 A**, **08.10.1999**.

Адрес для переписки:

**119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1,  
стр.2, НИИЯФ МГУ**

Документ находится в Патентном отделе

**ОКБ АСТРОН**140081, Московская область, г.Лыткарино,  
ул.Парковая, д.1**(54) ДЕТЕКТОР ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ДЖОЗЕФСОНОВСКОЙ  
ГЕТЕРОСТРУКТУРЕ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано в приемных системах для целей радиоастрономии, интроскопии и спектроскопии. Техническим результатом изобретения является повышение отклика детектора на микроволновое излучение, снижение шумового фактора, возможность реализации четырехзондовой схемы измерений, а также интеграции с СКВИД устройствами считывания информации. Сущность изобретения: детектор терагерцового излучения болометрического типа включает джозефсоновский переход на основе тонкопленочной структуры, содержащей слои сверхпроводникового материала, между которыми размещен

связанный с источником измеряемого сигнала абсорбер из нормального металла. Слои сверхпроводникового материала подключены параллельно к источнику тока смещения и измерительной цепи, индуктивно связанной с датчиком магнитного поля на основе СКВИДа и схемой регистрации. Абсорбер из нормального металла имеет форму удлиненной полоски и размещен через слои диэлектрика между слоями сверхпроводникового материала, при этом упомянутая полоска связана с источником измеряемого сигнала посредством элементов, присоединенных через слои изолятора к ее торцам с возможностью обеспечения взаимно перпендикулярных направлений протекания сверхтока и измеряемого сигнала. 5 з.п. ф-лы, 4 ил.

**RU 2 437 189 C1**

**RU 2 437 189 C1**



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.  
*H01L 39/22* (2006.01)  
*B82B 1/00* (2006.01)

**(12) ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: **2010137284/28, 08.09.2010**

(24) Effective date for property rights:  
**08.09.2010**

Priority:

(22) Date of filing: **08.09.2010**

(45) Date of publication: **20.12.2011 Bull. 35**

Mail address:

**119991, Moskva, GSP-1, Leninskie gory, 1, str.2,  
NIJJaF MGU**

Документ находится в Патентном отделе

**ОКБ АСТРОН**

140081, Московская область, г.Лыткарино,  
ул.Парковая, д.1

**(54) DETECTOR OF TERAHERTZ EMISSION ON JOSEPHSON HETEROSTRUCTURE**

(57) Abstract:

FIELD: electricity.

SUBSTANCE: detector of terahertz emission of bolometric type includes Josephson junction on the basis of thin-film structure containing layers of superconducting material, between which there arranged is absorber from normal metal, which is connected to source of measured signal. Layers of superconducting material are parallel connected to offset current source and measuring circuit inductively connected to magnetic field sensor on the basis of squid and recording geometry. Absorber from normal metal has the shape of elongated strip and is arranged through layers of dielectric between

layers of superconducting material; at that, the above strip is connected to the source of the measured signal by means of the elements connected through layers of insulator to its edges with possibility of providing mutually perpendicular directions of flow of supercurrent and the measured signal.

EFFECT: increasing response of the detector to microwave emission, reducing the noise factor, possibility of implementing four-point probe measurement circuit, as well as integration with squid information readout devices.

6 cl, 4 dwg

R U 2 4 3 7 1 8 9 C 1

R U 2 4 3 7 1 8 9 C 1

Изобретение относится к измерительной технике, а именно к детекторам микроволнового излучения, и может быть использовано в приемных системах для целей радиоастрономии, интроскопии и спектроскопии.

5 Конструкции и функциональные возможности устройств с использованием детекторов терагерцового СВЧ-излучения на основе джозефсоновских переходов (далее ДП) описаны. Так, известен интегральный спектрометр субмиллиметровых волн с системой фазовой автоподстройки частоты, выполненный в виде интегральной микросхемы, содержащей длинный ДП, используемый в качестве болометра (RU 10 2325003 C1, Кошелец, 20.05.2008).

Описано приемное устройство СВЧ с использованием ДП в виде набора вертикально-ориентированных SINIS (СИНИС)-структур, которые представляют многослойную меза-структуру, имеющую последовательно нанесенные на подложку 15 слои сверхпроводникового материала (S), изолятора (I), нормального металла (N), изолятора (I) и сверхпроводникового материала (S) (US 6348699, Zehe, 19.02.2002). Однако использование SINIS-структур ДП в данном случае не является необходимым условием: детектор может быть реализован на наборе SIS (сверхпроводник/изолятор/сверхпроводник) или SNS (сверхпроводник/нормальный металл/сверхпроводник). Детектор, состоящий из множества ДП, имеет существенные 20 геометрические размеры, сложен в изготовлении, что затруднит изготовление из них матриц детекторов.

В изобретении (US 6815708, Iguchi, et al., 09.11.2004) описан сверхпроводящий приемный элемент на ДП для детектирования электромагнитного излучения в ТГц 25 диапазоне длин волн, выполненный в форме чипа. Однако не показана возможность реализации для высокочастотной терагерцовой области, в которой детекторы на одиночных ДП на обычных, низкотемпературных сверхпроводниках, не функционируют. Изготовление качественных детекторов на высокотемпературных 30 сверхпроводящих купратах до настоящего времени является сложной технологической проблемой, что затрудняет их болометрическое применение.

Описаны эксперименты по детектированию излучения субмиллиметрового диапазона длин волн на SINIS-структуре (М.Тарасов и др. «Терагерцовая спектроскопия с джозефсоновским излучателем и СИНИС болометром». Письма в 35 ЖЭТФ, 2004, том 79, вып.6, с.356-361). Устройство включает четыре SIN перехода, установленные последовательно и образующие SINIS-структуру, при этом внутренние SIN переходы предназначены либо для предварительного электронного охлаждения, либо для подачи высокочастотного сигнала, при этом в качестве отклика 40 используется активный, низкочастотный отклик. Болометр реагирует на возбужденные электроны в области относительно больших энергий, что ограничивает величину его отклика.

В изобретении (WO 2009101257 A1, Giazotto et al., 20.08.2009 - ближайший аналог) описан приемник терагерцового излучения, реализованный на длинном ДП, имеющем 45 структуру SNS (сверхпроводник/нормальный металл/сверхпроводник), и формирующий выходной сигнал за счет изменения электронной температуры N слоя под действием терагерцового излучения. Откликом такого детектора является изменение критического тока ДП, что тождественно изменению его кинетической 50 индуктивности. SNS-структура не эффективна из-за квантового характера поглощения излучения в ее N-абсорбере. При квантовом поглощении микроволнового излучения электроны возбуждаются вплоть до энергии кванта сигнала  $\omega_0$ , а андреевское отражение эффективно удерживает возбуждение только с энергией менее

сверхпроводящей щели  $\Delta \ll \omega_0$ , позволяя возбужденным электронам с энергией больше  $\Delta$  покидать абсорбер. Поэтому возбужденные высокочастотным сигналом электроны N-абсорбера не будут удерживаться в области N-абсорбера сверхпроводниковыми зеркалами, что приведет к ухудшению сигнальных характеристик предлагаемого детектора. Также в данном изобретении не прояснена система связи ДП с терагерцовым сигналом. При этом подача излучения по пути протекания тока может привести к поглощению микроволнового излучения непосредственно в электродах из сверхпроводникового материала, что приведет к нестабильной работе приемника, а четырехзондовая схема нереализуема в длинном SNS-ДП из-за геометрических ограничений.

Настоящее изобретение направлено на усовершенствование конструкции детектора микроволнового излучения, осуществление новой топологии слоев джозефсоновского перехода, позволяющего осуществлять уверенный прием терагерцового излучения.

Детектор терагерцового излучения болометрического типа включает джозефсоновский переход на основе тонкопленочной структуры, содержащей слой сверхпроводникового материала, между которыми размещен связанный с источником измеряемого сигнала абсорбер из нормального металла, слой сверхпроводникового материала подключены параллельно к источнику тока смещения и измерительной цепи, индуктивно связанной с датчиком магнитного поля на основе СКВИДа и схемой регистрации.

Отличие состоит в том, что абсорбер из нормального металла имеет форму удлиненной полоски и размещен через слой диэлектрика между слоями сверхпроводникового материала, при этом упомянутая полоска связана с источником измеряемого сигнала посредством элементов, присоединенных через слой изолятора к ее торцам с возможностью обеспечения взаимноперпендикулярных направлений протекания сверхтока и измеряемого сигнала.

Детектор может характеризоваться тем, что каждый элемент для связи полоски с источником измеряемого сигнала представляет микрополосковую линию передачи, выполненную из нормального металла или сверхпроводникового материала.

Детектор может характеризоваться и тем, что нормальный металл представляет собой алюминий или медь.

Детектор может характеризоваться также тем, что слой диэлектрика выполнены из оксида алюминия или двуокиси титана.

Детектор может характеризоваться, кроме того, тем, что слой изолятора выполнены из оксида алюминия или двуокиси титана и имеют толщину 5-7 нм.

Детектор может характеризоваться также и тем, что размеры полоски составляют: длина 15-20 мкм, ширина 0,1-0,2 мкм, толщина 5-7 нм.

Технический результат изобретения - повышение отклика детектора на микроволновое излучение, снижение шумового фактора, возможность реализации четырехзондовой схемы измерений, а также интеграции с СКВИД устройствами считывания информации.

Сущность изобретения поясняется на чертежах, где:

на фиг.1 показана конструкция патентуемого детектора и схема его подключения;

на фиг.2 - функции распределения неравновесных квазичастиц (кривая 1),

спектральная плотность сверхпроводящего тока (кривая 2) и плотность состояний N-абсорбера (кривая 3), как функции энергии, нормированной на частоту сигнала;

на фиг.3,4 - графики зависимости отклика сверхтока от мощности  $P$  (фиг.3) и

частоты  $\nu_0$  (фиг.4) поглощаемого микроволнового сигнала.

Детектор терагерцового излучения болометрического типа содержит ДП на основе тонкопленочной гетероструктуры. Он состоит из слоев 1, 2 из сверхпроводникового материала, между которыми через слои 3, 4 диэлектрика размещен абсорбер из нормального металла в форме удлиненной полоски 5, имеющей длину  $z$ , ширину  $w$  и толщину  $t$ . Торцы полоски 5 абсорбера через слои 6, 7 изолятора связаны с микрополосковыми линиями 8, 9 передачи, по которым на структуру поступает измеряемый сигнал от источника измеряемого сигнала (не показан). Источником измеряемого сигнала может являться любое из известных приемных ТГц устройств, например антенна соответствующего диапазона длин волн. Микрополосковые линии 8, 9 передачи могут быть выполнены как из нормального металла, например алюминия или меди, так и из сверхпроводникового материала, например ниобия или тантала.

Слои 1, 2 сверхпроводникового материала подключены параллельно посредством токоподводов 10, 11 к источнику 12 тока  $i_b$  смещения и к измерительной цепи, содержащей индуктивность  $L$  13, обеспечивающую индуктивную связь с датчиком 14 магнитного поля на основе СКВИДа, подключенного к схеме 15 регистрации.

Слои 3, 4 диэлектрика могут быть выполнены из известных в микроэлектронике материалов, а именно оксида алюминия, двуокиси титана и др., и иметь толщину, характерную для атомарных размеров. Размеры полоски 5 могут составлять: длина  $z=15-20$  мкм, ширина  $w=0,1-0,2$  мкм, толщина  $t=5-7$  нм.

Устройство работает следующим образом. После помещения в криостат (не показан) и достижения состояния сверхпроводимости на структуру между слоями 1, 2 сверхпроводникового материала подается ток  $i_b$  смещения. Структура присоединена к измерительной цепи, содержащей индуктивность  $L$  13, вокруг которой возникает магнитное поле, величина которого пропорциональна току, протекающему через ДП. Датчик 14 (СКВИД) посредством схемы 15 регистрации измеряет величину магнитного поля. При подаче измеряемого сигнала на абсорбер-полоску 5 величина регистрируемого датчиком 14 магнитного поля изменяется, что фиксируется схемой 15.

Достижение технического результата иллюстрируется графическими материалами.

На фиг.2 представлена функция распределения неравновесных квазичастиц  $f_1(\epsilon)$  (кривая 1), спектральная плотность сверхпроводящего тока  $\text{Im } I_S(\epsilon, \pi/2)$  (кривая 2) и плотность состояний абсорбера  $N_n(\epsilon, \pi/2)$  (кривая 3) как функции энергии  $\epsilon$ , нормированной на частоту сигнала  $\nu_0$ . Эти графики получены для измеряемой микроволновой мощности  $P=10^{-15}$  Вт на частоте  $10^{12}$  Гц, поглощаемой в объеме  $10^{-19}$  м<sup>3</sup> абсорбера. Из представленных зависимостей (кривые 2, 3) видно, что они имеют небольшую "минищель" в области малых энергий. При этом спектральная плотность сверхпроводящего тока (кривая 2) имеет резкий максимум сразу за "минищелью" и два близкорасположенных, знакопеременных максимума. Как видно из фиг.2, функция  $f_1(\epsilon)$  достаточно быстро убывает с ростом энергии  $\epsilon$ , а сверхток через патентуемую джозефсоновскую гетероструктуру определяется интегралом по энергии от произведения  $\text{Im } I_S(\epsilon, \varphi)$  и  $f_1(\epsilon)$  по формуле (W.Belzig, F.K.Wilhelm, C.Bruder et al., Superlattices and Microstruct. 25, 1251 (1999)). Соответственно, основной вклад в сверхток дают неравновесные электроны в области первого "пика" спектральной плотности сверхпроводящего тока  $\text{Im } I_S(\epsilon, \varphi)$  в области малых энергий  $\epsilon \sim \Delta/\gamma_{\text{eff}}$  сразу за "минищелью". Это обеспечивает слабую зависимость отклика детектора от степени термолизаии неравновесной функции распределения электронов по энергии. Сильная зависимость от степени термолизаии проявляется преимущественно для больших значений энергии.

На фиг.3 представлены зависимости отклика сверхтока патентуемой гетероструктуры от мощности  $P$  поглощаемого микроволнового сигнала. Кривая 1 соответствует расчетам, проведенным с использованием кинетического уравнения (ж. Письма в ЖЭТФ, т.89, вып.9, с.541, уравнение (6)), а кривая 2 соответствует

5 результатам, полученным в рамках двухтемпературной модели (F.C.Wellstood, C.Urbina, and J.Clarke, Phys.Rev. B, 49, 5942 (1994)). При численном расчете мы предполагали  $T_0=0.1$  К, а константу электрон-фононной связи абсорбера-полоски 5 считали равной  $S=2 \cdot 10^8 \text{Вт} \cdot \text{К}^{-5} \cdot \text{м}^{-3}$  (P.Giazotto, T.T.Hekkila, A.Luukanen et al., Rev.Mod.

10 Phys. 78, 217 (2006)). Из сравнения кривых 1, 2 следует, что результаты расчетов отклика сверхтока патентуемой ГП в обеих моделях отличаются незначительно, что дает возможность утверждать о слабой зависимости предлагаемого детектора от степени термолиза функции распределения возбужденных электронов.

На фиг.4 представлены графики зависимости отклика  $\eta=\delta I_C/P$  сверхтока в ДП с патентуемой конструкцией от частоты  $\nu_0$  поглощаемого микроволнового сигнала. Аналогично графикам фиг.3, кривая 1 получена с использованием квантового кинетического уравнения, кривая 2 константа - в рамках двухтемпературной модели. Видно, что величина отклика, рассчитанная с использованием квантового

20 кинетического уравнения, уменьшается с ростом частоты, пересекая независимое от частоты микроволнового сигнала значение отклика, полученное в рамках двухтемпературной модели, при  $\nu_0=1.3$  ТГц. При этом величина отклика, рассчитанного с использованием кинетического уравнения, уменьшается с ростом частоты существенно медленнее обратно пропорциональной зависимости,

25 характерной для "фотонных счетчиков" (И.А.Девятов, П.А.Крутицкий, М.Ю.Куприянов. Письма в ЖЭТФ, т.84, 61 (2006)).

Достигнутые большие значения отклика патентуемого детектора на микроволновое излучение позволяют сделать вывод, что шумовой параметр NEP детектора определяется его собственными флуктуациями, а не флуктуациями последующих каскадов обработки сигнала. При этом отсутствие в данном детекторе

30 найквистовых шумов ограничивает его флуктуации термодинамическими флуктуациями электронного газа в N-абсорбере (полоска 5), связанного с решеткой.

Оценка величины  $NEP_{TFN}$ , выполненная по формулам упомянутой публикации P.Giazotto и др. (2006), учитывая малые размеры полоски 5 ( $V=10^{-19} \text{м}^3$ ) и низкую рабочую температуру  $T_0=0,1$  К, показала, что  $NEP_{TFN}$  составит значения менее  $10^{-19} \text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-0.5}$  в двухтемпературной модели при  $P < 10^{-13} \text{Вт}$ . Используя типичные значения коэффициента  $M=10^{-8}$  Гн взаимной индукции между элементами 13 и 14 (фиг.1)

40 и разрешение  $10^{-7} \Phi_0 \cdot \text{Гц}^{-0.5}$  для датчика 14 на СКВИДе постоянного тока (M.Kiviranta, et al., Supercond. Sci. Technol. 17, S285 (2004)), расчеты показывают, что значения шумового параметра  $NEP_{SQUID}=\delta\Phi/\eta M$ , обусловленного флуктуациями считывающего СКВИДа, оказываются более чем на четыре порядка меньше

45 флуктуации  $NEP_{TFN}$ .

Кроме того, в патентуемом устройстве величина отклика оказалась соизмеримой как при неравновесной, так и термолизованной функции распределения электронов в N-абсорбере. При этом самосогласованный расчет показал, что поглощаемая

50 мощность эффективно удерживается в N-абсорбере слоями 3, 4 диэлектрика. Возможность реализации четырехзондовой схемы подключения (слои 1, 2 сверхпроводникового материала и концы полоски 5 абсорбера подключены взаимно перпендикулярно) исключает интерференцию с прямым поглощением СВЧ в

сверхпроводящих электродах.

#### Формула изобретения

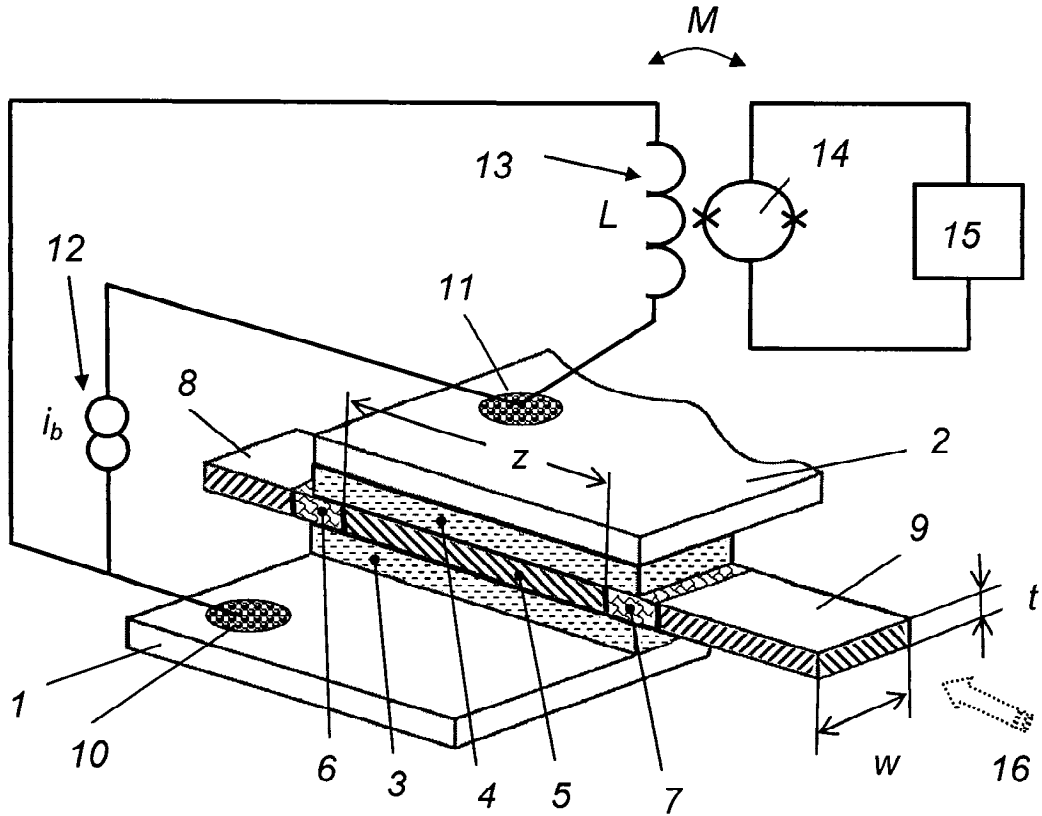
- 5 1. Детектор терагерцового излучения болометрического типа, включающий джозефсоновский переход на основе тонкопленочной структуры, содержащей слои сверхпроводникового материала, между которыми размещен связанный с источником измеряемого сигнала абсорбер из нормального металла,
- 10 слои сверхпроводникового материала подключены параллельно к источнику тока смещения и измерительной цепи, индуктивно связанной с датчиком магнитного поля на основе СКВИДа и схемой регистрации, отличающийся тем, что
- 15 абсорбер из нормального металла имеет форму удлиненной полоски и размещен через слои диэлектрика между слоями сверхпроводникового материала, при этом упомянутая полоска связана с источником измеряемого сигнала посредством элементов, присоединенных через слои изолятора к ее торцам с возможностью обеспечения взаимно перпендикулярных направлений протекания сверхтока и измеряемого сигнала.
2. Детектор по п.1, отличающийся тем, что каждый элемент для связи полоски с
- 20 источником измеряемого сигнала представляет микрополосковую линию передачи, выполненную из нормального металла или сверхпроводникового материала.
3. Детектор по п.1, отличающийся тем, что нормальный металл представляет собой алюминий или медь.
4. Детектор по п.1, отличающийся тем, что слои диэлектрика выполнены из оксида
- 25 алюминия или двуокиси титана.
5. Детектор по п.1, отличающийся тем, что слои изолятора выполнены из оксида алюминия или двуокиси титана и имеют толщину 5-7 нм.
6. Детектор по п.1, отличающийся тем, что размеры полоски составляют: длина 15-
- 30 20 мкм, ширина 0,1-0,2 мкм, толщина 5-7 нм.

35

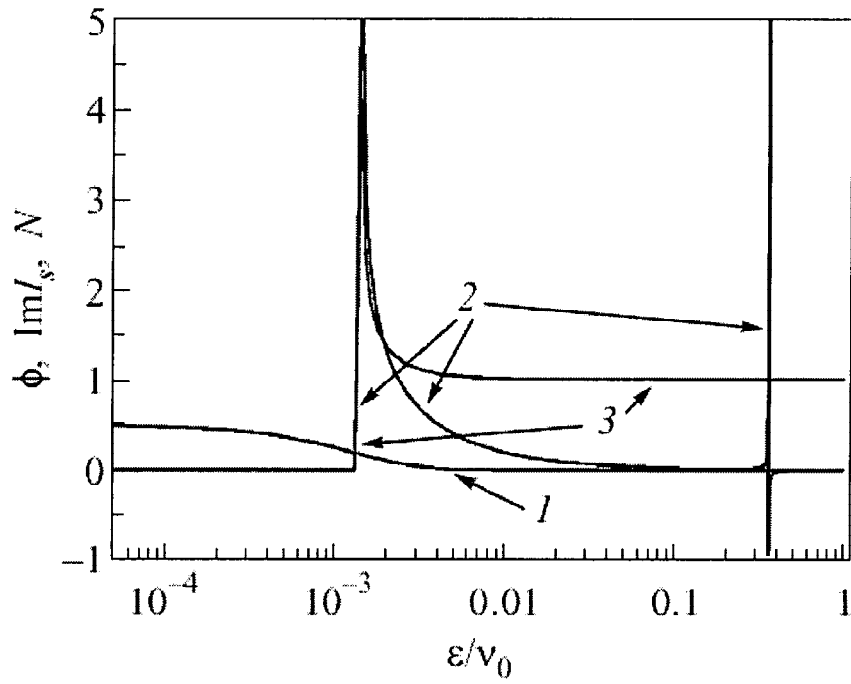
40

45

50

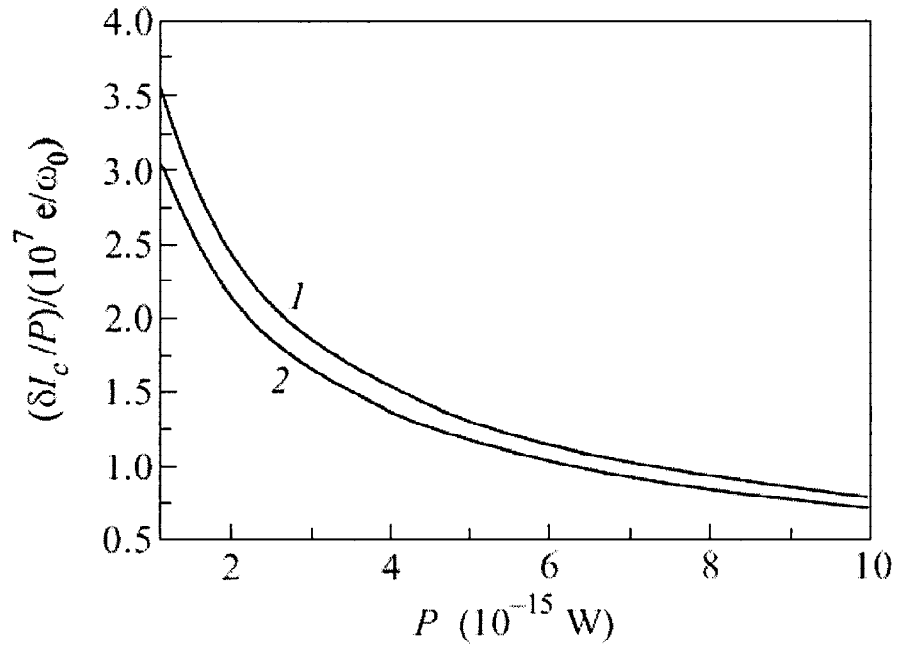


ФИГ. 1

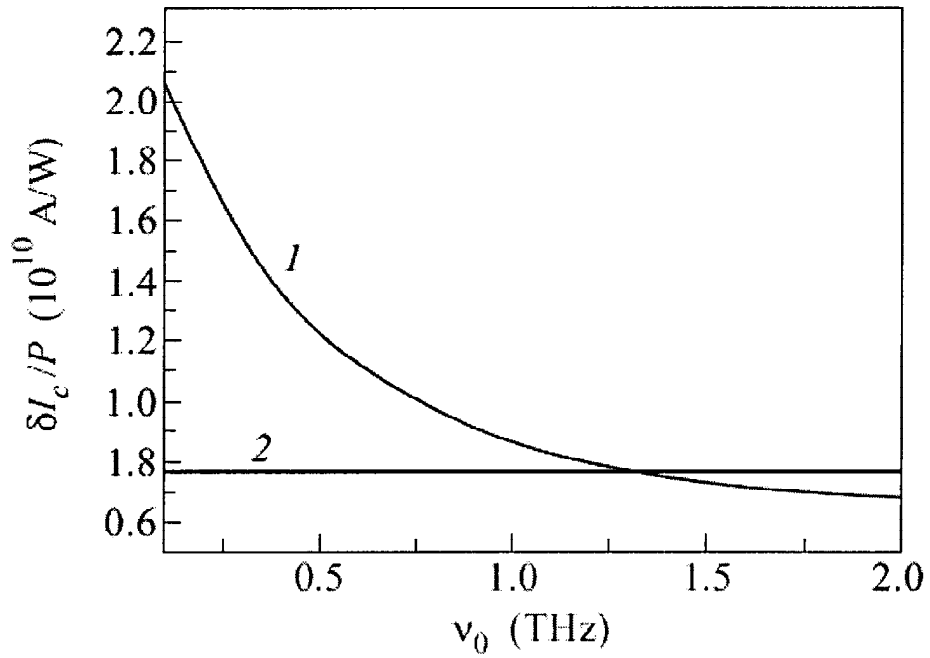


ФИГ. 2





ФИГ. 3



ФИГ. 4