

Терагерцовая спектроскопия с джозефсоновским излучателем и СИНИС болометром

М. Тарасов^{+□}, Л. Кузьмин^{*□}, Е. Степанцов^{△□}, И. Агуло[□], А. Калабухов^{*□}, М. Фоминский^{+□}, Z. Ivanov[□],
T. Claeson[□]

⁺ Институт радиотехники и электроники РАН, 114112 Фрязино, Московская обл., Россия

^{*} Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 119899 Москва, Россия

[△] Институт кристаллографии РАН, 117333 Москва, Россия

[□] Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

Поступила в редакцию 26 января 2004 г.

После переработки 17 февраля 2004 г.

Измерен отклик по напряжению болометра на горячих электронах в тонкой пленке нормального металла структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (СИНИС) на излучение высокотемпературного джозефсоновского перехода в терагерцовом диапазоне. Болометры были интегрированы с планарными логопериодическими и двойными дипольными антеннами, а джозефсоновские переходы интегрированы с логопериодическими антеннами. Измерения показали, что джозефсоновский переход, находящийся при 260 мК, перегревается транспортным током и электронная температура превышает 3 К при напряжении смещения 1 мВ. Максимум отклика болометра с двойной дипольной антенной наблюдался на частоте 300 ГГц, которая соответствует расчетной. Джозефсоновское излучение наблюдалось на частотах до 1.7 ТГц. Отклик болометра по напряжению достигает $4 \cdot 10^8$ В/Вт, полная мощность, эквивалентная шуму $1.5 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2}.

PACS: 74.50.+g, 85.25.Pb

1. СИНИС болометры. Болометры на горячих электронах в нормальном металле с емкостной развязкой структуры сверхпроводник-изолятор-нормальный металл-изолятор-сверхпроводник (СИНИС) были предложены в [1] и экспериментально исследованы в [2]. Отклик на внешний микроволновый сигнал и мощность, эквивалентная шуму (МЭШ), такого болометра определяются его электронной температурой. Для улучшения шумовых и сигнальных характеристик такого болометра было предложено использовать прямое электронное охлаждение абсорбера из нормального металла с помощью туннельного перехода сверхпроводник-изолятор-нормальный металл (СИН) [3]. Эффект электронного охлаждения был продемонстрирован в [4] и затем развит в [5].

Общий вид подложки с болометрами приведен на рис.1а. В центре подложки расположена широкополосная логопериодическая антенна диапазона частот 0.2–2 ТГц, справа две двойных дипольных антенны с центральной частотой 300 ГГц, слева двойная дипольная антенна с центральной частотой 600 ГГц. Сверху и снизу расположены тестовые структуры с двумя парами СИН переходов для исследования эффекта электронного охлаждения. Эффект электронного

охлаждения в такой структуре описан в [6]. Изображение центральной части болометра, полученное с помощью атомно-силового микроскопа, приведено на рис.1б.

Первым шагом в изготовлении образцов было нанесение золотых контактных площадок и ловушек для горячих квазичастиц. Рисунок формировали обычной фотолитографией. Золото толщиной 60 нм напыляли термически. Следующим шагом было формирование туннельных переходов и абсорбера. Рисунок формировали прямой электронной литографией. Пленки термически напыляли под разными углами через подвешенную маску из двойного фоторезиста. При такой технологии удается в едином процессе в вакууме нанести пленки разных металлов и обеспечить их перекрытие в области туннельных переходов. Пленку алюминия толщиной 65 нм напыляли под углом 60° к подложке и окисляли 2 мин в кислороде под давлением 0.1 мБар для получения туннельного барьера. Двуслойную пленку абсорбера из хрома и меди суммарной толщиной 75 нм напыляли в направлении перпендикулярно к подложке. Объем абсорбера составил 0.18 мкм³. Внешние охлаждающие СИН переходы в тестовых структурах

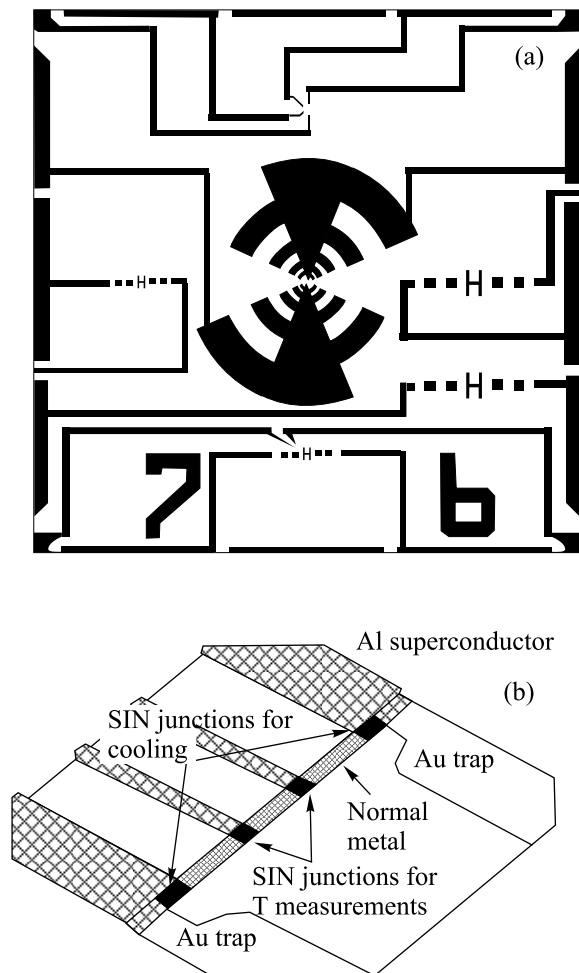


Рис.1. Общий вид подложки с болометром (а) и изображение центральной части болометра, полученное в микроскопе атомных сил (б)

имели сопротивление по 0.86 кОм, а внутренние – по 5.3 кОм. Внутренние переходы имели простую крестообразную геометрию, в которой участок полоски нормального металла пересекает окисленный алюминиевый электрод. Область перекрытия составляет 0.2×0.3 мкм. Структура внешних переходов такова, что концы абсорбера из нормального металла накрывают угол каждого из внешних алюминиевых окисленных электродов, и область переходов составляет 0.55×0.82 мкм. Увеличение размера алюминиевых электродов позволяет улучшить диффузию горячих квазичастиц, вынесенных из абсорбера туннельным током, избежать обратного туннелирования горячих квазичастиц, избежать реабсорбции в нормальном металле фононов, испускаемых при рекомбинации квазичастиц. Дополнительно в одной из тестовых структур с этой же целью применялись ловушки горячих квазичастиц в виде пленки нормального металла, расположенной вблизи области перехода

под алюминиевой пленкой. В экспериментах с электронным охлаждением приложение постоянного смещения вблизи энергетической щели внешних СИН переходов приводило к снижению электронной температуры, измеряемой внутренними СИН термометрами, с 260 мК до 100 мК.

2. Высокотемпературные джозефсоновские излучатели. Максимальная частота и мощность джозефсоновских колебаний, согласно [7, 8], определяются критическим током I_c , нормальным сопротивлением R_n и их произведением $V_c = I_c R_n$. Характерная частота джозефсоновского перехода $f_c = (2e/h)V_c$, где e – заряд электрона, h – постоянная Планка. Характерное напряжение джозефсоновского перехода не превышает напряжения энергетической щели, что соответствует частотам порядка 700 ТГц для ниобиевых переходов, а для высокотемпературных сверхпроводников с критической температурой выше 77 К может, в принципе, быть более 10 ТГц. Однако высокие значения характерного напряжения и частоты генерации реализуются только при температурах, значительно ниже критической. В частности, для ВТСП переходов значения V_c выше 5 мВ наблюдаются при гелиевых температурах и ниже. Для ВТСП переходов на бикристаллических подложках очень важным является выбор материала подложки. Наилучшие характеристики на постоянном токе получаются у переходов на подложках из титаната стронция, однако высокая диэлектрическая постоянная и большие потери на высоких частотах не позволяют использовать эти подложки в субмиллиметровом диапазоне. Лучшими характеристиками обладают подложки из сапфира, которые и были использованы для изготовления джозефсоновских излучателей. В отличие от обычных бикристаллических подложек с разориентацией в плоскости подложки, нами были использованы подложки с наклоном кристаллографической оси к плоскости подложки. Эпитаксиальные YBaCuO пленки выращивали методом лазерной абляции на подложках с наклоном оси c в направлении $\langle 100 \rangle$ под углом $14^\circ + 14^\circ$. Пленки толщиной 250 нм наносили поверх буферного слоя CeO_2 . Критическая температура пленок составляла $T_c = 89$ К и ширина перехода $\Delta T_c = 1.5$ К. Бикристаллические джозефсоновские переходы шириной от 1.5 до 6 мкм при температуре 4.2 К имели характерное напряжение $V_c \geq 4$ мВ, и при облучении внешним источником субмиллиметрового излучения на вольт-амперных характеристиках наблюдались ступени Шапиро при напряжениях до 4 мВ, что соответствует частотам выше 2 ТГц.

3. Отклик болометра на изменение температуры и поглощаемой мощности. Основные характеристики

болметра были измерены при температуре 260 мК в криостате с гелием-3 абсорбционным рефрижератором замкнутого цикла. Максимальное значение температурного отклика по напряжению составило 1.6 мВ/К для СИН перехода сопротивлением 10 кОм и по току 55 нА/К для перехода 6 кОм.

Для структур с четырьмя СИН переходами можно было прикладывать мощность к центральной паре переходов и измерять отклик на внешней паре. Измеренные зависимости отклика от напряжения смещения приведены на рис.2. Наибольшее значение от-

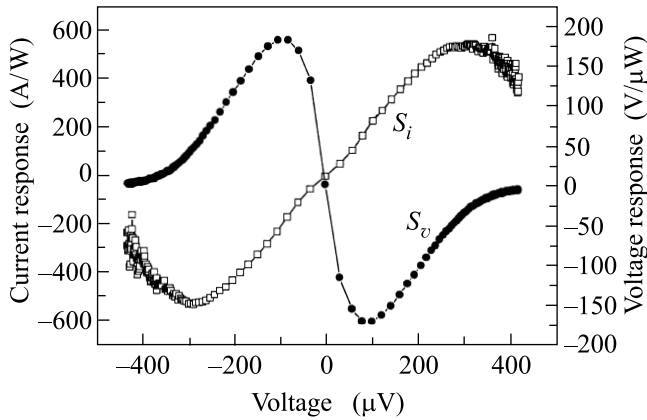


Рис.2. Отклик по току и по напряжению для болметра с сопротивлением туннельных переходов 10 кОм от приложенного напряжения смещения при температуре 260 мК

клика по напряжению составило $4 \cdot 10^8$ В/Вт для пары переходов сопротивлением 70 кОм и 55 А/Вт для пары сопротивлением 10 кОм. Эти значения соответствуют мощности эквивалентной шуму (NEP).

$$NEP = I_n/S_i \text{ или } NEP = V_n/S_v, \quad (1)$$

где I_n токовый шум, V_n – шум напряжения, $S_i = dI/dP$ – токовый отклик, $S_v = dV/dP$ отклик болметра по напряжению. Взяв значение шумового напряжения нашего предусилителя 3 нВ/Гц^{1/2}, получаем значение технической мощности эквивалентной шуму:

$$TNEP = 1.25 \cdot 10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{1/2}. \quad (2)$$

Подставляя измеренные значения отклика на изменение температуры и мощности, получаем величину тепловой проводимости болметра:

$$G_V = \frac{\partial P}{\partial T} = \frac{\partial V/\partial T}{\partial V/\partial P} = 0.8 \cdot 10^{-11} \text{ Вт/К}. \quad (3)$$

Термодинамическая мощность, эквивалентная шуму, определяется выражением

$$NEP_{TD}^2 = 4kT^2G. \quad (4)$$

С учетом $G = 5\Sigma\nu T^4 = 10^{-11}$ Вт/К получаем $NEP_{TD} = 1.4 \cdot 10^{-18}$ Вт/Гц^{1/2}, а подставив тепловую проводимость в режиме задания напряжения, получим значение

$$NEP_V = 1.3 \cdot 10^{-18} \text{ Вт/Гц}^{1/2}. \quad (5)$$

Применение маломощного считывающего устройства на основе сверхпроводникового квантового интерферометра (СКВИДа) с разрешением по току на уровне 50 фА/Гц^{1/2} позволит улучшить мощность эквивалентную шуму почти на порядок по сравнению с технической, определяемой шумами теплового транзисторного усилителя.

4. Измерение излучения джозефсоновского перехода при 260 мК. В первой серии экспериментов обратная сторона подложки с джозефсоновским излучателем непосредственно прижималась к обратной стороне подложки с болметром (см. рис.3) и эта сборка охлаждалась до 260 мК. Поскольку планарные ан-

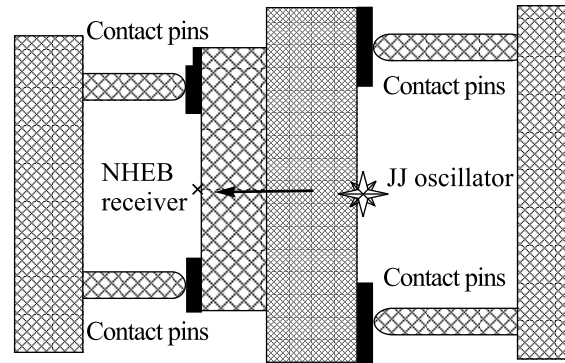


Рис.3. Схематическое изображение эксперимента при 260 мК, когда обратная сторона подложки с джозефсоновским излучателем непосредственно прижимается к обратной стороне подложки с болметром

тенны нанесены на подложки с диэлектрической постоянной больше 10, то основной лепесток диаграммы направленности ориентирован в диэлектрик и при расположении излучающей антенны напротив приемной происходит достаточно эффективная передача мощности от джозефсоновского перехода к болметру. Логопериодические антенны излучателя и приемника идентичны и рассчитаны на диапазон частот 200 ГГц–2 ТГц.

Зависимость отклика болметра от напряжения, приложенного к джозефсоновскому переходу, представлена на рис.4. Прикладывая магнитное поле, можно подавить критический ток джозефсоновского перехода до нуля, и тогда переход представляет собой простой резистор, нагреваемый током. В

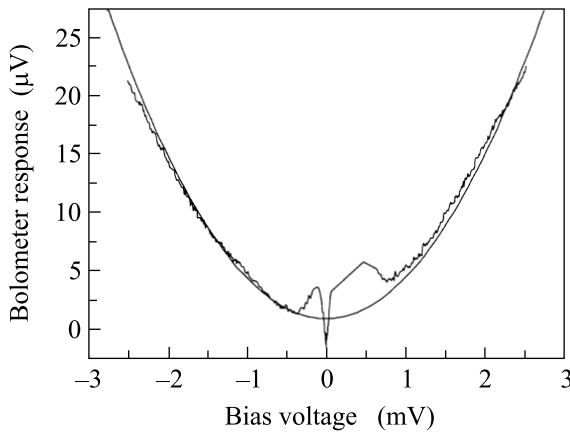


Рис. 4. Отклик болометра на излучение джозефсоновского излучателя. Сплошная парабола соответствует джоулеву разогреву

этом случае, в зависимости от смещения на излучающем переходе, болометр принимает тепловое излучение холодной или нагретой нагрузки. Наблюдается параболическая зависимость отклика от смещения, что соответствует джоулеву нагреву пропорционально квадрату приложенного напряжения. Этот эксперимент позволяет четко разделить джозефсоновскую компоненту с излучением на частоте, соответствующей напряжению смещения, и широкополосную тепловую компоненту, у которой мощность пропорциональна квадрату напряжения смещения. Важно отметить, что выше 1 мВ и в отсутствие магнитного поля, и при его наличии происходит сильный перегрев джозефсоновского перехода, и его эффективная электронная температура значительно превышает равновесную температуру рефрижератора.

Максимальную мощность джозефсоновского излучения можно оценить (см. [7]) как $P_{osc} = 0.1 \cdot I_c V_c = 2 \cdot 10^{-9}$ Вт. В случае излучения логопериодической антенной с ножевой диаграммой направленности и приема двойной дипольной с игольчатой диаграммой направленности происходит рассогласование диаграмм направленности и рост потерь более 10 дБ. На подложке излучателей расположены пять логопериодических антенн, а на подложке болометров – две двойных дипольных и одна логопериодическая, при этом антенны излучателя и приемника никогда не были направлены строго друг на друга, что приводило к потерям не менее 10 дБ. Между излучателем и приемником не было собирающих линз, происходил прием расходящихся пучков, что добавляло еще более 10 дБ потерь. Рассогласование с антенной, рассогласование приемного и излучающего пучков, неточное совмещение направлений для разных антенн, отражения от границы

сапфир/кремний, различие в поляризации приводят к суммарным потерям не менее 30 дБ на частотах порядка 1 ТГц, что соответствует мощности, принимаемой болометром, менее 10^{-12} Вт. Взяв отклик для данного болометра $S = 1.1 \cdot 10^8$ В/Вт получаем максимальное значение отклика по напряжению на уровне $1.1 \cdot 10^{-4}$ В. В наших экспериментах величина отклика на джозефсоновское излучение достигала 10 мкВ. Разница в один порядок величины может быть связана с неидеальными характеристиками джозефсоновского перехода, избыточным током, тепловым перегревом, что снижает выходную мощность. Отклик на неджозефсоновское излучение на параболическом участке кривой отклика можно отнести к приему субмиллиметрового и ИК излучения от согласованной нагрузки, включенной в широкополосную антенну, и излучающую в квазиоптический тракт.

Если принять модель перегрева джозефсоновского перехода как для мостика переменной толщины [4], то можно оценить температуру в центре мостика

$$T_m = \sqrt{T_b^2 + 3 \left(\frac{eV}{2\pi k} \right)^2}. \quad (6)$$

Из этого соотношения можно получить эквивалентную электронную температуру около 3 К при смещении джозефсоновского перехода на 1 мВ. Учитывая, что тепловое излучение рассеивается в телесный угол 4π и что болометр находится на расстоянии около 1 мм в диэлектрике, становится понятно значение эффективной температуры, измеряемой болометром, на уровне 5 мК. Поскольку мощность сначала излучается, а затем принимается, то необходимо также учесть квантовый характер излучения по закону Планка:

$$P_r = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1} \cdot 0.3f. \quad (7)$$

По этому соотношению максимальное излучение наблюдается на частоте, соответствующей температуре $hf \approx kT$. Применяя (7) в выражении (1) и пренебрегая фоновой температурой, получим выражение

$$P_{rad} = \frac{0.6}{4\pi^2} \cdot \frac{e^2 V^2}{h}, \quad (8)$$

которое соответствует квадратичной зависимости, наблюдаемой в эксперименте.

Облучение болометра джозефсоновским переходом при 1.8 К. Для увеличения выходной мощности джозефсоновского источника и увеличения частоты генерации необходимо увеличивать характерное напряжение джозефсоновского перехода, то есть

его критический ток. Помещая джозефсоновский переход на He4 ступень охлаждения мы, тем самым, предотвращаем перегрев болометра мощностью постоянного тока смещения джозефсоновского перехода. Как пример можно привести переход сопротивлением 10 Ом на частоте генерации 300 ГГц, в котором рассеивается мощность 0.2 мкВт. На 1 ТГц эта мощность возрастает уже до 2.5 мкВт.

В квазиоптической конфигурации (см. рис.5) болометр размещали на плоской поверхности сапфи-

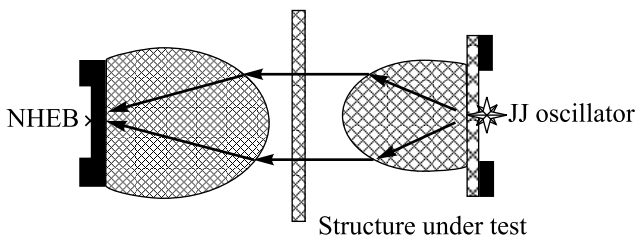


Рис.5. Схематическое изображение квазиоптического эксперимента, когда болометр размещали на плоской поверхности сапфировой гиперполусферической линзы при температуре 260 мК, а подложку с джозефсоновским генератором размещали на аналогичной кремниевой линзе при температуре 1.8 К. Излучатель и приемник находились на расстоянии 3 см друг от друга и между ними может быть помещен исследуемый объект

ровой гиперполусферической линзы при температуре 260 мК, а подложку с джозефсоновским генератором размещали на аналогичной кремниевой линзе при температуре 1.8 К. Излучатель и приемник находились на расстоянии 3 см друг от друга.

Топология джозефсоновских образцов была такая же, как и в экспериментах при 260 мК, но величина критического тока превышала 0.5–1 мА при 4 К. Без приложения внешнего магнитного поля величина $I_c R_n$ превышала 5 мВ, критический ток осциллировал при увеличении магнитного поля, ступени Шапиро при облучении от лампы обратной волны наблюдались до 4 мВ. Экспериментальные кривые представлены на рис.6. На рис.6а приведен отклик болометра с двойной дипольной антенной, рассчитанной на центральную частоту 300 ГГц, и болометра с логопериодической широкополосной антенной диапазона 0.2–2 ТГц. На рис.6б приведены две зависимости отклика болометра с двойной дипольной антенной при двух значениях магнитного поля, то есть при большем (верхняя кривая) и меньшем (нижняя кривая) значении критического тока и характерного напряжения. Отклик наиболее высокой частоты 1.7 ТГц представлен на рис.6с. На этой же кривой видны третья и пятая гармоники основной моды антенны.

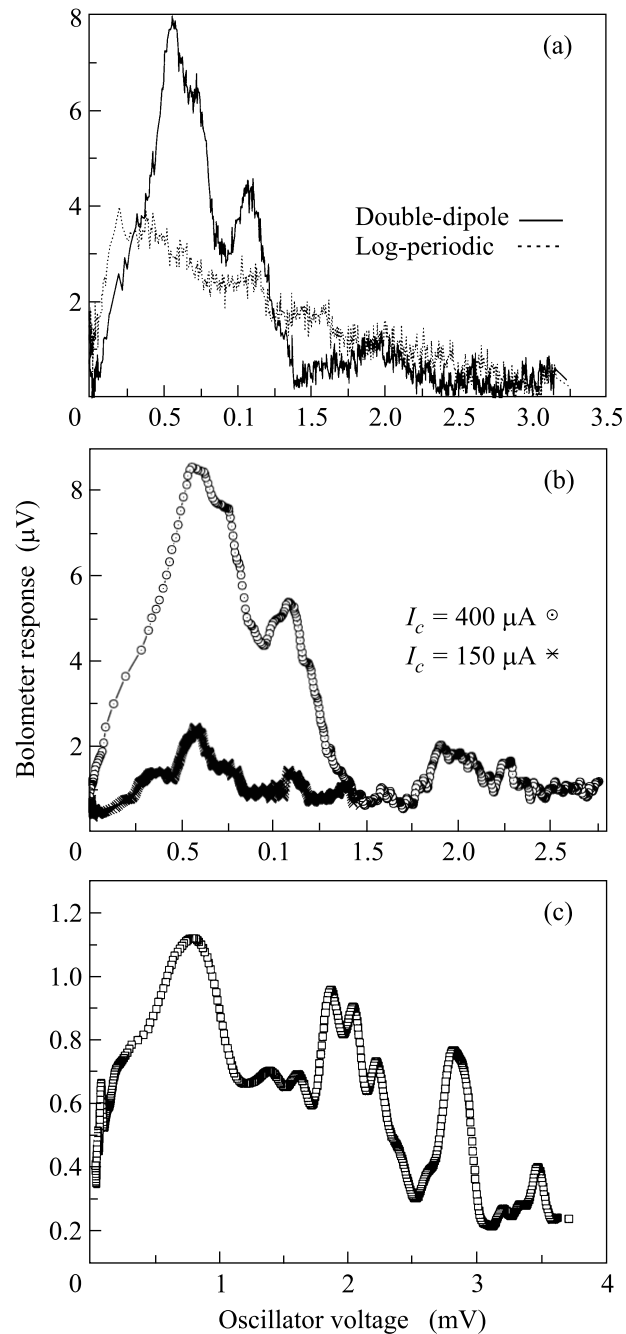


Рис.6. (а) Отклик, измеренный болометром с двойной дипольной антенной (верхняя кривая) и с логопериодической антенной (нижняя кривая). (б) Отклик болометра с двойной дипольной антенной, измеренный при двух значениях магнитного поля когда критический ток составляет 400 мкА (верхняя кривая) и 150 мкА (нижняя кривая). (с) Отклик, измеренный при больших значениях напряжения смещения без магнитного поля. Последний максимум соответствует частоте 1.7 ТГц

Обсуждение результатов. Простое аналитическое выражение для отклика болометра по напряжению [9]

дает грубую оценку практически достижимого отклика по мощности при температуре 260 мК:

$$S_V^{\max} = \frac{2k_b}{e\Sigma\nu T_e^4} = 10^8 \text{ В/Вт}.$$

Более точный расчет, согласно [9], дает $4 \cdot 10^8 \text{ В/Вт}$, что совпадает с экспериментальными значениями. С учетом шумов болометра в рабочей точке вместе с шумами усилителя $V_N = 6 \text{ нВ/Гц}^{1/2}$ в режиме заданного тока мощность, эквивалентная шуму, составит

$$NEP_V = V_N/S_V^{\max} = 1.5 \cdot 10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{1/2}.$$

Оценим также характерные величины для режима задания напряжения с электронным охлаждением. Основной поток тепла будет идти от фононов, как более горячих, к электронам, на которые влияет электронное охлаждение:

$$P_{Ph-e} = \Sigma\nu T_{Ph}^5 = 0.5 \text{ пВт}.$$

Для того чтобы удалить такую мощность из электронной системы, необходимо приложить охлаждающий ток

$$I_c = \frac{eP_{Ph-e}}{k_b T} = 2.2 \cdot 10^{-8} \text{ А}.$$

Этот ток вызывает дробовой шум. Взяв теоретическое значение отклика по току $S_I = e/2k_b T = 6 \cdot 10^3 \text{ А/Вт}$, можно получить величину мощности, эквивалентной шуму,

$$NEP_I = \sqrt{4k_b T_e \Sigma\nu T_{Ph}^5} = 1.3 \cdot 10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{1/2}.$$

Эта величина меньше измеренной $5 \cdot 10^{-17}$, что связано с меньшим значением отклика по току в сравнительно высокоомных СИН переходах по сравнению с теоретической величиной для оптимального сопоставления 1 кОм.

Измерено значение отклика по напряжению СИ-НИС болометра при температуре 260 мК, составив-

шее $4 \cdot 10^8 \text{ В/Вт}$. Мощность, эквивалентная шуму, ограниченная шумами болометра и усилителя, составляет $1.5 \cdot 10^{-17} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$. Измерения излучения ВТСП джозефсоновского перехода показали, что при смещениях порядка 1 мВ переход перегревается, и его эффективная температура превышает 3 К при температуре подложки 260 мК. Показаны преимущества использования ВТСП переходов при низких температурах, которые позволяют получить высокие значения характерного напряжения $I_c R_n$ и повысить частоту излучения, по крайней мере, до 1.7 ТГц. Объединение джозефсоновского излучателя терагерцового диапазона и высокочувствительного СИНИС болометра позволяет реализовать компактный криогенный терагерцовый анализатор цепей с разрешением по частоте порядка нескольких гигагерц.

Работа выполнена при финансовой поддержке шведских фондов VR и STINT, а также европейского фонда INTAS (гранты # 01-686 и # 00-384).

1. L. Kuzmin, *Physica* **B284-288**, 2129 (2000).
2. М. Тарасов, М. Фоминский, А. Калабухов, Л. Кузьмин, Письма в ЖЭТФ **76**, 588 (2002) [*JETP Lett.* **76**, 507 (2002)].
3. L. Kuzmin, I. Devyatov, and D. Golubev, *Proc. Of SPIE* **3465**, 193 (1998).
4. M. Nahum, T. M. Eiles, J. M. Martinis, *Appl. Phys. Lett.* **65**, 3123 (1994).
5. M. Leivo, J. Pecola, and D. Averin, *Appl. Phys. Lett.* **68**, 1996 (1996).
6. М. Тарасов, Л. Кузьмин, М. Фоминский и др., И.Агуло, А.Калабухов, Письма в ЖЭТФ **78**, 1228 (2003).
7. К. К. Лихарев, Б. Т. Ульрих, *Системы с джозефсоновскими контактами*, Изд. Моск. ун-та, 1978.
8. M. Tinkham, M. Octavio, and W. J. Skocpol, *J. Appl. Phys.* **48**, 1311 (1977).
9. D. Golubev and L. Kuzmin, *J. Appl. Phys.* **89**, 6464 (2001).