

УДК 520.622

ДВУМЕРНЫЙ МАССИВ БОЛОМЕТРОВ НА ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ ДЛЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Л. С. Кузьмин

Технологический университет Чалмерса, г. Гётеборг, Швеция
Нижегородский государственный технический университет им. Р. А. Алексеева,
г. Нижний Новгород, Россия

Предложена новая концепция двумерного массива болометров на холодных электронах с рас-
пределёнными дипольными антеннами в фокальной плоскости для высокочувствительных измере-
ний поляризации. Концепция даёт уникальное сочетание высокого поляризационного разрешения
благодаря большому однородному массиву болометров на холодных электронах и оптимального со-
гласования с JFET (Junction Field Effect Transistor)-усилителями благодаря гибкости в соединениях
по постоянному току. Улучшение шумовых характеристик достигается за счёт распределения мощ-
ности приходящего сигнала между многими болометрами на холодных электронах и повышения их
отклика. Это должно привести к существенному повышению чувствительности и динамического диа-
пазона по сравнению с конкурирующими альтернативными технологиями болометров. Надёжность
двумерного массива значительно увеличивается за счёт последовательно-параллельного соединения
большого количества болометров на холодных электронах. Высокое поляризационное разрешение
должно быть обеспечено за счёт равномерного покрытия подложки двумерным массивом на большой
площади и отсутствия сжатия пучка к небольшим сосредоточенным элементам. Фундаментальный
предел чувствительности массива болометров на холодных электронах меньше фотонного шума, ко-
торый рассматривается как предельный уровень, ограниченный фоновым излучением. Оценки шума
болометров с JFET-системой считывания показывают возможность реализовать предельную чув-
ствительность ниже уровня фотонного шума $5 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2} на частоте 350 ГГц для оптической
нагрузки с мощностью 5 пВт. Указанные параметры соответствуют требованиям к приёмной системе
баллонного телескопа BOOMERanG.

ВВЕДЕНИЕ

Измерение поляризации реликтового излучения является одной из важнейших задач наблю-
дательной космологии [1]. Квадрупольная анизотропия несёт информацию о последнем рассеянии
(безвихревая компонента поляризационного поля, или *E*-моды) и гравитационных волнах, излу-
чённых в первые доли секунды после Большого Взрыва (генерация вращательной компоненты,
или *H*-моды в дополнение к *E*-модам). Поляризационный эксперимент BOOMERanG проводился
в начале 2003 года и был направлен на точное детектирование *E*-мод в космическом реликтовом
излучении. Анализ данных позволял обеспечить детектирование спектральной мощности *E*-мод
поляризации реликтового излучения с точностью 4σ [2].

Для измерения *B*-мод поляризации поля был начат ряд наземных экспериментов, в т. ч. важ-
нейшие в Антарктиде: VICEP на Южном полюсе и *B*-Modes в Dome-C. Наземные эксперименты
в таком месте схорошими условиями наблюдения наиболее подходят для приёма очень слабого
сигнала *B*-мод (менее 0,1 мкК) благодаря наличию необходимого длительного времени накопле-
ния.

Исследования осложняются тем, что уровень поляризационных помех неизвестен. На высоких
галактических широтах и высоких частотах (более 100 ГГц) сильнейший поляризованный фон
будет формироваться за счёт межзвёздной пыли. Оценки влияния пыли на поляризацию дают
уровень помех, близкий к уровню ожидаемого полезного сигнала. Точное измерение необходимо

Л. С. Кузьмин

607

в качестве предварительного шага глубоких исследований поляризации. Фокальная плоскость нового инструмента для BOOMERanG должна быть оптимизирована для наблюдения поляризационного галактического фона на высоких галактических широтах с уровнем чувствительности, необходимым для вычитания от этого фона в предстоящих наземных и спутниковых исследованиях поляризации реликтового излучения.

1. ТРЕБОВАНИЯ К ДЕТЕКТОРУ

Предполагаемая оптическая нагрузка на детекторы в эксперименте BOOMERanG определяет необходимые параметры детектора и предельную чувствительность прибора. Оптическая мощность нагрузки $P_0 = 5$ пВт является относительно высокой.

Фотонный шум NEP_{ph} определяется соотношением $NEP_{ph} = \sqrt{2P_0hf}$ (здесь h — постоянная Планка, f — частота канала). Для канала с частотой 350 ГГц $NEP_{ph} = 5 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2}. Перспективные телескопы нуждаются в новом поколении детекторов и новой конструкции антенн. Одной из наиболее перспективных технологий являются болометры на холодных электронах с ёмкостной связью [3–6] (рис. 1). Болометр на холодных электронах является сверхпроводящим болометром, состоящим из двух туннельных переходов сверхпроводник—изолятор—нормальный металл (SIN) с наноабсорбером из нормального металла, связанным через ёмкость с планарной антенной (рис. 1). Детектирование с использованием болометров на холодных электронах осуществляется за счёт прохождения входного сигнала от антенны до абсорбера через ёмкость туннельных SIN-переходов.

Концепция болометров на холодных электронах основана на уникальной комбинации высокочастотной ёмкостной связи абсорбера с антенной через ёмкость туннельных SIN-переходов [3] и прямым электронным охлаждением абсорбера тем же туннельным SIN-переходом [4–6]. Шумовые свойства этого болометра значительно улучшаются за счёт снижения электронной температуры высокоэффективным электронным охлаждением. Прямое электронное охлаждение приводит также к значительному увеличению мощности насыщения из-за эффективного отвода мощности входного сигнала, от чувствительного наноабсорбера [4–6]. Прямое электронное охлаждение обеспечивает сильную отрицательную электротермическую обратную связь для сигнала [6], аналогичную связи в детекторах на границе сверхпроводящего перехода TES (Transition Edge Sensor) [7, 8]. Однако, искусственный нагрев TES-детекторов постоянным током заменён в болометре на холодных электронах прямым электронным охлаждением на туннельных SIN-переходах [7–9] для достижения минимальной температуры, которая может оказаться даже меньше фоновой температуры. Реализация этой концепции может привести к прорыву в разработке сверхчувствительных детекторов.

Болометр на холодных электронах может использоваться как с системой считывания на основе SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) [4, 6, 11], так и на основе JFET/CMOS [11–15]. CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor)-считывание с мультиплексированием и JFET-считыванием уже были использованы для миссий «Planck» и BOOMERanG [2]. В целом, цель состоит в реализации болометров на холодных электронах с JFET-считыванием с мощностью шума меньшей, чем мощность фотонного шума для оптической нагрузки BOOMERanG.

Болометры на холодных электронах могут легко согласовываться с любой планарной антенной. В данной работе в основном исследуются распределённые антенны в фокальной плоскости [13, 16]. Эти антенны позволяют избежать использования рупоров или кремниевых линз для согласования с болометрами и могут быть использованы в многомодовом режиме для широкополосных спектрометров. Для достижения согласования по высокой частоте с распределёнными

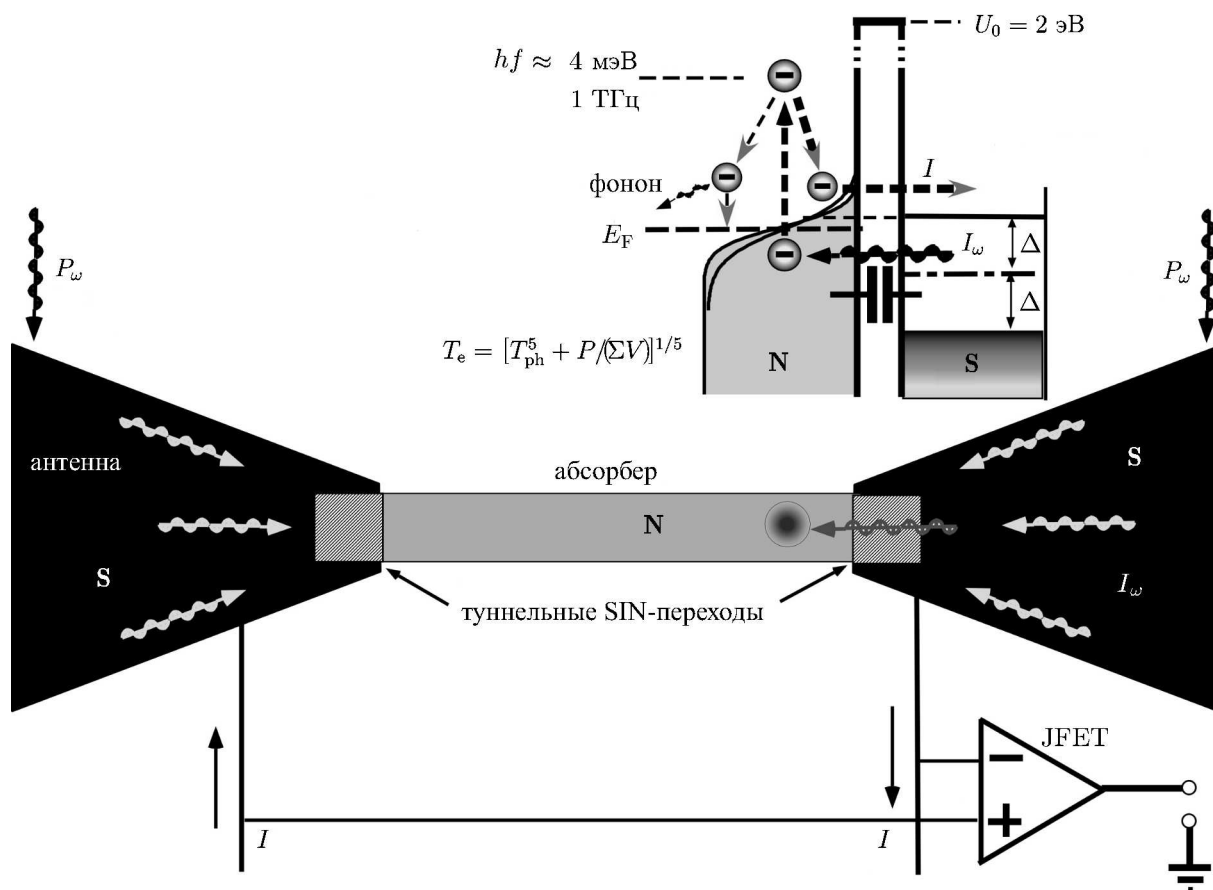


Рис. 1. Схема болометра на холодных электронах с ёмкостной связью с антенной и системой JFET-считывания [3–6]. Болометр состоит из планарной сверхпроводящей антенны и нормального абсорбера, связанных через ёмкость туннельных SIN-переходов. Туннельные SIN-переходы используются также для тепловой изоляции, электронного охлаждения и для считывания сигнала системами SQUID или JFET. На рисунке буквами S и N обозначены сверхпроводник и нормальный металл соответственно, U_0 — высота потенциального барьера

фокальными антеннами была проанализирована последовательная цепочка болометров на холодных электронах с JFET-считыванием [13]. Однако подобная конфигурация имеет несколько серьёзных недостатков: змееподобная форма распределённой антенны приводит к низкому разрешению по поляризации из-за перпендикулярных фрагментов антенны на краях цепочки. Кроме того, сопротивление подобной цепи по постоянному току слишком высоко для согласования с системой JFET-считывания, и вероятность отказа увеличивается пропорционально числу болометров в цепочке.

Чтобы избежать этих проблем, была предложена новая концепция двумерного массива болометров на холодных электронах с распределённой дипольной антенной.

1. ДВУМЕРНЫЙ МАССИВ БОЛОМЕТРОВ НА ХОЛОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

Двумерный массив с распределёнными дипольными антеннами (рис. 2) предлагается для приёма одной поляризационной компоненты сигнала в многомодовом режиме и эффективного согласования с JFET-усилителем [13]. В этой статье мы проанализируем реализацию такого массива на

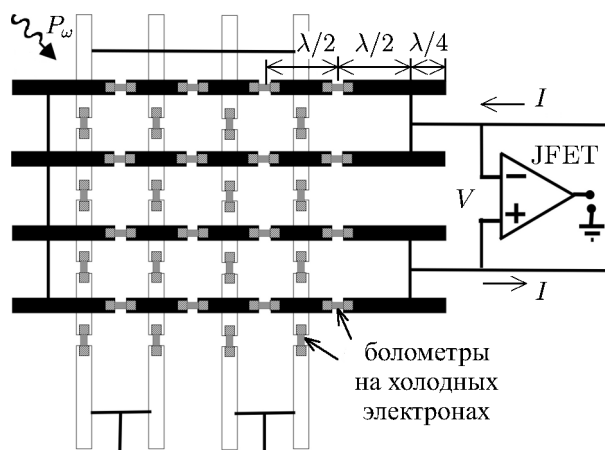


Рис. 2. Два двумерных массива болометров с дипольными антеннами для обеих поляризаций с системой JFET-считывания (показано измерение для одной горизонтальной поляризации). Показан массив из минимального числа болометров 4×4 с соединением по постоянному току 2×8 . Для анализа реально используется массив 8×8 болометров с соединением по постоянному току 4×16 (4 болометра соединены параллельно ($W = 4$) и 16 соединены последовательно ($N = 16$)). Электрическая изоляция должна быть сделана между электродами перекрёстной дипольной антенны

Дальнейшее повышение производительности достигается за счёт размещения четырёх резисторов на чипе в непосредственной близости от массива болометров для уменьшения шума резисторов смещения и защиты схемы от наводок [17, 18]. Согласование по высокой частоте осуществляется сопротивлением нормального абсорбера, которое не зависит от параметров туннельного перехода. Ёмкостное сопротивление туннельных переходов составляет порядка 30% от сопротивления абсорбера на частоте 350 ГГц и вносит только реактивную компоненту в импеданс болометра, сдвигающую резонансную частоту системы.

3. МОДЕЛЬ

В дальнейшем для анализа двумерного массива болометров на холодных электронах мы будем использовать базовую модель болометра с сильной электротермической обратной связью из-за электронного охлаждения [4–6, 11] и концепцию последовательной цепочки в режиме смещения по току [12, 13]. Характеристики массива болометров могут быть проанализированы с помощью уравнения теплового баланса для одного болометра с учётом распределения энергии между $N \times W$ болометрами:

$$2P_{\text{SIN}}(V, T_e, T_{\text{ph}}) + \Sigma\Lambda(T_e^5 - T_{\text{ph}}^5) + 2V^2/R_j + I^2R_a = [P_0 + \delta P(t)]/(WN). \quad (1)$$

Здесь $\Sigma\Lambda(T_e^5 - T_{\text{ph}}^5)$ — тепловой поток от электронов в фононную подсистему абсорбера, Σ — константа материала, Λ — объём поглотителя, T_e и T_{ph} — температуры электронного и фононного поглотителя соответственно; $P_{\text{SIN}}(V, T_e, T_{\text{ph}})$ — мощность охлаждения от туннельного SIN-перехода; R_j — подщелевое сопротивление туннельного перехода, R_a — сопротивление абсорбера;

частоте 350 ГГц для миссии BOOMERanG. Напряжение отклика болометров измеряется JFET-усилителем в режиме смещения по току. Основными целями при создании двумерного массива болометров является увеличение гибкости схемы при подключении по постоянному току для достижения большого отклика (малого шума), а также улучшение согласования высокого динамического сопротивления массива с шумовым импедансом системы JFET-считывания (порядка 0,6 МОм). Вероятность выхода из строя такой матрицы значительно снижается из-за параллельного соединения нескольких болометров.

Для анализа массива мы используем 4 болометра на холодных электронах, соединённых параллельно ($W = 4$) и 16 рядов болометров, соединённых последовательно ($n = 16$). На рис. 2 для иллюстрации показан массив из 4×4 болометров с соединением по постоянному току 2×8 . В отличие от работы [13] высокочастотное подключение осуществляется только для последовательного соединения в каждом ряду. Связь между линиями осуществляется узкими проводниками только для смещения по постоянному току.

V и I — напряжение на болометре и ток в нём, $P_0 + \delta P(t)$ — мощность высокочастотного сигнала на входе. Мы можем разделить уравнение (1) на два: независящее от времени

$$2P_{\text{SIN}0}(V, T_{\text{e}0}, T_{\text{ph}}) + \Sigma\Lambda(T_{\text{e}0}^5 - T_{\text{ph}}^5) = P_0/(WN) \quad (2)$$

и зависящее от времени

$$(2\partial P_{\text{SIN}}/\partial T + 5\Sigma\Lambda T_e^4)\delta T = \delta P. \quad (3)$$

В (3) первое слагаемое, пропорциональное $G_{\text{SIN}} = \partial P_{\text{SIN}}/\partial T$, определяет теплопроводность SIN-перехода, которая даёт отрицательную электротермическую обратную связь; когда связь велика, температурный отклик δT снижается, потому что мощность охлаждения P_{SIN} компенсирует изменения мощности сигнала в болометре. Второе слагаемое $G_{\text{e-ph}} = 5\Sigma\Lambda T_e^4$ определяет электрон-фононную теплопроводность абсорбера. Из уравнения (3) мы определяем эффективную теплопроводность, которая задаёт температурный отклик болометра на входной сигнал

$$G_{\text{eff}} = 2G_{\text{SIN}} + G_{\text{e-ph}}. \quad (4)$$

По аналогии с TES [7] эффективная теплопроводность болометра на холодных электронах увеличивается за счёт эффекта охлаждения электронов (отрицательная электротермическая обратная связь).

Здесь предполагается, что туннельные SIN-переходы смещены постоянным током, а напряжение измеряется JFET-усилителем. Чувствительность S_V характеризуется откликом напряжения δV на мощность входного сигнала δP :

$$S_V = \frac{\delta V}{\delta P} = \frac{2\partial V/\partial T}{G_{\text{e-ph}} + 2G_{\text{SIN}}}. \quad (5)$$

Величина

$$G_{\text{SIN}} = \frac{\partial P_{\text{SIN}}}{\partial T} - \frac{\partial P_{\text{SIN}}}{\partial V} \left(\frac{\partial I}{\partial T} / \frac{\partial I}{\partial V} \right) \quad (6)$$

описывает охлаждение за счёт теплопроводности SIN-перехода, что обеспечивает охлаждение электронов и предотвращает перегрев абсорбера.

Шумовые свойства характеризуются эквивалентной мощностью шума NEP_{tot} , которая является суммой трёх слагаемых:

$$\text{NEP}_{\text{tot}}^2 = NW \text{NEP}_{\text{e-ph}}^2 + NW \text{NEP}_{\text{SIN}}^2 + \text{NEP}_{\text{AMP}}^2. \quad (7)$$

Здесь $\text{NEP}_{\text{e-ph}}$ — шум, связанный с электрон-фононным взаимодействием:

$$\text{NEP}_{\text{e-ph}}^2 = 10k_B\Sigma\Lambda(T_e^6 + T_{\text{ph}}^6). \quad (8)$$

Величина NEP_{SIN} описывает шум туннельного SIN-перехода и состоит из трёх компонент: дробового шума $\delta I_\omega = 2eI$, флуктуаций теплового потока через туннельные переходы δP_ω и корреляции между этими двумя процессами:

$$\text{NEP}_{\text{SIN}}^2 = 2 \left(\frac{\delta I_\omega^2}{(S_V/R_d)^2} + 2 \frac{\langle \delta P_\omega \delta I_\omega \rangle}{S_V/R_d} + \delta P_\omega^2 \right). \quad (9)$$

Здесь R_d — дифференциальное сопротивление туннельного SIN-перехода. Данная корреляция увеличивает дробовой шум на 30÷50% по сравнению с дробовым шумом болометра в режиме смещения по напряжению, в котором дробовой шум уменьшает его сильная антикорреляция [10].

Последнее слагаемое в (7) вызывается шумом напряжения δV и тока δI JFET, которые выражаются в нВ/Гц^{1/2} и пА/Гц^{1/2} соответственно:

$$\text{NEP}_{\text{AMP}}^2 = \{\delta V^2 + [\delta I(R_d + R_a)N/W]^2\}/(S_V/W)^2. \quad (10)$$

Оценки были сделаны для канала с частотой 350 ГГц проекта BOOMERanG.

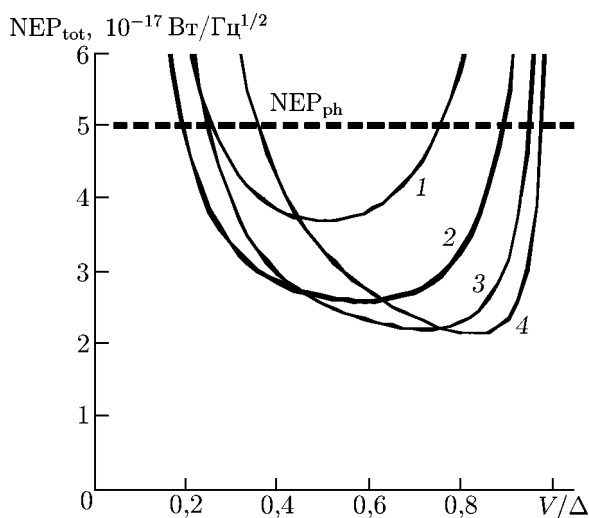


Рис. 3. Шумовые характеристики двумерного массива болометров с системой JFET-считывания для одной поляризации дипольных антенн (рис. 2). $NEP_{ph} = 5 \cdot 10^{-17}$ Вт/Гц^{1/2} для мощности оптической нагрузки $P_0 = 5$ пВт на частоте 350 ГГц. Параметры: $V_{JFET} = 3$ нВ/Гц^{1/2}, $I_{JFET} = 5$ фА/Гц^{1/2} (JFET), $R = 2$ кОм, объём $\Lambda = 0,01$ мкм³, $T = 300$ мК. Двумерный массив состоит из W болометров, соединённых параллельно, и N болометров, соединённых последовательно. Кривая 1 соответствует $W = N = 8$, кривая 2 — $W = 4, N = 16$, кривая 3 — $W = 2, N = 32$, кривая 4 — $W = 1, N = 64$

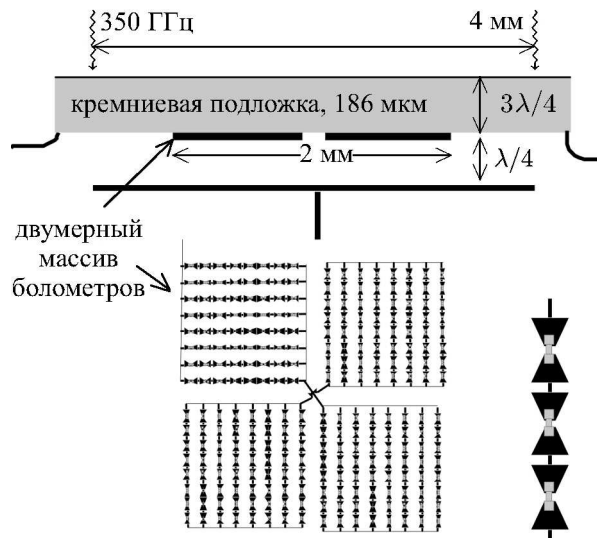


Рис. 4. Двумерные массивы болометров на холодных электронах для обеих поляризаций с дипольными антеннами в фокальной плоскости. Каждый массив состоит из двух подмассивов по 8×8 болометров для каждой поляризации. Согласование по высокой частоте достигается за счёт использования кремниевой подложки резонансной толщины $\lambda/4$ с отражающим поршнем за подложкой или с помощью кремниевой подложки с просветляющим четвертьволновым покрытием

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования для двумерного массива с системой JFET-считывания для различных параллельно-последовательных соединений по постоянному току показаны на рис. 3. Рисунок 3 демонстрирует, что для всех комбинаций ширины W и длины N массива мы можем реализовать общую мощность шума NEP_{tot} болометров меньше, чем фотонный шум NEP_{ph} . Также видно, что некоторое улучшение шумовых характеристик может происходить при переходе от квадратного массива (8×8) к вытянутому (4×16). Далее, небольшое улучшение может быть достигнуто для более вытянутых массивов (2×32 и 1×64). Финальные улучшения достигаются за счёт сдвига напряжения смещения в область с более сильным охлаждением для уменьшения динамического сопротивления массива, но массив при этом не так надёжен, как в предыдущих конфигурациях. Кроме того, вероятность отказа растёт пропорционально уменьшению ширины. Из этих рассуждений следует, что оптимальным массивом, с точки зрения сочетания шумовых характеристик и надёжности, является массив из 4×16 болометров.

Как мы видим из рис. 3, шумовые характеристики для мощности оптической нагрузки в 5 пВт соответствуют требованию $NEP_{tot} < NEP_{ph}$ для всех комбинаций W и N с оптимальным сопротивлением $R = 2$ кОм.

Оптимальным вариантом одновременного измерения двух компонент поляризации в одном и том же месте является ортогональная перекрёстная комбинация цепочек дипольных антенн

(см. рис. 4). При этом цепочки соединены узкими проводами для смещения по постоянному току и считывания. Оптическое согласование можно обеспечить с помощью кремниевой подложки резонансной толщины $\lambda/4$ (здесь λ — длина волны) и с поршнем за подложкой (рис. 4) или с помощью кремниевой подложки с просветляющим четвертьволновым покрытием [18]. Дополнительная кремниевая линза или рупор могут быть добавлены для лучшей концентрации мощности входного сигнала в двумерном массиве болометров. Основными критериями являются высокое разрешение по поляризации на уровне 25 дБ и сохранение высокой эффективности согласования.

На рис. 5 показаны результаты моделирования для двумерного массива, состоящего из двух секций из 8×8 болометров для каждой поляризации, для различных комбинаций соединений по постоянному току. Рисунок 5 демонстрирует, что для всех проанализированных комбинаций ширины W и длины N массива по постоянному току $NEP_{tot} < NEP_{ph}$. Из рис. 5 также видно, что оптимальным является массив с размером 4×32 . Ухудшение характеристик для более широких массивов, таких, как 8×16 , связано со снижением чувствительности S_V . Ухудшение характеристик для более вытянутых массивов, таких, как 2×64 и 1×128 , связано с увеличением общего динамического сопротивления массива до значений больших, чем шумовой импеданс JFET-усилителя. Чтобы компенсировать это несоответствие, оптимальная рабочая точка сдвигается к более высоким напряжениям смещения на туннельном SIN-переходе с более низким сопротивлением. Из данного моделирования следует, что оптимальным массивом с точки зрения шумовых характеристик и надёжности является двумерный массив из 4 болометров, соединённых параллельно, и 32 болометров, соединённых последовательно.

Успешное согласование с системой JFET-считывания достигается за счёт правильного выбора параллельных и последовательных сочетаний болометров и выбора надлежащего сопротивления SIN-переходов (рис. 6).

Результаты моделирования для двумерного массива с оптимальным сочетанием болометров 4×32 для различных сопротивлений туннельного SIN-перехода показаны на рис. 6. Оптимальное сопротивление для минимального NEP_{tot} составляет 3 кОм. Шумовые компоненты в зависимости от сопротивления показаны на рис. 6б. Полный шум определяется в основном шумом туннельного SIN-перехода (8) и шумом JFET-усилителя (11). Несмотря на довольно большое количество болометров в матрице электрон-фононный шум (8) мал из-за малого объёма абсорбера и низкой температуры.

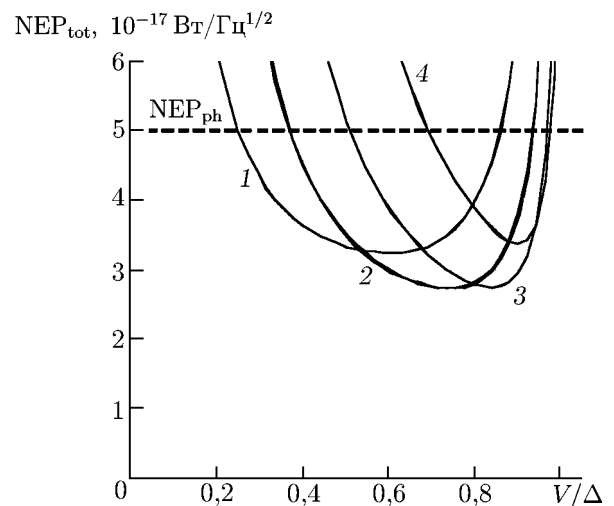


Рис. 5. Шумовые характеристики двумерного массива болометров в канале с частотой 350 ГГц, состоящего из двух подмассивов по 8×8 болометров для каждой поляризации (рис. 4). Различные комбинации болометров $W \times N$ для соединения по постоянному току проанализированы для согласования с системой JFET-считывания. Кривая 1 соответствует комбинации 8×16 , кривая 2 — 4×32 , кривая 3 — 2×64 , кривая 4 — 1×128 . Мощность нагрузки $P = 5$ пВт, $I_{JFET} = 5$ фА/Гц^{1/2}, $V_{JFET} = 3$ нВ/Гц^{1/2}, $R = 3$ кОм, $\Lambda = 0,01$ мкм³, $T = 300$ мК

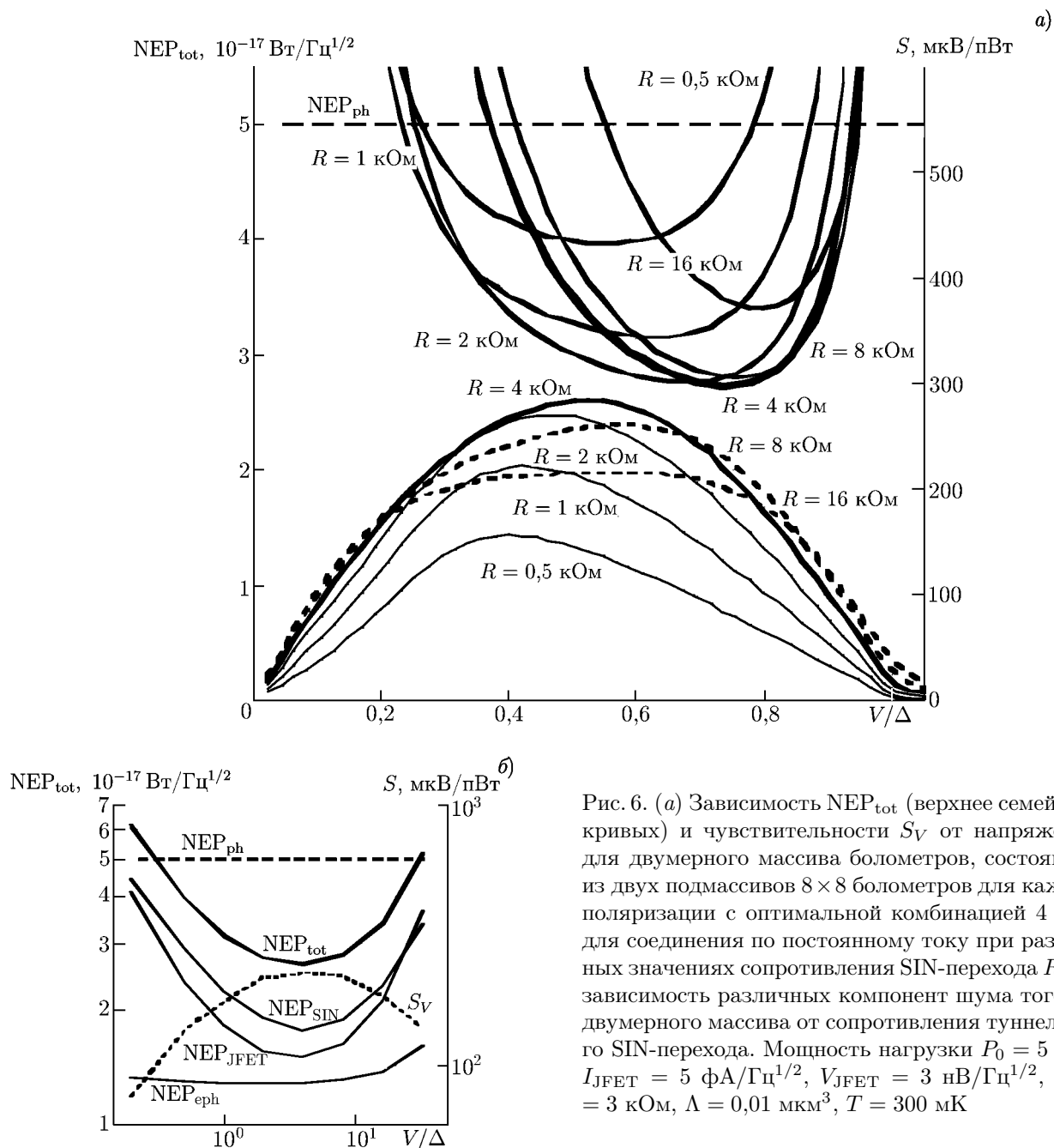


Рис. 6. (а) Зависимость NEP_{tot} (верхнее семейство кривых) и чувствительности S_V от напряжения для двумерного массива болометров, состоящего из двух подмассивов 8×8 болометров для каждой поляризации с оптимальной комбинацией 4×32 для соединения по постоянному току при различных значениях сопротивления SIN-перехода R ; (б) зависимость различных компонент шума того же двумерного массива от сопротивления туннельного SIN-перехода. Мощность нагрузки $P_0 = 5$ пВт, $I_{JFET} = 5$ фА/Гц $^{1/2}$, $V_{JFET} = 3$ нВ/Гц $^{1/2}$, $R = 3$ кОм, $\Lambda = 0,01$ мкм 3 , $T = 300$ мК

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая концепция двумерного массива болометров на холодных электронах с распределёнными дипольными антеннами для чувствительных измерений поляризации. Эта концепция двумерных массивов обеспечивает большую гибкость для согласования с системой считывания JFET или CMOS. Высокая чувствительность может быть достигнута за счёт распределения мощности между несколькими болометрами с уменьшением мощности нагрузки и увеличением входного сигнала в чувствительности каждого отдельного болометра. Высокое поляризационное

разрешение должно быть обеспечено за счёт равномерно распределённых по большей площади антенн и отсутствия сжимания пучка к малому сосредоточенному элементу. Оптическое согласование может быть обеспечено с помощью кремниевой подложки с резонансным расстоянием $\lambda/4$ и отражающим поршнем за подложкой или за счёт использования кремниевой подложки с четвертьволновым просветляющим покрытием. Надёжность двумерного массива значительно увеличивается за счёт параллельно-последовательного соединения многих болометров.

Оценки шума болометров с системой JFET-считывания показали возможность реализовать эквивалентную мощность шума на уровне ниже фотонного шума на частоте 350 ГГц для оптической нагрузки с мощностью 5 пВт, характерной для готовящегося эксперимента BOOMERanG.

Автор выражает признательность П. Дею (P. Day), П. Маускопфу (P. Mauskopf), Д. Голубеву и М. Тарасову за полезные дискуссии и В. Вдовину, О. Большакову и И. Леснову за содействие в технической подготовке статьи к публикации. Работа выполнена при поддержке Шведских грантов SNSB и SI и гранта № 220 по Постановлению Правительства РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cho A. // Science. 2010. V. 330. P. 1615.
2. Masi S., Ade P. A., Bock J. J., et al. // Astron. Astrophys. 2006. V. 458. P. 687.
3. Kuzmin L. // Physica B. 2000. V. 284. P. 2129.
4. Kuzmin L. // Proc. SNED. 2001. P. 145.
5. Kuzmin L., Golubev D. // Physica C. 2002. V. 378. P. 372.
6. Kuzmin L. // Proc. SPIE. 2004. V. 5498. P. 349.
7. Irwin K. // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 66. P. 1998.
8. Lee A., Richards P., Nam S., et al. // Appl. Phys. Lett. 1996. V. 69. P. 1801.
9. Nahum M., Eiles N. M., Martinis J. M. // Appl. Phys. Lett. 1994. V. 65. P. 3123.
10. Kuzmin L., Devyatov I., Golubev D. // Proc. SPIE. 1998. V. 3465 P. 193.
11. Golubev D., Kuzmin L. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 6464.
12. Kuzmin L. // J. Phys. Conf. Ser. 2008. V. 97. Art. no. 012310.
13. Kuzmin L. // Proc. ISSTT Conf. 2008. P. 154.
14. Kuzmin L., Mauskopf P., Golubev D. // J. Phys. Conf. Ser. 2006. V. 43. P. 1298.
15. Kuzmin L. // J. Low Temperature Phys. 2008. V. 151. P. 292.
16. Day P. K., LeDuc H. G., Goldin A., et al. // SPIE. 2004. V. 5498. P. 857.
17. Kuzmin L., Nazarov Yu. V., Haviland D. B., et al. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. P. 1161.
18. Kuzmin L. S., Haviland D. B. // Phys. Rev. Lett. 1991. V. 67. P. 2890.
19. Tran H., Page L. // J. Phys. Conf. Ser. 2009. V. 155. Art. no. 012007.

Поступила в редакцию 19 сентября 2011 г.; принята в печать 28 октября 2011 г.

TWO-DIMENSIONAL ARRAY OF COLD-ELECTRON BOLOMETERS FOR HIGH-SENSITIVITY POLARIZATION MEASUREMENTS

L. S. Kuz'min

A new concept of two-dimensional array of cold-electron bolometers with distributed dipole antennas in focal plane for high-sensitivity polarization measurements is proposed. The concept yields a unique combination of high polarization resolution due to large homogeneous array of cold-electron

bolometers and optimal agreement with JFET (Junction Field Effect Transistor) amplifiers due to flexibility in direct-current connections. The noise characteristics are improved due to arriving-signal power distribution among numerous cold-electron bolometers and their response increase. This should lead to a significant increase in sensitivity and dynamic range compared with competing alternative bolometer technologies. The two-dimensional array reliability significantly increases due to a series-parallel connection of a large number of cold-electron bolometers. High polarization resolution should be ensured due to uniform covering of substrate by a two-dimensional array over a large area and absence of the beam compression to small concentrated elements. Fundamental sensitivity limit of the cold-electron bolometer array is smaller than photon noise which is considered to be the limit level restricted by background radiation. Estimates of noise of bolometers with the JFET reading system show the possibility of realizing the limit sensitivity below the photon-noise level $5 \cdot 10^{-17} \text{ W/Hz}^{1/2}$ at a frequency of 350 GHz for optical load with power 5 pW. These parameters correspond to the requirements to the receiving system of the BOOMERanG balloon telescope.