

# ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 535.231.6

## АНТЕННО-СВЯЗАННЫЕ МИКРОБОЛОМЕТРЫ

© 2011 г. В. Ю. Зеров, канд. техн. наук; В. Г. Маляров, канд. техн. наук;  
И. А. Хребтов, канд. техн. наук

НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: vgmalyar@go.ru

Проанализированы тенденции развития устройств и технологий изготовления антенно-связанных микроболометров инфракрасного, субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов. В зависимости от решаемой задачи эти тепловые приемники могут быть одиночными, либо выстроенными в линейные или двумерные матрицы и работать при температурах 300, 78 и 4 К. Температура определяет выбор материала пленочного термочувствительного элемента – металла, полупроводника, высокотемпературного или классического сверхпроводника. Планарные антенны, используемые в этих приемниках, обеспечивают эффективный прием излучения в заданном спектральном диапазоне. Обсуждаются достигнутые параметры и примеры использования антенно-связанных микроболометров.

*Ключевые слова:* антенно-связанный микроболометр, двумерные матрицы, планарные антенны, терагерцовый диапазон, инфракрасный диапазон, криогенные температуры.

Коды OCIS: 040.0040, 040.1240, 040.2235

Поступила в редакцию 14.09.2010

### Введение

Антенно-связанные микроболометры – тепловые приемники излучения, в которых функции поглощения электромагнитного излучения и преобразования его мощности в электрический сигнал разделены между двумя связанными пленочными структурными элементами. Излучение поглощает планарная антенна, рассчитанная на прием длин волн определенного диапазона. Нагрузкой антенны является пленочный резистивный элемент микронных размеров, сопротивление которого меняется с температурой вследствие разогрева наведенными высокочастотными токами.

При пропускании через этот элемент тока смещения происходит изменение напряжения на нем, пропорциональное мощности поглощенного излучения, которое регистрируется электрической схемой. Такое разделение функций дает возможность повысить как чувствительность приемника, так и его быстродействие, так как из-за малых размеров термочувствительного элемента (ТЧЭ) его тепловая связь с подложкой

и теплоемкость могут быть значительно уменьшены.

Идея разделения в болометрическом приемнике функций поглощения излучения и преобразования его в электрический сигнал между пленочными антенной и ТЧЭ малых размеров оказалась весьма плодотворной и способствовала активному развитию приемников этого типа. Разработкой таких приемников различного назначения занимается ряд организаций в разных странах. После выпуска обзора [1] в периодической печати было опубликовано много статей, представляющих интерес как для разработчиков болометрических приемников, с точки зрения совершенствования их устройства и технологии изготовления, так и для разработчиков приборов на основе таких приемников.

Значительно расширился круг материалов, применяемых для изготовления пленочных ТЧЭ, работающих как при комнатной температуре, так и при охлаждении до температур жидкого азота или гелия. Если в первых антенно-связанных микроболометрах планарные антенны были сравнительно простыми (дипольные

или бантовые), то в дальнейшем стали использовать более сложные антенны (логарифмические спиральные, логарифмо-периодические и т. д.) с целью увеличения эффективности и расширения частотного диапазона регистрируемого излучения. Расширился и круг задач, решаемых с использованием антенно-связанных микроболометров.

В настоящем обзоре на примерах конкретных разработок проанализированы тенденции развития конструкции, технологии изготовления и сферы использования антенно-связанных микроболометров за последнее десятилетие.

### Основные характеристики

Во многих оригинальных статьях и в обзоре [1] уже проводился анализ основных проблем создания антенно-связанных микроболометров. Здесь уместно привести несколько формул, описывающих основные характеристики приемников этого типа.

Аналитическое выражение вольтовой чувствительности  $\mathcal{R}$  антенно-связанного микроболометра, как и любого другого болометрического приемника, имеет вид

$$\mathcal{R} = \frac{\varepsilon \alpha R I}{G(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)^{1/2}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент поглощения принимаемого излучения,  $\alpha = R^{-1}dR/dT$  – температурный коэффициент сопротивления (ТКС) термочувствительного элемента,  $R$  – сопротивление ТЧЭ в рабочей точке,  $I$  – ток смещения,  $G$  – тепловая проводимость связи ТЧЭ с тепловой базой,  $f$  – частота модуляции излучения,  $\tau$  – постоянная времени микроболометра. Последняя равна отношению теплоемкости  $C$  термочувствительного элемента к тепловой проводимости  $G$

$$\tau = C/G. \quad (2)$$

Мощность, эквивалентная шуму (NEP) болометрического приемника, определяется как

$$\text{NEP} = V_n/\mathcal{R}, \quad (3)$$

где  $V_n$  – шумовое напряжение на выходе приемника. Напряжение  $V_n$  представляет собой квадратичную сумму нескольких составляющих, основными из которых являются: радиационный ( $V_{\text{rad}}$ ) и фоновый ( $V_{\text{ph}}$ ) шумы, обусловленные флуктуациями теплообмена чувствительного элемента с окружающей средой посредством, соответственно, излучательного и фонового механизмов, шум Джонсона ( $V_R$ )

сопротивления ТЧЭ, избыточный токовый ( $V_I$ ) шум ТЧЭ типа  $1/f$ . Кроме того, в результирующую NEP может внести вклад шум предварительного усилителя электронного тракта, если уровень этого шума недостаточно мал.

В предположении единичной частотной полосы пропускания электронного тракта

$$V_{\text{rad}} = \frac{\mathcal{R}}{\varepsilon^{1/2}} \cdot [8k\sigma A \cdot (T_{bg}^5 + T^5)]^{1/2}, \quad (4)$$

$$V_{\text{ph}} = \frac{\mathcal{R}}{\varepsilon} \cdot (4kT^2G)^{1/2}, \quad (5)$$

$$V_R = (4kTR)^{1/2}, \quad (6)$$

$$V_I = \left( \frac{\alpha_H}{N} \frac{I^2 R^2}{f^a} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $A$  – эффективная приемная площадь болометра,  $T_{bg}$  – температура фона,  $T$  – температура болометра,  $\alpha_H$  – коэффициент Хоуге,  $N$  – количество носителей тока в ТЧЭ,  $a \approx 1$  – эмпирическая константа.

Из приведенных формул видно, что для достижения минимальной NEP антенно-связанного микроболометра необходимо обеспечить высокие эффективность антенны и ТКС термочувствительного элемента, и минимизировать тепловую проводимость  $G$  связи ТЧЭ с окружающей средой. Последнее, при заданной постоянной времени, будет ограничиваться реализуемой теплоемкостью  $C$ . Важным требованием, относящимся к выбору материала ТЧЭ, является возможность достижения низкого уровня токового  $1/f$ -шума. Следует заметить, что в субмиллиметровой (СММ) и миллиметровой (ММ) областях спектра, где справедливо выполнение закона Рэлея–Джинса, радиационный шум, как правило, существенно ниже остальных шумовых составляющих.

### Антенно-связанные микроболометры для инфракрасной области спектра

Группа из Университета Центральной Флориды (США) совместно с исследователями из других организаций пропагандирует идею создания неохлаждаемого ИК приемника [2–4], приемная площадка которого представляет собой двумерную матрицу ( $5 \times 5$ – $12 \times 12$ ) антенно-связанных микроболометров. Такая конструкция позволила бы, при сравнительно большой приемной площадке неохлаждаемого ИК

приемника ( $50 \times 50$  мкм), получить высокое быстродействие и поляризационную чувствительность, свойственные антенно-связанным микроболометрам.

Матрицы изготавливали на пластине высокоомного кремния, покрытой слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 0,2 мкм, для тепловой и электрической изоляции. Микроболометры в матрицах имели дипольные или бантовые антенны из слоя золота толщиной 0,1 мкм. Термочувствительным элементом служила полоска Nb размерами  $0,8 \times 0,3 \times 0,07$  мкм, осажденная вакуумным распылением. Элементы матрицы располагались на расстоянии 5 мкм друг от друга в двух направлениях. Все структуры матриц изготовлены с использованием электронно-лучевой литографии. Последовательно-параллельная комбинация микроболометров позволяла получить полное сопротивление матрицы, необходимое для эффективного согласования со считывающей электроникой.

Фотография матрицы микроболометров с бантовыми антеннами приведена на рис. 1. Используя способность микроболометров с упомянутыми планарными антеннами к обнаружению излучения видимого диапазона [5], было выполнено двумерное диагностическое сканирование изготовленных матриц с помощью HeNe лазера и оптики, дающей фокальное пятно радиусом 3 мкм. Эти измерения показали эффективность такого способа оценки однородности элементов матрицы и технологических методик их изготовления.

С целью увеличения чувствительности в работе [4] предпринята попытка улучшить тер-

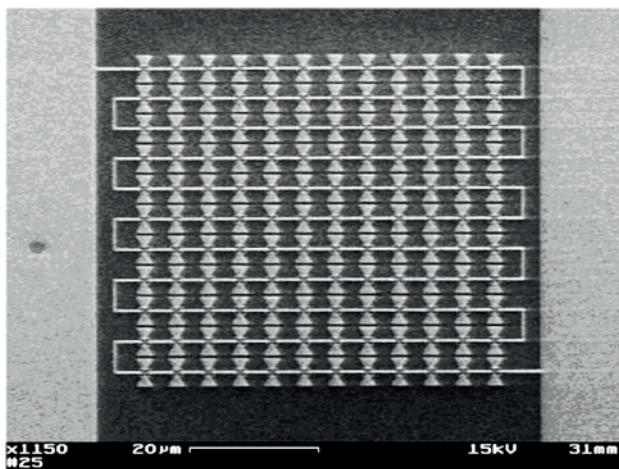


Рис. 1. Фотография матрицы микроболометров с бантовыми антеннами [4], полученная на электронном сканирующем микроскопе.

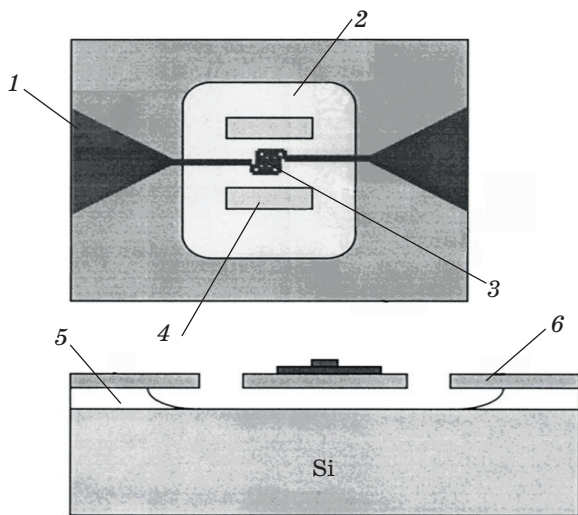
моизоляции микроболометров в матрице от подложки, посредством использования вместо слоя  $\text{SiO}_2$  слоя кварцевого аэрогеля толщиной 0,7 мкм с высокой пористостью (85%). Сравнительные исследования матриц с разными термоизолирующими слоями и с антеннами двух видов провели с использованием  $\text{CO}_2$ -лазера в качестве источника излучения.

Матрицы на слое аэрогеля имели вольтовую чувствительность в 20 и 30 раз большую, чем матрицы на пленке  $\text{SiO}_2$ , соответственно, для приемников с бантовыми и дипольными антеннами. Такое возрастание чувствительности соответствует соотношению теплопроводностей слоя аэрогеля и пленки  $\text{SiO}_2$ . Различие в увеличении чувствительности матриц с бантовыми и дипольными антеннами авторы объясняют тем, что отличие диэлектрической проницаемости аэрогеля и  $\text{SiO}_2$  меньше сказывается на эффективности бантовых антенн, поскольку они более широкополосны.

Уровень шума элементов на аэрогеле был выше, чем у элементов на пленке  $\text{SiO}_2$  и имел четко выраженную зависимость  $1/f$ . В результате выигрыш в отношении сигнал/шум на частоте модуляции 2,5 кГц у приемников на аэрогеле был в 2 раза меньше, чем в вольтовой чувствительности. Постоянная времени приемников на аэрогеле составила 5 мкс, что в 40 раз больше, чем постоянная времени приемников на пленке  $\text{SiO}_2$ .

Более радикальный метод термоизоляции ИК антенно-связанного микроболометра опробован в работе [6], выполненной в Университете Центральной Флориды. Метод заключается в вывешивании всего болометра на мембране из нитрида кремния. Антенной в этом устройстве служит квадратная спираль, которая имеет широкую частотную полосу приема и наиболее чувствительна к излучению, поляризованному по кругу. Размеры антенны в статье не приводятся. Судя по представленной фотографии, полученной с помощью электронного сканирующего микроскопа, планарные габариты антенны составляют приблизительно  $5 \times 4$  мкм.

Металл приемника выбран по результатам эллипсометрических исследований оптических констант в спектральной полосе 8–12 мкм четырех металлов – Al, Au, Ni и Ti. В итоге был выбран Ni из-за его высокой электрической проводимости (выше, чем у Ti и Au), низкой тепловой проводимости (ниже, чем у Al и Au) и высокого температурного коэффициента сопротивления (выше, чем у Al, Au и Ti).



**Рис. 2.** Вид сверху и поперечное сечение антенно-связанного микроболметра на мембране из нитрида кремния [6]. 1 – контакты, 2 –  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -мембрана, 3 – квадратная спиральная антенна, 4 – окна травления, 5 – слой  $\text{SiO}_2$ , 6 – слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

Антенно-связанные микроболметры были изготовлены на слое  $\text{Si}_3\text{N}_4$  толщиной 0,4 мкм, осажденном методом химического испарения при низком давлении. Подложкой для этого слоя служила кремниевая пластина с термически выращенным слоем  $\text{SiO}_2$  толщиной 3 мкм. На  $\text{Si}_3\text{N}_4$  осаждали Ni толщиной 0,15 мкм методом магнетронного распыления на постоянном токе. Мембраны под антенно-связанными микроболметрами получали путем удаления  $\text{SiO}_2$  изотропным жидкостным травлением через окна, вскрытые в  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с двух сторон от болметра (рис. 2).

Подаявая излучение от  $\text{CO}_2$ -лазера через оптическую систему на металл болметра, авторы измерили отклик и шум антенно-связанных микроболметров трех видов: на слое  $\text{Si}_3\text{N}_4$  без вытравливания  $\text{SiO}_2$ , на мембране  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при атмосферном давлении и на мембране  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в вакууме с остаточным давлением 20 мТорр. Чувствительность устройств на мембранах в вакууме оказалась в 160 раз выше, чем устройств, не имеющих мембран.

### **Антенно-связанные микроболметры для систем изображения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах**

В прошедшее десятилетие весьма активно антенно-связанными микроболметрами занималась группа разработчиков из США и Фин-

ляндии [7–12]. Основная цель этой группы состояла в создании недорогой системы получения изображения на терагерцовых частотах для дистанционного обнаружения и идентификации оружия и взрывчатых веществ, скрытых под одеждой человека. Такое обнаружение на длинах волн в диапазоне от 3 мм до 0,25 мм возможно благодаря относительно хорошему пропусканию этих волн материалами обычной одежды [13] и хорошему пространственному разрешению, достижимому со здоровыми диаметрами входных апертур приемной системы. Целесообразность использования в системах, создающих изображения на ММ и СММ волнах многоэлементных приемников, состоящих из антенно-связанных микроболметров, авторы названных работ обосновывают следующим образом.

Для обнаружения на ММ волнах часто используют радиометры на основе монолитных СВЧ интегральных схем (ММИС) с включенными ступенями малошумящих усилителей, для усиления приходящего миллиметрового сигнала до уровня превосходящего шумовой уровень квадратичного детектора, такого как диод Шоттки [14]. Высокая стоимость ММИС жестко ограничивает количество приемных элементов, а длина волны не может быть менее 1,5 мм из-за особенностей малошумящих усилителей. Недавние достижения в разработке высокочувствительных диодных детекторов, таких как туннельные диоды с нулевым смещением [15] и диоды Шоттки с низким барьером [16], позволяют в некоторых случаях исключить малошумящие усилители почти без снижения радиационной чувствительности системы. Однако присущий таким детекторам высокочастотный спад чувствительности ограничивает их применимость на длинах волн, меньших 3 мм.

Антенно-связанные микроболметры могут быть сделаны чувствительными в широком частотном диапазоне электромагнитного излучения – от радиочастот до инфракрасных, включительно. Кроме того, они гораздо проще и дешевле в изготовлении, чем детекторы, упомянутые выше, из них можно выстраивать достаточно большие матрицы, электроника считывания сигналов таких матриц также проще. Использование матриц антенно-связанных микроболметров возможно как в активных системах обнаружения и идентификации, так и в пассивных.

Пассивное обнаружение и идентификация скрытого под одеждой оружия, использующее



ММ или СММ волны, является сложной задачей, особенно если изображение необходимо получить в закрытом помещении. В таких условиях температурный контраст между скрытыми объектами и человеческим телом мал и типичные уровни сигналов имеют порядок нескольких пиковатт. Это накладывает очень высокие требования к чувствительности используемого приемника. Если применять при экспертизе активное освещение предмета источником незначительной мощности (несколько мВт), требования к чувствительности приемника существенно ослабляются, что способствует его упрощению и удешевлению.

#### *Антенно-связанные микроболометры для активных систем изображения*

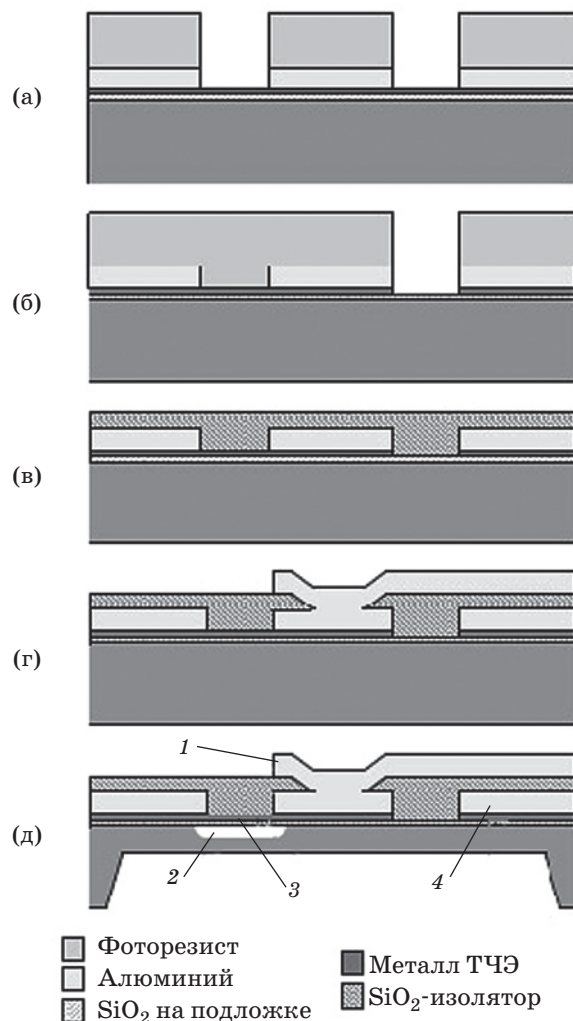
Концепция активных систем обнаружения проработана в серии работ финско-американской группы [7, 8, 17–20]. В активных системах авторы использовали не охлаждаемые металлические (Nb) пленочные микроболометры, связанные с планарными антеннами щелевого-кольцевого типа, рассчитанными для оптимального функционирования на длине волны 3 мм.

Работа проводилась в направлениях как увеличения числа элементов в приемнике, так и улучшения чувствительности индивидуального антенно-связанного микроболометра. Последнее способствует получению изображения с более высоким отношением сигнал/шум и, кроме того, позволяет уменьшить мощность источника подсветки и продвинуться в направлении более коротких длин волн (менее 0,6 мм), где активная система изображения с низкой чувствительностью требовала бы все более сложных и дорогих источников подсветки.

Улучшение чувствительности отдельного микроболометра достигнуто благодаря снижению тепловой проводимости между ТЧЭ и теплоотводом, посредством вытравливания материала подложки из-под ТЧЭ. При выборе конструкции и технологии изготовления 120-элементной матрицы антенно-связанных микроболометров разработчики руководствовались требованиями сохранения постоянной времени микроболометров менее 10 мкс и простоты процесса изготовления матрицы, насколько это возможно, чтобы ее стоимость была предельно низкой.

Процесс изготовления матрицы достаточно подробно описан в статье [8] и включает сле-

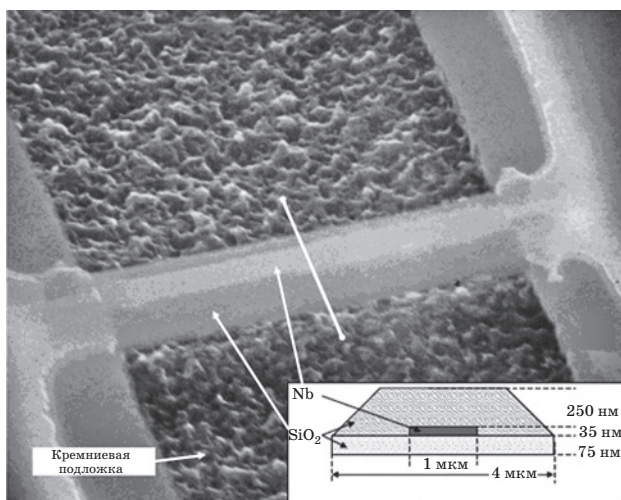
дующие основные операции. На пластине высокоомного кремния диаметром 75 мм путем стандартного жидкостного окисления создается оксидный слой (50 нм, SiO<sub>2</sub>), на который магнетронным распылением на постоянном токе осаждаются слой металла ТЧЭ (35 нм, Nb) и сразу же без нарушения вакуума слой металла антенны (200 нм, Al). Затем на антенном слое создается необходимый рисунок с использованием фоторезистивной маски, проекционной литографии и жидкостного травления алюминия (рис. 3). Далее создается рисунок ТЧЭ с при-



**Рис. 3.** Последовательность процесса изготовления антенно-связанного микроболометра [8]: а – выращивание SiO<sub>2</sub> на Si-пластине, осаждение металлов ТЧЭ и антенны, создание рисунка на слое антенны, б – создание рисунка на слое ТЧЭ, в – осаждение изолятора (SiO<sub>2</sub>) для разводки, г – создание рисунка на изоляторе, осаждение слоя разводки, создание рисунка на слое разводки, д – утоньшение подложки травлением с тыльной стороны, вытравливание кремния под ТЧЭ. 1 – разводка, 2 – полость в пластине, 3 – ТЧЭ, 4 – антенна.

менением фоторезистивной маски и реактивно-ионного травления (RIE). Реакционным газом служит  $SF_6$ . Затем следует осаждение слоя электроизоляции ТЧЭ и антенны (250 нм,  $SiO_2$ ), в котором методом RIE образуют отверстия для обеспечения контактов с разводкой. На слой изоляции осаждается и литографируется жидкостным травлением слой разводки (300 нм, Al). После этого в изолирующем слое  $SiO_2$  методом RIE вскрываются окна по обе стороны от ТЧЭ для последующего вытравливания через них материала подложки под ТЧЭ. Затем подложка с тыльной стороны под антенно-связанными микроболометрами утоньшается глубоким RIE до толщины менее 50 мкм для имитации антенны в свободном пространстве. Заключительной операцией процесса является изотропное газофазное химическое травление кремния в  $XeF_2$  до полного вывешивания мостика с ТЧЭ, представляющего собой полосу Nb, запечатанную между слоями  $SiO_2$ . Фотография мостика и его поперечное сечение показаны на рис. 4.

Таким образом на одной кремниевой подложке получены сотни антенно-связанных микроболометров с измеренной в вакууме электрической мощностью, эквивалентной шуму (в предположении 100% эффективности антенны в формулах (1), (4) и (5) следует принимать  $\epsilon = 1$ )  $NEP_{el} \approx 2,5 \times 10^{-11}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>. Путем устранения слоев  $SiO_2$  на микромостике разработчики надеются улучшить  $NEP_{el}$  до  $1,0 \times 10^{-11}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>. Хотя такой чувствительности еще не доста-



**Рис. 4.** Фотография центральной части антенно-связанного микроболометра [8], полученная на сканирующем электронном микроскопе. На вставке показано поперечное сечение ТЧЭ из Nb, закапсулированного в  $SiO_2$ .

точно для систем пассивного изображения на ММ и СММ волнах, использование описанных матриц в активных системах дает им большие преимущества в простоте и стоимости по отношению к существующим системам. Заметное продвижение на пути создания активных систем на основе неохлаждаемых матриц антенно-связанных микроболометров продемонстрировано в работах [7, 20].

Следует отметить, что разработки неохлаждаемых антенно-связанных микроболометров на СММ и ММ диапазоны проводятся и в других странах. В статье китайских авторов [21] описан микроболометр с логарифмо-периодической Al антенной и с ТЧЭ из нового для такого применения материала –  $Nb_5N_6$ . Этот материал при комнатной температуре имеет ТКС  $\approx 0,9\%/K$ , который более чем в 4 раза превосходит ТКС при той же температуре Nb, Ni или Vi.

Для согласования по сопротивлению с антенной ТЧЭ имеет размеры  $4 \times 0,5 \times 0,06$  мкм. Тонкие пленки  $Nb_5N_6$  осаждены высокочастотным магнетронным распылением в газовой смеси азота и аргона ( $N_2:Ar = 4:1$ ) при полном давлении 2 Па на пластину высокоомного кремния со слоем  $SiO_2$  толщиной 0,1 мкм. При изготовлении приемника применяли электронно-лучевую литографию и реактивно-ионное травление. Чтобы охарактеризовать отклик приемника на лучистый сигнал, использовали источник с длиной волны 3 мм и гиперполусферическую кремниевую линзу для фокусировки излучения.

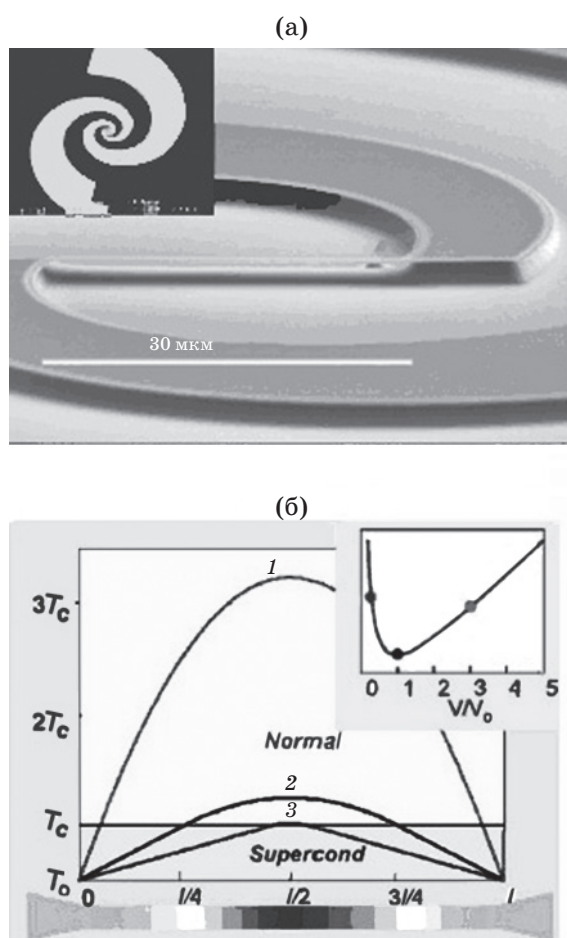
Несмотря на то, что микроболометр термоизолирован от подложки только посредством слоя  $SiO_2$ , измерена довольно высокая вольтовая чувствительность (100 В/Вт) и достигнута  $NEP_{el} \approx 4 \times 10^{-10}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при токе смещения 2 мА на частоте модуляции 1 кГц. Отмечено, что на частотах модуляции ниже 3 кГц доминирующим шумом приемника является  $1/f$ -шум.

#### *Антенно-связанные микроболометры для пассивных систем изображения*

Как было отмечено выше, для пассивного обнаружения оружия, скрытого под одеждой, необходимы приемники с очень высокой чувствительностью. Требуемой чувствительностью обладают антенно-связанные микроболометры с температурой теплостока  $\approx 4$  К, описанные в статьях [9–12].

Планарной антенной этих приемников является логарифмическая спираль, полученная

литографией на слое нормального при рабочей температуре металла (Al), а ТЧЭ – подвешенная полоска сверхпроводника (Nb). Фотография центральной части приемника, сделанная с помощью сканирующего электронного микроскопа, и вид сверху на антенну представлены на рис. 5а. Полоска Nb имеет толщину 20–50 нм, ширину 1 мкм и длину от 36 до 12 мкм. Длина полоски определяет коротковолновую границу диапазона приема спиральной антенны, которая является весьма широкополосной и способна принимать излучение с длиной волны от 4 мм до 250 мкм (до 80 мкм при длине ТЧЭ 12 мкм). Геометрические размеры ТЧЭ подобраны так, чтобы при рабочей температуре



**Рис. 5.** Фотография центральной части антенно-связанного микроболметра [11], полученная на сканирующем электронном микроскопе под низким углом возвышения (а); на вставке представлена оптическая микрофотография, показывающая антенну полностью. Температурный профиль ТЧЭ при высоком (1), промежуточном (2), низком (3) и напряжениях смещения (б). Вставка показывает соответствующие напряжения смещения на вольтамперной кривой приемника.

его сопротивление было согласовано с импедансом антенны (75 Ом).

Процесс изготовления криогенных антенно-связанных микроболметров подобен процессу изготовления неохлаждаемых Nb микроболметров и отличается только тем, что подложка не подвергается травлению с тыльной стороны. Последнее не делается ввиду того, что чип с микроболметром предполагается устанавливать на плоской поверхности кремниевой гиперполусферической линзы, с помощью которой синтезируется диэлектрическое полупространство, со стороны которого прием излучения антенной намного эффективнее, чем со стороны свободного полупространства.

Специфика работы Nb микроболметров при криогенных температурах заключается в том, что при охлаждении до температуры ниже критической ( $T_c \approx 9$  К) Nb переходит в сверхпроводящее состояние (рис. 5б). При приложении к болметру постоянного напряжения смещения центральная зона микромостика разогревается током и переходит в нормальное состояние. Мощность излучения, принятая антенной и переданная микромостику, разогревает его дополнительно, зона нормального металла расширяется, что приводит к увеличению сопротивления микроболметра. Детально принцип работы такого микроболметра описан в статьях [22, 23].

Для считывания сигналов сверхпроводящего микроболметра с “горячей точкой” разработана схема, использующая неохлаждаемый операционный усилитель и активную отрицательную электротепловую обратную связь [24, 10]. Применение такой техники считывания позволило разработчикам избежать использования сверхпроводящих квантовых интерференционных датчиков (SQUID), традиционно применяемых для считывания сигналов низкоомных мало-шумящих детекторов со сверхпроводящим переходом, но которые чрезвычайно нелинейны и чувствительны к помехам. Кроме того, достигнуто хорошее согласование по шумам усилителя с микроболметром – вносимый усилителем шум ниже шума микроболметра.

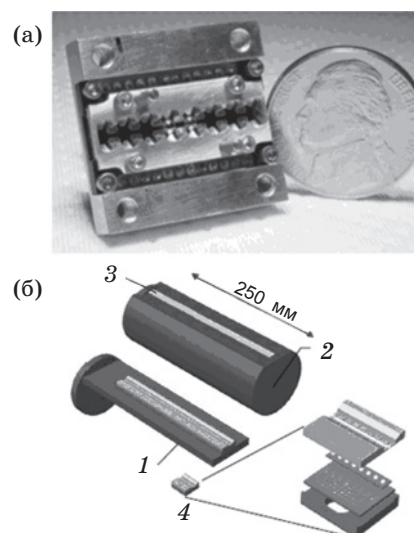
Электрические измерения, проведенные с использованием разработанной схемы считывания и криостата с жидким гелием, показали, что сверхпроводящие антенно-связанные ниобиевые микроболметры имеют  $NEP_{el} < 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>, что достаточно для обнаружения скрытого под одеждой оружия без каких-либо мер по увеличению контраста цели.



Примеры пассивных изображений скрытого оружия, полученные растровым сканированием одним криогенным микроболометром, приведены в статьях [10, 11]. Оптическая установка для получения изображения имела главное сферическое зеркало диаметром 30 см с фокусным расстоянием 25 см. При времени интегрирования пиксела 10 мс, полном времени получения изображения 2 мин, оцененная разность температур, эквивалентная шуму (NETD), составила 125 мК и пространственное разрешение на цели – 8 мм. Дальнейшие улучшения характеристик системы авторы статей [10, 12] связывают с повышением чувствительности отдельного криогенного микроболометра, с созданием 128-элементных матриц микроболометров и переходом к использованию безкриоагентного охладителя микроболометров.

Доведение  $NEP_{el}$  отдельного микроболометра до  $5 \times 10^{-15}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> возможно путем уменьшения тепловой связи ТЧЭ с базовой пластиной, например, посредством устранения слоя SiO<sub>2</sub> под ТЧЭ, что будет способствовать как увеличению вольтовой чувствительности, так и уменьшению фоновго шума. В работах [10, 12] описаны результаты сравнительных исследований антенно-связанных микроболометров с ТЧЭ в виде вывешенных полосок из Nb и NbN. Нитрид ниобия имеет более высокую температуру перехода в сверхпроводящее состояние ( $\approx 12$  К) и более высокое удельное сопротивление. Последнее расширяет возможности варьирования геометрии микромостика для лучшего согласования по сопротивлению с антенной, при изменении ее коротковолновой границы приема излучения. При работе на сверхпроводящем переходе микроболометры с ТЧЭ из Nb показали несколько большую чувствительность, вследствие их более низкой мощности насыщения (когда ТЧЭ полностью переходит в нормальное состояние). Однако при сравнении совокупности характеристик, явного предпочтения не отдано ни одному из этих материалов [12].

В статьях [10, 11] сообщается о намерении разработки 128-элементной криогенной линейки антенно-связанных микроболометров с ТЧЭ из Nb или NbN и использовании быстрого конического сканирования для получения изображений в видео-формате. Авторы приняли модульную концепцию построения линейки. Модуль состоит из 8 микроболометров с шагом расположения 3 мм, соединенных с 8 каналами считывания. Общая длина модуля 250 мм.



**Рис. 6.** Фотография собранного 8-элементного модуля антенно-связанных микроболометров [10]. Американский доллар для масштаба (а). Рисунок (б), показывающий части, которые монтируются на холодном (4 К) пальце криоохладителя. 1 – палец криоохладителя, 2 – радиационный экран, 3 – фильтр, отсекающий ИК излучение, 4 – модуль микроболометров.

Микроболометры рассчитаны для работы на длинах волн от 1,5 мм до 170 мкм или до 80 мкм, в зависимости от решаемой задачи. Фотография собранного 8-элементного модуля представлена на рис. 6. Оптическая установка для получения изображений с использованием 128-элементной линейки будет состоять из конического сканера с дуплетом асферических линз из полиэтилена высокой плотности и вращающимся зеркалом сканирования, и будет подобна установке, описанной в работе [20].

Одной из проблем при построении изображающих систем на основе сверхпроводящих микроболометров является потребность в глубоком охлаждении. Использование криостатов с жидким гелием не приемлемо для создания коммерчески доступных систем. Для удешевления и упрощения обслуживания таких систем предполагается использование современных криоохладителей замкнутого цикла типа “импульсной трубки” [10, 11].

Эти криоохладители не имеют перемещающихся частей на холодном конце и поэтому практически не имеют механических вибраций криогенной ступени. Это обеспечивает им длительный срок безотказной службы – более 2,3 года непрерывной работы. Кроме того, им-



пульсные трубки достаточно просты в обслуживании, а их массогабаритные и мощностные характеристики продолжают улучшаться при одновременном снижении стоимости.

### *Антенно-связанные микроболометры на основе высокотемпературных сверхпроводников*

Для решения некоторых задач пассивного получения изображения на СММ и ММ волнах альтернативой антенно-связанным микроболометрам, требующим охлаждения до температур жидкого гелия, являются микроболометры, в которых в качестве термочувствительного слоя служит пленка высокотемпературного сверхпроводника (ВТСП) [25, 26]. Пленки ВТСП имеют крутые температурные зависимости сопротивления в области сверхпроводящего перехода при температурах 80–90 К, т. е. высокий ТКС при охлаждении жидким азотом. Последнее существенно сокращает эксплуатационные расходы приборов на основе ВТСП материалов, по сравнению с приборами, требующими охлаждения жидким гелием.

Мировой опыт разработок ВТСП болометров показал, что наилучшие результаты были достигнуты при использовании эпитаксиальных пленок состава  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  (YBCO). В качестве материала подложки YBCO антенно-связанных микроболометров выгодно использовать высокоомный кремний для обеспечения эффективной работы планарных антенн, расширения спектрального диапазона приемника, а также с целью использования отработанных технологических методик создания мембранных или мостиковых структур и считывающей электроники на кремнии. Однако непосредственно на кремнии практически невозможно вырастить эпитаксиальную пленку YBCO высокого качества. Поэтому между кремниевой подложкой и пленкой YBCO необходимо помещать буферный слой, обеспечивающий эпитаксиальный рост YBCO. Наиболее подходящим для этих целей оказался слой диоксида циркония, стабилизированного в кубической фазе оксидом иттрия (YSZ). Слои YSZ, кроме того, имеют низкую теплопроводность и достаточную прочность при использовании в мостиковом варианте.

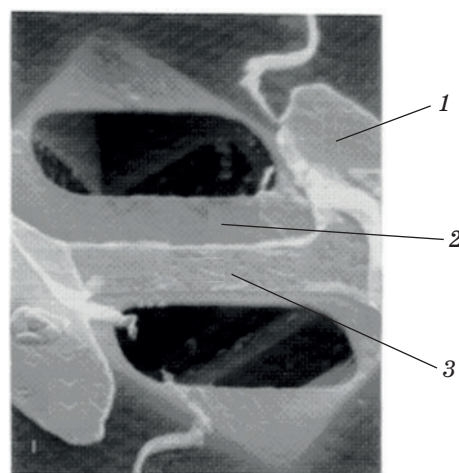
Процесс изготовления YBCO антенно-связанных микроболометров включает решение следующих основных задач. Во-первых, это получение на кремниевых подложках высококачественных однородных тонких пленок

YBCO с крутым сверхпроводящим переходом и низким уровнем  $1/f$ -шума. Во-вторых, использование таких методик обработки этих пленок, которые не вызвали бы деградации их сверхпроводящих свойств. В-третьих, необходимо максимально теплоизолировать пленку YBCO от подложки для обеспечения высокой вольтовой чувствительности и низкого фоновых шума микроболометра.

В работе [25] с целью термоизоляции ТЧЭ сначала формировали мостик в виде полоски YSZ посредством ионного вытравливания двух близко расположенных окон в сплошной пленке YSZ и анизотропного травления кремния в щелочи КОН через полученные окна до полного вывешивания полоски YSZ. Эта полоска имела ширину 4 мкм и длину 10 мкм. Затем на подложку с мостиками осаждали YBCO методом импульсного лазерного распыления керамической мишени. На слой YBCO осаждали слой Au и далее, с использованием фотолитографии и ионного дробления двойного слоя Au/YBCO до вскрытия YSZ, формировали логарифмопериодическую антенну и разводку. На заключительном этапе изготовления ионным дроблением удаляли Au со слоя YBCO на мостике (рис. 7).

Оценка характеристик изготовленного приемника показала, что при рабочей температуре 89 К он имел постоянную времени 2 мкс, вольтовую чувствительность около  $1 \times 10^3$  В/Вт и  $NEP_{el} \approx 3 \times 10^{-12}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> на частоте 1 кГц.

В сообщении [26] достаточно подробно описана иная методика создания микромостика



**Рис. 7.** Фотография центральной части YBCO антенно-связанного микроболометра [25], полученная на электронном сканирующем микроскопе. 1 – Au-антенна, 2 – YSZ-мостик, 3 – полоска YBCO.

со слоем YBCO. Сначала с использованием импульсного лазерного распыления получали без нарушения вакуума трехслойную структуру Au/YBCO/YSZ на кремнии. Отмечено, что для избежания растрескивания слоя YBCO его толщина должна быть менее 50 нм. Далее с использованием методики травления аргоно-ионным пучком в трехслойной композиции формировали окна для последующего удаления кремния из-под микромостика. Через полученные окна кремний удаляли изотропным реактивно-ионным травлением в SF<sub>6</sub>-плазме до полного вывешивания мостика. При этом слой Au служил пассивирующим и дополнительным к фоторезисту защитным слоем для YBCO. Заключительным шагом процесса было удаление слоя Au с мостика травлением ионным пучком. За счет того, что скорость травления Au в 5 раз выше скорости травления YBCO, слой Au чисто удалялся без заметного утоньшения YBCO. Фоторезистивные маски удаляли сжиганием в кислородной плазме. По описанной методике успешно получали работоспособные мостики размерами 3×10 мкм.

### Двухполосные антенно-связанные микроболометры

В статье [27] предложена концепция антенны в виде зон Френеля для двухполосного приема излучения в ИК и СММ областях спектра. Одновременное обнаружение излучения в двух спектральных областях может дать приемной системе свойства, соединяющие преимущества обеих областей – лучшее прохождение СММ волн в условиях низкой видимости (при наличии тумана, пыли или дыма), в то время как более короткие ИК волны обеспечивают лучшее пространственное разрешение.

Ранее было предложено использовать линзы с покрытием в виде зон Френеля для увеличения области улавливания ИК микроболометров со спиральной антенной [28]. Ввиду того, что размер и форма таких линз подобна спиральной антенне, рассчитанной на прием СММ волн, авторы [27] предлагают модифицированную конструкцию, которая будет служить для фокусировки излучения на ИК микроболометр и одновременно являться антенной для приема СММ излучения (рис. 8).

На лицевой поверхности кремниевой подложки располагается Au пленочная спиральная антенна СММ волн, в центре которой находится ТЧЭ из Ni. Эта же антенна с внешним

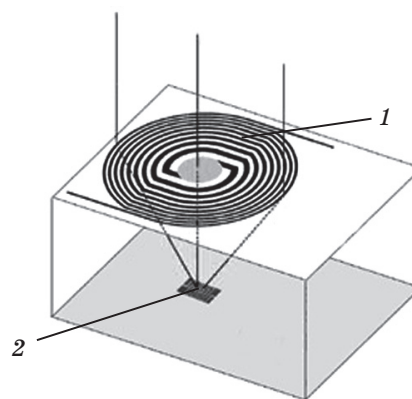


Рис. 8. Двухполосный приемник, предложенный в работе [27], который содержит два антенно-связанных микроболометра, расположенных на лицевой и тыльной поверхности кремниевой пластины. 1 – микроболометр СММ диапазона, 2 – микроболометр ИК диапазона.

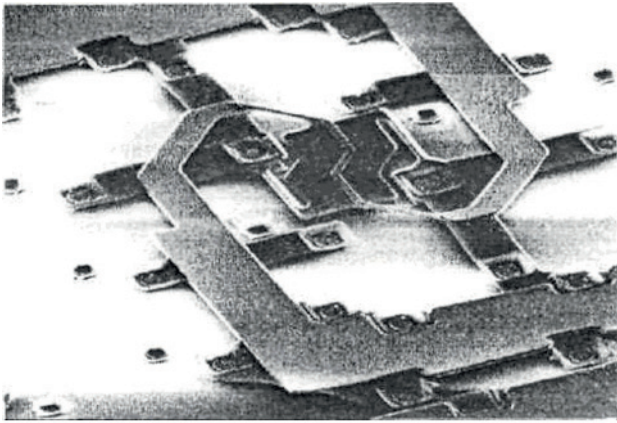
диаметром 350 мкм является линзой Френеля и фокусирует ИК излучение на микроболометр с квадратной спиральной антенной, расположенной на тыльной стороне кремниевой подложки толщиной 350 мкм. Пленочные материалы ИК микроболометра те же, что и у СММ приемника, их толщина 0,15 мкм.

Используя компьютерное моделирование, авторы [27] показали, что антенна СММ болометра имеет полосу принимаемых частот от 400 ГГц ( $\lambda = 750$  мкм) до 4,5 ТГц ( $\lambda = 65$  мкм) и наиболее чувствительна к излучению, поляризованному по кругу. Фокусирующая эффективность этой антенны на длине волны 10,6 мкм дает повышение облученности ИК приемника в 260 раз.

Идея создания многоэлементного микроболометрического приемника, работающего также в двух спектральных диапазонах, но построенного по иному принципу, предложена и проверена в работе новосибирских ученых [29].

При исследованиях свойств разработанной ИК микроболометрической (без антенн) матрицы форматом 320×240 в СММ области спектра была отмечена ее чувствительность на длинах волн 30–200 мкм, обусловленная 10% поглощением термочувствительного слоя – пленки оксида ванадия, полученной по золь-гель технологии [29, 30]. Для увеличения эффективности приема излучения в СММ диапазоне элементом такой матрицы необходимо было снабдить его планарной антенной.

Неохлаждаемые микроболометры на основе оксидов ванадия имеют ТКС, превосходящий



**Рис. 9.** Фрагмент неохлаждаемого матричного микроболметрического приемника с антенной, подвешенной на растяжках из нитрида кремния [29].

более чем на порядок величины ТКС металлических микроболметров, и высокое сопротивление порядка 100 кОм. Нагрузка широкополосных планарных антенн для эффективного согласования должна иметь сопротивление порядка 100 Ом. В статье [29] предложено нагрузку планарной антенны расположить на чувствительном элементе ИК микроболметра, который имеет сверху слой  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , а планарную квазиспиральную антенну вывесить в той же плоскости на растяжках из нитрида кремния на высоте 2,5 мкм (толщина вытравленного жертвенного слоя из полиимеда) над кремниевой схемой считывания (рис. 9).

В разработанных болометрах нагрузка антенны в виде металлической полоски размерами  $70 \times 2 \times 0,2$  мкм и сопротивлением 100 Ом, находясь в хорошем тепловом контакте с чувствительным элементом ИК микроболметра, передает ему энергию, принятую антенной и преобразованную нагрузкой в тепло. Антенны микроболметров были двух размеров  $150 \times 150$  и  $250 \times 250$  мкм и выполнены из хорошо проводящего металла. Такая конструкция в интегральном исполнении при размерах антенн  $250 \times 250$  мкм позволяет изготовить на кремниевом кристалле размерами  $20 \times 20$  мм матрицу форматом  $64 \times 48$  элементов.

Для сравнения эффективности работы и максимального исключения факторов невоспроизводимости и разброса, на одном кремниевом кристалле были изготовлены массивы микроболметров без антенн и с антеннами двух размеров. Измерения на длине волны 130 мкм с использованием излучения лазера на свобод-

ных электронах показали, что чувствительность приемников с антеннами обоих размеров в 4–6 раз выше, чем приемников без антенн. Тем самым продемонстрирована принципиальная работоспособность предложенной конструкции неохлаждаемых высокоомных антенно-связанных микроболметров, предназначенных для работы как в ИК, так и в СММ диапазонах.

## Заключение

Работы по созданию антенно-связанных микроболметров и систем на их основе в прошедшее десятилетие получили заметное развитие. Разработкой таких приемников излучения, одно- и многоэлементных, активно занимаются несколько коллективов в разных странах. В зависимости от решаемой задачи разработанные приемники рассчитаны на работу при охлаждении до температур жидких азота или гелия, а также при комнатной температуре.

Температура функционирования определяет выбор материала для планарных ТЧЭ микроболметров. При этом критериями выбора являются как можно больший ТКС, низкий уровень  $1/f$ -шума, тепловая проводимость и теплоемкость, а также простота метода изготовления. Для неохлаждаемых антенно-связанных микроболметров материалами ТЧЭ были выбраны металлы (Nb, Ni) и полупроводники ( $\text{Nb}_5\text{N}_6$ ,  $\text{VO}_x$ ), для охлаждаемых жидким азотом – высокотемпературный сверхпроводник ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ), для охлаждаемых до температур жидкого гелия – классические сверхпроводники (Nb, NbN). Поскольку размеры планарных ТЧЭ в антенно-связанных микроболметрах составляют всего несколько микрометров, для их формирования предпочтительнее использование электронно-лучевой литографии.

Во всех рассмотренных работах большое внимание уделено максимальной термоизоляции ТЧЭ от окружения, т. к. это прямой путь повышения вольтовой чувствительности и снижения фонов шума. Наиболее эффективным методом термоизоляции ТЧЭ является вывешивание его на мембранном микромостике, посредством вытравливания под ним материала базовой пластины, и вакуумирование приемника.

Для увеличения эффективности и расширения частотного диапазона регистрируемого излучения в современных антенно-связанных микроболметрах используют логарифмо-периодические и логарифмические спиральные ан-



тенны. Диапазон эффективно принимаемых длин волн таких антенн может составлять от 80 мкм до 4 мм. С той же целью улучшения поглощения принимаемого излучения, чипы с антенно-связанными микроболлометрами устанавливаются на плоскую поверхность кремниевых гиперполусферических линз, с помощью которых синтезируется диэлектрическое полупространство, со стороны которого прием излучения планарной антенной намного эффективней, чем со стороны свободного полупространства.

Заслуживают внимания предложения по созданию двухполосных антенно-связанных микроболлометров, поскольку одновременная регистрация такими приемниками излучения в ИК и СММ областях спектра может дать системе на их основе свойства, сочетающие преимущества обеих областей – лучшее прохождение СММ волн при плохой видимости и лучшее пространственное разрешение на ИК волнах.

Наилучшие измеренные значения  $NEP_{el}$  отдельных антенно-связанных микроболлометров, приведенные в рассмотренных статьях, составляют  $2,5 \times 10^{-11}$ ,  $3 \times 10^{-12}$  и  $1 \times 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> для приемников работающих, соответственно, без охлаждения и при охлаждении до температур жидкого азота и гелия. Разработчики надеются в ближайшее время улучшить указанные значения  $NEP_{el}$ , по крайней мере, вдвое, посредством совершенствования структуры и технологии изготовления этих приемников. В то же время количество микроболлометров в охлаждаемых линейках для изображающих на СММ волнах систем предполагается довести до 128, а формат неохлаждаемых двумерных матриц – до 64×48.

В представленном обзоре показано, что разработки антенно-связанных микроболлометров успешно развиваются, а сфера их использования расширяется, что обещает дальнейшее плодотворное развитие этого направления.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Леонов В.Н., Хребтов И.А.* Антенные тепловые приемники излучения // ПТЭ. 1993. Т. 6. № 4. С. 11–38.
2. *Boreman G.D.* Divide and conquer // SPIE's OE Magazine. 2002. P. 47–48.
3. *Gonzalez F.J., Gritz M.A., Fumeaux C., Boreman G.D.* Two dimensional array of antenna-coupled microbolometers // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2002. V. 23. № 5. P. 785–797.
4. *Gonzalez F.J., Ashley C.S., Clem P.G., Boreman G.D.* Antenna-coupled microbolometer arrays with aerogel thermal isolation // Infrared Phys. Technol. 2004. V. 45. P. 47–51.
5. *Fumeaux C., Alda J., Boreman G.D.* Lithographic antennas at visible frequencies // Opt. Lett. 1999. V. 24. № 22. P. 1629–1631.
6. *Middleton C.F., Boreman G.D.* Technique for thermal isolation of antenna-coupled infrared microbolometers // J. Vac. Sci. Technol. B. 2006. V. 24. № 5. P. 2356–2359.
7. *Luukanen A., Miller A.J., Grossman E.N.* Active millimeter-wave video rate imaging with a staring 120-element microbolometer array // Proc. SPIE. 2004. V. 5410. P. 195–201.
8. *Miller A.J., Luukanen A., Grossman E.N.* Micromachined antenna-coupled uncooled microbolometers for terahertz imaging arrays // Proc. SPIE. 2004. V. 5411. P. 18–24.
9. *Luukanen A., Miller A.J., Grossman E.N.* Passive hyperspectral terahertz imagery for security screening using a cryogenic microbolometer // Proc. SPIE. 2005. V. 5789. P. 127–134.
10. *Luukanen A., Grönberg L., Helistö P., Penttilä J.S., Seppä H., Sipola H., Dietlein C.R., Grossman E.N.* An array antenna-coupled superconducting microbolometers for passive indoors real-time THz imaging // Proc. SPIE. 2006. V. 6212. P. 270–278.
11. *Helistö P., Luukanen A., Grönberg L., Penttilä J.S., Seppä H., Sipola H., Dietlein C.R., Grossman E.N.* Antenna-coupled microbolometers for passive THz direct detection imaging arrays // Proc. of the 1st European Microwave Integrated Circuits Conference. 2006. P. 35–38.
12. *Dietlein C., Luukanen A., Penttilä J.S., Sipola H., Grönberg L., Seppä H., Helistö P., Grossman E.N.* Performance Comparison of Nb and NbN Antenna-coupled Microbolometers // Proc. SPIE. 2007. V. 6549. P. 6549OM-1–6549OM-8.
13. *Bjarnason J.E., Chan T.L.J., Lee W.M., Celis M.A., Brown E.R.* Millimeter-wave, terahertz, and mid-infrared transmission through common clothing // Appl. Phys. Lett. 2004. V. 85. P. 519–521.
14. *Yujiri L., Agravante H.H., Biedenbender M., G. Dow G.S., Flannery M.R., Fornaca S.W., Hauss B.I., Johnson R.L., Kuroda R.T., Jordan K., Lee P.S., Lo D., Quon B.H., Rowe A.W., Samec T.K., Shoucri M., Yokoyama K.E., Yun Y.* Passive millimeter-wave camera // Proc. SPIE. 1997. V. 3064. P. 15–22.

15. Schulman J., Chow D. Sb-heterostructure interband backward diodes // IEEE Electron Device Letters. 2000. V. 21. P. 353–355.
16. Kazemi H., Zimmerman J.D., Brown E.R., Gossard A.C., Boreman G.D., Hacker J.B., Lail B., Middleton C. First MMW characterization of ErAs/InAlGaAs/InP semimetal-semiconductor-Schottky diode (S3) detectors for passive millimeter-wave and infrared imaging // Proc. SPIE. 2005. V. 5789. P. 80–83.
17. Grossman E.N., Nolen S., Paulter N.G., Reintsema C.D. Concealed weapons detection system using uncooled, pulsed, imaging arrays of millimeter-wave bolometers // Proc. SPIE. 2001. V. 4373. P. 7–15.
18. Paulter N.G., Grossman E.N., Stenbakken G.N., Waltrip B.C., Nolen S., Reintsema C.D. Design of an active mm-wave concealed object imaging system // Proc. SPIE. 2001. V. 4373. P. 64–71.
19. Grossman E.N., Miller A.J. Active millimeter-wave imaging for concealed weapons detection // Proc. SPIE. 2003. V. 5077. P. 62–70.
20. Grossman E.N., Luukanen A., Miller A.J. Terahertz active direct detection imagers // Proc. SPIE. 2004. V. 5411. P. 68–77.
21. Lu X.H., Kang L., Chen J., Zhong Y.Y., He N., Zhang L.B., Jin B.B., Xu W.W., Wu P.H., Yao Q.J., Shi S.C. A terahertz detector operating at room temperature // Proc. SPIE. 2008. V. 7277. P. 72770N-1-72770N-7.
22. Luukanen A., Pekola J.P. A superconducting antenna-coupled hot-spot microbolometer // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 3970–3972.
23. Luukanen A., Hadfield R.H., Miller A.J., Grossman E.N. A superconducting antenna-coupled microbolometer for THz applications // Proc. SPIE. 2004. V. 5411. P. 121–126.
24. Penttilä J.S., Sipola H., Helistö P., Seppä H. Low-noise readout of superconducting microbolometers based on electrothermal feedback // Superconductor Science and Technology. 2006. V. 19. № 4. P. 319–322.
25. Rice J.P., Grossman E.N., Borchardt L.J., Rudman D.A. High- $T_c$  superconducting antenna-coupled microbolometer on silicon // Proc. SPIE. 1994. V. 2159. P. 98–109.
26. Zakar E., Wikner D., Potrepka D., Tidrow S., Dubey M., Kirchner K. HTSC microbolometer for passive MMW imaging applications // 2006. WEB Page: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?location=U2&doc=GetTDoc.pdf&AD=ADA481843>.
27. Alda J., Gonzalez F.J. Fresnel zone antenna for dual-band detection at millimeter and infrared wavelengths // Optics Letters. 2009. V. 34. № 6. P. 809–811.
28. Gonzalez F.J., Alda J., Ilic B., Boreman G.D. Infrared antennas coupled to lithographic Fresnel zone plate lenses // Appl. Opt. 2004. V. 43. P. 6067–6073.
29. Демьяненко М.А., Есаев Д.Г., Овсяк В.Н., Фомин Б.И., Асеев А.Л., Князев Б.А., Кулипанов Г.Н., Винокуров Н.А. Матричные микроболومترические приемники для инфракрасного и терагерцового диапазонов // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 12. С. 5–11.
30. Dem'yanenko M.A., Esaev D.G., Knyazev B.A., Kulipanov G.N., Vinokurov N.A. Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser // Appl. Phys. Lett. 2008. V. 92. 131116.