

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-105-121>



УДК 53.084

Термочувствительные тонкопленочные элементы на основе полуметаллов для приемников электромагнитного излучения

М.А. Кик¹,
И.А. Голоколенов^{2,3},
А.С. Сигов⁴,
А.А. Шиляев^{4,5,@},
В.В. Завьялов^{2,3},
С.С. Вербицкий⁵,
А.Н. Целебровский⁵

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва 119991, Россия

²Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН, Москва 117334, Россия

³Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва 101000, Россия

⁴МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

⁵Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Москва 119991, Россия

@Автор для переписки, e-mail: maruya3491@ya.ru

В статье представлены обобщенные результаты работ авторов по исследованию тонких пленок полуметаллов, которые можно использовать при разработке универсальных приемников электромагнитного излучения. Показано, что тонкопленочные материалы на основе полуметаллов обладают высокой термочувствительностью, низким уровнем собственных шумов и повышенным коэффициентом поглощения излучения в миллиметровой области спектра. Образцы пленок висмута и системы висмут–сурьма были получены методом вакуумно-термического напыления. Было проведено исследование термоэлектрических свойств тонких пленок системы висмут–сурьма в интервале температур от температуры жидкого гелия до комнатной, с целью применения данных пленок в виде чувствительного элемента болометрического типа в диапазоне от инфракрасного до радиочастотного. Представлены схема и описание экспериментальной установки для измерения

вольтамперных характеристик и величины сопротивления образцов в интервале температур 1.4–400 К. В ходе исследования были получены вольтамперные характеристики и зависимости сопротивления образцов пленок толщиной 80 и 20 нм от температуры. Были измерены характеристики изготовленного макетного приемника и на их основе сделаны оценочные расчеты по возможности разработки приемников болометрического типа с повышенной пороговой чувствительностью. Измерена пороговая чувствительность (NEP – Noise Equivalent Power) изготовленных приемников на частоте 147 ГГц, которая при комнатной температуре составляет $\approx(0.3\div 1)\cdot 10^{-9}$ В Гц^{1/2} и может быть существенно улучшена при охлаждении приемника до температур жидкого азота и жидкого гелия.

Ключевые слова: излучение миллиметрового диапазона, болометрический приемник, пленки полуметаллов.

Для цитирования: Кик М.А., Голоколенов И.А., Сигов А.С., Шиляев А.А., Завьялов В.В., Вербицкий С.С., Целебровский А.Н. Термочувствительные тонкопленочные элементы на основе полуметаллов для приемников электромагнитного излучения. *Российский технологический журнал*. 2019;7(6):105-121. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-105-121>

Thin-film heat-sensitive elements on the basis of semimetals for electromagnetic radiation receivers

Mikhail A. Kik¹,
Ilya A. Golokolenov^{2,3},
Aleksandr S. Sigov⁴,
Anatoly A. Shilyaev^{4,5,@},
Vitaly V. Zavyalov^{2,3},
Sergey S. Verbitsky⁵,
Aleksey N. Tselebrovsky⁵

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

²P.L. Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences, Moscow 117334, Russia

³National Research University Higher School of Economics, Moscow 101000, Russia

⁴MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

⁵N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia

@Corresponding author, e-mail: marnya3491@Ya.ru

The paper presents the generalized results of the authors' work on the study of thin films of semimetals, which can be used in the development of universal electromagnetic radiation receivers. It is shown that thin-film materials based on semimetals have high thermal sensitivity, low intrinsic noise and an increased absorption coefficient of radiation in the millimeter region of the spectrum. Samples of bismuth films and bismuth–antimony films were obtained by vacuum thermal spraying. A study was made on the thermoelectric properties of bismuth–antimony thin films in the range from liquid helium temperature

to room temperature in order to use these films as a bolometric type sensitive element in the range from infrared to radio frequency. A scheme and description of experimental installations for measuring current-voltage characteristics and determining the resistance of samples in the temperature range 1.4–400 K are presented. In the course of the study, the current-voltage characteristics and the temperature dependences of the resistance of film samples with a thickness of 80 and 20 nm were obtained. The characteristics of the manufactured prototype receiver were measured and used as a basis for estimating the possibility of developing bolometric-type receivers with increased NEP (Noise Equivalent Power). The NEP of the manufactured receivers at a frequency of 147 GHz was measured at room temperature and appeared to be $\approx(0.3\div 1)\cdot 10^{-9} \text{ Hz}^{1/2}$. This NEP value can be improved by cooling the receiver to liquid nitrogen or helium temperatures.

Keywords: millimeter wave radiation, bolometer, films of semimetals.

For citation: Kik M.A., Golokolenov I.A., Sigov A.S., Shilyaev A.A., Zavyalov V.V., Verbitsky S.S., Tselebrovsky A.N. Thin-film heat-sensitive elements on the basis of semimetals for electromagnetic radiation receivers. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):105-121 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-105-121>

Введение

Наиболее универсальными по применению считаются тепловые приемники (болометры), с помощью которых можно регистрировать излучение практически любой длины волны в видимом, инфракрасном (ИК), субмиллиметровом (СММ) и миллиметровом (ММ) диапазонах. Существует возможность разработки и создания оптико-электронных систем визуализации изображений во всех упомянутых диапазонах электромагнитного спектра [1–8].

Дальнейшее улучшение характеристик тепловизионных систем сдерживается отсутствием планомерных работ в данном направлении, в частности, отсутствием исследований фундаментальных физических принципов, реализуемых при разработке тепловизионных систем. В России это обусловлено резким сокращением числа физиков-исследователей по данному направлению.

В настоящее время основным фактором, сдерживающим дальнейшее развитие тепловизионных систем диагностики, является «тупиковая» ситуация, сложившаяся в области разработки матричных приемников излучения. Большинство используемых в данной области материалов и технологических приемов практически исчерпали свои возможности, поэтому дальнейшее улучшение потребительских свойств тепловизионных систем возможно только благодаря поиску новых физических принципов поглощения энергии и ее преобразования, новых материалов, а также принципиально новых конструкционных и технологических решений.

В представленной работе дано обобщение основных фундаментальных результатов, касающихся разработки матричных тепловых приемников излучения (МПИ) – основного элемента тепловизионной системы, которые были получены авторами с участием академиков А.М. Прохорова и А.С. Сигова [9–11].

Проведен аналитический обзор литературных источников, что позволило выявить факторы, сдерживающие развитие и совершенствование современной тепловизионной техники, а также заключить, что при выборе основного объекта исследования необходимо отдать предпочтение матричному приемнику излучения, что даст возможность улучшить в итоге все основные параметры тепловизоров.

Тепловизионные системы инфракрасного диапазона

К настоящему времени зарубежные фирмы, несмотря на сильное противодействие фирм-производителей фотонных приемников, достаточно полно решили «стартовую» проблему создания ИК-тепловизора (основная длина волны 10 мкм) на основе МПИ. Однако технические параметры этих тепловизоров еще далеки от предельных. Основные факторы, позволившие создать матричные приемники и видеокамеры на их основе, – это технология микромеханики, которая применяется для создания различных микроминиатюрных конструкций в кремнии, основном материале микроэлектроники, а также успехи в области вычислительной техники.

В основу разработок положен модульный принцип построения тепловизора, основным конструкционным элементом которого является фотоприемный модуль (ФПМ), содержащий МПИ и интегральную схему считывания (ИСС) и предварительной обработки сигналов.

Исследования состояния стандартных разработок ФПМ проведены на модельных тестовых структурах на предприятии «Орион» и достаточно полно изложены в статье [1], а также представлены в обширной литературе последних лет [см., например, 2–7], где главным образом рассматриваются вопросы, связанные с совершенствованием ИСС, в то время как разработка чувствительных элементов (ЧЭ) микроболометров осталась на уровне 2002 г.

Общие недостатки, характеризующие уровень исследований тепловых приемников ИК-излучения, заключаются в следующем:

- отсутствует необходимое теоретическое и экспериментальное обоснование их работы;
- применяются поликристаллические тонкопленочные термочувствительные материалы, которые при высокой термочувствительности обладают недопустимо высоким уровнем шумов;
- используются малоэффективные поглощающие излучение тонкопленочные покрытия.

Тепловизионные системы СММ- и ММ-диапазонов

Миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны электромагнитного излучения подлежат обязательному освоению в части конструирования радарных и тепловизионных систем, так как этот интервал длин волн совмещает преимущества оптического (высокая степень направленности) и радиочастотного (высокая проникающая способность через диэлектрические преграды) диапазонов.

В обнаружительных приборах, где используется СММ-диапазон, вероятно, наиболее заинтересованы службы безопасности, ведущие борьбу со всеми видами преступности, так как с его помощью можно обнаруживать предметы, скрытые под одеждой человека (без активной подсветки на расстоянии ~10 и более метров), и просматривать грузы на таможах, в аэропортах и т. д. (активные системы).

Имеется, по нашему мнению, неудачная попытка создания тепловизора для обнаружения скрытых предметов под одеждой человека с использованием однопиксельного приемника, изготовленного из сверхпроводящего пленочного материала, работающего только при глубоком охлаждении (температура жидкого гелия) в узком температурном диапазоне (рабочая температура приемника должна быть стабилизирована с точностью ~0.02 К). Изображение было получено сканированием объекта и составило 30 мин [8].

Примером использования миллиметрового диапазона может послужить тепловизор фирмы *QINETIQ* (Великобритания), рассчитанный на частоту 94 ГГц, где в качестве приемников (детекторов) используются низкоразмерные малогабаритные линейки рупоров, нагруженных на диоды Шоттки. В рекламном проспекте фирмы представлено изображение объекта, полученное с помощью сканирования. Время получения кадра составляет несколько минут. Представлен рисунок с изображением объекта, полученного с помощью обычной видеокамеры без запыленности, а также с изображением объекта с помехой (запыленность), полученного с помощью тепловизора миллиметрового диапазона. В последнем случае видимость удовлетворительная, но такой тепловизор очень сложен в изготовлении и эксплуатации и имеет низкое быстродействие.

Анализ требований, предъявляемых к характеристикам отдельных пикселей матричных тонкопленочных болометров

В основе работы болометра лежат свойства термочувствительного элемента (ТЧЭ), который меняет свое сопротивление при поглощении падающего на него внешнего излучения из-за нагрева. В роли этого элемента могут выступать различные материалы (платина, никель, кремний, окись ванадия и т. д.), и, как правило, они представляют собой тонкие пластины (пленки), расположенные на подложке для механического крепления. Нами было решено исследовать тонкие пленки Bi и $Bi_{88}Sb_{12}$ на их пригодность в роли ТЧЭ для вышеупомянутых диапазонов. Именно эти материалы при определенных условиях могут иметь высокую термочувствительность при низком уровне внутренних шумовых сигналов, а также дают возможность изготовления пленок с коэффициентом поглощения излучения $\sim 70\%$. Используя результаты, приведенные в описаниях патентов [9–11] и анализируя данные, представленные в литературе [1–8], можно получить перечень необходимых характеристик материалов, необходимых для разработки и изготовления приемников с параметрами, близкими к предельным. Вначале проведем анализ некоего модельного болометра (рис. 1).

На рис. 1 схематично представлен тонкопленочный приемный элемент (ПЭ) приемника прямоугольной формы. В общем случае он представляет собой тонкую пленку площади S , равной $2a \cdot 2b$, где $2a$ и $2b$ – длины сторон прямоугольника. ПЭ расположен на тонкой мембране с теплопроводностью K_1 и температуропроводностью χ_1 , которая, в свою очередь, расположена на массивной подложке с теплопроводностью K_2 и температуропроводностью χ_2 . Роль массивной подложки выполняет воздух.

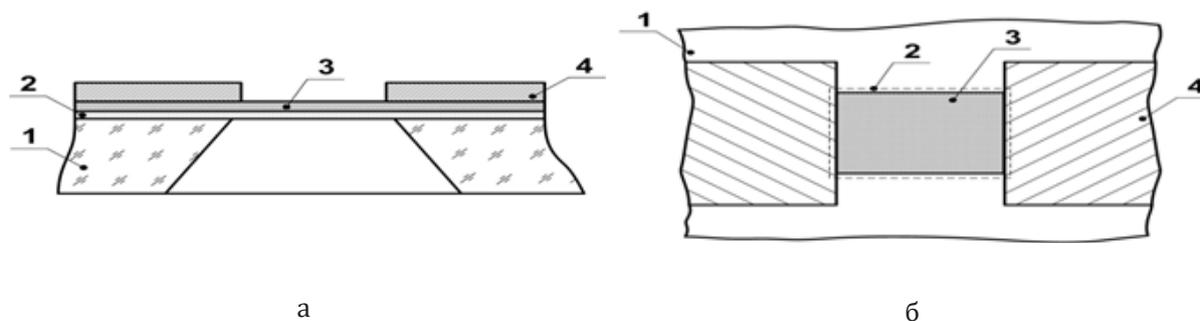


Рис. 1. Схема тонкопленочного приемного элемента (ПЭ) приемника прямоугольной формы: вид сбоку (а); вид сверху (б). 1 – кремниевая подложка; 2 – несущая мембрана; 3 – ТЧЭ; 4 – контакты.

В этой конструкции болометра тонкопленочный ПЭ одновременно выполняет роль поглотителя излучения и ТЧЭ, при этом площадь ТЧЭ равна площади, на которой происходит поглощение энергии. Сам ТЧЭ изготавливается в виде пленки полуметалла Bi или $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$. Наши измерения показали, что при таком соотношении висмута и сурьмы, как в $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$, обеспечивается максимальный температурный коэффициент сопротивления (ТКС) с известным коэффициентом поглощения излучения в ИК-, СММ- и ММ-диапазонах. Пленка нанесена на мембрану из $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$, полиимида или слюды на кремниевой подложке, но кремний из-под мембраны вытравлен. Эта мембрана служит для механического крепления ее к подложке. При этом мы считаем, что теплоотток от ТЧЭ происходит в основном в воздух и достаточно мал, и нагрев ПЭ, площадь которого S , внешним излучением оказывается высоким.

Воспользовавшись данными, приведенными в описаниях патентов [9–11], запишем асимптотическое выражение зависимости температурного отклика $T(t)$ от времени t (усредняя по площади S температуру $T(x, y, t)$, при учете распространения тепла от ТЧЭ во все трехмерное пространство), когда на ПЭ падает излучение с плотностью потока

$$P(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ P_0, & t \geq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$T(t) = \frac{1}{S} \iint_S T(x, y, t) dx dy = \frac{P_0}{2\pi K_2} L \quad \text{при } t \gg \tau, \quad (2)$$

где τ – быстродействие приемника (время выхода величины $T(t)$ на стационарное значение при воздействии на него импульсом энергии ступенчатой формы), а L – некоторый характерный размер приемника:

$$L = \frac{4}{ab} \left\{ b^2 a \cdot \ln \left(\frac{a}{b} + \sqrt{1 + \frac{a^2}{b^2}} \right) + a^2 b \cdot \ln \left(\frac{b}{a} + \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2}} \right) + \frac{1}{3} \left(a^3 + b^3 - \sqrt{(a^2 + b^2)} \right) \right\}. \quad (3)$$

Асимптотические значения для (2) и (3) можно получить при выполнении условия $S/(\chi_2 t) \gg 1$. Выражение для вольт-ваттной чувствительности W можно записать:

$$W = \frac{A \Delta U}{P_1} = \frac{A U_0 \alpha L}{2\pi K_2}. \quad (4)$$

Здесь A – коэффициент поглощения приемным элементом излучения, U_0 – напряжение смещения на болометре (при включении болометра по схеме генератора тока), α – ТКС, $P_1 = P_0 \cdot S$.

Теперь возможно сформулировать условия изготовления приемника для регистрации энергии P в полосе частот Δf с минимальным значением NEP (Noise Equivalent Power) – мощности по отношению к шуму.

$$NEP = \frac{U_{\text{ш}}}{W}, \quad (5)$$

где $U_{\text{ш}}$ – сигнал шума на болометре.

Из (4) и (5) следует необходимость применения в приемнике материалов с высоким значением величины A в рабочем диапазоне длин волн $\Delta\lambda$ (например, в ИК-области спектра этот интервал занимает область от 8 до 14 мкм), напряжение смещения на болометре также должно быть максимальным, откуда автоматически вытекает требование увеличения сопротивления болометров R_0 (до сотен кОм). Необходимо также минимальное значение $U_{\text{ш}}$ в рабочей полосе частот Δf . То есть тонкопленочный ТЧЭ должен быть изготовлен в виде монокристалльной пленки, в которой отсутствуют низкочастотные шумы типа $1/f$, и при разработке матричных модулей приемников оказывается возможным полностью использовать режим накопления сигнала (уменьшение полосы Δf). Напомним, что предельно минимальным шумом является шум Найквиста–Джонсона

$$U_{\text{ш}}^2 = 4kTR_0\Delta f, \quad (6)$$

здесь k – постоянная Больцмана.

Необходимым требованием является также однородность физических (электрических, теплофизических и оптических) параметров приемников в матрице.

Экспериментальные исследования

Было проведено исследование термоэлектрических свойств тонких пленок системы висмут–сурьма $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ в интервале температур от температуры жидкого гелия до комнатной, с целью применения данных пленок в виде чувствительного элемента болометрического типа в диапазоне от инфракрасного до радиочастотного.

Свойства одного и того же материала в виде пленки и массивного кристалла могут кардинально отличаться, тем самым определяя его практическое применение. С уменьшением толщины пленок, как правило, снижается температура плавления, изменяется механическая плотность и электросопротивление, кристаллическая структура, а также могут проявляться абсолютно новые эффекты, связанные с увеличением влияния поверхностной энергии. Свойства монокристаллических и поликристаллических пленок также могут серьезно отличаться. Пленки висмута и системы висмут–сурьма могут использоваться как преобразователи сигналов в различных низкоразмерных структурах вследствие их необычных физических свойств, как то высокая чувствительность к температурным, механическим и магнитным изменениям. Эти свойства объясняются в первую очередь электронной структурой полуметалла. Тонкопленочные висмутовые структуры хорошо подходят на роль чувствительного элемента в болометрах из-за высокого значения ТКС, и, кроме того, они могут эффективно поглощать излучение в диапазоне от инфракрасного до радиочастотного.

В наших исследованиях по напылению тонких пленок была выбрана, в основном, система $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$. Висмут и сурьма являются полностью взаимозамещаемыми в кристаллической решетке: они имеют очень близкие температуры возгонки и давления насыщенных паров. Таким образом, можно считать, что в процессе термического напыления они испаряются одновременно и занимают ячейки в кристаллической решетке с вероятностью, равной их массовой концентрации в лодочке испарителя. По этой причине объемная концентрация сурьмы остается постоянной во всем образце. Массовая доля сурьмы в 12% выбрана в связи с тем, что именно при такой концентрации наблюдается самая большая ширина запрещенной зоны [12].

Схема установки для измерения зависимости физических характеристик тонкопленочных образцов от температуры

Температурная зависимость электропроводности тонкопленочных образцов позволяет определить тип проводимости (металл/полуметалл/полупроводник/диэлектрик/сверхпроводник) и по форме этой зависимости оценить их качество.

Для проведения измерений была собрана экспериментальная установка, схема и фотография которой изображены на рис. 2 и 3.

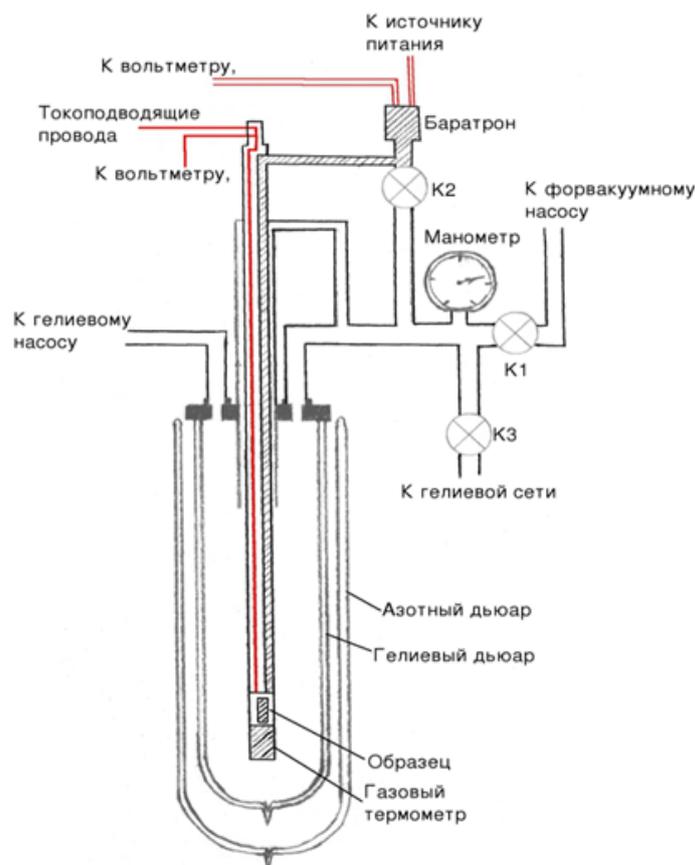


Рис. 2. Схема установки для измерения вольтамперных характеристик и величины сопротивления образцов в интервале температур 1.4–400 К.

Измерение вольтамперных характеристик и определение сопротивления образцов проводились по четырехпроводной схеме при помощи функционального генератора Agilent-33220А и мультиметра Keithley-2000 с 10-ти-канальным мультиплексором. Эти приборы имеют интерфейсы дистанционного управления, что позволило проводить измерения с помощью компьютера.

Для проведения температурных измерений мы использовали два стеклянных сосуда Дьюара. Образец помещали на плоскую медную стенку нижней камеры газового термометра объемом V_2 , который можно было поднимать над поверхностью налитого во внутренний сосуд жидкого гелия, изменяя таким образом его температуру в диапазоне 100–4.2 К. Во внешний сосуд был залит жидкий азот. Температуры в диапазоне 1.3–4.2 К достигались путем откачки паров жидкого гелия. При работе в диапазоне 400–90 К жид-

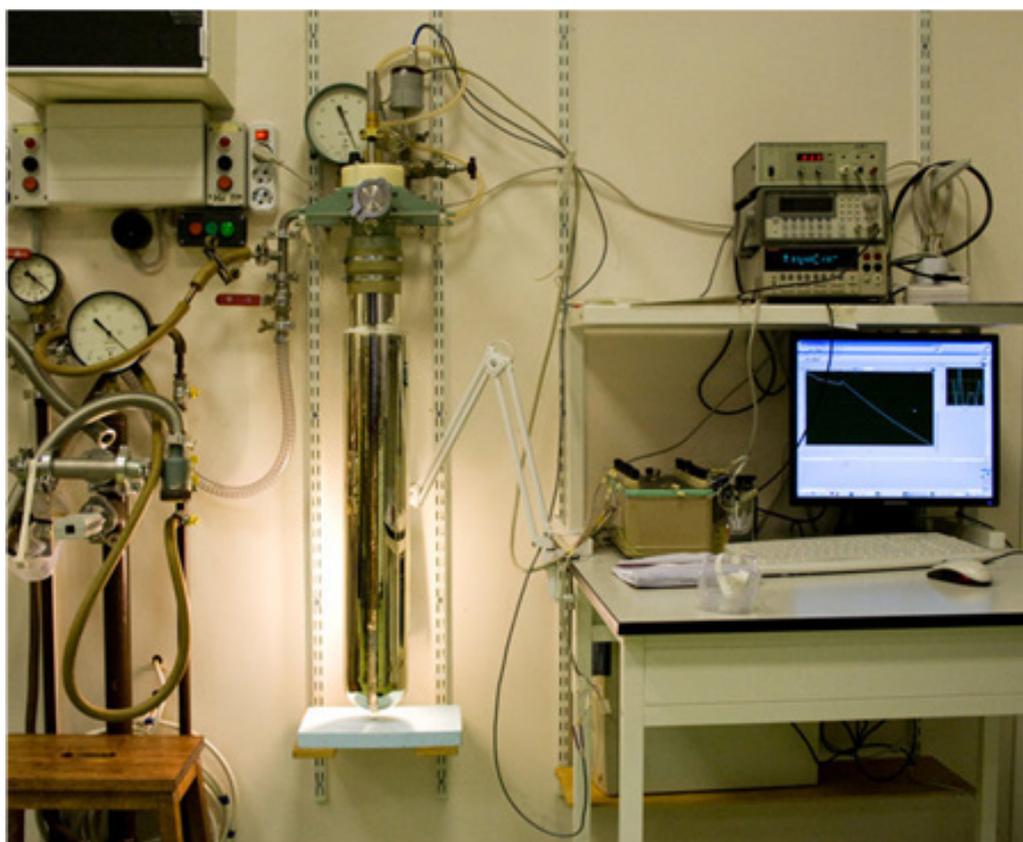


Рис. 3. Установка для измерения вольтамперных характеристик и величины сопротивления образцов в интервале температур 1.4–400 К.

кий гелий во внутренний сосуд не наливали, а заполняли его газообразным гелием. При этом охлаждение образца обеспечивалось залитым во внешний сосуд жидким азотом.

Толстостенный медный экран (на рисунке не показан) окружал нижнюю камеру объемом V_2 газового термометра вместе с закрепленным на ней образцом, что обеспечивало равенство температур образца и камеры и давало возможность проводить непрерывные измерения непосредственно в процессе охлаждения/отогрева прибора.

Давление в газовом термометре измеряли абсолютным мембранным манометром с объемом V_1 (Baratron-626B13TDE, диапазон 0–1000 Торр, разрешение 0.001 Торр), соединенным с нижней камерой объемом V_2 никелевым капилляром диаметром 1 мм и толщиной стенки 0.2 мм. Перед началом работы газовый термометр заполняли чистым газообразным гелием при нормальных условиях. Температура нижней камеры термометра вычислялась по уравнению Менделеева–Клапейрона, калибровка термометра заключалась в вычислении приборной константы V_1/V_2 при двух реперных температурах камеры: комнатной и 4.2 К (температуре жидкого гелия, находящегося при атмосферном давлении). Газовый термометр обеспечивал измерение температуры образца в диапазоне 4–400 К. При необходимости измерения температур в диапазоне 1.3–4 К манометр (Baratron-626B13TDE) открывали на измерение давления насыщенных паров гелия в дьюаре и температуру определяли по стандартной шкале («Шкалы температурные практические», ГОСТ 8.157-75). Программный модуль пересчета температур приведен на рис. 4.

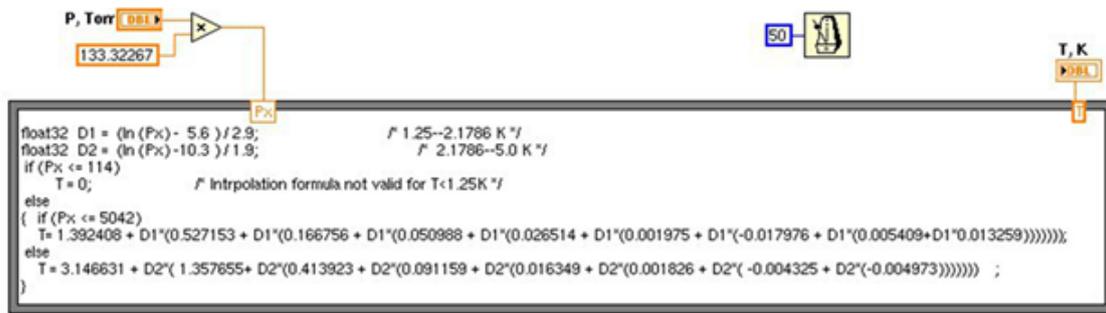


Рис. 4. Программный модуль пересчета температур.

Нами была разработана компьютерная система управления и сбора данных на основе лицензионной платформы LabVIEW-8.6, установленной на компьютере с операционной системой Linux (Gentoo). Управление и получение информации с приборов Agilent-33220A и Keithley-2000 было организовано по GPIB-шине. Написанная на графическом языке LabView программа для измерения вольтамперных характеристик образца и температуры (см. рис. 5) обеспечивала запись измеренных значений в файл данных в течение всего цикла изменения температуры. Обработка данных, анализ и построение графиков программировались на свободном скриптовом языке GnuPlot.

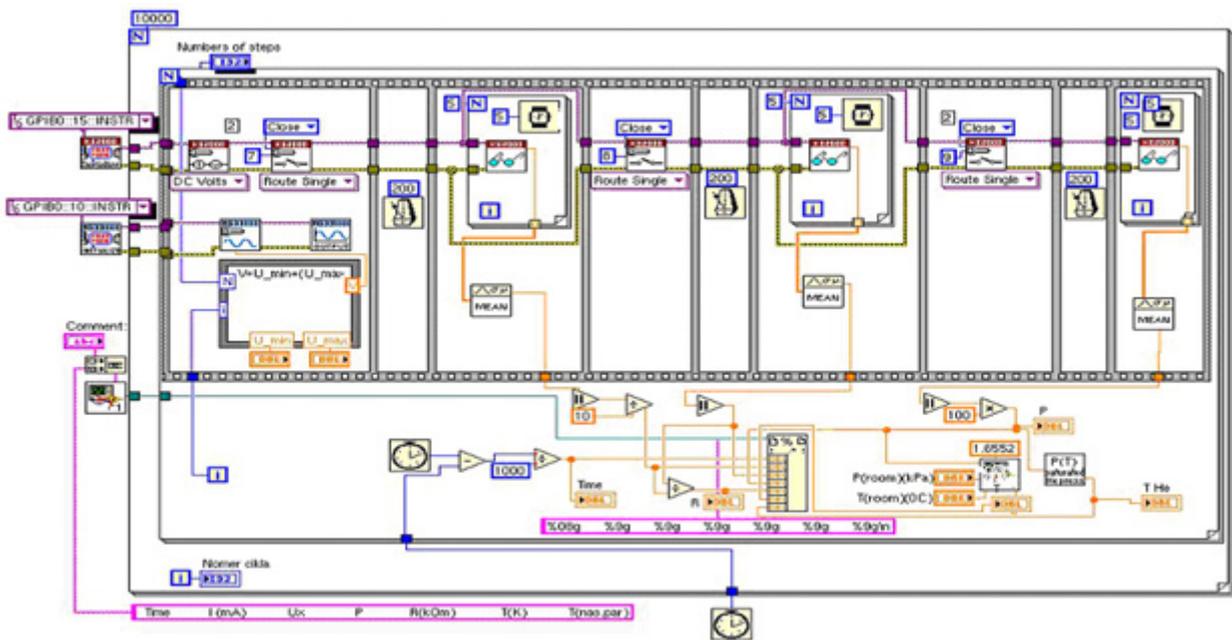


Рис. 5. Программа управления и измерения вольтамперных характеристик в зависимости от температуры образца, написанная на графическом языке LabView.

Изготовление образцов пленок

Методика роста эпитаксиальных пленок висмута подробно описана в монографии [12], она позволила нам получить стабильные, содержащие минимальное количество дефектов пленки Bi и $Bi_{88}Sb_{12}$, ось C_3 которых ориентирована по нормали к пленке с точностью более 0.1° .

Образцы были получены методом вакуумно-термического напыления [12]. Нагрев смеси порошков $Bi_{88}Sb_{12}$, помещенной в вольфрамовую «лодочку», производили при

температуре ~ 800 °С. Данное соотношения висмута и сурьмы выбрано по той причине, что при таком количестве сурьмы в висмуте он становится диэлектриком в массивном образце. На расстоянии ~ 15 см от «лодочки» расположен нагреватель с подложкой, температура которой составляет 95 °С. За счет нагрева смеси в «лодочке» происходит испарение, и $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ наносится на подложку. Аналогично производили напыление образцов из чистого висмута.

Температуру нагревателя с подложкой измеряли платиновым термометром сопротивления, а температуру «лодочки» контролировали по ее цвету (см. [7]). В итоге для изучения электрических свойств были получены пленки напылением Bi и $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ на подложки из пластинок слюды, $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ и полиимида с толщиной от 20 до 200 нм. Все изготовленные образцы имели форму прямоугольника с общей длиной 6 мм, а ширина варьировалась от 0.2 до 3 мм.

Контакты к образцам также изготавливали термическим напылением последовательно: слой хрома толщиной ~ 10 нм, слой золота толщиной ~ 100 нм. Хром необходим для обеспечения адгезии контактных площадок к образцам.

Для измерения спектральных характеристик пленок висмута и $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ размеры образцов обычно составляли 40×40 мм².

Кристаллографическую структуру полученных пленок изучали с помощью рентгеновского дифракционного анализа. На рис. 6 представлены рентгеновские дифрактограммы пленок Bi толщиной 15, 35 и 150 нм на мусковите, снятые в геометрии $\theta-2\theta$. Наблюдаются интенсивные рефлексы $(00l)$, $l=2, 4, 6$ и т. д. от мусковита и рефлексы $(00l)$, $l=3, 6$ и т. д. от висмута. Эти данные подтверждают как монокристалличность подложки и пленки Bi , так и ориентацию плоскостей $(00l)$ параллельно поверхности пленки. При этом для Bi и мусковита использовались данные о симметрии и параметрах их элементарных ячеек, взятые из базы данных ICDD по Bi (файл 44-1246: пр. гр. $R-3m$, $a = 0.4547$, $c = 1.1861$ нм) и мусковиту (файл 85-1855: пр. гр. $P3112$, $a = 0.5215$, $c = 2.9755$ нм). Относительная интенсивность рефлекса (003) от висмута понижается с уменьшением толщины пленки, тем не менее этот рефлекс уверенно промеряется и на пленке толщиной 15 нм.

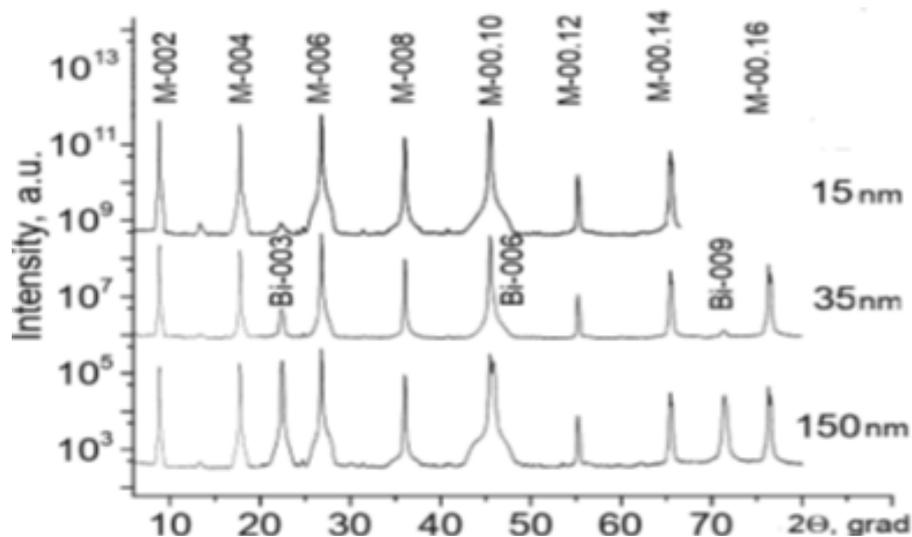


Рис. 6. Рентгеновские дифрактограммы пленок Bi толщиной 15, 35 и 150 нм на подложках мусковита, снятые в геометрии $\theta-2\theta$.

Вольтамперные характеристики и зависимости сопротивления тонкопленочных образцов от температуры

В ходе исследования были получены вольтамперные характеристики (ВАХ) и зависимости сопротивления образцов пленок толщиной 80 и 20 нм от температуры.

Здесь представлены наиболее удачные результаты измерений (ВАХ) и зависимость величины ТКС от температуры. Для дальнейших обсуждений мы считаем достаточным приведение результатов только этих измерений. Графики ТКС строились по аппроксимациям кривых $R(T)$ полиномами 5-ой степени.

Серия образцов пленок толщиной 80 нм проявила наибольшую стабильность при измерениях и наилучшую повторяемость результатов, кроме того, результаты оказались в хорошем соответствии (характер кривых идентичен) с результатами схожих измерений, полученных для подобных образцов пленок толщиной 2 мкм в более ранних работах, проводимых в нашей лаборатории. ВАХ этих образцов в измеренном диапазоне (± 2 мА) оказались линейными с высокой точностью, таким образом, этот факт позволяет утверждать, что пленки Vi и $\text{Vi}_{88}\text{Sb}_{12}$ находятся в состоянии «металл».

ВАХ образцов пленок $\text{Vi}_{88}\text{Sb}_{12}$ толщиной ~ 20 нм содержат стабильную нелинейность, которая с понижением температуры становится более ярко выраженной (см. рис. 7). В связи с этим обстоятельством для такого образца нельзя ввести нормальное понятие электрического сопротивления, однако можно формально рассмотреть зависимость сопротивления от температуры при постоянном токе (либо напряжении); в нашем случае мы выбрали ток $I = 1$ мА для измерения ТКС. Измерения проводились на импульсах с шириной 5 мс с задержкой от начала импульса в 1 мс. На графике зависимости ТКС $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ представлен участок вблизи комнатной температуры и для ВАХ в интервале от температуры жидкого гелия до комнатной.

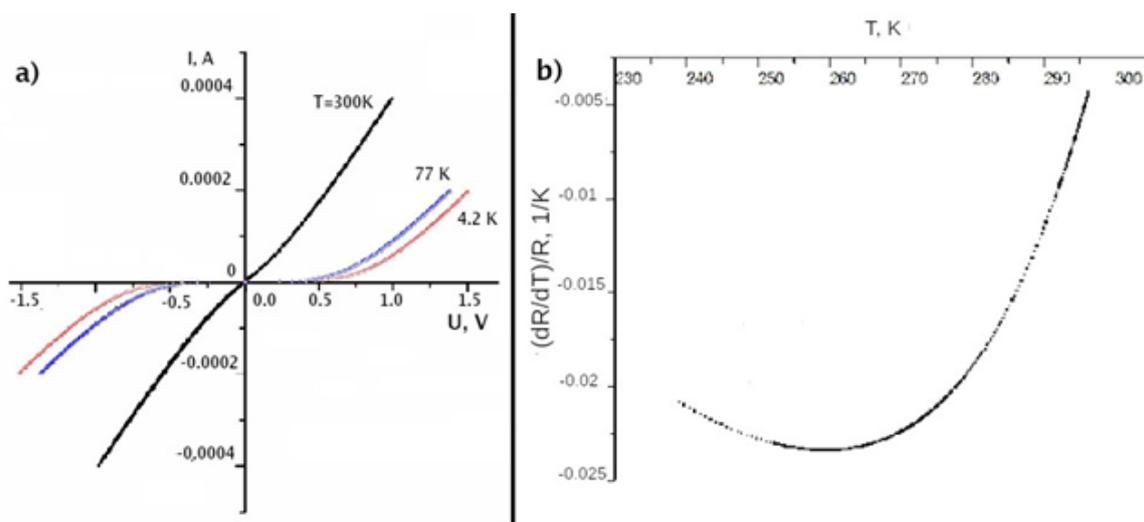


Рис. 7. ВАХ пленок $\text{Vi}_{88}\text{Sb}_{12}$ толщиной ~ 20 нм (а);
зависимость величины ТКС $\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$ от температуры (б).

Из нелинейности ВАХ пленок $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ толщиной ~ 20 нм при низких температурах и сглаживания кривой зависимости $I(U)$ при комнатной температуре следует вывод, что электропроводность пленки носит активационный характер с энергией активации $E \sim 0.02$ эВ, а величина ТКС таких пленок при понижении температуры может быть увеличена на порядки. ТКС полупроводников оценивается из формулы:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{E}{kT} \frac{1}{T} \quad (7)$$

Из [12] известно, что максимальное значение ТКС, полученное при исследовании висмутовых образцов, составляет величину менее процента.

Приемник электромагнитного излучения

Макетный приемник излучения был изготовлен по следующей схеме. ПЭ (в данном случае пленка $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$ толщиной ~ 30 нм) был напылен на слой $\text{SiO}_2 + \text{Si}_3\text{N}_4$ толщиной ~ 2 мкм, который предварительно был выращен на кремнии. ПЭ в данном случае совмещает в себе две функции: поглотитель внешнего излучения и ТЧЭ. Эта чувствительная часть зажата между двумя пластинами кремния Si толщиной ~ 400 мкм, в которых имеются пирамидоидальные отверстия для пропуска излучения к ТЧЭ. Описанная система помещается на третью, цельную пластину кремния Si, на которую предварительно напылен алюминий Al толщиной ~ 300 нм, имеющий очень высокий коэффициент отражения и выступающий в роли зеркала, чтобы доля излучения, падающая на ПЭ, поглощалась максимально. Фотография и схема приемника и представлены на рис. 8 и 9.

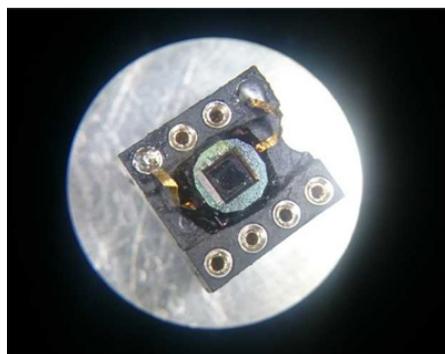


Рис. 8. Увеличенная фотография чипа размером 4.5×4.5 мм приемника.

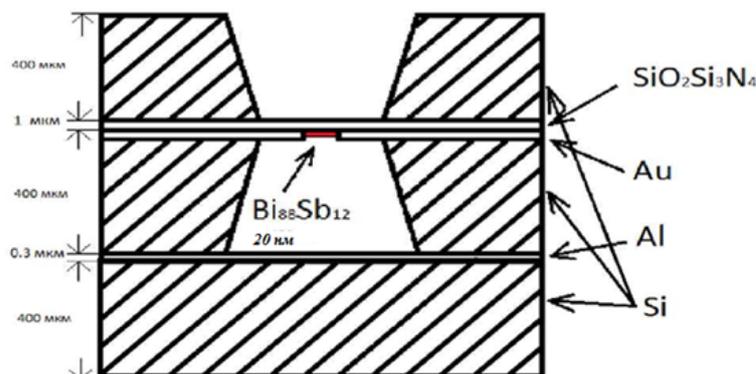


Рис. 9. Устройство приемника (эскиз). Конструкция разработана и изготовлена по МЭМС-технологии [3] болометра.

На основе проведенных исследований нами были измерены характеристики изготовленного макетного приемника и на их основе сделаны оценочные расчеты по возможности разработки приемников болометрического типа с повышенной пороговой чувствительностью (NEP).

Измерения NEP проводились с использованием высокочастотного генератора Г4-161 на частоте 147 ГГц по методике, описанной в [11, 13]. Результаты измерений представлены в таблице.

Характеристики изготовленного макетного приемника

Наименование параметра	Единица измерения	Значение
Толщина пленки $\text{Bi}_{88}\text{Sb}_{12}$	нм	~30
Коэффициент поглощения излучения	%	67
Температурный коэффициент сопротивления	%	2
Рабочая температура	К	275
Сопротивление болометра	кОм	130
Напряжение смещения на болометре	В	15
Напряжение шума (в полосе 1 Гц)	нВ	~46
Вольт-вагтная чувствительность	В/Вт	160
Пороговая чувствительность (NEP)	Вт/Гц ^{1/2}	~(0.3±1)·10 ⁻⁹

Непосредственные измерения NEP приемника при температурах, близких к температуре жидкого гелия, не проводились. Тем не менее, нетрудно получить расчетную оценку для NEP, используя полученные экспериментальные данные для пленок и приемника при температуре 275 К, а также формулы (1)–(7).

Из этих оценок следует, что при низких температурах достижимы значения NEP ~10⁻¹¹–10⁻¹⁴ В Гц^{1/2}.

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору А.А. Бушу (кафедра нанозлектроники РТУ МИРЭА) за рентгеноскопическое исследование образцов.

Работа выполнена при поддержке РТУ МИРЭА в рамках инициативной научно-исследовательской работы ИЦМР-13.

Литература:

1. Андрюшин С.Я., Кравченко Н.В., Кулыманов А.В., Либерова Г.В., Таубкин И.И., Трищенко М.А., Филачев А.М., Эскин Ю.М. Состояние разработок микроболюметрических матриц в Государственном научном центре «НПО Орион» // Прикладная физика. 2000. № 5. С. 5–17.
2. Тарасов В.В., Якушенко Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего типа». М.: «ЛЮГОС», 2004. 443 с.
3. Lianjun Sun, Benkang Chang, Junju Zhang. Analysis and measurement of thermal-electrical performance of microbolometer detector // Proceedings of the SPIE. 2007. V. 6782. Optoelectronic Materials and Devices II, 678231. <https://doi.org/10.1117/12.745347>
4. Ufuk Senveli S., Yusuf Tanrikulu M., Tayfun Akin. A thermal conductance optimization approach for uncooled microbolometers // Proceedings SPIE. 2011. V. 8012. Infrared Technology and Applications XXXVII, 80121T. <https://doi.org/10.1117/12.890234>
5. Dumas M.J., Lail B.A. A parametric analysis of microbolometer pixel designs // Proceedings SPIE. 2011. V. 8155. Infrared Sensors, Devices and Applications, Single Photon Imaging II, 815517. <https://doi.org/10.1117/12.894170>
6. Sun L., Chang B., Zhang J., Qian Y., Qiu Y. Thermal and electrical performance of α -Si microbolometer focal plane arrays // Proceedings SPIE. 2007. V. 6423. 64232D. <https://doi.org/10.1117/12.779855>
7. Gauntt J.Li, Cabarcos O.M., Basantani H.A., Venkatasubramanian C., Bharadwaja S.S.N. Microstructure of vanadium oxide used in microbolometers // Proceedings SPIE. 2011. V. 8012. Infrared Technology and Applications XXXVII, 80123T. <https://doi.org/10.1117/12.884161>
8. Luukanen A., Miller A.J. and Grossman E.N. Passive hyperspectral terahertz imagery for security screening using a cryogenic microbolometer // Proceedings SPIE. 2005. 5789. P. 127–134. <https://doi.org/10.1117/12.608838>
9. Прохоров А.М., Шиляев А.А., Валиев К.А. и др. Датчик для регистрации плотности потока энергии электромагнитного излучения. Авторское свидетельство № 1225342, декабрь 1985.
10. Емохонов В.Н., Клягин А.С., Тальрозе В.Л., Шиляев А.А. Приемник электромагнитного излучения: патент 1 825 246 РФ. № 4641108/25; заявл. 26.12.1988; опубл. 10.04.1995.
11. Кик М.А., Шиляев А.А., Сигов А.С., Шампаров Е.Ю., Завьялов В.В., Богомолов Г.Д., Емохонов В.Н., Терехова Е.В., Шиляева А.А., Денискин В.В. Широкополосный измерительный приемник излучения миллиметрового диапазона с независимой калибровкой: патент 2 616 721 РФ. № 2015154123; заявл. 17.12.2015.; опубл. 18.04.2017. Бюл. № 11.

12. Комник Ю.Ф. Физика металлических плёнок. М.: Атомиздат, 1979. 263 с.

13. Кик М.А., Шиляев А.А., Сигов А.С., Емохонов В.Н., Завьялов В.В., Шампаров Е.Ю., Денискин В.В. Приемник для измерения мощности электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн. // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2015. Т. 15. № 4. С. 164–169.

References:

1. Andryushin S.Ya., Kravchenko N.V., Kulymanov A.V., Liberova G.V., Taubkin I.I., Trishenkov M.A., Filachev A.M., Eskin Yu.M. The state of development of microbolometric matrices at the State Scientific Center “NPO Orion”. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*. 2000;5:5-17 (in Russ.).

2. Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. “Looking type” infrared systems. M.: LOGOS Publ., 2004. 443 p. (in Russ.).

3. Lianjun Sun, Benkang Chang, Junju Zhang. Analysis and measurement of thermal-electrical performance of microbolometer detector. In: *Proceedings of the SPIE*. 2007. V. 6782. Optoelectronic Materials and Devices II, 678231. <https://doi.org/10.1117/12.745347>

4. Ufuk Senveli S., Yusuf Tanrikulu M., Tayfun Akin. A thermal conductance optimization approach for uncooled microbolometers. In: *Proceedings SPIE*. 2011. V. 8012. Infrared Technology and Applications XXXVII, 80121T. <https://doi.org/10.1117/12.890234>

5. Dumas M.J., Lail B.A. A parametric analysis of microbolometer pixel designs. In: *Proceedings SPIE*. 2011. V. 8155. Infrared Sensors, Devices and Applications, Single Photon Imaging II, 815517. <https://doi.org/10.1117/12.894170>

6. Sun L., Chang B., Zhang J., Qian Y., Qiu Y. Thermal and electrical performance of α -Si microbolometer focal plane arrays. In: *Proceedings SPIE*. 2007. V. 6423. 64232D. <https://doi.org/10.1117/12.779855>

7. Gauntt J.Li, Cabarcos O.M., Basantani H.A., Venkatasubramanian C., Bharadwaja S.S.N. Microstructure of vanadium oxide used in microbolometers. In: *Proceedings SPIE*. 2011. V. 8012. Infrared Technology and Applications XXXVII, 80123T. <https://doi.org/10.1117/12.884161>

8. Luukanen A., Miller A.J. and Grossman E.N. Passive hyperspectral terahertz imagery for security screening using a cryogenic microbolometer. In: *Proceedings SPIE*. 2005. V. 5789. P. 127-134. <https://doi.org/10.1117/12.608838>

9. Prokhorov A.M., Shilyaev A.A., Valiev K.A. [et al.] A sensor for detecting the energy flux density of electromagnetic radiation. Copyright certificate No. 1225342, December 1985.

10. Emokhonov V.N., Klyagin A.S., Talrose V.L., Shilyaev A.A. Electromagnetic radiation receiver: patent RU 1825246. No. 4641108/25; filed December 24, 1988; publ. October 04, 1995.

11. Kik M.A., Shilyaev A.A., Sigov A.S., Shamparov E.Yu., Zavyalov V.V., Bogomolov G.D., Emokhonov V.N., Terekhova E.V., Shilyaeva A.A., Deniskin V.V. Independently calibrated millimeter-wave radiation measuring receiver: patent 2 616 721 RF (in Russ.).

12. Komnik Yu.F. Physics of metal films. M.: Atomizdat Publ., 1979. 263 p. (in Russ.).

13. Kik M.A., Shilyaev A.A., Sigov A.S., Emokhonov V.N., Zav'yalov V.V., Shamparov E.Yu., Deniskin V.V. A receiver for measuring the power of electromagnetic radiation in a wide range of wavelengths. *Fundamental'nye problemy radioelektronnogo priborostroyeniya = Fundamental problems of radioengineering and device construction*. 2015;15(4):164-169 (in Russ.).

Об авторах:

Кик Михаил Андреевич, старший научный сотрудник, кафедра квантовой электроники, физический факультет, Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, МГУ). E-mail: prostokik@mail.ru

Голоколенов Илья Алексеевич, старший научный сотрудник, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (117334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2); старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, Россия, Москва, Мясницкая ул., д. 20). E-mail: undante@mail.ru

Сигов Александр Сергеевич, академик РАН, доктор физ.-мат. наук, президент ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: sigov@mirea.ru; Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017

Шиляев Анатолий Алексеевич, кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4); старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78) E-mail: marnya3491@yandex.ru

Завьялов Виталий Вадимович, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (117334, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2); старший научный сотрудник, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, Россия, Москва, Мясницкая ул., д. 20). E-mail: v_zav@mail.ru

Вербицкий Сергей Сергеевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4). E-mail: verbitvs@gmail.com

Целебровский Алексей Николаевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (119991, Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 4). E-mail: anzeleb@gmail.com

About the authors:

Mikhail A. Kik, Senior Researcher, Chair of Quantum Electronics, Physics Faculty, Lomonosov Moscow State University (119991, Russia, Moscow, Russia, Leninskie gory). E-mail: prostokik@mail.ru

Ilya A. Golokolenov, Senior Researcher, Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences (2, ul. Kosygina, Moscow 119334, Russia); Senior Researcher, National Research University Higher School of Economics (20, Myasnitskaya ul., Moscow 101000, Russia). E-mail: undante@mail.ru

Aleksandr S. Sigov, Academician, Dr. of Sci. (Phys.-Math.), President of the MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia); Scopus Author ID 35557510600, ResearcherID L-4103-2017. E-mail: sigov@mirea.ru

Anatoly A. Shilyaev, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, ul. Kosygina, Moscow 119991, Russia); Senior Researcher, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia). E-mail: marnya3491@yandex.ru

Vitaly V. Zavyalov, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences (2, ul. Kosygina, Moscow 119334, Russia); Senior Researcher, National Research University Higher School of Economics (20, Myasnitskaya ul., Moscow 101000, Russia). E-mail: v_zav@mail.ru

Sergey S. Verbitsky, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, ul. Kosygina, Moscow 119991, Russia). E-mail: verbitvs@gmail.com

Aleksey N. Tselebrovsky, Cand. of Sci. (Phys.-Math.) Senior Researcher, Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, ul. Kosygina, Moscow 119991, Russia). E-mail: anzeleb@gmail.com