

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-4-122-133>



УДК 53.084

Многоэлементный приемник для субмиллиметрового диапазона с пленочным чувствительным элементом на основе полуметаллов в тепловизорах смотрящего типа

**М.А. Кик¹,
Г.Д. Богомолов²,
А.С. Сигов³,
А.А. Шиляев^{3,4,@},
В.В. Завьялов^{2,5},
С.С. Вербицкий⁴,
А.Н. Целебровский⁴**

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ), Москва 119991, Россия

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

³МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

⁴Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН Москва 119991, Россия

⁵Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва 101000, Россия

@Автор для переписки, e-mail: marnya3491@Ya.ru

Рассмотрены перспективы разработки многоэлементных приемников для субмиллиметрового диапазона (СММ) с пленочным чувствительным элементом на основе полуметаллов в тепловизорах смотрящего типа (TV-СММ). Электромагнитные волны СММ-диапазона обладают высокой проникающей способностью через различные диэлектрические материалы, что дает возможность разработки тепловизора, с помощью которого можно обнаруживать и наблюдать предметы через самые разнообразные преграды: ткани, картон, дерево и т.д. В статье обобщены ранее полученные результаты исследований по разработке приемников излучения. Исходя из проведенных теоретических и экспериментальных исследований, обзора научно-технической и патентной литературы, в данной работе в качестве

чувствительного элемента выбран терморезистивный преобразователь на основе монокристалльных пленок материалов в переходном состоянии металл–узкозонный полупроводник–диэлектрик. Для определения возможностей использования тонкопленочного Bi и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ в качестве поглотителя терагерцового излучения, а также полиимидной пленки в качестве увеличивающего поглощение просветляющего покрытия были проведены измерения спектров пропускания и спектров отражения пленок монокристаллического Bi , выращенных на полиимидной подложке толщиной 12 мкм. Измерения были выполнены на установке, использующей селективный прием излучения при циклотронном резонансном поглощении в InSb , которая регистрирует тепловое излучение образцов материалов в диапазоне от 1 до 5 ТГц со спектральным разрешением 0.6 ТГц. Изготовлены макетные образцы приемников и измерены их характеристики, характеристики с помощью сконструированного стенда, в котором использован лазер, генерирующий излучение в СММ-области спектра. Пороговая чувствительность (NEP – noise equivalent power) предложенных приемников составила величину порядка $(4\div 6) \cdot 10^{-11} \text{ Вт/Гц}^{1/2}$.

Ключевые слова: излучение терагерцового диапазона, болометрический приемник, пленки полуметаллов, лазер на парах воды.

Для цитирования: Кик М.А., Богомолов Г.Д., Сигов А.С., Шилиев А.А., Завьялов В.В., Вербицкий С.С., Целебровский А.Н. Многоэлементный приемник для субмиллиметрового диапазона с пленочным чувствительным элементом на основе полуметаллов в тепловизорах смотрящего типа. *Российский технологический журнал*. 2019;7(6):122-133. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-122-123>

Multi-element receiver with semimetal film sensing element for the submillimeter thermal imagers of viewing type

Mikhail A. Kik¹,
Genrikh D. Bogomolov²,
Aleksandr S. Sigov³,
Anatoly A. Shilyaev^{3,4,@},
Vitaly V. Zavyalov^{2,5},
Sergey S. Verbitsky⁴,
Aleksey N. Tselebrovsky⁴

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991,

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

³MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

⁴N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia

⁵National Research University Higher School of Economics, Moscow 101000, Russia

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

Prospects of developing multi-element receivers for the submillimeter range (SMM) on the basis of thin-film semimetallic sensitive bolometers are considered. Electromagnetic

waves of the SMM band have a high penetrating power and allow developing a thermal imager for the detection and observation of objects through various materials: fabrics, cardboard, wood, etc. The previously obtained research results are summarized. On the basis of the theoretical and experimental studies and of a review of scientific, technical and patent literature, in this work, a thermoresistive converter based on single-crystal films of materials in the metal – narrow-bandgap semiconductor – dielectric transition state is selected as a sensitive element. To determine the possibilities of using thin-film Bi and Bi-Sb system as an absorber of terahertz radiation, as well as a polyimide film as an absorption-enhancing antireflection coating, the transmission spectra and reflection spectra of single-crystal Bi films grown on a 12 μm thick polyimide substrate were measured. The measurements were performed on a setup using selective radiation reception at cyclotron resonance absorption in InSb, which records the thermal radiation of material samples in the range from 1 to 5 THz with a spectral resolution of 0.6 THz. The design and characteristics of the model receiver are presented. The experimental setup was performed using a terahertz gas-discharge laser. The NEP of the proposed receiver is $\sim(4 \div 6) \cdot 10^{-11} \text{ W/Hz}^{1/2}$.

Keywords: terahertz radiation, bolometric receiver, semimetal films, water vapor laser.

For citation: Kik M.A., Bogomolov G.D., Sigov A.S., Shilyaev A.A., Zavyalov V.V., Verbitsky S.S., Tselebrovsky A.N. Multi-element receiver with semimetal film sensing element for the submillimeter thermal imagers of viewing type. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* = Russian Technological Journal. 2019;7(6):122-133 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-6-122-133>

Введение

Диапазон длин волн электромагнитного излучения в интервале 1.0–0.1 мм называют субмиллиметровым, а соответствующие частоты 300–3000 ГГц относят к терагерцовому диапазону. До настоящего времени исследование в субмиллиметровом (СММ) диапазоне носят в значительной мере академический характер и связаны с изучением фундаментальных характеристик веществ. Достаточно полное представление о состоянии и направлении исследований в СММ-диапазоне дает монография [1], в которой приведены многочисленные ссылки на работы ученых из разных стран.

Начиная с 1990-х годов, в этой области стали появляться работы, которые носят прикладной характер. Это обусловлено значительным возрастанием уровня в разработке и создании новых полупроводниковых материалов на основе гетероструктур и развитием процессов нанолитографии в микроэлектронике.

Хорошо известно, что электромагнитные волны СММ-диапазона обладают высокой проникающей способностью через различные материалы. Именно этот факт дал возможность разработать и создать тепловизор, работающий в СММ-диапазоне (ТВ-СММ), с помощью которого можно обнаруживать и наблюдать предметы через самые разнообразные преграды: ткани, картон, дерево и т. д. [2]. В таком приборе, вероятно, наиболее заинтересованы службы безопасности, ведущие борьбу со всеми видами преступности, и, в частности, провозом контрабандных товаров, так как его наличие позволяет обнаруживать предметы, скрытые под одеждой человека (без активной подсветки), и просматривать грузы на таможенных, в почтовых отделениях аэропортах и т. д. (активные системы).

Прибор, описанный в [2], не найдет широкого применения, так как время получения одного кадра составляет 30 мин. Это связано с тем, что изображение скрытого под

одеждой человека предмета получено сканированием одиночным приемником. Однако результаты, полученные в [2], дают возможность получить и уточнить параметры матричного приемника, необходимые для разработки ТВ-СММ. В работе будет показано, что применение тонкопленочных монокристаллических материалов на основе полуметаллов позволяет разработать и изготовить широкополосный приемник на весь СММ-диапазон.

1. Требования к характеристикам приемника. Необходимая пороговая чувствительность отдельного пикселя в матричном приемнике

Для решения этой задачи необходимо оценить величину плотности потока энергии F от различно нагретых участков поверхности «черного» тела с элементарной площадки ΔS в пределах малого телесного угла $\Delta\Omega$ в направлении, образующего с нормалью к поверхности угол $\theta \approx \pi/2$. Считая, что излучение происходит в полупространство, запишем формулу для оценки величины F в дифференциальном виде [3]:

$$dF = B\Delta\Omega d\omega = \frac{c}{2\pi} U(\omega, T) \Delta\Omega d\omega. \quad (1)$$

Здесь B – яркость объекта; c – скорость света; $U(\omega, T)$ – функция распределения энергии в спектре излучения черного тела:

$$U(\omega, T) = \left(\frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \right) \left(\exp \frac{\hbar\omega}{kT} - 1 \right)^{-1} \cdot \omega^3 d\omega \quad (2)$$

частота $\omega = 2\pi c/\lambda$, где λ – длина волны; T – температура; k – постоянная Больцмана. Показатель экспоненты в (2) приближенно равен единице при $T = 300$ К и $\lambda = 48$ мкм. Поэтому экспоненту в (2) для СММ-диапазона можно записать:

$$\exp(\hbar\omega/kT) \approx 1 - \hbar\omega/kT.$$

Подставив это выражение в (2) и сделав замену переменной $\omega \rightarrow \frac{2\pi c}{\lambda}$, проинтегрируем выражение (1) по λ . Окончательно для величины F получим выражение:

$$F = \frac{2}{3} kTc \left[(1/\lambda_1)^3 - (1/\lambda_2)^3 \right] \cdot \Delta\Omega. \quad (3)$$

Это выражение представляет собой формулу Джинса для плотности потока энергии, излучаемого черным телом в телесный $\Delta\Omega$ в интервале длин волн от λ_1 до λ_2 . При температуре $T_0 = 300$ К в единицах Вт/см² формула (3) примет вид:

$$F \approx 8.3 \cdot 10^{-11} \left[(1/\lambda_1)^3 - (1/\lambda_2)^3 \right] \cdot \Delta\Omega \text{ [Вт/см}^2\text{]} \quad (4)$$

Для разницы в плотности потока энергии ΔF от различных участков черного тела с температурным контрастом ΔT можно записать: $\Delta F = F \cdot \Delta T/T_0$.

Если сфокусировать это излучение на приемник с помощью линзы диаметром $D = 0.5$ м, находящейся на расстоянии $L = 3$ м от объекта, то $\Delta\Omega = \pi(D/2L)^2 \approx 0.022$ (входной зрачок системы).

В этом случае

$$F \approx 1.8 \cdot 10^{-12} \left[(1/\lambda_1)^3 - (1/\lambda_2)^3 \right] \cdot \Delta\Omega \text{ [Вт/см}^2\text{]}. \quad (5)$$

В табл. 1 приведены значения величин F и ΔF , полученные с использованием формулы (5), для различных температурных контрастов и величин λ_1 .

Таблица 1. Значения величин F и ΔF (Вт/см²), рассчитанные по формуле (5), для различных температурных контрастов и величин λ_1 (при $\lambda_2 \sim 1$ мм)

$\Delta T, \text{ K}$	$\lambda_1 = 100 \text{ мкм}$		$\lambda_1 = 200 \text{ мкм}$		$\lambda_1 = 300 \text{ мкм}$	
	F	ΔF	F	ΔF	F	ΔF
3	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$1.8 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-10}$
6	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$1.4 \cdot 10^{-9}$
8	$1.8 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$

Из анализа таблицы следует, что плотность потока излучения в рассматриваемом нами случае в интервале длин волн $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ достаточно велика и для разработки матричных СММ-приемников не обязательно использовать такие материалы, как сверхпроводники [2]. Необходимость осуществлять их индивидуальную термостабилизацию в узком температурном диапазоне (~ 0.02 К) при криогенных температурах не дает возможности для широкого их применения в разработках тепловизоров смотрящего типа. Здесь будет показано, что в этом случае могут быть использованы тонкопленочные материалы на основе $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$. Эти материалы обладают уникальными свойствами. В зависимости от концентрации Sb и толщины пленки они могут находиться в состояниях металл, узкозонный полупроводник и металлическое состояние, в котором электроны представляют собой двумерный Ферми-газ [4–6]. Полуметаллы могут быть использованы в приемниках одновременно и как термочувствительные элементы (ТЧЭ), и в качестве поглощающих излучение структур.

Нами получены тонкопленочные материалы с температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) $\alpha_1 = 2\%$ при температурах, близких к комнатной, и с $\alpha_1 \sim 100\%$ при температуре жидкого гелия. ТЧЭ в болометрах могут быть изготовлены с высоким сопротивлением (100 кОм и более), что дает возможность подавать на приемник повышенное напряжение смещения и увеличить вольт-ваттную чувствительность. В [2] представлен приемник, работающий при температуре вблизи сверхпроводящего перехода, у которого величина ТКС (1/град.) $\alpha_2 = 1000\%$. Выбор материала с большим значением α_2 нужен для повышения чувствительности приемника. Приемник, изготовленный из сверхпроводника, является низкоомным, и во избежание перегрева измерительным током напряжение смещения V_2 на нем составляет ~ 1 мВ. Вольт-ваттная чувствительность W приемников болометрического типа определяется, в основном, произведением $V \cdot \alpha$. Отношение величины $V \cdot \alpha$, полученной из измерений на материалах, предложенных нами (при напряжении смещения $V = 3$ В на испытуемом сопротивлении $R = 100$ кОм при температуре 230 К), к такой же величине для случая, описанного в [2], $W_2/W_1 = V_2 \cdot \alpha_2 / V_1 \cdot \alpha_1 = 6$. При температуре жидкого гелия эта величина увеличится приблизительно на два порядка. В то же время для тонкопленочных болометров на основе $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ существует возможность изготовления матрицы, в которой отсутствует (или сведен к минимуму) разброс физических характеристик отдельных пикселей.

2. Анализ спектров материалов

Нами были проведены предварительные эксперименты по изучению свойств пленок в терагерцовой области спектра в качестве моделирования этой ситуации. Результаты для пленки Bi представлены на рис. 1.

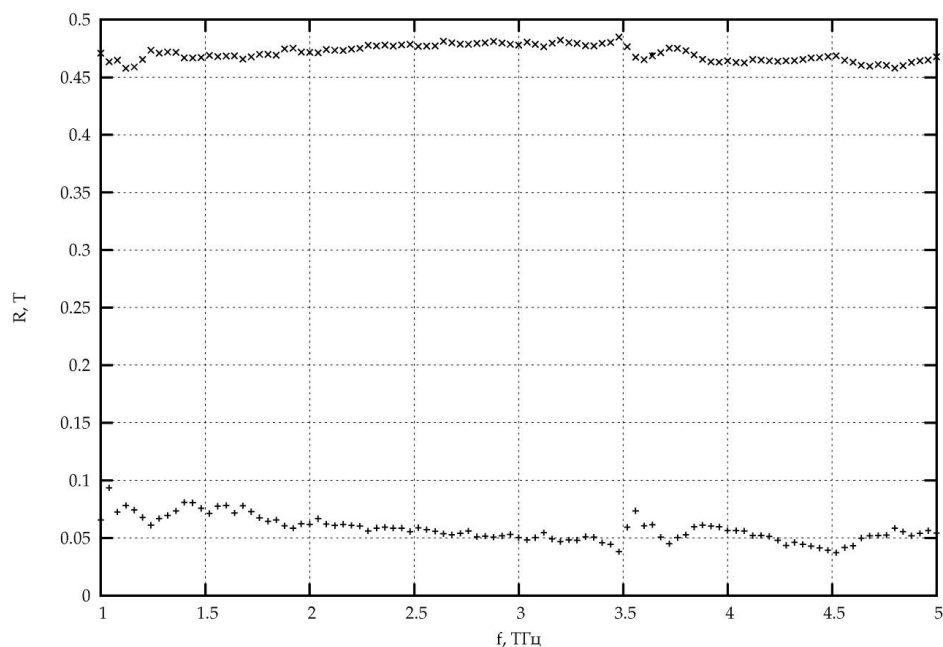


Рис. 1. Спектр пропускания (символ «x») и отражения (символ «+») пленки Bi толщиной 36 нм на полиимидной подложке толщиной 12 мкм. Излучение падает со стороны подложки.

Для определения возможностей использования тонкопленочных Bi и $\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x$ в качестве поглотителя терагерцового излучения, а также полиимидной пленки в качестве увеличивающего поглощение просветляющего покрытия были проведены измерения спектров пропускания и спектров отражения пленок монокристаллического Bi , выращенных на полиимидной подложке толщиной 12 мкм.

Измерения были выполнены на установке, использующей селективный прием излучения при циклотронном резонансном поглощении в InSb , которая регистрирует тепловое излучение образцов материалов в диапазоне от 1 до 5 ТГц со спектральным разрешением 0.6 ТГц [7].

Полный анализ спектров дал возможность выбрать конструкцию поглощающей пленки Bi с просветляющей пленкой полиимида + воздушный зазор. На основании данного анализа было также установлено, что показатель преломления полиимида $n = 1.8$.

В итоге был изготовлен тонкопленочный болометр (П-СММ1) по предложенному нами способу, описанному в [8], в котором удалось достичь величины поглощения по всей площади приемника излучения в терагерцовом диапазоне $\sim 70\%$.

Для испытаний приемников, а также исследования отражательных и поглощающих свойств материалов в СММ-области спектра нами был изготовлен стенд, в котором используется газоразрядный лазер на парах воды с мощностью излучения до 10 мВт [9]. Оптическая часть стенда представлена на рис. 2.



Рис. 2. Терагерцовая часть станда: локация объекта.

Используемый газоразрядный лазер облучает объект, подвешенный на блоке вращения, слабо расходящимся пучком терагерцового излучения. Отраженное от объекта излучение регистрируется охлажденным до температуры жидкого гелия Ge-приемником, расположенным на нижнем конце лучевода, погруженного в транспортный гелиевый криостат. Излучение направляется на приемник юстируемым зеркалом, расположенным на верхнем конце лучевода.

Для увеличения чувствительности регистрация отраженного от объекта излучения производится модуляционным методом. Для этого применен зеркальный механический модулятор, конструкция которого позволяет направлять часть лазерного излучения через полиэтиленовую линзу на опорный пирозлектрический приемник излучения. Блок-схема измерительной части станда приведена на рис. 3.

Исследуемый объект подвешивался на тонких нитях и приводился во вращательное движение вокруг вертикальной оси при помощи *механизма вращательного подвеса*, собранного на основе шагового двигателя FL28STH45. Питание двигателя обеспечивается функциональным генератором Agilent3322a, управляемым по программе от компьютера. Сигналы с пирозлектрического приемника (опорный канал) и с охлаждаемого Ge-приемника (рабочий канал) усиливаются узкополосными усилителями Unipan-233, настроенных на частоту модуляции механического модулятора, и поступают на многоканальный вольтметр Keithley-2000, осуществляющий оцифровку сигналов и передачу их на компьютер.

Для передачи данных используется стандарт GPIB.

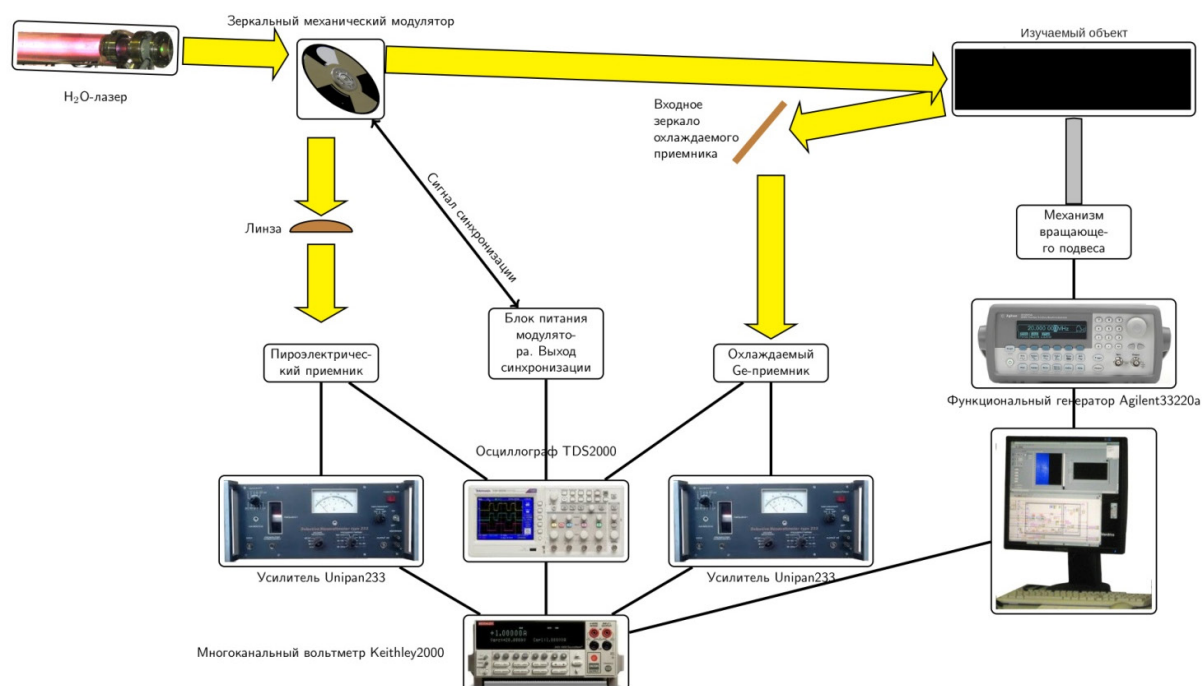


Рис. 3. Блок-схема измерительной части стенда.

3. Источник терагерцового излучения [9]

Лазерная генерация в терагерцовом диапазоне при разряде в парах воды возникает на переходах между вращательными уровнями, на которые расщеплены колебательные уровни молекулы воды.

В режиме непрерывного излучения от лазера на парах воды можно получить генерацию на следующих длинах волн (табл. 2).

Таблица 2. Возможные длины волн непрерывного излучения лазера на парах воды

	$H_2O + H_2$									$D_2O + D_2$			
λ , мкм	28.0	33.0	47.2	55.1	78.4	79.1	115	118.6	220	71.9	84.3	107.7	171.7

Регулируя давление и соотношение компонент газовой смеси и настраивая длину резонатора лазера, можно с одним и тем же выходным зеркалом получить генерацию как на одной, так и одновременно на нескольких длинах волн (см. рис. 4).

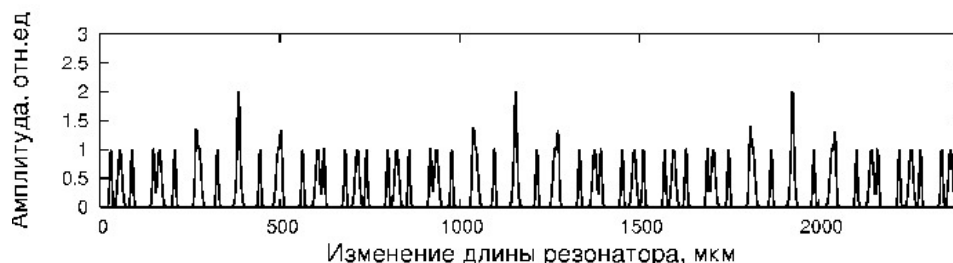


Рис. 4. Возбуждение волн с $\lambda = 78.4, 118$ и 220 мкм при изменении длины резонатора.

Расходимость лазерного луча и распределение мощности по его сечению. Эти величины определяются типом (модой) возбужденного в резонаторе лазера колебания. Для основного TEM₀₀-колебания распределение мощности по сечению азимутально симме-

трично и имеет радиальный гауссовский профиль $1 - \exp(r/r(l))^2$ с шириной $r(l)$, вычисляемой по формулам:

$$r(l) = r_0 \left(1 + l^2 / (LR - L^2) \right)^{1/2}, \quad r_0 = \left((LR - L^2)^{1/2} \times \lambda / 4\pi \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где l – расстояние от плоскости рассматриваемого сечения до плоского зеркала; r_0 – радиус сечения пучка на плоском зеркале; L – расстояние между плоским и сферическим зеркалами; R – радиус кривизны сферического зеркала.

Практический интерес представляет $r_{99}(l) \approx 2.146 r(l)$ – радиус сечения пучка в границах, содержащих 99% его мощности, изображенный на рис. 5. Для представляемого в данной работе лазера $R = 7$ м, $L = 3.4$ м, и радиус r_0 сечения пучка на плоском зеркале для длин волн 118.6 и 220 мкм составляет соответственно 0.57 и 0.78 см.

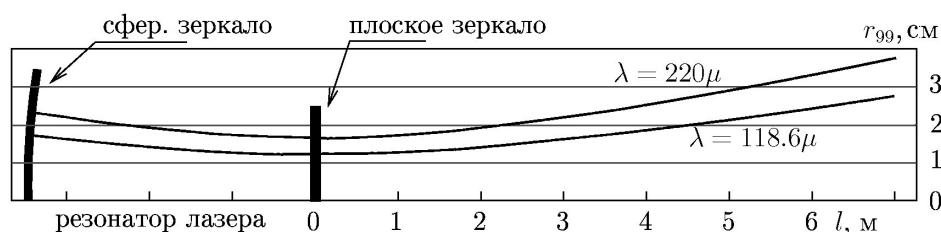


Рис. 5. Гауссовый профиль пучка излучения лазера, рассчитанный на уровне $1/e^2$ потока.

При широкой апертуре резонатора лазера для коротких длин волн, кроме основного TEM_{00} -колебания, могут возбуждаться и высшие типы: TEM_{01} и TEM_{10} , которые легко идентифицировать и отфильтровывать при перестройке длины лазерного резонатора.

Наличие стенда, в котором применяется лазер терагерцового диапазона, позволило нам более надежно протестировать и оценить характеристики экспериментальных макетов болометров, изготовленных нами как предварительный вариант пикселя для матричных приемников, так как в этом случае отсутствуют фоновые помехи.

4. Измерение характеристик болометров (П-СММ1)

Перед испытанием на место пироэлектрического приемника ставился болометр для измерения мощности электромагнитного излучения в широком диапазоне длин волн [10] и производилась калибровка стенда. Поток излучения модулировался с частотой 3 Гц. Далее, используя уже прокалиброванный стенд, мы измеряли вольт-ваттную чувствительность W и пороговую чувствительность, то есть величину $NEP = V_{ш}/W$, где $V_{ш}$ – величина шума термочувствительного элемента в полосе 1 Гц.

Характеристики приемника П-СММ1:

сопротивление $R_0 = 130$ кОм;

площадь приемной площадки $S = 1$ мм²;

чувствительность $W = 400$ В/Вт;

пороговая чувствительность $NEP = (4 \div 6) \cdot 10^{-11}$ Вт/Гц^{1/2}.

5. Пропускание тканями электромагнитного излучения в коротковолновой части СММ-диапазона

В [11] достаточно полно представлены экспериментальные данные по пропусканию тканей в терагерцовой области спектра. Авторами показано, что величина T при частотах от 1 до 5 ТГц принимает значения от 10 до 30%. Эти результаты подтверждены и нами при измерениях на стенде.

Предложенный приемник П-СММ1 является широкополосным. Он может использоваться для регистрации излучения от инфракрасной области спектра до 200 ГГц. Это важно использовать при разработке ТВ-СММ, так как контрастная яркость ΔF увеличивается с уменьшением длины волны по закону $\sim 1/\lambda^3$.

Заключение

Исходя из проведенных теоретических и экспериментальных исследований, обзора научно-технической и патентной литературы, в данной работе в качестве чувствительного элемента выбран терморезистивный преобразователь на основе монокристаллических пленок материалов в переходном состоянии металл–узкозонный полупроводник–диэлектрик. Одним из таких материалов могут служить пленки висмута (Bi+Sb), полученные в условиях, благоприятствующих образованию кристаллической структуры, с размерами кристаллитов, превосходящими характерные размеры структурных элементов преобразователя. Кроме того, должна быть правильно подобрана толщина таких пленок и учтена зависимость квантового состояния электронов от ширины структурных элементов термочувствительного элемента. Конструкция пикселя должна также соответствовать структуре организации матрицы как с расположением ее на кристалле схемы считывания сигнала (технология chip-on-chip), так и при ее организации с внешним опросом сигнала.

Благодарности

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

Литература:

1. Субмиллиметровая диэлектрическая спектроскопия твердого тела / отв. ред. Г.В. Козлов. М.: Наука, 1990. 221 с.
2. Luukanen A., Miller A.J., Grossman E.N. Passive hyperspectral terahertz imagery for security screening using a cryogenic microbolometer // Proceedings of the SPIE. 2005. V. 5789. P. 127–134. <https://doi.org/10.1117/12.608838>
3. Королев Ф.А. Теоретическая оптика. М.: Высшая школа, 1966. 557 с.
4. Baba S., Sugawara H., Kinbara A. Electrical resistivity of thin bismuth films // Thin Solid Films. 1976. V. 31. № 3. P. 329–335. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(76\)90379-5](https://doi.org/10.1016/0040-6090(76)90379-5)
5. Ando Y. Topological Insulator Materials // J. Phys. Soc. Jap. 2013. V. 82. Iss. 10. P.102001-32. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.82.102001>
6. Chu H.T. Comment on “Semimetal-to-semiconductor transition in bismuth thin films” // Phys. Rev. B. 1995. V. 51. Iss. 8. P. 5532–5534. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.5532>
7. Богомолов Г.Д., Завьялов В.В., Зотова Е.А., Шампаров Е.Ю. Быстродействующий перестраиваемый детектор излучения субмиллиметрового диапазона на циклотронном резонансе в InSb // Приборы и техника эксперимента. 2002. № 1. С. 87–95.
8. Шиляев А.А., Емохонов В.Н., Сигов А.С., Шиляева А.А., Фомина Л.Ф., Денискин В.В., Иванов А.А., Кик М.А. Наноструктурированный ИК-приемник (болومتر) с большой поверхностью поглощения: патент RU 2511275. № 2012129709/28; заявл. 16.07.2012; опубл. 10.04.2014. Бюл. № 10.
9. Завьялов В.В., Богомолов Г.Д. Стабильный газоразрядный лазер на парах воды с генерацией ортогональных поляризаций // Приборы и техника эксперимента. 1982. Т. 25. № 3. С. 174–179.

10. Кик М.А., Шилиев 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.

11. Родэ С.В., Шампаров Е.Ю. Влияние влаги на терагерцовые спектры тканей // *Дизайн и технологии*. 2011. № 24 (66). С. 70–76.

References:

1. Submillimeter dielectric spectroscopy of a solid. Ed. By G.V. Kozlov. M.: Nauka Publ., 1990. 221 p.
2. Luukanen A., Miller A.J., Grossman E.N. Passive hyperspectral terahertz imagery for security screening using a cryogenic microbolometer. *Proceedings of the SPIE*. 2005;5789:127-134. <https://doi.org/10.1117/12.608838>
3. Korolev F.A. Theoretical optics. M.: Vysshaya shkola Publ., 1966. 557 p. (in Russ.).
4. Baba S., Sugawara H., Kinbara A. Electrical resistivity of thin bismuth films. *Thin Solid Films*. 1976;31(3):329-335. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(76\)90379-5](https://doi.org/10.1016/0040-6090(76)90379-5)
5. Ando Y. Topological Insulator Materials. *J. Phys. Soc. Jap.* 2013;82(10):102001-32. <https://doi.org/10.7566/JPSJ.82.102001>
6. Chu H.T. Comment on “Semimetal-to-semiconductor transition in bismuth thin films”. *Phys. Rev. B*. 1995;51(8):5532-5534. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.51.5532>
7. Bogomolov G.D., Zav'yalov V.V., Zotova E.A., Shamparov E.Yu. A Fast tunable detector of submillimeter waves on cyclotron resonance in an InSb crystal. *Instruments and Experimental Techniques*. 2002;45(1):78-86. <https://doi.org/10.1023/A:1014560528347>
8. Shilyaev A.A., Emokhonov V.N., Sigov A.S., Shilyaeva A.A., Fomina L.F., Deniskin V.V., Ivanov A.A., Kik M.A. Nanostructured IR receiver (bolometer) with a large absorption surface: patent RU 2511275. No. 2012129709/28; filled July 16, 2012; publ. April 10, 2014 (in Russ.).
9. Zav'yalov V.V., Bogomolov G.D. A stable water-vapor discharge laser generating orthogonal polarizations. *Instruments and Experimental Technique*. 1982;25(3):708-713.
10. 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 priborostroeniya* = Fundamental problems of radioengineering and device construction. 2015;15(4):164-169 (in Russ.).
11. Rode S.V., Shamparov E.Yu. Effect of moisture on terahertz spectra of tissues. *Design and Technologies*. 2011;24(66):70-76 (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

Богомолов Генрих Дмитриевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН (117334 Россия, Москва, ул. Косыгина, д. 2). E-mail: bogomolov@kapitza.ras.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

Шилиев 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). E-mail: marnya3491@yandex.ru; старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

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

Genrikh D. Bogomolov, Senior Researcher, Cand. of Sci. (Phys.-Math.), Kapitza Institute for Physical Problems, Russian Academy of Sciences (2, ul. Kosygina, Moscow 119334, Russia). E-mail: bogomolov@kapitza.ras.ru

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

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