

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СИГНАЛОВ И ИЗОБРАЖЕНИЙ

УДК 53.083, 535-1, 681.2, 681.7

ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ВИЗУАЛИЗАТОР НА ОСНОВЕ ТГц—ИК-КОНВЕРТЕРА

© А. Г. Паулиш^{1,2}, Б. Н. Новгородов¹, С. В. Хрящев¹,
С. А. Кузнецов^{1,3}

¹Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1

²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

³Новосибирский государственный университет,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2
E-mail: paulish63@ngs.ru

Предложена и исследована новая система ТГц-визуализатора для регистрации изображения в терагерцовом (ТГц) диапазоне с использованием конверсии ТГц-излучения в тепловое ИК-излучение. Конвертер ТГц—ИК состоит из ультратонкого резонансного ТГц-поглотителя (метапоглотителя), на обратную сторону которого нанесён эмиссионный слой с коэффициентом эмиссии, близким к единице. Поглощение ТГц-излучения приводит к нагреванию конвертера, которое регистрируется ИК-камерой со стороны эмиссионного слоя. Малая толщина конвертера (более чем в 50 раз меньше рабочей длины волны ТГц-излучения) определяет его малую теплоёмкость, что повышает чувствительность и быстродействие визуализатора. Оптимизация оптической схемы ТГц-визуализатора, изготовление разрезов в структуре конвертера для уменьшения блюминга и увеличения отклика, методика обработки ИК-изображения, повышающая отношение сигнал/шум, позволили обеспечить чувствительность ТГц-визуализатора на уровне чувствительности тепловых детекторов в ИК-диапазоне 8–12 мкм.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, детекторы терагерцового изображения, конверсия ТГц—ИК, обработка изображения.

DOI: 10.15372/AUT20190108

Введение. Одной из задач создания систем терагерцового (ТГц) диапазона является визуализация пучков данного излучения. Наилучшим способом проблема визуализации решается с использованием матричных фотоприёмников. Так как энергия фотона ТГц-излучения мала (0,4–4 мэВ), то матричные фотоприёмники, основанные на внутреннем фотоэффекте, требуют глубокого охлаждения. Ведутся разработки ТГц-детекторов на основе полупроводниковых структур $Pb_{1-x}Sn_xTe:In$ [1, 2], $HgCdTe$ [3], низкоразмерных структур $Ge-Si$ [4]. Сегодня такие системы — весьма дорогие единичные устройства.

Охлаждаемые и неохлаждаемые детекторы на основе барьеров Шоттки используются как для прямого детектирования излучения, так и в качестве нелинейных элементов в гетеродинных смесителях. Такие детекторы обладают высокой чувствительностью в терагерцовом и субтерагерцовом диапазонах, но их сложно объединить в матричную структуру из-за высокой мощности локального осциллятора и гетеродина [5, 6].

Наиболее чувствительными детекторами, обеспечивающими высокое спектральное разрешение, являются гетеродинные детекторы на основе структур сверхпроводник—диэлектрик—сверхпроводник [7]. Данные детекторы работают при субгелиевых темпе-

ратурах и обеспечивают чувствительность, близкую к квантовому пределу, что даёт возможность работать в режиме счёта фотонов. Однако крупноформатные матричные детекторы ещё не созданы. Для высокочастотного ТГц-диапазона (более 1 ТГц) хорошие характеристики имеют болометры на горячих электронах на основе сверхпроводящих слоёв NbN [8, 9], которые являются перспективными для создания матричных структур большого формата. Благодаря малому времени электрон-фононной релаксации такие детекторы перспективны для создания широкополосных детекторов.

Болометрические матричные приёмники, разработанные для регистрации ИК-излучения ($\lambda = 8\text{--}12$ мкм), обладают низкой чувствительностью в ТГц-области спектра [10]. Пирозлектрические матричные приёмники фирмы Ophir-Spiricon, LLC (США) [11] имеют малую площадь чувствительного элемента ($\approx 80 \times 80$ мкм) и малый размер матрицы ($\approx 26 \times 26$ мм) и предназначены в основном для регистрации излучения с $\lambda \leq 100$ мкм. Для получения качественного изображения излучения с длиной волны > 100 мкм таких размеров матрицы явно недостаточно. Терагерцовые камеры фирмы Terasense Group, Inc. (США) [12], наоборот, имеют размер пикселя $1,5 \times 1,5$ мм и размерность до 64×64 и предназначены для получения изображения излучения с $\lambda \geq 1$ мм.

Одним из наиболее эффективных тепловых детекторов, используемых для регистрации ТГц-излучения, является оптико-акустический или пневматический приёмник (ячейка Голея) [13]. Однако до сих пор не созданы матричные приёмники такого типа для получения ТГц-изображения, что возможно с помощью термофлюоресцентных экранов, выпускаемых компанией Macken Instruments (США) [14]. Однако применение этих экранов ограничено ввиду:

- а) низкой чувствительности к ТГц-излучению;
- б) малого динамического диапазона (< 20) и низкого временного разрешения (> 1 с);
- в) необходимости равномерной подсветки рабочего поля экрана ультрафиолетовым (УФ) излучением от внешнего источника;
- г) необходимости осуществления УФ-подсветки экрана со стороны падения ТГц-излучения, что создаёт дополнительные трудности при его регистрации в геометрии на просвет. Сохраняется потребность в простых, малогабаритных и достаточно недорогих матричных детекторах изображения ТГц-диапазона, работающих при комнатной температуре и позволяющих получать изображение без длительного (< 1 с) накопления и сканирования.

В данной работе приводятся результаты исследования ТГц-визуализатора с использованием ТГц—ИК-конвертера. Решалась задача разработки системы визуализации ТГц-изображения близко расположенных объектов: расстояние до объекта ≤ 100 см, поле зрения ≤ 50 см. Такая задача связана с реализацией носимого варианта ТГц-визуализатора для локального (< 1 м) детектирования скрытых (замаскированных) объектов. Для дистанционных детекторов (> 5 м) необходимо повышать мощность ТГц-подсветки и расширять входную апертуру ТГц-визуализатора, что увеличит массогабаритные параметры системы.

Схема ТГц-визуализатора. На рис. 1 показана схема ТГц-визуализации. Пучок ТГц-излучения из источника 1 формируется коллиматором 2 из прозрачного материала в ТГц-диапазоне и освещает объект наблюдения 3. Изображение объекта с помощью объектива 4 проецируется на ТГц—ИК-конвертер 5. В результате поглощения ТГц-излучения происходит нагрев конвертера, что приводит к увеличению интенсивности теплового излучения со стороны эмиссионного слоя. Тепловое изображение конвертера регистрируется ИК-камерой, состоящей из проекционной системы 6 и матричного инфракрасного фотоприёмного устройства (ФПУ) 7.

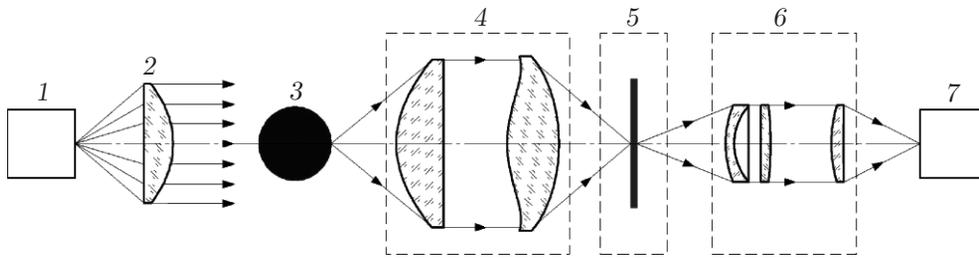


Рис. 1. Схема визуализации ТГц-излучения в геометрии на просвет

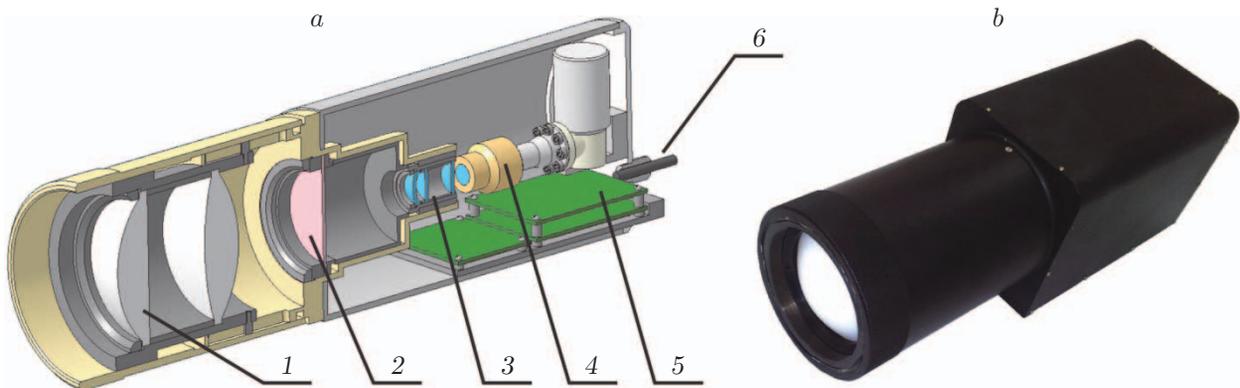


Рис. 2. ТГц-визуализатор: а — схема (1 — ТГц-объектив, 2 — ТГц-ИК-конвертер, 3 — ИК-объектив, 4 — ИК ФПУ, 5 — модуль электронной обработки, 6 — выходной сигнал) и б — внешний вид

На рис. 2 показаны конструкция (а) и внешний вид (б) реализованного ТГц-визуализатора. В качестве инфракрасного ФПУ использовалось охлаждаемое устройство Sofradir Epsilon MW (Франция) со спектральным диапазоном чувствительности 3,4–4,8 мкм и типичной разницей температуры, эквивалентной шуму, < 20 мК. В качестве источника ТГц-излучения использовались лампы обратной волны с перестраиваемой частотой монохроматического излучения в диапазоне 0,1–1,0 ТГц и мощностью выходного излучения 1–3 мВт.

ТГц-ИК-конвертер. Схема конвертера (рис. 3, а) основана на ультратонких резонансных поглотителях (метаматериалах) [15], представляющих собой многослойную структуру на базе плёнки диэлектрика (в нашем случае полипропилена) 1, покрытой с двух сторон металлическим слоем 2, 3. На металлическом слое (со стороны падения излучения) сформирован топологический рисунок (частотно-избирательная поверхность (ЧИП) [16, 17]), обеспечивающий резонансное поглощение ТГц-излучения на заданной длине волны $\lambda_{рез}$ в диапазоне 300–3000 мкм (0,1–1 ТГц). Ширина полосы поглощения составляет $\Delta\lambda_{рез}/\lambda_{рез} \approx 0,05$. В нашем случае топология ЧИП представляла собой набор резонаторов с расщеплённым кольцом (рис. 3, с) [18]. Размер одного резонатора составлял $\approx 90 \times 90$ мкм, диаметр рабочей апертуры конвертера — 50–70 мм. На обратную сторону поглотителя нанесён эмиссионный слой 4, состоящий из смеси полимера и графита толщиной 20–40 мкм с коэффициентом эмиссии 0,90–0,93 [18]. Метапоглотители обладают близким к единице ($> 0,98$) коэффициентом поглощения излучения на $\lambda_{рез}$. Поглощение ТГц-излучения приводит к изменению теплового излучения конвертера со стороны эмиссионного слоя, которое регистрируется ИК-камерой. Излучением со стороны ЧИП можно пренебречь, так как алюминий и полипропилен имеют низкий коэффициент эмиссии (менее 0,03). Таким образом, в ТГц-визуализаторе используется конверсия энергии ТГц-излучения в тепловое излучение поглотителя с максимумом вблизи $\lambda_{макс} \approx 10$ мкм (при

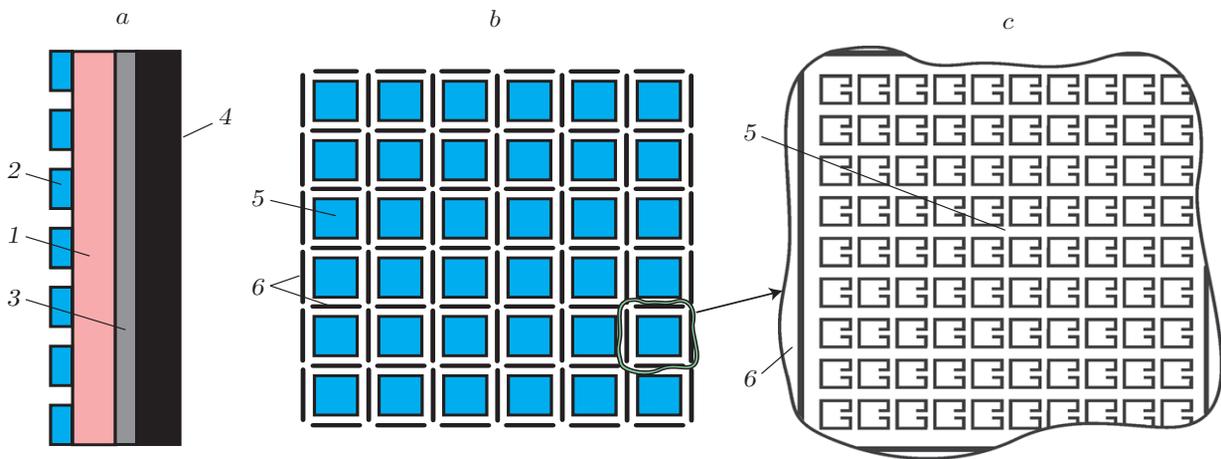


Рис. 3. Схема ТГц—ИК-конвертера: *a* — схема в разрезе, *b* — фрагменты ЧИП и разрезы, *c* — структура ЧИП

температуре $T \approx 300$ К). Технология изготовления метапоглопителей, являясь, по сути, планарной технологией с использованием фотолитографии, позволяет на одной структуре конвертера сформировать фрагменты поглотителей с различной спектральной и поляризационной чувствительностью (позиция 5 на рис. 3, *b*). В результате в одном оптико-электронном устройстве можно реализовать функцию спектрофотометра (фрагменты с различной спектральной чувствительностью) и/или поляриметра (фрагменты с различной поляризационной чувствительностью) [19]. Рабочий спектральный диапазон метапоглопителей ограничивается только технологиями их изготовления, которые на данный момент охватывают интервал длин волн от 1,6 до 10000 мкм [15].

Очевидно, что из-за конечной теплопроводности вдоль структуры конвертера будет происходить расплывание теплового изображения (эффект блюминга). Для уменьшения блюминга в конвертере методом лазерной резки выполнены сквозные разрезы (позиция 6 на рис. 3, *b*, *c*) шириной менее 20 мкм, не нарушающие целостности структуры и образующие пиксели размером $\sim (\lambda \times \lambda)$. В данной работе использовалось излучение с частотой 0,30–0,36 ТГц ($\lambda = 1,0$ –0,83 мм), поэтому размеры пикселей в конвертере составляли $\approx 0,9 \times 0,9$ мм.

Для реализации ТГц-визуализатора необходимо было разработать соответствующие оптические элементы, такие как ТГц-объектив для проецирования изображения объекта на поверхность ТГц—ИК-конвертера, а также проекционный объектив для передачи теплового изображения эмиссионного слоя в плоскость ИК-матрицы.

ТГц-объектив. В качестве материалов для изготовления линз ТГц-объектива рассматривались наиболее доступные материалы: полиэтилен высокой плотности (HDPE), полиметилпентен (PMP) и фторопласт (PTFE). Особенно актуальным диапазоном является частотный диапазон 0,1–1,0 ТГц, поскольку такие волны обладают достаточно высокой проникающей способностью в сочетании с приемлемым пространственным разрешением. Анализ спектральных характеристик показал, что эти материалы обладают примерно одинаковым коэффициентом пропускания не менее 80 % при толщине 10 мм. Поэтому для изготовления линз был выбран фторопласт как более доступный, к тому же обладающий наименьшим коэффициентом преломления, что снижает потери при отражении излучения от поверхности. Для их сокращения необходимо свести количество линз к минимуму. При таких условиях качественное изображение на поверхности конвертера с рабочей апертурой ≈ 50 мм можно получить с помощью только асферической формы. Использование поверхностей линз, которые описываются полиномом вида $Z(r) = \alpha_1 r^2 + \alpha_2 r^4 + \alpha_3 r^6$, позволяет

получить изображение дифракционного качества по всему полю изображения. Дисперсия показателя преломления фторопласта в ТГц-диапазоне мала, благодаря чему объектив является ахроматическим для всего участка спектра.

Инфракрасный объектив. Требования к ИК-объективу определяются параметрами используемого ИК ФПУ: спектральный диапазон чувствительности 3,4–4,8 мкм, размерность матрицы 384×288, размер пикселя 15×15 мкм. При разработке проекционно-го ИК-объектива необходимо было решить нетрадиционную задачу передачи изображения. Обычно тепловизионные системы создаются для наблюдения удалённых объектов. Здесь же задачей является передача теплового изображения конвертера на поверхность ИК-матрицы, отстоящих друг от друга на минимальном расстоянии для снижения массогабаритных параметров визуализатора и повышения коэффициента передачи энергии. Система содержала три линзовых компонента в виде менисков со сферическими поверхностями, первый из которых изготовлен из германия, а два остальных — из кремния. В спектральном диапазоне ИК ФПУ (3,4–4,8 мкм) объектив является ахроматическим и в нём отсутствуют aberrации вследствие малой дисперсии показателей преломления.

В традиционной схеме ИК-объектива промежуточное изображение переносится дополнительной проекционной системой в плоскость матрицы. Расчёт в предлагаемой схеме был произведён без проекционной системы, что обеспечило минимальное количество линз и соответственно малые потери на отражение от линз. Выходной зрачок объектива расположен в плоскости охлаждаемой диафрагмы криостата ФПУ, что позволило исключить фоновое излучение от элементов конструкции объектива. С учётом ИК-объектива эквивалентная шуму разница температуры ИК-камеры составила 40 мК. Именно эта величина определяет чувствительность ТГц-визуализатора независимо от спектральной чувствительности ИК ФПУ.

Получение и обработка ТГц-изображения. Размерность матрицы ИК ФПУ (в нашем случае 384×288) явно избыточна для получения качественного ТГц-изображения с длиной волны ~ 1 мм на конвертере диаметром ≈ 50 мм. Это даёт возможность повысить соотношение сигнал/шум за счёт усреднения сигналов пикселей ИК-камеры, приходящихся на один пиксель ТГц—ИК-конвертера, ограниченного разрезами.

На рис. 4, *a* показано исходное ИК-изображение фрагмента конвертера с разрезами. Данный конвертер состоял из пикселей с одинаковой резонансной частотой $\lambda_{рез} = 0,33$ ТГц. Мощность падающего излучения на данной частоте была равна 2,8 мВт. На изображении хорошо видны разрезы в конвертере, образующие пиксели ТГц-изображения. По площади ТГц-пикселя проводилось усреднение сигнала, заполнялись об-

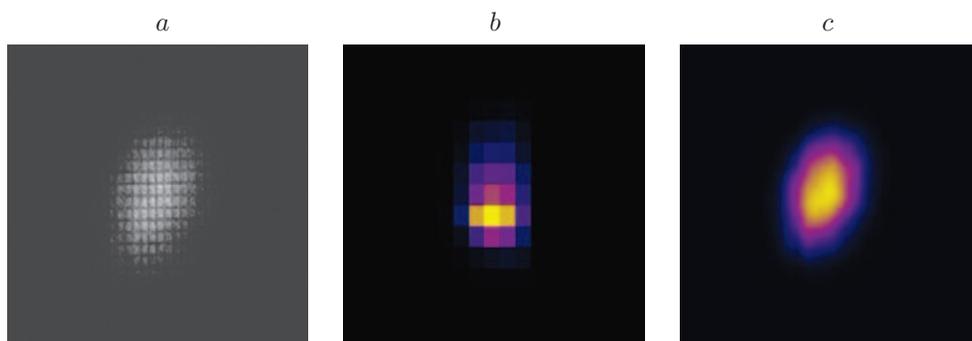


Рис. 4. Обработка изображения: исходное изображение пучка с длиной волны 0,9 мм (*a*); пример увеличенного изображения с усреднением сигнала пикселей ИК-камеры, приходящихся на пиксель ТГц—ИК-конвертера (*b*); сглаженное изображение (*c*)

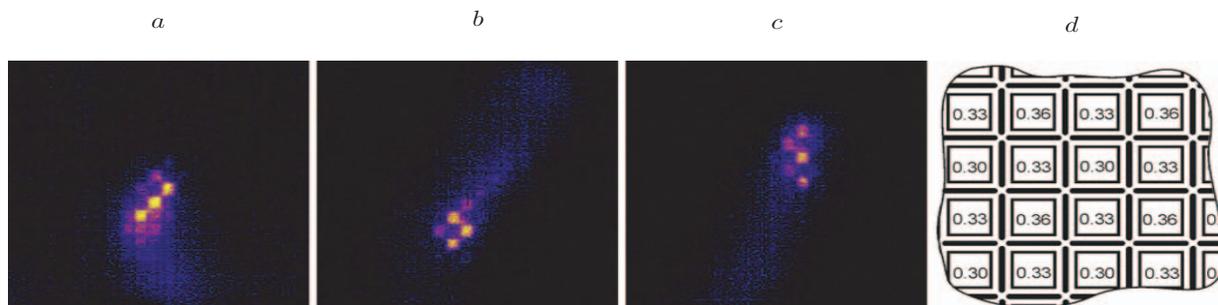


Рис. 5. Результат визуализации при движении пучка излучения с частотой 0,33 ТГц вдоль поверхности многоспектрального конвертера: стоп-кадры видеозаписи (а—с); схема расположения фрагментов ЧИП с резонансными частотами (d)

ласти изображения, соответствующие разрезам. Количество пикселей ИК-фотоприёмника, приходящихся на пиксель конвертера, составляло от 10×10 до 15×15 . В результате усреднения соотношение сигнал/шум возрастает в 10–15 раз. Так как кадровая частота предложенного ТГц-визуализатора, обусловленная теплоёмкостью ТГц—ИК-конвертера, составила менее 3 Гц, осуществлялось накопление сигнала за время кадра $\approx 0,3$ с. В итоге получалось изображение с однородными квадратами разной интенсивности (пример увеличенного фрагмента такого изображения показан на рис. 4, b). Для улучшения восприятия изображения проводилось гауссовское сглаживание с размером окна порядка 21. Итоговое изображение представлено на рис. 4, с.

На рис. 5, а—с приведены стоп-кадры видеозаписи с ТГц-визуализатора при движении пучка излучения с частотой 0,33 ТГц вдоль поверхности многоспектрального конвертера, содержащего фрагменты ЧИП с резонансными частотами $\lambda_{\text{рез}} = 0,30; 0,33; 0,36$ ТГц. Схема расположения фрагментов ЧИП показана на рис. 5, d. На рисунке видно, что на облучение реагируют только фрагменты с рабочей частотой 0,33 ТГц, расположенные в шахматном порядке, и практически не реагируют соседние фрагменты ЧИП с рабочими частотами 0,30 и 0,36 ТГц, что подтверждает хорошее спектральное разрешение и низкую межпиксельную связь конвертера. Рассчитанная величина межпиксельной связи составила менее 2 мВт/К, что соответствует современным тепловым приёмникам ИК-излучения. При регистрации многоспектрального изображения производилась предварительная калибровка, определяющая связь ТГц-пикселей с координатами соответствующих пикселей инфракрасного ФПУ. Это позволяет раскрашивать пиксели с разной спектральной чувствительностью в разные цвета при выводе изображения на цветной монитор.

Параметры ТГц-визуализатора были исследованы с использованием набора ламп обратной волны в качестве перестраиваемых монохроматических источников излучения. Калибровка чувствительности проводилась с помощью измерителя мощности производства Thomas Keating Instruments, Ltd. (Великобритания). Мощность ТГц-излучения, падающего на пиксель конвертера, определялась по измеренной мощности всего ТГц-пучка и его пространственного распределения, полученного с помощью ТГц-визуализатора. При определении мощности, эквивалентной шуму, проводились усреднение сигнала по пикселям ИК ФПУ, приходящимся на пиксель конвертера, и накопление сигнала за время кадра. Чувствительность ТГц-визуализатора определяется эффективностью конверсии ТГц—ИК. В работе [20] методами численного моделирования показано, что эффективность конверсии при наличии разрезов в конвертере может достигать 80 %.

Полученные характеристики ТГц-визуализатора приведены в таблице, согласно которой мощность, эквивалентная шуму, для данной системы, равная 10^{-9} Вт/Гц^{1/2}, соответствует тепловым (болометрическим и пироэлектрическим) детекторам для инфракрасного

Параметры ТГц-визуализатора	Значения
Размерность ИК-матрицы	384 × 288
Спектральный диапазон чувствительности	3,6–4,9 мкм
Диапазон рабочей частоты ТГц-визуализатора ($\lambda_{рез}$)	0,1–1,0 ТГц
Спектральная селективность ($\Delta\lambda_{рез}/\lambda_{рез}$)	<0,05
Поляризационная селективность	>20 дБ
Мощность ТГц-излучения, эквивалентная шуму	10^{-9} Вт/Гц ^{1/2}
Кадровая частота	≤3 Гц
Габаритные параметры: длина × диаметр	375 × 110 мм
Масса	2,9 кг
Питание	+12 В
Выходной сигнал	Аналоговый + USB

диапазона ($\lambda = 8\text{--}12$ мкм). ТГц-визуализатор уступает им по быстродействию: частота кадра не превышает 3 Гц. В [19] также была установлена линейность зависимости времени отклика ТГц—ИК-конвертера от его толщины, поэтому повышения кадровой частоты можно достичь уменьшением толщины конвертера для снижения его теплоёмкости, определяющей быстродействие ТГц-визуализатора.

Заключение. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований ТГц-визуализатора на основе ТГц—ИК-конвертера. Изготовление разрезов в структуре конвертера значительно уменьшило эффект расплывания (блюминга) ИК-изображения. Усреднение сигналов пикселей ИК-камеры, приходящихся на пиксель ТГц—ИК-конвертера, и накопление сигнала за время кадра позволили увеличить соотношение сигнал/шум более чем на порядок и тем самым обеспечить чувствительность ТГц-визуализатора на уровне тепловых матричных фотоприёмников ИК-диапазона. Чувствительность ТГц-визуализатора задаётся в основном температурным разрешением ИК-камеры независимо от её спектрального диапазона чувствительности, а быстродействие определяется толщиной ТГц—ИК-конвертера.

Данный ТГц-визуализатор предполагается применять в системах анализа (включая спектральный) скрытых объектов как альтернативу (или дополнение) рентгеновским системам, поскольку ТГц-излучение не является ионизирующим, при этом обладает достаточной проникающей способностью и обеспечивает приемлемое пространственное разрешение, а также в системах контроля профиля пучков в квазиоптических спектрометрах, рупорно-линзовых антенн, параметров излучения гиротронов и других источников ТГц-излучения. С использованием компактных источников ТГц-излучения, таких как барьеры Шоттки, лавинно-пролётные диоды, диоды Ганна, возможно создание носимых/переносных активных систем, объединяющих в одной конструкции источники излучения (их может быть несколько), ТГц-визуализатор, ТВ-камеру, инфракрасные лазерные целеуказатели. Такие системы могут применяться в строительстве для обнаружения скрытых (замаскированных) полостей, трещин, объектов и анализа однородности материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Klimov A., Shumsky V., Kubarev V. Terahertz sensitivity of $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ // *Ferroelectrics*. 2007. **347**, N 1. P. 111–119.
2. Khokhlov D. R., Ivanchik I. I., Raines S. N. et al. Performance and spectral response of $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ far-infrared photodetectors // *Appl. Phys. Lett.* 2000. **76**, N 20. P. 2835–2837.
3. Сизов Ф. Ф., Апатская М. В., Гуменюк-Сычевская Ж. В. и др. Многоэлементные приёмники терагерцового излучения на HgCdTe // *Прикладная физика*. 2011. № 2. С. 61–66.

4. Жукова Е. С., Горшунов Б. П., Юрьев В. А. и др. Поглощение терагерцового излучения в гетероструктурах Ge/Si(001) с квантовыми точками // Письма в ЖЭТФ. 2010. **92**, № 12. С. 887–883.
5. Crowe T. W., Bishop W. L., Porterfield D. W. et al. Opening the terahertz window with integrated diode circuits // IEEE Journ. Solid.-St. Circ. 2005. **40**, N 10. P. 2104–2110.
6. Bozhkov V. G. Semiconductor detector, mixer, and frequency multipliers for the terahertz band // Radiophys. Quantum. El. 2003. **46**, N 8–9. P. 631–656.
7. Matsuo H., Nagata H., Mori Y., Arioshi S. Performance of SIS photon detectors for superconductive imaging submillimeter-wave camera (SISCAM) // Proc. SPIE. 2006. **6275**. 627504.
8. Semenov A., Gol'tsman G. N., Sobolewski R. Hot-electron effect in semiconductors and its application for radiation sensors // LLE Rev. 2001. **87**. P. 134–143.
9. Yao M., Li J., Liu D. C. et al. Development of a 0.85 THz Nb-AlN-NbN superconductor-insulator-superconductor mixer // Proc. of the 10th Global Symposium on Millimeter-Waves (GSMW 2017). Hong Kong, China, 24–26 May, 2017. P. 117–119.
10. Dem'yanenko M. A., Esaev D. G., Knyazev B. A. et al. Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser // Appl. Phys. Lett. 2008. **92**, N 13. 131116.
11. PyrocamTM IV. Ophir-Spiricon, LLC. URL: <https://www.ophiropt.com/laser-measurement/beam-profilers/products/Beam-Profiling/Camera-Profiling-with-BeamGage/Pyrocam-IV> (дата обращения: 10.09.2018).
12. Terahertz cameras. Terasense Group, Inc. URL: <http://terasense.com/products/sub-thz-imaging-cameras/> (дата обращения: 10.09.2018).
13. Техника спектроскопии в дальней инфракрасной, субмиллиметровой и миллиметровой областях спектра /Д. Х. Мартин, П. Л. Ричардс, Г. Р. Уилкинсон. М.: Мир, 1970. 399 с.
14. Thermal Image Plates. Macken Instruments Incorporated. URL: <http://www.macken.com> (дата обращения: 10.09.2018).
15. Padilla W. J., Liu X. Perfect electromagnetic absorbers from microwave to optical // Opt. Design & Eng. SPIE Newsroom. 2010. 3 p. URL: <http://spie.org/newsroom/3137-perfect-electromagnetic-absorbers-from-microwave-to-optical?ArticleID=x42025> (дата обращения: 10.09.2018).
16. Munk B. A. Frequency Selective Surfaces: Theory and Design. New York: John Wiley & Sons Inc., 2000. 410 p.
17. Кузнецов С. А., Генцелев А. Н., Баев С. Г. Реализация фильтров высоких частот субтерагерцового диапазона с использованием высокоаспектных полимерных структур // Автометрия. 2017. **53**, № 1. С. 108–116.
18. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V. et al. Bolometric THz-to-IR converter for terahertz imaging // Appl. Phys. Lett. 2011. **99**, N 2. 023501.
19. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V. et al. Matrix structure of metamaterial absorbers for multispectral terahertz imaging // Progress In Electromagnetics Research. 2012. **122**. P. 93–103.
20. Паулиш А. Г., Загубисало П. С., Кузнецов С. А. и др. Моделирование теплофизических процессов в визуализаторе субтерагерцового излучения, основанном на тонкоплёночном конвертере из метаматериала // Изв. вузов. Радиофизика. 2013. **LVI**, № 1. С. 22–38.

Поступила в редакцию 10.09.2018

После доработки 09.10.2018

Принята к публикации 22.10.2018