

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И КОМПЛЕКСЫ

УДК 621.38

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-4-160-175

ДЕТЕКТОРЫ МИЛЛИМЕТРОВОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Игорь Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, Плеханового, 10, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института стратегического развития, e-mail: prof.minin@gmail.com

Олег Владиленович Минин

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, Плеханового, 10, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института стратегического развития, e-mail: prof.minin@gmail.com

Целью работы является аналитический обзор приемников излучения терагерцового и миллиметрового диапазонов. Произведена классификация приемников терагерцового излучения и их сравнительные характеристики. В работе рассмотрены различные аспекты применения терагерцового излучения, а также основные виды и типы приемников этого излучения. Проведен анализ фотонных и тепловых приемников, терагерцовых приемников на основе ячеек Голея, конвекторов терагерцового излучения в инфракрасное. В результате предложен метод повышения чувствительности приемников электромагнитного излучения на основе применения эффекта фотонной струи.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон, фотоника, чувствительность, детекторы теплового типа, фотопроводящие детекторы, диоды Шоттки, конверторы, фотонная струя

Введение

Терагерцовый (ТГц) диапазон частот электромагнитного спектра лежит между инфракрасным диапазоном и областью миллиметровых длин волн. Граница ТГц-диапазона в настоящее время точно не определена. Считается, что нижняя граница терагерцового диапазона длин волн лежит в пределах 100–300 ГГц, а верхняя 3–10 ТГц [1].

ТГц-диапазон является областью сопряжения электроники и фотоники, существенно отличающихся как теоретической базой, так и техникой генерации, осуществления приема и обработки электромагнитных волн [1]. В этой же работе приведен хороший обзор применения ТГц-излучения в различных областях науки и техники.

ТГц- и миллиметровое излучение применяется в устройствах дефектоскопии, интроскопии и системах радиовидения [2–5], для поиска взрывчатых веществ и наркотиков [6], а также в археологии и искусствоведении [7].

Ведутся исследования процессов взаимодействия ТГц-излучения с различными материалами, например, биологическими тканями [8, 9], полимерами [10, 11], сверхпроводящими пленками [12], керамикой [13], метаматериалами [14, 15].

В настоящее время ТГц-излучение используется для томографии и других медицинских исследований [16–18], диагностики живых организмов, в приборах для диагностики рака кожи [19, 20], контроля ожоговых раневых поверхностей [21], влагосодержания биотканей [22], выявления зубного

кариеса [23] и т. д. На основе ТГц-излучения предложены методы лечения: NO-терапия [24], молекулярная ТГц-акустотерапия [25], ТГц-аэротерапия [26], ингаляционная ТГц-акустотерапия [27], термическая деструкция биотканей [28]. Разрабатываются устройства обнаружения и идентификации предметов, скрытых за препятствиями, например, для задач обеспечения безопасности и борьбы с терроризмом [29–32].

Интенсивно исследуются вопросы, посвященные передаче ТГц-сигналов в земной атмосфере и влиянию осадков, испарений, дыма и тумана [33–38]. Обзорные работы [39–43] посвящены детальному анализу проблем реализации ТГц-систем связи для передачи информации.

Детекторы миллиметрового и ТГц-излучения характеризуются набором параметров [44–46]: рабочий диапазон длин волн, порог чувствительности или эквивалентная мощность шума (NEP), вольт-ваттная или ампер-ваттная чувствительность, инерционность или время отклика, пространственное и угловое разрешение, рабочая температура, устойчивость к механическим, электрическим и световым перегрузкам и т. п.

Пространственное Δx и угловое $\Delta \varphi$ разрешения любого детектора подчиняются универсальному дифракционному неравенству $\Delta x \Delta \varphi \geq \lambda$, в котором знак равенства справедлив для оптимальных детекторов антенного типа. Ввиду малости кванта излучения в ТГц-диапазоне наименьший порог чувствительности имеют детекторы, охлаждаемые до температуры жидкого гелия. Наименьшее время отклика имеют детекторы с ха-

рактерными размерами в микронном и субмикронном диапазоне.

Основные результаты исследования

Исходя из принципа действия, детекторы могут быть разделены на три характерные группы [44]. Первая, самая многочисленная, группа – это детекторы теплового типа (термопары, термодатчики и основанные на них калориметры, пироэлектрические детекторы, оптико-акустические детекторы, микроболометры, охлаждаемые и сверхпроводящие болометры), работающие на принципе передачи тепла от широкополосного поглотителя к различным сенсорам. Характерной особенностью этих детекторов является широкий диапазон длин волн и, за исключением специальных микроконструкций, низкое или среднее временное разрешение. Например, пироэлектрические приемники имеют достаточно хорошую чувствительность в диапазоне длин волн 0,4–10 мкм и 300–3000 мкм [45–54].

В качестве приемников ТГц-излучения чаще всего применяются болометрические и диодные детекторы. Принцип работы сверхпроводниковых болометров (СПБ) основывается на явлении электронного разогрева [55, 56]. Российские сверхпроводящие болометры из тонких пленок MoRe и NbN рассмотрены в работах [57–62], а зарубежные, например, в работах [63, 64]. В таблице приведены характеристики сверхпроводящего болометра QNbTES/X фирмы QMC Instruments Ltd., Великобритания и QFI/X. Детектор работает при температуре не более 4,2 К и размещен на кварцевой пластине размерами 5 × 4,7 мм × 300 мкм [63].

Параметры сверхпроводящего болометра QNbTES/X и QFI/X

| | | |
|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Эквивалентная шумовая мощность (NEP) | < 1 пВт/Гц ^{0,5} | > 500 аВт/Гц ^{0,5} |
| Рабочий диапазон частот | 100 ГГц ... 20 ТГц | 60 ... 500 ГГц |
| Частота отклика (3 дБ) | 2 ГГц ... 1 кГц | 1 МГц |
| Рабочая температура | 8 К | 4,2 К |

В волноводных устройствах широко используется традиционный тип детекторов на диодах Шоттки. Широкую номенклатуру волноводных детекторов на диодах Шоттки с нулевым смещением предлагает фирма Virginia Diodes Inc., США [63].

Гораздо лучшее временное разрешение имеет вторая группа детекторов, основанная на эффекте фотопроводимости [44] (фотопроводимость на мелких примесных уровнях, эффекты нагрева свободных электронов в зоне проводимости, резонансная фотопроводимость

на переходах между уровнями Ландау полупроводника в магнитном поле). Эта группа характеризуется хорошей чувствительностью, однако ее существенным недостатком является необходимость охлаждения до гелиевых температур.

В третью группу можно отнести самые быстродействующие детекторы, основанные на диодах Шоттки микронного и субмикронного размера. Эти малогабаритные детекторы обычно работают при комнатной температуре на стенатуре. Основные недостатки этой группы – неустойчивость микродиодов к различным перегрузкам и довольно средняя чувствительность в низкочастотном диапазоне сигнальной частоты из-за фликкер-шумов.

Детекторы теплового типа (термопары и полупроводниковые датчики), несмотря на сравнительно низкую чувствительность ($NEP [ВтГц^{-1/2}] \approx 10^{-3} - 10^{-4}$) и временное разрешение ($\tau \approx 10^0 - 10^{-3}$ с), могут работать в широком спектральном диапазоне: от 1 до 1 000 мкм и более. Сигнал с этих детекторов пропорционален температуре [45]. Отечественная промышленность выпускала калориметры ИМО-2, ИМО-4С.

Пироэлектрические детекторы [45, 65–72] основаны на пироэффекте – зависимости спонтанной поляризации некоторых кристаллов (ТГС, $LiTaO_3$, $LiNiO_3$, $BaTiO_3$ и др.) от температуры. Нагрев кристалла внешним излучением вызывает перетекание зарядов с его внешних металлических электродов через нагрузочное сопротивление. Отечественная промышленность выпускает малогабаритные детекторы МГ-30 и МГ-33 с приемным элементом 1×1 мм², $NEP \approx 6 \cdot 10^{-10}$ ВтГц^{-1/2}, $f_{max} = 200$ Гц. Хотя по паспорту детекторы сертифицированы до длин волн 20 мкм, они обладают хорошей чувствительностью и в субмиллиметровом диапазоне длин волн. За рубежом такие детекторы (но с большей приемной площадкой) выпускаются рядом фирм, например, фирмой Molelectron Detector Inc.

Несколько более высокую чувствительность и лучшую неселективность, чем пироприемники, имеют оптико-акустические детекторы (преобразователи). Оптико-акустический приемник, или термопневматический

детектор, или пневматический приемник излучения работает на принципе расширения газа при его нагреве [45, 73–75]. Оптико-акустический приемник (ОАП) имеет в своей основе конструкцию, впервые предложенную Голеем (М. J. E. Golay) в 1947 г. и часто называемую ячейкой Голея. Электромагнитная энергия поглощается алюминиевой пленкой, тепло от которой передается небольшому объему с ксеноновым газом. Камера имеет подвижную мембрану, которая изгибается во время расширения газа. Одна сторона мембраны имеет зеркальное покрытие, что позволяет изменять направление отраженного от нее оптического луча, падающего на фотоэлемент. Изменение освещенности фотоэлемента приводит к появлению сигнала. Оптико-акустический приемник по своим характеристикам приближается к идеальному приемнику, ограниченному лишь фотонными шумами. Недостатком таких детекторов является относительно низкое быстродействие ($\tau \approx 10^0 - 10^{-2}$ с), большая чувствительность к различным перегрузкам, увеличение габаритов детектора. Отечественная промышленность выпускает детекторы типа ОАП-7 с $NEP \approx 10^{-10}$ ВтГц^{-1/2}, $f_{max} = 25$ Гц. Эти же детекторы за рубежом продаются фирмой QMC Instruments Ltd.

Усовершенствование оптико-акустического приемника предложено в работе [76]. Оптико-акустический приемник содержит приемную камеру, снабженную входным окном с оптическим конусом, и оптический микрофон, а непосредственно между окном приемной камеры и оптическим конусом располагается диэлектрическая мезомасштабная частица, формирующая фотонную струю или монослой диэлектрических мезомасштабных частиц.

Фотонная струя – это область повышенной концентрации электромагнитной энергии, возникающая непосредственно у границы диэлектрической мезомасштабной частицы с поперечными размерами порядка $\lambda/3 - \lambda/4$ и протяженностью от 2 до 10λ [77, 78], где λ – длина волны излучения в свободном пространстве. При этом размер частиц составляет не менее $\lambda/2$. Чем больше размер мезомасштабной частицы, тем эффективнее

осуществляется фокусировка излучения, но при этом возрастают потери излучения на отражение, уменьшая эффективность предлагаемого устройства. При формировании фотонных струй с помощью диэлектрических мезомасштабных частиц достигается высокая локализация высокоинтенсивного ближнего поля в объеме поглощающей пленки приемной камеры ОАП. Данное увеличение поглощения происходит с микроскопической точки зрения за счет того, что диэлектрическая мезомасштабная частица локально усиливает электрическое поле, а это приводит к появлению так называемых горячих пятен – субволновых областей концентрации излучения. Так как горячие пятна возникают в области занятой поглощающей излучение пленкой, то падающее излучение эффективно поглощается в ней. Таким образом, повышается эффективность ввода излучения в приемную камеру ОАП. Поглощенная пленкой энергия излучения передается газу, наполняющему камеру, в результате чего в камере возникают пульсации давления газа с частотой, равной частоте прерывания потока падающего излучения. Эти пульсации воспринимаются оптическим микрофоном.

Близкими по конструкции к пироприемникам являются микроболометры, основанные на тепловой зависимости сопротивления металлов от температуры. Достоинством этих детекторов является гораздо лучшее быстродействие ($NEP \approx 10^{-10}$ ВтГц^{-1/2}, $f_{max} = 25$ МГц).

Резкий скачок в увеличении чувствительности болометров дает его охлаждение до температур жидкого гелия и ниже. Хорошо известным представителем этого класса приборов являются Si-болометры фирмы Infrared Lab. ($T \approx 1,7$ К, $NEP \approx 3 \cdot 10^{-15}$ ВтГц^{-1/2}, $f_{max} = 200$ Гц), которые за рубежом используются в экспериментах со слабым ТГц излучением фемтосекундных лазеров. В сверхпроводящих болометрах используется сильная нелинейность сопротивления сверхпроводника при выходе из сверхпроводящего состояния [44, 45].

Детекторы на основе фотопроводимости имеют немного меньшую чувствительность, но гораздо лучшее временное разрешение, чем охлаждаемые болометры. Типичные па-

раметры фотосопротивлений при $T \leq 4,2$ К, $NEP \approx 10^{-11} - 10^{-13}$ ВтГц^{-1/2}, $f_{max} = 10 - 30$ МГц. Эти детекторы перекрывают диапазон длин волн от инфракрасного до сантиметрового. Для этого используются эффекты собственной и примесной фотопроводимости, фотопроводимость «горячих» электронов в зоне проводимости. В дальнем инфракрасном и миллиметровом диапазонах хорошо работает n-InSb детектор на «горячих» электронах в зоне проводимости. При наложении магнитного поля этот детектор приобретает узкополосность из-за квантования энергетических уровней (уровни Ландау). Сместить пик чувствительности детектора по длинам волн можно изменением величины магнитного поля.

Детекторы на основе диодов Шоттки имеют граничную частоту до $\approx 5 - 6$ ТГц [44] и чувствительность в режиме видеодетектора $NEP \approx 10^{-8} - 10^{-10}$ ВтГц^{-1/2}. Детектор этого типа неработоспособен без какой-либо антенны, собирающей заметную долю падающего излучения

Электрические методы выпрямления дают возможность преобразовать сигналы СВЧ в постоянный ток или ток низкой частоты. В качестве нелинейных элементов используют детекторы или преобразователи. Вследствие их простоты, высокой чувствительности и доступности детекторные устройства являются наиболее распространенными индикаторами. Нелинейность характеристики позволяет использовать кристаллические детекторы как для детектирования малых сигналов, так и в качестве преобразователей частоты. Если детектор используют в качестве преобразователя частоты, то на него совместно с измеряемым сигналом подается напряжение гетеродина, и на выходе выделяется ток биений [79]. При детектировании слабых сигналов в цепи детектора появляется выпрямленный ток. Например, смесительный диод типа Д-407, выпускаемый промышленностью и рассчитанный на рабочую частоту излучения 75 ГГц, имеет хорошую чувствительность и в более высокочастотной области, примерно до 200 ГГц.

Детекторы с точечным контактом [45]. Полупроводниковые диоды с точечным контактом являются весьма чувствительными, простыми и быстродействующими детектор-

ными устройствами. Эти диоды используются в качестве видеодетекторов и смесителей до длин волн примерно 0,3 мм. Одним из недостатков обычных точечных диодов является нестабильность их характеристик и чувствительность к перегрузкам.

Общим недостатком в СВЧ-приемниках с волноводным входом является их недостаточная чувствительность, обусловленная малыми размерами чувствительного элемента по сравнению с характерным сечением волновода. Инновационным решением этой проблемы является решение, предложенное в [79, 80] для детекторной СВЧ-головки. Задача решена за счет того, что в детекторной головке, содержащей детекторный диод и корпус, выполненный в виде основания и крышки, сопряженных по плоскости, перпендикулярной к волноводному каналу (причем в основании выполнен сквозной волноводный канал, а в крышке – короткозамыкатель; между основанием и крышкой установлена полосковая плата, на которой расположены фильтр, контактная площадка, являющаяся выходом детекторной головки, детекторный диод, оба вывода которого присоединены к проводникам платы с внешней стороны основания непосредственно над сквозным волноводным каналом), установлена диэлектрическая мезоразмерная частица, формирующая фотонную струю, а расстояние между внешней поверхностью основания и детекторным диодом, расположенным на полосковой плате, составляет не более длины фотонной струи, формируемой указанной диэлектрической частицей.

Детекторная головка работает следующим образом. Электромагнитная волна падает на диэлектрическую частицу, формирующую фотонную струю, которая направлена в сквозной волноводный канал в направлении короткозамыкателя, и поступает на волноводно-полосковый переход в зоне сквозного волноводного канала и короткозамыкателя, где происходит преобразование волны H_{01} прямоугольного волновода в квази-ТЕМ волну полосковой линии. Далее электромагнитная волна поступает на детекторный диод, подключенный последовательно полосковой линии. Геометрические размеры полосковой линии выбираются из соображения установки детекторного

диода в зоне с наиболее высоким коэффициентом преобразования СВЧ-поля в постоянный ток. По постоянному току детекторный диод соединен с выходом детекторной головки. Постоянный ток с выхода детекторной головки поступает на центральный контакт коаксиального разъема, корпус которого электрически соединен с корпусом детекторной головки.

Диэлектрическая частица обеспечивает дополнительную локализацию падающего на нее волнового фронта в виде фотонной струи в зоне сквозного волноводного канала, чем обеспечивается дополнительное усиление падающей электромагнитной волны пассивными средствами. При этом поперечный размер области фокусировки (фотонной струи) диэлектрической частицы меньше дифракционного предела и составляет около $1/3$ длины волны в свободном пространстве, что меньше характерных размеров сквозного волноводного канала. Выполнение диэлектрической частицы мезоразмерной (характерный размер порядка длины волны излучения в свободном пространстве) позволяет минимизировать геометрические размеры детекторной головки.

Другими словами, используя эффект фотонной струи в волноводе, возможно сфокусировать электромагнитное поле на чувствительный элемент.

Принцип построения диэлектрических мезоразмерных частиц произвольной трехмерной формы для формирования фотонных струй с поперечным размером каустики порядка трети длины волны и длиной от 0 до 10 длин волн рассмотрен в [77, 81–84]. Выполнение диэлектрической частицы в виде кубика (частица с плоской гранью) позволяет упростить крепление частицы на основании детекторной головки. Предлагаемое техническое решение позволяет увеличить чувствительность детекторной головки при широком поле зрения (угла падения излучения на волноводный канал).

Для подтверждения правильности выбранного технического решения были изготовлены лабораторные образцы детекторных головок Ка-диапазона, в которых в качестве детекторного диода использован 3А149А с балочными выводами. Корпус выполнен из латуни с галь-

ваническим покрытием Ср6. Полосковая плата выполнена на основе двухстороннего фольгированного термостойкого материала с керамическим наполнителем, усиленным стекловолокном RO4003. Диэлектрическая частица была выполнена кубической формы из фторопласта с размером грани, равной длине волны излучения в свободном пространстве. Увеличение усиления, падающего на детекторную головку, составило 8 дБ при изменении угла падения излучения на диэлектрическую частицу в пределах ± 40 градусов [80–85].

В работе [86] исследовалась возможность использования тлеющих разрядов в качестве детекторов электромагнитного излучения на частотах 100 и 250 ГГц. В качестве приемника применялась зеленая неоновая индикаторная лампа № 523.

Для регистрации изображения в ТГц-диапазоне с использованием конверсии ТГц-излучения в тепловое ИК-излучение используются специальные конверторы. Например, известно устройство для создания изображения в ТГц-лучах [87]. Материалом для преобразователей служит вода, стекло, углеродные нанотрубки или материал, содержащий их. Размер преобразователей от 50 до 500 мкм. Известен конвертер ТГц-излучения в ИК-излучение, состоящий из слоя искусственно созданного метаматериала с резонансным поглощением ТГц-излучения, нанесенного на твердую подложку из сапфира, расположенный между входным ТГц-объективом и объективом приемной камеры (видимого света), расположенной со стороны подложки; источник видимого света, настроенный для освещения задней стороны конвертера; и камеру с объективом и детектором, адаптированным для выявления излучения видимого света от задней стороны конвертера. При этом конвертер состоит из жидкокристаллического слоя, нанесенного на жесткую подложку из сапфирового стекла, и содержит поглощающий слой, включающий в себя частицы металла в виде порошка (железа, алюминия, олова или меди), а детектор принимает соответствующее изображению излучение видимого света, сформированное на задней грани конвертера [88]. В работе [89] конвертер терагерцового излучения в инфракрасное излучение состоял

из слоя искусственно созданного метаматериала с резонансным поглощением терагерцового излучения, нанесенного на твердую подложку, расположенный между входным терагерцовым объективом и объективом инфракрасной камеры, при этом конвертер выполнен на основе желатиновой матрицы, содержащей наночастицы металла, и снабжен отсекающим фильтром, размещенным перед матрицей с возможностью фильтрации теплового излучения источника терагерцового излучения с длинами волн не более 30 мкм.

В качестве преобразователей ТГц-излучения в инфракрасное излучение могут быть использованы, например, конверторы терагерцового излучения в инфракрасное [90–98]. Мощность ТГц-излучения, эквивалентная шуму для конвертора, достигает величины порядка 10^{-9} Вт/Гц^{1/2}.

Повысить качество получаемого терагерцового изображения объектов возможно за счет увеличения чувствительности устройства. Это можно достичь за счет размещения на освещенной поверхности конвертора терагерцового излучения монослоя диэлектрических мезоразмерных частиц, формирующих фотонные струи, и с характерным размером частиц не менее $\lambda/2$, где λ – длина волны используемого излучения, при этом выбирают коэффициент преломления материала частиц, лежащий в диапазоне примерно от 1,2 до 1,7.

В результате проведенных исследований было установлено, что при освещении диэлектрической мезоразмерной частицы, например, сферической формы, величина интенсивности электромагнитного поля на ее теневой стороне в области «фотонной» струи по отношению к интенсивности излучения на ее освещенной стороне больше и зависит только от показателя преломления материала n частицы. Например, для $n \approx 1,65$ усиление такой сферической мезоразмерной частицы достигает около 100 [99], в то время как размер пятна (ширина фотонной струи) пропорционален размеру частиц и может быть менее чем $\lambda/3$ – $\lambda/5$. За счет меньшей по объему формируемой области фокусировки достигается большая интенсивность облучения.

В первом приближении интенсивность электромагнитного поля в области фокуса

(фотонной струи) может быть оценена по выражению, для сферической частицы [99]:

$$I_{\max} = \frac{27n^4}{(4-n^2)^3} I_0,$$

где I_0 – интенсивность падающей на частицу волны.

При характерном размере частиц менее $\lambda/2$, где λ – длина волны используемого излучения, область фокусировки типа фотонной струи не формируется.

При коэффициенте преломления материала частиц менее примерно 1,2 область фокусировки становится более дифракционного предела и повышение чувствительности устройства не происходит. При коэффициенте преломления материала частиц более примерно

1,7 область фокусировки типа фотонной струи смещается вовнутрь частицы и повышение чувствительности устройства не происходит.

Заключение

В работе рассмотрены различные аспекты применения терагерцового излучения, а также основные виды и типы приемников этого излучения. Проведен анализ фотонных и тепловых приемников, терагерцовых приемников на основе ячеек Голея, конвекторов терагерцового излучения в инфракрасное. Предложен метод повышения чувствительности приемников электромагнитного излучения на основе применения эффекта фотонной струи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Исаев В. М., Кабанов И. Н., Комаров В. В., Мещанов В. П. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона // Доклады ТУСУРа. – 2014. – № 4 (34). – С. 5–16.
2. Минин И. В., Минин О. В. Сканирующее устройство на основе диска Нипкова с субдифракционным разрешением в миллиметровом, терагерцовом, инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн : Патент РФ 171360. – Опубл. 29.05.2017. – Бюл. № 16.
3. Минин И. В., Минин О. В. Устройство формирования изображения объектов с субдифракционным разрешением в миллиметровом, терагерцовом, инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн : Патент РФ 182458. – Опубл. 17.08.2018. – Бюл. № 23.
4. Минин И.В., Минин О.В. Способ формирования изображения объектов с субдифракционным разрешением в миллиметровом, терагерцевом, инфракрасном и оптическом диапазонах длин волн : Патент РФ 2631006. – Опубл. 15.09.2017. – Бюл. № 26.
5. Ожегов Р. В., Горшков К. Н., Окунев О. В., Гольцман Г. Н., Кошелец В. П., Филиппенко Л. В., Кинёв Н. В. Флуктуационная чувствительность и стабильность приемников с СИС и НЕВ смесителями для терагерцового тепловидения. – М. : МПГУ, 2014. – 104 с.
6. Kemp M. C. Explosive detection by terahertz spectroscopy – a bridge too far // IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 282–292.
7. Jackson J. B., Bowen J., Walker G., Labaune J., Mourou G., Menu M., Fukunaga K. A survey of terahertz applications in cultural heritage conservation science. // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 220–231.
8. Reid C. B., Reese G., Gibson A. P., Wallace V. P. Terahertz time-domain spectroscopy of human blood // Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, № 4. – P. 363–367.
9. Saviz M., Spathmann O., Streckert J., Hansen V., Clemens M., Faraji-Dana R. Theoretical estimation of safety thresholds for terahertz exposure of surface tissues // Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, № 5. – P. 635–640.
10. Fischer B. M., Wietzke S., Reuter M., Peters O., Gente R., Jansen C., Vieweg N., Koch M. Investigating material characteristics and morphology of polymers using terahertz technology // Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, № 3. – P. 259–268.
11. Jin Y. S., Kim G. J., Jeon S. G. Terahertz dielectric properties of polymers // Journal of Korean Physics Society. – 2006. – Vol. 49, № 2. – P. 513–517.
12. Pracht U. S., Heintze E., Clauss C., Hafner D., Bek R., Werner D., Gelhorn S., Scheffler M., Dressel M., Sherman D., Gorshunov B., Il'in K. S., Henrich D., Siegel M. Electrodynamics of the superconducting state in ultra-thin films at THz frequencies // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, № 3. – P. 269–280.

13. Takano K., Yakiyama Y., Shibuya K., Izumi K., Miyazaki H., Jimba Y., Miyamaru F., Kitahara H., Hangyo M. Fabrication and performance of TiO₂-ceramic-based metamaterials for terahertz frequency range // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, № 6. – P. 812–819.
14. Withayachumnankul W., Abbott D. Metamaterials in the Terahertz regime // IEEE Photonics Journal. – 2009. – Vol. 1, № 2. – P. 99–118.
15. Chen H.-T., O'Hara J. F., Taylor A. J., Averitt R. D. Complementary planar terahertz metamaterials // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, № 3. – P. 1084–1095.
16. Taylor Z. D., Singh R. S., Bennett D. B., Tewari P., Kealey C. P., Bajwa N., Culjat M. O., Stojadinovic A., Lee H., Hubschman J. P., Brown E. R., Grundfest W. S. THz medical imaging: in vivo hydration sensing // IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 201–219.
17. Ajito K., Ueno Y. THz chemical imaging for biological applications // IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 293–300.
18. Гуляев Ю. В., Креницкий А. П., Бецкий О. В., Майбородин А. В., Киричук В. Ф. Терагерцовая техника и ее применение в биомедицинских технология // Успехи современной радиоэлектроники. – 2008. – № 9. – С. 30–35.
19. Woodward R. M., Cole B. E., Wallace V. P., Pye R. J., Arnone D. D., Linfield E. H., Pepper M. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin cancer and skin tissue // Physics in Medicine and Biology. – 2002. – Vol. 47. – P. 3853–3855.
20. Pickwell E., Cole B. E., Fitzgerald A. J., Wallace V. P., Pepper M. Simulation of terahertz pulse propagation in biological systems // Applied Physics Letters. – 2004. – Vol. 84. – P. 2190–2192.
21. Taylor Z. D., Singh R. S., Culjat M. O., Suen J. Y., Grundfest W. S., Lee H., Brown E. R. Reflective terahertz imaging of porcine skin burns // Optics Letters. – 2008. – Vol. 33. – P. 1258–1260.
22. Bennett D. B., Li W., Taylor Z. D., Grundfest W. S., Brown E. R. Stratified media model for terahertz reflectometry of the skin // IEEE Sensors. – 2010. – Vol. 11. – P. 1530–1534.
23. Hirmer M., Danilov S. N., Giglberger S., Putzger J., Niklas A., Jager A., Hiller K. A., Loffler S., Schmalz G., Redlich B., Schulz I., Monkman G., Ganichev S. D. Spectroscopic study of human teeth and blood visible to terahertz frequencies for clinical diagnostics of dental pulp vitality // International Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. – 2012. – Vol. 33. – P. 366–375.
24. Бецкий О. В., Киричук В. Ф., Креницкий А. П., Майбородин А. В., Тупикин В. Д. Оксид азота и электромагнитное излучение КВЧ (Информационное взаимодействие в живых объектах, подвергнутых воздействию электромагнитных КВЧ колебаний на частоте молекулярного спектра поглощения и излучения оксида азота) // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2002. – № 10–11. – С. 95–108.
25. Майбородин А. В., Креницкий А. П., Бецкий О. В. Молекулярная КВЧ-акустотерапия // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2003. – № 4. – С. 8–10.
26. Креницкий А. П., Майбородин А. В. КВЧ-аэротерапия – новый, природный, естественный, экологически чистый метод лечения // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2002. – № 4. – С. 21–23.
27. Гуляев Ю. В., Креницкий А. П., Бецкий О. В., Майбородин А. В., Киричук В. Ф. Терагерцовая техника и ее применение в биомедицинских технологиях // Успехи современной радиоэлектроники. – 2008. – № 9. – С. 30–35.
28. Neelakanta P. S., Sharma B. Conceiving THz endometrial ablation: feasibility, requirements and technical challenges // IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, № 4. – P. 402–408.
29. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. – Berlin: Springer, 2009. – P. 159–170.
30. Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications / Edited by Daryoosh Saeedkia. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2013. – 688 p.
31. Siegel P. H. Terahertz technology // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2002. – Vol. 50, № 3. – P. 910–928.
32. De Maagt P., Bolivar P. H., Mann C. Terahertz science, engineering and systems – from space to earth applications // Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering / ed. by K. Chang. – N.Y. : Wiley-Interscience, 2005. – P. 5176–5194.
33. Yang Y., Mandehgar M., Grischkowsky D. R. Broadband THz pulse transmission through the atmosphere // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 264–273.
34. Van Exter M., Fattinger C., Grischkowsky D. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor // Optics Letters. – 1989. – Vol. 14. – P. 1128–1130.

35. Yang Y., Shutler A., Grischkowsky D. Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19. – P. 8830–8838.
36. Weber M. J., Yang B. B., Kulie M. S., Bennartz R., Booske J. H. Atmospheric attenuation of 400 GHz radiation due to water vapor // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, № 3. – P. 355–360.
37. Rosker M. J., Wallace H. B. Imaging through the atmosphere at terahertz frequencies // *Proceedings of the International IEEE/MTT-S*. – Honolulu, USA, 2007. – P. 773–776.
38. Brown E. R. Fundamentals of terrestrial millimeter-wave and THz remote sensing // *Int. J. High Speed Electronics and Systems*. – 2003. – Vol. 13, № 4. – P. 995–1097.
39. Federici J., Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – Vol. 107, № 11. – Article ID 111101. – 22 p.
40. Song H.-J., Nagatsuma T. Present and future of terahertz communications // *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 256–263.
41. Armstrong C. M. The truth about terahertz // *IEEE Spectrum*. – 2012. – No 9. – P. 36–41.
42. Kleine-Ostermann T., Nagatsuma T. A review on terahertz communication research // *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. – 2011. – Vol. 32, № 2. – P. 143–171.
43. Nagatsuma T., Horiguchi S., Minamikata Y., Yoshimizu Y., Hisatake S., Kuwano S., Yoshimoto N., Terada J., Takahashi H. Terahertz wireless communications based on photonics technologies // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, № 21. – P. 23736–23747.
44. Кубарев В. В. Детекторы терагерцового излучения // Сб. тр. Первого рабочего совещания «Генерация и применение терагерцового излучения» (Новосибирск, 24-25 ноября 2005 г.). – Новосибирск : Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера, 2006. – С. 35–40.
45. Техника субмиллиметровых волн / Колл. авторов под ред. Р. А. Валитова. – М. : Советское радио, 1969. – 480 с.
46. Rodriguez-Morales F., Yngvesson S., Gu D. Integrated terahertz hot-electron-bolometer receivers from FPAs. – *Laser Focus World*, 2007. – P. 77–80.
47. Andreev V. G., Angeluts A. A., Vdovin V. A., Lukichev V. F. Spectral characteristics of nanometer-thick chromium films in terahertz frequency range // *Tech. Phys. Lett.* – 2015. – Vol. 41, № 2. – P. 180–183.
48. Batra A. K., Edwards M. E., Guggilla P., Aggarwal M. D., Lal R. B. Pyroelectric properties of PVDF: MWCNT nanocomposite film for uncooled infrared detectors and medical applications // *Integrated Ferroelectrics*. – 2014. – Vol. 158, № 1. – P. 98–107.
49. Edwards M., Corda J., Egarievwe S., Guggilla P. Measurement of the dielectric, conductance and pyroelectric properties of MWCNT: PVDF nanocomposite thin films for application in infrared technologies // *Proc. SPIE. Infrared Sensors, Devices and Applications III*. – 2013. – Vol. 8868. – Article № 88680E.
50. Goncharenko B. G., Salov V. D., Zhukov A. A., Zorin S. M., Kozlov V. V., Korpukhin A. S. Algorithm for elimination of structural noise in an image intensifier with pyroelectric array // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2018. – Vol. 63, № 5. – P. 485–490.
51. Hossain A., Rashid M. Pyroelectric Detectors and Their Applications // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1991. – Vol. 27, № 5. – P. 824–829.
52. Müller R., Bohmeyer W., Kehrt M., Lange K., Monte C., Steiger A. Novel detectors for traceable THz power measurements // *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2014. – Vol. 35, № 8. – P. 659–670.
53. Müller R., Gutschwager B., Hollandt J., Kehrt M., Monte C., Müller R., Steiger A., Characterization of a Large-Area Pyroelectric Detector from 300 GHz to 30 THz // *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2015. – Vol. 36, № 7. – P. 654–661.
54. Rogalski A., Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays // *Opto-Electronics Review*. – 2011. – Vol. 19, № 3. – P. 346–404.
55. Пентин И. В., Смирнов К. В., Вахтомин Ю. Б., Смирнов А. В., Ожегов Р. В., Дивочий А. В., Гольцман Г. Н. Быстродействующий терагерцевый приемник и инфракрасный счетчик одиночных фотонов на эффекте разогрева электронов в сверхпроводниковых тонкопленочных наноструктурах // *Труды МФТИ*. – 2011. – Т. 3, № 2. – С. 38–42.
56. Karasik B. S., Sergeev A. V., Prober D. E. Nanobolometers for THz photon detection // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, № 1. – P. 97–111.
57. Milostnaya I., Korneev A., Tarhov M., Divochiy A., Minaeva O., Seleznev V., Kaurova N., Voronov B., Okunev O., Chulkova G., Smirnov K., Gol'tsman G. Superconducting single photon nanowire detectors for IR and THz applications // *Journal of Low Temperature Physics*. – 2008. – Vol. 151. – P. 591–596.

58. Divochiy A., Marsili F., Bitauld D., Gaggero A., Leoni R., Mattioli F., Korneev V., Seleznev V., Kaurova N., Minaeva O., Gol'tsman G., Lagoudakis K., Benkhaoul M., Levy F., Fiore A. Superconducting nanowire photon number resolving detector at telecom wavelength // *Nature Photonics*. – 2008. – № 2. – P. 32–36.
59. Wei J., Olaya D., Karasik B. S., Pereverzev S. V., Sergeev A. V., Gershonson M. E. Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics // *Nature Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 3. – P. 496–500.
60. Gonzalez F. J., Ilic B., Alda J., Boreman G. D. Antenna-coupled infrared detectors for imaging applications // *IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics*. – 2005. – Vol. 11, № 1. – P. 117–120.
61. Hammar A., Cherednichenko S., Bevilacqua S., Drakinskiy V., Stake J. Terahertz direct detection in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ microbolometers // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, № 2. – P. 390–394.
62. Cherednichenko S., Hammar A., Bevilacqua S., Drakinskiy V., Stake J., Kabanov A. A room temperature bolometers for terahertz coherent and incoherent detection // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, № 2. – P. 395–402.
63. Алавердян С. А., Боков С. И., Булгаков В. О., Зайцев Н. А., Исаев В. М., Кабанов И. Н., Катускин Ю. Ю., Комаров В. В., Креницкий А. П., Мещанов В. П., Савушкин С. А., Сыромятников А. В., Якунин А. С. Терагерцовый диапазон частот: электронная компонентная база, вопросы метрологического обеспечения // *Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ*. – М. : ЦНИИ «Электроника», 2012. – 74 с.
64. Insight Product Co. Terahertz Hot Electron Bolometer Detectors from 0.3 to 150 THz , 2011 [Electronic resource]. – Mode of access : <http://www.insight-product.com/detect3.htm>.
65. Andreev V. G., Angeluts A. A., Vdovin V. A., Lukichev V. F. Spectral characteristics of nanometer-thick chromium films in terahertz frequency range // *Tech. Phys. Lett.* – 2015. – Vol. 41, № 2. – 2015. – P. 180–183.
66. Batra A. K., Edwards M. E., Guggilla P., Aggarwal M. D., Lal R. B. Pyroelectric properties of PVDF: MWCNT nanocomposite film for uncooled infrared detectors and medical applications // *Integrated Ferroelectrics*. – 2014. – Vol. 158, № 1. – P. 98–107.
67. Edwards M., Corda J., Egarievwe S., Guggilla P. Measurement of the dielectric, conductance and pyroelectric properties of MWCNT: PVDF nanocomposite thin films for application in infrared technologies // *Proc. SPIE. Infrared Sensors, Devices and Applications III*. – 2013. – Vol. 8868. – Article № 88680E.
68. Goncharenko B. G., Salov V. D., Zhukov A. A., Zorin S. M., Kozlov V. V., Korpukhin A. S. Algorithm for elimination of structural noise in an image intensifier with pyroelectric array // *Journal of Communications Technology and Electronics*. – 2018. – Vol. 63, № 5. – P. 485–490.
69. Hossain A., Rashid M. Pyroelectric Detectors and Their Applications // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 1991. – Vol. 27, № 5. – P. 824–829.
70. Müller R., Bohmeyer W., Kehrt M., Lange K., Monte C., Steiger A. Novel detectors for traceable THz power measurements // *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2014. – Vol. 35, № 8. – P. 659–670.
71. Müller R., Gutschwager B., Hollandt J., Kehrt M., Monte C., Müller R., Steiger A., Characterization of a Large-Area Pyroelectric Detector from 300 GHz to 30 THz // *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. – 2015. – Vol. 36, № 7. – P. 654–661.
72. Rogalski A., Sizov F. Terahertz detectors and focal plane arrays // *Opto-Electronics Review*. – 2011. – Vol. 19, № 3. – P. 346–404.
73. Панкратов М. А. Современные оптико-акустические приемники излучения // *Оптический журнал*. – 1994. – № 5. – С. 5–6.
74. Гибин И. С., Котляр П. Е. Неохлаждаемые матричные терагерцовые преобразователи изображений. Принципы конструирования // *Прикладная физика*. – 2019. – № 4. – С. 80–86.
75. Гибин И. С., Котляр П. Е. Приемники излучения терагерцового диапазона (обзор) // *Успехи прикладной физики*. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 117–129.
76. Минин И. В., Минин О. В. Оптико-акустический приемник : Патент РФ 170388. – Оpubл. 24.04.2017. – Бюл. № 12.
77. Minin I. V., Minin O. V. Diffractive optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit. – Springer, 2016. – 75 p.
78. Минин И. В., Минин О. В. Фотонные струи в науке и технике // *Вестник СГУГиТ*. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 212–234.

79. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник / Под ред. В. В. Клюева. – М. : «Машиностроение», 1976. – 391 с.
80. Минин И. В., Минин О. В. Детекторная головка : патент РФ № 2624608. – Оpubл. 04.07.2017. – Бюл. № 19.
81. Минин И. В., Минин О. В. Радар-детектор : патент РФ № 169537. – Оpubл. 22.03.2017. – Бюл. № 9.
82. Минин И. В., Мини О. В. Фотоника изолированных диэлектрических частиц произвольной трехмерной формы – новое направление оптических информационных технологий // Вестник НГУ. Сер.: Информационные технологии. – 2014. – Т. 12, вып. 4. – С. 59–70.
83. Минин И. В., Минин О. В. Метрология в фотонике и нанооптике. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – 172 с.
84. Минин И. В., Минин О. В. Квазиоптика: современные тенденции развития. – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – 163 с.
85. Бутков В. П., Губарев Д. Е., Зикий А. Н., Зламан П. Н. Серийные детекторы СВЧ (обзор) // Инженерный вестник Дона. – 2017. – № 1.
86. Abramovich A., Kopeika N. S., Rozban D., Farber E. Inexpensive detector for terahertz imaging // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46, № 29. – P. 7207–7211.
87. Pradere C., Batsale J.-C., Chassagne B., Caumes J.-P. Terahertz Imaging Device With Improved Thermal Converter : Patent US 20120032082.
88. Молдосанов К. А. Терагерц-инфракрасный конвертер для визуализации источников терагерцевого излучения : патент РФ 201612489.
89. Кавеев А. К., Молдосанов К. А., Лелевкин В. М., Козлов П. В., Кропотов Г. И., Цыпишка Д. И. Устройство визуализации источников терагерцевого излучения : патент РФ 2511070. – Оpubл. 10.04.2014. – Бюл. № 10.
90. Moldosanov K., Postnikov A. A terahertz-vibration to terahertz-radiation converter based on gold nanoobjects: a feasibility study // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2016. – Vol. 7. – P. 983–989.
91. Молдосанов К. А., Лелевкин В. М., Козлов П. В., Кавеев А. К. Терагерц-инфракрасный конвертер на основе металлических наночастиц: потенциал применения // Вестник КРСУ. – 2013. – Т. 13, № 4. – С. 69–77.
92. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V., Lazorskiy P. A., Fedorinin V. N. Bolometric THz-to-IR converter for terahertz imaging // Applied Physics Letters. – 2011. – Vol. 99. – P. 023501.
93. Паулиш А. Г., Новгородов Б. Н., Хрящев С. В., Кузнецов С. А. Терагерцовый визуализатор на основе ТГц—ИК-конвертора // Автотриетрия. – 2019. – Т. 55, № 1. – С. 56–63.
94. Kuznetsov S. A., Paulish A. G., Gelfand A. V. et al. Bolometric THz-to-IR converter for terahertz imaging // Appl. Phys. Lett. – 2011. – Vol. 99, № 2. – P. 023501.
95. Padilla W. J., Liu X. Perfect electromagnetic absorbers from microwave to optical [Electronic resource] // Opt. Design & Eng. SPIE Newsroom. – 2010. – 3 p. – Mode of access : <http://spie.org/newsroom/3137-perfect-electromagnetic-absorbers-from-microwave-to-optical?ArticleID=x42025> (дата обращения: 10.09.2018).
96. Паулиш А. Г., Загубисало П. С., Кузнецов С. А. и др. Моделирование теплофизических процессов в визуализаторе субтерагерцевого излучения, основанном на тонкоплёночном конвертере из метаматериала // Изв. вузов. Радиофизика. – 2013. – Т. LVI, № 1. – С. 22–38.
97. Кузнецов С. А., Федоринин В. Н., Гельфанд А. В., Паулиш А. Г., Лазорский П. А. Преобразователь терагерцевого излучения (варианты) : патент РФ 2447574. – Оpubл. 10.04.2012. – Бюл. № 10.
98. Олейник А. С., Медведев М. А., Мещанов В. П., Коплевацкий Н. А. Приёмник терагерцевого излучения на основе плёнки VOx : патент РФ 2701187. – Оpubл. 25.09.2019. – Бюл. № 27.
99. Luk'yanchuk B. S., Paniagua-Domínguez R., Minin I., Minin O., Wang Z. Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow // Optical Materials Express. – 2017. – Vol. 7, Issue 6. – P. 1820–1847.

Получено 19.11.2020

© И. В. Минин, О. В. Минин, 2021

MILLIMETER AND TERAHERTZ RADIATION DETECTOR

Igor V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Institute for Strategic Development, e-mail: prof.minin@gmail.com

Oleg V. Minin

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, D. Sc., Professor, Chief Researcher, Institute for Strategic Development, e-mail: prof.minin@gmail.com

The aim of this work is an analytical review of terahertz and millimeter-wave radiation receivers. Classification of terahertz radiation receivers and their comparative characteristics are made. Various aspects of the application of terahertz radiation, as well as the main types and types of receivers of this radiation, are considered in this paper. Photon and thermal receivers, terahertz receivers based on Golay cells, and terahertz-to-infrared converters are analyzed. As a result, a method for increasing the sensitivity of electromagnetic radiation receivers based on the application of the photon jet effect is proposed.

Keywords: terahertz range, photonics, sensitivity, thermal detectors, detectors based on the effect of photoconductivity, Schottky diodes, converters, photon jet

REFERENCES

1. Isaev, V. M., Kabanov, I. N., Komarov, V. V., & Meshchanov, V. P. (2014). Modern radioelectronic systems of the terahertz range. *Doklady TUSURa [Reports of TUSUR]*, 4(34), 5–16 [in Russian].
2. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Scanning device based on The nipkov disk with sub-diffraction resolution in the millimeter, terahertz, infrared and optical wavelength ranges. Patent of the Russian Federation No. 171360 [in Russian].
3. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2018). Device for forming images of objects with sub-diffraction resolution in the millimeter, terahertz, infrared and optical wavelength ranges. Patent of the Russian Federation No. 182458 [in Russian].
4. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Method for forming images of objects with sub-diffraction resolution in the millimeter, terahertz, infrared and optical wavelength ranges. Patent of the Russian Federation No. 2631006 [in Russian].
5. Ozhegov, R. V., Gorshkov, K. N., Okuneva, O. V., Goltsman, G. N., Koshelev, V. P., Filippenko, L. V., & Kinev, N. V. (2014). *Fluktuatsionnaya chuvstvitel'nost' i stabil'nost' priemnikov s SIS i NEV smesitelyami dlya teragertsovogo teplovideniya [Fluctuation sensitivity and stability of receivers with SIS and NEV mixers for terahertz thermal imaging]*. Moscow: MPSU Publ., 104 p. [in Russian].
6. Kemp, M. C. (2011). Explosive detection by terahertz spectroscopy – a bridge too far. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 1(1), 282–292.
7. Jackson, J. B., Bowen, J., Walker, G., Labaune, J., Mourou, G., Menu, M., & Fukunaga, K. (2011). A survey of terahertz applications in cultural heritage conservation science. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1(1), 220–231.
8. Reid, C. B., Reese, G., Gibson, A. P., & Wallace, V. P. (2013). Terahertz time-domain spectroscopy of human blood. *Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(4), 363–367.
9. Saviz, M., Spathmann, O., Streckert, J., Hansen, V., Clemens, M., & Faraji-Dana, R. (2013). Theoretical estimation of safety thresholds for terahertz exposure of surface tissues. *Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(5), 635–640.
10. Fischer, B. M., Wietzke, S., Reuter, M., Peters, O., Gente, R., Jansen, C., Vieweg, N., & Koch, M. (2013). Investigating material characteristics and morphology of polymers using terahertz technology. *Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(3), 259–268.
11. Jin, Y. S., Kim, G. J., & Jeon, S. G. (2006). Terahertz dielectric properties of polymers. *Journal of Korean Physics Society*, 49(2), 513–517.
12. Pracht, U. S., Heintze, E., Clauss, C., Hafner, D., Bek, R., Werner, D., Gelhorn, S., Scheffler, M., Dressel, M., Sherman, D., Gorshunov, B., Il'in, K. S., Henrich, D., Siegel, M. (2013). Electrodynamic of the

superconducting state in ultra-thin films at THz frequencies. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 3(3), 269–280.

13. Takano, K., Yakiyama, Y., Shibuya, K., Izumi, K., Miyazaki, H., Jimba, Y., Miyamaru, F., Kitahara, H., & Hangyo, M. (2013). Fabrication and performance of TiO₂-ceramic-based metamaterials for terahertz frequency range. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 3(6), 812–819.

14. Withayachumnankul, W., & Abbott, D. (2009). Metamaterials in the Terahertz regime. *IEEE Photonics Journal*, 1(2), 99–118.

15. Chen, H.-T., O'Hara, J. F., Taylor, A. J., & Averitt, R. D. (2007). Complementary planar terahertz metamaterials. *Optics Express*, 15(3), 1084–1095.

16. Taylor, Z. D., Singh, R. S., Bennett, D. B., Tewari, P., Kealey, C. P., Bajwa, N., Culjat, M. O., Stojadinovic, A., Lee, H., Hubschman, J. P., Brown, E. R., & Grundfest, W. S. (2011). THz medical imaging: in vivo hydration sensing. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 1(1), 201–219.

17. Ajito, K., & Ueno, Y. (2011). THz chemical imaging for biological applications. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 1(1), 293–300.

18. Gulyaev, Yu. V., Krenitsky, A. P., Betsky, O. V., Mayborodin, A. V., & Kirichuk, V. F. (2008). Terahertz technology and its application in biomedical technologies. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki [Success of Modern Radio Electronics]*, 9, 30–35.

19. Woodward, R. M., Cole, B. E., Wallace, V. P., Pye, R. J., Arnone, D. D., Linfield, E. H., & Pepper, M. (2002). Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin cancer and skin tissue. *Physics in Medicine and Biology*, 47, 3853–3855.

20. Pickwell, E., Cole, B. E., Fitzgerald, A. J., Wallace, V. P., & Pepper, M. (2004). Simulation of terahertz pulse propagation in biological systems. *Applied Physics Letters*, 84, 2190–2192.

21. Taylor, Z. D., Singh, R. S., Culjat, M. O., Suen, J. Y., Grundfest, W. S., Lee, H., & Brown, E. R. (2008). Reflective terahertz imaging of porcine skin burns. *Optics Letters*, 33, 1258–1260.

22. Bennett, D. B., Li, W., Taylor, Z. D., Grundfest, W. S., & Brown, E. R. (2010). Stratified media model for terahertz reflectometry of the skin. *IEEE Sensors*, 11, 1530–1534.

23. Hirmer, M., Danilov, S. N., Giglberger, S., Putzger, J., Niklas, A., Jager, A., Hiller, K. A., Löffler, S., Schmalz, G., Redlich, B., Schulz, I., Monkman, G., & Ganichev, S. D. (2012). Spectroscopic study of human teeth and blood visible to terahertz frequencies for clinical diagnostics of dental pulp vitality. *International Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 33, 366–375.

24. Betsky, O. V., Kirichuk, V. F., Krenitsky, A. P., Mayborodin, A. V., Tupikin, V. D. (2002). Nitric oxide and electromagnetic radiation of EHF (Information interaction in living objects exposed to electromagnetic EHF vibrations at the frequency of the molecular spectrum of absorption and radiation of nitric oxide). *Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika [Biomedical technologies and Radioelectronics]*, 10-11, 95–108 [in Russian].

25. Mayborodin, A. V., Krenitsky, A. P., & Betsky, O. V. (2003). Molecular Quaculture. *Millimetrovye volny v biologii i meditsine [Millimeter Waves in Biology and Medicine]*, 4, 8–10 [in Russian].

26. Krenitsky, A. P., & Mayborodin, A. V. (2002). EHF-aerotherapy – a new, natural, environmentally friendly method of treatment. *Millimetrovye volny v biologii i meditsine [Millimeter Waves in Biology and Medicine]*, 4, 21–23 [in Russian].

27. Gulyaev, Yu. V., Krenitsky, A. P., Betsky, O. V., Mayborodin, A. V., & Kirichuk, V. F. (2008). Terahertz technology and its application in biomedical technologies. *Uspekhi sovremennoy radioelektroniki [Success of Modern Radio Electronics]*, 9, 30–35 [in Russian].

28. Neelakanta, P. S., & Sharma, B. (2013). Conceiving THz endometrial ablation: feasibility, requirements and technical challenges. *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*, 3(4), 402–408.

29. Lee, Y.-S. (2009). *Principles of Terahertz Science and Technology* (pp. 159–170). Berlin: Springer.

30. Daryoosh Saeedkia. (Ed.). (2013). *Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications*. Cambridge: Woodhead Publ., 688 p.

31. Siegel, P. H. (2002). Terahertz technolgy. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 50(3), 910–928.

32. De Maagt, P., Bolivar, P. H., & Mann, C. (2005). Terahertz science, engineering and systems – from space to earth applications. In *Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering* (pp. 5176–5194). K. Chang (ed.). N.Y. : Wiley-Interscience.

33. Yang, Y., Mandehgar, M., & Grischkowsky, D. R. (2011). Broadband THz pulse transmission through the atmosphere. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1(1), 264–273.

34. Van Exter, M., Fattinger, C., & Grischkowsky, D. (1989). Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor. *Optics Letters*, 14, 1128–1130.
35. Yang, Y., Shutler, A., & Grischkowsky, D. (2011). Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz. *Optics Express*, 19, 8830–8838.
36. Weber, M. J., Yang, B. B., Kulie, M. S., Bennartz, R., & Booske, J. H. (2012). Atmospheric attenuation of 400 GHz radiation due to water vapor. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2(3), 355–360.
37. Rosker, M. J., & Wallace, H. B. (2007). Imaging through the atmosphere at terahertz frequencies. *Proceedings of the International IEEE/MTT-S* (pp. 773–776). Honolulu, USA.
38. Brown, E. R. (2003). Fundamentals of terrestrial millimeter-wave and THz remote sensing. *Int. J. High Speed Electronics and Systems*, 13(4), 995–1097.
39. Federici, J., & Moeller, L. (2010). Review of terahertz and subterahertz wireless communications. *Journal of Applied Physics*, 107(11), Article ID 111101, 22 p.
40. Song, H.-J., & Nagatsuma, T. (2011). Present and future of terahertz communications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1(1), 256–263.
41. Armstrong, C. M. (2012). The truth about terahertz. *IEEE Spectrum*, 9, 36–41.
42. Kleine-Ostmann, T., & Nagatsuma, T. A. Review on terahertz communication research. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 32(2), 143–171.
43. Nagatsuma, T., Horiguchi, S., Minamikata, Y., Yoshimizu, Y., Hisatake, S., Kuwano, S., Yoshimoto, N., Terada, J., & Takahashi, H. (2013). Terahertz wireless communications based on photonics technologies. *Optics Express*, 21(21), 23736–23747.
44. Kubarev, V. V. (2005). Detectors of terahertz radiation. In *Sbornik trudov Pervogo rabochego soveshchaniya: Generatsiya i primeneniye teragertsovogo izlucheniya [Proceedings of the First Workshop: Generation and Application of Terahertz Radiation]* (pp. 35–40). Novosibirsk: Budker Institute of Nuclear Physics Publ. [in Russian].
45. Valitov, R. A. (Ed.). (1969). *Tekhnika submillimetrovykh voln [Technique of submillimeter waves]*. Moscow: Sovetskoe radio Publ, 480 p. [in Russian].
46. Rodriguez-Morales, F., Yngvesson, S., & Gu, D. (2007). *Integrated terahertz hot-electron-bolometer receivers from FPAs* (pp. 77–80). Laser Focus World.
47. Andreev, V. G., Angeluts, A. A., Vdovin, V. A., & Lukichev, V. F. (2015). Spectral characteristics of nanometer-thick chromium films in terahertz frequency range. *Tech. Phys. Lett.*, 41(2), 180–183.
48. Batra, A. K., Edwards, M. E., Guggilla, P., Aggarwal, M. D., & Lal, R. B. (2014). Pyroelectric properties of PVDF: MWCNT nanocomposite film for uncooled infrared detectors and medical applications. *Integrated Ferroelectrics*, 158(1), 98–107.
49. Edwards, M., Corda, J., Egariyevwe, S., & Guggilla, P. (2013). Measurement of the dielectric, conductance and pyroelectric properties of MWCNT: PVDF nanocomposite thin films for application in infrared technologies. *Proc. SPIE. Infrared Sensors, Devices and Applications III*, 8868, Article No. 88680E.
50. Goncharenko, B. G., Salov, V. D., Zhukov, A. A., Zorin, S. M., Kozlov, V. V., & Korpukhin, A. S. (2018). Algorithm for elimination of structural noise in an image intensifier with pyroelectric array. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 63(5), 485–490.
51. Hossain, A., & Rashid, M. (1991). Pyroelectric Detectors and Their Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 27(5), 824–829.
52. Müller, R., Bohmeyer, W., Kehrt, M., Lange, K., Monte, C., & Steiger, A. (2014). Novel detectors for traceable THz power measurements. *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35(8), 659–670.
53. Müller, R., Gutschwager, B., Hollandt, J., Kehrt, M., Monte, C., Müller, R., & Steiger, A. (2015). Characterization of a Large-Area Pyroelectric Detector from 300 GHz to 30 THz. *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36(7), 654–661.
54. Rogalski, A., & Sizov, F. (2011). Terahertz detectors and focal plane arrays. *Opto-Electronics Review*, 19(3), 346–404.
55. Pentin, I. V., Smirnov, K. V., Vakhtomin, Yu. B., Smirnov, A. V., Ozhegov, R. V., Divochy, A. V., & Goltsman, G. N. (2011). High-speed terahertz receiver and infrared counter of single photons on the effect of electron heating in superconducting thin-film nanostructures. *TRUDY MFTI [Proceedings of MIPT]*, 3(2), 38–42 [in Russian].
56. Karasik, B. S., Sergeev, A. V., & Prober, D. E. (2011). Nanobolometers for THz photon detection. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1(1), 97–111.

57. Milostnaya, I., Korneev, A., Tarhov, M., Divochiy, A., Minaeva, O., Seleznev, V., Kaurova, N., Voronov, B., Okunev, O., Chulkova, G., Smirnov, K., & Gol'tsman, G. (2008). Superconducting single photon nanowire detectors for IR and THz applications. *Journal of Low Temperature Physics*, 151, 591–596.
58. Divochiy, A., Marsili, F., Bitauld, D., Gaggero, A., Leoni, R., Mattioli, F., Korneev, V., Seleznev, V., Kaurova, N., Minaeva, O., Gol'tsman, G., Lagoudakis, K., Benkhaoul, M., Levy, F., & Fiore, A. (2008). Superconducting nanowire photon number resolving detector at telecom wavelength. *Nature Photonics*, 2, 32–36.
59. Wei, J., Olaya, D., Karasik, B. S., Pereverzev, S. V., Sergeev, A. V., & Gershonson, M. E. (2008). Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics. *Nature Nanotechnology*, 3, 496–500.
60. Gonzalez, F. J., Ilic, B., Alda, J., & Boreman, G. D. (2005). Antenna-coupled infrared detectors for imaging applications. *IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics*, 11(1), 117–120.
61. Hammar, A., Cherednichenko, S., Bevilacqua, S., Drakinskiy, V., & Stake, J. (2011). Terahertz direct detection in YBa₂Cu₃O₇ microbolometers. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1(2), 390–394.
62. Cherednichenko, S., Hammar, A., Bevilacqua, S., Drakinskiy, V., Stake, J., Kabanov, A. A. (2011). Room temperature bolometers for terahertz coherent and incoherent detection. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 1(2), 395–402.
63. Alaverdyan, C. A., Bokov, S. I., Bulgakov, V. O., Zaitsev, N. A., Isaev, V. M., Kabanov, I. N., Katushkin, Yu. Yu., Komarov, V. V., Krenitsky, A. P., Meshchanov, V. P., Savushkin, S. A., Syromyatnikov, A. V., Yakunin, A. S. (2012). Terahertz frequency range: electronic component base, issues of metrological support. In *Obzory po elektronnoy tekhnike: Ser. 1, Elektronika SVCh [Reviews of Electronic Equipment: Ser. 1, Electronics Microwave]*. Moscow: Central Research Institute "Electronics" Publ., 74 p. [in Russian].
64. Insight Product Co. Terahertz Hot Electron Bolometer Detectors from 0.3 to 150 THz. (2011). Retrieved from <http://www.insight-product.com/detect3.htm>.
65. Andreev, V. G., Angeluts, A. A., Vdovin, V. A., & Lukichev, V. F. (2015). Spectral characteristics of nanometer-thick chromium films in terahertz frequency range. *Tech. Phys. Lett.*, 41(2), 180–183.
66. Batra, A. K., Edwards, M. E., Guggilla, P., Aggarwal, M. D., & Lal, R. B. (2014). Pyroelectric properties of PVDF: MWCNT nanocomposite film for uncooled infrared detectors and medical applications. *Integrated Ferroelectrics*, 158(1), 98–107.
67. Edwards, M., Corda, J., Egarievwe, S., & Guggilla, P. (2013). Measurement of the dielectric, conductance and pyroelectric properties of MWCNT: PVDF nanocomposite thin films for application in infrared technologies. *Proc. SPIE. Infrared Sensors, Devices and Applications III*, 8868, Article No. 88680E.
68. Goncharenko, B. G., Salov, V. D., Zhukov, A. A., Zorin, S. M., Kozlov, V. V., & Korpukhin, A. S. (2018). Algorithm for elimination of structural noise in an image intensifier with pyroelectric array. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 63(5), 485–490.
69. Hossain, A., & Rashid, M. (1991). Pyroelectric Detectors and Their Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 27(5), 824–829.
70. Müller, R., Bohmeyer, W., Kehrt, M., Lange, K., Monte, C., & Steiger, A. (2014). Novel detectors for traceable THz power measurements. *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35(8), 659–670.
71. Müller, R., Gutschwager, B., Hollandt, J., Kehrt, M., Monte, C., Müller, R., & Steiger, A. (2015). Characterization of a Large-Area Pyroelectric Detector from 300 GHz to 30 THz. *J. Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36(7), 654–661.
72. Rogalski, A., & Sizov, F. (2011). Terahertz detectors and focal plane arrays. *Opto-Electronics Review*, 19(3), 346–404.
73. Pankratov, M. A. (1994). Modern optical-acoustic radiation receivers. *Opticheskiy zhurnal [Optical Journal]*, 5, 5–6 [in Russian].
74. Gibin, I. S., & Kotlyar, P. E. (2019). Uncooled matrix terahertz image converters. Design principles. *Prikladnaya fizika [Journal of Applied Physics]*, 4, 80–86 [in Russian].
75. Gibin, I. S., & Kotlyar, P. E. (2018). Terahertz radiation receivers (overview). *Uspekhi prikladnoy fiziki [Advances in Applied Physics]*, 6(2), 117–129 [in Russian].
76. Minin, I. V., & Minin O. V. (2017). Opto-acoustic receiver. Patent of the Russian Federation 170388.
77. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). Diffractive optics and nanophotonics: Resolution below the diffraction limit. Springer, 75 p.
78. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Photon jets in science and technology. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(2), 212–234 [in Russian].

79. Klyuev, V. V. (Ed.). (1976). *Pribory dlya nerazrushayushchego kontrolya materialov i izdeliy [Devices for non-destructive testing of materials and products]*. Moscow: "Mashinostroenie" Publ., 391 p. [in Russian].
80. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Detector head. Russian patent no. 2624608.
81. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2017). Radar detector. Patent of the Russian Federation no. 169537.
82. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2014). Photonics of isolated dielectric particles of arbitrary three-dimensional shape – a new direction of optical information technologies. *Vestnik NGU. Seriya: Informatsionnye tekhnologii [Bulletin of NSU. Series: Information Technologies]*, 12(4), 59–70 [in Russian].
83. Minin, I. V., & Minin, O. V. (2016). *Metrologiya v fotonike i nanooptike [Metrology in Photonics and nanooptics]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 172 p. [in Russian].
84. Minin I. V., & Minin O. V. (2015). *Kvazioptika: sovremennye tendentsii razvitiya [Quasioptics: current development trends]*. Novosibirsk: SSUGT Publ., 163 p. [in Russian].
85. Butkov, V. P., Gubarev, D. E., Zikiy, A. N., & Zlaman, P. N. (2017). Serial microwave detectors (review). *Inzhenernyy vestnik Dona [Engineering Bulletin of the Don]*, No. 1 [in Russian].
86. Abramovich, A., Kopeika, N. S., Rozban, D., & Farber, E. (2007). Inexpensive detector for terahertz imaging. *Applied Optics*, 46(29), 7207–7211.
87. Pradere, C., Batsale, J.-C., Chassagne, B., & Caumes, J.-P. Terahertz Imaging Device With Improved Thermal Converter. Patent US 20120032082.
88. Moldokanov, K. A. Terahertz-infrared Converter for visualization of terahertz radiation sources. Patent of the Russian Federation 201612489.
89. Kaveev, A. K., Moldobasanov, K. A., Lelevkin, V. M., Kozlov, P. V., Kropotov, G. I., & Tsypishka, D. I. (2014). Device for visualization of terahertz radiation sources. Patent of the Russian Federation 2511070.
90. Moldosanov, K., & Postnikov, A. (2016). A terahertz-vibration to terahertz-radiation converter based on gold nanoobjects: a feasibility study. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 7, 983–989.
91. Moldosanov, K. A., Lelevkin, V. M., Kozlov, P. V., & Kaveev, A. K. (2013). Terahertz-infrared Converter based on metal nanoparticles: application potential. *Vestnik KRSU [Bulletin of KRSU]*, 13(4), 69–77 [in Russian].
92. Kuznetsov, S. A., Paulish, A. G., Gelfand, A. V., Lazorskiy, P. A., & Fedorinin, V. N. (2011). Bolometric THz-to-IR converter for terahertz imaging. *Applied Physics Letters*, 99, P. 023501.
93. Paulish, A. G., Novgorodov, B. N., Hryashchev, S. V., & Kuznetsov, S. A. (2019). Terahertz Visualizer based on a THz-IR Converter. *Avtometriya [Autometry]*, 55(1), 56–63 [in Russian].
94. Kuznetsov, S. A., Paulish, A. G., Gelfand, A. V., & et al. (2011). Bolometric THz-to-IR converter for terahertz imaging. *Appl. Phys. Lett.*, 99(2), P. 023501.
95. Padilla, W. J., & Liu, X. (2010). Perfect electromagnetic absorbers from microwave to optical. *Opt. Design & Eng. SPIE Newsroom*, 3 p. Retrieved from <http://spie.org/newsroom/3137-perfect-electromagnetic-absorbers-from-microwave-to-optical?ArticleID=x42025> (accessed date 10.09.2018).
96. Paulish, A. G., Zagubisalo, P. S., Kuznetsov, S. A., & etc. (2013). Modeling of thermophysical processes in a subterahertz radiation Visualizer based on a thin-film metamaterial Converter. *Izvestiya vuzov. Radiofizika [Izvestiya Vuzov. Radiophysics]*, LVI(1), 22–38 [in Russian].
97. Kuznetsov, S. A., Fedorinin, V. N., Gelfand, A. V., Paulish, A. G., Lazorsky, P. A. (2012). Terahertz radiation Converter (variants). Patent of the Russian Federation 2447574.
98. Oleinik, A. S., Medvedev, M. A., Meshchanov, V. P., & Kuplevatsky, N. A. (2019). Terahertz radiation Receiver based on VOx film. Patent of the Russian Federation 2701187.
99. Luk'yanchuk, B. S, Paniagua-Domínguez, R., Minin, I., Minin, O., & Wang, Z. (2017). Refractive index less than two: photonic nanojets yesterday, today and tomorrow. *Optical Materials Express*, 7(6), 1820–1847.

Received 19.11.2020

© I. V. Minin, O. V. Minin, 2021