

Современное состояние и перспективы матричных неохлаждаемых детекторов терагерцового диапазона

Н. Кульчицкий¹, А. Наумов², В. Старцев³,
М. Демьяненко, к. ф.-м. н.⁴

УДК 621.315.592 | ВАК 05.27.01

Анализируются перспективы развития болометрических матричных неохлаждаемых детекторов. Преимущества неохлаждаемых детекторов, помимо дешевизны и удобства использования, заключаются в их пригодности для изготовления крупноформатных матричных приемников.

Терагерцовое (ТГц) излучение – это электромагнитное излучение, спектр частот которого расположен между инфракрасным и миллиметровым диапазонами. В данной работе для определенности принимается, что ТГц-диапазон находится в пределах 0,1–10 ТГц (30 мкм – 3 мм), частично перекрываясь со средним инфракрасным (2,5–50 мкм) и миллиметровым (30–300 ГГц, 1–10 мм) диапазонами. Приборы, действующие в терагерцовом диапазоне, приобретают все большее значение в разнообразных приложениях. Состояние и прогноз развития рынка терагерцовой техники приведен на рис. 1. ТГц-волны эффективны в обнаружении присутствия воды и позволяют эффективно различать различные объекты на теле человека (содержание воды в человеческом организме составляет около 60%), поскольку одежды являются прозрачными для этого диапазона длин волн [1].

Критическое различие между детектированием в ТГц-диапазоне и детектированием в инфракрасном диапазоне заключается в малой энергии фотонов ТГц-диапазона, что затрудняет разработку фотонных приемников ТГц-излучения. Создание компактных высокочувствительных перестраиваемых по частоте и работающих при комнатной температуре детекторов терагерцового излучения по-прежнему представляет собой сложную задачу. Это прежде всего обусловлено тем, что, при приближении к терагерцовой области спектра, методы генерации

и детектирования, используемые в радио- и СВЧ-диапазоне, а также в оптическом и ИК-диапазоне, становятся малоэффективными. Так, реализация терагерцовых квантовых генераторов и детекторов сталкивается с тем, что энергия терагерцового фотона сравнима с тепловой энергией при комнатной температуре. Тем не менее, все большее число компаний производят оборудование, работающее в терагерцовом диапазоне – Applied Research & Photonics, TeraSense, Acal PLC, Advantest Corporation, Digital Barriers PLC, Toptica Photonics AG, TeraView Limited, Microtech Instruments, Menlo Systems GmbH, Advanced Photonix.

Известно, что приемники излучения можно разделить на класс фотонных (квантовых) фотоприемников, в которых энергия фотона преобразуется в некоторую первичную реакцию электронной системы фотоприемника, и класс тепловых фотоприемников, в которых энергия фотонов преобразуется в тепло, а реакция фотоприемника возникает, как следствие повышения температуры чувствительного элемента. С точки зрения использования и областей применения важным является разделение приемников ТГц-излучения на охлаждаемые и неохлаждаемые. Преимуществом охлаждаемых (глубоко охлаждаемых) детекторов является их предельно высокая чувствительность, которая характеризуется мощностью, эквивалентной шуму, NEP (Noise-Equivalent Power) $\sim 10^{-18}$ – 10^{-20} Вт/Гц^{1/2} при рабочей температуре $T=100$ – 200 мК [2]. Из-за высокой чувствительности такие сверхпроводящие детекторы предпочтительны в условиях низкого фонового потока фотонов, они нашли применение, в частности, в астрономии. В настоящее время существует большое разнообразие сенсоров ТГц-излучения, как относительно традиционных (например, болометры), так и основанных на различных принципах и материалах, которые появились недавно.

Рассмотрим состояние дел и перспективы развития болометрических матричных неохлаждаемых детекторов.

¹ Государственный научный центр РФ, АО «НПО «ОРИОН» (г. Москва), зам. начальника управления; МИРЭА-Российский технологический университет, (РТУ МИРЭА), (г. Москва).

² Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон» (г. Лыткарино, Моск. обл.), руководитель направления.

³ Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон» (г. Лыткарино, Моск. обл.), главный конструктор.

⁴ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (г. Новосибирск), старший научный сотрудник.

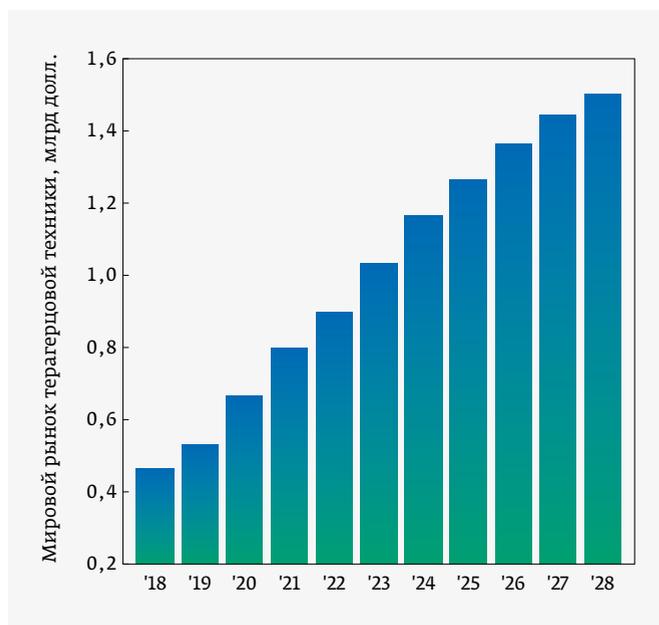


Рис. 1. История и прогноз развития рынка терагерцовой техники. Источник – Adroit Market research, 2021

Преимущества неохлаждаемых детекторов, помимо дешевизны и удобства использования, заключаются в их пригодности для изготовления крупноформатных матричных приемников. NEP неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников ТГц-диапазона форматом 320×240 может достигать значений 40 пВт или $2 \cdot 10^{-13}$ Вт / Гц^{1/2} на частоте 3 ТГц [3].

Следует отметить, что NEP определяется как среднеквадратическое значение входной мощности сигнального излучения W_s , требуемой для обеспечения среднеквадратического выходного сигнала (S), который равен среднеквадратическому значению шума (N), измеренному в полосе частот 1 Гц. Однако, иногда для определения NEP используют шум в полной полосе частот ($\Delta\nu$), задаваемой конкретной измерительной схемой. В этом случае NEP измеряется в ваттах. Это зачастую приводит к неоднозначности и путанице в литературе. Так, например, в работе [4] представлены разработанные канадской фирмой INO неохлаждаемые ТГц-болометры, характеризующиеся $NEP = 24,7$ пВт (при частоте излучения 4,25 ТГц), измеренной в полосе частот $\Delta\nu = 160$ кГц. В то время как в обзоре [5] эти же значения NEP приводятся с указанием размерности Вт / Гц^{1/2}. Во избежание подобной путаницы мы здесь будем использовать термин пороговая или минимальная разрешимая мощность MDP (Minimum Detectable Power), если шум не приведен к полосе 1 Гц.

БОЛОМЕТРЫ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СВЯЗЬЮ

В случаях, когда высокая чувствительность не требуется, актуальными становятся высокое пространственное

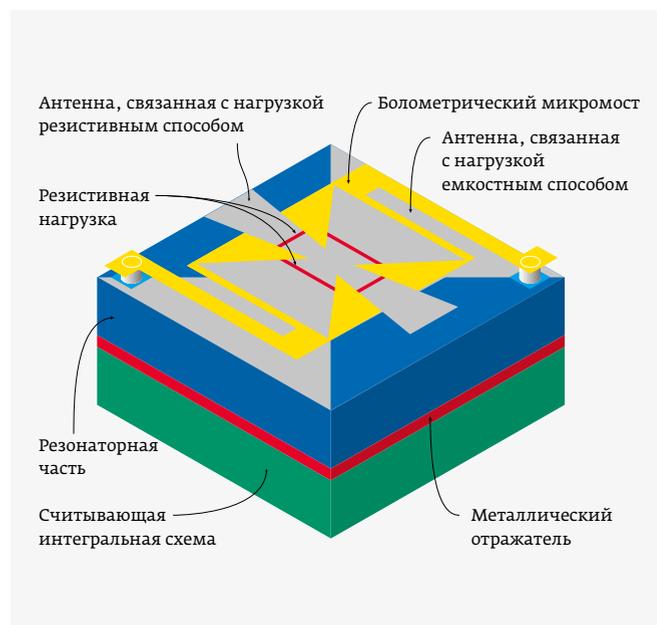


Рис. 2. Схема микроболометра с антеннами, связанными с нагрузками резистивным и емкостным способом

разрешение, скорость визуализации изображения и удобство использования приемников. Для решения этих задач могут быть использованы матричные микроболометрические приемники большого формата, чувствительные к ТГц-диапазону. Высокая чувствительность неохлаждаемых микроболометрических приемников к терагерцовому излучению обеспечивается двумя способами. Первый состоит в применении антенн, связанных с микроболометром резистивным и/или емкостным способом (рис. 2). Второй состоит в применении тонких металлических поглотителей, наносимых на термоизолированную мембрану болометра (рис. 3). Первый преимущественно развивается фирмой LETI (Франция) [6], а второй – фирмой NEC (Япония) [7]. В обоих случаях могут применяться дополнительные оптические резонаторы. В длинноволновой части ТГц-диапазона предпочтительнее применение антенны, поскольку она позволяет подвести электромагнитную мощность к чувствительному элементу, размер которого может быть намного порядков меньше длины волны.

В настоящее время в обоих вариантах исполнения достигнута пороговая мощность $MDP \approx 30\text{--}40$ пВт/пиксель на длинах волн 100–200 мкм ($NEP < 4 \cdot 10^{-13}$ Вт / Гц^{1/2}, так как характерная измерительная полоса частот матричных приемников формата 320×240 обычно составляет более 10 кГц). Быстродействие приемников составляет около 10–15 мс, так что кадровая частота не превышает 60–100 Гц. Здесь следует отметить, что приводимые значения NEP ($> 10^{-10}$ Вт / Гц^{1/2}) для неохлаждаемых матричных микроболометров ТГц-диапазона в ряде обзоров [6, 7]

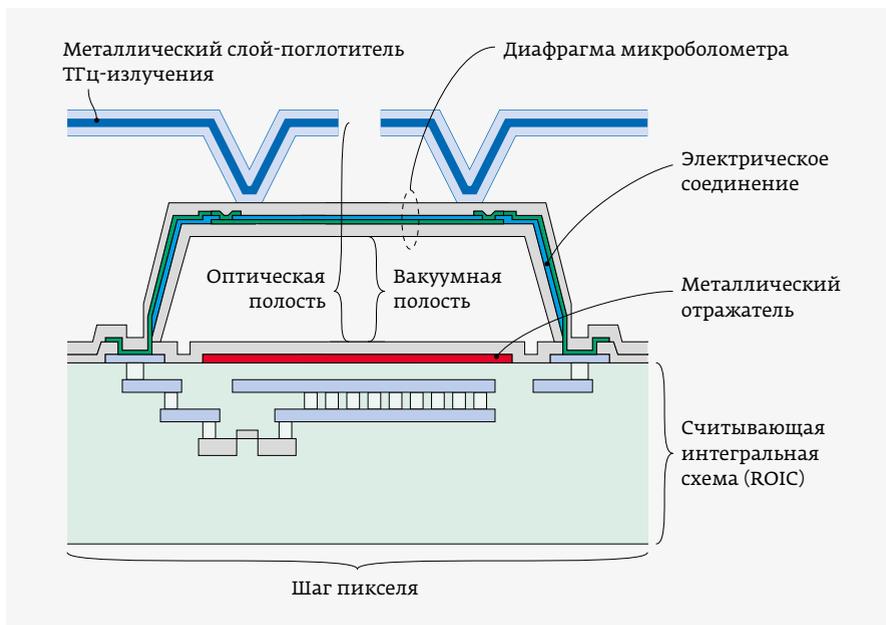


Рис. 3. Схема микроболметра с тонким металлическим поглотителем

являются устаревшими, поскольку еще в 2008 году в работе [8] японской фирмой NEC были представлены неохлаждаемые матричные микроболметрические приемники ТГц-диапазона, обладающие $MDP \approx 40$ пВт / пиксель. Для многих приложений длина волны принимаемого излучения должна достигать порядка 1000 мкм, поскольку в этой области спектра прозрачность многих материалов заметно больше, чем на длинах волн 100–200 мкм. Однако на длинах волн порядка 1000 мкм пороговая мощность вышеуказанных микроболметров повышается до 1000 пВт / пиксель и более [9] вследствие нарушения согласованности импеданса резонатора (оптической полости) и вакуума.

Технология изготовления антенн и поглотителей, являясь, по сути, планарной технологией с использованием фотолитографии, позволяет на одной структуре сформировать фрагменты поглотителей с различной спектральной и поляризационной чувствительностью. Рабочий спектральный диапазон поглотителей ограничивается только технологиями их изготовления, которые на данный момент охватывают интервал длин волн от 1,6 до 10 000 мкм [10].

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ МИКРОБОЛМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЕМНИКОВ

В настоящее время неохлаждаемые микроболметрические приемники являются наиболее подходящими для создания недорогих крупноформатных матричных приемников ТГц-излучения. Коммерчески доступны терагерцовые камеры форматом 320 × 240 и 640 × 480, работающие в режиме реального времени [11]. Минимальная

детектируемая мощность (MDP) излучения на длинах волн порядка 100 мкм составляет 20–40 пВт, что с учетом полосы частот, равной примерно 10 кГц, соответствует $NER = (2-4) \cdot 10^{-13}$ Вт / Гц^{1/2}. Столь малые значения MDP и NER, близкие к соответствующим значениям, достигаемым в ИК-области, обусловлены тем, что были найдены конструктивные решения, позволяющие существенно увеличить коэффициент поглощения ТГц-излучения и, в некоторых случаях, сделать его близким к единице. Для эффективного поглощения ТГц-излучения используются: во-первых, антенны, нагруженные на резистивную нагрузку [12, 13], во-вторых, тонкие металлические поглотители (толщиной в несколько десятков нанометров), обладающие поверхностным сопротивлением от 40 до 377 Ом

в зависимости от расстояния между поглотителем и отражателем [14, 15], в-третьих, метаматериалы или частотно-селективные поверхности [16], в-четвертых, черное золото [17] и, в-пятых, углеродные материалы, в первую очередь, вертикально ориентированные углеродные нанотрубки (ВОУНТ) [18, 19]. Во всех случаях показана возможность достижения практически полного поглощения ТГц-излучения. При этом первые три типа поглотителей, характеризуются в разной степени селективной частотной зависимостью, а последние два – позволяют создавать широкополосные приемники.

В случае применения тонких металлических поглотителей коэффициент поглощения оказывается близким к единице, если поглотитель имеет слоевое сопротивление, равное импедансу вакуума (377 Ом / квадрат), а зазор между поглотителем и отражателем d равен четверти длины волны λ детектируемого излучения. Для $\lambda = 100$ мкм оптимальный зазор d равен 25 мкм. Однако подвешивание микроболметров на такой высоте над подложкой является трудной технологической задачей, поэтому японской фирмой NEC [21, 22] была использована конструкция, в которой на отражателе наносили толстый (7 мкм) слой нитрида кремния, над которым на высоте (≈ 4 мкм) подвешивался болометр. Результирующая оптическая толщина резонатора составила $7 \cdot 1,9 + 4 \approx 17$ мкм, которой достаточно, чтобы обеспечить 90%-ное поглощение на длине волны 100 мкм. Минимальная детектируемая мощность приемника форматом 640 × 480 с размером пикселя 23,5 мкм составила 20 пВт / пиксель на частоте 2,5 ТГц, немного понижаясь в сторону высоких частот (до 10 пВт

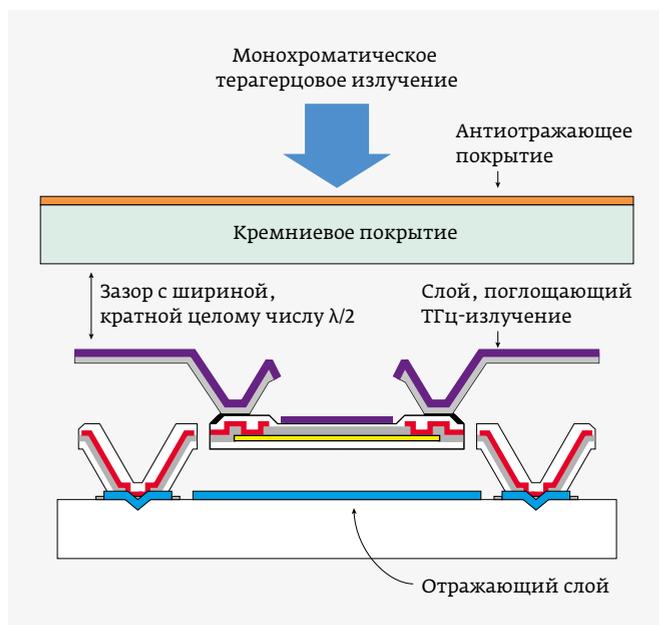


Рис. 4. Болометр с дополнительным оптическим резонатором, образованным зазором между входным окном и мембраной болометра

на 4,3 ТГц) и значительно повышаясь в сторону низких частот (до 600–800 пВт / пиксель на 0,6 ТГц).

Другим способом увеличения чувствительности болометра на длинных волнах является применение дополнительных оптических резонаторов, образованных зазором, равным или кратным $\lambda/2$, между микроболометром и просветленным с внешней стороны входным кремниевым окном (рис. 4). Такие резонаторы позволяют существенно увеличить коэффициент поглощения за счет конструктивной интерференции электромагнитного излучения, падающего и отраженного от болометра и затем от внутренней стороны входного окна, или понизить при деструктивной интерференции [23]. Это приводит к тому, что приемник становится узкополосным. Простота этих конструктивных решений позволила фирме NEC (Япония) наладить производство миниатюрных ТГц-камер, обладающих высокой чувствительностью [11]. Основные способы повышения коэффициента поглощения ТГц-излучения для болометров с тонким металлическим поглотителем описаны в работе [24], в которой приведены аналитические соотношения для расчета спектральных зависимостей коэффициента поглощения в болометрических структурах различного типа.

Еще один вариант поглотителя ТГц-диапазона разрабатывается на основе метаматериалов (или частотно селективных поверхностях-FSS) [25–27]. Такие поглотители представляют собой два тонких слоя металла, разделенные диэлектрическим слоем, толщиной d . Один из них – сплошной слой металла, не пропускающий излучения

через поглотитель, а второй – FSS-слой – подбирается с таким топологическим рисунком, чтобы он мог обеспечить на некоторых частотах импеданс приемника Z_D , равный импедансу вакуума Z_v . В таком случае не будет и отражения падающего излучения, а, следовательно, коэффициент поглощения будет равен единице. Импеданс FSS-слоя может быть представлен в виде последовательной LCR-цепи [28]:

$$Z_{FSS} = R - j \left(\frac{1 - \omega^2 LC}{\omega C} \right),$$

где ω – круговая частота; R – сопротивление; C и L – емкость и индуктивность, величины которых определяются формой частотно-селективной поверхности. Импеданс диэлектрического зазора между двумя слоями металла равен

$$Z_d = jZ_m \tanh(kd),$$

где Z_m – импеданс диэлектрического материала между двумя слоями металла. В итоге, полный импеданс структуры (детектора) равен

$$Z_D = \frac{Z_d Z_{FSS}}{Z_d + Z_{FSS}}.$$

В резонансе, когда $(1 - \omega^2 LC)/\omega C - Z_m \tanh(kd) = 0$, для длин волн, много больших толщины диэлектрического слоя d , получаем, что мнимая компонента импеданса Z_D близка к нулю, а значение сопротивления R , при котором реальная компонента импеданса структуры будет равна импедансу вакуума Z_v , должно удовлетворять условию

$$R = \frac{Z_m^2 \tanh(kd)^2}{Z_v}.$$

На рис. 5 показан фрагмент матрицы двухуровневых микроболометров с ТГц-поглотителем на основе метаматериала. Формат матрицы 384 × 288, размер пикселя 35 мкм. Первый уровень болометра, приподнятый на 3 мкм над полностью отражающим зеркалом, содержит как термочувствительный элемент (VOx), так

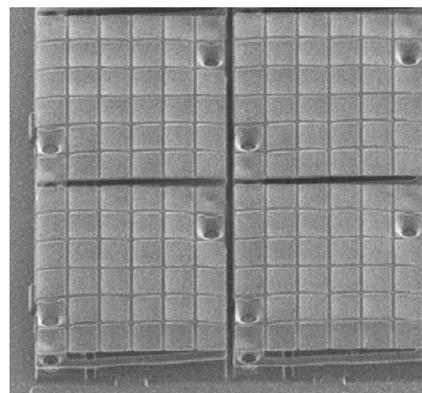


Рис. 5. Электронно-микроскопическая фотография фрагмента матрицы ТГц микроболометрических элементов с поглотителем на основе метаматериалов [25]

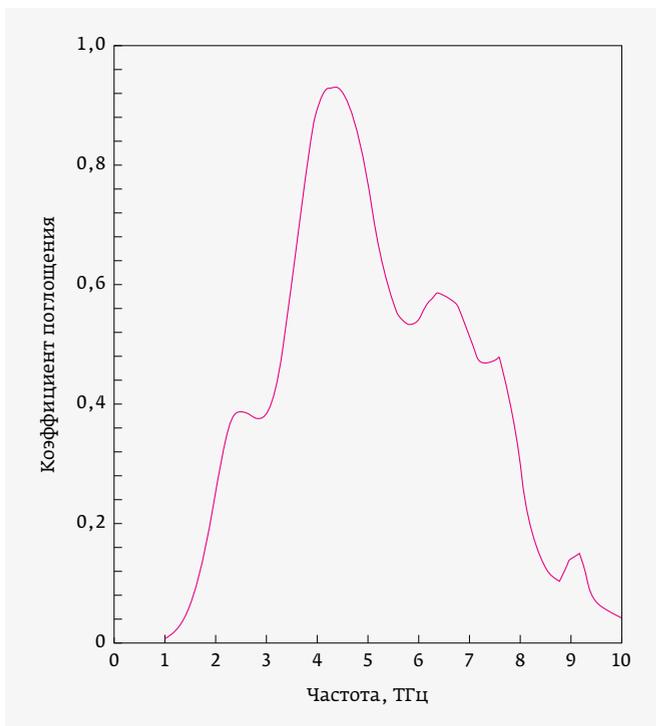


Рис. 6. Спектральная зависимость коэффициента поглощения микроболومترного приемника с поглотителем на основе метаматериала [25]

и терагерцовый поглотитель. Второй уровень, подвешенный на 2,3 мкм выше первого, представляет собой инфракрасный фильтр, состоящий из массива квадратов форматом 6×6 , отражающий ИК-излучение и пропускающий терагерцовое излучение. На рис. 6 приведена спектральная зависимость поглотителя на основе метаматериала. Видно, что реализуется достаточно высокий коэффициент поглощения (более 90%) на частотах соответствующих длинам волн порядка 70 мкм.

Широкополосные болометрические приемники ТГц-диапазона успешно разрабатываются с применением поглотителей на основе черного золота и вертикально ориентированных углеродных нанотрубок (ВОУНТ). Осаждаемое в среде азота золото представляет собой очень рыхлую структуру, состоящую из случайных цепей наночастиц золота. Оно обладает очень малой плотностью (до 65 мг/см^3), что позволяет делать широкополосные поглотители из толстых (30–50 мкм) слоев черного золота, существенно не увеличивая массу и теплоемкость чувствительной мембраны болометра [29]. Слой черного золота толщиной 30 мкм по массе и теплоемкости эквивалентен сплошному слою золота толщиной 100 нм. Слои черного золота характеризуются удельным сопротивлением ρ от 0,1 до $25 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, при этом $\rho = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ является оптимальными для изготовления поглотителей [30]. На основе этой технологии фирма

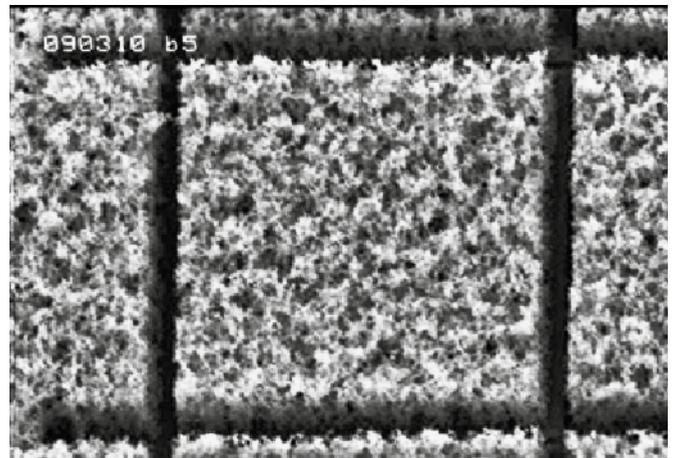


Рис. 7. Микроболومتر размером 52 мкм с поглотителем из черного золота толщиной 30 мкм [29]

INO (Канада) производит широкополосные терагерцовые матричные болометрические приемники. Изображение пикселей такой матрицы показаны на рис. 7 [29]. Такая технология, помимо процесса нанесения черного золота, содержит еще один нестандартный этап производства, а именно – лазерное разрезание слоев черного золота на пиксели. Тем не менее в Канаде поставлено производство терагерцовых камер форматом 384×288 пикселей, с размером пикселя 35 мкм. Минимальная детектируемая мощность камеры составляет 11–34 пВт / пиксель в диапазоне от 4,25 до 0,198 ТГц, что, учитывая время интегрирования сигнала, равно 40 мкс, при пересчете на полосу частот равную 1 Гц дает мощность эквивалентную шуму (NEP) от 0,11 до $0,32 \text{ пВт/Гц}^{1/2}$ [31]. Это означает, что «пальма первенства» среди неохлаждаемых приемников терагерцового излучения принадлежит микроболометрам.

Слои многосенных ВОУНТ также как и слои черного золота имеют малую плотность ($20\text{--}30 \text{ мг/см}^3$ [32]) и могут быть выращены толщиной 50–100 мкм и более, что обеспечивает практически полное поглощение падающего на него излучения от 0,3 до 500 мкм [33, 34]. В настоящее время температура роста ВОУНТ составляет $750\text{--}850 \text{ }^\circ\text{C}$, что не позволяет их выращивать на болометрах, изготовленных на кремниевых мультиплексах. Однако были продемонстрированы линейки микроболометров с размером мембраны $100 \times 100 \text{ мкм}$, на которых был выращен слой ВОУНТ толщиной 22 мкм (рис. 8). При этом в качестве термочувствительного слоя использовался оксид ванадия, наносимый на мембрану до выращивания нанотрубок. В процессе выращивания слоя ВОУНТ температурный коэффициент сопротивления VOx понижался от исходного значения $3\%/\text{K}$ до $1,2\%/\text{K}$, что все еще значительно больше ТКС металлов ($\approx 0,3\%/\text{K}$).

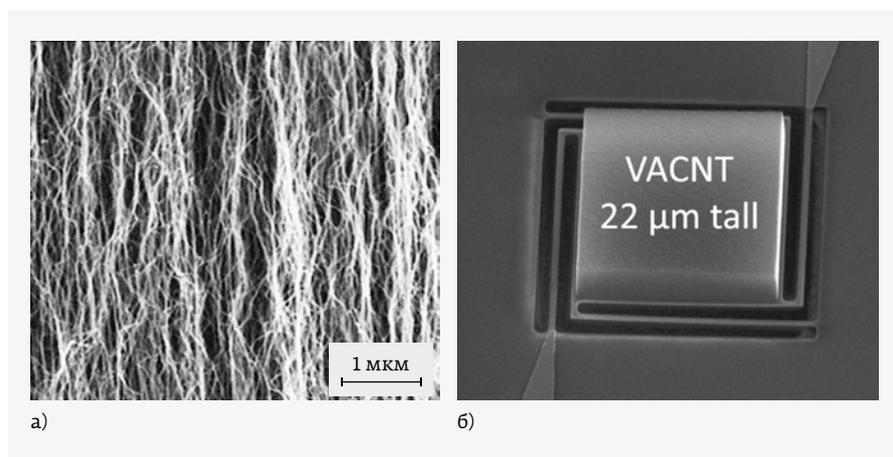


Рис. 8. Изображения, сделанные с помощью сканирующего электронного микроскопа: а – массив ВОУНТ [25]; б – микроболومتر с размером мембраны 100×100 мкм, на которой выращен слой ВОУНТ толщиной 22 мкм [34]

СОСТОЯНИЕ ДЕЛ В РОССИИ

В России неохлаждаемые микроболметрические приемники ТГц-излучения с тонким металлическим поглотителем форматом 160×120 и 320×240 , обладающие на длине волны 130 мкм пороговой мощностью ≈ 3 нВт/пиксель, были разработаны и продемонстрированы в ИФП СО РАН. Повышенное экспериментальное значение пороговой мощности обусловлено применением германиевых окон, обладающих высоким поглощением ТГц-излучения, и вдвое пониженным напряжением смещения болометра, применяемым для обеспечения большого динамического диапазона, необходимого при работе приемника с мощным ТГц-излучением новосибирского лазера на свободных электронах. Замена германиевого окна на кремниевое и применение повышенного напряжения смещения болометра позволяют понизить пороговую мощность, MDP до ≈ 250 пВт/пиксель. Дальнейшее понижение MDP требует увеличения толщины оптического резонатора (высоты подвески болометра над мультиплексором) и понижения теплопроводности микроболметров. Также были разработаны и продемонстрированы микроболметрические приемники ТГц-излучения антенного типа форматом 53×40 и 32×24 с размерами антенн 150×150 и 250×250 мкм, соответственно, предназначенные для работы в субмиллиметровом диапазоне. Экспериментальное значение MDP, измеренное на длине волны 130 мкм, составило ≈ 30 нВт/пиксель. В отличие от сверхпроводящих и металлических болометров, неохлаждаемые болометры на основе оксидов ванадия имеют сопротивление порядка 100 кОм, что представляет определенную трудность для согласования антенны с нагрузкой. В конструкции ИФП СО РАН нагрузкой для антенны является не сам термочувствительный

элемент микроболметра, а узкая металлическая полоска, нанесенная на верхний слой нитрида кремния между контактами к слою оксида ванадия и, следовательно, имеющая хороший тепловой контакт с микроболметром, но электрически изолированная от термочувствительного слоя. Длина полоски 70 мкм, ширина 2 мкм и толщина 200 нм, сопротивление – порядка 100 Ом. Антенна выполнена из хорошо проводящего металла и подвешена над кремниевой схемой считывания на высоте 2,5 мкм с помощью растяжек из нитрида кремния. Эти разработки ИФП СО РАН позволили АО «ОКБ «Астрон» впервые в России изготовить несколько

опытных полупромышленных партий чувствительных в терагерцовой области микроболметрических матриц с шагом пикселя 25 мкм [35].

Преимущества неохлаждаемых детекторов заключаются в относительной простоте схемы, а также в их способности действовать при комнатной температуре в широкой полосе частот. NEP неохлаждаемых детекторов находится в диапазоне 10^{-9} – 10^{-11} Вт/Гц^{1/2}. В настоящее время неохлаждаемые микроболметрические приемники считаются наиболее подходящими для создания недорогих крупноформатных матричных приемников ТГц-излучения. Минимальная детектируемая мощность (MDP) излучения на длинах волн порядка 100 мкм составляет 20–40 пВт. Столь малые значения MDP, близкие к соответствующим значениям, достигаемым в ИК-области, обусловлены тем, что были найдены конструктивные решения, позволяющие существенно увеличить коэффициент поглощения ТГц-излучения. Сегодня, несомненно, «пальма первенства» среди неохлаждаемых приемников терагерцового излучения принадлежит микроболметрам.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sizov F.F.** Detectors and Sources for THz and IR // Materials Research Foundations. 2020. V. 72 ISSN 2471-8890. 320 p.
2. **Wei J., Olaya D., Karasik B. S., Pereverzev S. V., Sergeev A. V., Gershenson M. E.** Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics // Nat. Nanotechnol. 2008. № 3. PP. 496–500.
3. **Fukasawa R.** Terahertz Imaging: Widespread Industrial Application in Non-destructive Inspection and Chemical Analysis // IEEE Trans. Terahertz Science and Technology. 2015. V. 5. № 6. PP. 1121–1127.

4. **Chevalier C., Mercier L., Duchesne F., Gagnon L., Tremblay B., Terroux M., Génèreux F., Paultre J.-E., Provençal F., Desroches Y., Marchese L., Jerominek H., Alain C., Bergeron A.** Introducing a 384×288 Pixel Terahertz Camera Core // Proc. of SPIE. 2013. V. 8624, 86240.
5. **Lewis R. A.** A review of terahertz detectors // J. Phys. D: Appl. Phys. 52, 433001, 2019.
6. **Sizov F. F., Reva V. P., Golenkov A. G., Zabudsky V. V.** Uncooled Detectors Challenges for THz/sub-THz Arrays Imaging // J Infrared Milli Terahz Waves. 2011. V. 32. PP. 1192–1206.
7. **Simoens F., Meilhan J., Delplanque B., Gidon S., Lasfargues G., Lalanne Dera J., Nguyen D. T., Ouvrier-Buffe J. L., Pocas S., Maillou T.** Real-time imaging with THz fully-customized uncooled amorphous silicon microbolometer focal plane arrays // Proc. SPIE. 2012. V. 8363, 83630D.
8. **Oda N., Yoneyama H., Sasaki T., Sano M., Kurashina S., Hosako I., Sekine N., Sudoh T., Irie T.** Detection of terahertz radiation from quantum cascade laser, using vanadium oxide microbolometer focal plane arrays // Proc. of SPIE 2008. V. 6940, 69402Y.
9. **Bolduc M., Terroux M., Tremblay B., Marchese L., Savard E., Doucet M., Oulachgar H., Alain C., Jerominek H., Bergeron A.** Noise-equivalent power characterization of an uncooled microbolometer-based THz imaging camera // Proc. SPIE. 2011. V. 8023, 80230C.
10. **Bolduc M., Terroux M., Marchese L., Tremblay B., Savard É., Doucet M., Oulachgar H., Alain C., Jerominek H., Bergeron A.** THz imaging and radiometric measurements using a microbolometer-based camera // Proc. IEEE. 2011. 6105155. No. 1–2.
11. **Oda N.** Technology trend in real-time, uncooled image sensors for sub-THz and THz wave detection // Proc. SPIE. 2016. V. 9836, 98362P.
12. **Simoens F., Meilhan J.** Terahertz real-time imaging uncooled array based on antenna- and cavity-coupled bolometers // Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 2014. V. 372, No. 2012. P. 20130111.
13. **Simoens F., Meilhan J., Nicolas J.-A.** Terahertz real-time imaging uncooled arrays based on antenna-coupled bolometers or FET developed at CEA-Leti // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2015. V. 36. № 10. PP. 961–985.
14. **Oda N.** Détecteur matriciel de type bolométrique à température ambiante et caméra vidéo pour l'imagerie terahertz. Comptes Rendus Phys. Elsevier Masson SAS, 2010. V. 11, No. 7–8. PP. 496–509.
15. **Nemoto N. et al.** High-Sensitivity and Broadband, Real-Time Terahertz Camera Incorporating a Micro-Bolometer Array With Resonant Cavity Structure // IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol. IEEE. 2016. V. 6. No. 2. PP. 175–182.
16. **Oulachgar H. et al.** Optimization of design and microfabrication of metamaterial-based absorber for terahertz microbolometer // 39th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz waves (IRMMW-THz). IEEE. 2014.
17. **Proulx C. et al.** The EarthCARE broadband radiometer detectors // Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XVII ed. Strojnik M. 2009. P. 74530S.
18. **Yung C. et al.** BABAR: black array of broadband absolute radiometers for far infrared sensing // Image Sensing Technologies: Materials, Devices, Systems, and Applications VI ed. Dhar N. K., Dutta A. K., Babu S. R. SPIE. 2019. P. 109800F.
19. **Tomlin N. A. et al.** Overview of microfabricated bolometers with vertically aligned carbon nanotube absorbers // AIP Adv. AIP Publishing, LLC. 2020. V. 10. No. 5. P. 055010.
20. **Simoens F., Meilhan J., Nicolas J.-A.** Terahertz Real-Time Imaging Uncooled Arrays Based on Antenna-Coupled Bolometers or FET Developed at CEA-Leti // J Infrared Milli Terahz Waves. 2015 36:961–985. DOI: 10.1007/s10762-015-0197-x.
21. **Oda N., Kurashina S., Miyoshi M., Doi K., Ishi T., Sudou T., Morimoto T., Goto H., Sasaki T** Microbolometer Terahertz Focal Plane Array and Camera with Improved Sensitivity in the Sub-Terahertz Region // J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves. 2015. V. 36, No. 10. PP. 947–960.
22. **Oda N.** Technology Trend in Real-time, Uncooled Image Sensors for sub-THz and THz Wave Detection // Proc. SPIE. 2016. V. 9836. 98362P.
23. **Oda N.** Development of Terahertz focal plane arrays and handy camera / Naoki Oda, Masahiko Sano, Ken'ichi Sonoda, et al. // Proc. SPIE 8012, Infrared Technology and Applications XXXVII / ed. by B. F. Andresen, G. F. Fulop, P. R. Norton. 2011. P. 80121B.
24. **Dem'yanenko M. A., Marchishin I. V., Startsev V. V.** Absorption of terahertz radiation by a thin metal absorber in conventional and inverted bolometers. OSA CONTINUUM. 2019. V. 2. No. 6. PP. 2085–2097.
25. **Oulachgar H., Mauskopf P., Bolduc M., Ilias S., Paultre J.-E., D'Amato D., Terroux M., Pope T., Alain C., Topart P., Jerominek H.** Design and microfabrication of frequency selective uncooled microbolometer focal plane array for terahertz imaging // Proc. of 38th conference of IRMMW-THz. Mainz-Germany. 2013.
26. **Oulachgar H., Paultre J.-E., Provençal F., D'Amato D., Beaupré P., Alain C., Jerominek H.** Optimization of design

ООО
СМП



ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

электронные КОМПОНЕНТЫ
**для ПОВЕРХНОСТНОГО
МОНТАЖА**

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Разборные металлические EMI SMD экраны
- Кварцевые генераторы 0532 на частоты до 125 МГц

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32, е-тап: sales@smd.ru
Тел: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780

- and microfabrication of metamaterial-based absorbers for terahertz microbolometers // Proc. of 39th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. IRMMW-THz. 2014.
27. **Oulachgar H., Marchese L. E., Terroux M., Ilias S., Paultre J.-E., D'Amato D., Tremblay B., Provençal P. B., Alain C., Topart P., Génèreux F., Jerominek H., Bergeron A.** A 384×288 microbolometer-based pixel camera with metamaterial absorbers for real-time terahertz imaging applications // Proc. of the 6th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics. META'15 New York. USA. 2015.
 28. **Costa F., Monorchio A., Manara G.** Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010. V.58. No. 5. PP. 1551–1558.
 29. **Proulx C., Williamson F., Allard M., Baldenberger G., Gay D., Garcia-Blanco S., Côté P., Martin L., Larouche C., Ilias S., Pope T., Caldwell M., Ward K., Delderfield J.** The Earth CARE broadband radiometer detectors // Proc. of SPIE. 2009. V. 7453, 74530S. doi: 10.1117 / 12.829935.
 30. **Panjwani D. R.** Characterization of gold black and its application in un-cooled infrared detectors: Ph.D. dissertation. University of Central Florida. 2015. 143 p.
 31. **Terroux M., Talbot P., Génèreux F., Marchese L., Oulachgar E.-H., Bergeron A.** NEP characterization and analysis method for THz imaging devices // Proc. of SPIE. 2021. V. 11745, 117450L. <https://doi.org/10.1117/12.2586094>.
 32. **Okamoto A., Gunjishima I., Inoue T., Akoshima M., Miyagawa H., Nakano T., Baba T., Tanemura M., Oomi G.** Thermal and electrical conduction properties of vertically aligned carbon nanotubes produced by water-assisted chemical vapor deposition // Carbon N.Y. 2011. V. 49, No. 1. PP. 294–298.
 33. **Yung C. S., Tomlin N. A., Straatsma C., Rutkowski J., Richard E. C., Harber D. M., Lehman J. H., Stephens M. S.** BABAR: black array of broadband absolute radiometers for far infrared sensing // Proc. of SPIE. 2019. V. 10980, 109800.
 34. **Tomlin N. A., Yung C. S., Castleman Z., Denoual M., Drake G., Farber N., Harber D., Heuerman K., Kopp G., Passe H., Richard E., Rutkowski J., Sprunck J., Stephens M., Straatsma C., Van Dreser S., Vayshenker I., White M. G., Woods S. I., Zheng W., Lehman J. H.** Overview of microfabricated bolometers with vertically aligned carbon nanotube absorbers // AIP Adv. AIP Publishing. LLC. 2020. V. 10. No. 5. P. 055010.
 35. **Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В., Демьяненко М. А.** Современное состояние и перспективы детекторов в терагерцовом диапазоне. Часть 1. Прямое детектирование терагерцового излучения // Успехи прикладной физики. 2021. Т. 9, № 1. С. 68–82. DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-1-68-82.

АСТРОН
 Оптико-механическое
 конструкторское бюро

ПРОИЗВОДСТВО ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ
 140080, МО, г. Лыткарино, ул. Парковая, д.1; тел: +7 (495) 215-13-82; info@astrohn.ru, www.astrohn.ru