DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.8.642.655

Детектирование в терагерцевом диапазоне

Часть II

Н. А. Кульчицкий[1,2], А. В. Наумов[3], В. В. Старцев[3], М. А. Демьяненко[4]

[1] *Государственный научный центр РФ, Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Орион», Москва, Россия*
[2] *МИРЭА – Российский технологический университет, (РТУ МИРЭА), Москва, Россия*
[3] *Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», Лыткарино, Московская обл., Россия*
[4] *Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия*

В статье идет обсуждение проблем, связанных с развитием технологии детекторов излучения терагерцевого диапазона. Продолжено рассмотрение состояния дел в области неохлаждаемых матричных болометрических приемников, недавний прогресс в различных методах детектирования терагерцевого излучения – прямого детектирования и гетеродинного детектирования. Внимание сфокусировано на преимуществах и недостатках сенсоров прямого детектирования и сенсоров с гетеродинным детектированием.

Ключевые слова: гетеродинное детектирование, полоса частот, прямое терагерцевое излучение чувствительность

Статья получена: 01.10.2021
Статья принята: 24.10.2021

* Примечание редактора: данная статья является продолжением статьи Н. А. Кульчицкий, А. В. Наумов, В. В. Старцев, М. А. Демьяненко. Детектирование в терагерцевом диапазоне. Часть 1. ФОТОНИКА.2021, т. 15, № 1, с. 52–68. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.1.52.68.

Detection in the Terahertz Range

Part II

N. A. Kulchitsky[1,2], A. V. Naumov[3], V. V. Startsev[3], M. A. Demyanenko[4]

[1] *The State Scientific Center of the Russian Federation, Joint Stock Company "Scientific and Production Association "Orion", Moscow, Russia*
[2] *MIREA- Russian Technological University, (RTU MIREA), Moscow, Russia*
[3] *Joint Stock Company "Optical and Mechanical Design Bureau Astron", Lytkarino, Moscow region, Russia*
[4] *Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the SB RAS, Novosibirsk, Russia*

The article discusses the problems associated with the development of technology of THz radiation detectors. The article continues to review the state of affairs in the field of uncooled matrix bolometric receivers, recent progress in various methods of detecting terahertz radiation – direct detection and heterodyne detection. Attention is focused on the advantages and disadvantages of direct detection sensors and sensors with heterodyne detection.

Keywords: heterodyne detection, frequency band, direct terahertz radiation sensitivity

The article was received: 01.10.2021
The article was accepted: 24.10.2021

UNCOOLED MATRIX MICROBOLOMETRIC RECEIVERS. PART II

Currently, uncooled microbolometric receivers are the most suitable for creating inexpensive large-format matrix THz radiation receivers. 320×240 and 640×480 terahertz cameras that operate in real time are commercially available [1]. The minimum detectable power (MDP) of radiation at wavelengths of the

* Note: This article is a continuation of the article by N. A. Kulchitsky, A. V. Naumov, V. V. Startsev, M. A. Demyanenko. Detection in the Terahertz Range. Part 1. PHOTONICS RUSSIA. 2021, vol.15, No. 1, pp. 52–68. DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.1.52.68.

НЕОХЛАЖДАЕМЫЕ МАТРИЧНЫЕ МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ. ЧАСТЬ II

В настоящее время неохлаждаемые микроболометрические приемники являются наиболее подходящими для создания недорогих крупноформатных матричных приемников ТГц-излучения. Коммерчески доступны терагерцевые камеры форматом 320×240 и 640×480, работающие в режиме реального времени [1]. 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 NEP=2–4·10^{-13} Вт/Гц$^{1/2}$. Столь малые значения MDP и NEP, 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: 1) антенны, нагруженные на резистивную нагрузку [2, 3] и 2) тонкие металлические поглотители (толщиной в несколько десятков нанометров), обладающие поверхностным сопротивлением от 40 до 377 Ом в зависимости от расстояния между поглотителем и отражателем [4, 5], 3) метаматериалы или частотно-селективные поверхности [6], 4) черное золото [7] и 5) углеродные материалы, в первую очередь вертикально ориентированные углеродные нанотрубки (ВОУНТ) [8, 9]. 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.

Применение антенн, связанных емкостным или прямым способом с резистивной нагрузкой, расположенной на мембране болометра, было рассмотрено в первой части обзора. Здесь, отметим только одну тенденцию их развития, а именно: замена антенн в форме бабочки на антенны V-образной формы, обладающие малой площадью металла и, следовательно, малой массой и теплоемкостью, что позволяет повысить быстродействие приемников [10].

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

order of 100 microns is 20–40 pW, which, taking into account the frequency band equal to about 10 kHz, corresponds to NEP=2–4·10^{-13} W/Hz$^{1/2}$. Such small values of MDP and NEP, close to the corresponding values achieved in the IR region, are due to the fact that constructive solutions have been found that can significantly increase the absorption coefficient of THz radiation and, in some cases, make it close to unity. For effective absorption of THz radiation, the following methods are used: 1) antennas loaded with a resistive load [2,3] and 2) thin metal absorbers (several tens of nanometers thick) with a surface resistance from 40 to 377 ohms, depending on the distance between the absorber and the reflector [4,5], 3) metamaterials or frequency-selective surfaces [6], 4) black gold [7] and 5) carbon materials, primarily vertically aligned carbon nanotubes (VACNTs) [8,9]. In all cases, the possibility of achieving almost complete absorption of THz radiation is shown. At the same time, the former three types of absorbers are characterized to varying degrees by selective frequency dependence, and the latter two types allow creating broadband receivers.

The use of antennas connected in a capacitive or direct way with a resistive load located on the bolometer membrane was considered in the first part of the review. Only one trend of their development should be noted in this regard, namely, the -replacement of butterfly-shaped antennas with V-shaped antennas with a small metal area and, consequently, low mass and heat capacity, which makes it possible to increase the speed of the receivers [10].

In the case of thin metal absorbers, the absorption coefficient turns out to be close to unity if the absorber has a layer resistance equal to the vacuum impedance (377 ohms/square), and the gap between the absorber and the reflector d is equal to a quarter of the wavelength of the λ detected radiation. For λ=100 microns, the optimal gap d is 25 microns. However, hanging microbolometers at such a height above the substrate is a difficult technological task, therefore, the Japanese company NEC [11,12] used a design in which a thick (7 microns) layer of silicon nitride was applied to the reflector, above which a bolometer was suspended at a height of (≈4 microns). The resulting optical thickness of the resonator was 7·1.9+4≈17 microns, which is sufficient to provide 90% absorption at a wavelength of 100 microns. The minimum detectable power of a 640×480 receiver with a pixel size of 23.5 microns was 20 pW/pixel at a frequency of 2.5 THz, slightly decreasing towards high frequencies (up to 10 pW at 4.3 THz) and significantly increasing towards low frequencies (up to 600×800 pW/pixel at 0.6 THz).

детектируемого излучения. Для λ=100 мкм оптимальный зазор *d* равен 25 мкм. Однако подвешивание микроболометров на такой высоте над подложкой является трудной технологической задачей, поэтому японской фирмой NEC [11, 12] была использована конструкция, в которой на отражатель наносили толстый (7 мкм) слой нитрида кремния, над которым на высоте (≈4 мкм) подвешивался болометр. Результирующая оптическая толщина резонатора составила 7·1,9+4≈17 мкм, которая достаточна, чтобы обеспечить 90%-ое поглощение на длине волны 100 мкм. Минимальная детектируемая мощность приемника форматом 640×480 с размером пиксела 23,5 мкм составила 20 пВт/пиксел на частоте 2,5 ТГц, немного понижаясь в сторону высоких частот (до 10 пВт на 4,3 ТГц) и значительно повышаясь в сторону низких частот (до 600×800 пВт/пиксел на 0,6 ТГц).

Другим способом увеличения чувствительности болометра на длинных волнах является применение дополнительных оптических резонаторов, образованных зазором, равным или кратным λ/2, между микроболометром и просветленным с внешней стороны входным кремниевым окном (рис. 1). 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 [13]. Это приводит к тому, что приемник становится узкополосным. Простота этих конструктивных решений позволила фирме NEC (Япония) наладить производство миниатюрных ТГц-камер, обладающих высокой чувствительностью [1]. Основные способы повышения коэффициента поглощения ТГц-излучения для болометров с тонким металлическим поглотителем описаны в работе [14], 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) [15–17]. 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 при-

Another way to increase the sensitivity of the bolometer at long waves is the use of additional optical resonators formed by a gap equal to or multiple of λ/2 between the microbolometer and the externally illuminated input silicon window (Fig. 1). These resonators can significantly increase the absorption coefficient due to constructive interference of electromagnetic radiation incident and reflected from the bolometer and then from the inside of the input window, or lower it as destructive interference occurs [13]. This causes the receiver to become narrowband. The simplicity of these design solutions allowed NEC (Japan) to begin manufacturing high-sensitivity miniature THz cameras [1]. The main ways to increase the absorption coefficient of THz radiation for bolometers with a thin metal absorber are described in the paper [14], which provides analytical relations for calculating the spectral dependences of the absorption coefficient in bolometric structures of various types.

Another version of the THz-band absorber is being developed using metamaterials (or frequency selective-FSS surfaces) [15–17]. Such absorbers comprise two thin layers of metal separated by a dielectric layer, *d* thick. One of them is a solid layer of metal that does

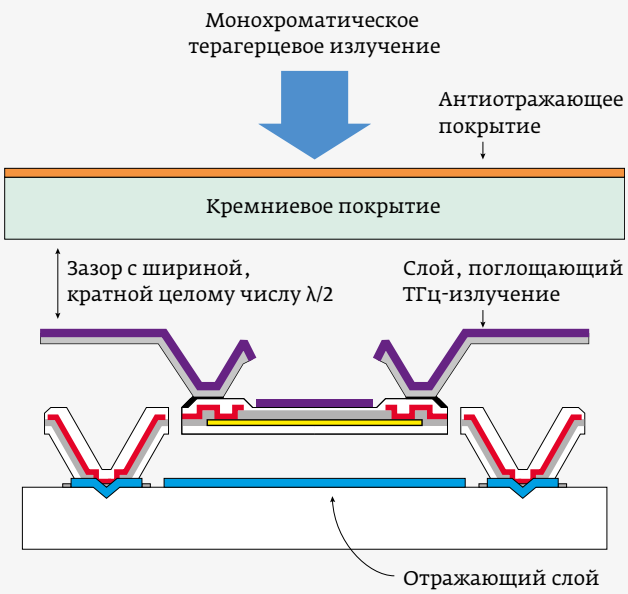


Рис. 1. *Болометр с дополнительным оптическим резонатором, образованным зазором между входным окном и мембраной болометра*

Fig. 1. *Bolometer with an additional optical resonator formed by a gap between the entrance window and the bolometer membrane*

емника 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 [18]:

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

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. 2 показан фрагмент матрицы двухуровневых микроболометров с ТГц-поглотителем на основе метаматериала. Формат матрицы 384×288, размер пиксела 35 мкм. Первый уровень болометра, приподнятый на 3 мкм над полностью отражающем зеркалом, содержит как термочувствительный элемент (VOx), так и терагерцевый поглотитель. Второй уровень, подвешенный на 2,3 мкм выше первого, представляет собой инфракрасный фильтр, состоящий из массива квадратиков форматом 6×6, отражающий ИК-излучение и пропускающий терагерцевое излучение. На рис. 3 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

not pass radiation through the absorber, and the second-FSS layer is selected with a topological pattern so that it can at some frequencies provide the impedance of the receiver Z_D equal to the impedance of the vacuum Z_v. In this case, no reflection of the incident radiation will occur, and, consequently, the absorption coefficient will be equal to unity. The impedance of the FSS layer can be represented as a serial LCR circuit [18]

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

where ω is the circular frequency, R is the resistance, C and L are the capacitance and inductance, the values of which are determined by the shape of the frequency-selective surface. The impedance of the dielectric gap between two layers of metal is equal to

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

where Z_m is the impedance of the dielectric material between two layers of metal. Eventually, the total impedance of the structure (detector) is equal to

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

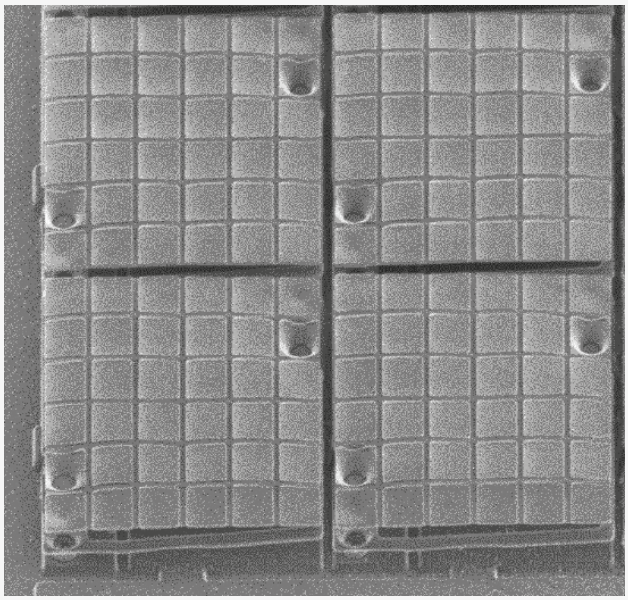


Рис. 2. *Электронно-микроскопическая фотография фрагмента матрицы ТГц микроболометрических элементов с поглотителем на основе метаматериалов [15]*

Fig. 2. *Electron microscopic photograph of a fragment of a matrix of THz microbolometric elements with an absorber based on metamaterials [15]*

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 плотности (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 [19]. 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 Ом·см, при этом ρ = 0,5 Ом·см является оптимальными для изготовления поглотителей [20]. На основе этой технологии фирма INO (Канада) производит широполосные терагерцевые матричные болометрические приемники. Изображение пикселов такой матрицы показаны на рис. 4 [19]. Такая технология, помимо процесса нанесения черного золота, содержит еще один нестандартный этап производства, а именно: лазерное разрезание слоев черного золота на пикселы. Тем не менее в Канаде поставлено производство терагерцевых камер форматом 384×288 пикселов с размером пиксела 35 мкм. Минимальная детектируемая мощность камеры составляет 11–34 пВт/пиксел в диапазоне от 4,25 до 0,198 ТГц, что, учитывая время интегрирования сигнала, равное 40 мкс, при пересчете на полосу частот равную 1 Гц дает мощность, эквивалентную шуму (NEP) от 0,11 до 0,32 пВт/Гц$^{1/2}$ [21]. Это означает, что «пальма первенства» среди неохлаждаемых приемников терагерцевого излучения принадлежит микроболометрам.

Слои многостенных ВОУНТ так же, как и слои черного золота, имеют малую плотность (20–30 мг/см^3 [22]) 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 [23, 24]. В настоящее время температура роста ВОУНТ составляет 750–850 °С, что не позволяет их выращивать на болометрах, изготовленных на кремниевых мультиплексорах. Однако были продемонстрированы линейки микроболометров с размером мембраны 100×100 мкм, на которых был выращен слой ВОУНТ толщиной 22 мкм (см. рис. 5). При этом в качестве термочувствительного слоя использовался оксид ванадия, наносимый на мембрану до выращивания нанотубок. В процессе выращивания слоя ВОУНТ темпера-

In resonance, when $(1-\omega^2 LC)/\omega C - Z_m \tanh(kd) = 0$, for wavelengths that are much greater than the thickness of the dielectric layer d, we obtain that the supposed component of the impedance Z_D is close to zero, and the value of the resistance R, at which the real component of the impedance of the structure will be equal to the impedance of the vacuum Z_v, should meet the condition

$$R = \frac{z_m^2 \tanh(kd)^2}{z_v}.$$

Figure 2 shows a fragment of a matrix of two-level microbolometers with a THz absorber based on

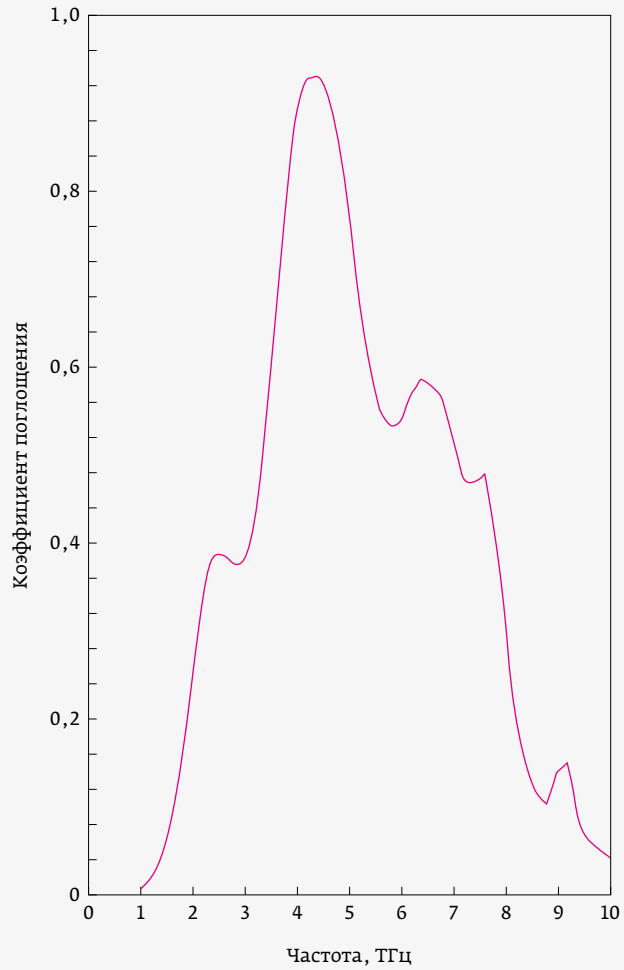


Рис. 3. *Спектральная зависимость коэффициента поглощения микроболометрического приемника с поглотителем на основе метаматериала [15]*

Fig. 3. *Spectral dependence of the absorption coefficient of a microbolometric receiver with an absorber based on a metamaterial [15]*

турный коэффициент сопротивления VOx понижался от исходного значения −3 %/K до −1,2 %/K, что все еще значительно больше ТКС металлов (≈0,3 %/K).

ДЕТЕКТОРЫ С ГЕТЕРОДИННЫМ ОБНАРУЖЕНИЕМ

В гетеродинных детекторах сигналы с ТГц- или суб-ТГц-частотами преобразуются в сигналы с более низкими промежуточными частотами (IF), предоставляя информацию об амплитуде и фазе входного излучения. На протяжении нескольких десятилетий такие детекторы применяются для высокоразрешающих спектроскопических исследований, космического дистанционного зондирования, а относительно недавно стали использоваться для формирования изображения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазоне.

Схема гетеродинного детектирования показана на рис. 6. Вдобавок к сигналу W_s и мощности фонового излучения W_B добавляется мощность излучения W_{LO} от локального осциллятора (например лазера или любого другого вида узкополосного источника излучения). Локальный осциллятор необходим для обеспечения процесса оптического смешивания. Основными элементами гетеродинных детекторов является смеситель, который необходим для смешивания W_s и W_{LO} и для генерации сигнала на промежуточной частоте $\nu_{IF} = \nu_s - \nu_{LO}$. Ключевым компонентом смесителя является нелинейный смешивающий элемент (детектор), в котором сигнальная мощность и мощность *LO* излучения взаимодействуют при использовании некоторого вида диплексера (фильтра, предназначенного для объединения сигналов различных диапазонов частот, который служит для объединения двух портов в один). При использовании миллиметровой или субмиллиметровой матрицы выбор смесителя определяется доступностью источника *LO* мощности в данном спектральном диапазоне, рабочей температурой смесителя и необходимой чувствительностью.

Расчеты предполагают, что *LO* импульсная мощность, требуемая для смесителей Шоттки, составляет 1 мВт, для смесителей

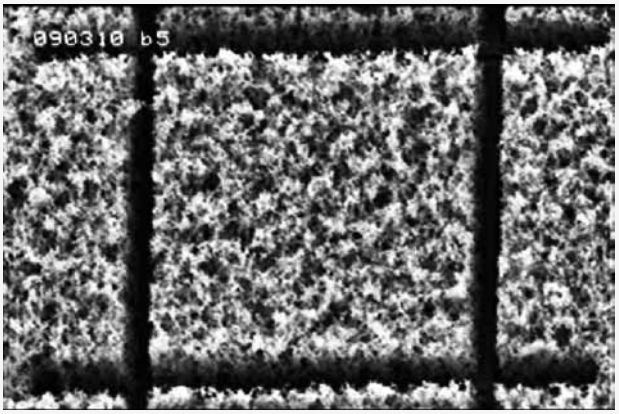
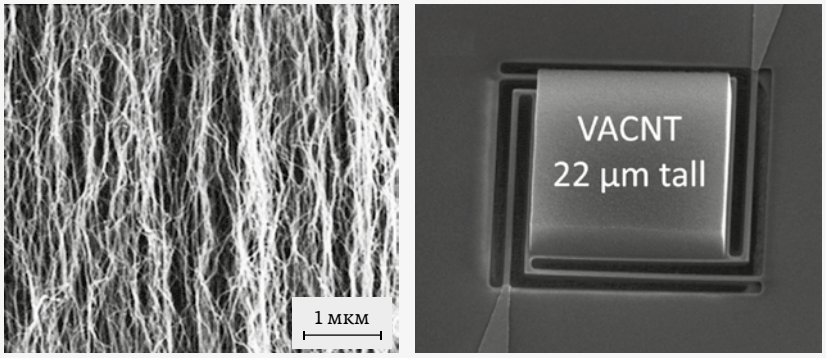


Рис. 4. *Микроболометр размером 52 мкм с поглотителем из черного золота толщиной 30 мкм [19]*

Fig. 4. *52-micron microbolometer with a black gold absorber 30 microns thick [19]*

a metamaterial. The matrix format is 384×288, the pixel size is 35 microns. The first level of the bolometer, raised 3 microns above the fully reflective mirror, contains both a thermosensitive element (VOx) and a terahertz absorber. The second level, suspended 2.3 microns above the first level, is an infrared filter consisting of an array of 6×6 squares reflecting IR radiation and transmitting terahertz radiation. Figure 3 shows the spectral dependence of the absorber based



a) b)

Рис. 5. *Изображения, сделанные с помощью сканирующего электронного микроскопа: массив ВОУНТ [25] (a), микроболометр с размером мембраны 100×100 мкм, на которой выращен слой ВОУНТ толщиной 22 мкм [24] (b)*

Fig. 5. *Images taken with a scanning electron microscope: VACNTs array [25] (a), microbolometer with a membrane size of 100×100 microns, on which a 22 microns thick layer of VACNTs is grown [24](b)*

сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник (SIS) – 40 мкВт и для смесителей на основе болометров с горячими электронами (HEB) – 2 мкВт. Предполагались потери связи локального осциллятора, равные 3 дБ [8]. Серьезная проблема, которая ограничивает применение гетеродинных матриц в субмиллиметровой (ТГц) спектральной области (то есть для приложений высокоразрешающей спектроскопии ($\nu/\Delta\nu \approx 10^6$, где ν – частота, $\Delta\nu$ – интервал частот), или фотометрии ($\nu/\Delta\nu \approx 3$–10) и для формирования изображений, лежит в технологических ограничениях твердотельного локального осциллятора (*LO*) мощности или гетеродина. Из-за значительного ослабления ТГц-волны не очень полезны для дальней связи, но вследствие сильного поглощения большинством материалов ТГц-излучение предоставляет информацию о физических свойствах материалов.

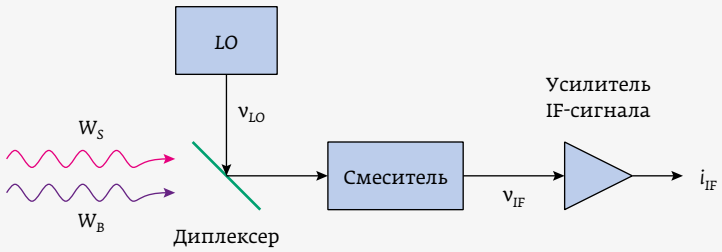


Рис. 6. *Упрощенное схематическое представление гетеродинного приемника. W_s – мощность сигнала с частотой n_s, W_B – мощность фонового излучения, W_{LO} – мощность излучения локального осциллятора с частотой n_{LO} и n_{IF} – промежуточная частота*

Fig. 6. *Simplified schematic representation of a heterodyne receiver. W_s – signal power with frequency n_s, W_B – background radiation power, W_{LO} – local oscillator radiation power with frequency n_{LO} and n_{IF} – intermediate frequency*

Основным преимуществом систем гетеродинного детектирования является то, что информация о частоте и фазе сигнала с частотой ν_s преобразуется в частоту ν_{IF}, которая находится в намного более низкочастотном диапазоне ($\nu_{IF} \ll \nu_s$), соответствующем времени отклика электроники. Это преобразование ($\nu_s \to \nu_{IF}$) называется гетеродинным переходом (конверсией). Если частоты сигнала и локального осциллятора равны между собой, тогда $\nu_{IF} = 0$ (т.е. вырождается в постоянный сигнал), то такой процесс детектирования называется гомодинным переходом.

Для эффективного преобразования и обеспечения низкого шума в миллиметровом и субмиллиметровом спектральных диапазонах может быть использовано только несколько типов детекторов в качестве смесителей. Часто используются приборы, имеющие сильную электрическую квадратичную нелинейность. Примерами являются прямо смещенные диоды (SBD), сверхпроводник-диэлектрик-сверхпроводник (SIS) с туннельным переходом, полупроводниковые и сверхпроводниковые болометры HEBs, сверхрешетки (SL). Схематические вольт-амперные характеристики таких приборов показаны на рис. 7.

Одновременно с разумной эффективностью преобразования и низким шумом эти нелинейные

on the metamaterial. It can be seen that a sufficiently high absorption coefficient (more than 90%) is realized at frequencies corresponding to wavelengths of about 70 microns.

Broadband bolometric receivers of the THz band are successfully developed using absorbers based on black gold and vertically aligned carbon nanotubes (VACNTs). Gold deposited in nitrogen is of a very loose structure consisting of random chains of nanoparticles of gold. It has a very low density (up to 65 mg/cm^3), which makes it possible to make broadband absorbers from thick (30–50 microns) layers of black gold, without having to increase the mass and heat capacity of the sensitive bolometer membrane significantly [19]. A layer of black gold with a thickness of 30 microns is equivalent in weight and heat capacity to a solid layer of gold with a thickness of 100 nm. The layers of black gold are characterized by a resistivity ρ from 0.1 to 25 ohms·cm, while $\rho = 0.5$ ohms·cm is optimal for the manufacture of absorbers [20]. Based on this technology, INO (Canada) produces wide-band terahertz matrix bolometric receivers. The image of the pixels of such a matrix is shown in Fig. 4 [19]. This technology, in addition to the process of applying black gold, contains another non-standard stage of production – namely, laser cutting of layers of black gold into pixels. Nevertheless, in Canada, the production of terahertz cameras in the format of 384×288 pixels, with a pixel size of 35 microns, has been introduced. The minimum detectable power of the camera is 11–34 pW/pixel

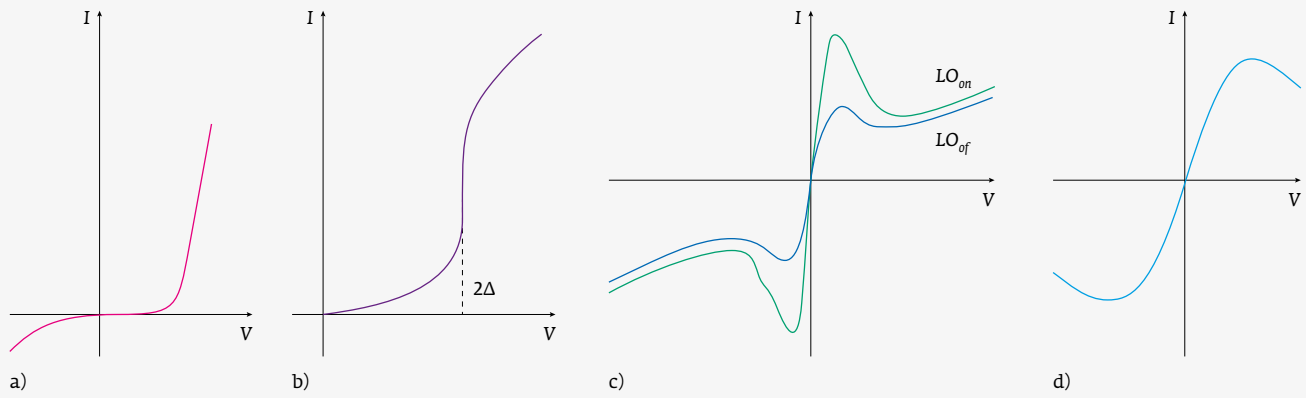


Рис. 7. *Схематические вольт-амперные характеристики нелинейных элементов, на которых основаны ТГц- гетеродинные приемники: a) диод Шоттки, b) SIS, c) HEB, и d) SL [26]*

Fig. 7. *Schematic volt-ampere characteristics of nonlinear elements on which THz-heterodyne receivers are based: a) Schottky diode, b) SIS, c) HEB, and d) SL [26]*

приборы должны обладать высокой операционной скоростью преобразования для обеспечения широкой полосы для последующего усиления сигналов при намного более низких частотах ($f \approx 1$–30 ГГц).

При большой *LO* мощности W_{LO} можно детектировать относительно малую мощность сигнала W_s. Когда такое условие соблюдается (при $W_{LO} \gg W_s$), квантовый шум в сигнальном потоке может быть доминирующим шумом и для внутреннего усиления сигнала $G=1$ для не фотопроводящих детекторов при отношении сигнала к шуму $S/N=1$, следует:

$$W_{s,\text{het}}^{\min} = \frac{h\nu}{\eta}\Delta f,$$

а для минимальной обнаруживаемой энергии имеем $E_{s,\text{het}}^{\min} = \frac{h\nu}{\eta}$. Для эффективности связи $\eta=1$ это означает квантовый предел обнаружения сигнала. Так как при этом энергия одного фотона, принимаемая не фотопроводящим детектором, трансформируется в кинетическую энергию одного электрона, который затем пересекает барьер.

Для гетеродинного детектирования может быть показано, что NEP равно (BLIP режим):

$$\text{NEP} = \frac{W_{s,\text{het}}^{\min}}{\Delta f} = \frac{h\nu}{\eta}.$$

Заметим, что для гетеродинного детектирования единицами измерения NEP являются Вт/Гц вместо Вт/Гц^{0,5}, как для прямого детектирования.

in the range from 4.25 to 0.198 THz, which, taking into account the signal integration time equal to 40 microseconds, when converted to a frequency band equal to 1 Hz, gives a power equivalent to noise (NEP) from 0.11 to 0.32 pW/Hz$^{1/2}$ [21]. This means that microbolometers bear the palm among uncooled terahertz radiation receivers.

The layers of multi-walled VACNTs, as well as the layers of black gold, have a low density (20–30 mg/cm^3 [22]) and can be grown with a thickness of 50–100 microns or more, which provides almost complete absorption of the its radiation incident from 0.3 to 500 microns [23,24]. Currently, the growth temperature of VACNTs is 750–850 °C, which does not allow them to be grown on bolometers that are manufactured using silicon multiplexers. However, lines of microbolometers with a membrane size of 100×100 microns were demonstrated, on which a 22 microns thick layer of VONT was grown (see Fig. 5). In so doing, vanadium oxide was used as a heat-sensitive layer, applied to the membrane before the nanotubes were grown. During the growth of the VACNTs layer, the temperature coefficient of resistance VOx decreased from the initial value of –3 %/K to –1.2 %/K, which is still significantly higher than the temperature coefficient of resistance of metals (≈0.3 %/K).

DETECTORS WITH HETERODYNE DETECTION

In heterodyne detectors, signals with THz or sub-THz frequencies are converted into signals with lower

Чувствительность гетеродинных детекторов часто дается в терминах температуры шума смесителя T_{mix}, которая коррелирует с эквивалентной мощностью шума смесителя:

$$NEP_{mix} = k_B T_{mix}.$$

Для спектральной зоны $\lambda \approx 3$ мм ($\nu \approx 100$ ГГц), где есть окно прозрачности атмосферы, значение $T_s^{min} = \frac{E_{s,het}^{min}}{k_B} = \frac{h\nu}{k_B} = 4{,}8$ K является фундаментальным пределом шумовой температуры, введенным принципом неопределенности любых одновременных измерений амплитуды и фазы электромагнитной волны.

Предельные значения шумовой температуры гетеродинных ТГц-детекторов часто сравнивают, используя значения T_s^{min}. Поскольку гетеродинные детекторы измеряют как амплитуду, так и фазу одновременно, они регулируются принципом неопределенности и, следовательно, они ограничены квантовым шумом при абсолютном уровне шума 48 К/ТГц.

СРАВНЕНИЕ ГЕТЕРОДИННОГО И ПРЯМОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

Гетеродинное детектирование предлагает высокое спектральное разрешение $\nu/\Delta\nu \approx 10^5$–$10^6$. Очень высокое спектральное разрешение возможно, пока $\nu_{IF} \ll \nu$. Но для гетеродинных систем, особенно для SBD-приемников в ТГц-области, критическим компонентом является локальный осциллятор.

В то же время детекторы с прямым детектированием, как правило, действуют в широком спектральном диапазоне, и, когда фотонный фон низок, могут обеспечивать достаточно высокое разрешение. Они предпочтительнее для умеренного спектрального разрешения $\nu/\Delta\nu \approx 10^3$–$10^4$ или ниже, а также для формирования изображений. Детекторы с прямым детектированием могут использоваться в таких применениях, где чувствительность более важна, чем спектральное разрешение.

Иметь ограниченную фоном матрицу детекторов важно с точки зрения исключения, например фонового шума неба, учитывая, что любая пространственно коррелированная компонента этого шума, детектируемая во всех сенсорах в матрице, может быть существенно подавлена. Среди детекторов с прямым детектированием, низкотемпературные болометры обычно обеспечивают наивысшую чувствительность

intermediate frequencies (IF), providing information about the amplitude and phase of the input radiation. For several decades, such detectors have been used for high-resolution spectroscopic studies, space remote sensing, and relatively recently they have been used to form images in the millimeter and sub-millimeter range.

The diagram of heterodyne detection is shown in Fig. 6. In addition to the W_s signal and the background radiation power W_B, the radiation power W_{LO} is added from a local oscillator (for example, a laser or any other type of narrow-band radiation source). A local oscillator is required to ensure the optical mixing process. The main elements of millimeter or sub-millimeter heterodyne detectors are a mixer, which is necessary for mixing W_s and W_{LO} and for generating a signal at an intermediate frequency $\nu_{IF} = \nu_s - \nu_{LO}$. The key component of the mixer is a nonlinear mixing element (detector), in which the signal power and the *LO* radiation power interact when using some kind of diplexer (a filter designed to combine signals of different frequency ranges, which serves to combine two ports into one). When using a millimeter or sub-millimeter matrix, the choice of mixer is determined by the availability of a *LO* power source in a given spectral range, the operating temperature of the mixer, and the desired sensitivity.

Calculations assume that the *LO* pulse power required for Schottky mixers is 1 MW, for superconductor-insulator-superconductor (SIS) mixers – 40 μW, and it is 2 μW for mixers based on hot-electron bolometers (HEB). The coupling losses of the local oscillator were assumed to be equal to 3 dB [8]. A serious problem that limits the application of the heterodyne matrices in the sub-millimeter (THz) spectral region (i.e., for applications of high-resolution spectroscopy ($\nu/\Delta\nu \approx 10^6$ where ν is the frequency, $\Delta\nu$ is the frequency interval), or photometry ($\nu/\Delta\nu \approx 3$–10) and for imaging lies in the technological limitations of the power of solid-state local oscillator (*LO*) or heterodyne oscillator. Due to the significant attenuation, THz waves are not very useful for long-distance communication, but due to the strong absorption of most materials, THz radiation provides information about the physical properties of materials.

The main advantage of heterodyne detection systems is that the information about the frequency and phase of the signal with frequency ν_s is converted into the frequency ν_{IF}, which is in a much lower frequency range ($\nu_{IF} \ll \nu_s$) corresponding to the response time of the electronics. This transformation is ($\nu_s \to \nu_{IF}$) called a heterodyne transition (conversion). If the frequen-

Таблица. Ограничения современных технологий с одним источником *LO*, действующим при 300 K и 120 K
Table. Limitations of state-of-the-art technologies with a single *LO* source operating at 300 K and 120 K

Выходная частота, ГГц Output frequency, GHz	Выходная мощность (опубликованные данные), мкВт Output power (public data), μW		Выходная мощность (возможная), мкВт Output (possible) power, μW		Число пикселов для различных смесителей Number of pixels for various mixers					
					Шоттки Schottky		SIS		HEB	
	300 K	120 K	300 K	120 K	300 K	120 K	300 K	120 K	300 K	120 K
800	1	2	2	4	2	4	25	50	400	800
1500	15	40	40	80	–		1	2	20	40
1800	3	20	10	50	–	–	–	–	5	25
2400	–	–	2	5	–	–	–	–	1	2

от дальнего инфракрасного до миллиметрового диапазона электромагнитного спектра, обеспечивая ограниченные фоном характеристики с NEP $\approx (0{,}4–3)\cdot 10^{-19}$ Вт/Гц^{0,5} при рабочей температуре 100–300 мК. В условиях микроволнового фона (CMB) использовались системы когерентных детекторов и некогерентные болометрические системы. Для космических экспериментов наземного базирования применимыми являются оба типа детекторов.

По сравнению с прямым детектированием, гетеродинное детектирование обладает преимуществами и недостатками. Преимущества гетеродинного детектирования заключаются в следующем:

- оно может детектировать частотную модуляцию и фазовую модуляцию;
- доминирующий шум следует из флуктуаций мощности гетеродина W_{LO}, и он более вероятен, чем шум фонового излучения, таким образом, обеспечивается избирательность, например против фонового потока и т. д.;
- процесс преобразования частоты *IF* обеспечивает усиление так, что выходной сигнал *IF* детектора может быть сделан больше, чем, например, тепловой и генерационно-рекомбинационный шум;
- усиление преобразования пропорционально W_{LO}/W_s и, таким образом, намного меньшая мощность сигнала излучения может быть обнаружена по сравнению с прямым детектированием.

cies of the signal and the local oscillator are equal to each other, then $\nu_{IF}=0$ (i. e. degenerates into a constant signal), then such a detection process is identified as a homodyne transition.

For efficient conversion and ensuring low noise in the millimeter and sub-millimeter spectral ranges, only a few types of detectors can be used as mixers. Devices with strong electrical quadratic nonlinearity are often used. Examples are directly biased diodes (SBD), superconductor-insulator-superconductor (SIS) with tunnel junction, semiconductor and superconducting HEBs, and superlattices (SL). Schematic volt-ampere characteristics of such devices are shown in Figure 7.

Together with reasonable conversion efficiency and low noise, these nonlinear devices should have a high operational conversion rate so that they can provide a wide bandwidth for subsequent signal amplification at much lower frequencies ($f \approx 1–30$).

With a large *LO* power W_{LO}, a relatively small W_s signal power can be detected. When this condition is met (at $W_{LO} \gg W_s$), the quantum noise in the signal stream can be the dominant noise, as well as for internal signal amplification $G=1$ for non-photoconductive detectors with a signal-to-noise ratio $S/N=1$, it follows that

$$W_{s,\mathrm{het}}^{\min} = \frac{h\nu}{\eta}\Delta f,$$

for the minimum detectable energy, we have $E_{s,\mathrm{het}}^{\min} = \frac{h\nu}{\eta}$. For communication efficiency $\eta=1$, this

Недостатками гетеродинного детектирования являются:

- оба пучка должны совпадать и быть равными по диаметру, и также их векторы Пойтинга должны совпадать;
- волновые фронты обоих пучков должны иметь одинаковые радиусы кривизны и иметь похожие структуры поперечных пространственных мод, поэтому они должны быть поляризованы в одном направлении;
- трудности в производстве матриц большого формата.

Системы когерентного детектирования (с SIS или SBD-смесителями), как правило, ограничены в детектировании сигналами с частотами, превышающими 1 ТГц. Гетеродинные HEB-смесители и детекторы прямого детектирования на основе сенсоров, действующих вблизи края перехода в сверхпроводящее состояние (TES), почти не имеют практических ограничений в применении в коротковолновом субмиллиметровом диапазоне [27].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящий прогресс в технологии ТГц-детекторов обеспечивается решением технологических проблем, новыми физическими концепциями и явлениями, а также многообещающими приложениями. Характеристики нескольких типов дискретных детекторов и малоформатных матриц, действующих при низких или субкельвиновских температурах (например SIS, HEB, TES и болометры на холодных электронах (CEB)) близки к предельным характеристикам при низком уровне фона. Они охватывают весь ТГц-диапазон. Однако будущее улучшение чувствительности будет обеспечиваться использованием крупноформатных матриц со считыванием в фокальной плоскости для обеспечения высокоразрешающей спектроскопии ($\nu/\Delta\nu \approx 10^7$) и регистрацииприи частотах, превышающих 1 ТГц. Сверхпроводящие HEB-детекторы характеризуются хорошими темновыми характеристиками, высокой скоростью счета, и они также перспективны как счетчики отдельных фотонов в широком ИК-спектральном диапазоне. Сомнительно, что сверхпроводящие HEBs, действующие при высоких температурах, достигнут чувствительности низкотемпературных сверхпроводящих HEBs из-за избыточного шума, но вследствие короткого времени электрон-фононной релаксации эти материалы являются перспективными для широкополосных приборов.

means the quantum limit of signal detection. Since, in this case, the energy of one photon received by a non-photoconductive detector is transformed into the kinetic energy of one electron, which then crosses the barrier.

For heterodyne detection, it can be shown that NEP is equal to (BLIP mode):

$$\mathrm{NEP} = \frac{W_{s,\mathrm{het}}^{\min}}{\Delta f} = \frac{h\nu}{\eta}.$$

It should be noted that for heterodyne detection, the units of measurement of NEP are W/Hz instead of $\mathrm{W/Hz^{0.5}}$, as for direct detection.

The sensitivity of heterodyne detectors is often given in terms of the mixer noise temperature T_{mix}, which correlates with the equivalent mixer noise power:

$$\mathrm{NEP}_{\mathrm{mix}} = k_B T_{\mathrm{mix}}.$$

For the spectral zone of $\lambda \approx 3$ mm ($\nu \approx 100$ GHz), where there is an atmospheric transparency window, the value $T_s^{\min} = \frac{E_{s,\mathrm{het}}^{\min}}{k_B} = \frac{h\nu}{k_B} = 4{,}8$ K is the fundamental limit of the noise temperature introduced by the uncertainty principle of any simultaneous measurements of the amplitude and phase of an electromagnetic wave.

The limit values of the noise temperature of heterodyne THz detectors are often compared using values $T_s^{\min}$. Since heterodyne detectors measure both amplitude and phase, they are regulated by the uncertainty principle concurrently and therefore they are limited by quantum noise at an absolute noise level of 48 K/THz.

COMPARISON OF HETERODYNE DETECTION AND DIRECT DETECTION

Heterodyne detection offers high spectral resolution $\nu/\Delta\nu \approx 10^5$–$10^6$. Very high spectral resolution is possible as long as $\nu_{IF} \ll \nu$. But for heterodyne systems, especially for SBD receivers in the THz region, the local oscillator is a critical component.

At the same time, detectors with direct detection, as a rule, operate in a wide spectral range, and when the photon background is low, they can provide a sufficiently high resolution. They are preferable for moderate spectral resolution $\nu/\Delta\nu \approx 10^3$–$10^4$ or lower, as well as for image formation. Direct detection detectors can be used in applications where sensitivity is more important than spectral resolution.

Одной из важных компонент ТГц-технологии являются неохлаждаемые или слегка охлаждаемые ТГц-сенсоры, требующие дальнейшего улучшения чувствительности, которое сделает системы менее сложными и громоздкими. В большинстве миллиметровых и субмиллиметровых спектрометров со средним разрешением часто используются неохлаждаемые детекторы, действующие в широкой полосе частот. Преимущества неохлаждаемых детекторов заключаются в относительной простоте схемы, а также в их способности действовать при комнатной температуре в широкой полосе частот. Их NEP находится в диапазоне 10^{-9}–10^{-11} Вт/Гц^{0,5}. Представляют интерес и исследования, направленные на создание новых разработок терагерцевых детекторов, например на основе низкоразмерных структур из HgCdTe, на основе PbSnTe: In, на основе квантовых колец и квантовых точек Ge/Si [27]. Неохлаждаемые или слегка охлаждаемые сенсоры на основе, например плазмонного резонанса 2D-электронов в HEMTs перспективны для использования в крупноформатных матрицах в системах с низкой стоимостью. Другие разработанные или разрабатываемые неохлаждаемые ТГц- тепловые детекторы прямого обнаружения с NEP≈10^{-10}–10^{-11} Вт/Гц^{0,5} могут быть использованы во многих низкоразрешающих спектроскопических применениях и системах активного наблюдения.

REFERENCES

1. **Oda N.** Technology trend in real-time, uncooled image sensors for sub-THz and THz wave detection. *Proc. SPIE*. 2016;9836:98362P
2. **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; 372(2012):20130111.

Having a background-limited detector array is important from the point of view of excluding, for example, background sky noise, given that any spatially correlated component of this noise detected in all sensors in the matrix can be significantly suppressed. Among detectors with direct detection, low-temperature bolometers usually provide the highest sensitivity from the far-infrared to the millimeter range of the electromagnetic spectrum, providing background-limited characteristics with NEP≈$(0.4–3)\cdot10^{-19}$ W/Hz$^{0.5}$ at an operating temperature of 100–300 mK. Coherent detector systems and incoherent bolometric systems were used in the cosmic microwave background (CMB) conditions. Both types of detectors can be applied for ground-based space experiments.

Compared to direct detection, heterodyne detection has its advantages and disadvantages. The advantages of heterodyne detection are as follows:

- it can detect frequency modulation and phase modulation;
- the dominant noise follows from fluctuations in the power of the heterodyne W_{LO} and it is more likely than background radiation noise, thus selectivity is ensured, for example, against background flux, etc.;
- the *IF* frequency conversion process provides amplification so that the output signal of the *IF* detector can be made greater than, for example, thermal and generation-recombination noise;
- the gain of the conversion is proportional to W_{LO}/W_s and thus a much lower power of the radiation signal can be detected compared to direct detection.

The disadvantages of heterodyne detection are:

3. **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; 36(10): 961–985.
4. **Oda N.** Détecteur matriciel de type bolométrique à température ambiante et camera vidéo pour l'imagerie terahertz. *Comptes Rendus Phys. Elsevier Masson SAS*. 2010; 11 (7–8): 496–509.
5. **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; 6(2): 175–182.
6. **Oulachgar H. et al.** Optimization of design and microfabrication of metamaterial-based absorber for terahertz microbolometer. 2014. 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz). IEEE. 2014.
7. **Proulx C. et al.** The EarthCARE broadband radiometer detectors. *Infrared Spaceborne Remote Sensing and Instrumentation XVII* / ed. Strojnik M. 2009. P. 74530S.
8. **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.
9. **Tomlin N. A. et al.** Overview of microfabricated bolometers with vertically aligned carbon nanotube absorbers. *AIP Adv. AIP Publishing. LLC*. 2020; 10(5): 055010.
10. **F. Simoens, J. Meilhan, J.-A. Nicolas.** 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.
11. **Oda N., Seiji Kurashina, Masaru Miyoshi, Kohei Doi, Tsutomu Ishi, Takayuki Sudou, Takao Morimoto, Hideki Goto, Tokuhito Sasaki.** Microbolometer Terahertz Focal Plane Array and Camera with Improved Sensitivity in the Sub-Terahertz Region. *J. Infrared, Millimeter, Terahertz Waves*. 2015; 36(10): 947–960.
12. **Oda N.** Technology Trend in Real-time, Uncooled Image Sensors for sub-THz and THz Wave Detection. *Proc. SPIE*. 2016; 9836:98362P.
13. **Oda Naoki, Sano Masahiko, Ken'ichi Sonoda et al.** Development of Terahertz focal plane arrays and handy camera. *Proc. SPIE 8012. Infrared Technology and Applications XXXVII* / ed. by B. F. Andresen, G. F. Fulop, P. R. Norton. 2011; 80121B.
14. **M. A. Dem'yanenko, I. V. Marchishin, V. V. Startsev.** Absorption of terahertz radiation by a thin metal absorber in conventional and inverted bolometers. *OSA CONTINUUM*. 2019; 2(6):2085–2097.
15. **H. Oulachgar, P. Mauskopf, M. Bolduc, S. Ilias, J-E. Paultre, D. D'Amato, M. Terroux, T. Pope, C. Alain, P. Topart, H. Jerominek.** Design and microfabrication of frequency selective uncooled microbolometer focal plane array for terahertz imaging. *Proc. of 38th conference of IRMMW-THz*. – Mainz-Germany. 2013.
16. **H. Oulachgar, J.-E. Paultre, F. Provençal, D. D'Amato, P. Beaupré, C. Alain, H. Jerominek.** Optimization of design and microfabrication of metamaterial-based absorbers for terahertz microbolometers. *Proc. of 39th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, IRMMW-THz*. 2014.
17. **H. Oulachgar, L. E. Marchese, M. Terroux, S. Ilias, J.-E. Paultre, D. D'Amato, B. Tremblay, Patrick Beaupré Francis Provençal, C. Alain, P. Topart, F. Généreux, H. Jerominek, A. Bergeron.** 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.
18. **F. Costa, A. Monorchio, and G. Manara.** Analysis and design of ultra thin electromagnetic absorbers comprising resistively loaded high impedance surfaces. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2010;58(5):1551–1558.
19. **C. Proulx, F. Williamson, M. Allard, G. Baldenberger, D. Gay, S. Garcia-Blanco, P. Côté, L. Martin, C. Larouche, S. Ilias, T. Pope, M. Caldwell, K. Ward, J. Delderfield.** The Earth CARE broadband radiometer detectors. *Proc. of SPIE*. 2009;7453:74530S. doi: 10.1117/12.829935.
20. **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.
21. **M. Terroux, P. Talbot, F. Généreux, L. Marchese, E.-H. Oulachgar, A. Bergeron.** NEP characterization and analysis method for THz imaging devices. *Proc. of SPIE*. 2021; 11745:117450L. https://doi.org/10.1117/12.2586094.
22. **A. Okamoto, I. Gunjishima, T. Inoue, M. Akoshima, H. Miyagawa, T. Nakano, T. Baba, M. Tanemura, G. Oomi.** Thermal and electrical conduction properties of vertically aligned carbon nanotubes produced by water-assisted chemical vapor deposition. *Carbon N. Y.* 2011; 49 (1): 294–298.
23. **C. S. Yung, N. A. Tomlin, C. Straatsma, J. Rutkowski, E. C. Richard, D. M. Harber, J. H. Lehman, M. S. Stephens.** BABAR: black array of broadband absolute radiometers for far infrared sensing. *Proc. of SPIE*. 2019; 10980:109800.

- both beams should coincide and be equal in diameter, and also their Pointing vectors should coincide;
- the wavefronts of both beams should have the same radii of curvature and have similar structures of transverse spatial modes, therefore they should be polarized in the same direction;
- difficulties in the production of large format matrices.

Coherent detection systems (with SIS or SBD mixers), as a rule, are limited in detecting signals with frequencies that exceed 1 THz. Heterodyne HEB mixers and direct detection detectors based on sensors that operate near the edge of the transition to the superconducting state (TES) have almost no practical limitations in use in the short-wave sub-millimetre range [27].

CONCLUSION

The real progress in the technology of THz detectors is provided by the solution of technological problems, new physical concepts and phenomena, as well as promising applications. The characteristics of several types of discrete detectors and small-format matrices operating at low or sub-Kelvin temperatures (for example, SIS, HEB, TES and cold electron bolometers (CEB)) are close to the limiting characteristics at a low background level. They cover the entire THz range. However, future sensitivity improvement will be provided by the use of large-format matrices with reading in the focal plane to provide high-resolution spectroscopy ($\nu/\Delta\nu \approx 10^7$) and recording at frequencies that exceed 1 THz. Superconducting HEB detectors are characterized by good background response characteristics, high counting speed and they are also promising as counters of individual photons in a wide IR spectral range. It is doubtful that superconducting HEBs operating at high temperatures will achieve the sensitivity of low-temperature superconducting HEBs due to excessive noise, but due to the short electron-phonon relaxation time, these materials are promising for broadband devices.

One of the important components of THz technology are uncooled or slightly cooled THz sensors, which require further sensitivity improvement that will make systems less complex and cumbersome. Most millimeter and submillimeter spectrometers with medium resolution often employ uncooled detectors operating in a wide frequency band. The advantages of uncooled detectors are the relative simplicity of the circuit, as well as their ability to operate at room temperature in a wide frequency band. Their NEP is in the range of 10^{-9}–10^{-11} W/Hz$^{0.5}$.

24. **N. A. Tomlin, C. S. Yung, Z. Castleman, M. Denoual, G. Drake, N. Farber, D. Harber, K. Heuerman, G. Kopp, H. Passe, E. Richard, J. Rutkowski, J. Sprunck, M. Stephens, C. Straatsma, S. Van Dreser, I. Vayshenker, M. G. White, S. I. Woods, W. Zheng, J. H. Lehman.** Overview of microfabricated bolometers with vertically aligned carbon nanotube absorbers. *AIP Adv. AIP Publishing. LLC.* 2020; 10(5): 055010.
25. **D. Xiao, M. Zhu, L. Sun, C. Zhao, Y. Wang, E. H. T. Teo, F. Hu, L. Tu.** Flexible ultra-wideband terahertz absorber based on vertically aligned carbon. *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 2019;11:43671–43680,
26. **A. V. Vojcekhovskij, S. N. Nesmelov, N. A. Kul'chickij, A. A. Mel'nikov, P. P. Mal'cev.** Tipy detektorov teragercovogo izlucheniya. *NANO- I MIKROSISTEMNAYA TEKHNIKA.* 2012; 3: 25–34.
А. В. Войцеховский, С. Н. Несмелов, Н. А. Кульчицкий, А. А. Мельников, П. П. Мальцев. Типы детекторов терагерцевого излучения. *НАНО- И МИКРОСИСТЕМНАЯ ТЕХНИКА.* 2012; 3: 25–34.
27. **F Sizov.** Terahertz radiation detectors: the state-of-the-art. *Semicond. Sci. Technol.* 2018;33:123001 (26pp). https://doi.org/10.1088/1361–6641/aae473.

АВТОРЫ

Наумов А. В., руководитель направления, Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», г. Лыткарино, Московская обл., Россия.
ORCID: 0000-0001-6081-8304

Старцев В. В., к. т. н. главный конструктор, Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», г. Лыткарино, Московская обл., Россия.
ORCID: 0000-0002-2800-544X

Кульчицкий Н. А., д. т.н,, заместитель начальника управления, Государственный научный центр РФ, Акционерное общество «Научно-производственное объединение «Орион»; проф. МИРЭА-Российский технологический университет, (РТУ МИРЭА), Москва, Россия.
ORCID: 0000-0003-4664-4891

Демьяненко М. А., старший научный сотрудник, к. ф.- м. н., Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия.
ORCID: 0000-0002-8840-9446

Of interest are also studies aimed at creating new developments of terahertz detectors, for example, based on low-dimensional structures from HgCdTe, based on PbSnTe: In, based on quantum rings and Ge/Si quantum dots [27].

Uncooled or slightly cooled sensors based, for example, on the plasmonic resonance of 2D electrons in HEMTs are promising for use in large-format matrices in low-cost systems. Other uncooled THz thermal direct detection detectors with NEP that are developed or under development ~10^{-10}–10^{-11} W/Hz$^{0.5}$ can be used in many low-resolution spectroscopic applications and active surveillance systems.

ABOUT AUTHORS

Naumov A. V., Head of the Research Area, Joint Stock Company "Optical and Mechanical Design Bureau Astron", Lytkarino, Moscow region, Russia.
ORCID: 0000-0001-6081-8304

Startsev V. V., Cand. of Sc.(Eng.), Chief Designer, Joint Stock Company "Optical and Mechanical Design Bureau Astron", Lytkarino, Moscow region, Russia.
ORCID: 0000-0002-2800-544X

Kulchitsky N. A., Dr. of Sc. (Eng.), Deputy Head of the Department, The State Scientific Center of the Russian Federation, Joint Stock Company "Scientific and Production Association "Orion", Prof. MIREA- Russian Technological University, (RTU MIREA), Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0003-4664-4891

Demyanenko M. A., Cand. of Sc.(Phys&Math), Senior Researcher, Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of the SB RAS, Novosibirsk, Russia.
ORCID: 0000-0002-8840-9446