



Детектирование в терагерцевом диапазоне

Часть 1

Н. А. Кульчицкий^{1,2}, А. В. Наумов³, В. В. Старцев³,
М. А. Демьяненко⁴

¹ ГНЦ РФ, АО «НПО «Орион», Москва, Россия.

² МИРЭА – Российский технологический университет,
Москва, Россия.

³ АО «Опτικο-механическое конструкторское бюро
Астрон», Лыткарино, Московская обл., Россия.

⁴ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова
СО РАН, Новосибирск, Россия.

В работе обсуждаются проблемы, связанные с развитием технологии детекторов излучения терагерцевого диапазона. Рассмотрены основные физические явления и недавний прогресс в различных методах детектирования терагерцевого излучения (прямого детектирования и гетеродинного детектирования). Обсуждаются преимущества и недостатки сенсоров прямого детектирования и сенсоров с гетеродинным детектированием. В первой части рассмотрен ряд особенностей прямого детектирования и дано описание некоторых типов терагерцевых детекторов прямого обнаружения.

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

Статья получена: 15.12.2020
Принята к публикации: 10.01.2021

ВВЕДЕНИЕ

Терагерцевое (ТГц) излучение – это электромагнитное излучение, спектр частот которого расположен между ИК- и миллиметровым диапазонами. Границы между этими видами излучения в разных источниках определяются по-разному. В данной работе для определенности принимается, что ТГц-диапазон находится в пределах 0,1–10 ТГц (30 мкм–3 мм), частично перекрываясь со сред-

Detection in the Terahertz Range

Part 1

N. A. Kulchitsky^{1,2}, A. V. Naumov³, V. V. Startsev³,
M. A. Demyanenko⁴

¹ State Scientific Center of the Russian Federation, JSC
Scientific and Production Association “Orion”, Moscow,
Russia.

² MIREA – Russian Technological University, (RTU MIREA),
Moscow, Russia.

³ JSC “Optical and Mechanical Design Bureau Astrohn”,
Lytkarino, Moscow region, Russia.

⁴ A. V. Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics, SB of RAS,
Novosibirsk, Russia.

The paper discusses the problems associated with the development of technology for detectors of terahertz radiation. The main physical phenomena and recent progress in various methods of detecting terahertz radiation (direct detection and heterodyne detection) are considered. The advantages and disadvantages of direct detection sensors and sensors with heterodyne detection are discussed. In the first part, a number of features of direct detection are considered and a description of some types of terahertz detectors of direct detection is given.

Key words: terahertz radiation, direct, heterodyne detection, frequency band, sensitivity

Received on: 15.12.2020
Accepted on: 10.01.2021

INTRODUCTION

Terahertz (THz) radiation is electromagnetic radiation, the frequency spectrum of which is located between the infrared and millimeter ranges. The boundaries between these types of radiation are defined differently in different sources. In this work, for definiteness, it is assumed that the THz range is within 0.1–10 THz (30 μm – 3 mm), partially overlapping with the mid-infrared (2.5–50 μm) and millimeter (30–300 GHz, 1–10 mm) ranges, as well as including narrower sub-

ним инфракрасным (2,5–50 мкм) и миллиметровым (30–300 ГГц, 1–10 мм) диапазонами, а также включая в себя более узкие субмиллиметровый и субтерагерцевый диапазоны. Приборы, действующие в терагерцевом диапазоне, приобретают все большее значение в разнообразных приложениях (например в охранных, медицинских, для формирования изображений) [1, 2]. ТГц-волны являются эффективными в обнаружении присутствия воды и, таким образом, позволяют эффективно различать различные объекты на человеческих телах (содержание воды в человеческом организме составляет около 60%), поскольку одежды являются прозрачными. Краткое описание истории развития терагерцевых исследований дано, например, в [3]. На настоящий момент рынок терагерцевых применений только вышел из начальной фазы развития. Поэтому прогноз развития рынка терагерцевой техники (рис. 1) достаточно оценочный. Однако с уверенностью можно сказать, что рынок имеет огромные перспективы.

Известно, что приемники излучения можно поделить на класс фотонных (квантовых) фотоприемников, в которых энергия фотона преобразуется в некоторую первичную реакцию электронной системы фотоприемника и класс тепловых, в которых энергия фотонов преобразуется в тепло, а реакция фотоприемника возникает как следствие повышения температуры чувствительного элемента. 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. 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.

Все ТГц-системы обнаружения могут быть также подразделены на две группы: когерентные (гетеродинные) системы обнаружения и некогерентные (прямого детектирования) системы обнаружения [4]. Первые позволяют определять не только амплитуды сигналов, но также их фазы, что важно для увеличения объема информации, получаемой об объекте. Это позволяет также реализовать наивысшие характеристики чувствительности детектора и его спектрального разрешения. Когерентные системы обнаружения сигнала используют принцип гетеродинных схем, так как до сих пор для высоких частот излучения собственных усилителей не существует. Детектируемые сиг-

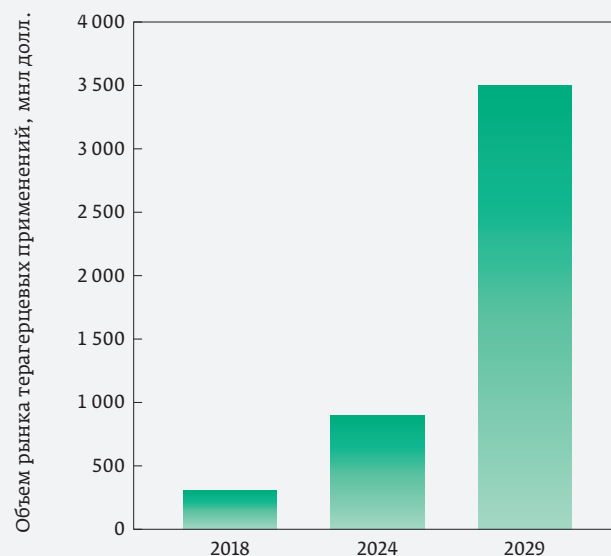


Рис. 1. Развитие и прогноз рынка терагерцевых компонентов и систем 2018–2029 годы (млн \$) (Источник – Variant Market research)

Fig. 1. Development and forecast of the terahertz components and systems market for 2018–2029 (\$ million) (Source – Variant Market research)

millimeter and subterahertz ranges. Devices operating in the terahertz range are becoming increasingly important in various applications (for example, in security, medical, for imaging) [1, 2]. THz waves are effective in detecting the presence of water, and thus, they can effectively distinguish various objects on human bodies (the water content in the human body is about 60%), since the garments are transparent. A brief description of the history of the development of terahertz research is given, for example, in [3]. At the moment, the market for terahertz applications has just left the initial phase of development. Therefore, the forecast for the development of the terahertz technology market (Fig. 1) is quite evaluative. However, we can say with confidence that the market has great prospects.

It is known that radiation detectors can be divided into a class of photonic (quantum) photodetectors, in which the photon energy is converted into a certain primary reaction of the electronic system of the photodetector, and a class of thermal ones, in which the photon energy is converted into heat, and the reaction of the photodetector arises as a result of an increase in the temperature of the sensitive element. The critical difference between detection in the THz range and



налы преобразуются в существенно более низкочастотные ($\nu \approx 1-30$ ГГц), которые затем усиливаются малошумящими усилителями. В основном эти системы являются селективными (узкополосными) системами обнаружения. некогерентные системы обнаружения позволяют определять только амплитуды сигналов и, как правило, являются широкополосными системами. Детекторы, используемые в этих двух системах обнаружения, сходны во многих случаях, но некоторые из них, например неохлаждаемые тепловые детекторы, предпочитают не использовать в когерентных системах из-за относительно большого времени отклика ($\tau \approx 10^{-7}$ с).

С точки зрения использования и областей применения важным является разделение приемников ТГц-излучения на два класса: 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/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при рабочей температуре $T=100-200$ мК [5]. Из-за высокой чувствительности такие сверхпроводящие детекторы предпочтительны в условиях низкого фонового потока фотонов и нашли применение, в частности, в астрономии. 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/ $\sqrt{\text{Гц}}$ на частоте 3 ТГц [13].

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 имеет размерность ватт. Это зачастую приводит к неоднозначности и путанице в литературе. Так, например, в работе [11] представлены разработанные канадской фирмой INO неохлаждаемые ТГц-болометры, характеризующиеся $\text{NEP}=24,7$ пВт (при частоте излучения 4,25 ТГц), измеренной в полосе частот $\Delta\nu=160$ кГц. В то время как в обзоре [12] эти же значения NEP приводятся с указанием размерности Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Во избежание

detection in the infrared range is the low energy of THz photons, which complicates the development of photon detectors of THz radiation. Currently, there is a wide variety of terahertz radiation sensors, both relatively traditional (for example, bolometers) and based on various principles and materials that have appeared recently.

All THz detection systems can also be subdivided into two groups, coherent (heterodyne) detection systems and incoherent (direct detection) detection systems [4]. The former make it possible to determine not only the amplitudes of the signals, but also their phases, which is important for increasing the amount of information received about the object. This also makes it possible to realize the highest characteristics of the detector's sensitivity and spectral resolution. Coherent signal detection systems use the principle of heterodyne circuits, since up to now, for high frequencies of radiation, there are no own amplifiers. The detected signals are converted into significantly lower frequencies ($\nu \approx 1-30$ GHz), which are then amplified by low-noise amplifiers. Basically, these systems are selective (narrowband) detection systems. Incoherent detection systems only detect signal amplitudes and are generally broadband systems. The detectors used in these two detection systems are similar in many cases, but some of them, for example, uncooled thermal detectors, prefer not to be used in coherent systems due to their relatively long response time ($\tau \approx 10^{-7}$ s).

From the point of view of use and applications, it is important to divide THz radiation receivers into two classes: cooled and uncooled. The advantage of cooled (deeply cooled) detectors is their extremely high sensitivity, which is characterized by noise-equivalent power (NEP) $\sim 10^{-18}-10^{-20}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at an operating temperature of $T=100-200$ mK [5]. Due to their high sensitivity, such superconducting detectors are preferable in conditions of low background photon flux and have found applications, in particular, in astronomy. The advantages of uncooled detectors, in addition to their low cost and ease of use, are their suitability for the manufacture of large-format array detectors. The NEP of uncooled array microbolometric receivers of the THz range with a format of 320×240 can reach values of 40 pW or $2 \cdot 10^{-13}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at a frequency of 3 THz [13].

It should be noted that NEP is defined as the rms input signal power W_s required to provide a rms output signal (S) that is equal to the rms noise (N) measured in a 1 Hz bandwidth. However, sometimes noise in the full bandwidth ($\Delta\nu$) defined by a specific measurement circuit is used to determine NEP. In this case,

подобной путаницы мы здесь будем использовать термин пороговая или минимальная разрешимая мощность MDP (Minimum Detectable Power), если шум не приведен к полосе 1 Гц.

Целью настоящей работы является обзор современных терагерцевых приемников как квантовых, так и тепловых, наиболее широко применяемых либо для прямого, либо гетеродинного детектирования.

ДЕТЕКТОРЫ ПРЯМОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

Сенсоры с прямым детектированием подходят для применений, не требующих ультравысокого спектрального разрешения ($\nu/\Delta\nu \approx 10^6$), которое обеспечивается гетеродинными спектроскопическими системами. В отличие от гетеродинных систем детектирования для них не существует технических проблем формирования многоэлементных матриц, обусловленных необходимостью применения локального осциллятора (источника опорного излучения) большой мощности и детекторов с малым временем отклика ($\tau \approx 10^{-10}$ – 10^{-11} с). Поэтому детекторы, действующие при комнатной температуре с относительно большим временем отклика ($\tau \approx 10^{-2}$ – 10^{-3} с) и умеренной чувствительностью, могут быть использованы в системах прямого детектирования. Среди таких детекторов для формирования ТГц-изображений используются, например, ячейки Голя и пироэлектрические детекторы, болометры и микроболометры, которые используют антенны для связи излучения с малыми поглощающими областями. Значение NEP для неохлаждаемых детекторов обычно составляет от 10^{-12} до 10^{-9} Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ (табл. 1) [5].

NEP is in watts. This often leads to ambiguity and confusion in the literature. For example, in [11], uncooled THz bolometers developed by the Canadian company INO are presented, characterized by $\text{NEP}=24,7$ 24.7 pW (at a radiation frequency of 4.25 THz), measured in the frequency band $\Delta\nu=160$ kHz. While in the review [12], the same NEP values are given with the indication of the unit $\text{W}/\sqrt{\text{Hz}}$. To avoid such confusion, we will use the term minimum detectable power (MDP) here if the noise is not scaled to a 1 Hz bandwidth.

The aim of this work is to review modern terahertz detectors, both quantum and thermal, which are most widely used for either direct or heterodyne detection.

DIRECT DETECTION DETECTORS

Direct detection sensors are suitable for applications that do not require the ultra-high spectral resolution ($\nu/\Delta\nu \approx 10^6$) provided by heterodyne spectroscopic systems. Unlike heterodyne detection systems, for them there are no technical problems in the formation of multielement matrices due to the need to use a local oscillator (reference radiation source) of high power and detectors with a short response time ($\tau \approx 10^{-10}$ – 10^{-11} s). Therefore, detectors operating at room temperature with a relatively long response time ($\tau \approx 10^{-2}$ – 10^{-3} s) and moderate sensitivity can be used in direct detection systems. Among such detectors for forming THz images, for example, Goly cells and pyroelectric detectors, bolometers and microbolometers are used, which use antennas to couple radiation with small absorbing regions. The NEP value for uncooled detectors usually ranges from 10^{-12} to 10^{-9} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ (Table 1) [5].



Теплотелевизионный регистратор температуры тела

АСТРОН-ТТ2019

Предназначен для автоматизированного бесконтактного определения людей с повышенной температурой тела на пунктах пропуска и досмотра

АСТРОН
Оптико-механическое конструкторское бюро

140080, МО, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1;
тел.: +7 (495) 215-13-82;
v@astrohn.ru, www.astrohn.ru



Таблица 1. Параметры некоторых неохлаждаемых ТГц-детекторов

Table 1. Parameters of some uncooled THz detectors

Тип детектора Detector type	Частота модуляции, Гц Modulation frequency, Hz	Рабочая частота, ТГц Working frequency, THz	NEP (мощность, эквивалентная шуму), Вт/Гц ^{0.5} NEP (Noise-Equivalent Power), W/Hz ^{0.5}
Ячейка Голея Golay cell	≤20	≤30	10 ⁻⁹ –10 ⁻¹⁰
Пьезоэлектрические Piezoelectric	≤10 ²	≤30	(1–3)·10 ⁻⁹ (уменьшается с увеличением <i>n</i>) (decreases with increase of <i>n</i>)
Микроболометры Microbolometers	≤10 ²	≤30	10 ⁻¹² –2·10 ⁻¹³ (уменьшается с увеличением <i>n</i>) (decreases with increase of <i>n</i>)
Nb микроболометры Nb microbolometers	–	≤30	5·10 ⁻¹¹
Диоды Шоттки Schottky diodes	≤10 ¹⁰	≤10	≤10 ⁻¹⁰ (уменьшается на несколько порядков при увеличении <i>n</i> от 0,1 до 10 ТГц) (decreases by several orders of magnitude with increase of <i>n</i> 0.1 to 10 THz)
GaAs HEMT-детектор GaAs HEMT detector	≤2·10 ¹⁰	≤30	10 ⁻¹⁰ (зависит от длины затвора и напряжения на затворе) (depends on gate length and gate voltage)
Si MOSFET-детектор Si MOSFET detector	3·10 ⁴	0,645	3·10 ⁻¹⁰
HEB-детектор HEB detector	10 ⁸	0,03–2	4·10 ⁻¹⁰ (зависит от <i>n</i>) (depends on <i>n</i>)

HEMT – транзисторы с высокой подвижностью электронов | High Electron Mobility Transistor.

MOSFET – МОП полевые транзисторы | MOS field effect transistors.

HEB – полупроводниковый болометр на горячих электронах | Hot Electron Bolometer.

n – частота падающего излучения | frequency of incident radiation.

Также применяются различные виды охлаждаемых полупроводниковых детекторов (например болометры с горячими электронами на основе InSb и болометры на основе примесных Si и Ge) [4, 5] со временем отклика ($\tau \approx 10^{-6}$ – 10^{-8} с) и $NEP \approx 10^{-13}$ – $5 \cdot 10^{-17}$ Вт/√Гц при рабочей температуре $T < 4$ К. Болометры, охлаждаемые до $T \approx 100$ – 300 мК, обладают наибольшей чувствительностью среди других детекторов прямого действия в суб-мм и мм спектральных диапазонах, достигая NEP, ограниченной флуктуациями космического фонового излучения. Примесные фоторезисторы с прямым детектированием (например на основе Ge:Ga) чувствительны до длины волны около 400 мкм и могут быть объединены в матрицы. Их пороговая мощность может достигать $NEP \approx 5 \cdot 10^{-17}$ Вт/√Гц при $\lambda = 150$ мкм и рабочей температуре $T = 2$ К.

Схематическая диаграмма прямого детектирования показана на рис. 2. На детектор падает как сигнальное излучение с мощностью W_s , так и фоновое излучение с мощностью W_b . Фокусирующая оптика (линзы, зеркала и т. д.) используется

Various types of cooled semiconductor detectors are also used (for example, bolometers with hot electrons based on InSb and bolometers based on impurity Si and Ge) [4,5] with a response time ($\tau \approx 10^{-6}$ – 10^{-8} s) and $NEP \approx 10^{-13}$ – $5 \cdot 10^{-17}$ W/√Hz at an operating temperature $T < 4$ K. Bolometers cooled to $T \approx 100$ – 300 mK have the highest sensitivity among other direct-action detectors in the sub-mm and mm spectral ranges, reaching NEP limited by fluctuations in cosmic background radiation. Doped photoresistors with direct detection (for example, based on Ge:Ga) are sensitive up to a wavelength of about 400 μm and can be combined into matrices. Their threshold power can reach $NEP \approx 5 \cdot 10^{-17}$ W/√Hz at $\lambda = 150$ μm and operating temperature $T = 2$ K.

A schematic diagram of direct detection is shown in Fig. 2. Both the signal radiation with the power W_s and the background radiation with the power W_b are incident on the detector. Focusing optics (lenses, mirrors, etc.) are used to collect radiation from a large area and focus it on a detector. Often, an optical filter is located upstream of the detector to

для сбора излучения с большой площади и фокусировки ее на детектор. Часто оптический фильтр расположен до детектора для удаления фонового излучения в спектральном диапазоне длин волн, отличных от длины волны сигнала. Относительно малый электрический сигнал детектора усиливается и обрабатывается в дальнейшем.

Способность обнаруживать малые сигналы для детекторов с прямым детектированием ограничена непреодолимым шумом фоновых фотонов, который не становится малым даже для космического фона. Характеристики этих детекторов ограничены фоновым шумом по сравнению с гетеродинными детекторами, характеристики которых ограничены квантовым шумом. Как правило, пороговая мощность, регистрируемая детекторами с прямым обнаружением, больше, чем для гетеродинных, что обусловлено вкладом других шумов, присутствующих в самом детекторе, в элементах схемы и усилителях.

Преимуществом систем с прямым детектированием является относительная простота и возможность разработки крупноформатных матриц. Большинство систем формирования изображения использует прямое детектирование.

ТИПЫ ДЕТЕКТОРОВ

Сложность разработки терагерцевых устройств состоит в том, что при детектировании терагерцевого излучения перестают действовать некоторые принципы работы фотонных и электронных устройств. Терагерцевое излучение характеризуется малой энергией фотона (4 мэВ для излучения частотой 1 ТГц) и поэтому фотонные терагерцевые устройства с квантовыми переходами могут работать только при пониженных температурах. Предельная частота работы электронных устройств определяется временем пролета электрона в активной области прибора, которая, в свою очередь, зависит от скорости носителей. Для гетероструктур максимальная скорость пролета электронов активной области порядка несколько единиц 10^7 см/с, в то время как скорость плазменных волн в подзатворном канале транзистора на два порядка выше, что позволило разработать детекторы ТГц-излучения на основе полевых транзисторов.

Ячейка Голея

В классе тепловых приемников особого внимания заслуживает приемник Голея [6], превосходящий в 5-15 раз по предельной обнаружительной способности пироэлектрические и термопарные приемники (тоже работающие без криогенного

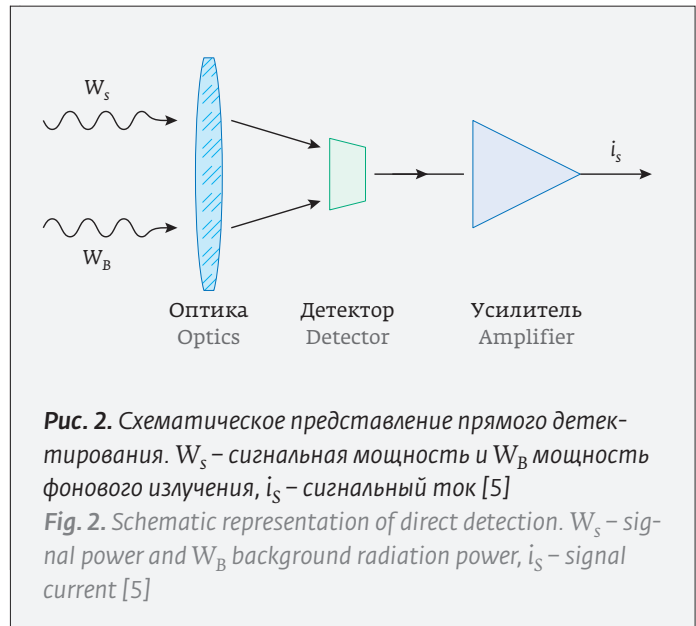


Рис. 2. Схематическое представление прямого детектирования. W_s – сигнальная мощность и W_B мощность фонового излучения, i_s – сигнальный ток [5]

Fig. 2. Schematic representation of direct detection. W_s – signal power and W_B background radiation power, i_s – signal current [5]

remove background radiation in the spectral range of wavelengths other than the signal wavelength. The relatively small electrical signal of the detector is amplified and further processed.

The ability to detect small signals for detectors with direct detection is limited by the insurmountable background photon noise that does not become small even for the cosmic background. The performance of these detectors is limited by background noise compared to heterodyne detectors, which are limited by quantum noise. As a rule, the threshold power recorded by detectors with direct detection is higher than for heterodyne ones, which is due to the contribution of other noise present in the detector itself, in circuit elements and amplifiers.

The advantage of systems with direct detection is the relative simplicity and the possibility of developing large-format matrices. Most imaging systems use direct detection.

DETECTOR TYPES

The complexity of the development of terahertz devices lies in the fact that when terahertz radiation is detected, some principles of operation of photonic and electronic devices cease to operate. Terahertz radiation is characterized by a low photon energy (4 meV for radiation with a frequency of 1 THz) and therefore photonic terahertz devices with quantum transitions can operate only at low temperatures. The limiting frequency of operation of electronic devices is determined by the time of flight of an electron in the active region of the device, which in turn depends on the speed of the carriers. For het-

охлаждения) и относящийся к числу наиболее широкополосных. Приемник Голя представляет собой разновидность волюметрических газовых термометров, в которых измеряется изменение объема газа с изменением температуры, и основан на газовом законе Ж. Шарля. В отечественной литературе одновременно существует несколько названий одного и того же устройства: пневматический приемник излучения, оптико-акустический приёмник, оптико-пневматический измерительный преобразователь излучения. В основе оптико-акустического приемника (синоним пневматического приемника и ячейки Голя) инфракрасного излучения лежит обнаруженный в 1880 году Александром Беллом и исследованный Тиндалем и Рентгеном оптико-акустический эффект. Этот эффект заключается в том, что если газ, способный поглощать инфракрасную радиацию, подвергнуть облучению потоком модулированного инфракрасного излучения, то в результате возникает колебание температуры газа и его давления, а также акустические колебания. Частота колебаний зависит от частоты модуляции потока, а интенсивность колебаний – от способности данного газа поглощать инфракрасную радиацию и от интенсивности радиации.

Современный пневматический приемник состоит из наполненной газом расширительной камеры, один из торцов которой герметически закрыт тонкой мембраной, поверхность которой покрыта слоем вещества, сильно поглощающего принимаемое излучение (рис. 3). Второй торец закрыт тонкой упругой мембраной, на внешнюю поверхность которой нанесено металлическое зеркальное покрытие. Поступающее в камеру излучение нагревает газ, который, расширяясь, изгибает зеркальную мембрану, вызывая сигнал считывающей оптической системы, например за счет отклонения сфокусированного луча света видимого диапазона. Чувствительность ячейки Голя ограничена только температурным шумом теплообмена между поглощающей пленкой и газом, заполняющим приемник, что позволяет получить очень высокую обнаружительную способность ($D^* > 3 \cdot 10^9$ см Гц^{1/2} Вт⁻¹) и вольт-ваттную чувствительность (10^5 – 10^6 В/Вт). Чувствительность устройства существенно зависит от частоты модуляции потока входного излучения и имеет явно выраженный максимум. На низких частотах спад чувствительности объясняется тем, что давление в расширительной камере успевает выровняться с давлением в компенсационной камере, а на высоких – газ не успевает нагреваться и охлаждаться.

erostructures, the maximum speed of flight of electrons in the active region is of the order of several units of 10^7 cm/s, while the speed of plasma waves in the gate channel of the transistor is two orders of magnitude higher, which made it possible to develop THz radiation detectors based on field effect transistors.

Golay cell

In the class of thermal detectors, special attention should be paid to the Golay detector [6], which is 5–15 times superior in limiting detectivity to pyroelectric and thermocouple detectors (also operating without cryogenic cooling), and is one of the most broadband. The Golay receiver is a kind of volumetric gas thermometers, in which the change in the volume of gas with a change in temperature is measured, and is based on the gas law of J. Charles. In the domestic literature, there are several names for the same device at the same time: pneumatic radiation receiver, optical-acoustic receiver, optical-pneumatic radiation measuring transducer. The optical-acoustic receiver (a synonym for a pneumatic receiver and a Golay cell) of infrared radiation is based on the optical-acoustic effect discovered in 1880 by Alexander Bell and investigated by Tyndall and Roentgen. This effect consists in the fact that if a gas capable of absorbing infrared radiation is irradiated with a stream of modulated infrared radiation, then the result is a fluctuation in the temperature of the gas and its pressure, as well as acoustic vibrations. The frequency of oscillations depends on the frequency of modulation of the flow, and the intensity of oscillations depends on the ability of a given gas to

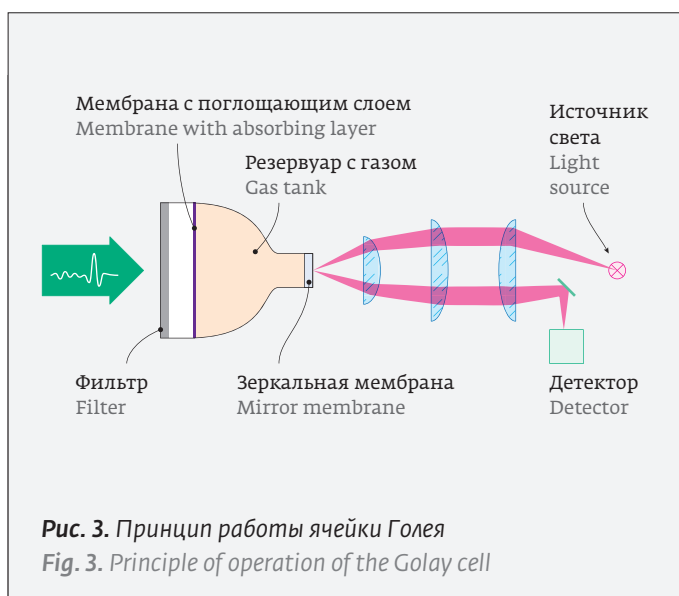


Рис. 3. Принцип работы ячейки Голя

Fig. 3. Principle of operation of the Golay cell

Диоды с барьерами Шоттки

Структуры, основанные на барьерах Шоттки, являются одними из основных элементов ТГц-технологий. Детекторы с барьерами Шоттки (SBD – Schottky Barrier Diode) ТГц-диапазона используются как для прямого детектирования, так и в качестве нелинейных элементов в гетеродинных смесителях в широком диапазоне температур $T=4-300$ К. В отличие от обычных диодов на основе р-п – перехода диоды Шоттки обладают существенно большим быстродействием, благодаря чему возможно их использование при частотах до нескольких терагерц [7]. Диоды Шоттки обладают этим свойством вследствие того, что транспорт заряда в них обусловлен главным образом термоэмиссией электронов через энергетический барьер, возникающий в контакте металл-полупроводник. Как правило, такие приемники конструируются на основе δ -легированных диодов Шоттки с балочными выводами, встроенными в антенны. Исторически первые структуры на барьерах Шоттки имели точечные контакты в виде конических металлических проволок (вискеров). Например, широко использовались р-Si/W контакты. При комнатной температуре они имели пороговую мощность $NER \approx 4 \cdot 10^{-10}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Также использовались точечные контакты из вольфрама или бериллиевой бронзы к n-Ge, n-GaAs, n-InSb. SBD на основе GaAs до сих пор используются как смесители в малошумящих гетеродинных приемниках.

Поперечное сечение SBD с эквивалентной схемой перехода показано на рис. 4. Оно состоит из перехода (площадью менее нескольких мкм²) между платиновым анодом и эпитаксиальным слоем n-GaAs. Наконечник металлического уса обеспечивает электрический контакт к аноду, а также служит в качестве длинной проволочной антенны для связи с внешним излучением. Смешивание волн происходит на нелинейном сопротивлении перехода R_j . Последовательное сопротивление диода R_s и зависящая от напряжения емкость перехода C_j являются паразитными элементами, которые приводят к деградации характеристик.

Однако существуют некоторые ограничения этой технологии диодов Шоттки с контактами в форме усов. Начиная с 1980-х усилия разработчиков направлены на производство планарных диодов Шоттки. С целью использования планарной технологии в диапазоне от 300 ГГц до нескольких ТГц была разработана технология «без подложек». При таком подходе диоды интегрируются с согласующей цепью, большая часть подложки

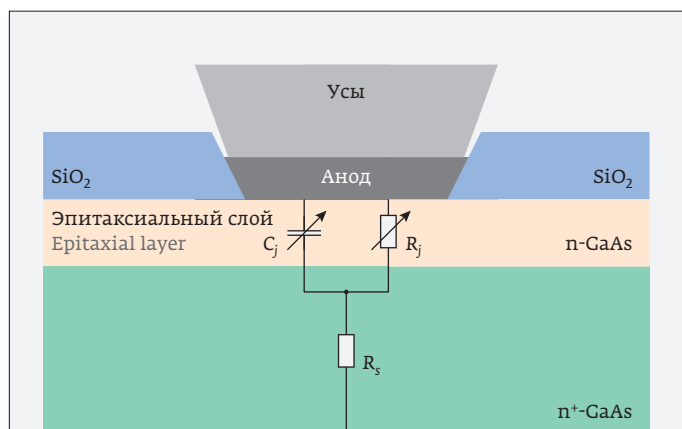


Рис. 4. Поперечное сечение контакта Шоттки с эквивалентной схемой перехода [2, 5]

Fig. 4. Cross-section of a Schottky contact with an equivalent junction circuit [2, 5]

absorb infrared radiation and on the intensity of radiation.

A modern pneumatic receiver consists of an expansion chamber filled with gas, one of the ends of which is hermetically sealed by a thin membrane, the surface of which is covered with a layer of a sub-

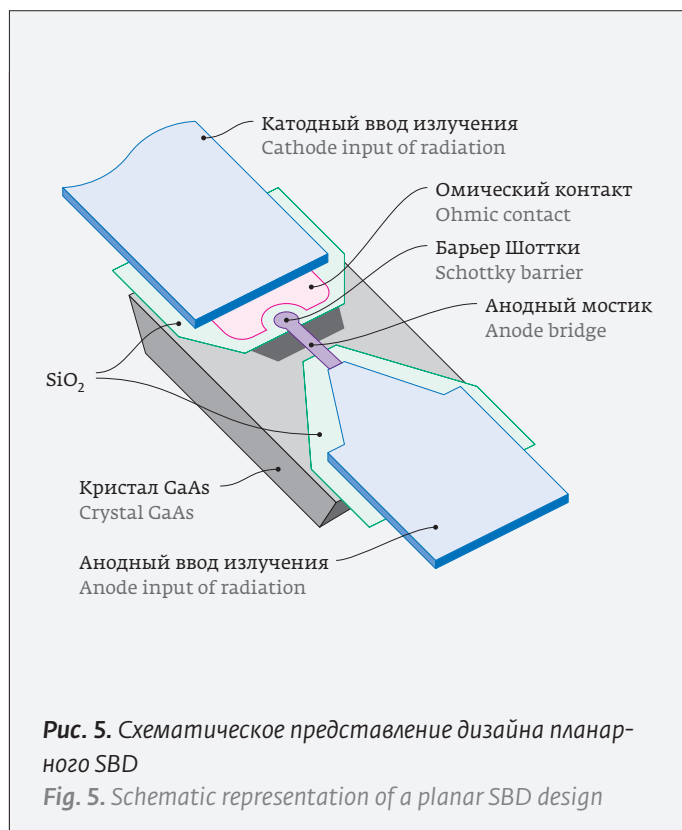


Рис. 5. Схематическое представление дизайна планарного SBD

Fig. 5. Schematic representation of a planar SBD design

из GaAs удаляется из кристалла, и схема создается на оставшейся эпитаксиально выращенной GaAs мембране (рис. 5). Эпитаксиальный GaAs является наиболее часто используемым полупроводником для изготовления смесителей на основе планарных диодов Шоттки, хотя другие материалы системы III-V также используются в некоторых приложениях.

SBD-смесители могут действовать в условиях комнатной температуры до частоты $\nu \approx 25$ ТГц, но реально с относительно низким шумом SBD обычно они применяются в частотном диапазоне < 5 ТГц. Приемники на основе смесителей на основе барьеров Шоттки, действующие при комнатной температуре, обычно имеют радиометрическую чувствительность $\Delta T \approx 0,05$ К при $\nu = 500$ ГГц и $\Delta T \approx 0,5$ К при 2,5 ТГц для времени интегрирования 1 с и полосы предварительного обнаружения 1 ГГц [5]. Паразитные параметры R_s и C_j (рис. 4) определяют критическую частоту диода, которая равна $1/2\pi R_s C_j$. При уменьшении площади перехода уменьшаются емкости переходов, что увеличивает рабочую частоту. Но в то же время это увеличивает последовательное сопротивление. Существующие приборы имеют диаметр анода около 0,25 мкм и емкости C_j около 0,25 фФ. Для высокочастотного действия слой GaAs легируют до концентрации $n \approx (5-10) \cdot 10^{17}$ см⁻³. Емкость перехода зависит от напряжения, поскольку размер области обеднения зависит от приложенного смещения.

В диапазоне низких частот ($\nu \leq 0,1$ ТГц) действие диодов на основе барьеров Шоттки может быть описано теорией смесителя, учитывающей паразитные параметры диода Шоттки (переменную емкость диода, последовательное сопротивление диода). Однако при высоких частотах появляются несколько паразитных механизмов, например скин-эффект (поверхностный эффект), а также необходим учет высокочастотных процессов в полупроводнике материале, таких как рассеяние носителей, время переноса

stance that strongly absorbs the received radiation (Fig. 3). The second end is closed by a thin, elastic membrane, on the outer surface of which a metallic mirror coating is applied. Radiation entering the chamber heats up the gas, which expands and bends the mirror membrane, causing a signal from the readout optical system, for example, by deflecting a focused beam of visible light. The sensitivity of the Golay cell is limited only by the thermal noise of heat transfer between the absorbing film and the gas filling the receiver, which makes it possible to obtain very high detectivity ($D^* > 3 \cdot 10^9$ cm Hz^{1/2} W⁻¹) and volt-watt sensitivity (10^5-10^6 V/W). The sensitivity of the device substantially depends on the modulation frequency of the input radiation flux and has a pronounced maximum. At low frequencies, the decrease in sensitivity is explained by the fact that the pressure in the expansion chamber has time to equalize with the pressure in the compensation chamber, and at high frequencies, the gas does not have time to heat up and cool down.



Рис. 6. Схема микроболометра с антеннами, связанными с нагрузками резистивным и емкостным способом

Fig. 6. Microbolometer circuit with antennas associated with loads resistive and capacitive way

носителя через барьер (оно составляет около 1 пс), а также время диэлектрической релаксации.

При комнатной температуре SBD с прямым детектированием реализуют NEP около $\sim 3 \cdot 10^{-10} - 10^{-8}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при $n = 891$ ГГц [7,8].

Болометры с электромагнитной связью

В случаях, когда высокая чувствительность не требуется (например в системах с активной подсветкой, использующих ТГц-излучатели, такие как квантовые каскадные лазеры и лазеры на свободных электронах) актуальными становятся высокое пространственное 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 терагерцевому излучению обеспечивается двумя способами. Первый состоит в применении антенн, связанных с микроболометром резистивным и/или емкостным способом (рис. 6). Второй состоит в применении тонких металлических поглотителей, наносимых на термоизолированную мембрану болометра (рис. 7). Первый преимущественно развивается фирмой LETI (Франция) [1, 19], а второй – фирмой NEC (Япония) [2, 17]. 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 меньше длины волны.

В настоящее время в обоих вариантах исполнения на длинах волн ≈ 100 мкм достигнута пороговая мощность MDP $\approx 30-40$ пВт/пиксел на длинах волн 100-200 мкм ($\text{NEP} < 4 \cdot 10^{-13}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, т.к. характерная измерительная полоса частот матричных приемников формата 320×240 обычно составляет более 10 кГц). Быстродействие приемников составляет около 10-15 мс, так что кадро-

Schottky Barrier Diodes

Structures based on Schottky barriers are one of the main elements of THz technologies. Detectors with SBD (Schottky Barrier Diode) of the THz range are used both for direct detection and as nonlinear elements in heterodyne mixers in a wide temperature range $T = 4-300$ K. Unlike conventional diodes based on pn-junction, Schottky diodes have a significantly high speed, which makes it possible to use them at frequencies up to several terahertz [7]. Schottky diodes have this property due to the fact that charge transport in them is mainly due to thermal emission of electrons through the energy barrier arising in the metal-semiconductor contact. As a rule, such receivers are constructed on the basis of δ -doped Schottky diodes with beam terminals built into the antennas. Historically, the first structures on Schottky barriers had point contacts in the form of tapered metal wires (whiskers). For example, p-Si/W contacts have been widely used. At room temperature, they had a threshold power of $\text{NEP} \approx 4 \cdot 10^{-10}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$. We also used point contacts made of tungsten or beryllium bronze to n-Ge, n-GaAs, n-InSb. GaAs SBDs are still used today as mixers in low noise heterodyne receivers.

A cross-section of an SBD with an equivalent junction circuit is shown in Fig. 4. It consists of a junction

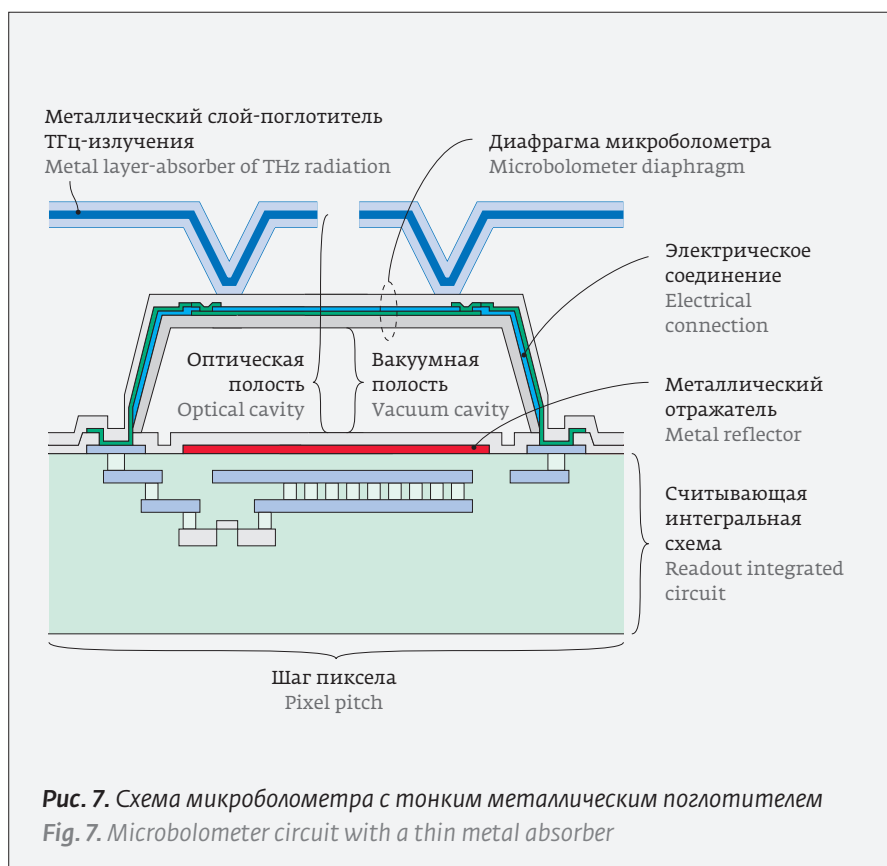


Рис. 7. Схема микроболометра с тонким металлическим поглотителем
Fig. 7. Microbolometer circuit with a thin metal absorber



вая частота не превышает 60–100 Гц. Здесь следует отметить, что приводимые значения NEP ($>10^{-10}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$) для неохлаждаемых матричных микроболометров ТГц-диапазона в ряде обзоров [1, 2, 18, 19] являются устаревшими, поскольку еще в 2008 году в работе [17] японской фирмой NEC были представлены неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники ТГц-диапазона, обладающие $\text{MDP} \approx 40$ пВт/пиксел. Для многих приложений длины волн принимаемого излучения должны 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 микроболометров повышается до 1000 пВт/пиксел и более [14, 15] вследствие нарушения согласованности импеданса резонатора (оптической полости) и вакуума.

В России неохлаждаемые микроболометрические приемники ТГц-излучения с тонким металлическим поглотителем форматом 160×120 и 320×240 , обладающие на длине волны 130 мкм пороговой мощностью ≈ 3 нВт/пиксел, 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 [16]. Замена германиевого окна на кремниевое и применение повышенного напряжения смещения болометра позволяет понизить пороговую мощность, MDP, до ≈ 250 пВт/пиксел. Дальнейшее понижение MDP требует увеличения толщины оптического резонатора (высоты подвески болометра над мультиплексором) и понижения теплопроводности микроболометров. Также были разработаны и продемонстрированы микроболометрические 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/пиксел. В отличие от сверхпроводящих и металлических болометров неохлаждаемые болометры на основе оксидов ванадия имеют сопротивление порядка 100 кОм, что представляет определен-

(less than a few μm^2) between the platinum anode and the n-GaAs epitaxial layer. The tip of the metal bar provides electrical contact to the anode and also serves as a long wire antenna to communicate with external radiation. Mixing of waves occurs at the nonlinear resistance of the transition R_s . The series resistance R_s of the diode and the voltage-dependent junction capacitance C_j are parasitic elements that degrade performance.

However, there are some limitations to this Schottky diode technology with whisker contacts. Since the 1980s, development efforts have focused on the production of planar Schottky diodes. With the aim of using planar technology in the range from 300 GHz to several THz, a “no substrates” technology has been developed. With this approach, the diodes are integrated with the matching network, most of the GaAs substrate is removed from the crystal, and the circuit is created on the remaining epitaxially grown GaAs membrane (Fig. 5). Epitaxial GaAs is the most commonly used semiconductor for planar Schottky diode mixers, although other III-V materials are also used in some applications.

SBD mixers can operate in room temperature conditions up to $\nu \approx 25$ THz, but in reality with relatively low SBD noise, they are usually used in the frequency range < 5 THz. Receivers based on mixers based on Schottky barriers operating at room temperature usually have a radiometric sensitivity of $\Delta T \approx 0.05$ K at $\nu = 500$ GHz and $\Delta T \approx 0.5$ K at 2.5 THz for an integration time of 1 s and a 1 GHz preliminary detection bandwidth [5]. Parasitic parameters R_s and C_j (Fig. 4) determine the critical frequency of the diode, which is equal to $1/2\pi R_s C_j$. With a decrease in the transition area, the capacitances of the transitions decrease, which increases the operating frequency. But at the same time, it increases the series resistance. Existing devices have an anode diameter of about $0.25 \mu\text{m}$ and a capacitance C_j of about 0.25 fF. For high-frequency action, GaAs layers are doped to a concentration of $n \approx (5-10) \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Junction capacitance is voltage dependent since the size of the depletion region depends on the applied bias.

In the low frequency range ($\nu \leq 0,1$ THz), the action of diodes based on Schottky barriers can be described by the mixer theory, which takes into account the parasitic parameters of the Schottky diode (variable capacitance of the diode, series resistance of the diode). However, at high frequencies, several parasitic mechanisms appear, for example, the skin effect (surface effect), and it is also necessary to take into account high-frequency processes in a semiconductor material, such as carrier scattering, carrier transfer

ную трудность для согласования антенны с нагрузкой. В конструкции ИФП СО РАН нагрузкой для антенны является не сам термочувствительный элемент микроболометра, а узкая металлическая полоска, нанесенная на верхний слой нитрида кремния между контактами к слою оксида ванадия и, следовательно, имеющая хороший тепловой контакт с микроболометром, 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 терагерцевой области микроболометрических матриц с шагом пиксела 25 мкм.

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 [15].

Пирозлектрические детекторы

Активным элементом в этих устройствах является пирозлектрический материал, в котором при изменении температуры наводится электрическое поле. Таким образом, пирозлектрический детектор в отличие от болометра не требует для работы источника постоянного напряжения и при этом дает непосредственный отклик на падающее излучение в виде напряжения на своих выводах. Характеристики пирозлектрических детекторов, которые также используются в матрицах терагерцевых камер, существенно уступают микроболометрам по чувствительности и близки в части времени релаксации [1].

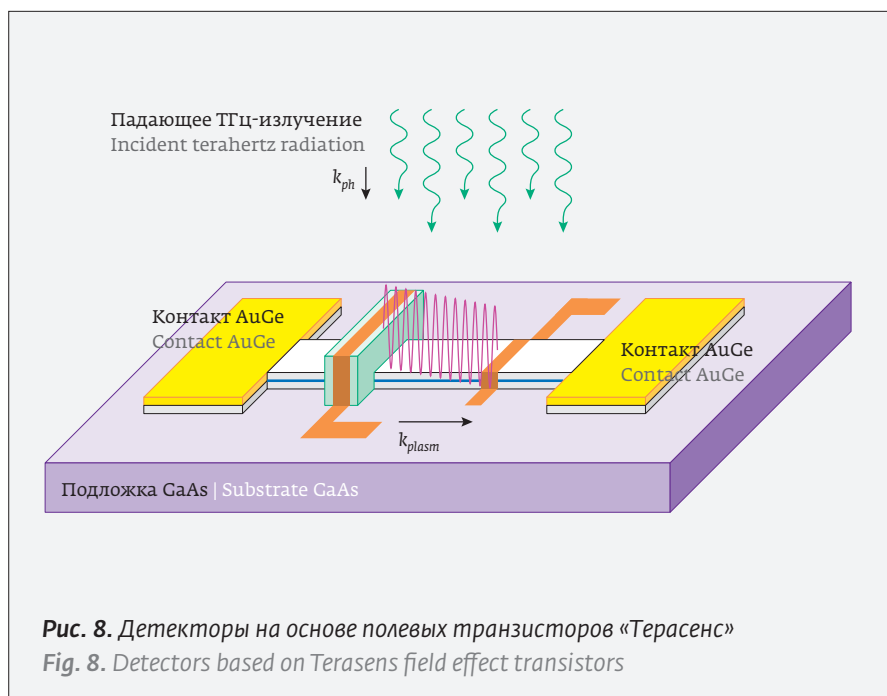
time through the barrier (it is about 1 ps), and See also dielectric relaxation time.

At room temperature, SBDs with direct detection realize NEP of about $\sim 3 \cdot 10^{-10} - 10^{-8} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ at $\nu = 891 \text{ GHz}$ [7,8].

Bolometers with electromagnetic coupling

In cases where high sensitivity is not required (for example, in systems with active illumination using THz emitters, such as quantum cascade lasers and free electron lasers), high spatial resolution, image rendering speed, and ease of use of receivers become relevant. To solve these problems, matrix microbolometric receivers of large format, sensitive to the THz range, can be used. High sensitivity of uncooled microbolometric receivers to terahertz radiation is provided in two ways. The first is the use of antennas connected to the microbolometer in a resistive and/or capacitive way (Fig. 6). The second consists in the use of thin metal absorbers applied to the thermally insulated membrane of the bolometer (Fig. 7). The first is mainly developed by LETI (France) [1, 19], and the second – by NEC (Japan) [2, 17]. In both cases, additional optical cavities can be used. In the long-wavelength part of the THz range, it is preferable to use an antenna, since it allows the electromagnetic power to be supplied to the sensitive element, the size of which can be much smaller than the wavelength.

At present, in both versions at wavelengths of $\approx 100 \mu\text{m}$, the threshold power $\text{MDP} \approx 30 - 40 \text{ pW}/\text{pixel}$ at wavelengths of 100-200 μm is achieved





Детекторы на основе полевых транзисторов

Еще одним широко используемым классом детекторов терагерцевого излучения являются детекторы на основе полевых транзисторов (FET – Field Effect Transistor) с высокой подвижностью электронов. Исток и сток такого транзистора связывает плоский канал, заполненный двумерным электронным газом, в котором могут распространяться плазменные волны терагерцевой частоты (рис. 8). Нелинейные свойства плазменных возбуждений (волн электронной плотности) в наноразмерных полевых транзисторах делают возможным их отклик при частотах, значительно более высоких, чем граничная частота прибора, что обусловлено баллистическим транспортом электронов. Результаты, получаемые на полевых транзисторах, использованных как терагерцевые детекторы, показывают, что FET может быть использован для резонансного и нерезонансного (широкополосного) детектирования (см., например, [2]). Резонансная частота перестраивается путем изменения напряжения на затворе, что может быть использовано для создания селективных перестраиваемых твердотельных детекторов.

Эти приемники могут действовать в широком диапазоне температур вплоть до комнатной температуры. FET-детектирование наблюдалось в HEMT-транзисторах на основе GaAs/AlGaAs, InGaP/InGaAs/GaAs, GaN/AlGaN и в кремниевых MOSFET [1, 2, 4, 5]. Осцилляции плазмы также могут наблюдаться в двумерном электронном канале с обратно смещенным переходом Шоттки и FET с двойной квантовой ямой с периодическим решеточным затвором. Физический механизм, поддерживающий создание стабильных осцилляций, лежит в отражении плазменных волн на границах транзистора с последующим усилением амплитуды волн. Плазменные возбуждения в FET на материале с достаточно высокой подвижностью электронов могут быть использованы как для генерации, так и для детектирования ТГц-излучения.

Отечественная фирма «МВЭЙВ» (с международным представительством в лице TeraSense Group Inc.) [20] в настоящее время выпускает несколько модификаций GaAs/AlGaAs плазменных детекторов. Основной особенностью технологии является возможность создания широкоформатных камер вплоть до 128×128 пикселей с общим размером сенсора 40×40 см. Типичные матричные приемники, предназначенные для детектирования излучения частотой 100 ГГц и 300

($NEP < 4 \cdot 10^{-13} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$, since the characteristic measuring frequency band matrix receivers of 320×240 format is usually more than 10 kHz). The speed of the receivers is about 10–15 ms, so the frame rate does not exceed 60–100 Hz. It should be noted here that the reported NEP values ($> 10^{-10} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$) for uncooled THz array microbolometers in a number of reviews [1,2,18,19] are outdated, since back in 2008 in [17] the Japanese uncooled array microbolometric receivers of the THz range were presented by NEC, with $MDP \approx 40 \text{ pW/pixel}$. For many applications, the wavelengths of the received radiation should reach the order of 1000 μm , since in this spectral region the transparency of many materials is noticeably higher than at wavelengths of 100–200 μm . However, at wavelengths of the order of 1000 microns, the threshold power of the above microbolometers increases to 1000 pW/pixel and more [14,15] due to a violation of the consistency of the impedance of the resonator (optical cavity) and vacuum.

In Russia, uncooled microbolometric detectors of THz radiation with a thin metal absorber in 160×120 and 320×240 formats, with a threshold power of $\approx 3 \text{ nW/pixel}$ at a wavelength of 130 μm , were developed and demonstrated at the Institute of Semiconductor Physics, SB of RAS. The increased experimental value of the threshold power is due to the use of germanium windows with high absorption of THz radiation and a two-fold lower bias voltage of the bolometer, which is used to provide a large dynamic range required for the operation of a receiver with powerful THz radiation from the Novosibirsk free electron laser [16]. Replacing the germanium window with a silicon one and using an increased bias voltage of the bolometer allows one to lower the threshold power, MDP, to $\approx 250 \text{ pW/pixel}$. A further decrease in the MDP requires an increase in the thickness of the optical resonator (the height of the bolometer suspension above the multiplexer) and a decrease in the thermal conductivity of the microbolometers. Also, microbolometric receivers of THz radiation of the antenna type were developed and demonstrated in the format 53×40 and 32×24 with antenna sizes of 150×150 and 250×250 μm , respectively, intended for operation in the submillimeter range. The experimental MDP value measured at a wavelength of 130 μm was $\approx 30 \text{ nW/pixel}$. Unlike superconducting and metal bolometers, uncooled bolometers based on vanadium oxides have a resistance of about 100 k Ω , which presents a certain difficulty for matching the antenna to the load. In the design of the IPP SB RAS, the load for the antenna is not the thermosensitive element of the microbolom-

ГГц, состоят из пикселей размером $1,5 \times 1,5$ мм и $0,5 \times 0,5$ мм.

При изучении кремниевых MOSFET с длинами затвора 20–300 нм при комнатной температуре и частоте излучения 0,7 ТГц найдено, что отклик зависит от длины затвора и напряжения на затворе. Было реализовано значение вольт-ваттной чувствительности 200 В/Вт и $NEP > 10^{-10}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что демонстрирует потенциал Si MOSFET как чувствительных детекторов терагерцевого излучения. Также создана матрица фокальной плоскости размером 3×5 на основе Si MOSFET, изготовленная при помощи 0,25 мкм КМОП технологии. Каждый пиксел матрицы состоит из антенны на 645 ГГц, связанной с FET детектором, и усилителя напряжения на 43 дБ с полосой частот 1,6 МГц. Было достигнуто значение $NEP \cdot 3 \cdot 10^{-10}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$, что прокладывает путь реализации широкополосных ТГц-детекторов и матриц фокальной плоскости с высокой кадровой скоростью формирования изображения на основе КМОП-технологии. Характеристики этих быстрых детекторов при комнатной температуре соответствуют другим неохлаждаемым детекторам в ТГц-частотном диапазоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящий прогресс в технологии ТГц-детекторов обеспечивается решением технологических проблем, применением новых физических концепций и явлений, а также многообещающими приложениями. Характеристики нескольких типов дискретных детекторов и малоформатных матриц, действующих при низких температурах или температурах субкельвин диапазона и охватывающих

eter itself, but a narrow metal strip applied to the upper layer of silicon nitride between the contacts to the vanadium oxide layer and, therefore, having good thermal contact with the microbolometer, but electrically isolated from the thermosensitive layer. The strip is 70 μm long, 2 μm wide and 200 nm thick, and the resistance is about 100 ohms. The antenna is made of a highly conductive metal and is suspended above the silicon readout circuit at a height of 2.5 μm using silicon nitride braces. These developments of Institute of Semiconductor Physics, SB of RAS allowed ODB Astrohn LLC for the first time in Russia to manufacture several pilot semi-industrial batches of microbolometric arrays sensitive in the terahertz region with a pixel pitch of 25 μm .

The technology for manufacturing antennas and absorbers, being, in fact, a planar technology using photolithography, allows the formation of fragments of absorbers with different spectral and polarization sensitivities on one structure. The working spectral range of absorbers is limited only by their manufacturing technologies, which currently cover the wavelength range from 1.6 to 10000 μm [15].

Pyroelectric detectors

The active element in these devices is a pyroelectric material, in which an electric field is induced when the temperature changes. Thus, a pyroelectric detector, unlike a bolometer, does not require a constant voltage source for operation, and at the same time gives a direct response to incident radiation in the form of a voltage at its terminals. The characteristics of pyroelectric detectors, which are also used in arrays of terahertz chambers, are significantly inferior to

Диагностика и компоненты

- Фотоприемники с усилителем, лавинные, балансные
- Изоляторы Фарадея 400-1250 нм, до 60 дБ, до 15 мм
- Селекторы импульсов на 250-2700 нм до 2 МГц
- Измерители длительности импульсов, SPIDER
- Электроника ФАПЧ для синхронизации
- Спектрометры 190-3450 нм



Фемтосекундные лазерные системы

- Параметрические генераторы 340-4200 нм
- Волоконные лазеры на 780, 1030-1064, 1560 нм
- Лазеры со средней мощностью до 50 Вт
- Оптический синтезатор частоты ("комб-генератор")
- Титан-сапфировые генераторы от 6 до 100 фс
- Системы с пиковой мощностью до 15 ТВт





весь ТГц-диапазон, близки к предельным характеристикам. Однако будущее улучшение технических характеристик систем регистрации ТГц-излучения и рост их рынка будет обеспечиваться применением крупноформатных матриц и в первую очередь неохлаждаемых или слабо охлаждаемых. Подобно тому, как это происходило в инфракрасном диапазоне.

Неохлаждаемые и охлаждаемые гетеродинные SBD детекторы могут обеспечивать относительно высокую чувствительность и подходят для многих применений в ТГц-спектральном диапазоне, но их сложно объединить в матрицы с большим числом пикселей вследствие отсутствия мощных компактных твердотельных локальных осцилляторов. Сегодня доступны системы как с однопиксельными когерентными SBD детекторами, так и с небольшим числом пикселей, но важной проблемой остается их эффективное применение при $\nu > 1$ ТГц.

В большинстве терагерцевых 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/ $\sqrt{\text{Гц}}$.

Неохлаждаемые детекторы на основе микроболметров, сопряженных с тонким металлическим поглотителем или антенной, перспективны для создания крупноформатных матриц, используемых в системах низкой стоимости. Такие разработанные или разрабатываемые неохлаждаемые ТГц-приемники прямого детектирования с $\text{NEP} \approx 10^{-12}$ Вт/ $\sqrt{\text{Гц}}$ могут быть использованы во многих спектроскопических применениях низкого разрешения и системах активного наблюдения.

Исследования, направленные на создание новых терагерцевых детекторов, например, на основе низкоразмерных структур из HgCdTe, на основе квантовых колец и квантовых точек Ge/Si, графена и др. будут представлены в продолжении обзора.

REFERENCES

1. Rogalsky A. *Infrared and Terahertz Detectors (Third Edition)*. – CRC Press of Taylor & Francis Group. 2019. 1043 p.
2. Sizov F., Rogalsky A. Terahertz detectors and focal plane arrays». *Opto-Electronics Review*. 2011; 19 (3): 346–404.
3. Startsev V. V., Popov V. K., Naumov A. V. IR and THz-ranges multispectral screening system. *Fotonika (Photonics Russia)*. 2017; 6: 98–112. doi: 10.22184/1993-7296.2017.66.6.98.112.
Старцев В. В., Попов В. К., Наумов А. В. Мультиспектральный модуль обнаружения и анализа угроз для охраны протяженных объектов

microbolometers in sensitivity and are similar in terms of the relaxation time [1].

Field effect transistor detectors

Another widely used class of terahertz radiation detectors is field effect transistor (FET) detectors with high electron mobility. The source and drain of such a transistor are connected by a flat channel filled with a two-dimensional electron gas in which plasma waves of terahertz frequency can propagate (Fig. 8). The nonlinear properties of plasma excitations (electron density waves) in nanoscale field-effect transistors make their response possible at frequencies significantly higher than the cutoff frequency of the device, which is due to the ballistic transport of electrons. The results obtained with field-effect transistors used as terahertz detectors show that the FET can be used for resonant and non-resonant (broadband) detection (see, e.g., [2]). The resonant frequency is tuned by changing the gate voltage, which can be used to create selective tunable solid-state detectors.

These receivers can operate over a wide temperature range up to room temperature. FET detection was observed in HEMTs based on GaAs/AlGaAs, InGaP/InGaAs/GaAs, GaN/AlGaN, and in silicon MOSFETs [1, 2, 4, 5]. Plasma oscillations can also be observed in a two-dimensional electron channel with a back-biased Schottky junction and a double quantum well FET with a periodic lattice gate. Physical mechanism, supporting the creation of stable oscillations lies in the reflection of plasma waves at the boundaries of the transistor with the subsequent amplification of the amplitude of the waves. Plasma excitations in an FET based on a material with a sufficiently high electron mobility can be used for both generation and detection of terahertz radiation.

The domestic company “MWAVE” (with an international representation represented by TeraSense Group Inc.) [20] currently produces several modifications of GaAs/AlGaAs plasmon detectors. The main feature of the technology is the ability to create wide-format cameras up to 128×128 pixels with a total sensor size of 40×40 cm. Typical array receivers designed for detecting radiation at 100 GHz and 300 GHz consist of pixels 1.5×1.5 mm and 0.5×0.5 mm in size.

When studying silicon MOSFETs with a gate length of 20–300 nm at room temperature and an emission frequency of 0.7 THz, it was found that the response depends on the gate length and the gate voltage. A volt-watt sensitivity of 200 V/W and $\text{NEP} > 10^{-10}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ was implemented, which demonstrates the potential of Si

на базе ИК- и видеосистем. *Фотоника*. 2017; 6: 98–112. doi: 10.22184/1993-7296.2017.66.6.98.112.

4. **Vojcekhovskij A. V., Nesmelov S. N., Kul'chickij N. A., Mel'nikov A. A., Mal'cev P. P.** Detektirovanie v teragercovom diapazone. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2012; 2: 28–35. [In Russ].
Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Мальцев П. П. Детектирование в терагерцовом диапазоне. *Нано- и микросистемная техника*. 2012; 2: 28–35.
5. **Vojcekhovskij A. V., Nesmelov S. N., Kul'chickij N. A., Mel'nikov A. A., Mal'cev P. P.** Tipy detektorov teragercovogo izlucheniya. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*. 2012; (3): 25–34. [In Russ].
Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Мальцев П. П. Типы детекторов терагерцового излучения. *Нано- и микросистемная техника*. 2012; (3): 25–34.
6. **Gibin I. S., Kotlyar P. E.** Priemniki izlucheniya teragercovogo diapazona (obzor). *Uspekhi prikladnoj fiziki*. 2018; 6 (2): 117–129. [In Russ].
Гибин И. С., Котляр П. Е. Приемники излучения терагерцового диапазона (обзор). *Успехи прикладной физики*. 2018; 6 (2): 117–129.
7. **Vaks V. L., Domracheva E. G., Lastovkin A. A., Pripolzin S. I., Sobakinskaya E. A., Chernyaeva M. B., Anfert'ev V. A.** Priemniki izlucheniya teragercovogo chastotnogo diapazona. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo*. 2013; 6 (1): 81–87. [In Russ].
Вакс В. Л., Домрачева Е. Г., Ластовкин А. А., Приползин С. И., Собакинская Е. А., Черняева М. Б., Анфертьев В. А. Приемники излучения терагерцового частотного диапазона. *Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского*. 2013; 6 (1): 81–87.
8. **Esman A. K., Kuleshov V. K., Zykov G. L.** Selektivnyj priemnik teragercovogo izlucheniya. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki*. 2014; 4 (21): 10–13. [In Russ].
Есман А. К., Кулешов В. К., Зыков Г. Л. Селективный приемник терагерцового излучения. *Проблемы физики, математики и техники*. 2014; 4 (21): 10–13.
9. **Yachmenev A. E., Lavrukhin D. V., Glinskiy I. A., Zenchenko N. V., Goncharov Y. G., Spektor I. E., Khabibullin R. A., Otsuji T., Ponomarev D. S.**

MOSFETs as sensitive detectors of terahertz radiation. Also, a 3×5 focal plane array based on Si MOSFET was created, fabricated using 0.25 μm CMOS technology. Each pixel of the array consists of a 645 GHz antenna coupled to an FET detector and a 43 dB voltage amplifier with a 1.6 MHz bandwidth. The NEP value of $3 \cdot 10^{-10} \text{ W}/\sqrt{\text{Hz}}$ was achieved, which paves the way for the implementation of wideband THz detectors and focal plane arrays with a high frame rate of image formation based on CMOS technology. The performance of these fast detectors at room temperature is similar to that of other uncooled detectors in the THz frequency range.

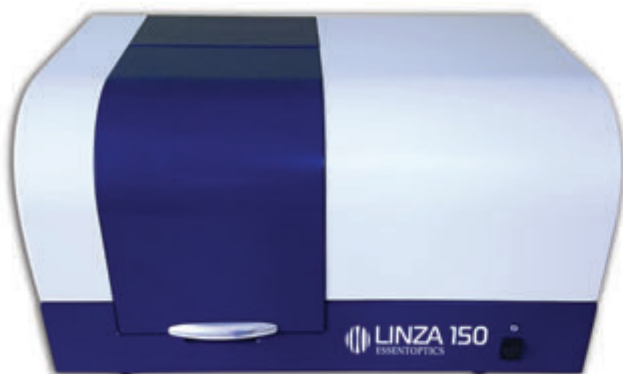
CONCLUSION

Real progress in terahertz detector technology is driven by the solution of technological problems, the application of new physical concepts and phenomena, and promising applications. The characteristics of several types of discrete detectors and small-format arrays operating at low or sub-Kelvin temperatures and covering the entire THz range are close to their limiting characteristics. However, the future improvement of the technical characteristics of THz radiation detection systems and the growth of their market will be

ЭССЕНТОПТИКС ||| ESSENTOPTICS

LINZA 150

Первый в мире спектрофотометр для измерения пропускания и отражения линз и объективов



Спектрофотометр LINZA 150
Новая функция: измерение пропускания и отражения от асферических поверхностей

LINZA 150 Spectrophotometer
New feature: transmittance and reflectance measurement of aspheric lens

ООО «ЭссентОптикс»

23а-81, ул. 40 лет Победы, Боровляны, Минская обл., Минский р-н, 223053 Беларусь
Тел.: +375-17-5112025 | Факс: +375-17-5112026 | www.essentoptics.com



- Metallic and dielectric metasurfaces in photoconductive terahertz devices: a review. *Opt. Eng.* 2019; 59 (6): 061608. doi: 10.1117/1.OE.59.6.061608.
10. **Torhov N. A., Babak L. I., Kokolov A. A.** Primenenie diodov SHottki v teragercovom chastotnom diapazone. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov.* 2019; 53 (12): 1697–1707. [In Russ].
Торхов Н. А., Бабак Л. И., Коколов А. А. Применение диодов Шоттки в терагерцовом частотном диапазоне». *Физика и техника полупроводников.* 2019; 53 (12): 1697–1707.
 11. **Chevalier C., Mercier L., Duchesne F., Gagnon L., Tremblay B., Terroux M., C en ereux 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; 8624: 86240.
 12. **Lewis R. A.** A review of terahertz detectors. *Phys. D: Appl. Phys.* 52, 433001, 2019.
 13. **Fukasawa R.** Terahertz Imaging: Widespread Industrial Application in Non-destructive Inspection and Chemical Analysis. *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology.* 2015; 5 (6): 1121–1127.
 14. **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; 8023: 80230C.
 15. **Bolduc M., Terroux M., Marchese L., Tremblay B., Savard E., Doucet M., Oulachgar H., Alain C., Jerominek H., Bergeron A.** THz imaging and radiometric measurements using a microbolometer-based camera. *Proc. IEEE.* 2011; 6105155: 1–2.
 16. **Kulipanov G. N., Gavrilov N. G., Knyazev B. A. et al.** Research Highlights from the Novosibirsk 400 W average power THz FEL. *Terahertz Science and Technology.* 2008; 1 (2): 107–125.
 17. **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; 6940: 69402Y.
 18. **Sizov F. F., Reva V. P., Golenkov A. G., Zabudsky V. V.** Uncooled Detectors Challenges for THz / sub-THz Arrays Imaging. *Journal of Infrared Milli Terahz Waves.* 2011; 32: 1192–1206.
 19. **Simoens F., Meilhan J., Delplanque B., Gidon S., Lasfargues G., Lalanne Dera J., Nguyen D. T., Ouvrier-Buffet J. L., Pocas S., Maillou T., Cathabard O., Barbieri S.** Real-time imaging with THz fully-customized uncooled amorphous silicon microbolometer focal plane arrays. *Proc. SPIE.* 2012; 8363: 83630D.
 20. **Shchepetilnikov A. V., Gusikhin P. A., Muravev V. M., Tsydynzhapov G. E., Nefyodov Yu. A., Dremine A. A., Kukushkin I. V.** New Ultra-Fast Sub-Terahertz Linear Scanner for Postal Security Screening». *International Journal of Infrared and MillimeterWaves.* <https://doi.org/10.1007/s10762-020-00692-4>.

АВТОРЫ

- Н. А. Кульчицкий, д.т.н., проф., e-mail n.kulchitsky@gmail.com, зам. начальника управления, Государственный научный центр РФ, Акционерное общество «Научно производственное объединение «Орион»; МИРЭА- Российский технологический университет (ПТУ МИРЭА), Москва, Россия.
ORCID: 0000-0003-4664-4891
- А. В. Наумов, руководитель направления, АО «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», <https://astrohn.ru>, Лыткарино, Моск. обл., Россия.
ORCID: 0000-0001-6081-8304
- В. В. Старцев, главный конструктор, к. т. н. АО «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон», <https://astrohn.ru>, Лыткарино, Моск. обл., Россия.
ORCID: 0000-0002-2800-544X
- М. А. Демьяненко, снс, к. ф.- м. н., Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия.
ORCID: 0000-0002-8840-9446

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

ensured by the use of large-format matrices, and first of all, uncooled or poorly cooled ones. Similar to how it happened in the infrared range.

Uncooled and cooled heterodyne SBD detectors can provide relatively high sensitivity and are suitable for many applications in the THz spectral range, but they are difficult to combine into arrays with a large number of pixels due to the lack of powerful compact solid-state local oscillators. Today, systems are available both with single-pixel coherent SBD detectors and with a small number of pixels, but their effective application at $v > 1$ THz remains an important problem.

Most terahertz spectrometers with medium resolution often use uncooled detectors operating over 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 over a wide frequency band. Their NEP is in the range of 10^{-9} – 10^{-11} W/ $\sqrt{\text{Hz}}$.

Uncooled detectors based on microbolometers coupled with a thin metal absorber or antenna are promising for creating large-format arrays used in low-cost systems. Such developed or under development uncooled THz receivers of direct detection with $\text{NEP} \approx 10^{-12}$ W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ can be used in many low-resolution spectroscopic applications and active observation systems.

Studies aimed at creating new terahertz detectors, for example, based on low-dimensional structures made of HgCdTe, based on quantum rings and quantum dots Ge/Si, graphene, etc. will be presented in the continuation of the review.

ABOUT AUTHORS

- Kulchitsky Nikolai Alexandrovich, Doctor of Scien. (Engineering); e-mail: n.kulchitsky@gmail.com; Prof., Moscow Technological University (MIREA), Chief Specialist, SSC RF, JSC Orion Scientific-Production Association, Moscow, Russia.
ORCID: 0000-0003-4664-4891
- Naumov Arkady Valerievich, Head of research and production direction, ASTROHN Technology Ltd, <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Moscow region, Russia.
ORCID: 0000-0001-6081-8304
- Startsev Vadim Valerievich, Cand. of Scien. (Engineering), ASTROHN Technology Ltd, <https://astrohn.ru>, Lytkarino, Moscow region, Russia.
ORCID: 0000-0002-2800-544X
- M. A. Demyanenko, Cand. of Scien. (Phys. & Math), Senior Researcher, A. V. Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB of RAS, Novosibirsk, Russia.
ORCID: 0000-0002-8840-9446:

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of work by all members of the team of authors.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.



355000, г. Ставрополь, проспект Кулакова, д. 8
телефон: +7 (8652) 56-02-70
факс: +7 (8652) 56-07-10
e-mail: lumin.stv@mail.ru
www.luminophor.ru

ЗАО «НПФ «Люминофор»

Уникальное российское предприятие
с полувековой историей

ЗАО «НПФ «Люминофор» является правопреемником Всесоюзного научно-исследовательского института люминофоров и особо чистых веществ (ВНИИЛ), организованного в 1964 году в системе Государственного комитета химической промышленности при Госплане СССР.

Сегодня ЗАО «НПФ «Люминофор» – современная динамично развивающаяся компания, которая продолжает заниматься научными исследованиями, технологическими разработками для российских и зарубежных предприятий, серийно выпускающая более 250 наименований продукции, значительная часть которой уникальна и не имеет аналогов в мире.

МЫ ГОТОВЫ ПРЕДЛОЖИТЬ:

- МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ:
 - Материалы для пьезокерамики
 - Материалы для конденсаторной керамики
- МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТОНКОСЛОЙНОЙ ОПТИКИ:
 - Оксиды
 - Фториды
 - Халькогениды
- ЛЮМИНОФОРЫ ВСЕХ ВИДОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
- СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ:
- ВИЗУАЛИЗАТОРЫ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УФ- и ИК-диапазонов
- МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ МАГНИТО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ
- ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ КРАСКИ:
 - Для защищенной печати и полиграфии
 - Для декоративных целей
 - Для рекламной полиграфии и дизайна
- ТЕРМОИНДИКАТОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ
 - Термоиндикаторные наклейки
 - Термоиндикаторные суспензии
- СВЕТОКОРРЕКТИРУЮЩИЕ ДОБАВКИ
для изготовления современных светопреобразующих материалов для парников и теплиц

Наша компания обладает значительным научным и производственным потенциалом для освоения новых перспективных научных и производственных направлений. Постоянное совершенствование опытно-технологической базы предприятия позволяет разрабатывать и внедрять в производство новые продукты.

**ПРИГЛАШАЕМ К ВЗАИМОВЫГОДНОМУ
И ДОЛГОСРОЧНОМУ СОТРУДНИЧЕСТВУ!**

