

Современное состояние и перспективы детекторов в терагерцовом диапазоне. Часть 1. Прямое детектирование терагерцового излучения

Н. А. Кульчицкий, А. В. Наумов, В. В. Старцев, М. А. Демьяненко

В работе обсуждаются проблемы, связанные с развитием технологии детекторов излучения терагерцового диапазона. Рассмотрены основные физические явления и недавний прогресс в различных методах детектирования терагерцового излучения (прямого детектирования и гетеродинного детектирования). Обсуждаются преимущества и недостатки сенсоров прямого детектирования и сенсоров с гетеродинным детектированием. В части 1 рассмотрен ряд особенностей прямого детектирования и дано описание некоторых типов терагерцовых детекторов прямого обнаружения. В части 2 будет дано описание гетеродинного детектирования и продолжено описание некоторых типов современных фотонных терагерцовых приемников.

Ключевые слова: терагерцовое излучение, прямое, гетеродинное детектирование, полоса частот, чувствительность.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-1-68-82

Введение

Терагерцовое (ТГц) излучение – это электромагнитное излучение, спектр частот которого расположен между инфракрасным и миллиметровым диапазонами. Границы между этими видами излучения в разных источниках определяются по-разному. В данной работе для определен-

ности принимается, что ТГц-диапазон находится в пределах 0,1–10 ТГц (30 мкм – 3 мм), частично перекрываясь со средним инфракрасным (2,5–50 мкм) и миллиметровым (30–300 ГГц, 1–10 мм) диапазонами, а также включая в себя более узкие субмиллиметровый и субтерагерцовый диапазоны. Приборы, действующие в терагерцовом диапазоне, приобретают все

Кульчицкий Николай Александрович^{1,2}, зам. начальника управления, д.т.н.

E-mail: orion@orion-ir.ru

Наумов Аркадий Валерьевич³, руководитель направления.

Старцев Вадим Валерьевич³, главный конструктор.

Демьяненко Михаил Алексеевич⁴, с.н.с., к.ф.-м.н.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

² МИРЭА – Российский технологический университет.

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

³ Акционерное общество «Оптико-механическое конструкторское бюро Астрон».

Россия, 140080, Московская область, г. Лыткарино, ул. Парковая, 1.

E-mail: info@astrohn.ru

⁴ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН.

Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13.

Статья поступила в редакцию 28 октября 2020 г.

© Кульчицкий Н. А., Наумов А. В., Старцев В. В., Демьяненко М. А., 2021

большее значение в разнообразных приложениях (например, в охранных, медицинских, для формирования изображений)

[1, 2]. Некоторые области применения детекторов терагерцового применения приведены на рис. 1.

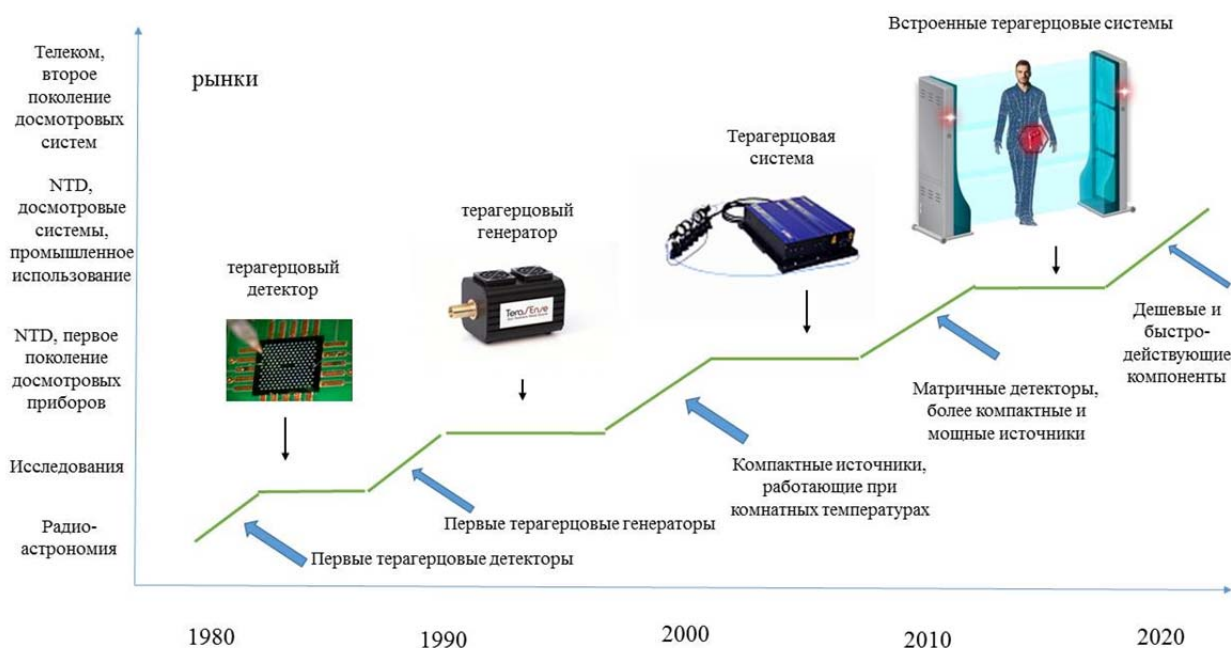


Рис. 1. Области применения терагерцовых детекторов [1].

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 терагерцовых

исследований дано, например, в [3]. На настоящий момент рынок терагерцовых применений только вышел из начальной фазы развития. Поэтому прогноз развития рынка терагерцовой техники (рис. 2) достаточно оценочный. Однако с уверенностью можно сказать, что рынок имеет огромные перспективы.

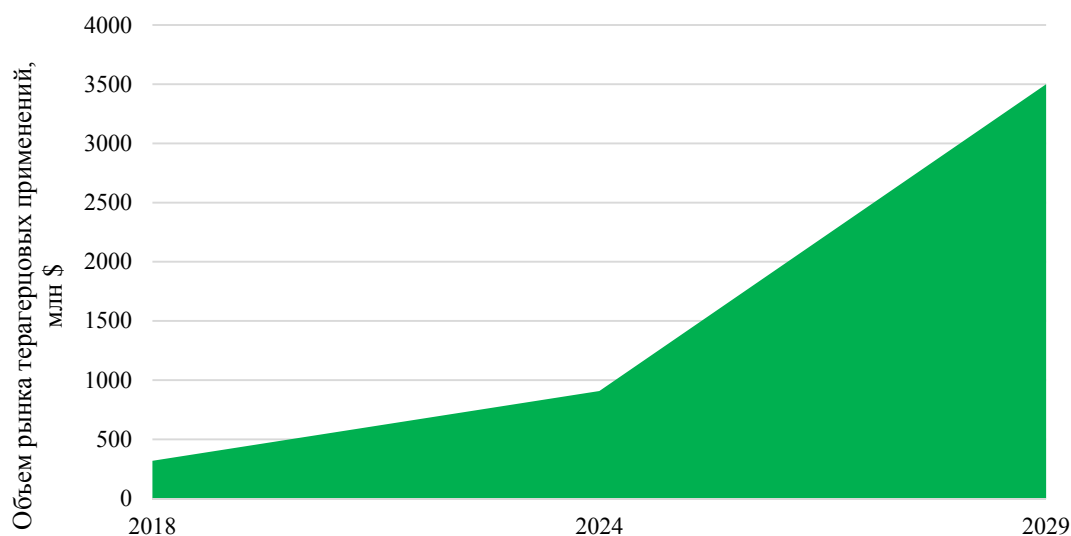


Рис. 2. Развитие и прогноз рынка терагерцовых компонентов и систем 2018–2029 гг. (млн \$) (Источник – Variant Market research).

Несмотря на то, что область терагерцовых технологий в последние годы переживает бурное развитие [1–5], создание компактных высокочувствительных перестраиваемых по частоте и работающих при комнатной температуре детекторов и генераторов терагерцового излучения по-прежнему представляет собой сложную научную задачу. Это прежде всего обусловлено тем, что при приближении к терагерцовой области спектра, методы генерации и детектирования, используемые в радио- и СВЧ-диапазоне, а также в оптическом и ИК-диапазоне становятся малоэффективными. Так, вакуумные электронные приборы, при приближении к терагерцовой области, при своем изначально большом размере, требуют наличия сильных магнитных полей, а реализация терагерцовых квантовых генераторов и детекторов сталкивается с тем, что энергия терагерцового фотона сравнима с тепловой энергией при комнатной температуре. 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 об-

наружения 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 сигналы преобразуются в существенно более низкочастотные ($\nu \sim 1\text{--}30$ ГГц), которые затем усиливаются маломощными 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 ($\tau \sim 10^{-7}$ с).

На данный момент для детектирования ТГц излучения доступны широкополосные детекторы, такие как болометры, пироэлектрические датчики, диоды Шоттки, диоды на сверхрешетках и фотопроводящие детекторы. Эти детекторы используются в двух типах приемников: когерентные (гетеродинные) и некогерентные (прямого детектирования). Приемники в гетеродинных системах перекрывают только узкий спектральный диапазон (< 50 ГГц) вблизи частоты гетеродина. Практически все вышеуказанные детекторы являются достаточно медленными и поэтому непригодными для работы в системах реального времени. Все они обладают определенными недостатками в зависимости от физи-

ческих принципов работы [2] и имеют сравнительно высокую стоимость. Диоды Шоттки обладают теми же самыми перспективами, что и полевые транзисторы, кроме возможности электрической подстройки к приему частоты.

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/Гц^{0,5} 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 2×10^{-13} Вт/Гц^{0,5} 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 боло-

метры, характеризующиеся $NEP = 24,7$ пВт (при частоте излучения 4,25 ТГц), измеренной в полосе частот $\Delta\nu = 160$ кГц. В то время как в обзоре [12], эти же значения NEP приводятся с указанием размерности Вт/Гц^{0,5}. Во избежание подобной путаницы мы здесь будем использовать термин пороговая или минимальная разрешимая мощность MDP (Minimum Detectable Power), если шум не приведен к полосе 1 Гц.

Целью настоящей работы является обзор современных терагерцовых 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 ($\nu/\Delta\nu \sim 10^6$), 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 ($\tau \sim 10^{-10}$ – 10^{-11} с). Поэтому детекторы, действующие при комнатной температуре с относительно большим временем отклика ($\tau \sim 10^{-2}$ – 10^{-3} с) и умеренной чувствительностью, могут быть использованы в системах прямого детектирования. Среди таких детекторов для формирования ТГц изображений используются, например, ячейки Голея 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/Гц^{1/2} (таблица) [5].

Параметры некоторых неохлаждаемых ТГц детекторов

Тип детектора	Частота модуляции, Гц	Рабочая частота, ТГц	NEP, Вт/Гц ^{0,5}
Ячейка Голея	≤ 20	≤ 30	$10^{-9}-10^{-10}$
Пьезоэлектрические	$\leq 10^2$	≤ 30	$(1-3)\times 10^{-9}$ (уменьшается с увеличением ν)
Микроболометры	$\leq 10^2$	≤ 30	$10^{-12}-2\times 10^{-13}$ (уменьшается с увеличением ν)
Nb микроболометры	–	≤ 30	5×10^{-11}
Диоды Шоттки	$\leq 10^{10}$	≤ 10	$\leq 10^{-10}$ (уменьшается на несколько порядков при увеличении ν от 0,1 до 10 ТГц)
GaAs HEMT-детектор	$\leq 2\times 10^{10}$	≤ 30	10^{-10} (зависит от длины затвора и напряжения на затворе)
Si MOSFET-детектор	3×10^4	0,645	3×10^{-10}
HEB-детектор	10^8	0,03–2	4×10^{-10} (зависит от ν)

HEMT – High Electron Mobility Transistor – транзисторы с высокой подвижностью электронов; MOSFET – МОП полевые транзисторы; HEB – Hot Electron Bolometer – полупроводниковый болометр на горячих электронах; ν – частота падающего излучения.

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 ($\tau \sim 10^{-6}-10^{-8}$ с) и NEP $\sim 10^{-13}-5\times 10^{-17}$ Вт/Гц^{0,5} при рабочей температуре $T < 4$ К. Болометры, охлаждаемые до $T \sim 100-300$ 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 $\sim 5\times 10^{-17}$ Вт/Гц^{0,5} при $\lambda = 150$ мкм и рабочей температуре $T = 2$ К.

Схематическая диаграмма прямого детектирования показана на рис. 3. 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 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.

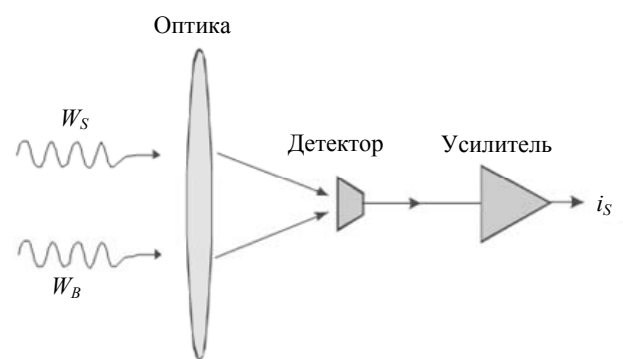


Рис. 3. Схематическое представление прямого детектирования. W_s – сигнальная мощность и W_B мощность фонового излучения, i_s – сигнальный ток [5].

Способность обнаруживать малые сигналы для детекторов с прямым детектированием ограничена непреодолимым шумом фоновых фотонов, который не ста-

новится 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 используют прямое детектирование.

Типы детекторов

Сложность разработки терагерцовых устройств состоит в том, что при детектировании терагерцового излучения перестают действовать некоторые принципы работы фотонных и электронных устройств. Терагерцовое излучение характеризуется малой энергией фотона (4 мэВ для излучения частотой 1 ТГц) и поэтому фотонные терагерцовые 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 пирозлектрические и термопарные приемники (тоже работающие без криогенного охлаждения), и относящийся к числу наиболее широкополосных. Приемник Голея представляет собой разновидность волнометрических 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 Голея) инфракрасного излучения лежит обнаруженный в 1880 г. 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. 4). 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 отклоне-

ния 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 ($D^* > 3 \times 10^9 \text{ смГц}^{0,5} \text{ Вт}^{-1}$) и вольт-ваттную чувствительность ($10^5\text{--}10^6 \text{ В/Вт}$). Чувствитель-

ность 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.

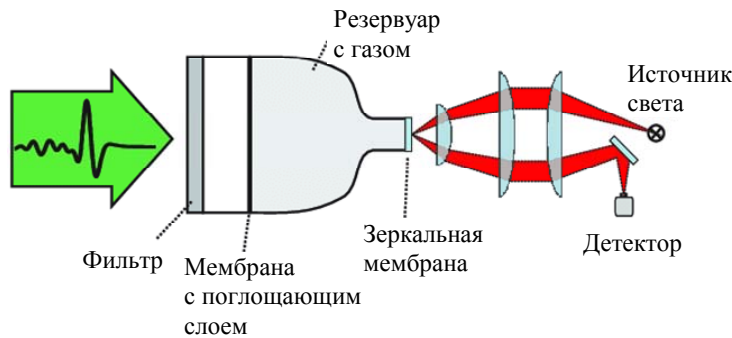


Рис. 4. Принцип работы ячейки Голя.

Диоды с барьерами Шоттки

Другими широко применяемыми детекторами миллиметрового и субмиллиметрового излучения являются диоды Шоттки (ДШ). 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 $T = 4\text{--}300 \text{ К}$. В отличие от обычных диодов на основе $p\text{--}n$ -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 $p\text{-Si/W}$ контакты. При комнатной температуре они имели пороговую мощность $NEP \sim 4 \times 10^{-10} \text{ Вт/Гц}^{0,5}$. Также использовались точечные контакты из вольфрама или бериллиевой бронзы к $n\text{-Ge}$, $n\text{-GaAs}$, $n\text{-InSb}$. SBD на основе GaAs до сих пор используются как смесители в малощумящих гетеродинных приемниках.

Поперечное сечение SBD с эквивалентной схемой перехода показано на рис. 5. Оно состоит из перехода (площадью менее нескольких мкм^2) между платиновым анодом и эпитаксиальным слоем $n\text{-GaAs}$. 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.

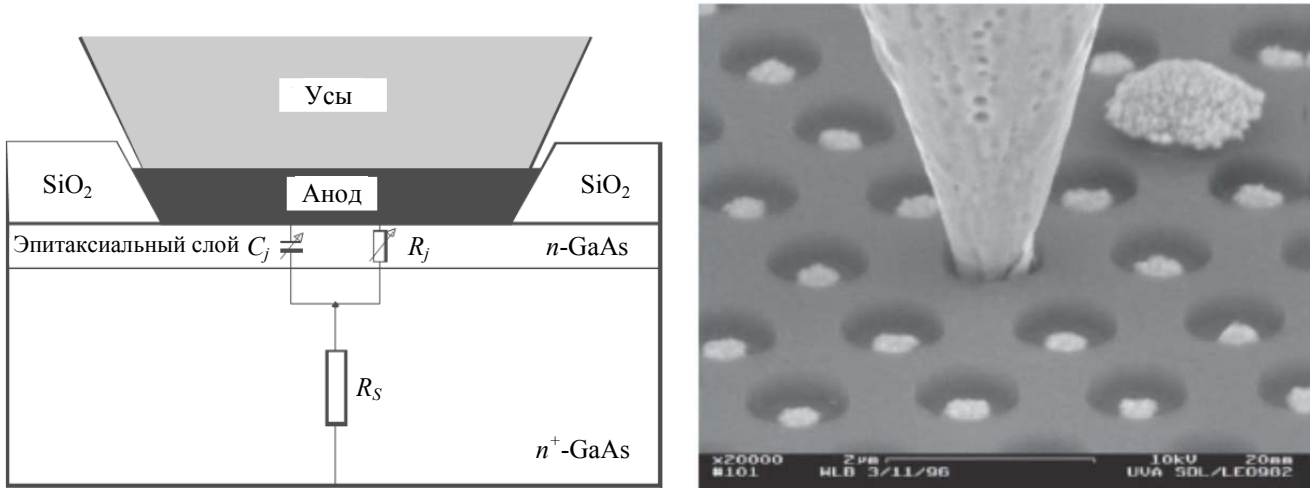


Рис. 5. Поперечное сечение контакта Шоттки с эквивалентной схемой перехода [1, 5].

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 использованию 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 из GaAs удаляется из кристалла и схема создается на оставшейся эпитаксиально выращенной GaAs мембране (рис. 5).

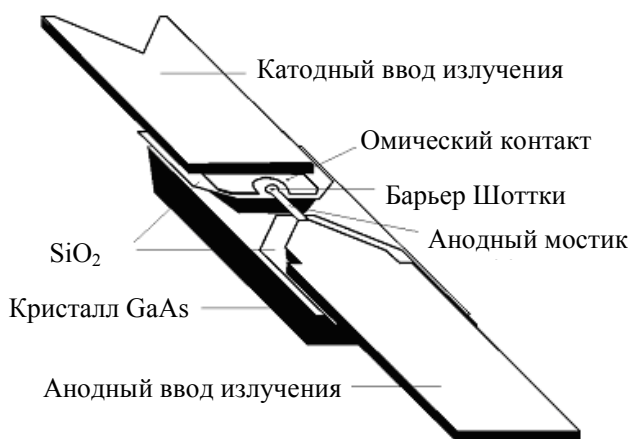


Рис. 6. Схема планарного SBD [5].

Наиболее часто для изготовления смесителей на основе планарных диодов Шоттки используется эпитаксиальный GaAs,

хотя в некоторых приложениях используются и другие материалы A^3B^5 .

SBD смесители могут работать в условиях комнатной температуры до частоты $\nu \sim 25$ ТГц, но реально с относительно низким шумом SBD обычно они применяются в частотном диапазоне до 5 ТГц. Приемники на основе смесителей на основе барьеров Шоттки, действующие при комнатной температуре, обычно имеют радиометрическую чувствительность $\Delta T \sim 0,05$ К при $\nu = 500$ ГГц и $\Delta T \sim 0,5$ 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. 5) 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 высокочастотных применений слой GaAs легируют до концентрации $n \sim (5-10) \times 10^{17}$ см⁻³. Емкость перехода зависит от напряжения, поскольку размер области обеднения зависит от приложенного смещения.

В диапазоне низких частот ($\nu < \sim 0,1$ 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 носителя через барьер (оно составляет около 1 пс), а также время диэлектрической релаксации.

При комнатной температуре SBD с прямым детектированием реализуют NEP около $\sim 3 \times 10^{-10} - 10^{-8}$ Вт/Гц^{0,5} при $\nu = 891$ 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 терагерцовому излучению обеспечивается двумя способами. Первый состоит в применении антенн, связанных с микроболометром резистивным и/или емкостным способом (рис. 7). Второй состоит в применении тонких металлических поглотителей, наносимых на термоизолированную мембрану болометра (рис. 8). 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 порядков меньше длины волны.

В настоящее время в обоих вариантах исполнения на длинах волн ≈ 100 мкм достигнута пороговая мощность $MDP \approx 30-40$ пВт/пиксель на длинах волн 100–200 мкм ($NEP < 4 \times 10^{-13}$ Вт/Гц^{0,5}, 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 кадровая частота не превышает 60–100 Гц. Здесь следует отметить, что

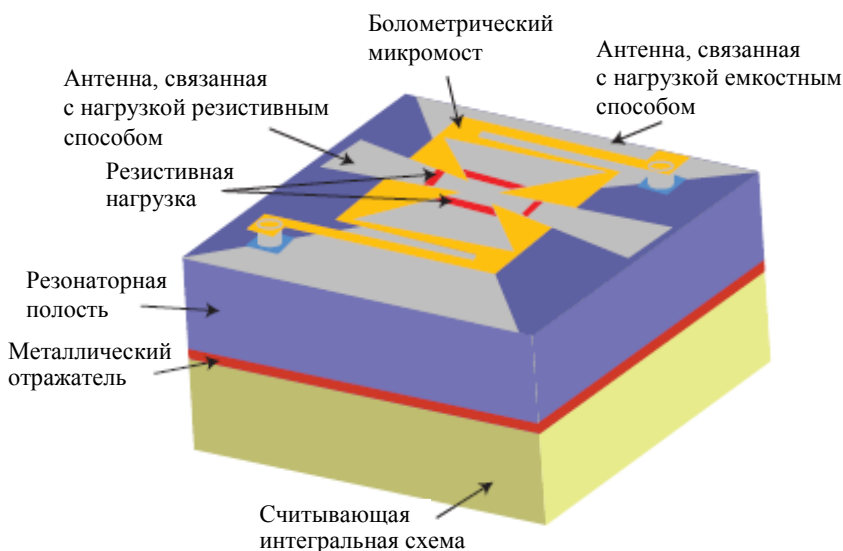


Рис. 7. Схема микроболометра с антеннами, связанными с нагрузками резистивным и емкостным способом.

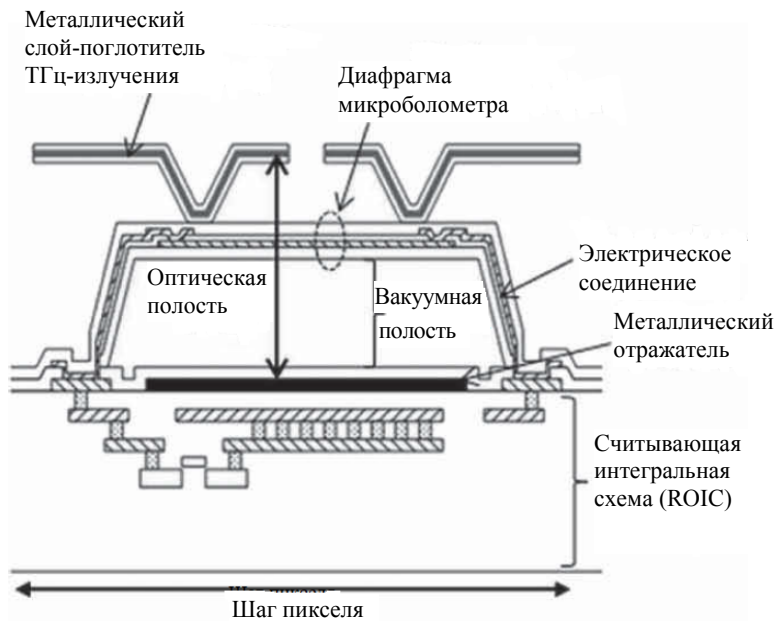


Рис. 8. Схема микроболметра с тонким металлическим поглотителем.

приводимые значения NEP ($> 10^{-10}$ Вт Гц^{-0,5}) для неохлаждаемых матричных микроболметров 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 микроболметрические приемники ТГц диапазона, обладающие MDP ≈ 40 пВт/пиксель. 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 микроболметров повышается до 1000 пВт/пиксель и более [14, 15] вследствие нарушения согласованности импеданса резонатора (оптической полости) и вакуума.

В России неохлаждаемые микроболметрические приемники ТГц излучения с тонким металлическим поглотителем форматом 160×120 и 320×240, обладающие на длине волны 130 мкм пороговой мощностью ≈ 3 нВт/пиксель, были разработаны и продемонстрированы в ИФП СО РАН. Повышенное экспериментальное значение пороговой мощности обусловлено применением германиевых окон, обладающих

высоким поглощением ТГц излучения, и вдвое пониженным напряжением смещения болометра, применяемым для обеспечения большого динамического диапазона, необходимого при работе приемника с мощным ТГц излучением Новосибирского лазера на свободных электронах [16]. Замена германиевого окна на кремниевое и применение повышенного напряжения смещения болометра позволяет понизить пороговую мощность, MDP, до ≈ 250 пВт/пиксель. Дальнейшее понижение MDP требует увеличения толщины оптического резонатора (высоты подвески болометра над мультиплексором) и понижения теплопроводности микроболметров. Также были разработаны и продемонстрированы микроболметрические приемники ТГц излучения антенного типа форматом 53×40 и 32×24 с размерами антенн 150×150 и 250×250 мкм, соответственно, предназначенные для работы в субмиллиметровом диапазоне. Экспериментальное значение MDP, измеренное на длине волны 130 мкм составило ≈ 30 нВт/пиксель. В отличие от сверхпроводящих и металлических болометров, неохлаждаемые болометры на основе оксидов ванадия имеют сопротивление порядка 100 кОм, что представляет определенную трудность для согласования антенны с нагрузкой. В кон-

струкции 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 терагерцовой области микроболометрических матриц с шагом пикселя 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 10000 мкм [15].

Пироэлектрические детекторы

Активным элементом в этих устройствах является пироэлектрический материал, в котором при изменении температуры наводится электрическое поле. Таким образом, пироэлектрический 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 пироэлектрических детекторов, которые также ис-

пользуются в матрицах терагерцовых камер, существенно уступают микроболометрам по чувствительности и близки в части времени релаксации [1].

Детекторы на основе полевых транзисторов

Перспективным детектором ТГц излучения является полевой транзистор с высокой подвижностью электронов (НЕМТ). Оценки реальных параметров полевых транзисторов показывают, что частоты плазменных возбуждений носителей заряда в канале транзистора находятся в ТГц диапазоне [7]. Нелинейные свойства плазменных возбуждений (плазмонов) в двумерном электронном канале НЕМТ могут использоваться для детектирования ТГц излучения [1]. Плазмонные НЕМТ ТГц детекторы могут работать в широком диапазоне ТГц частот при внешней окружающей температуре и показывают хороший баланс между чувствительностью и быстродействием [9, 10]. Исток и сток НЕМТ транзистора связывает плоский канал, заполненный двумерным электронным газом в котором могут распространяться плазменные волны терагерцовой частоты (рис. 9). 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 терагерцовые детекторы, показывают, что FET может быть использован для резонансного и нерезонансного (широкополосного) детектирования (см., например, [2]). При резонансном режиме работы резонансная частота перестраивается путем изменения напряжения на затворе, что может быть использовано для создания селективных перестраиваемых твердотельных детекторов.

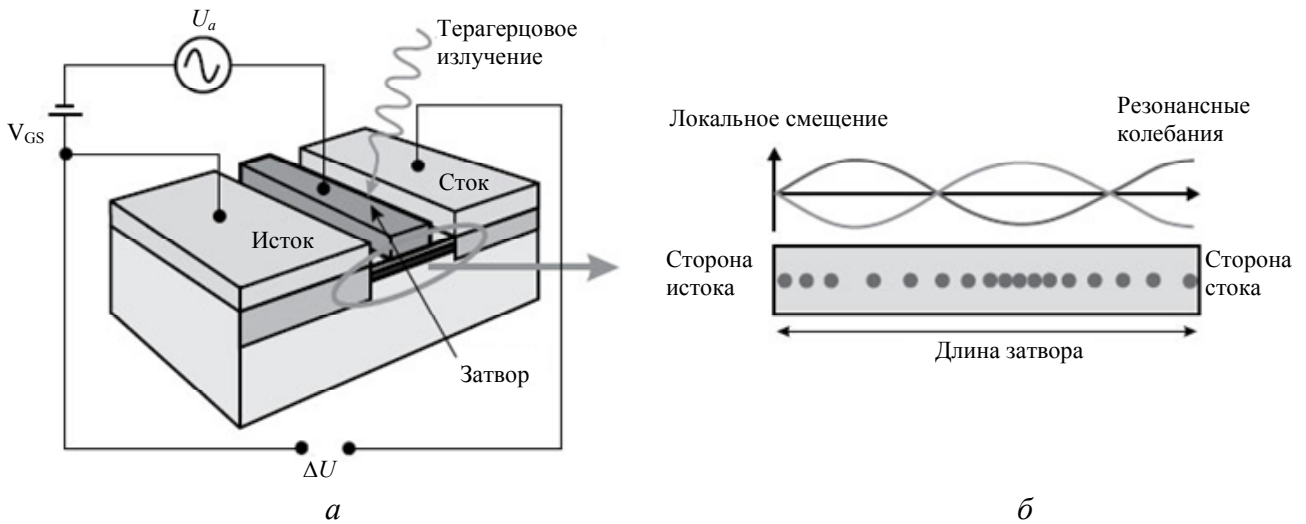


Рис. 9. Схема детектора терагерцового излучения на основе НЕМТ транзистора (а) и колебаний плазмы в транзисторе (б).

Эти приемники могут действовать в широком диапазоне температур вплоть до комнатной температуры. FET-детектирование наблюдалось в НЕМТ-транзисторах на основе GaAs/AlGaAs, InGaP/InGaAs/GaAs, GaN/AlGaN и в кремниевых MOSFET [2, 7]. Осцилляции плазмы также могут наблюдаться в двумерном электронном канале с обратнo 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 вы-

сокой 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 плазмонных детекторов (рис. 10). 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 ГГц, состоят из пикселей размером 1,5×1,5 мм и 0,5×0,5 мм.

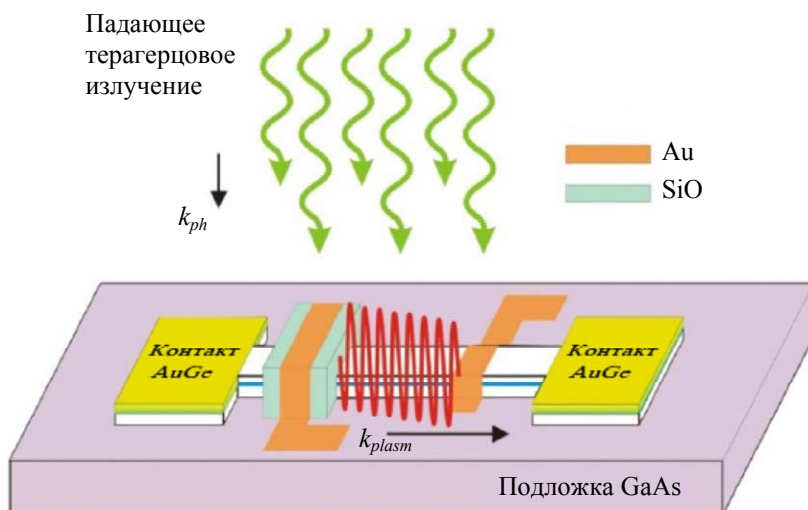


Рис. 10. Детекторы на основе полевых транзисторов «МВЭЙВ»/«Терасенс» [20].

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/Гц^{0,5}, что демонстрирует потенциал Si MOSFET как чувствительных детекторов терагерцового излучения. Также создана матрица фокальной плоскости размером 3×5 на основе Si MOSFET, изготовленная при помощи 0,25 мкм КМОП технологии. Каждый пиксель 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 $NEP 3 \times 10^{-10}$ Вт/Гц^{0,5}, 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 или суб-Кельвиновских температурах и охватывающих 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 терагерцовых 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}.

Неохлаждаемые детекторы на основе микроболометров, 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 $NEP \sim 10^{-12}$ Вт/Гц^{0,5} могут быть использованы во многих спектроскопических приложениях низкого разрешения, пассивных системах досмотра и системах активного наблюдения.

Исследования, направленные на создание новых терагерцовых детекторов, например, на основе низкоразмерных структур из HgCdTe, на основе квантовых колец и квантовых точек Ge/Si, графена и др. будут представлены в части 2 обзора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rogalsky A. Infrared and Terahertz Detectors (Third Edition). New York – CRC Press of Taylor & Francis Group. 2019.

2. Sizov F., Rogalsky A. // Opto-Electronics Review. 2011. Vol. 19. № 3. P. 346.
3. Старцев В. В., Попов В. К., Наумов А. В. // Фотоника. 2017. № 6. С. 98.
4. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Мальцев П. П. // На-но- и микросистемная техника. 2012. № 2. С. 28.
5. Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Кульчицкий Н. А., Мельников А. А., Мальцев П. П. // На-но- и микросистемная техника. 2012. № 3. С. 25.
6. Гибин И. С., Котляр П. Е. // Успехи прикладной физики. 2018. Т. 6. № 2. С. 117.
7. Вакс В. Л., Домрачева Е. Г., Ластовкин А. А., Приползин С. И., Собакинская Е. А., Черняева М. Б., Анфертьев В. А. // Вестник Нижегородского уни-верситета им. Н. И. Лобачевского. 2013. № 6 (1). С. 81.
8. Есман А. К., Кулешов В. К., Зыков Г. Л. // Проблемы физики, математики и техники. 2014. № 4 (21). С. 10.
9. Yachmenev A. E., Lavrukhin D. V., Glinskiy I. A., Zenchenko N. V., Goncharov Yu. G., Spektor I. E., Khabibullin R. A., Otsuji T., Ponomarev D. S. // Opt. Eng. 2019. Vol. 59. № 6. P. 061608. doi: 10.1117/1.OE.59.6.061608.
10. Торхов Н. А., Бабак Л. И., Коколов А. А. // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. Вып. 12. С. 1697.
11. Chevalier C., Mercier L., Duchesne F., Gagnon L., Tremblay B., Terroux M., Génèreux F., Paul-тре J.-E., Provençal F., Desroches Y., Marchese L., Jerominek H., Alain C., Bergeron A. // Proc. of SPIE. 2013. Vol. 8624. P. 86240.
12. Lewis R. A. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2019. Vol. 52. P. 433001.
13. Fukasawa R. // IEEE Trans. Terahertz Sci-ence and Technology. 2015. Vol. 5. № 6. P. 1121.
14. Bolduc M., Terroux M., Tremblay B., Mar-chesse L., Savard E., Doucet M., Oulachgar H., Alain C., Jerominek H., Bergeron A. // Proc. SPIE. 2011. Vol. 8023. P. 80230C.
15. Bolduc M., Terroux M., Marchese L., Trem-blay B., Savard É., Doucet M., Oulachgar H., Alain C., Jerominek H., Bergeron A. // Proc. IEEE. 2011. Vol. 6105155. P. 1-2.
16. Kulipanov G. N., Gavrilov N. G., Knyazev B. A. et al. // Terahertz Science and Technology. 2008. Vol. 1. № 2. P. 107.
17. Oda N., Yoneyama H., Sasaki T., Sano M., Kurashina S., Hosako I., Sekine N., Sudoh T., Irie T. // Proc. of SPIE. 2008. Vol. 6940. P. 69402Y.
18. Sizov F. F., Reva V. P., Golenkov A. G., Zabudsky V. V. // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2011. Vol. 32. P. 1192.
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., Catha-bard O., Barbieri S. // Proc. SPIE. 2012. Vol. 8363. P. 83630D.
20. Shchepetilnikov A. V., Gusikhin P. A., Mu-ravev V. M., Tsydynzhapov G. E., Nefyodov Yu. A., Dremine A. A., Kukushkin I. V. // International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2020. Vol. 41. P. 655. <https://doi.org/10.1007/s10762-020-00692-4>

PACS: 85.60.Gz

Current state and prospects of detectors in the terahertz range. Part 1. Direct detection of terahertz radiation

N. A. Kulchitsky^{1,2}, A. V. Naumov³, V. V. Startsev³, and M. A. Dem'yanenko⁴

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

² MIREA – Russian Technological University (RTU MIREA)
78 Vernardsky Ave., Moscow, 119454, Russia

³ Experimental Design Bureau “ASTROHN”, JSC
1 Park st., Lytkarino, Moscow region, 140080, Russia

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics of SB RAS
13 Lavrentieva Ave., Novosibirsk, 630090, Russia

Received October 28, 2020

The paper discusses the problems associated with the development of technology for terahertz radiation detectors. The main physical phenomena and recent progress in various methods of detecting terahertz radiation (direct detection and heterodyne detection) are considered. Advantages and disadvantages of direct detection sensors and sensors with heterodyne detection are discussed. In part 1, a number of features of direct detection are considered and some types of terahertz direct detection detectors are described. Part 2 will describe heterodyne detection and continue to describe some types of modern photonic terahertz receivers.

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

REFERENCES

1. A. Rogalsky. *Infrared and Terahertz Detectors*. Third Edition (New York: CRC Press of Taylor & Francis Group, 2019).
2. F. Sizov and A. Rogalsky, *Opto-Electronics Review* **19** (3), 346 (2011).
3. V. V. Starcev, V. K. Popov, and A. V. Naumov, *Fotonika*, No. 6, 98 (2017).
4. A. V. Vojcekhovskij, S. N. Nesmelov, N. A. Kul'chickij, A. A. Mel'nikov, and P. P. Mal'cev, *Hanoi mikrosistemnaya tekhnika*, No. 2, 28 (2012).
5. A. V. Vojcekhovskij, S. N. Nesmelov, N. A. Kul'chickij, A. A. Mel'nikov, and P. P. Mal'cev, *Hanoi mikrosistemnaya tekhnika*, No. 3, 25 (2012).
6. I. S. Gibin and P. E. Kotlyar, *Usp. Prikl. Fiz.* **6** (2), 117 (2018).
7. V. L. Vaks, E. G. Domracheva, A. A. Lastovkin, S. I. Pripolzin, E. A. Sobakinskaya, M. B. Chernyaeva, and V. A. Anfert'ev, *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N. I. Lobachevskogo*, No. 6 (1), 81 (2013).
8. A. K. Esman, V. K. Kuleshov, and G. L. Zykov, *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki*, No. 4 (21), 10 (2014).
9. A. E. Yachmenev, D. V. Lavrukhin, I. A. Glinskiy, N. V. Zenchenko, Y. G. Goncharov, I. E. Spektor, R. A. Khabibullin, T. Otsuji, and D. S. Ponomarev, *Opt. Eng.* **59** (6), 061608 (2019), doi: 10.1117/1.OE.59.6.061608.
10. N. A. Torhov, L. I. Babak, and A. A. Kokolov, *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* **53** (12), 1697 (2019).
11. C. Chevalier, L. Mercier, F. Duchesne, L. Gagnon, B. Tremblay, M. Terroux, F. Génereux, J.-E. Paultre, F. Provençal, Y. Desroches, L. Marchese, H. Jerominek, C. Alain, and A. Bergeron, *Proc. of SPIE* **8624**, 86240 (2013).
12. R. A. Lewis, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52**, 433001 (2019).
13. R. Fukasawa, *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology* **5** (6), 1121 (2015).
14. M. Bolduc, M. Terroux, L. Marchese, B. Tremblay, É. Savard, M. Doucet, H. Oulachgar, C. Alain, H. Jerominek, and A. Bergeron, *Proc. SPIE* **8023**, 80230C (2011).
15. M. Bolduc, M. Terroux, L. Marchese, B. Tremblay, É. Savard, M. Doucet, H. Oulachgar, C. Alain, H. Jerominek, and A. Bergeron, *Proc. IEEE* **6105155**, 1–2 (2011).
16. G. N. Kulipanov, N. G. Gavrilov, B. A. Knyazev, et al., *Terahertz Science and Technology* **1** (2), 107 (2008).
17. N. Oda, H. Yoneyama, T. Sasaki, M. Sano, S. Kurashina, I. Hosako, N. Sekine, T. Sudoh, and T. Irie, *Proc. of SPIE* **6940**, 69402Y (2008).
18. F. F. Sizov, V. P. Reva, A. G. Golenkov, and V. V. Zabudsky, *J. Infrared Milli Terahz Waves* **32**, 1192 (2011).
19. F. Simoens, J. Meilhan, B. Delplanque, S. Gidon, G. Lasfargues, J. Lalanne Dera, D. T. Nguyen, J. L. Ouvrier-Buffet, S. Pocas, T. Maillou, O. Cathabard, and S. Barbieri, *Proc. SPIE* **8363**, 83630D (2012).
20. A. V. Shchepetilnikov, P. A. Gusikhin, V. M. Muravev, G. E. Tsydynzhapov, Yu. A. Nefyodov, A. A. Dremin, and I. V. Kukushkin, *International Journal of Infrared and Millimeter Waves* **41**, 655 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10762-020-00692-4>