

УДК 631.372 (024); 631.396

В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, В.П. Мещанов

Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона

Одной из тенденций развития современной радиоэлектроники является освоение терагерцового частотного диапазона, занимающего промежуточное положение между хорошо изученными микроволновым и оптическим участками спектра электромагнитного излучения. В последние годы резко возросло количество фундаментальных и прикладных исследований по этой тематике. В данной работе кратко анализируется состояние электронно-компонентной базы, основных направлений использования и метрологического обеспечения терагерцовой техники. Используются отечественные и зарубежные источники информации, большинство из которых опубликовано в последнее десятилетие.

Ключевые слова: терагерцовый диапазон, электроника, фотоника, диагностика, спектроскопия сред, астрофизические исследования, радиолокация, телекоммуникации, пассивные элементы, активные элементы, измерения.

Терагерцовый диапазон частот электромагнитного спектра (ТГц-диапазон) лежит между областью миллиметровых длин волн и инфракрасным диапазоном (рис. 1). Граничные частоты ТГц-диапазона в настоящее время точно не определены и в разных источниках определяются по-разному. В наиболее широкой интерпретации ТГц-диапазон занимает область частот от 100 ГГц до 10 ТГц (диапазон длин волн от 3 мм до 30 мкм). С другой стороны, в соответствии с ГОСТ 24375–80 и рекомендациями Международного союза электросвязи ТГц-диапазон можно определить как диапазон частот от 300 ГГц до 3 ТГц (диапазон длин волн от 1 до 0,1 мм). Вместе с тем, если следовать стандартам Международной организации по стандартизации (ISO), ТГц-диапазон лежит в области дальнего инфракрасного спектра, границы которого лежат в интервале 300 ГГц и 6 ТГц. Таким образом, в определении границ ТГц-диапазона как со стороны нижних, так и со стороны верхних частот, а также границ лежащего рядом дальнего инфракрасного диапазона имеется неоднозначность.

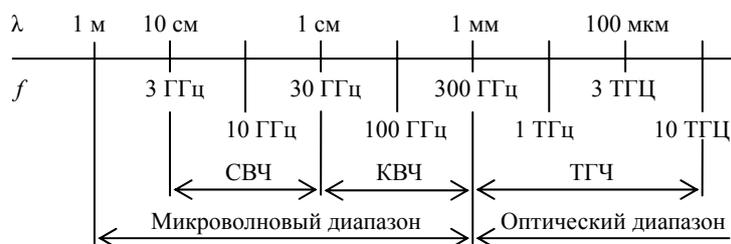


Рис. 1. Спектр электромагнитного излучения

Такая неоднозначность возникла вследствие того, что до последнего времени ТГц-диапазон частот оставался наименее исследованным. В указанном диапазоне плохо работают и радиофизические методы обработки сигнала, и оптические. Однако возможность практического использования терагерцовых частот обусловила активные попытки их освоения [1–16].

Продвижение в область терагерцовых частот осуществлялось с двух направлений: со стороны диапазона миллиметровых волн и со стороны инфракрасного (ИК) спектра излучения. В ходе освоения в методологию исследований ТГц-диапазона привносились методические подходы и технические решения, свойственные как микроволновой технике, так и оптике. В результате и нижняя, и верхняя границы диапазона оказались «размытыми», а методы исследований и практического освоения различными для низкочастотной и высокочастотной областей диапазона.

ТГц-диапазон является областью сближения электроники и фотоники, существенно отличающихся как теоретической базой, так и техникой генерации, осуществления приема и обработки электромагнитных (ЭМ) волн. В основе традиционной электроники лежат классическая теория электромагнетизма и теория переноса, описывающая электрон-дырочное взаимодействие и возни-

кающее в результате излучение, в то время как в основе фотоники лежат квантомеханические принципы взаимодействия излучения и материи. Такой дуализм допускает (и предполагает) использование в ТГц-диапазоне гибридных устройств обработки сигнала, построенных на смешении классических и квантомеханических принципов.

В данном обзоре представлены некоторые аспекты использования терагерцовых волн в различных областях науки и техники, рассмотрены современные активные приборы генерации и управления терагерцовым излучением, а также пассивные радиоэлектронные устройства и компоненты; проведен анализ проблем метрологического обеспечения.

Направления использования. ТГц-диапазон обладает специфическими свойствами, делающими его привлекательным для фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии, медицины (рис. 2).

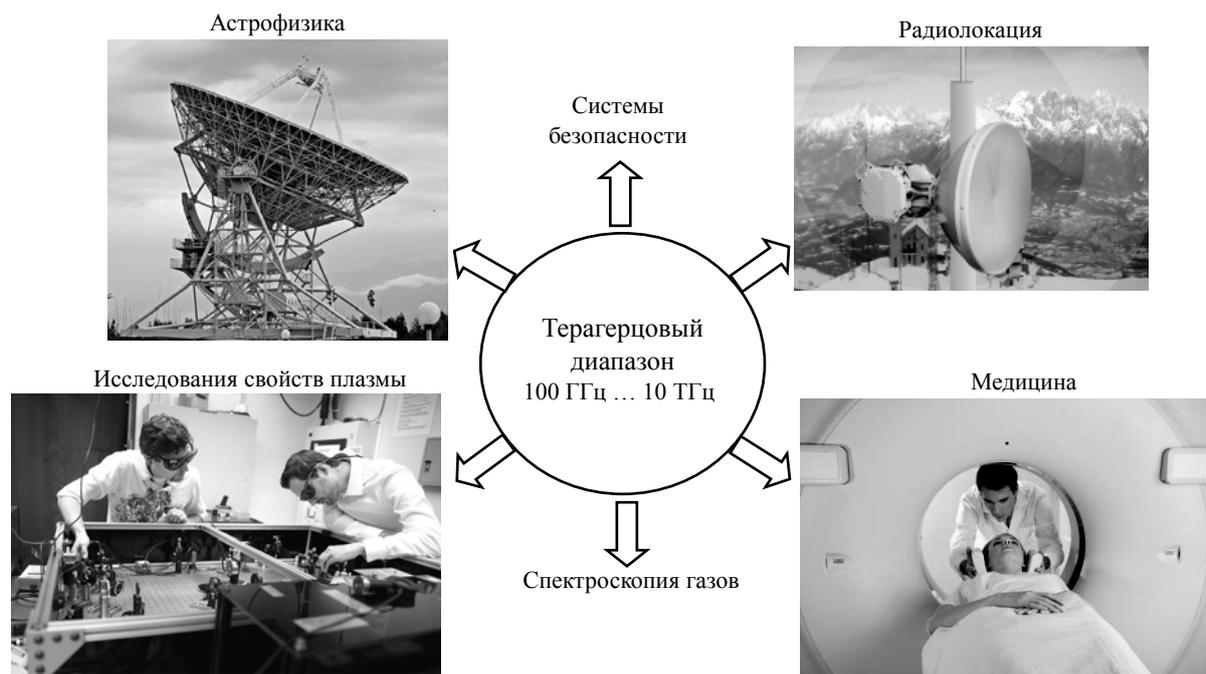


Рис. 2. Области применения терагерцовых волн

В этом диапазоне находятся большое число сильных вращательных переходов молекул, а также линии колебательных и колебательно-вращательных переходов больших молекул, в том числе органических, что открывает возможности их исследования и селективного воздействия на них. Терагерцовые волны перспективны для диагностики и спектроскопии различных сред, включая методы электронного парамагнитного резонанса и ядерного магнитного резонанса высокого разрешения, а также для создания плотной плазмы и управления ее параметрами.

Из-за малой энергии квантов терагерцовое излучение является неионизирующим и относительно безопасным для человека и, следовательно, может использоваться для томографии и других медицинских исследований [17–19]. В частности, так как терагерцовый квант энергии меньше рентгеновского на девять порядков, а изображение в Т-лучах для биосред является более контрастным по сравнению с ИК и оптическими волнами из-за малого рэлеевского рассеяния, Т-волны являются привлекательной альтернативой рентгеновскому излучению при проведении диагностики живых организмов. В настоящее время уже предложены приборы для диагностики рака кожи [20, 21], груди [22, 23], контроля ожоговых раневых поверхностей [24], влагосодержания биотканей [25], выявления зубного кариеса [26].

Терагерцовые волны обладают также и лечебным эффектом благодаря влиянию на реакционную способность атмосферных газов-метаболитов, имеющих спектры поглощения в ТГц-диапазоне. В настоящее время предложены такие методы лечения и операционного вмешательства, как: NO-терапия [27], молекулярная ТГц-акустотерапия [28], ТГц-аэротерапия [29], ингаляционная ТГц-акустотерапия [19], термическая деструкция биотканей [30].

Высокая проникающая способность ТГц-излучения позволяет адаптировать его для обнаружения и идентификации предметов, скрытых за препятствиями, что необходимо для решения задач

обеспечения безопасности [12]. Если объект не содержит молекул воды или других полярных веществ, сильно поглощающих такое излучение, то Т-волны свободно проникают через объект практически без потерь энергии. При этом может наблюдаться резонансное взаимодействие ЭМ-поля с отдельными молекулами и молекулярными комплексами, что позволяет не только выявлять, но и идентифицировать различные среды. Таким образом, можно обнаружить, к примеру, наркотики или взрывчатые вещества [31]. Кроме того, как показали многочисленные экспериментальные исследования, Т-лучи позволяют более эффективно осуществлять контроль спрятанных под одеждой опасных предметов и оружия [6, 9, 10].

В настоящее время ведутся интенсивные исследования процессов взаимодействия ТГЧ-излучения с биологическими тканями [32, 33], полимерами [34, 35], древесиной [36], сверхпроводящими пленками [37], керамикой [38], метаматериалами [39, 40]. В работах [41–46] приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований, посвященных передаче терагерцовых сигналов в земной атмосфере и влиянию осадков, испарений, дыма и тумана на распространение ЭМ-волн.

Спектроскопия веществ различного агрегатного состояния является одним из наиболее перспективных направлений использования ТГЧ-излучения. В работе [19] приведены молекулярные спектры излучения и поглощения газов атмосферного воздуха, метаболитов и загрязнителей воздуха для диапазона 0,1...3,39 ТГц, представляющие интерес с точки зрения экологического мониторинга. Благодаря развитию метода терагерцовой спектроскопии во временной области (THz-TDS), который основан на генерации и детектировании когерентного ТГЧ-излучения с помощью импульсов одного и того же лазера, стало возможным также и изучение физическо-химических свойств некоторых жидкостей [47] и твердых материалов [48].

Терагерцовые телескопы находят все более широкое применение в астрофизических исследованиях фонового космического излучения, для анализа спектров отдельных звезд и галактик, экзопланет, астероидов, комет, а также других космических объектов. Для этих целей используются частоты: 120...180 ГГц [49], 500 ГГц [50], 787...950 ГГц [51]. Новейшие открытия в этой области были сделаны в последние годы с помощью радиотелескопов SOFIA, CCAT, SPICA, ALMA, AMANOGAWA [52, 53]. Наиболее компактным из них можно считать переносной телескоп, предназначенный для размещения на одной из научных станций в Антарктике [50].

Терагерцовые приборы и устройства успешно применяются в настоящее время в измерительной технике, например для исследования субмиллиметрового излучения при пучково-плазменном взаимодействии. В частности, одна из таких радиометрических систем, позволяющая регистрировать ЭМ импульсы с частотой 210...530 ГГц, описана в работе [54]. Другие применения в этой области связаны с оценкой плотности электронного потока как функции координат и времени, а также температуры в ядре плазмы [10, 55].

Терагерцовые волны представляют большой интерес для радиолокационных и телекоммуникационных применений. В большинстве случаев для наземных радиоэлектронных систем преимущества ТГЧ-излучения относительно микроволнового и ИК-излучений проявляются на средних и малых расстояниях. Дело в том, что, как показали результаты исследований [44, 45], затухание терагерцовых сигналов достаточно сильно зависит от влажности атмосферного воздуха и, к примеру, на частоте 400 ГГц может превышать 20 Дб/км при влажности 50...60%. Высота и температура воздуха также оказывают влияние на коэффициент ослабления терагерцовых волн.

На больших высотах влажность уменьшается, увеличивая тем самым дальность передачи сигналов. В [14] теоретически была исследована емкость канала связи с беспилотным летательным аппаратом, находящимся на высоте 5 км на разных частотах. При расчетах учитывались фоновый шум и атмосферное затухание, вызванное дождем. Емкость канала определялась с привлечением теоремы Шеннона–Хартли, и было установлено, что на частотах выше 500 ГГц емкость резко падает, и для передачи сигналов по каналам емкостью более 10 Гбит/с на расстояния до нескольких километров наиболее подходит частотный диапазон 100...300 ГГц.

Одной из серьезных проблем передачи информации в ИК-диапазоне являются искажения фазового фронта волны, вызванные локальными вариациями коэффициента преломления вблизи луча. В итоге детектирование такого сигнала вызывает затруднения. Теоретические прогнозы, а также ряд экспериментальных наблюдений [14] говорят о том, что в ТГЧ-диапазоне эти проблемы не возникают.

Другая проблема, на этот раз в микроволновом диапазоне, связана с расходимостью ЭМ волн при удалении от излучателя из-за дифракции. В работе [7] были проведены оценочные расчеты для двух коммуникационных систем с рабочими частотами 60 и 400 ГГц. Несмотря на то, что ТГЧ-источники уступают по мощности микроволновым, при передаче сигнала на расстояние до 2 км этот недостаток был скомпенсирован более высокой направленностью.

Обзорные работы [14–16, 56, 57] посвящены детальному анализу проблем реализации терагерцевых систем связи для передачи информации. В работах [58–62] приведены экспериментальные результаты исследований пропускной способности и другие коммуникационные характеристики таких систем, полученные на частотах 100...300 ГГц. Большинство из них обладают пропускной способностью 10...20 Гбит/с, однако в работе [57] дано обоснование возможности увеличения данного параметра до 100 Гбит/с.

Нетрадиционные применения ТГЧ-излучения, появившиеся совсем недавно, связаны с такими сферами, как археология и искусствоведение [62].

Активные терагерцевые приборы. Развитие и внедрение ТГЧ-систем различного назначения находятся в прямой зависимости от успехов в области современной электроники и фотоники. Активные приборы ТГЧ-диапазона можно условно разделить на три группы: генераторы, усилители и приемники. Генераторы, в свою очередь, подразделяются на вакуумные лампы [63], твердотельные устройства [64], а также лазерные и фотонные источники. ТГЧ-источники с высоким уровнем мощности классифицируются по двум категориям: с поперечной и продольной модуляцией электронного потока [63]. К первой категории относятся гиротроны и лазеры на свободных электронах, а ко второй – клистроны с распределенным взаимодействием (КРВ), лампы бегущей волны (ЛБВ) и лампы обратной волны (ЛОВ). Уровни рабочих мощностей для вакуумных ТГЧ-приборов варьируются от мВт до ГВт (12 порядков).

Лидирующее положение среди мощных ТГЧ-источников занимают гиротроны, применяемые для разогрева плазмы, термической обработки материалов, радиолокации и телекоммуникации [65]. В Институте прикладной физики (ИПФ) РАН (Нижний Новгород) создан компактный импульсный гиротрон длиной 400 мм, в котором формируется магнитное поле 40 Т, с рабочей частотой 1 ТГц и мощностью до 1,5 кВт [66]. С целью снижения омических потерь охлаждение соленоида осуществляется жидким водородом. Конструкция гиротрона с мощностью 1 кВт, частотой 0,423 ТГц и магнитным полем 8 Т производства КНР описана в работе [67]. Двухчастотный гиротрон (0,54 и 1,08 ТГц) гораздо меньшей мощности, созданный в университете Фукуи (Япония), имеет магнитное поле до 20 Т [68].

Модельный ряд терагерцевых гиротронов фирмы Toshiba (Япония) представлен сразу несколькими разработками, характеристики которых даны в табл. 1. Все они снабжены сверхпроводящими магнитами.

Таблица 1

Гиротроны фирмы Toshiba

| Модель | Частота, ГГц | Мощность, кВт | Апертура волновода, см | Тип волны | Масса, кг | Длина, м |
|--------|--------------|---------------|------------------------|-----------|-----------|----------|
| E3974 | 170 | 500 | 11,6 | T | 640 | 2,96 |
| E3993 | 170 | 1000 | 8 | T | 820 | 3,10 |
| E3965 | 384 | 1,3 | 2,8 | TE26 | 33 | 1,57 |
| E3973 | 576 | 0,8 | 2 | TE26 | 28 | 1,57 |
| E3983 | 874 | 0,6 | 2 | TE19 | 29 | 1,53 |

Как видно из этой таблицы переход к более высоким частотам ведет к снижению выходной мощности источника, что, в свою очередь, снижает эффективность применения устройств ТГЧ-диапазона для некоторых прикладных областей, например радиолокации. Дополнительные сведения о разработках ТГЧ-гиротронов можно найти в [69–72].

Лидерами по созданию КРВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов являются компании CPI (Канада) и SLAC (США). К настоящему времени разработчикам CPI удалось достигнуть частоты 280 ГГц и импульсной мощности 50 Вт [73], но имеющиеся технологии позволяют увеличить рабочие частоты до 700 ГГц [74] и импульсной мощности 2 Вт. Серьезными проблемами на пути дальнейшего развития терагерцевых КРВ являются технологические ограничения, увеличение тепловыделения и перераспределение электронного потока по скоростям [63].

Примером успешной реализации терагерцовых ЛОВ может служить разработка импульсного клинотрона мощностью до 1 кВт и частотой 300 ГГц [75]. ЛОВ ТГц-диапазона находят применение в сфере промышленной диагностики [76] и спектроскопии [77]. Корпусные (30...180 ГГц) и бескорпусные (0,18...1,5 ТГц) ЛОВ выпускаются компанией «Исток», г. Фрязино Московской области [78].

Для успешной реализации ЛБВ ТГц-диапазона необходимо решить сразу несколько проблем, связанных с малыми размерами таких приборов, прецизионным позиционированием электронной пушки внутри системы, поиском путей создания малоразмерных катодов с высокой плотностью тока, обеспечением однородных магнитных полей высокой напряженности и т.д. Эти и некоторые другие проблемы конструирования терагерцовых ЛБВ решены в работах [79–82].

Разработки квантовых каскадных лазеров, функционирующих на частотах до 1,2 и даже до 0,6 ТГц, представлены в [83–85]. Фотодиодные источники с выходной мощностью более 10 Вт на частоте 1 ТГц, описаны в [86, 87]. Еще один тип лазерных источников – лазеры на свободных электронах – также могут быть успешно приспособлены для эксплуатации в терагерцовом диапазоне [63].

Достаточно подробный обзор литературы по применению различных полупроводниковых ТГц-устройств приведен в [88]. Одну группу таких устройств формируют частотные умножители на диодах Шоттки на GaAs. В [89] была предложена новая модель диода Шоттки, адаптированного для работы в терагерцовом диапазоне.

Успехи в развитии методов расчета и технологии изготовления частотных умножителей на планарных диодах Шоттки из GaAs, достигнутые в последние годы, дали возможность изготавливать устройства с выходными мощностями до нескольких сот микроватт на частотах вплоть до 2,7 ТГц [90]. В настоящее время в области твердотельной электроники терагерцового диапазона наблюдается очень быстрый прогресс по созданию более эффективных и дешевых источников. С этой целью здесь успешно применяются, в частности, биполярные транзисторы на гетеропереходах, транзисторы с высокой подвижностью электронов, генераторы на диодах Ганна с частотами 400...500 ГГц, туннельные диоды с частотой 1,04 ТГц [91].

Твердотельные интегральные усилители с выходной мощностью до 10 мВт широко применяются в различных системах терагерцового диапазона с рабочими частотами до 700 ГГц [92]. В некоторых из них используются метаморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов (mHEMT) [93], другие базируются на технологии применения гетероструктурных транзисторов (InP ДНВТ) [94]. Большинство разработок, представленных в [92], находятся на стадии лабораторных испытаний и не достигают частот свыше 1 ТГц.

В качестве приемников ТГц-излучения в настоящее время чаще всего применяются болометрические и диодные детекторы. Появлению сверхпроводниковых болометров (СПБ), принцип работы которых базируется на явлении электронного разогрева [95], в значительной степени способствовал прогресс в области тонкопленочных сверхпроводниковых технологий начала этого века. Уникальные характеристики СПБ – высокая чувствительность и быстродействие до 50 нс – достигаются за счет сильной зависимости сопротивления в области перехода от температуры и быстрой релаксации энергии в сверхпроводниковых пленках толщиной 3–4 нм, являющихся базовым элементом СПБ.

На сайте компании СКОНТЕЛ представлены отечественные разработки по созданию СПБ из тонких пленок MoRe и NbN. Результаты теоретических исследований данных структур представлены в [96–101].

В настоящее время на зарубежных рынках представлены различные болометры терагерцового диапазона. Например, в работе [2], а также на сайте компании *Insight Product Company*, США [102], специализирующейся на разработке и производстве синтезаторов, источников, детекторов, смесителей и умножителей частоты миллиметрового и терагерцового диапазонов, представлены технические характеристики болометров на горячих электронах (hot-electron bolometers – HEBs).

В табл. 2 приведены характеристики сверхпроводящего болометра QNbTES/X фирмы QMC Instruments Ltd., Великобритания. Эта компания предлагает также высокочувствительные болометры на горячих электронах на основе антимонида индия (InSb), отличающегося очень высокой подвижностью электронов. Детектор работает при температуре не более 4,2 К и размещен на кварцевой пластине размерами 5×4,7 мм × 300 мкм [2]. Характеристики одного из них даны в табл. 3.

В волноводных устройствах широко используется традиционный тип детекторов на диодах Шоттки. Широкую номенклатуру волноводных детекторов на диодах Шоттки с нулевым смещением предлагает фирма *Virginia Diodes Inc.*, США [2].

Таблица 2

Параметры СПБ QNbTES/X

| | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Эквивалентная шумовая мощность (NEP) | $< 1 \text{ пВт}/(\text{Гц})^{-1/2}$ |
| Рабочий диапазон частот | 100 ГГц ... 20 ТГц |
| Частота отклика (-3 дБ) | 2 Гц ... 1 кГц |
| Рабочая температура | 8 К |

Таблица 3

Параметры болометра QFI/X

| | |
|--------------------------------------|--|
| Эквивалентная шумовая мощность (NEP) | $> 500 \text{ фВт}/(\text{Гц})^{-1/2}$ |
| Рабочий диапазон частот | 60 ... 500 ГГц |
| Частота отклика (-3 дБ) | 1 МГц |
| Рабочая температура | 4,2 К |

К перспективным детекторам терагерцового излучения следует отнести также смесители на основе сверхпроводниковых туннельных переходов типа СИС (сверхпроводник–изолятор–сверхпроводник) [103], GaGe/GaAs-фотодиоды [104] и пироэлектрические детекторы [105].

Пассивные элементы терагерцовой техники. Для передачи ЭМ-сигналов и энергии в ТГц-устройствах в настоящее время применяются различные волноведущие структуры, в том числе коаксиальные линии, фотонно-кристаллические, диэлектрические и металлические волноводы с полимерными пленками. Использование обычных микроволновых коаксиальных линий и диэлектрических волноводов ближнего инфракрасного диапазона малоэффективно из-за высоких потерь в металле или диэлектрике. За последние годы в этой области удалось добиться снижения потерь со 100 до 1 дБ/км для ТГц-волн [106–112]. Несколько модификаций таких волноводов подробно проанализировано в обзоре [108], где также представлена конструкция круглого металлического волновода с тонкой полимерной пленкой на внутренней поверхности стенки волновода. В таком волноводе распространяется основная волна гибридного типа HE_{11} , а ширина полосы пропускания достигает 1 ТГц. На частоте 2,5 ТГц ослабление составляет менее 1 дБ/м.

Еще одна линия передачи (четырёхслойный металлдиэлектрический круглый волновод) была исследована в [109] на частоте 1 ТГц. Волновод состоит из двух слоев диэлектрика с показателем преломления $n = 3,42$, между которыми располагается медная пленка толщиной 50...500 нм. Толщина внешнего слоя диэлектрика составляет 1 мм, диаметр сердцевины 1...20 мм. Пространство между защитной металлической оболочкой и слоем диэлектрика заполнено воздухом.

Поляризационные устройства различного типа находят широкое применение в средствах связи и радиолокации микроволнового, миллиметрового и терагерцового диапазонов частот. Одной из разновидностей таких устройств являются сеточные поляризаторы (СП), предназначенные для управления параметрами линейно поляризованных ЭМ-сигналов. Подробный сравнительный анализ таких устройств сделан в [1].

В ОАО ЦНИИИА совместно с НПП «НИКА-СВЧ» (г. Саратов) были разработаны СП, выполненные по технологии струйного травления. Данные устройства обеспечивают в диапазоне частот 129...260 ГГц уровень ослабления 33...44 дБ для E -поляризованных волн и 0,05...0,6 дБ для волн с H -поляризацией. Геометрические размеры перемычек составили: ширина – 2...35 мкм, толщина – 20...50 мкм, шаг проволоки – 100 мкм. Результаты теоретических и экспериментальных исследований данных устройств приведены в [1, 113–116].

Терагерцовые СП могут быть также изготовлены по технологии LIGA [117], методом фотолитографии на полимерной основе [118], с помощью нанопечати [119, 120] и на основе натянутых проволочных перемычек круглой формы [6]. Как правило, такие устройства используются в лабораторных условиях, например для изучения фонового космического излучения [121] или для измерения спектра мощности излучения из плазмы [122]. В ряде случаев в ТГц-диапазоне проявляются малоизученные физические эффекты, как, например, аномальные резонансы, для объяснения которых привлекается теория плазмонов [123, 124].

Одномерные периодические структуры (металлические решетки), на базе которых создаются СП, также успешно применяются и для фильтрации сигналов [125]. Решетки, выполненные на основе графена, выполняют функции поглотителей Т-волн [126].

Двумерные метаматериалы, получившие также название частотно-селективные поверхности (ЧСП), находят все более широкое распространение в терагерцовой технике в качестве фильтров [127–129], поглотителей [130, 131], модуляторов [132], антенн [133] и т.д. ЧСП представляют собой планарные периодические системы с элементами рассеяния (ЭР), выполненными либо в виде отверстий в экранах [127], либо в виде участков металлизации на диэлектрическом основании [130]. Электродинамические характеристики ЧСП зависят от размеров отдельных ЭР, их периодичности, толщины металлических и диэлектрических слоев, электрофизических свойств материалов.

В работе [134] были проведены исследования ЧСП с крестообразными ЭР, созданные по фотолитографической технологии нанесения золотых и свинцовых пленок на миларовую подложку. Измерения проводились в диапазоне 1,5...3 ТГц для металлических пленок различной толщины при разных температурах.

Двухслойные ЧСП с крестообразными РЭ в виде золотой фольги толщиной 100 нм на стеклянной основе были рассмотрены в работе [135]. Экспериментальные исследования и численное моделирование таких структур приводились для частотного диапазона 0,2...0,8 ТГц при толщине диэлектрического основания 150 мкм. Полученные результаты позволили авторам [135] разработать каскадный полосно-пропускающий фильтр с центральной частотой 0,48 ТГц.

Важным элементом многих систем ТГЧ-диапазона являются приемопередающие антенны различных типов (печатные и фотопроводящие) [136–138]. Фотопроводящие антенны (ФА) обычно выполняются на базе копланарной полосковой структуры. Первая из них имеет резонансную частоту 100 ГГц [136]. Ширина внутреннего проводника копланарной линии составляет 0,06 мм при ширине самой линии 0,1 мм. В конструкции антенны использованы гетероструктурный диод и силиконовая подложка. Вторая конструкция [137] предназначена для работы в широком частотном интервале, включая частоту 125 ГГц.

В последние годы было предложено довольно много оригинальных конструкций антенн ТГЧ-диапазона. В частности, в работе [139] представлена планарная антенная решетка с элементами в форме галстука-бабочки и размерами 9×16 мкм для детектирования слабых сигналов в диапазоне 1,89...14,64 ТГц. Линзовая антенна для решетки с рабочей частотой 550 ГГц и технология ее изготовления описаны в [140]. Еще одна линзовая антенна, но на этот раз вытекающих волн, интегрированная на одной подложке со сверхпроводящим детектором для диапазона 0,15...1,5 ТГц, была разработана в работе [141]. Терагерцовая антенна вытекающих волн может быть реализована, например, с привлечением такого нового конструкционного материала, как графен. Именно такая конструкция была предложена в [142] для электронно-лучевого сканирования в ТГЧ-диапазоне. Наконец, в работе [143] была рассмотрена спиральная антенна, выполненная на композитной подложке диэлектрик–полупроводник с улучшенными по сравнению с аналогами электродинамическими характеристиками. Подробный анализ рупорных ТГЧ-антенн можно найти в [144].

Развитие современных микромашинных (MEMS) технологий изготовления микроминиатюрных устройств миллиметрового и терагерцового диапазонов позволят изготавливать весьма сложные узлы и элементы. Примером таких устройств может служить смеситель субгармоник с рабочей частотой 500 ГГц, описанный в [12]. Апертура входного волноводного элемента данного смесителя составляет 800×400 мкм [145]. Конструкции аналогичных смесителей ТГЧ-диапазона представлены в [145–147].

Последние достижения в области MEMS-технологий позволяют реализовывать коаксиальные волноведущие линии с Т-волной, габаритные размеры которых составляют от 50 до 800 мкм [148]. Для них характерна сверхмалая дисперсия основной волны до частот порядка 400...500 ГГц, в зависимости от размера и волнового сопротивления линии, и низкие потери (0,1 дБ/см на частоте 50 ГГц) [149]. За счет шероховатости центрального проводника и скин-эффекта потери могут возрасти до 0,22 дБ/см в W-диапазоне при среднеквадратичном значении шероховатости 0,1 мкм.

К настоящему времени уже созданы и прошли экспериментальную апробацию такие пассивные компоненты ТГЧ-техники, как аттенюаторы [150], кольцевые резонаторы для лазерных источников [151], волноводные фильтры [152], замедляющие системы для ЛБВ [79, 153], поляризационные преобразователи [154, 155], переходы [156–158], модуляторы [159].

Измерения в ТГЧ-диапазоне. В связи с тем, что коммерческое освоение терагерцового диапазона только началось и терагерцовая метрология, включая методы измерений и контрольно-измерительную аппаратуру, находится на ранней стадии развития, метрологическая инфраструктура – нормативно-техническая документация, методология, службы аттестации и калибровки измеритель-

ных приборов – также только начинают развиваться, причем ряд зарубежных фирм делают попытки расширить стандарты и нормы СВЧ- и оптического диапазонов на терагерцовый участок спектра.

Необходимо отметить, что в настоящее время номенклатура серийно выпускаемой контрольно-измерительной аппаратуры ограничена. Подробный обзор метрологического обеспечения и электронно-компонентной базы измерительной техники ТГЧ-диапазона сделан в работах [1, 2, 160].

Измерения мощности являются одним из основных типов измерений в терагерцовом диапазоне частот. Это связано, в частности, с необходимостью разработки и калибровки генераторов. Измеритель абсолютной терагерцовой мощности, выпускающийся фирмой *Thomas Keating Ltd.*, состоит из двух компонентов: измерительной головки и блока обработки сигнала на базе модуля сбора данных USB-6211 фирмы *National Instrument* [2]. Он предназначен для измерения мощности терагерцовой ЭМ-волны в открытом пространстве. Прибор обеспечивает точность 10% при эквивалентной шумовой мощности порядка 5 мкВт/Гц^{1/2}. Диапазон рабочих частот – от 30 ГГц до 3 ТГц и выше. Измерительная головка представляет собой фотоакустический детектор. Калибровка осуществляется в программно-управляемом режиме путем нагрева тонкой металлической пленки.

Измерения S-параметров в ТГЧ-диапазоне частот проводятся, как правило, с помощью векторных анализаторов цепей миллиметрового диапазона. Ряд зарубежных компаний, специализирующихся на производстве векторных анализаторов цепей, активно продвигают свою продукцию от 110 ГГц вверх по диапазону [2]. Среди них фирмы *Agilent Technologies, Inc.*, *Rohde&Schwarz*, *OML, Inc.*, *Virginia Diodes, Inc.* и др.

В работе [161] описана схема для проведения измерений фазовых шумов ТГЧ-сигналов с верхней границей частотного диапазона 670 ГГц. Новая методика бесконтактного измерения параметров матрицы рассеяния произвольного ТГЧ-многополюсника описана в [162]. Вопросам калибровки измерительных систем для анализа волноводных элементов посвящены работы [163–165]. Прямые измерения влияния шероховатости на электропроводность пассивных ТГЧ-элементов были сделаны в [166].

Большой интерес для изучения процессов взаимодействия Т-волн с различными средами представляют данные о магнитных и диэлектрических свойствах этих сред. Для проведения экспериментальных исследований различных веществ методом дисперсионной Фурье-спектроскопии в работе [167] были разработаны комплект квазиоптических узлов с пьезоэлектрическим управлением и измерительная схема для диапазона частот 0,1...3 ТГц. Методом терагерцовой спектроскопии во временной области в [168] были исследованы величины коэффициентов преломления и поглощения образцов мальтозы.

Вода играет наиболее важную роль на процессы взаимодействия. В [169] разработана математическая модель для расчета комплексной диэлектрической проницаемости воды для различных значений ее солёности (s , ‰). Для $s = 0$ ‰ модель справедлива в широком диапазоне частот вплоть до 500 ГГц и температур $-20...+40$ °С. Эта модель хорошо согласуется с экспериментальными данными, установленными в [170] для субмиллиметрового диапазона.

Экспериментальные исследования, проведенные в [36] для диапазона частот 0,1...0,6 ТГц и трех образцов древесины разных сортов, показали наличие эффекта двулучепреломления, вызванного разницей показателей преломления волокон древесины в направлениях, параллельном и перпендикулярном вектору напряженности электрического поля.

Заключение. Очевидные преимущества ТГЧ-диапазона: отсутствие ионизирующего воздействия, большая информационная емкость, способность проникать через непрозрачные объекты, возможность высоконаправленного излучения и некоторые другие – обусловили быстрое развитие терагерцовой техники во всем мире. Эти преимущества определяют привлекательность практического применения Т-волн для создания высокоскоростных линий связи, высокоточных РЛС, способных работать в сложной электромагнитной обстановке, систем получения изображений с очень высоким разрешением, устройств дистанционной идентификации химических веществ и прочей военной и гражданской техники.

Приведенный обзор свидетельствует о значительных успехах, достигнутых в настоящее время в области разработки терагерцовых технологий, и быстром развитии электронной компонентной базы ТГЧ-диапазона. Дальнейшее усовершенствование радиоэлектронных приборов и компонент ТГЧ-диапазона требует развития метрологической базы, включая разработку нормативно-технической документации, стандартов, методов и методик измерения параметров терагерцовой ЭКБ, необходимого контрольно-измерительного оборудования. При этом процессы изготовления и

производства терагерцевых компонентов зачастую остаются сложными и трудоёмкими, вследствие чего их стоимость остаётся крайне высокой.

Литература

1. Устройства поляризации радиоволн в терагерцевом диапазоне частот / под ред. А.С. Якунина. – М.: Радиотехника, 2012. – 256 с.
2. Терагерцевый диапазон частот: электронная компонентная база, вопросы метрологического обеспечения / С.А. Алавердян, С.И. Боков, В.О. Булгаков, Н.А. Зайцев, В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, Ю.Ю. Катушкин, В.В. Комаров, А.П. Креницкий, В.П. Мещанов, С.А. Савушкин, А.В. Сыромятников, А.С. Якунин // *Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ.* – М.: ЦНИИ «Электроника», 2012. – 74 с.
3. Царев М.В. Генерация и регистрация терагерцевого излучения ультракороткими лазерными импульсами: учеб. пособие. – Нижний Новгород: НГУ, – 2011. – 75 с.
4. Zhang X.-C. Introduction to THz Wave Photonics / X.-C. Zhang, J Xu. – Berlin: Springer, 2010.
5. Terahertz optoelectronics / Edited by K. Sakai. – Berlin : Springer, 2005. – P. 63–97.
6. Lee Y.-S. Principles of Terahertz Science and Technology. – Berlin: Springer, 2009. – P. 159–170.
7. Mann C.M. Towards terahertz communication systems, Terahertz sources and systems / Ed by R. Miles et al. – Amsterdam: Kluwer Academic, 2001. – P. 261–267.
8. The Terahertz Wave eBook. / Technical Overview. Zomega Terahertz Corporation. – 2012. – 84 p.
9. Handbook of terahertz technology for imaging, sensing and communications / Edited by Daryoosh Saeedkia. – Cambridge: Woodhead Publishing, 2013. – 688 p.
10. Siegel P.H. Terahertz techonlogy // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2002. – Vol. 50, No 3. – P. 910–928.
11. Siegel P.H. Terahertz technology in biology and medicine // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2004. – Vol. 52, No 10. – P. 2438–2447.
12. De Maagt P. Terahertz science, engineering and systems – from space to earth applications / P. De Maagt, P.H. Bolivar, C. Mann; ed. by K. Chang // *Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering.* – N.Y.: Wiley-Interscience, 2005. – P. 5176–5194.
13. Kukutsu N. Overview of millimeter and terahertz wave application research / N. Kukutsu, Y. Kado // *NTT Technical Review.* – 2009. – Vol. 7, No 3. – P. 1–5.
14. Federici J. Review of terahertz and subterahertz wireless communications / J. Federici, L. Moeller // *Journal of Applied Physics.* – 2010. – Vol. 107, No 11. – Article ID 111101. – 22 p.
15. Song H.-J. Present and future of terahertz communications / H.-J. Song, T. Nagatsuma // *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology.* – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 256–263.
16. Armstrong C.M. The truth about terahertz // *IEEE Spectrum.* – 2012. – No 9. – P. 36–41.
17. THz medical imaging: in vivo hydration sensing / Z.D. Taylor, R.S. Singh, D.B. Bennett, et al. // *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology.* – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 201–219.
18. Ajito K. THz chemical imaging for biological applications / K. Ajito, Y. Ueno // *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology.* – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 293–300.
19. Терагерцевая техника и ее применение в биомедицинских технологиях / Ю.В. Гуляев, А.П. Креницкий, О.В. Бецкий, А.В. Майбородин, В.Ф. Киричук // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2008. – № 9. – С. 30–35.
20. Terahertz pulse imaging in reflection geometry of skin cancer and skin tissue / R.M. Woodward, B.E. Cole, V.P. Wallace, R.J. Pye, D.D. Arnone, E.H. Linfield, M. Pepper // *Physics in Medicine and Biology.* – 2002. – Vol. 47. – P. 3853–3855.
21. Simulation of terahertz pulse propagation in biological systems / E. Pickwell, B.E. Cole, A.J. Fitzgerald, V.P. Wallace, M. Pepper // *Applied Physics Letters.* – 2004. – Vol. 84. – P. 2190–2192.
22. Terahertz pulsed imaging of human breast tumors / A.J. Fitzgerald, V.P. Wallace, M. Jimenez-Linan, L. Bobrow, R.J. Pye, A.D. Purushotham, D.D. Arnone // *Radiology.* – 2006. – Vol. 239. – P. 533–540.
23. Terahertz pulsed spectroscopy of freshly excised human breast cancer / P.C. Ashwort, E. Pickwell-MacPherson, E. Provenzano, S.E. Pinder, A.D. Purushotham, M. Pepper, V.P. Wallace // *Optics Express.* – 2009. – Vol. 17. – P. 12444–12454.
24. Reflective terahertz imaging of porcine skin burns / Z.D. Taylor, R.S. Singh, M.O. Culjat, J.Y. Suen, W.S. Grundfest, H. Lee, E.R. Brown // *Optics Letters.* – 2008. – Vol. 33. – P. 1258–1260.
25. Stratified media model for terahertz reflectometry of the skin / D.B. Bennett, W. Li, Z.D. Taylor, W.S. Grundfest, E.R. Brown // *IEEE Sensors.* – 2010. – Vol. 11. – P. 1530–1534.

26. Spectroscopic study of human teeth and blood visible to terahertz frequencies for clinical diagnostics of dental pulp vitality / M. Hirmer, S.N. Danilov, S. Giglberger, J. Putzger, A. Niklas, A. Jager, K.A. Hiller, S. Loffler, G. Schmalz, B. Redlich, I. Schulz, G. Monkman, S.D. Ganichev // *International Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. – 2012. – Vol. 33. – P. 366–375.
27. Оксид азота и электромагнитное излучение КВЧ / В.Ф. Киричук, А.П. Креницкий, А.В. Майбородин и др. // *Биомедицинские технологии и радиоэлектроника*. – 2002. – № 10–11. – С. 95–108.
28. Майбородин А.В. Молекулярная КВЧ-акустотерапия / А.В. Майбородин, А.П. Креницкий, О.В. Бецкий // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. – 2003. – № 4. – С. 8–10.
29. Креницкий А.П. КВЧ-аэротерапия – новый, природный, естественный, экологически чистый метод лечения / А.П. Креницкий, А.В. Майбородин // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. – 2002. – № 4. – С. 21–23.
30. Neelakanta P.S. Conceiving THz endometrial ablation: feasibility, requirements and technical challenges / P.S. Neelakanta, B. Sharma // *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 4. – P. 402–408.
31. Kemp M.C. Explosive detection by terahertz spectroscopy – a bridge too far // *IEEE Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 282–292.
32. Terahertz time-domain spectroscopy of human blood / C.B. Reid, G. Reese, A.P. Gibson, V.P. Wallace // *Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 4. – P. 363–367.
33. Theoretical estimation of safety thresholds for terahertz exposure of surface tissues / M. Saviz, O. Spathmann, J. Streckert, V. Hansen, M. Clemens, R. Faraji-Dana // *Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 5. – P. 635–640.
34. Investigating material characteristics and morphology of polymers using terahertz technology / B.M. Fischer, S. Wietzke, M. Reuter, O. Peters, R. Gente, C. Jansen, N. Vieweg, M. Koch // *Transactions of Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 3. – P. 259–268.
35. Jin Y.S. Terahertz dielectric properties of polymers / Y.S. Jin, G.J. Kim, S.G. Jeon // *Journal of Korean Physics Society*. – 2006. – Vol. 49, No 2. – P. 513–517.
36. Todoruk T.M. Origin of birefringence in wood at terahertz frequencies / T.M. Todoruk, I.D. Hartley, M.W. Reid // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, No 1. – P. 123–130.
37. Electrodynamic of the superconducting state in ultra-thin films at THz frequencies / U.S. Pracht, E. Heintze, C. Clauss, D. Hafner, R. Bek, D. Werner, S. Gelhorn, M. Scheffler, M. Dressel, D. Sherman, B. Gorshunov, K.S. Il'in, D. Henrich, M. Siegel // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 3. – P. 269–280.
38. Fabrication and performance of TiO₂-ceramic-based metamaterials for terahertz frequency range / K. Takano, Y. Yakiyama, K. Shibuya, K. Izumi, H. Miyazaki, Y. Jimba, F. Miyamaru, H. Kitahara, M. Hangyo // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 6. – P. 812–819.
39. Withayachumnankul W. Metamaterials in the Terahertz regime / W. Withayachumnankul, D. Abbott // *IEEE Photonics Journal*. – 2009. – Vol. 1, No 2. – P. 99–118.
40. Complementary planar terahertz metamaterials / H.-T. Chen, J.F. O'Hara, A.J. Taylor, R.D. Averitt // *Optics Express*. – 2007. – Vol. 15, No 3. – P. 1084–1095.
41. Yang Y. Broadband THz pulse transmission through the atmosphere / Y. Yang, M. Mandehgar, D.R. Grischkowsky // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 264–273.
42. Van Exter M. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor / M. Van Exter, C. Fattinger, D. Grischkowsky // *Optics Letters*. – 1989. – Vol. 14. – P. 1128–1130.
43. Yang Y. Measurement of the transmission of the atmosphere from 0.2 to 2 THz / Y. Yang, A. Shuttler, D. Grischkowsky // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19. – P. 8830–8838.
44. Atmospheric attenuation of 400 GHz radiation due to water vapor / M.J. Weber, B.B. Yang, M.S. Kulie, R. Bennartz, J.H. Booske // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, No 3. – P. 355–360.
45. Rosker M.J. Imaging through the atmosphere at terahertz frequencies / M.J. Rosker, H.B. Wallace // *Proceedings of the International IEEE/MTT-S*. – Honolulu, USA, 2007. – P. 773–776.
46. Brown E.R. Fundamentals of terrestrial millimeter-wave and THz remote sensing // *Int. J. High Speed Electronics and Systems*. – 2003. – Vol. 13, No 4. – P. 995–1097.
47. Combined THz and Microwave dielectric spectroscopy of intermolecular interactions in homologous protic ionic liquids / M. Kruger, M.-M. Huang, E. Brundermann, H. Weingartner, M. Havenith // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 313–320.

48. Tanaka K. THz nonlinear spectroscopy of solids / K. Tanaka, H. Hirori, M. Nagai // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 301–312.
49. Metal-mesh achromatic half-wave plate for use at submillimeter wavelengths / G. Pisano, G. Savini, P.A. Ade, V. Haynes // *Applied Optics*. – 2008. – Vol. 47, No 33. – P. 6251–6256.
50. Development of a transportable telescope for galactic survey at 500 GHz in Antarctica / S. Ishii, M. Seta, N. Nakai, Y. Miyamoto, M. Nagai, H. Arai, H. Maezawa, T. Nagasaki, N. Miyagawa, H. Motoyama, Y. Sekimoto, L. Bronfman // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 1. – P. 15–24.
51. The first six ALMA band 10 receivers / Y. Fujii, A. Gonzalez, M. Kroug, K. Kaneko, A. Miyachi, T. Yokoshima, K. Kuroiwa, H. Ogawa, K. Makise, Z. Wang, Y. Uzawa // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 1. – P. 39–49.
52. Stacey G.J. THz low resolution spectroscopy for astronomy // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 241–255.
53. The AMANOGAWA-2SB galactic plane survey I. Data on the galactic equator / T. Yoda, T. Handa, K. Kohno, T. Nakajima, M. Kaiden, Y. Yonekura, H. Ogawa, J. Morino, K. Dobashi // *Astronomic Society of Japan*. – 2010. – Vol. 62. – P. 1277–1289.
54. Многоканальная радиометрическая система для регистрации субмиллиметрового излучения при пучково-плазменном взаимодействии / С.А. Кузнецов, А.В. Аржанников, А.В. Гельфанд, А.В. Зоренко, Б.П. Горшунов // *Вестник Новосибирского государственного университета*. – 2010. – Т. 5, вып. 3. – С. 5–19.
55. Development of a mm-wave imaging system for the W7-AS fusion experiment / S. Baumel, G. Michel, M. Rodrigues-Girones, H.L. Hartnagel, H.J. Hartfuß // *Proceedings of the 8th Int. Terahertz Electron. Conf.* – Darmstadt, Germany, 2000. – P. 193–196.
56. Kleine-Ostermann T. A review on terahertz communication research / T. Kleine-Ostermann, T. Nagatsuma // *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*. – 2011. – Vol. 32, No 2. – P. 143–171.
57. Terahertz wireless communications based on photonics technologies / T. Nagatsuma, S. Horiguchi, Y. Minamikata, Y. Yoshimizu, S. Hisatake, S. Kuwano, N. Yoshimoto, J. Terada, H. Takahashi // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21, No 21. – P. 23736–23747.
58. 10-Gbit/s bi-directional and 20-Gbit/s uni-directional data transmission over a 120-GHz-band wireless link using a finline ortho-mode transducer / J. Takeuchi, A. Hirata, H. Takahashi, N. Kukutsu // *Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference*. – Yokohama, Japan, 2010. – P. 195–198.
59. Optically power supplied Gbit/s wireless hotspot using 1.55 μm THz photomixer and heterodyne detection at 200 GHz / G. Ducournau, P. Szriftgiser, D. Bacquet, A. Beck, T. Akalin, E. Peytavit, M. Zakoune, J.F. Lampin // *Electronics Letters*. – 2010. – Vol. 46, No 19. – P. 1349–1351.
60. All active MMIC-based wireless communication at 220 GHz / I. Kallfass, J. Antes, T. Schneider, F. Kurz, D. Lopez-Diaz, S. Diebold, H. Massler, A. Leuther, A. Tessmann // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 2. – P. 477–487.
61. 300 GHz transmission system / C. Jastrow, K. Münter, R. Piesiewicz, T. Kürner, M. Koch, T. Kleine-Ostmann // *Electronics Letters*. – 2008. – Vol. 44, No 3. – P. 213–214.
62. A survey of terahertz applications in cultural heritage conservation science / J.B. Jackson, J. Bowen, G. Walker, J. Labaune, G. Mourou, M. Menu, K. Fukunaga // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 220–231.
63. Vacuum electronic high power terahertz sources / J.H. Booske, R.J. Dobbs, C.D. Joye, C.L. Kory, G.R. Neil, G.S. Park, J. Park, R.J. Temkin // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 54–75.
64. Chattopadhyay G. Technology, capability, and performance of low power terahertz sources // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 33–53.
65. Kartikeyan M.V. Gyrotrons, high power microwave and millimeter wave technology / M.V. Kartikeyan, E. Borie, M.K.A. Thumm. – N.Y.: Springer-Verlag, 2004. – 227+xi p.
66. Glyavin M.Yu. Generation of 1.5-kW, 1 THz coherent radiation from a gyrotrone with a pulsed magnet field / M.Yu. Glyavin, A.G. Luchinin, G.Yu. Golubiatnikov // *Physics Review Letters*. – 2008. – Vol. 100. – 015101 p.
67. A 0.423 THz second harmonic gyrotron oscillator / Y. Yan, X. Li, X. Yuan, W. Fu, D. Liu // *Chinese Journal of Electronics*. – 2013. – Vol. 22, No 2. – P. 415–418.
68. A THz gyrotron FU CW III with a 20 T superconducting magnet / T. Idehara, I. Ogawa, H. Mori, S. Kobayashi // *Journal of Plasma Fusion Research. SERIES*. – 2009. – Vol. 8. – P. 1508–1511.

69. Братман В.Л. Субтергерцовые и терагерцовые гиротроны с большой орбитой / В.Л. Братман, Ю.К. Калынов, В.Н. Мануилов // Известия вузов. Радиофизика. – 2009. – Т. 52, № 7. – С. 525–535.
70. Gyrotron development for high power THz technologies at IAP RAS / V.L. Bratman, A.A. Bogdashov, G.G. Denisov, M.Yu. Glyavin, Yu.K. Kalynov, A.G. Luchinin, V.N. Manuilov, V.E. Zapevalov, N.A. Zavolsky, V.G. Zorin // Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves. – 2012. – Vol. 33, No 7. – P. 715–723.
71. Nanosecond pulses in a THz gyrotron oscillator operating in a mode-locked self-consistent Q-switch regime / S. Alberti, F. Braunmueller, T.M. Tran, J. Genoud, J.P. Hogge, M.Q. Tran, J.P. Ansermet // Physics Review Letters. – 2013. – Vol. 111, No 20. – 205101 p.
72. THz gyrotrons: status and possible optimization / M.Yu. Glyavin, N.S. Ginzburg, A.L. Goldenberg, G.G. Denisov, A.G. Luchinin, V.N. Manuilov, V.E. Zapevalov, I.V. Zotova // Terahertz Science and Technology. – 2012. – Vol. 5, No 2. – P. 67–77.
73. Григорьев А.Д. Мощные источники когерентного излучения терагерцового диапазона // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Саратов, 2014. – С. 11–18.
74. Sub-millimeter waves from a compact, low voltage extended interaction klystron / A. Roitman, D. Berry, M. Hyttinen, B. Steer // Proceedings of the IRMMW-THz Conference. – Cardiff, UK, 2007. – P. 892–894.
75. Состояние разработок клинотронов непрерывного действия / Е.Е. Лысенко, О.Ф. Пишко, В.Г. Чумак, С.А. Чурилова // Зарубежная радиоэлектроника. – 2004. – № 8. – С. 3–13.
76. Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator / A. Dobroiu, M. Yamashita, Y.N. Ohshima, Y. Morita, C. Otani, K. Kawase // Applied Optics. – 2004. – Vol. 43. – P. 5637–5646.
77. Dexheimer S.L. Terahertz spectroscopy: principles and applications. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2007. – 562 p.
78. BWO generators for terahertz dielectric measurements / G.A. Komandin, S.V. Chuchupal, S.P. Lebedev, Yu.G. Goncharov, A.F. Korolev, O.E. Porodinkov, I.E. Spektor, A.A. Volkov // Terahertz Science and Technology. – 2013. – Vol. 3, No 4. – P. 440–444.
79. Давидович М.В. Замедляющая система для ЛБВ терагерцового диапазона / М.В. Давидович, Н.А. Бушуев // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 2014. – Саратов, 2014. – Т. 1. – С. 299–306.
80. Электронно-оптические системы с повышенной однородностью магнитного поля для ЛБВ с ленточным пучком терагерцового диапазона / Н.А. Бушуев, Ю.А. Григорьев, А.А. Бурцев, А.Ю. Кивокурцев, Р.В. Спиридонов, П.Д. Шалаев // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф., 2014. – Саратов, 2014. – Т. 1. – С. 449–452.
81. Folded waveguide traveling-wave tube sources for terahertz radiation / S. Bhattacharjee, J.H. Booske, C.L. Kory, D.W. van der Weide, S. Limbach, S. Gallagher, J.D. Welter, M.R. Lopez, R.M. Gilgenbach, R.L. Ives, M.E. Read, R. Divan, D.C. Mancini // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2004. – Vol. 32, No 3. – P. 1002–1014.
82. Mineo M. Double-corrugated rectangular waveguide slow-wave structure for terahertz vacuum devices / M. Mineo, C. Paoloni // IEEE Transactions on Electronic Devices. – 2010. – Vol. 57, No 11. – P. 3169–3175.
83. Quantum cascade lasers operating from 1.2 to 1.6 THz / C. Walther, M. Fischer, G. Scalari, R. Terazzi, N. Hoyler, J. Faist // Applied Physics Letters. – 2007. – Vol. 91, No 13. – P. 1–3.
84. THz and sub-THz quantum cascade lasers / G. Scalari, C. Walther, M. Fischer, R. Terazzi, H. Beere, D. Ritchie, J. Faist // Laser & Photonics Review. – 2009. – Vol. 3, No 1–2. – P. 45–66.
85. Magnetic-field-assisted terahertz quantum cascade laser operating up to 225 K / A. Wade, G. Fedorov, D. Smirnov, S. Kumar, B.S. Williams, Q. Hu, J.L. Reno // Nature Photonics. – 2008. – Vol. 3. – P. 41–45.
86. Nagatsuma T. High-power RF photodiodes and their applications / T. Nagatsuma, H. Ito, T. Ishibashi // Laser & Photonics Review. – 2009. – Vol. 3, No 1–2. – P. 123–137.
87. Nakajima F. High-power continuous-terahertzwave generation using resonant antenna-integrated uni-traveling-carrier photodiode / F. Nakajima, T. Furuta, H. Ito // Electronics Letters. – 2004. – Vol. 40, No 20. – P. 1297–1299.
88. Chattopadhyay G. Technology, capability, and performance of low power terahertz sources // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 33–53.
89. Design considerations for heavily-doped cryogenic Schottky diode varactor multipliers / E. Schlecht, F. Maiwald, G. Chattopadhyay, S. Martin, I. Mehdi // Proceedings of the 12th International Symposium on Space Terahertz Technology. – San Diego, USA, 2001. – P. 485–494.

90. Bozhkov V.G. Semiconductor detectors, mixers, and frequency multipliers for the terahertz band // *Radiophysics and Quantum Electronics*. – 2003. – Vol. 46, No 8–9. – P. 631–656.
91. Fundamental oscillators of resonant tunneling diodes above 1 THz at room temperature / S. Suzuki, M. Asada, A. Teranishi, H. Sugiyama, H. Yokoyama // *Applied Physics Letters*. – 2010. – Vol. 97, No 24.
92. Samoska L.A. An overview of solid-state integrated circuit amplifiers in the submillimeter-wave and THz regime // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 9–24.
93. Ng G.I. Are we there yet? – A metamorphic HEMT and HBP perspective / G.I. Ng, K. Radhakrishnan, H. Wang // *Proceedings of the 13th GaAs Symposium*. – Paris, France, 2005. – P. 13–19.
94. Design and characterization of H-band (220-325 GHz) amplifiers in a 250-nm InP DHBT technology / K. Eriksson, S.E. Gunnarsson, V. Vassilev, H. Zirath // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 56–64.
95. Karasik B.S. Nanobolometers for THz photon detection / B.S. Karasik, A.V. Sergeev, D.E. Prober // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 97–111.
96. Superconducting single photon nanowire detectors for IR and THz applications / I. Milostnaya, A. Korneev, M. Tarhov, A. Divochiy, O. Minaeva, V. Seleznev, N. Kaurova, B. Voronov, O. Okunev, G. Chulkova, K. Smirnov, G. Gol'tsman // *Journal of Low Temperature Physics*. – 2008. – Vol. 151. – P. 591–596.
97. Superconducting nanowire photon number resolving detector at telecom wavelength / A. Divochiy, F. Marsili, D. Bitauld, A. Gaggero, R. Leoni, F. Mattioli, V. Korneev, V. Seleznev, N. Kaurova, O. Minaeva, G. Gol'tsman, K. Lagoudakis, M. Benkhaoul, F. Levy, A. Fiore // *Nature Photonics*. – 2008. – No 2. – P. 32–36.
98. Ultrasensitive hot-electron nanobolometers for terahertz astrophysics / J. Wei, D. Olaya, B.S. Karasik, S.V. Pereverzev, A.V. Sergeev, M.E. Gershonson // *Nature Nanotechnology*. – 2008. – Vol. 3. – P. 496–500.
99. Antenna-coupled infrared detectors for imaging applications / F.J. Gonzalez, B. Ilic, J. Alda, G.D. Boreman // *IEEE Journal of Selected Topics of Quantum Electronics*. – 2005. – Vol. 11, No 1. – P. 117–120.
100. Terahertz direct detection in YBa₂Cu₃O₇ microbolometers / A. Hammar, S. Cherednichenko, S. Bevilacqua, V. Drakinskiy, J. Stake // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 2. – P. 390–394.
101. A room temperature bolometers for terahertz coherent and incoherent detection / S. Cherednichenko, A. Hammar, S. Bevilacqua, V. Drakinskiy, J. Stake, A. Kabanov // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 2. – P. 395–402.
102. Insight Product Co. Terahertz Hot Electron Bolometer Detectors from 0.3 to 150 THz , 2011 // URL: <http://www.insight-product.com/detect3.htm>
103. Richards P.L. Superconducting detectors and mixers for millimeter and submillimeter astrophysics / P.L. Richards, J. Zmuidzinas // *IEEE Proceedings*. – 2004. – Vol. 92. – P. 1597–1616.
104. Haller E.E. Advanced far-infrared detectors // *Infrared Physics and Technology*. – 1994. – Vol. 35. – P. 127–146.
105. Dooley D. Sensitivity of broadband pyroelectric terahertz detectors continues to improve // *Laser Focus World*. – 2010. – Vol. 46. – P. 49–56.
106. Dual cylindrical metallic grating-cladding polymer hollow waveguide for terahertz transmission with low loss / D. Tian, H. Zhang, Q. Wen, Z. Wang, S. Li, Z. Chen, X. Guo // *Applied Physics Letters*. – 2010. – No 97. – P. 1335020.
107. Low-index terahertz pipe waveguides / C.-H. Lai, Y.-C. Hsueh, H.-W. Chen, Y.J. Huang, H.C. Chang, C.K. Sun // *Optics Letters*. – 2010. – Vol. 34. – P. 3457–3459.
108. Reducing transmission losses in hollow THz waveguides / O. Mitrofanov, R. James, F.A. Fernandez, T.K. Mavrogordatos, J.A. Harrington // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011 – Vol. 1, No 1. – P. 124–132.
109. Шихматова В.В. Распространение плазмонных волн в слоистых металлодиэлектрических структурах с круглым поперечным сечением в терагерцовом диапазоне / В.В. Шихматова, Ф.Г. Рожнев // *Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф.* – Саратов, 2012. – С. 42–46.
110. Terahertz parallel-plate ladder waveguide with highly confined guided modes / M. Ahmadi-Boroujeni, K. Altmann, B. Scherger, C. Jansen, M. Shahabadi, M. Koch // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 1. – P. 87–95.
111. Markov A. Planar porous THz waveguides for low-loss guidance and sensing applications / A. Markov, A. Mazhorova, M. Skorobogatiy // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 1. – P. 96–102.

112. Jafarlou S. A fast method for analysis of guided waves and radiation from a nano-scale slit loaded waveguide for a THz photoconductive source / S. Jafarlou, M. Neshat, S. Safavi-Naeini // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, No 6. – P. 652–658.
113. Сеточные структуры поляризации электромагнитных волн в терагерцовом диапазоне частот / С.А. Алавердян, С.И. Боков, Н.А. Зайцев, В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, А.П. Креницкий, В.П. Мещанов // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2012. – Т. 17, № 12. – С. 47–50.
114. Передаточные характеристики сеточных поляризаторов терагерцового диапазона / С.А. Алавердян, С.И. Боков, В.М. Исаев, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, А.П. Креницкий, В.П. Мещанов, С.А. Савушкин, А.С. Якунин // *Динамика сложных систем – XXI век*. – 2012. – № 4. – С. 89–94.
115. Математическое моделирование дифракции электромагнитных волн на сеточных поляризационных структурах / С.А. Алавердян, И.Н. Кабанов, В.В. Комаров, В.П. Мещанов // *Радиотехника и электроника*. – 2014. – Т. 59, № 9. – С. 925–931.
116. Кабанов И.Н. Исследование одномерных поляризационных решеток в терагерцовом диапазоне частот // *Радиотехника*. – 2013. – № 5. – С. 27–29.
117. Разработка медных сеточных структур для частотной и пространственной селекции ТГц-излучения Новосибирского лазера на свободных электронах / С.А. Кузнецов, Б.Г. Гольденберг, П.В. Калинин, В.С. Елисеев, Е.В. Петрова // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. – 2009. – No 9. – С. 38–49.
118. Ma Y. Direct fabrication of terahertz optical devices on low-absorption polymer substrates / Y. Ma, A. Khalid, T.D. Drysdale, D.R. Cumming // *Optics Letters*. – 2009. – Vol. 34, No 10. – P. 1555–1557.
119. Broadband terahertz polarizers with ideal performance based on aligned carbon nanotube stacks / L. Ren, C.L. Pint, T. Arikawa, K. Takeya, I. Kawayama, M. Tonouchi, R.H. Hauge, J. Kono // *NanoLetters*, (ACS publications). – 2012. – No 12. – P. 787–790.
120. Extremely high extinction ratio terahertz broadband polarizer using bilayer subwave length metal wire-grid structure / L.Y. Deng, J.H. Teng, L. Zhang, Q.Y. Wu, H. Liu, X.H. Zhang, S.J. Chua // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Vol. 101. – ID 011101.
121. Metal-mesh achromatic half-wave plate for use at submillimeter wavelengths / G. Pisano, G. Savini, P.A. Ade Haynes // *Applied Optics*. – 2008. – Vol. 47, No 33. – P. 6251–6256.
122. Многоканальная радиометрическая система для регистрации субмиллиметрового излучения при пучково-плазменном взаимодействии / С.А. Кузнецов, А.В. Аржанников, А.В. Гельфанд, А.В. Зоренко, Б.П. Горшунов // *Вестник Новосибирского государственного университета*. – 2010. – Т. 5, вып. 3. – С. 5–19.
123. Khavashi A. Enhanced reflection in one-dimensional mostly-hollow metallic gratings at terahertz frequencies / A. Khavashi, M. Miri, K. Mehrany // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 2. – P. 435–440.
124. Anomalous transmission of terahertz wave through one-dimensional lamellar metallic grating / D. Li, S. Shu, F. Li, G. Ma, Y. Dai, H. Ma // *Optics Communications*. – 2011. – Vol. 284. – P. 2415–2419.
125. A metamaterial-based terahertz low-pass filter with low insertion loss and sharp rejection / Z. Zhu, X. Zhang, J. Gu, E. Singh, Z. Tian, J. Han, W. Zhang // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 6. – P. 832–837.
126. He S. Broadband THz absorbers with graphene-based anisotropic metamaterial films / S. He, T. Chen // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 6. – P. 757–763.
127. Resonant metal-mesh bandpass filters for the far infrared / D.W. Porterfield, J.L. Hesler, R. Densing, E.R. Mueller, T.W. Crowe, R.M. Weikle // *Applied Optics*. – 1994. – Vol. 33, No 25. – P. 6046–6052.
128. Passive metal mesh based quasi-optical selective components for subterahertz and terahertz applications / S.A. Kuznetsov, A.V. Arzhannikov, V.V. Kubarev, A.V. Gelfand, N.I. Fedorinina, Yu. G. Goncharov, P.V. Kalinin, N.A. Vinokurov, B.G. Goldenberg, M. Sorolla // *Proceedings of the 39th Microwave European Conference*. – Rome, Italy, 2009. – P. 826–829.
129. THz frequency selective surface filters for Earth observation remote sensing instruments / R. Dickie, R. Cahill, V. Fusco, H.S. Gamble, N. Mitchell // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 2. – P. 450–461.
130. Equivalent-circuit interpretation of polarization insensitive performance of THz metamaterial absorbers / D.S. Wilbert, P.M. Hokmabadi, P. Kung, S.M. Kim // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 6. – P. 846–850.
131. Experimental demonstration of terahertz metamaterial absorbers with a broad and flat high absorption band / L. Huang, D.R. Chowdhury, S. Ramani, M.T. Reiten, S.N. Luo, A.J. Taylor, H.T. Chen // *Optics Letters*. – 2012. – Vol. 37. – P. 154–155.

132. Broadband modulation of terahertz waves with non-resonant graphene meta-devices / S.H. Lee, H.-D. Kim, H.J. Choi, B. Kang, Y.R. Cho, B. Min // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 6. – P. 764–771.
133. Terahertz corrugated and bull's eye antennas / M. Beruete, U. Beaskoetxea, M. Zehar, A. Agrawal, S. Liu, K. Blary, A. Chahadih, X.-L. Han, M. Navarro-Cia, D.E. Salinas, A. Nahata, T. Akalin, M.S. Ayza // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 6. – P. 740–747.
134. Spectral transmittance of lossy printed resonant-grid terahertz bandpass filters / M.E. MacDonald, A. Alexanian, R.A. York, Z. Popovic, E.N. Grossman // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2000. – Vol. 48, No 4. – P. 712–718.
135. Terahertz two-layer frequency selective surfaces with improved transmission characteristics / S. Vegesna, Y. Zhu, A. Bernussi, M. Saed // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, No 4. – P. 441–448.
136. Mumcu G. Dual slot THz antenna array for real time excised tissue imaging / G. Mumcu, K. Sertel // *Antennas and Propagation Society International Symposium*. – Charleston, USA, 2009. – P. 1–4.
137. Topalli K. An indirect impedance characterization method for monolithic THz antennas using coplanar probe measurements / K. Topalli, G.C. Trichopoulos, K. Sertel // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2012. – No 11. – P. 3–5.
138. Spectral characterization of broadband THz antennas by photoconductive mixing: toward optimal antenna design / R. Mendis, C. Sydlo, J. Sigmund, M. Feiginov, P. Meissner, H.L. Hartnagel // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – 2005. – Vol. 4. – P. 85–88.
139. Sabaawi A.M.A. Planar bowtie nanoarray for THz energy detection / A.M.A. Sabaawi, C.C. Tsimenidis, B.S. Sharif // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 5. – P. 524–531.
140. Antenna for Terahertz Integrated Heterodyne Arrays / N. Llombart, C. Lee, M. Alonso del Pino, G. Chattopadhyay, C. Jung-Kubiak, L. Jofre, I. Mehdi // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 5. – P. 515–523.
141. Demonstration of the leaky wave antenna at submillimeter wavelengths / A. Neto, N. Llombart, J.A. Baselmans, A. Baryshev, S.J.C. Yates // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 26–32.
142. Esquius M. Sinusoidally modulated graphene leaky-wave antenna for electronic beamscanning at THz / M. Esquius, J.S. Gomez-Diaz, J. Perruisseau-Carrier // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 116–122.
143. Electric field enhancement in 3D tapered helix antenna for terahertz applications / V. Varlamava, F. Palma, P. Nenzi, M. Balucani // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 4, No 3. – P. 360–367.
144. Bevan M. Electromagnetic analysis of horn antennas in the terahertz region: M.S. Degree dissertation. – Maynooth, Ireland: NUI, 2013. – 117 p.
145. Preliminary measurement results of a 650 GHz planar circuit balances SIS mixer / B.-K. Tan Yassin, P. Grimes, K. Jacobs, S. Withington // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 1. – P. 32–38.
146. Terahertz detection by a homodyne field effect transistor multiplicative mixer / S. Preu, S. Kim, R. Verma, P.G. Burke, N.Q. Vinh Sherwin, A.C. Gossard // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, No 3. – P. 278–283.
147. A low noise 2.7 THz waveguide-based superconducting mixer / F.M. Boussaha, J.H. Kawamura, J.A. Stern, A. Skalare, V. White // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, No 3. – P. 284–289.
148. Patent 7,012,489 U.S. CIC H01P 3/06 (20060101). Coaxial waveguide microstructures and methods of formation thereof / J. Fisher, D. Sherrer. – Mar. 2006.
149. Modeling of realistic rectangular micro-coaxial lines / M. Lukic, S. Rondineau, Z. Popović, D.S. Filipovic // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2006. – Vol. 54. – P. 2068–2076.
150. Квазиоптические поляризационные аттенуаторы в терагерцовом диапазоне частот / В.И. Безбородов, В.К. Киселев, Е.М. Кулешов, М.С. Яновский // *Радиофизика и электроника*. – 2007. – Т. 12, № 2. – С. 451–455.
151. Numerical investigation of terahertz emission properties of microring difference-frequency resonators / K. Iwaszczuk, C.Z. Bisgaard, A. Andronico, G. Leo, P.U. Jepsen // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 2. – P. 192–199.

152. WR-3 band waveguides and filters fabrication using SU8 photoresist micromachining technology / X. Shang, M. Ke, Y. Wang, M.J. Lancaster // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, No 6. – P. 629–637.
153. Corrugated waveguide slow-wave structure for THz travelling wave tube / M. Mineo, C. Paoloni, A.D. Carlo Fiorello, M. Dispenza // *Proceedings of the 39th European Microwave Conference*. – Rome, Italy, 2009. – P. 842–845.
154. A 225 GHz circular polarization waveguide duplexer based on a septum orthomode transducer polarizer / C.A. Leal-Sevillano, K.B. Cooper, J.A. Ruiz-Cruz, J.R. Montejeo-Garani, J.M. Rebollar // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 5. – P. 574–583.
155. Development of a wideband compact orthodome transducer for the 180-270 GHz band / C.A. Leal-Sevillano, T.J. Reck, G. Chattopadhyay, J.A. Ruiz-Cruz, J.R. Montejeo-Garani, J.M. Rebollar // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4, No 5. – P. 634–637.
156. Grossman E.N. Non-imaging Winston cone concentrators for submillimeter-wave, overmoded waveguide / E.N. Grossman, O.D. Friedman, A.O. Nelson // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 65–74.
157. Vahidpour M. 2.5D micromachined 240 GHz cavity-backed coplanar waveguide to rectangular waveguide transition / M. Vahidpour, K. Sarabandi // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, No 3. – P. 315–322.
158. Moallem M. A broadband, micromachined rectangular waveguide to cavity-backed coplanar waveguide transition using impedance-taper technique / M. Moallem, J. East, K. Sarabandi // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 49–55.
159. Rahm M. THz wave modulators: a brief review on different modulation techniques / M. Rahm, J.-S. Li, W.J. Padilla // *Journal of Infrared, Millimeter Wave and Terahertz Waves*. – 2013. – Vol. 34. – P. 1–27.
160. Popovich Z. THz-metrology and instrumentation / Z. Popovich, N.E. Grossman // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 1. – P. 133–144.
161. Phase-noise measurement system for the terahertz band / J.A. DeSalvo Hati, C. Nelson, D.A. Howe // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2012. – Vol. 2, No 6. – P. 638–641.
162. Moallem M. A non-contact submillimeter wave S-parameters measurement technique for multiport micromachined devices / M. Moallem, K. Sarabandi // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4, No 3. – P. 338–346.
163. Williams D.F. 500 GHz – 750 GHz rectangular waveguide Vector-Network-Analyzer calibration // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – Vol. 1, No 2. – P. 364–377.
164. Sensitivity analysis of TRL calibration in waveguide integrated membrane circuit / J. Stenarson, T.N. Do, H. Zhao, P.J. Sobis, A.-Y. Tang, K. Yhland, J. Stake // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 5. – P. 558–565.
165. Measurement of silicon micromachined waveguide components at 500-750 GHz / T.J. Reck, C. Jung-Kubiak, J. Gill, G. Chattopadhyay // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4, No 1. – P. 33–48.
166. Yang B.B. Theoretical and empirical evaluation of surface roughness effects on conductivity in the terahertz regime / B.B. Yang, M.P. Kirley, J.H. Booske // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2014. – Vol. 4, No 3. – P. 368–375.
167. Креницкий А.П. Проблемы измерения диэлектрических характеристик нано- и микроразмерных сред в терагерцовом диапазоне 100–3000 ГГц // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2008. – № 9. – С. 30–35.
168. Bernier M. Precise determination of the refractive index of samples showing low transmission bands by THz time-domain spectroscopy / M. Bernier, F. Garet, J.-L. Coutaz // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2013. – Vol. 3, No 3. – P. 295–301.
169. Meissner T. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations / T. Meissner, F.J. Wentz // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2004. – Vol. 42, No 9. – P. 1836–1849.
170. The temperature variation of the near millimeter wavelength optical constants of water / J.B. Hasted, S.K. Husain, F.A.M. Frescur, J.R. Birch // *Infrared Physics*. – 1987. – Vol. 27, No 1. – P. 11–15.

Исаев Вячеслав Михайлович

Д-р техн. наук, профессор, первый зам. директора Мытищинского НИИ радиоизмерительных приборов, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, г. Мытищи, Московская обл.

Тел.: (495) 586-17-21, доб. 103

Эл. почта: isaev-mniirp@mail.ru

Кабанов Игорь Николаевич

Канд. техн. наук, нач. отдела СВЧ-электроники Мытищинского НИИ радиоизмерительных приборов, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, г. Мытищи

Тел.: (495) 586-17-21

Эл. почта: mr.kin63@mail.ru

Комаров Вячеслав Вячеславович

Д-р техн. наук, профессор Саратовского гос. техн. ун-та им. Гагарина (СГТУ), зам. нач. отдела ООО НПП «НИКА-СВЧ», г. Саратов

Тел.: 960-353-06-69

Эл. почта: vyacheslav.komarov@gmail.com

Мещанов Валерий Петрович

Д-р техн. наук, профессор СГТУ, директор ООО НПП «НИКА-СВЧ», заслуженный изобретатель РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники за 2013 год

Тел.: 8-845-274-02-72

Эл. почта: nika373@bk.ru

Isaev V.M., Kabanov I.N., Komarov V.V., Meshchanov V.P.

Modern radio-electronic systems of terahertz frequency range

One of the tendencies of modern electronics is the developing of terahertz frequency range, which occupies an intermediate position between the well-studied microwave and optical spectrum of electromagnetic radiation. The number of fundamental and applied research on this topic dramatically increased in recent years. In this work we briefly analyze the condition of electronic and component base, the main directions of use and metrological providing terahertz equipment. In the review where used domestic and foreign sources of information, most of which have been published in the last decade.

Keywords: terahertz range, electronics, photonics, diagnostics, spectroscopy of environments, astrophysical researches, radar-location, telecommunications, passive elements, active elements, measurements.