

Проблемы разработки источников мощного когерентного излучения терагерцевого диапазона

Описаны основные области применения электромагнитного излучения терагерцевого диапазона частот и отмечена актуальность создания усилителей и генераторов этого диапазона с выходной импульсной мощностью от десятков Вт до десятков кВт на низком уровне амплитудных и фазовых шумов. Сформулированы основные проблемы, возникающие при проектировании таких приборов и показаны пути их решения. Приведены примеры отечественных и зарубежных разработок приборов ТГц диапазона.

Ключевые слова: терагерцевый диапазон, электровакуумные приборы СВЧ, интегральные технологии

Одна из основных тенденций 120-летнего развития радиоэлектронных систем – повышение максимальной рабочей частоты, которая за этот период увеличилась почти в 1 миллион раз (рис. 1) и вплотную приблизилась к терагерцевому диапазону, под которым понимается диапазон частот $f = 0,3 \dots 3$ ТГц (длина волны в свободном пространстве $\lambda = 1 \dots 0,1$ мм). Освоение этого диапазона позволяет увеличить скорость передачи информации в системах связи, пространственное и временное разрешение радиолокационных систем, создать системы радиовидения с высокой частотой смены кадров, повысить скрытность и помехозащищенность систем передачи информации, уменьшить массу и габариты систем, включая антенны. Применение терагерцевых источников питания линейных ускорителей диапазона позволяет резко увеличить темп ускорения и тем самым сократить длину ускорителя. В технологических нагревательных установках повышение частоты приводит к увеличению темпа нагрева и более равномерному распределению температуры в нагреваемых объектах. В частности, для нагрева плазмы в экспериментальном термоядерном реакторе ITER используется частота 170 ГГц, что близко к терагерцевому диапазону.

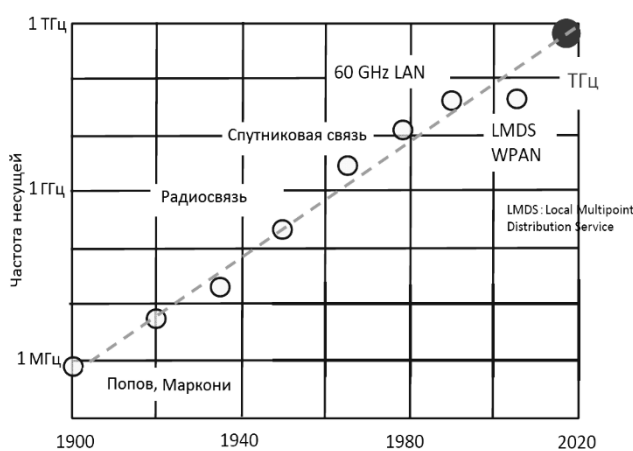


Рисунок 1.

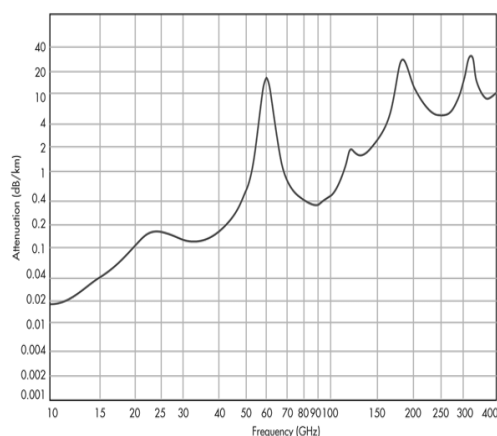


Рисунок 2.

При проектировании систем терагерцевого диапазона необходимо учитывать особенности распространения электромагнитных волн в атмосфере и других средах.

Взаимодействие электромагнитных волн этого диапазона с молекулами CO_2 , O_2 и N_2 приводит к появлению полос поглощения, между которыми находятся так называемые «окна прозрачности», однако даже в них затухание достаточно велико (см. рис. 2). Поэтому системы связи и радиолокации терагерцевого диапазона наиболее эффективно использовать в космосе или в верхних слоях атмосферы. В то же время особенности распространения волн ТГц диапазона можно использовать для анализа облачного покрова и состава атмосферы [1].

Перечисленные приложения требуют использования достаточно мощных источников ТГц излучения с выходной мощностью от нескольких десятков до нескольких тысяч Вт и более. На рис. 3 показано современное состояние различных типов микроволновых приборов в координатах частота-мощность. Как видно, в терагерцевом диапазоне наблюдается так называемый провал. Это та область спектра, в которой трудно создать «классические» микроволновые приборы вследствие технологических ограничений. Квантовые приборы (лазеры) также работают в этой области плохо из-за низкой энергии квантов, сравнимой с энергией тепловых колебаний.

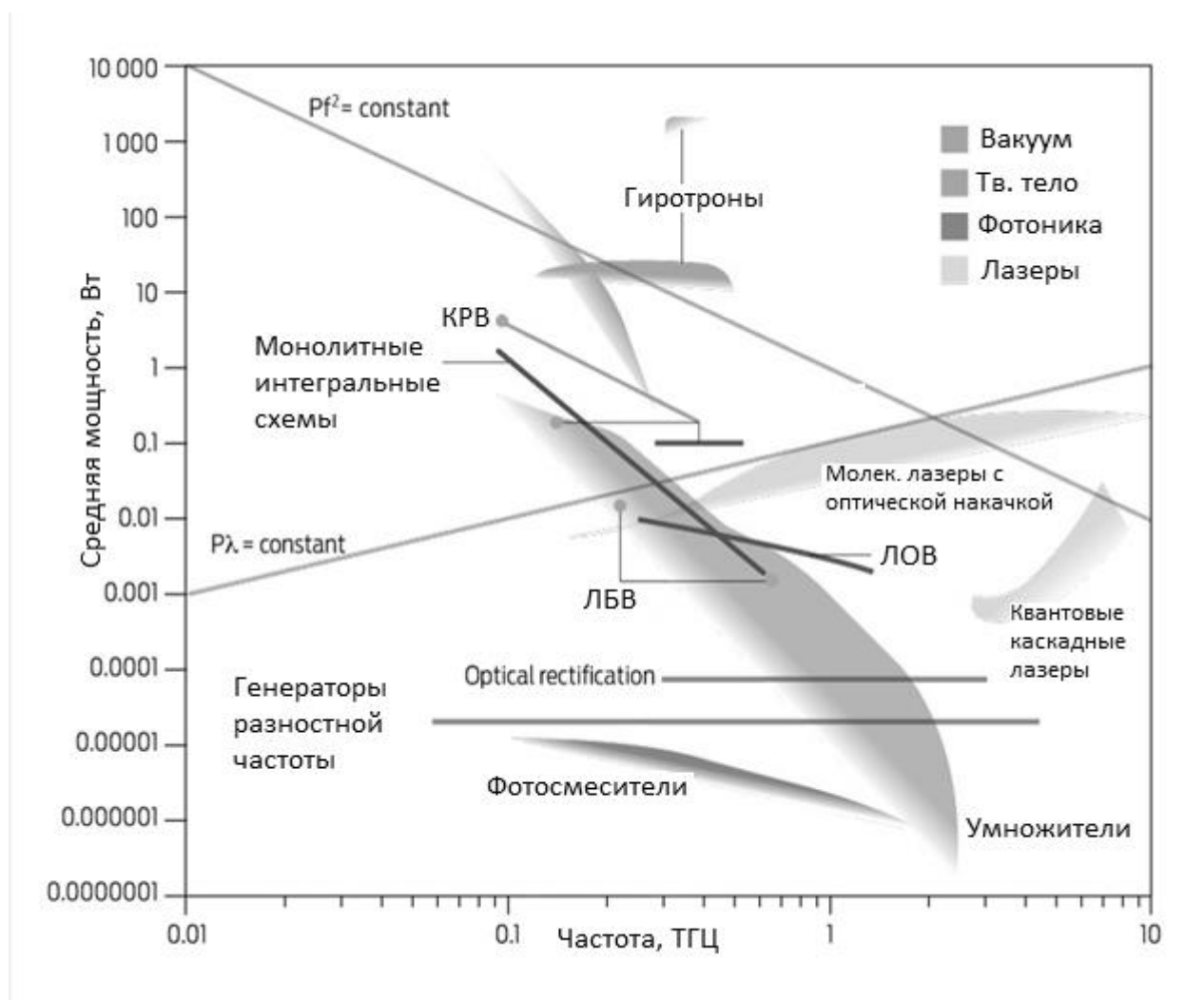


Рисунок 3.

Фотоэлектронные приборы и лазеры на частоте 1 ТГц имеют среднюю мощность, не превышающую 100 мВт. Еще более низкий уровень мощности имеют твердотельные приборы. Наибольшую мощность в этом диапазоне обеспечивают гиротроны и лазеры на свободных

электронах (на рисунке не показаны). Однако эти приборы имеют большую массу и габариты, а качество генерируемых ими колебаний не позволяет использовать эти приборы в современных системах связи и радиолокации. Поэтому усилия разработчиков направлены на продвижение «классических» электровакуумных приборов, таких как усилительные клистроны и лампы бегущей волны, в терагерцевый диапазон.

Разработка вакуумных приборов терагерцевого диапазона требует решения целого ряда проблем, связанных с пропорциональностью линейных размеров области взаимодействия прибора и длины волны. В результате

- Уменьшается площадь поперечного сечения электронного луча и, соответственно, увеличивается плотность тока в нем до 1000-2000 А/см². Так как плотность тока обычно применяемых термокатодов не превышает 10...20 А/см², необходимо конструировать электронные пушки с высокой компрессией. Кроме того, для предотвращения расплывания луча под действием сил пространственного заряда требуется сильное магнитное поле с индукцией более 1 Тл, что трудно обеспечить с помощью постоянных магнитов.
- Стремление снизить ток луча приводит к увеличению его сопротивления постоянному току. Для обеспечения эффективного взаимодействия с таким лучом требуется использовать резонаторы с высоким волновым сопротивлением и замедляющие системы с высоким сопротивлением связи. Создание таких электродинамических систем в ТГц диапазоне – трудная задача.
- Малые размеры электронного луча требуют разработки специальных конструкций коллектора с равномерным распределением конвекционного тока по его внутренней поверхности с тем, чтобы исключить локальные перегревы.
- Малые размеры резонаторов и замедляющих систем требуют разработки специальной технологии их изготовления, обеспечивающей допуски в пределах единиц микрон и высокое качество поверхности.

Над решением этих и других проблем конструирования мощных вакуумных приборов ТГц диапазона работают ученые и инженеры многих стран. Предложенные ими решения включают:

- Использование ленточного электронного луча, что позволяет увеличить площадь его поперечного сечения и снизить плотность тока в луче.
- Использование новых типов термокатодов с увеличенной плотностью катодного тока. В перспективе возможно использование автоэмиссионных катодов.
- Использование многоззорных резонаторов с высоким волновым сопротивлением.
- Использование новых типов замедляющих систем, например, типа «петляющий волновод».
- Применение новых интегральных технологий изготовления деталей приборов – LIGA технологии [2] или DRIE процесса [3].

LIGA технология позволяет создавать структуры с большим аспектным отношением (отношением глубины профиля к его поперечным размерам), вертикальными стенками и

высоким качеством поверхности. Для этого фоторезист подвергают экспонированию жестким синхротронным излучением с энергией 2 ГэВ и расходимостью пучка 0.006°. Такая технология позволяет создавать структуры глубиной до 1 мм, в том числе матрицы для прессования деталей. Пространственное разрешение – менее 1 мкм. К сожалению, источники синхротронного излучения мало доступны.

Технология DRIE (Deep Reactive Ion Etching) основана на многократном чередовании ионного травления и пассивации. При этом достигается высокое разрешение, однако стенки получаются слегка волнистыми. Для травления используются мощные источники плазмы. К недостаткам этой технологии относится необходимость использования специализированного дорогостоящего оборудования.

В последнее время за рубежом был разработан целый ряд вакуумных приборов ТГц или

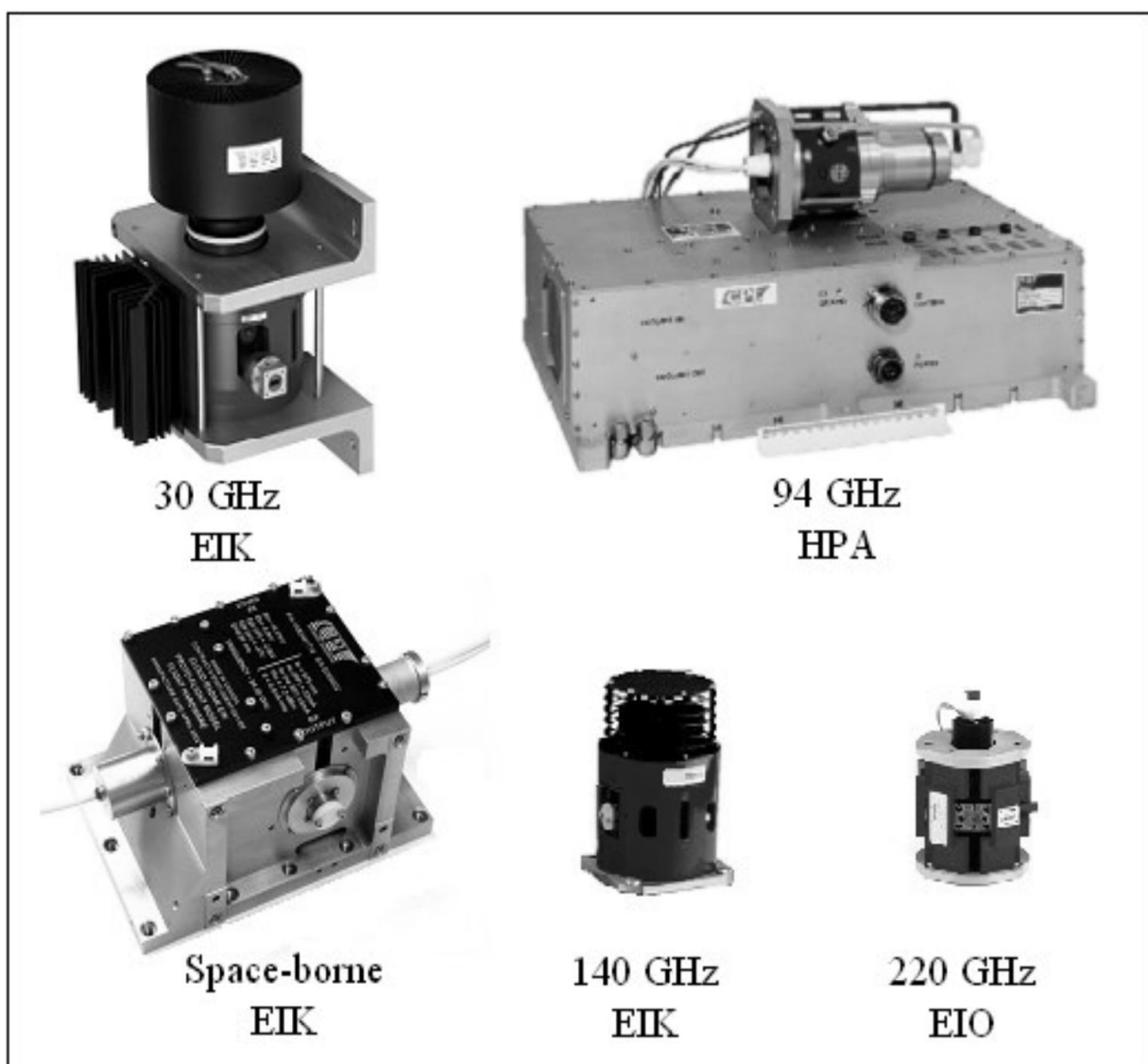


Рисунок 4.

близкого к нему диапазона. В качестве примера приведем серию приборов, разработанную фирмой CPI [4] (рис. 4). Параметры этих приборов, достигутые к 2010 г, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Частота, ГГц	Импульсная мощность, Вт	Средняя мощность, Вт
95	3000	1000
220	100	10
350	20	1
450	10	0,5
550	2	0,1

В 2013 г. фирмой Northrop Grumman была разработана ЛБВ на 850 ГГц, Лаборатория NRL разработала клистроны на 218 и 229 ГГц и ведет работы по созданию клистронов на 670, 850 и 1030 ГГц. В рамках европейского проекта OPTHER был разработан усилитель обратной волны на 1 ТГц [5].

В России ЗАО «Светлана-электронприбор» разработан и выпускается клистрон 8-мм диапазона с импульсной мощностью 5 кВт, а НПП «Салют» (Нижний Новгород) разработало и поставляет ЛБВ W-диапазона со средней мощностью 1 Вт [6]. На ряде предприятий электронной промышленности прорабатываются возможности создания клистронов и ЛБВ с рабочей частотой 95 ГГц и более.

Библиографический список

1. Millimeter-wavelength radars – new frontier in atmospheric cloud and precipitation research / P/ Collias, E.E. Clothiaus, M.A. Miller et al. Brookhaven National Lab. report No 213, 2012.
2. Гольденберг Б.Г. Базовые принципы LIGA-технологии [электронный ресурс].// www.ssrc.inp.nsk.su/CKP/lections/Theory_of_LIGA-technology.pdf
3. DRIE technology: from micro to nanoapplications [электронный ресурс] / J.-M. Thevenoud, B. Mercier, T. Bourouina et. al. www.researchgate.net/profile/Bourouina/publication
4. CMP's family of MMW products [электронный ресурс]. // <http://www.cpii.com/division.cfm/1>
5. Design and fabrication of a 1 THz backward wave amplifier / C. Paolini, A.D. Carlo, F. Brunetti et.al. Terahertz science and technology, Dec 2011, V. 4, No 4, pp. 149-163.
6. Иванов А.А. Разработка замедляющей системы для низковольтной лампы бегущей волны W-диапазона // Труды 16-й международной зимней школы-семинара по радиофизике и электронике сверхвысоких частот. Саратов: Изд-во СГУ, 2015.