

# МСЭ-R

Сектор радиосвязи МСЭ

Отчет МСЭ-R SM.2352-0  
(06/2015)

## Тенденции в области технологий активных служб в диапазоне частот 275–3000 ГГц

Серия SM  
Управление использованием спектра

## Предисловие

Роль Сектора радиосвязи заключается в обеспечении рационального, справедливого, эффективного и экономичного использования радиочастотного спектра всеми службами радиосвязи, включая спутниковые службы, и проведении в неограниченном частотном диапазоне исследований, на основании которых принимаются Рекомендации.

Всемирные и региональные конференции радиосвязи и ассамблеи радиосвязи при поддержке исследовательских комиссий выполняют регламентарную и политическую функции Сектора радиосвязи.

## Политика в области прав интеллектуальной собственности (ПИС)

Политика МСЭ-R в области ПИС излагается в общей патентной политике МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК, упоминаемой в Резолюции МСЭ-R 1. Формы, которые владельцам патентов следует использовать для представления патентных заявлений и деклараций о лицензировании, представлены по адресу: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, где также содержатся Руководящие принципы по выполнению общей патентной политики МСЭ-T/МСЭ-R/ИСО/МЭК и база данных патентной информации МСЭ-R.

### Серии Отчетов МСЭ-R

(Представлены также в онлайн-форме по адресу: <http://www.itu.int/publ/R-REP/en>.)

Серия	Название
<b>VO</b>	Спутниковое радиовещание
<b>BR</b>	Запись для производства, архивирования и воспроизведения; пленки для телевидения
<b>BS</b>	Радиовещательная служба (звуковая)
<b>BT</b>	Радиовещательная служба (телевизионная)
<b>F</b>	Фиксированная служба
<b>M</b>	Подвижные службы, служба радиоопределения, любительская служба и относящиеся к ним спутниковые службы
<b>P</b>	Распространение радиоволн
<b>RA</b>	Радиоастрономия
<b>RS</b>	Системы дистанционного зондирования
<b>S</b>	Фиксированная спутниковая служба
<b>SA</b>	Космические применения и метеорология
<b>SF</b>	Совместное использование частот и координация между системами фиксированной спутниковой службы и фиксированной службы
<b>SM</b>	<b>Управление использованием спектра</b>

*Примечание.* – Настоящий Отчет МСЭ-R утвержден на английском языке Исследовательской комиссией в соответствии с процедурой, изложенной в Резолюции МСЭ-R 1.

Электронная публикация  
Женева, 2015 г.

© ITU 2015

Все права сохранены. Ни одна из частей данной публикации не может быть воспроизведена с помощью каких бы то ни было средств без предварительного письменного разрешения МСЭ.

## ОТЧЕТ МСЭ-R SM.2352-0

Тенденции в области технологий активных служб  
в диапазоне частот 275–3000 ГГц

(2015)

**Сфера применения**

В настоящем Отчете рассматриваются тенденции в области технологий активных служб в диапазоне частот 275–3000 ГГц. Целью настоящего Отчета является предоставление технической информации для подготовки исследований совместного использования и совместимости между активными и пассивными службами, а также между активными службами в диапазоне частот 275–3000 ГГц.

## СОДЕРЖАНИЕ

	<i>Стр.</i>
1 Введение.....	2
2 Свойства, характеристики и типовые применения в диапазоне ТГц.....	3
2.1 Обзор диапазона частот выше 275 ГГц.....	3
2.2 Характеристики диапазона выше 275 ГГц.....	4
2.3 Типовые применения ТГц.....	5
3 Регламентарная информация.....	6
4 Беспроводная связь ТГц.....	7
4.1 Возможные случаи использования систем связи ТГц.....	7
4.2 Технологии приемопередатчиков ТГц.....	11
5 Зондирование и визуализация.....	15
5.1 Метод генерации ТГц.....	15
5.2 Камеры диапазона ТГц.....	18
5.3 Спектроскопия.....	20
5.4 Неразрушающие испытания.....	21
6 Деятельность, касающаяся терагерцевой области, проводимая в рамках разработки международных стандартов.....	24
7 Резюме.....	25
8 Библиография.....	25

**Сокращения и акронимы**

ATR	Attenuated total reflection spectrometry	Спектрометрия ослабленного полного отражения
BER	Bit error ratio	Коэффициент ошибок по битам
BNA	N-Benzyl-2-Methyl-4-Mitroaniline	N-бензил-2-метил-4-митроанилин
BWO	Backward-wave oscillator	Генератор обратной волны
DAST	Diethylaminosulfur Trifluoride	Трифторид (диэтиламино) серы
DFG	Difference frequency generation	Генерация разностной частоты

FEL	Free-electron laser		Лазер на свободных электронах
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy		Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье
HBT	Heterojunction bipolar transistor		Биполярный транзистор с гетеропереходом
HEMT	High electron mobility transistor		Транзистор с высокой подвижностью электронов
IMPATT	Impact ionization avalanche transit-time		Лавинно-пролетный диод
LoS	Line of sight		Линия прямой видимости
LT-GaAs	Low temperature grown Gallium Arsenide		Низкотемпературный арсенид галлия
MMIC	Monolithic microwave integrated circuit		Монолитная интегральная схема СВЧ-диапазона
NEP	Noise equivalent power	ЭМШ	Эквивалентная мощность шума
NFC	Near field communication		Связь в ближнем поле
NLoS	Non line of sight		Вне прямой видимости
QCL	Quantum cascade laser		Квантово-каскадный лазер
RTD	Resonant tunnelling diode		Резонансный туннельный диод
TDS	Time domain spectroscopy		Спектроскопия с разрешением во времени
TNNNET	Tunnel injection transit-time		Лавинно-пролетный диод с туннельной инжекцией носителей
THz	Terahertz	ТГц	Терагерц
UTC-PD	Uni-traveling-carrier photodiode		Фотодиод с одинаковыми носителями заряда

### Справочные документы

Рекомендация МСЭ-R <a href="#">P.676</a> :	Затухание в атмосферных газах
Рекомендация МСЭ-R <a href="#">P.838</a> :	Модель погонного ослабления в дожде, используемая в методах прогнозирования
Рекомендация МСЭ-R <a href="#">P.840</a> :	Ослабление из-за облачности и тумана
Отчет МСЭ-R <a href="#">F.2107-2</a> :	Характеристики и применения систем фиксированной беспроводной связи, действующих в диапазонах частот между 57 ГГц и 134 ГГц

## 1 Введение

Полосы частот выше 275 ГГц не распределены конкретным службам, но определены для пассивной службы в Регламенте радиосвязи (РР). Продолжается изучение регулирования использования спектра в отношении частот выше 3000 ГГц в соответствии с Резолюцией 118 (Марракеш, 2002 г.). На Всемирной конференции радиосвязи 2012 года (ВКР-12) в п. **5.565** РР были внесены поправки согласно Резолюции **950 (Пересм. ВКР-07)** с целью определения для использования администрациями для применений пассивных служб, таких как радиоастрономическая служба, спутниковая служба исследования Земли (пассивная) и служба космических исследований (пассивная). Вместе с тем использование диапазона 275–1000 ГГц пассивными службами не исключает использования этого диапазона активными службами.

В 2013 году был разработан и утвержден новый Вопрос МСЭ-R 237/1 "Технические и эксплуатационные характеристики активных служб", с тем чтобы побудить администрации изучать технические и эксплуатационные характеристики активных служб в диапазоне частот 275–1000 ГГц. Ожидается, что наряду с исследованием технических и эксплуатационных характеристик будут проведены исследования совместного использования частот активными и пассивными службами, а также между активными службами, с учетом этих характеристик в соответствии с новым Вопросом МСЭ-R 237/1.

Благодаря прогрессу в области технологий выше 275 ГГц, достигнутому в последнее время, интегрированные устройства и каналы, работающие выше 275 ГГц, позволяют нам внедрять такие сложные применения, как спектроскопия, визуализация, неразрушающие испытания и камера, работающая в терагерцевом диапазоне. Хотя преимущества таких высоких частот заключаются в возможности использовать сверхширокую ширину полосы, что недопустимо в микроволновом и миллиметровом частотных диапазонах, пока эти преимущества не используются для развития сверхвысокоскоростных беспроводных систем связи.

Чтобы использовать прогресс, достигнутый в терагерцевых технологиях (технологиях ТГц), в применениях радиосвязи, необходимо безотлагательно достичь понимания существующих в области технологий тенденций в отношении активных служб в диапазоне выше 275 ГГц.

Наряду с прогрессом, достигнутым в области технологий ТГц, IEEE 802 недавно учредила целевую группу IEEE 802.15.3d для разработки стандарта IEEE 802, который включал бы также физический уровень (PHY) выше 275 ГГц. Вместе с тем частотные диапазоны выше 275 ГГц еще не определены для активных служб, и в Регламенте радиосвязи отсутствуют распределения какой-либо службе в этом диапазоне. Также с регуляторной точки зрения необходимо безотлагательно понять технические и эксплуатационные характеристики активных систем, с тем чтобы избежать помех между пассивными службами, работающими в этом диапазоне, и активными службами, которые будут разработаны и внедрены в ближайшем будущем.

В настоящем Отчете дается обзор тенденций в технологиях активных систем, исследуемых в диапазоне выше 275 ГГц, и ставится задача предоставления технической информации для подготовки исследований совместного использования и совместимости. Технологии, обсуждаемые в настоящем Отчете, относятся к областям беспроводной связи, зондирования и визуализации в диапазоне ТГц.

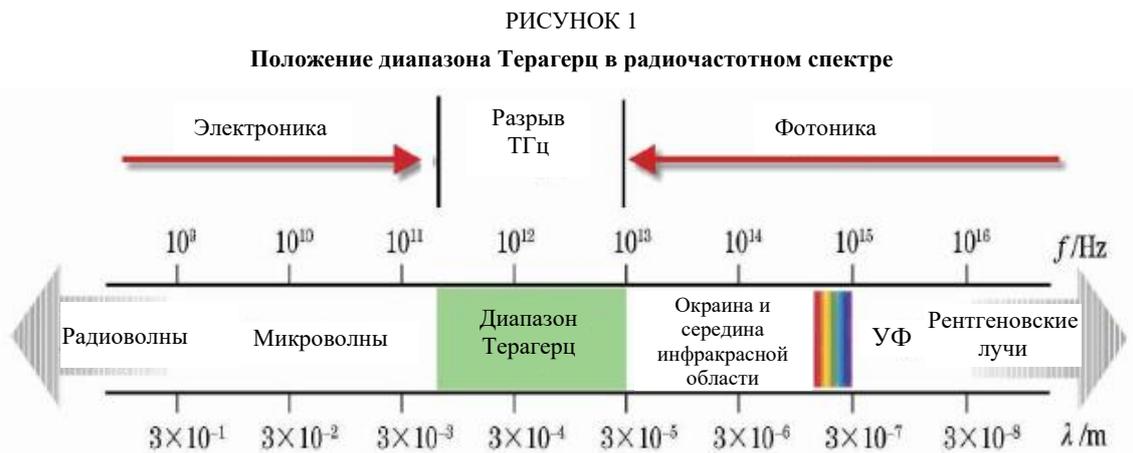
## **2 Свойства, характеристики и типовые применения в диапазоне ТГц**

Развитие беспроводной связи в диапазоне ТГц происходит на базе традиционной беспроводной связи, проходя через микроволновый и миллиметровый диапазоны до диапазона ТГц; вместе с тем отчасти в перспективе намечается лазерная беспроводная связь. ТГц не заменит микроволновую и лазерную связь, но связь ТГц обладает уникальными преимуществами, которых нет у большинства видов микроволновой и лазерной связи.

### **2.1 Обзор диапазона частот выше 275 ГГц**

Диапазон выше 275 ГГц составляет основную часть терагерцевого диапазона. Под волнами диапазона Терагерц, также известными как субмиллиметровое излучение, обычно понимают диапазон частот 0,1 ТГц – 10 ТГц с соответствующей длиной волны 0,03 мм – 3 мм.

Положение диапазона Терагерц в электромагнитном спектре показано на рисунке 1.



## 2.2 Характеристики диапазона выше 275 ГГц

Ввиду своих уникальных свойств диапазон выше 275 ГГц обладает многими особыми характеристиками по сравнению с другими радиочастотными диапазонами. Ниже излагаются основные уникальные характеристики:

### 1) Высокая проникаемость

Радиосигнал выше 275 ГГц хорошо проникает через многие диэлектрические материалы и неполярные жидкости, поэтому он может отобразить непрозрачные материалы или предметы, а также может применяться для неразрушающих испытаний при проверке безопасности и контроле качества.

Кроме того, длина его волны больше, чем у взвешенных частиц пыли или грязи в воздухе, а потери при передаче в пыли или дыму крайне малы, поэтому радиосигнал можно использовать для визуализации в обстановке задымления, например при тушении пожаров или пыльных бурях в пустыне.

### 2) Быстрое затухание в воде

Радиосигнал выше 275 ГГц характеризуется сильным затуханием в воде, что может использоваться в области медицины. Поскольку содержание воды в опухолевых тканях существенно отличается от обычных тканевых клеток, раковые ткани возможно локализовать путем анализа содержания воды в тканях.

### 3) Безопасность

Фотонная энергия в терагерцевом диапазоне составляет всего миниеlectron-вольт, что значительно ниже, чем энергия в большинстве химических соединений. Ввиду этого он не вызовет реакцию ионизации, что имеет решающее значение для обнаружения биологических образцов и исследования организма человека. Наряду с этим вода оказывает сильное поглощающее воздействие в этом диапазоне. Поскольку радиосигнал в этом диапазоне не может пройти сквозь кожу и является безопасным для людей, он может использоваться для медицинской диагностики, в частности кожных заболеваний.

### 4) Спектральное разрешение

В терагерцевом диапазоне содержится обширная спектральная информация, в том числе физическая и химическая информация. Многие молекулы, в особенности органические, обладают в этом диапазоне сравнительно выраженными свойствами рассеяния и поглощения. Путем исследования спектральных свойств материала в этом диапазоне мы можем понять структурные характеристики материала, определить его состав и проанализировать его физические и химические свойства.

### 5) Высокое пространственное разрешение

В диапазоне выше 275 ГГц пространственное разрешение сравнительно лучше, чем в микроволновом диапазоне. Теоретически благодаря более короткой длине волны его разрешающая способность при обработке изображений выше, чем в микроволновом диапазоне.

## **б) Короткая длина волны и хорошая направленность**

По сравнению с микроволновым диапазоном частота выше, что позволяет ее использовать как несущую связи для передачи большего объема информации в единицу времени. При меньшей длине волны и хорошей направленности открываются отличные перспективы использования в определенных сценариях применений беспроводной связи.

### **2.3 Типовые применения ТГц**

Чем больше исследуются волны в терагерцевом диапазоне, тем яснее становятся их выдающиеся характеристики. В настоящее время этот диапазон в основном по-прежнему используется для астрономических наблюдений, но с появлением источников терагерцевого излучения высокой мощности для диапазона выше 275 ГГц открываются широкие перспективы в большем числе применений. Ниже перечисляются возможные типовые применения.

#### **1) Применение в астрономии**

В небесном и межзвездном излучении содержится обширная спектральная информация, значительная часть которой помещается в диапазоне выше 275 ГГц с гораздо более низким фоновым шумом. Именно поэтому научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в полосе выше 275 ГГц изначально относятся к астрономии. Наряду с инфракрасным телескопом и космическим телескопом Хаббла был изобретен терагерцевый радиотелескоп для изучения комплексного физического состояния межзвездного облака в Галактике, включая самый в мире большой космический телескоп для наблюдений в дальней ИК-области спектра.

#### **2) Применение в молекулярном обнаружении**

Все материи обладают движением, и даже если объект выглядит неподвижным, его внутренняя молекулярная структура находится в стремительном движении, поскольку если есть движение, есть и излучение. У электромагнитного излучения есть собственная вибрирующая частота или длина волны, именуемая "идентифицирующая область спектра". Большая часть молекулярных "отпечатков" находятся в инфракрасной части спектра выше 275 ГГц, поэтому для обнаружения излучения, создаваемого незначительными молекулярными вибрациями, которые нельзя обнаружить инфракрасным лучом, может использоваться терагерцевый твердотельный лазер.

#### **3) Применение в проверке безопасности**

Поскольку большинство молекулярных ротационных уровней взрывчатых веществ и наркотиков находятся в терагерцевом регионе, можно применять спектроскопию терагерцевого диапазона для проведения проверок безопасности организма человека для обнаружения взрывчатых веществ, наркотиков, биологических макромолекул, оружия и других контрабандных товаров. В отличие от существующих технологий рентгеновского облучения и ультразвуковой визуализации спектроскопия и визуализация могут не только показать очертания предмета, но и сравнить измерения спектральной информации с данными имеющейся библиотеки опасностей терагерцевого диапазона. Кроме того, ввиду крайне низкой энергии волна не создаст излучения, вредного для биологических тканей. Таким образом, по сравнению с недостатками рентгеновских лучей, которые могут причинить вред организму человека, и металлодетекторов, неспособных обнаружить неметаллические материалы, терагерцевая технология обладает хорошими перспективами применения для проверок безопасности.

#### **4) Применение в биомедицине**

Радиосигнал выше 275 ГГц легко поглощается полярными молекулами, например воды или кислорода, и различные молекулы имеют различный спектр поглощения. Используя эти спектральные линии и технологию визуализации, можно диагностировать ранние поражения, вызываемые раком кожи, и другие наружные ткани. При хирургических операциях зачастую используется система терагерцевой визуализации для проверки удаления рака в режиме реального времени; этот метод обеспечивает более четкую визуализацию мягких тканей, чем ультразвуковое обследование. Наряду с этим можно применять систему терагерцевой спектроскопии временных интервалов (THz-TDS) для изучения органических макромолекул, уровень энергии биологической молекулярной вибрации и ротационные уровни которых находятся в терагерцевом регионе, для ориентации фармацевтического производства и медицинских исследований.

### 5) Применение в области беспроводной связи

Диапазон выше 275 ГГц занимает переходную позицию между оптической областью и электроникой и по своей природе обладает характеристиками как микроволновой, так и оптической связи. Во-первых, при стремительном развитии связи традиционной микроволновой связи сложно удовлетворять требования высокоскоростной широкополосной беспроводной связи, тогда как благодаря высокой скорости передачи данных и большой ширине полосы этот диапазон мог бы стать основой будущей беспроводной связи. С другой стороны, световая волна сильно затухает в пыли, стенах, пластиковых материалах, тканях и других неметаллических и неполярных материалах. В полосе выше 275 ГГц эти материалы можно пройти с небольшим затуханием, что создает возможность хороших показателей проникновения в сложных условиях. В то же время у этого диапазона есть и недостатки, наиболее серьезный из которых заключается в том, что сигнал в нем может легко поглощаться полярными молекулами в атмосфере, то есть его атмосферное затухание сравнительно велико, в особенности в дождливые дни. Ввиду этих характеристик он может использоваться в основном для будущей межпланетной связи, наземной широкополосной подвижной связи малого радиуса, а также в сложных условиях, например на сухом и задымленном поле боя.

### б) Применение в радарх

Применения терагерцевых волн в области радиолокации, распознавания целей, высокоточного наведения и огня имеют потенциальные перспективы. При таких преимуществах терагерцевой волны, как хорошая направленность и концентрация энергии, можно установить низкий угол места радара с высокой разрешающей способностью и радара слежения. Благодаря возможности визуализации через материал можно обнаруживать объекты, замаскированные укрытием или дымом. Ввиду возможности обнаружения в пыли и дыму можно создать всепогодную навигационную систему, в силу чего становится возможным наведение воздушных судов на посадку. Терагерцевая волна имеет большую ширину полосы, чем другие волновые диапазоны, поэтому у нее более широкий диапазон частот по сравнению с диапазоном технологии малой заметности, применяемой в настоящее время, поэтому сверхширокополосный радар, использующий терагерцевую волну как источник излучения, способен получать изображения малозаметных летательных аппаратов.

## 3 Регламентарная информация

В п. 5.565 Регламента радиосвязи были внесены поправки с целью определения для использования администрациями для применений пассивных служб, таких как радиоастрономическая служба, спутниковая служба исследования Земли (пассивная) и служба космических исследований (пассивная) на ВКР-12. П. 5.565 РР (издание 2012 г.) приведен ниже:

### 275–3000 ГГц

Распределение по службам		
Район 1	Район 2	Район 3
275–3 000	(не распределена) MOD 5.565	

**5.565** Следующие полосы частот в диапазоне 275–1000 ГГц определены для использования администрациями для применений пассивных служб:

- радиоастрономическая служба: 275–323 ГГц, 327–371 ГГц, 388–424 ГГц, 426–442 ГГц, 453–510 ГГц, 623–711 ГГц, 795–909 ГГц и 926–945 ГГц;
- спутниковая служба исследования Земли (пассивная) и служба космических исследований (пассивная): 275–286 ГГц, 296–306 ГГц, 313–356 ГГц, 361–365 ГГц, 369–392 ГГц, 397–399 ГГц, 409–411 ГГц, 416–434 ГГц, 439–467 ГГц, 477–502 ГГц, 523–527 ГГц, 538–581 ГГц, 611–630 ГГц, 634–654 ГГц, 657–692 ГГц, 713–718 ГГц, 729–733 ГГц, 750–754 ГГц, 771–776 ГГц, 823–846 ГГц, 850–854 ГГц, 857–862 ГГц, 866–882 ГГц, 905–928 ГГц, 951–956 ГГц, 968–973 ГГц и 985–990 ГГц.

Использование диапазона 275–1000 ГГц пассивными службами не исключает использование этого диапазона активными службами. Администрациям, желающим предоставить частоты в диапазоне 275–1000 ГГц для применений активных служб, настоятельно предлагается принимать все практически возможные меры для защиты этих пассивных служб от вредных помех до даты принятия Таблицы распределения частот в вышеупомянутом диапазоне частот 275–1000 ГГц.

Все частоты в диапазоне 1000–3000 ГГц могут использоваться как активными, так и пассивными службами. (ВКР-12)

#### **4 Беспроводная связь ТГц**

В диапазоне частот выше 5 ГГц проводится ряд исследований по системам сверхширокополосной беспроводной связи. Целью некоторых исследований является разработка сверхскоростных систем беспроводной связи с интерфейсами Ethernet 40 Гбит/с и 100 Гбит/с.

Ввиду высокой проводной способности и большой потери распространения линий связи, использующих технологии ТГц, эти линии могут работать как линии доступа последней мили. Организации, занимающиеся НИОКР, провели несколько испытаний, используя частоты выше 275 ГГц.

##### **4.1 Возможные случаи использования систем связи ТГц**

При рассмотрении случаев использования связи ТГц следует учитывать следующие моменты:

- использование сверхширокой ширины полосы частот;
- возможность миниатюризации антенны и устройства;
- высокую направленность и большую потерю распространения в свободном пространстве (длина волны составляет менее 1/5 полосы 60 ГГц, и хотя потеря распространения в свободном пространстве составляет не менее 25 раз, ее компенсируют высокие характеристики усиления антенны);
- развитие технологии производства, например генераторов, усилителей мощности и антенн с управляемым положением диаграммы направленности.

##### **4.1.1 Связь на сверхмалых расстояниях между микросхемами и между печатными платами**

На рисунке 1 показан случай использования связи на сверхмалых расстояниях между микросхемами и между печатными платами. Ожидается, что беспроводное соединение компонентов и печатных плат позволит отказаться от проводов и миниатюризовать субстраты и устройства.

В таблице 1 приведены типовые требования для этого случая использования. Делается вывод, что расстояния связи при применении интегральных схем (ИС) и/или разделении на уровни используемых на основе интегральных схем субстратов в одном корпусе будут варьироваться от нескольких мм до нескольких десятков см.

Что касается скорости передачи, для USB3.1 уже была предписана скорость 10 Гбит/с, а для PCIExpress 4.0 был установлен стандарт скорости передачи для уровня линии передачи данных 4 ГБ/с = 32 Гбит/с (в обоих направлениях) и дополнительно, до 4 ГБ/с × 64 = 256 ГБ/с (2 Тб/с), который охватывает до 64 дорожек.

Поддерживать связь на скоростях, превышающих Тб/с, не всегда обязательно, но при связи между микросхемами и между печатными платами с использованием связи ТГц потребуется сверхвысокоскоростная передача, превышающая по меньшей мере несколько десятков Гбит/с.

Что касается среды распространения, необходимо рассматривать связь как LoS, так и NLoS как модель близости или сверхблизости в корпусе, которая предполагает использование металлического корпуса при сильных отражательных волнах. Необходимо рассмотреть эффект многолучевого распространения между устройствами, расположенными в сверхблизости, и многолучевого распространения через внутренние стенки корпуса устройства путем проникновения волн ТГц через субстраты.

РИСУНОК 2

Случай использования связи на сверхмалых расстояниях между микросхемами и между печатными платами

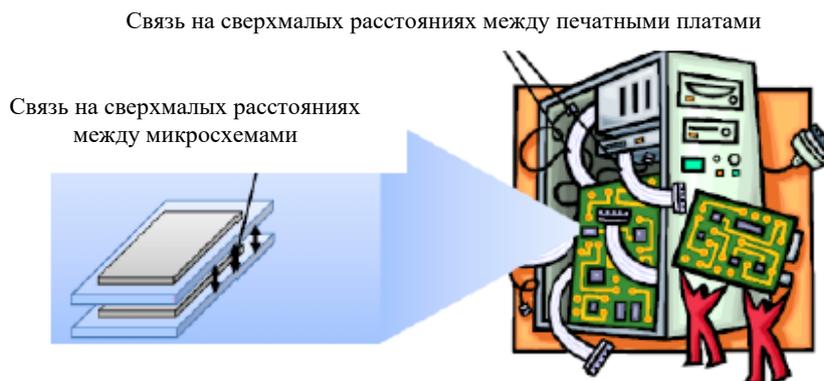


ТАБЛИЦА 1

**Типовые требования**

Расстояние связи	От нескольких мм до нескольких см (от сверхблизости до близости)
Скорость передачи данных	Несколько десятков Гбит/с
Среда распространения	Модель сверхблизости в корпусе и близости (LoS/NLoS)
Требуемый BER	$10^{-9}$

**4.1.2 Синхронизация контента с облаком посредством связи в ближнем поле**

На рисунке 3 показан случай использования синхронизации контента с облаком посредством связи в ближнем поле. В последнее время стремительно растет распространение услуг, использующих облако, как и услуг сотрудничества между стремительно распространяющимися смартфонами и облаком.

Услуга хранения в облаке – это одна из облачных услуг, состоящая в том, что фото- и видеоматериалы смартфона пользователя хранятся посредством сети, а пользователь не осознает процесс синхронизации. Вместе с тем пакетная связь с использованием 3G и LTE, применяемых в смартфонах для частой синхронизации хранящегося в облаке контента, о которой пользователь не знает, приводит к неожиданному увеличению расхода заряда батареи.

В этом случае использования имеется в виду, что, помимо функции зарядки IC в автоматических турникетах на железнодорожных станциях, пользователи могут обладать смартфонами с функцией связи ТГц. При проходе через турникет железнодорожной станции по дороге на работу или в школу одновременная синхронизация контента посредством связи ТГц подавит потребление энергии батареи смартфона.

В таблице 2 показаны типовые требования для этих случаев использования. Хотя расстояние связи составляет менее нескольких см, для синхронизации соответствующего объема данных или контента за очень короткое время – примерно 1 секунду – желательно, чтобы скорость связи была возможно велика. Для этого, наряду со скоростью связи, необходимо будет разработать систему аутентификации и ассоциации, которая позволит сделать время установления канала связи очень коротким. С другой стороны, даже если возможна скорость связи ТГц в ближнем поле свыше 100 Гбит/с, необходимо изучить, совместима ли скорость чтения и письма при хранении, которой, как предполагается для данного случая использования, оснащены смартфоны, с такой высокой скоростью передачи. В качестве примера можно привести скорость чтения и письма SSD (твердотельного диска), которая заявлена как самая большая в мире и составляет около 500 Мбайт/с (4 Гбит/с).

Также предполагается, что средой передачи будет модель близости устройств, которая применима только к LoS. Следует изучить вопрос о том, скажутся ли на передаче данных многолучевые отражения между расположенными вблизи друг от друга устройствами.

РИСУНОК 3

Случай использования синхронизации контента с облаком посредством связи в ближнем поле

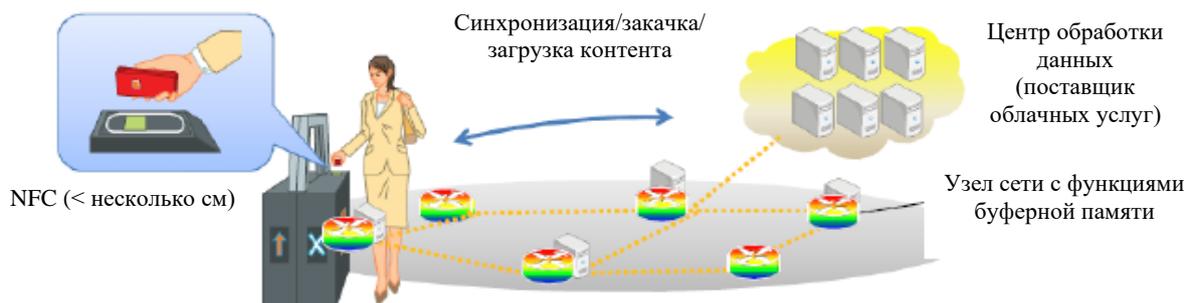


ТАБЛИЦА 2

## Типовые требования

Расстояние связи	До нескольких см (близость)
Скорость передачи данных	От 4 Гбит/с до нескольких десятков Гбит/с
Среда распространения	Модель расположения устройств вблизи друг от друга (LoS)
Требуемый BER	$10^{-12}$

## 4.1.3 Беспроводная связь между серверами в центре обработки данных

На рисунке 4 показан случай использования связи ТГц между серверами в центре обработки данных. В последнее время стремительно растет распространение услуг, использующих облако, что приводит к ускорению строительства центров обработки данных. Как правило, в центрах обработки данных имеются несколько стоек с серверами, в том числе с запоминающими устройствами и многопозиционными переключателями, и желательно, чтобы между серверами на стойках серверов и между стойками осуществлялась беспроводная связь.

В таблице 3 приведены типовые требования в этом случае использования. Расстояния связи от нескольких см, если речь идет о соединении между серверами, расположенными на стойках вертикально, до нескольких м, если речь идет о соединении между стойками.

Что касается среды распространения, необходимо рассматривать варианты как LoS, так и NLoS, при котором предполагается модель служебного помещения, где использованы строительные материалы со сравнительно низкой проницаемостью (высокой отражающей способностью), но если мы возьмем особый случай, в котором стойка с серверами расположена около поверхности стены, а кабельные соединения между задними панелями заменены каналом связи ТГц, между задними панелями можно применить двухлучевую модель.

РИСУНОК 4

Беспроводная связь между серверами в центре обработки данных



ТАБЛИЦА 3

## Типовые требования

Расстояние связи	От нескольких см до нескольких м (близость)
Скорость передачи данных	Несколько десятков Гбит/с – несколько сот Гбит/с
Среда распространения	Модель служебного помещения/двухволновая модель (LoS/NLoS)
Требуемый BER	$10^{-12}$

## 4.1.4 Беспроводной промежуточный трафик/периферийный трафик

Линия промежуточного трафика – это соединение между базовой станцией и более централизованным элементом сети, тогда как линия периферийного трафика соединяет контроллер радиооборудования базовой станции и удаленную радиоточку (радиоустановку). В будущем такие тенденции, как массовое развертывание малых сот, реализация скоординированной многоточечной передачи (CoMP) и/или облачных сетей радиодоступа (C-RAN), могут увеличить требуемые скорости передачи данных для промежуточного трафика или периферийного трафика, либо для обоих видов трафика. Использование для этого беспроводных линий может быть желательным в ситуациях, когда волоконные линии недоступны.

В случаях, когда требуются несколько десятков Гбит/с, диапазон частот ТГц может считаться перспективным вариантом. В ходе демонстрации, описываемой в работе [1] библиографии, на протяжении линии длиной 1 км была достигнута скорость передачи данных 24 Гбит/с.

ТАБЛИЦА 4

## Типовые требования

Расстояние связи	От 500 м до 1 км
Скорость передачи данных	До 100 Гбит/с
Среда распространения	Вне помещений
Требуемый BER	Не представлен

## 4.1.5 Беспроводная локальная вычислительная сеть ТГц (WLAN ТГц)

На рисунке 5 отображен случай беспроводной локальной вычислительной сети ТГц (WLAN). По мере развития технологии беспроводной связи WLAN играет все большую роль в жизни людей, избавляя их от ограничений, связанных с проводами. В настоящее время WLAN, как и интернет и сети подвижной связи, стала важным средством передачи информации, широко применяемым в аэропортах, служебных

помещениях, ресторанах, жилых домах и т. п. Частота ТГц составляет 1–4 порядков величин, что выше, чем в микроволновом диапазоне, а скорость передачи данных может быть 10 Гбит/с. Учитывая, что WLAN ТГц обладает такими характеристиками, как высокая скорость, широкая полоса, компактная структура, малый размер, низкий уровень ущерба от излучения и высокая помехозащищенность, она может использоваться в коммерческих и военных применениях, таких как перспективная высококачественная видеотелефонная связь, видеоконференцсвязь, игры в реальном 3D и т. п.

РИСУНОК 5

Случай использования WLAN ТГц



ТАБЛИЦА 5

Типовые требования

Расстояние связи	Несколько десятков метров
Скорость передачи данных	От нескольких Мбит/с до нескольких десятков Мбит/с
Среда распространения	Служебные помещения, аэропорты, рестораны
Требуемый BER	$\leq 1 \times 10^{-6}$

## 4.2 Технологии приемопередатчиков ТГц

### 4.2.1 Приемопередатчик 300 ГГц, использующий ММІС

На рисунке 6 приведена блок-схема общей структуры модуля передатчика. В металлическом пакете волновода установлены диагональная рупорная антенна, усилитель мощности, модулятор и устройство умножения. Устройство умножения умножает несущую 75 ГГц, вырабатываемую местным генератором, и на модулятор поступают сигналы 20 ГГц. Для оценки модуля передачи конфигурируется система оценки путем установки модуля приемника для проведения оценки. Модуль приемника состоит из стандартной рупорной антенны (24 дБи) и модуля волновода, оснащенного барьерным диодом Шоттки. На рисунке 7 показан измеряемый спектр сигнала ASK 20 Гбит/с на выходном терминале усилителя мощности. Модулирующий сигнал на центральной частоте 300 ГГц  $\pm$  20 ГГц наблюдался модулятором выходного спектра, как показано на рисунке 8.

РИСУНОК 6  
Блок-схема модуля передатчика

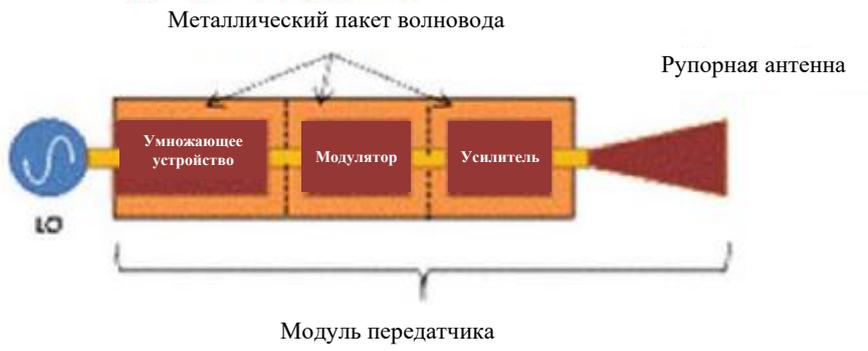


РИСУНОК 7  
Глазковая диаграмма сигнала 20 Гбит/с модуля передатчика

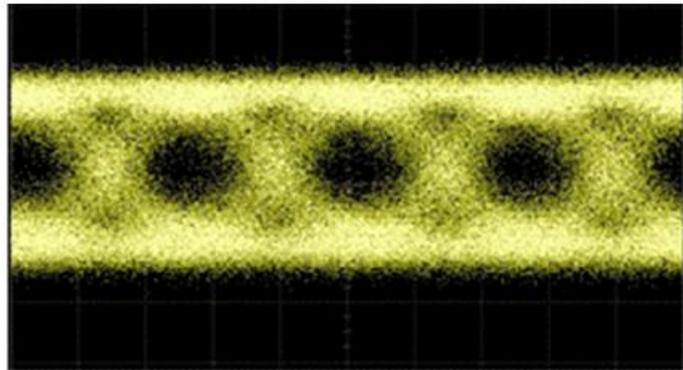
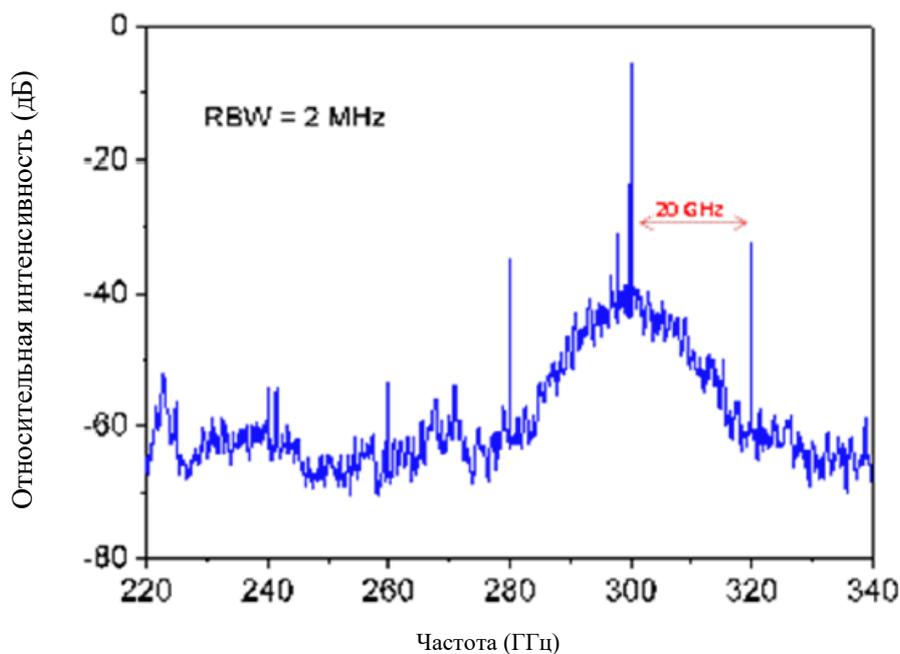


РИСУНОК 8

Выходной спектр усилителя мощности



Еще об одном подходе, в котором используется технология ММИС, сообщается в работе [1] библиографии, в которой представляется субгармоничный квадратурный передатчик, работающий на частоте 240 ГГц. В этой работе описываются и характеристики передатчика. Несущая частота в этом варианте ниже 275 ГГц, но приведенная информация позволяет сделать определенные выводы о характеристиках приемопередатчика, которые можно ожидать в нижней части диапазона частот ГГц.

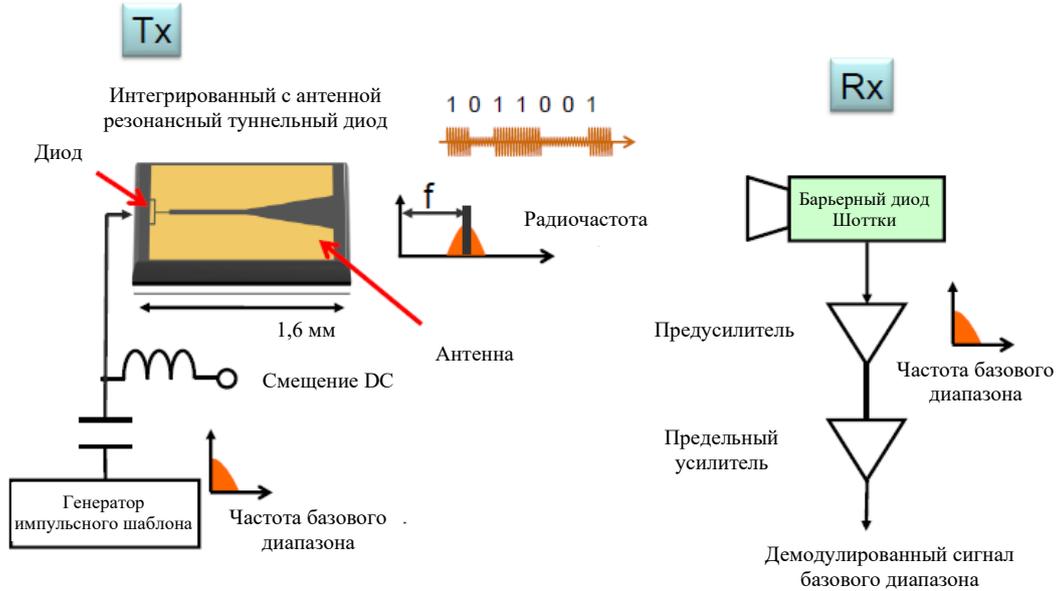
В работе [2] библиографии представляется система беспроводной связи, работающая на частоте 237,5 ГГц и способная обеспечивать скорость передачи данных 100 Гбит/с на расстоянии 20 м. На стороне приемника используется технология, описанная в работе [1], а на стороне передатчика применяется фотонный подход, при котором используется фотодиод с одинаковыми носителями заряда, мощность на выходе которого затем излучается антенной с фокусировкой луча.

#### 4.2.2 Приемопередатчик 300 ГГц, использующий RTD

Генератором является так называемый резонансный туннельный диод (RTD), который производит энергию при соответствующем напряжении смещения постоянного тока. Посредством изменения напряжения смещения сигнал несущей 300 ГГц модулируется как ON и OFF, в зависимости от амплитуды напряжения смещения. Что касается приемника, используется приемник прямого детектирования, как показано на рисунке 9. Максимальная скорость составляла 1,5 Гбит/с, а передача несжатых сигналов ТВЧ была возможна благодаря диодным технологиям. Также показано, что RTD можно также эксплуатировать в качестве детектора высокой чувствительности. Демонстрировалась также передача без ошибок на скорости 2,5 Гбит/с на частоте 625 ГГц с использованием частотного множителя для передатчика.

РИСУНОК 9

Блок-схема беспроводной линии с использованием диодных технологий

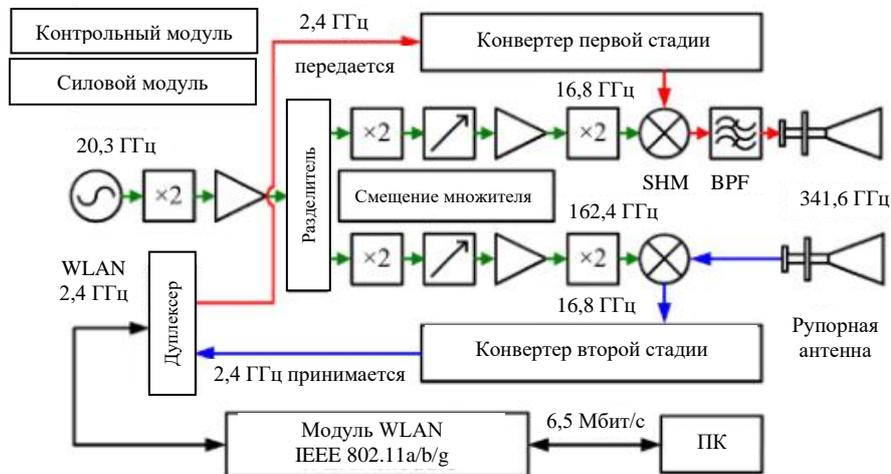


4.2.3 WLAN 0,34 ТГц на базе IEEE802.11

На рисунке 10 показана схема WLAN 0,34 ТГц, которая реализуется в каскаде приемопередатчика беспроводной связи 0,34 ТГц на основании технологии электроники твердотельных полупроводников и устройства WLAN на базе IEEE802.11. Скорость передачи данных WLAN 0,34 ТГц может составлять 6,536 Мбит/с на расстоянии 50 м, а ее BER ниже  $10^{-6}$ . Уровень MAC и частичный физический уровень устанавливаются на основе коммерческого беспроводного модуля IEEE802.11, который работает на частоте 2,4 ГГц со скоростью 150 Мбит/с. Несущая 2,4 ГГц на базе IEEE802.11 может быть перемещена на 16,8 ГГц при использовании смесителя. Сигнал несущей на 16,8 ГГц принимается в каскаде приемопередатчика WLAN 0,34 ТГц и перемещается на частоту 0,34 ТГц, а затем сигнал 0,34 ТГц направляется антенной. Если в каскаде приемопередатчика 0,34 ТГц принимается сигнал, он преобразует сигнал до 2,4 ГГц и посылает его беспроводному устройству на базе IEEE802.11.

РИСУНОК 10

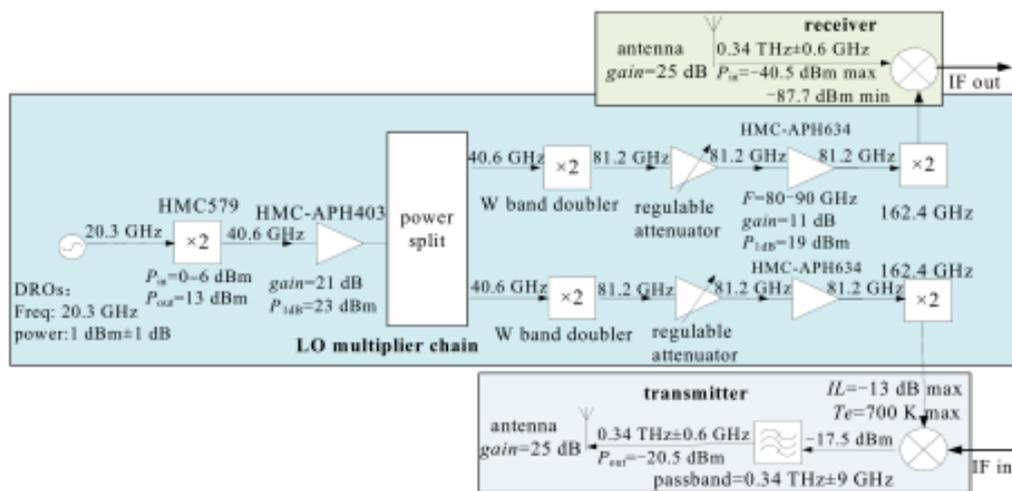
Схема узла WLAN 0,34 ТГц



На рисунке 11 показана структура входного каскада приемопередатчика 0,34 ТГц, который состоит из резонаторного фильтра 0,34 ТГц, гармонического смесителя 0,34 ТГц, двойной частотной цепочки 0,17 ТГц и фидерной цепи смещения. Гармонический смеситель 0,34 ТГц является важнейшим модулем входного каскада приемопередатчика; принцип его работы базируется на эффекте нелинейного соотношения ток-напряжение (I-V) антипараллельного диода Шоттки. Двойная частотная цепочка 0,17 ТГц с 8-гармоничной структурой доводит вибрационный сигнал до гармонического смесителя 0,34 ТГц, который состоит из двухчастотного смесителя диапазона Q, усилителя диапазона Q, разделителя мощности диапазона Q, двухчастотного смесителя диапазона W, регулируемого ослабителя диапазона W, усилителя диапазона W, двухчастотного умножителя диапазона G band и т. п. Сюда также входит трехпорядковый двухчастотный умножитель и двухпорядковый задающий усилитель.

РИСУНОК 11

Каскад приемопередатчика WLAN 0,34 ТГц



## 5 Зондирование и визуализация

Волны ТГц обладают умеренной проникаемостью веществ и хорошим пространственным разрешением, а также уникальными характеристиками, которых лишены другие полосы электромагнитных частот, такими как спектральная дактилоскопия реактивов, распознавание однонитевой и двухнитевой ДНК, распознавание поглощения водой и льдом и чувствительность в отношении примесей в полупроводниках; наряду с этим волны ТГц не представляют опасности для организма человека. На основании этих фактов прогнозируется применение широкого спектра видов зондирования и визуализации.

### 5.1 Метод генерации ТГц

В таблице 6 показано соотношение между методами генерации ТГц и их технологиями.

ТАБЛИЦА 6

## Методы генерации ТГц и их технологии

Метод генерации	Технология производства	Материал	Функция
Фотовозбуждение сверхкороткими импульсами	Фотопроводящая антенна	LT-GaAs	ТГц-TDS Работа при комнатной температуре
Нелинейная оптика	Параметрическая DFG	GaAs, GaP, GaSe, ZGP, PPLN, BD-GaAs, OP-GaAs	Переменная длина волны Работа при комнатной температуре
Фотосмещение	Фотопроводник UTC-PD	LT-GaAs, InP/InGaAs	Работа при комнатной температуре
Лазер	QCL	GaAs/AlGaAs, InGaAs-AlInAs/InP	Узкая ширина линии Работа при криогенной температуре
Твердотельное электронное устройство	Gunn, IMPATT, RTD Составной полупроводник	GaAs, InP, Si AlAs/GaInAs/AlAs HBT, HEMT, mHEMT, pHEMT	Фиксированная длина волны Работа при комнатной температуре
Электронно-лучевая трубка	BWO, Gyrotron		Переменная длина волны Работа при комнатной температуре

## 1) Фотовозбуждение сверхкороткими импульсами

В настоящее время это наиболее распространенный метод генерации импульсов ТГц. Посредством фотовозбуждения нелинейного кристалла (NLC), фотопроводящей антенны (PCA), полупроводников и сверхпроводников и т.п., используя производимые лазером сверхкороткие импульсы продолжительностью около фемтосекунды, можно получить в полупроводниках колебания фотопроводящего тока продолжительностью субпикосекунды и можно генерировать широкополосный оптический импульс ТГц, используя вторичную нелинейную поляризацию (выпрямление света) с применением нерезонансной нелинейной среды. Этот метод широко применяется в спектроскопии ТГц с разрешением во времени (ТГц-TDS).

ТГц-TDS обладает чрезвычайно высоким соотношением сигнала и шума (коэффициент  $S/N$ ) по сравнению со спектрометром дальнего ИК-диапазона с преобразованием Фурье, с применением обычного источника ИК-излучения, и используется в спектроскопии и визуализации ТГц и т.п. Хотя следует соответствующим образом выбирать структуру, состав кристалла и длину волны лазера возбуждения для структуры фотопроводящей антенны, полупроводника и нелинейного кристалла, благодаря последним достижениям в технологии лазеров сверхкоротких импульсов и используя регенеративный усилитель для получения в качестве света возбуждения импульсного света высокой мощности, возможно получить импульс ТГц, обладающий высоким напряжением электрического поля.

## 2) Нелинейная оптика

Этот метод генерации подразделяется на параметрическую генерацию и генерацию разностной частоты (DFG). Параметрическая генерация предполагает преобразование длины волны фотонными поляритонами в таких нелинейных кристаллах, как LiNbO<sub>3</sub>. Она предполагает настраиваемую длину волны и работу при комнатной температуре, а миниатюризация источника света с настольных до наладонных размеров возможна при миниатюризации лазеров возбуждения. Недавно был получен импульс ТГц пикового напряжения, превышающего 1 кВт, что сопоставимо со значениями при использовании лазера на свободных электронах (FEL).

С другой стороны, генерация разностной частоты (DFG) представляет собой генерацию разностной частоты при использовании вторичного нелинейного оптического эффекта нелинейных кристаллов. За последние годы сообщалось о методах генерации с использованием органических кристаллов, таких как DAST и BNA, а в отношении напряжения генерации сообщалось о мВт на выходе при использовании внутрирезонаторной DFG.

### 3) Фотосмещение

При инжектировании света лазера, работающего на двух длинах волны, в фотопроводящее устройство или фотодиод генерируется волна ТГц, которая является разностной оптической частотой, с применением фотоэлектрического преобразования посредством фотосмещения. Что касается фотодиода, может генерироваться свет ТГц, превышающий 1 ТГц, благодаря тому, что фотодиод с одинаковыми носителями заряда (UTC-PD) обладает характеристиками высокой скорости и высокой производительности.

### 4) Лазер

Квантово-каскадный лазер (QCL) имеет многослойную структуру, состоящую из полупроводниковых материалов с энергетическими барьерами различной высоты и толщиной, измеряемой в нанометрах, в котором лазерная генерация осуществляется с помощью межподзонных переходов. Хотя в принципе ширина линии будет очень узкой, на практике она ограничивается работой при низких температурах (максимальная рабочая температура, достигаемая при запуске импульса, составляет 200 К). Однако выходная мощность при частоте, превышающей 1 ТГц, является относительно высокой.

### 5) Твердотельные электронные устройства

Традиционно такие устройства разрабатываются для работы на микроволнах или миллиметровых волнах. Диоды Ганна, использующие эффект междолинного перехода и имеющие полосы проводимости с различной фактической массой, лавинно-пролетные диоды (IMPATT), а также лавинно-пролетные диоды с туннельной инжекцией носителей (TNNETT) представляют собой пролетные диоды, формирующие структурно высокие зоны, в которых перемещаются электроны.

Резонансные туннельные диоды (RTD) представляют собой структуру двойного барьера с тонкой полупроводниковой пленкой, в которой создается отрицательное дифференциальное сопротивление за счет возникающего в ней туннельного эффекта, обеспечивающего базовую лазерную генерацию с частотой, превышающей 1 ТГц (хотя уровень на выходе остается незначительным).

В качестве практичного высокочастотного полупроводникового устройства, применяемого в настоящее время в лазерных генераторах, усилителях и даже в монолитных интегральных схемах СВЧ-диапазона (ММИС), используются биполярный транзистор с гетеропереходом (HBT), который представляет собой полупроводниковое соединение, а также транзистор с высокой подвижностью электронов (HEMT). Хотя и предполагается, что полупроводники типа InP с такими характеристиками материала, как высокая подвижность электронов, должны работать с более высокой скоростью, были также сообщения об устройствах, которые функционируют на частотах, превышающих несколько сот ГГц, за счет применения таких технологий, как псевдоморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов (pHEMT) и метаморфные транзисторы с высокой подвижностью электронов (mHEMT), которые стремятся к более высоким скоростям.

### 6) Электронно-лучевая трубка

Волны с частотой ТГц образуются генератором обратной волны (BWO) за счет взаимодействия замедляющих схем и электронов; излучением Смита-Парселла за счет эффекта Смита-Парселла, возникающего в момент прохождения электронов через металлическую дифракционную решетку; гиротроном с помощью воздействия мазера в циклотронном резонансе, который связан с изменением массы электрона, вызванным релятивистским эффектом. И если результаты на выходе, как правило, оказываются большими, то и размеры конструкции также являются большими.

## 5.2 Камеры диапазона ТГц

Ниже приводятся тенденции в области двумерных матричных датчиков диапазона ТГц, основанных на технологии неохлаждаемого инфракрасного матричного датчика типа болометра.

На рисунке 13 представлено изображение инфракрасной камеры, оснащенной двумерным инфракрасным матричным датчиком с количеством пикселей, составляющим  $320 \times 240$ , и плотностью пикселей, равной  $23,5 \mu\text{m}$ , в момент инжектирования электронов квантово-каскадным лазером с частотой в  $3,1 \text{ ТГц}$ . Структура пикселей в данном случае имеет дополнительный терагерцевый поглощающий слой и за счет корректировки сопротивления тонкой металлической пленки от полного сопротивления вакуума до  $377 \text{ Ом}$ , чувствительность при частоте порядка  $3 \text{ ТГц}$  улучшается примерно на однозначное число (рисунок 12(a)). Кроме того, узкополосный терагерцевый матричный датчик, показанный на рисунке 12(b), разработан с целью повышения чувствительности еще в 2–4 раза только при определенной длине волны.

На рисунке 14 показана зависимость длины волны эквивалентной мощности шума (ЭМШ) для широкополосного и узкополосного терагерцевых матричных датчиков. Как видно из характеристик широкополосного терагерцевого матричного датчика, он демонстрирует примерно плоские характеристики ЭМШ начиная с длины волны в  $3 \mu\text{m}$  до чуть менее  $200 \mu\text{m}$ , а с уровня выше  $200 \mu\text{m}$  характеристики ЭМШ начинают ухудшаться. На рисунке 15 и в таблице 7 представлены внешний вид и технические характеристики портативной терагерцевой камеры, оснащенной одним из двух типов матричных датчиков – широкополосным терагерцевым матричным датчиком. При использовании кремния с высоким уровнем сопротивления в качестве материала для терагерцевой линзы, на кремнии формируется париленовая пленка в качестве неотражающего покрытия. Кроме того, перед терагерцевой линзой устанавливается инфракрасный блокирующий фильтр (фильтр из металлической решетки, который позволяет осуществлять передачу с длиной волн, превышающей примерно  $30 \mu\text{m}$ ). Эта камера может запускаться с помощью компьютера через интерфейс USB 2.0 и может также регистрировать в компьютере данные в цифровом изображении.

РИСУНОК 12(a)

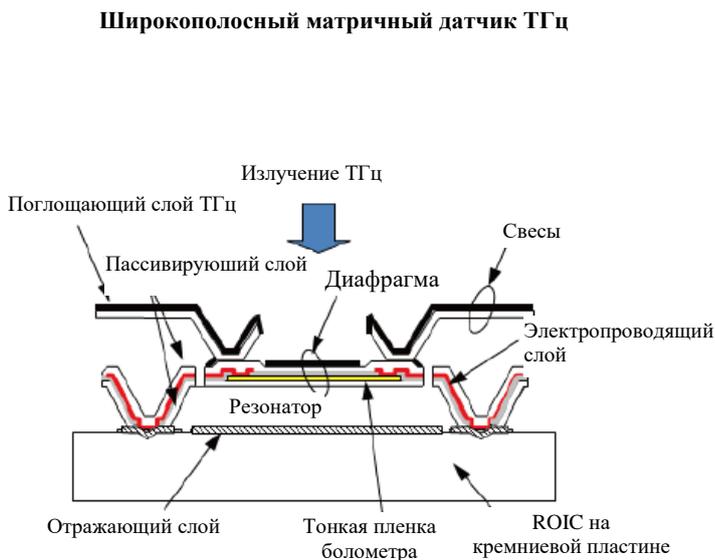


РИСУНОК 12(b)

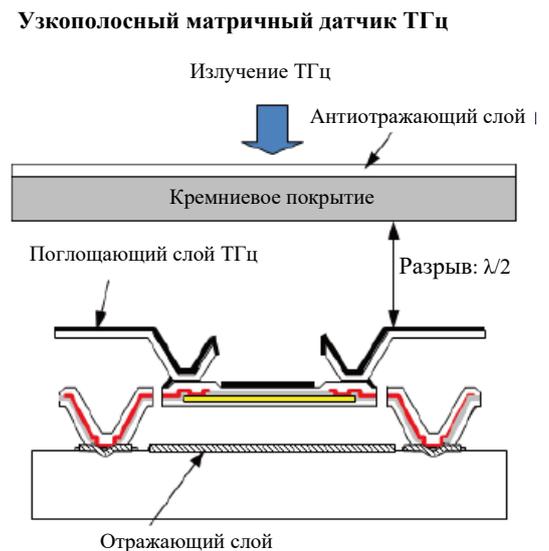


РИСУНОК 13

Диаграмма направленности луча терагерцевого матричного датчика QCL с количеством пикселей  $320 \times 240$  и плотностью пикселей  $23,5 \mu\text{м}$

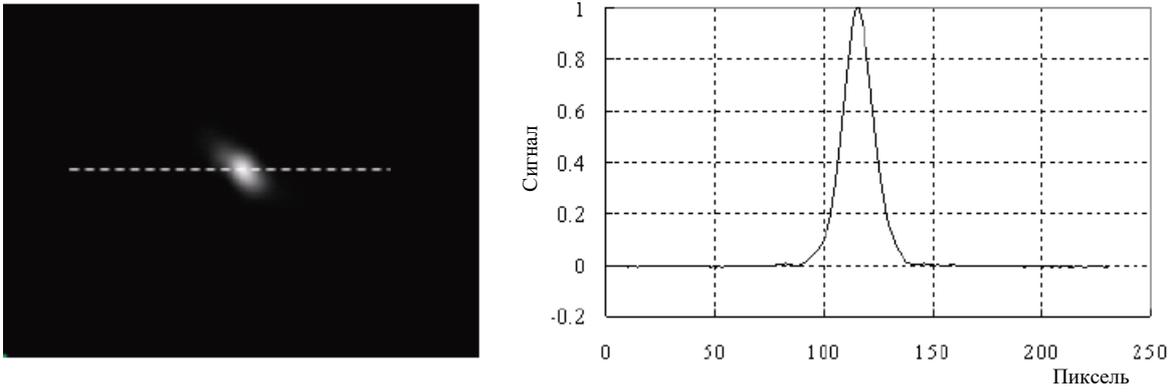


РИСУНОК 14

Зависимость длины волны ЭМШ терагерцевого матричного датчика

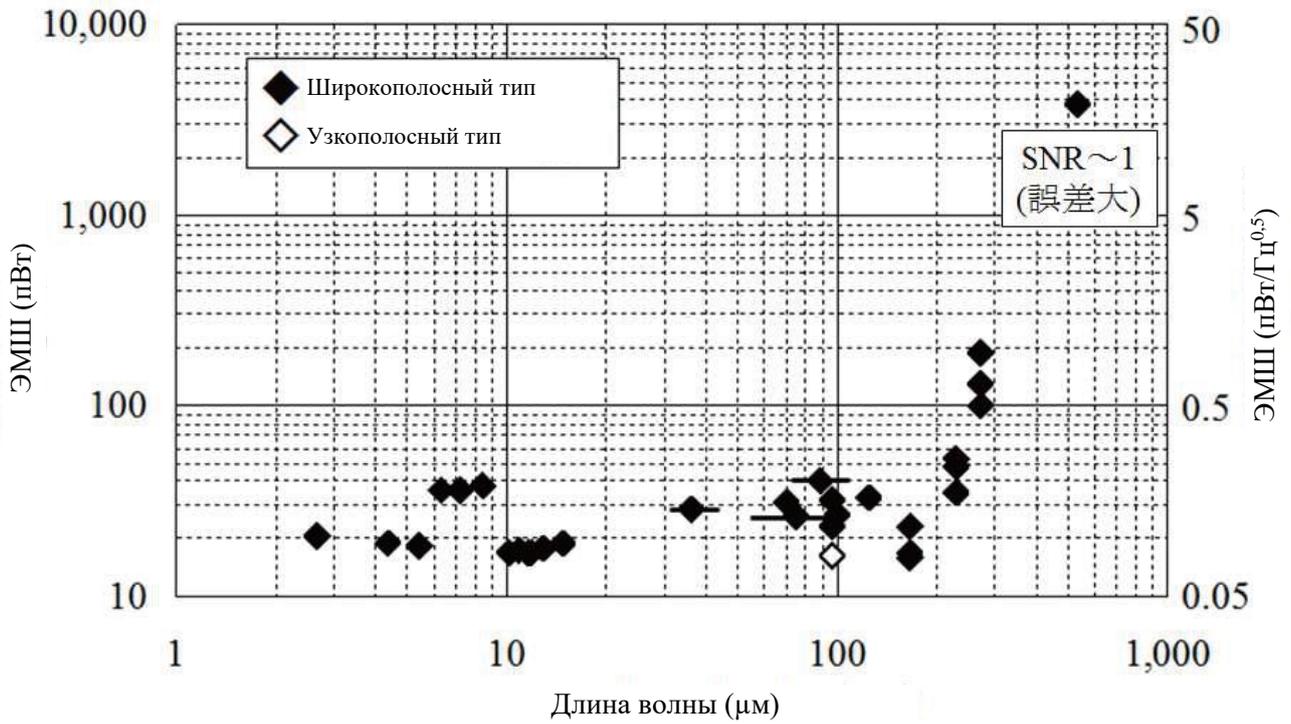


РИСУНОК 15

Внешний вид терагерцевой камеры



ТАБЛИЦА 7

Технические характеристики терагерцевой камеры

Метод	Тип болометра
Формат матрицы	Количество пикселей: 320 × 240 Плотность пикселей: 23,5 мкм
Поле обзора	Примерно 15° × 11° (при оснащении линзой с фокусным расстоянием в 28 мм)
Частота кадров	30 Гц
Получаемый результат	Данные в цифровом изображении: USB2.0 Синхронный сигнал: BNC
Функция блокирования изображения	Синхронный сигнал: 15 Гц, 7,5 Гц, 3,75 Гц, 1,875 Гц (результат на выходе TTL: +5В)
Функция обработки сигнала	Интеграция кадра Пространственный фильтр
Вес	Около 550 г (без линзы и фильтра)

### 5.3 Спектроскопия

Спектроскопические системы можно подразделить на обычную инфракрасную спектроскопию с преобразованием Фурье (FTIR), спектроскопические системы с изменением длины волны и терагерцевую спектроскопию с разрешением во времени (ТГц-TDS). Система Мартина-Паплета, которая представляет собой усовершенствование обычной инфракрасной технологии, служит одним из примеров FTIR. Спектроскопические системы с изменением длины волны используют трубку обратной волны, чтобы непосредственно менять длину терагерцевой волны, а также методы изменения частот, в которых используются два лазера с меняющейся длиной волны. Вместе с тем, существуют вопросы, касающиеся диапазона изменений и точности длины волны.

#### 5.3.1 ТГц-TDS

В течение прошлого десятилетия был разработан новый мощный инструмент для осуществления измерений в диапазоне ТГц, так называемая спектроскопия с разрешением во времени (ТГц-TDS). Электромагнитные волны моноцикла импульса терагерцевого излучения генерируются и измеряются за счет регулируемого по времени обнаружения с помощью короткого лазерного импульса спектроскопии ближнего ИК-диапазона (NIR). Обычно моноцикл импульса терагерцевого излучения содержит весьма обширную часть спектра, как правило, от 100 ГГц до 10 ТГц. Этот метод получает широкое распространение в связи с осуществлением диагностики материалов.

### 5.3.2 Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье (FTIR)

Многие материалы обладают так называемыми спектральными "отпечатками пальцев" в диапазоне частот выше 275 ГГц. Действительно, спектроскопия в диапазоне частот выше около 1000 ГГц проводится с 1960-х годов, и уже разработаны некоторые коммерческие продукты. Система охватывает полосу частот полностью вплоть до среднего ИК-диапазона. В среднем ИК-диапазоне спектральные характеристики определяются внутримолекулярным поведением и уже существуют спектральные библиотеки, содержащие данные практически обо всех стандартных химических веществах. Так, химики могут использовать коммерческую систему в качестве обычного инструмента для идентификации неизвестных материалов. В дальнем ИК-диапазоне или в терагерцевой полосе частот, спектральные характеристики "отпечатков пальцев" зависят от межмолекулярного поведения, поглощения фононов, водородных связей или аналогичных условий состояния молекул. В отличие от среднего ИК-диапазона, здесь нет никакой коммерческой спектральной библиотеки.

### 5.3.3 Анализ материалов

Анализ характеристик твердых и жидких веществ осуществляется с помощью спектрометрии ТГц-TDS. Например, используется поляриметрия полосы ТГц для оценки характеристик двойного лучепреломления материала на каждой частоте. Помимо устройств, использующих такую функцию оценки, на рынке начинают появляться также устройства, оснащенные аналитическими функциями, такими как анализ оптических изомеров полимеров, позволяющими разрабатывать новые материалы. С другой стороны, несмотря на то, что терагерцевые волны весьма подвержены поглощению водой, стало возможным проводить измерения образцов, содержащих воду, что традиционно считалось трудноосуществимой задачей, за счет использования спектрометрии ослабленного полного отражения (метода ATR) на частотах ТГц.

С помощью этого метода характеристики образца можно получить, не проникая в воду, и можно также обнаруживать клетки в жидкой питательной среде, в связи с чем этот метод ATR рассматривается в качестве эффективного метода для терагерцевых применений в биотехнологии.

## 5.4 Неразрушающие испытания

### 5.4.1 Применения, касающиеся промышленных продуктов

Спрос на получение изображений в диапазоне ТГц для промышленных продуктов и материалов по-прежнему остается весьма устойчивым. Это объясняется тем, что только использование радиоволн терагерцевых полос или таких излучений, как рентгеновские лучи, позволяет видеть насквозь непрозрачные предметы в видимом свете. Однако применение ионизирующего излучения, например рентгеновских лучей, связано с рисками и другими ограничениями, в то время как радиоволны терагерцевых полос обладают низкой энергией как кванты и не создают ионизирующих излучений, а использование рентгеновских лучей для обнаружения таких легких элементов, как углерод, представляется проблематичным. Из радиоволн вплоть до терагерцевых полос, в сравнении в частности с микроволнами, которые, в принципе, имеют большую длину волны и плохое разрешение изображения (пространственное разрешение), миллиметровые волны вплоть до терагерцевых волн, которые обеспечивают пространственное разрешение в пределах миллиметра или меньше, представляются намного более полезными для применений, обеспечивающих получение изображений.

В промышленных продуктах нашей повседневной жизни используется огромное количество неметаллических материалов, способных передавать терагерцевые волны. Некоторые из наиболее типичных из этих продуктов изготавливаются из пластических материалов, винила и бумаги, в то время как другие делаются из керамики и резины и обладают различными функциями, а также часто имеют высокую добавленную стоимость. Примерами могут служить медицинские компоненты, в которых используется теплостойкость керамики и гибкость резины. Эти продукты широко применяются в энергетике и медицине и очень нужны для обнаружения посторонних частиц. Размеры дефектов часто составляют по крайней мере около 1–10  $\mu\text{m}$ , в связи с чем требуются высокие уровни отношения S/N и скорости.

Терагерцевая СТ технология является весьма перспективной с точки зрения развития терагерцевой технологии получения изображений при неразрушающих испытаниях, которые невозможно было бы проводить, используя рентгеновские лучи. Терагерцевые волны, которые могут получать спектроскопическую информацию, могут обнаруживать дефекты, а также информацию о характере этих дефектов, и привлекают внимание как технология, способная обеспечить новую добавленную стоимость для анализа. К дефектам, требующим обнаружения, относятся посторонние частицы, а также неровности тонкой пленки и дефекты в защитном покрытии и т. п.

Желаемая глубина точности составляет обычно примерно несколько  $\mu\text{м}$ , однако при проверке подложки полупроводника и т. п. бывают случаи, когда требуются электрические характеристики тонкой пленки с толщиной менее примерно нескольких 100 нм. Ранее измерение такой тонкой пленки с использованием терагерцевых волн было связано с трудностями, однако благодаря достигнутому в последнее время прогрессу в области развития технологии это становится вполне возможным.

#### 5.4.2 Биологические и медицинские применения

В настоящее время существует широкий круг применений для проведения клинического диагностического контроля, начиная с заболеваний, связанных с образом жизни, вплоть до маркеров онкологических заболеваний, если включить сюда исследовательские применения. В число базовых принципов клинического обнаружения белковых мишеней и т. п. входит также множество других, которые моделируются на основе механизма признания организмов, такого как реакция антиген-антитело.

Однако для того чтобы различать в теле человека наличие или отсутствие такого признания, требуется более высокий уровень обработки. Например, в рамках метода обнаружения аллергенов, в котором используется метод клинического контроля, известный под названием иммуноферментного анализа, иммобилизованное антитело, которое конкретно ассоциируется с аллергеном, фиксируется на субстрате и после реакции с образцом обнаруживается наличие или отсутствие этого аллергена с помощью использования антитела обнаружения или маркера обнаружения. Таким образом применяется многоэтапная реакция, чтобы показать результаты контроля с помощью цвета или свечения. Такие маркеры предназначены для того, чтобы эффективно вырабатывать цвет с помощью самой незначительной реакции с субстратом, а при хемилюминесцентных измерениях достигается чувствительность обнаружения порядка пикограмма. Однако проведение многоэтапного контроля также связано с проблемами, такими как потребности в многочисленных реагентах, продолжительность времени контроля и повышение фактора ошибок за счет многоэтапной обработки данных.

На этом фоне группа исследователей в Германии в 2000 году сообщила о возможности безмаркерного обнаружения за счет использования терагерцевых волн. Исследователи продемонстрировали в рамках своих экспериментов наличие различий в терагерцевой полосе между индексами рефракции и пропускания в одноцепочной и двухцепочной молекулах ДНК. Впоследствии группа исследователей в США предложила метод обнаружения, предусматривающий связывание авидин-биотина с помощью фазовой задержки в форме волны спектроскопии с разрешением во времени ТГц-TDS. Это означает, что появляется возможность обнаруживать наличие/отсутствие связывания без использования маркеров с помощью изменения индекса рефракции и поглощения биологических полимеров в терагерцевых полосах частот. В Японии использовалась система измерения изображения, включающая квантово-каскадный лазер и камеру диапазона ТГц, в рамках которой линия низкомолекулярных соединений фиксировалась на мембране фильтра, а белки, которые конкретно с ними ассоциировались, были успешно обнаружены в виде изображения, что подтверждает возможность обнаружения биологических веществ, таких как белки, быстрым, удобным и безмаркерным способом.

С другой стороны, одной из важных тем технологического развития является проблема чувствительности обнаружения. Уровень чувствительности, требуемый для клинического контроля, находится в пределах от миллиграмма до пикограмма, а для проведения безмаркерного контроля особенно необходима чувствительность в пределах от нанogramма до пикограмма. В качестве примера применений контроля, требующих такие небольшие величины чувствительности, можно привести применение, используемое для целей прогнозного диагноза аутоиммунных заболеваний, возникающих в связи с присутствием аутоиммунного антитела в крови.

Как правило, защита от проникновения бактерий и вирусов из окружающей среды обеспечивается за счет иммунной реакции в организме. Однако в случае аутоиммунных заболеваний вещества, участвующие в обеспечении иммунитета в организме, атакуют организм. Например, при заболевании диабетом 1-го типа были обнаружены аутоиммунные антитела, нацеленные на три типа панкреатических белков, причем известно, что 70–90% пациентов имеют по крайней мере одно из этих аутоантител. Кроме того, исследовалась связь между этими тремя аутоантителами и их распространением и была установлена четкая взаимосвязь. Поэтому с помощью проведения предварительного контроля, чтобы узнать, существуют ли в организме эти аутоантитела, может быть спрогнозировано начало их появления, что можно также использовать в целях профилактики.

Желательно, чтобы такой контроль осуществлялся в рамках медицинских осмотров и важно, чтобы была разработана удобная, быстрая и недорогостоящая технология контроля. При ее применении в рамках медицинских осмотров было бы идеально, чтобы в ходе одного контроля могли быть спрогнозированы различные заболевания, а не только упомянутый ранее диабет 1-го типа. Другими словами, для проведения контроля за один раз с помощью реакции аутоантиген различных заболеваний, зафиксированных на единой микросхеме контроля, с небольшими объемами аутоантител, обнаруженных в образце крови, требуется такая технология, которая позволяла бы осуществлять безмаркерный контроль и обнаруживать биологические вещества размером порядка пикограмм.

Требуемый в рамках клинических исследований объем лекарственных препаратов для исследования обычной антисыворотки, включая контроль, основанный на реакции антиген-антитело, оценивался на внутреннем рынке в 157,2 млрд. иен в 2008 финансовом году и в 168 млрд. иен в 2013 финансовом году, по данным обследования, проведенного Фуджи-Кейзаи. Этот рынок охватывает более 40% от рынка исследуемых лекарственных препаратов, что составляет самую большую его долю. С их появлением предполагается, что на этом рынке не смогут оказаться технологии с использованием маркеров и высокоточные технологии контроля и вряд ли они смогут способствовать расширению размеров этого рынка.

С другой стороны, такие потребности в безмаркерных методах отслеживания веществ ощущаются в различных областях и их побочный эффект является существенным. Это включает сферу безопасности с точки зрения проверки на наличие опасных газов, бактериологического оружия и взрывчатых веществ; проверку на наличие инфекционных вирусов, таких как новые типы гриппа, когда возникает опасение в отношении пандемии; и проверку на наличие микроэлементов в окружающей среде, остатков пестицидов в сельскохозяйственной продукции и остатков антибиотиков в организме животных.

Поэтому важно продолжать начатые разработки в области технологий безмаркерного контроля в качестве инфраструктуры для проведения исследований, касающихся отбора контрольных веществ на основе этой технологии, а также для осуществления научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с целью повышения чувствительности обнаружения. В качестве одной из технологий повышения чувствительности обнаружения терагерцевых волн, применяется метод использования в качестве датчика металлической решетки, которая ведет к технологиям, позволяющим обнаруживать белки размером порядка нанogramм/мм.

За счет объединения технологии безмаркерного обнаружения микроэлементов с технологией получения изображения, сфера их использования будет и далее расширяться. В частности, можно будет осуществлять всеобъемлющий контроль белков, которые конкретно ассоциируются с соединениями, имеющими малую молекулу, и с соединениями сахарной цепи, что станет технологией, которая позволит добиться прогресса в области обнаружения наркотиков. Кроме того, технология безмаркерного обнаружения с помощью терагерцевых волн позволит внести ясность в отношении существования белков, которые до настоящего времени оставались незамеченными, поскольку их нельзя было маркировать, и предполагается, что это станет мощной технологией контроля и обнаружения в рамках исследований, проводимых в области биологических наук.

## **6 Деятельность, касающаяся терагерцевой области, проводимая в рамках разработки международных стандартов**

В 2008 году в рамках Рабочей группы IEEE 802.15 была создана Специальная группа по терагерцевым частотам (СГ ТГц). Ее цель заключалась прежде всего в стандартизации связи на терагерцевых частотах и соответствующих сетевых применений, работающих в терагерцевых полосах частот в диапазоне 275–3000 ГГц. Такие применения связи в диапазоне ТГц включали бы: беспроводную связь компонента с компонентом, борта с бортом, машины с машиной, человека с машиной и человека с человеком (в помещении и вне помещения). Применения связи в диапазоне ТГц охватывают многочисленные категории с различными требованиями. Предусматривается, что связь в диапазоне ТГц в целом будет осуществляться с помощью методов беспроводной модуляции ограниченной сложности, ненаправленных антенн и/или направленных систем, которые, как правило, будут обеспечивать очень высокие скорости передачи данных, кратные 10 Гбит/с и до 100 Гбит/с, обеспечивая мощность, равную мощности будущих волоконно-оптических линий. Беспроводные терагерцевые системы могли бы поддерживать расстояния передачи, составляющие от очень коротких дистанций (несколько сантиметров или менее) до относительно больших расстояний в несколько сот метров.

СГ ТГц сосредоточила свои усилия на вопросах открытого спектра, моделировании каналов и на мониторинге развития технологии. С развитием все более зрелых приемо-передающих технологий, Рабочая группа 802.15 сделала шаг вперед в направлении разработки нового стандарта, учредив в июле 2013 года исследовательскую группу, сфера действия которой заключалась в определении обоснованности стандарта по 100 G (100 Гбит/с через луч коммутируемой беспроводной линии связи пункта с пунктом 40/100 Гбит/с).

Исследовательская группа завершила свою работу в марте 2014 года созданием Целевой группы 3d. На основе материалов IEEE 802.15.3c этой Целевой группой будет подготовлена поправка к стандарту IEEE 802.15.3, в которой будет определен физический уровень беспроводной коммутируемой связи пункта с пунктом, работающей на скоростях передачи данных РНУ, как правило, составляющих до 100 Гбит/с или выше, с решениями перехода к более низким скоростям передачи данных, в случае необходимости. Рассматривается оперативная деятельность в полосах частот, начиная с 60 ГГц и вплоть до оптической беспроводной связи включительно, осуществляемой на короткие расстояния, составляющие от нескольких сантиметров до нескольких сот метров.

Кроме того, определены изменения, которые необходимо внести в уровень управления доступом к среде (MAC), чтобы оказать поддержку этому новому физическому уровню. Потенциальные применения, представляющие интерес, включают беспроводные центры данных, загрузку из информационного киоска, беспроводную связь между устройствами и беспроводную связь в целях обеспечения промежуточного трафика и периферийного трафика.

Первоначально ИГ ТГц сосредоточила свои усилия на диапазоне частот выше 275 ГГц, однако в рамках Целевой группы 3d вопрос о диапазоне частот будет открытым и можно будет включить другие полосы частот, в частности предусматривается рассмотреть частоту 60 ГГц и оптическую связь в сводном пространстве (FSO). Соответственно, интерес для этого физического уровня (РНУ) будут представлять миллиметровые или более короткие волны.

Ключевым вопросом в процессе разработки поправки является выявление конкретных полос частот выше 275 ГГц. Важное место при отборе надлежащих полос частот занимают характеристики затухания в газах в полосах частот от 100 ГГц до 1000 ГГц. Существует погонное резонансное затухание под воздействием кислорода и водяного пара. Непрерывная полоса, представляющая интерес для терагерцевой связи, оценивается просто с помощью отказа от соответствующих линий резонансного затухания. В таблице 8 приводятся подходящие диапазоны частот и данные о непрерывной ширине полосы.

ТАБЛИЦА 8

## Подходящая полоса частот и непрерывная ширина полосы

Полоса частот (ГГц)	Непрерывная ширина полосы (ГГц)	Дополнительные потери в связи с резонансным затуханием (дБ/км)
200–320	120	< 10
275–320	45	< 10
335–360	25	< 10
275–370	95	< 100
380–445	65	< 100
455–525	70	< 100
625–725	100	< 100
780–910	130	< 100

Большое значение имеет не только рассмотрение характеристик затухания, но и уровень зрелости технологии. Исходя из продемонстрированных экспериментов в области передачи и из текущих исследовательских проектов, вполне вероятно, что в рамках Целевой группы 802.15.3d основное внимание будет уделяться полосе частот в пределах от 275 ГГц до 325 ГГц.

Следует ожидать распространения запроса на представление предложений во второй половине 2015 года, цель которого будет заключаться в том, чтобы завершить работу над стандартом в первой половине 2017 года. Параллельно продолжает свою работу Специальная группа ТГц, которая по-прежнему осуществляет активный мониторинг технологических разработок, имеющих отношение к другим видам использования помимо тех, которые охвачены Целевой группой 3d. В конечном итоге это приведет к созданию одной или нескольких исследовательских групп для рассмотрения стандартов в терагерцевом диапазоне частот.

## 7 Резюме

Характеристики терагерцевых устройств и систем, обсуждаемые в настоящем Отчете, быстро совершенствуются за счет прогресса в технологии создания этих устройств. Терагерцевые беспроводные системы связи, в частности, могут обладать большим потенциалом для высокоскоростной передачи данных, близкой к 100 Гбит/с, обсуждение которой ведется в настоящее время в рамках IEEE802. Необходимо будет принять во внимание результаты исследований о совместном использовании между пассивными и активными службами, а также обзор потребностей РР, чтобы в ближайшем будущем представить эти устройства на рынке.

## 8 Библиография

- [1] J. Antes *et al.*, High Data Rate Wireless Communication using a 240 GHz Carrier IEEE 802.15-14-0017-00-0thz, Los Angeles, January 2014; <https://mentor.ieee.org/802.15/dcn/14/15-14-0017-00-0thz-high-data-rate-wireless-communication-using-a-240-ghz-carrier.pdf>
- [2] S. König *et al.*, Wireless sub-THz communication system with high data rate, Nature Photonics 7, 977–981 (2013), <http://www.nature.com/nphoton/journal/vaop/ncurrent/abs/nphoton.2013.275.html>
- [3] APT/ASTAP/REPT-04 – Technology trends of telecommunications above 100 GHz.