

Терагерцовая оптоэлектроника и ее применения

*А.С. Ахманов, А.А. Ангелуц, А.В. Балакин,
М.М. Назаров, И.А. Ожередов, Д.А. Сапожников,
В.И. Соколов, Е.В. Хайдуков, А.П. Шкуринов,
В.Я. Панченко*

1. Введение

Изучение явлений природы, имеющих отношение к терагерцовому (ТГц) диапазону частот электромагнитного излучения и определяемому как 0,3 – 10 ТГц (диапазон длин волн 1 мм – 30 мкм), сейчас признается как одно из передовых и прорывных направлений фундаментальной науки и техники. Многие фундаментальные научные исследования и разработки современных технологий ТГц диапазона остаются еще малоразвитыми по сравнению с относительно развитой областью науки и техники электромагнитного излучения микроволнового и оптического диапазонов частот [1, 2].

История развития учения о коротких электромагнитных волнах тесно связана с Московским университетом, с лабораторией электромагнетизма имени Максвелла, в которой в 20 годы прошлого века, продолжая исследования П.Н.Лебедева по получению коротких электромагнитных волн, работала А.А.Глаголева-Аркадьева. Под руководством своего мужа профессора В.К. Аркадьева она приступила к поиску нового метода получения электромагнитных волн, лежащих в промежуточной области между радиоволновой и оптической областью спектра [3]. Заполнение существовавшего тогда пробела на шкале электромагнитных волн имело важное значение как доказательство единства природы электромагнитных и световых волн (рис. 1).

И в 1922 г. А.А.Глаголева-Аркадьева изобретает источник таких волн, который она называет «массовым излучателем» (рис. 2) и докладывает свои результаты на съезде российской ассоциации физиков в Нижнем Новгороде, о свойствах электромагнитных волн лежащих в диапазоне от 50 мм до 82 мкм, в промежутке между радиоволновым и инфракрасным диапазонами спектра [4] (в современной классификации эти волны охватывают дальнюю область ИК спектра и часть СВЧ микроволнового диапазона и получили название ТГц диапазона частот).

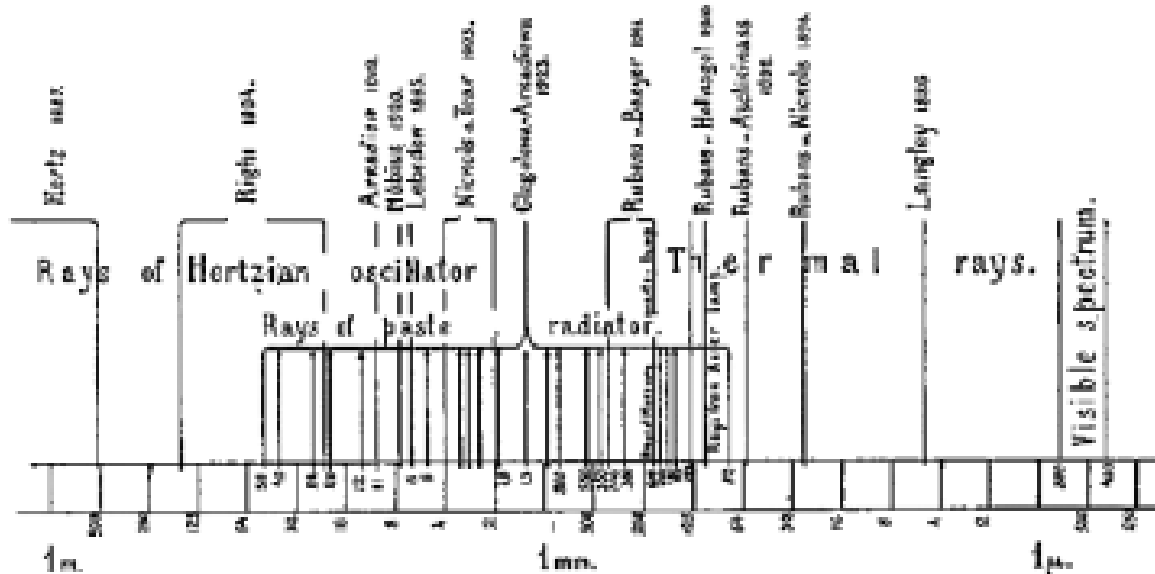


Рис. 1. Шкала электромагнитных волн (1924 год) [3]. Выделенная область соответствует ТГц диапазону.

Это важное открытие доказало единство световых и электромагнитных волн и принесло А.А.Глаголевой-Аркадьевой широкую известность и признание в научных кругах СССР и всего мира. Работы по совершенствованию техники генерации электромагнитного излучения предельно коротких длин волн электромагнитного излучения не прекращались учеными Московского университета и в годы войны. Продолжались исследования эффектов, связанных с излучением «массового излучателя»: разрабатывается теория его генерации и возможности модификации, а также начаты первые работы по применению излучения этого диапазона длин волн в технике, биологии, системах связи и безопасности. Именно в годы войны предпринята первая попытка использовать излучение «массового излучателя» для поиска противопехотных мин. Уникальность свойств электромагнитного излучения «массового излучателя» были понятны уже в то время, но большой размер и плохая мобильность самого «массового излучателя» и разработанного на его основе регистратора излучения не позволили развить широко его практические применения.

Появление источников сверхкоротких лазерных импульсов позволило в 80-х годах прошлого века получить широкополосное излучение ТГц диапазона частот с помощью достаточно практичных и надежных источников и детекторов [5]. Сейчас можно считать уже сформировавшимися такие направления как генерация и применение ТГц излучения, получаемого с помощью синхротронных ускорителей, лазеров на свободных электронах и ламповых источников, исследование процессов распространения ТГц излучения в свободном пространстве, ТГц лидары и новые принципы передачи информации в ТГц диапазоне частот. В последние годы начали активно

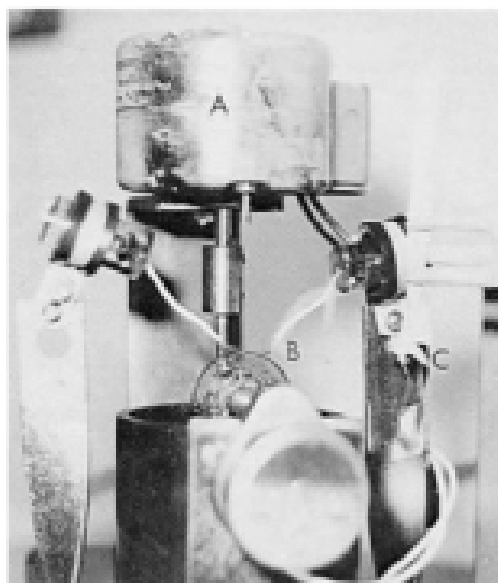


Рис. 2. Терагерцовый «массовый» генератор [4].

развиваться сразу несколько принципиально новых направлений, ранее не свойственных этому диапазону частот [6]. К таким направлениям несомненно стоит отнести применение ТГц излучения в биологии и медицине, в исследовании химических реакций в реальном времени, развитии техники формирования информативных конфокальных изображений и томографии, изучение взаимодействия ТГц излучения с метаматериалами и возбуждение плазмонных волн [7].

После первой демонстрации принципов импульсной ТГц спектроскопии в конце 80-х годов 20-го века [8] наблюдался значительный прогресс, обусловленный появлением более интенсивных источников ТГц излучения и более чувствительных детекторов, обеспечивающих новые возможности для глубокого понимания фундаментальной науки в ТГц частотном диапазоне. Техника генерации импульсного ТГц излучения имеет в своей основе преобразование лазерного излучения фемтосекундной длительности с помощью дипольных антенн на основе полупроводниковых материалов [9], в нелинейно-оптических кристаллах [10] и даже в плазме оптического пробоя [11]. Стало понятно, что развитие многих направлений ТГц исследований будет определяться тем, насколько быстро и эффективно будут развиваться источники, детекторы ТГц излучения и методы доставки излучения, насколько они будут обеспечивать потребность быстроразвивающихся приложений ТГц излучения. Обсуждению этих ключевых направлений и посвящена настоящая статья.

В данной статье мы описываем результаты работ, проводимых в Институте проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук по совершенствованию элементной базы импульсной терагерцовой спектроскопии и ее приложениях в медицине и безопасности.

2. Принципы генерации и регистрации импульсного ТГц излучения с помощью фемтосекундных лазеров. Элементная база лазерной импульсной ТГц техники: фотопроводящие антенны

Для того, чтобы показать основные принципы разработки источников импульсного ТГц излучения рассмотрим как происходит его генерация. Типичная импульсная система генерации и детектирования ТГц излучения построена на принципе «накачки и зондирования» и представлена на рис. 3. Наиболее распространенным способом работы импульсных систем является расщепление пучка фемтосекундного лазера на две части: зондирующий пучок и пучок накачки. Пучок накачки используется для генерации ТГц импульса, в то время как зондирующий пучок осуществляет временное стробирование и сканирование - с помощью линии задержки происходит стробирование детектора для получения профиля ТГц импульса. В дальнейшем временной профиль ТГц импульса с помощью преобразования Фурье преобразуется в частотное (спектральное) представление.

Фотопроводящая (ФП) антенна — это один из наиболее часто используемых узлов для генерации и детектирования ТГц волн. Она генерирует и регистрирует ТГц импульсы с помощью короткоживущих носителей заряда, индуцированных сверхкороткими лазерными импульсами. На рис. 4 приведен эскиз ФП антенны и показано, как использовать ФП

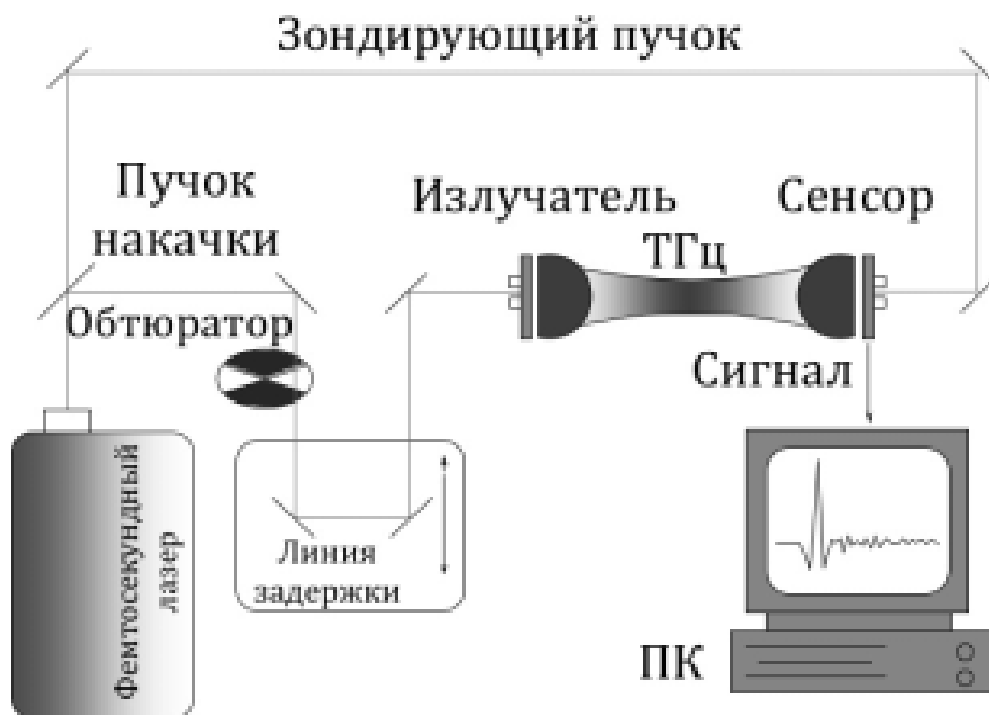


Рис. 3. Импульсная установка для генерации и детектирования ТГц волн.

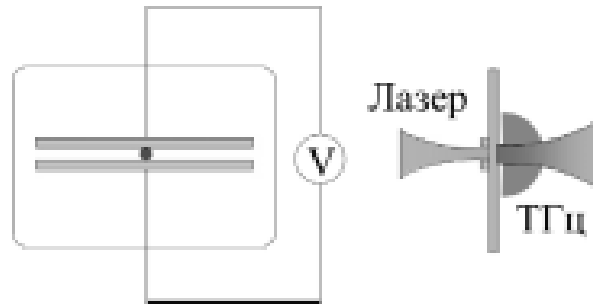


Рис. 4. ФП антенна и диаграмма направленности ТГц излучения ФП антенны.

антенну для генерации ТГц импульсов. Конструктивно ФП антенна состоит из двух металлических электродов, нанесенных на полуизолирующую полупроводниковую подложку с зазором между этими двумя электродами. Для генерации ТГц импульсов на электроды подается электрическое напряжение. Так как подложка является полуизолирующей, электрическая энергия запасается в области зазора и сверхкороткие лазерные импульсы играют роль быстродействующих переключателей, которые замыкают электрический контур и, тем самым, способствуют генерации ТГц импульса в результате ускоренного движения носителей в полупроводнике.

Как правило энергия фотонов (или суммы нескольких фотонов) возбуждающего оптического импульса должна превышать ширину запрещенной зоны подложки. Поскольку электроны обычно имеют намного более высокую подвижность, чем «дырки», то в большинстве случаев вкладом «дырок» можно пренебречь. Плотность тока тогда описывается следующим выражением:

$$J(t) = N(t)e\mu E_b, \quad (1)$$

где N — плотность фотоносителей заряда, e — заряд электрона, μ — подвижность электрона, E_b — электрическое поле смещения. Плотность фотоносителей заряда N — это функция времени, вид которой определяется формой лазерного импульса и временем жизни носителей заряда. Так как фототок изменяется во времени, происходит генерация электромагнитного импульса, чье электрическое поле приближенно описывается выражением:

$$E_{THz} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{A}{c^2 z} \frac{\partial J(t)}{\partial t} = \frac{Ae}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{\partial N(t)}{\partial t} \mu E_b, \quad (2)$$

где A — площадь в зазоре, освещенная светом лазера, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная вакуума, c — скорость света в вакууме и z — расстояние между точкой поля и ТГц источником. При выводе выражения (2) предполагалось, что точка измерения поля расположена на нормали к ФП антенне и

расстояние между точкой поля и источником много больше, чем размеры ФП антенны.

Энергия ТГц импульса черпается из электрической энергии, запасенной в зазоре, а не из энергии оптического импульса. В принципе, энергия импульса ТГц излучения не ограничена энергией импульса возбуждающего лазера, и эффективность преобразования оптических квантов в ТГц кванты может быть больше единицы. Однако энергия импульса ТГц излучения непосредственно связана с энергией импульса возбуждающего лазера. Чем больше фотоносителей заряда возбуждается, тем больше запасенной энергии преобразуется в ТГц излучение. В условиях слабого оптического возбуждения поле импульса ТГц волны пропорционально энергии импульса возбуждающего лазера. В действительности линейные зависимости между полем смещения и ТГц полем, так же как и между энергией возбуждающего импульса и ТГц полем, являются справедливыми только при слабом возбуждении и небольшом поле смещения. Когда подложка ФП антенны фотовозбуждена, она уже не является полуизолирующим материалом, а скорее является проводящей средой. В результате фотовозбужденная область экранирует смещающее поле, и выражение (1) для фототока преобразуется в:

$$J(t) = \frac{\sigma(t)E_b}{1 + \frac{\sigma(t)\eta_0}{1+n}}, \quad (3)$$

где σ — поверхностная проводимость подложки ($[\sigma] = \text{Ом}^{-1}$), $\eta_0 = 377 \text{ Ом}$ обозначает импеданс вакуума, n — показатель преломления подложки. Проводимость подложки σ вызывается возбуждающим лазером, и можно считать, что $\sigma \sim I_0$, где I_0 — интенсивность лазерного излучения. Комбинируя выражения (2) и (3), получаем для ТГц поля:

$$E_{\text{ТГц}} \propto \frac{d\sigma(t)}{dt} \left[1 + \frac{\sigma(t)\eta_0}{1+n} \right]^{-2} \propto \frac{I_0}{(1+kI_0)^2}. \quad (4)$$

Здесь $k = \kappa(t)\eta_0/(1+n)$, где $\kappa(t) = \sigma(t)/I_0$.

Выражение (4) ясно показывает, что, когда лазерное возбуждение достаточно сильное, импеданс подложки становится сопоставимым с импедансом вакуума, и ТГц поле начинает испытывать насыщение с ростом мощности возбуждающего лазера.

Увеличение поля смещения также ограничено, так как высокое электрическое поле может вызвать диэлектрический пробой в подложке. Пробой ФП антенны при генерации ТГц волны может быть двух типов: пробой, вызванный полем, и тепловой пробой. Пробой, вызванный полем, происходит, когда поле смещения выше, чем поле пробоя полупроводникового материала, то есть при $4 \cdot 10^5 \text{ В/см}$ для арсенида галлия. Он обычно возникает

мгновенно из-за стимулированной полей лавины. Тепловой пробой вызывается нагревом подложки фототоком, протекающим в подложке (так же как и поглощением фотонов возбуждающего лазера). Нагревание подложки уменьшает ее сопротивление, что приводит к еще большему электрическому току. Тепловой пробой является медленным процессом и обычно длится несколько секунд и даже минут. Большинство пробоев ФП антенн при генерации ТГц волн являются тепловыми, за исключением антенн, имеющих очень небольшой зазор или высокое напряжение смещения. Тепловой пробой ФП антенн вынуждает искать компромисс между интенсивностью возбуждающего лазера и максимальным напряжением смещения. Специальная обработка или покрытие поверхности подложки могут увеличить поле пробоя и таким образом усилить генерацию ТГц волн ФП антенной.

Применение ФП антенны в качестве ТГц детектора совершенно аналогично использованию ее в качестве ТГц излучателя. Единственное существенное отличие — это то, что у ФП антенны в качестве детектора два ее электрода подключаются к датчику тока, а не к источнику питания. Путем регулирования времени задержки между ТГц импульсом и оптическим зондирующим импульсом, электрическое поле между полосковыми электродами ФП антенны в установке для генерации и детектирования ТГц волн (см. рис. 3) может быть измерено в любой заданный момент времени с помощью стробирующего оптического импульса. Поскольку в течение определенного времени задержки в активной области присутствуют и ТГц импульсы и лазерные импульсы, фотоиндуцированные носители заряда приводятся в движение полем ТГц импульса, создавая ток между двумя электродами. Индуцированный ТГц полем ток равен:

$$\bar{J} = \bar{N}e\mu E(\tau). \quad (5)$$

Здесь \bar{N} — средняя концентрация электронов, τ — время задержки между зондирующим и ТГц импульсом. С помощью сканирования времени задержки регистрируется временная диаграмма ТГц импульса.

Период ТГц колебаний составляет около 1 пс. Типичные ТГц импульсы представляют собой колебания поля от доли периода до нескольких периодов. Как видно из выражения (5), при детектировании ТГц импульсов непосредственно регистрируется их поле, а не интенсивность. При измерении делается запись не только амплитуды, но и фазовой информации ТГц импульса, в то время как в оптике последнюю довольно трудно измерять непосредственно.

Рабочие характеристики ФП антенны зависят главным образом от следующих факторов: материала подложки, конфигурации или топографии активной области антенны, а также от возбуждающего лазерного импульса. Материалы с коротким временем жизни носителей заряда, такие как низкотемпературный арсенид галлия (LT-GaAs) или легированный кремний, обычно выбираются в качестве подложки, чтобы увеличить скорость отклика

ФП антенны. Скорость отклика существенна при генерации и регистрации ТГц импульсов, содержащих высокочастотные составляющие. Более высокая подвижность носителей — также желательное свойство, способствующее высокой эффективности генерации ТГц волны. Высокое темновое сопротивление подложки требуется для того, чтобы иметь достаточное напряжение пробоя антенны. Активная область ФП антенны, которой является область зазора, в которой осуществляется лазерное возбуждение свободных носителей заряда — это ещё один ключевой элемент ФП антенны, так как именно в этой области происходит генерация и детектирование ТГц волн. Тщательный расчет распределения поля в зазоре может увеличить поле пробоя и позволит генерировать более интенсивные ТГц импульсы с помощью ФП антенны [12]. Распределение возбуждающего света в пределах зазора также важно. ФП антенны с меньшими зазорами более чувствительны, особенно когда используется низкая мощность возбуждения. Однако большие зазоры допускают более высокие мощности возбуждения и напряжения смещения, которые могут использоваться с ФП антенной, позволяя таким образом генерировать более мощное ТГц излучение. Большая активная область может также помочь снизить эффект экранирования. Форма антенны является решающей для оптимизации связи ТГц волн между антенной и свободным пространством. В терминах частотной характеристики антенны разделяются на две группы: резонансные и нерезонансные антенны. У первых имеется резонансная частота, и они испускают ТГц волны вблизи определенной центральной частоты. Дипольная антенна — наиболее широко используемая резонансная антенна, которая испускает ТГц волну с центральной длиной волны $\lambda_n = 2L/m$. Здесь λ_n — длина волны в подложке, а длина волны в свободном пространстве $\lambda = \lambda_n n$, где n — показатель преломления подложки. L обозначает ширину антенны от одной стороны анода до другой стороны катода, m может быть любым положительным целым числом. Нерезонансная антенна имеет переменную ширину, и это приводит к более широкому диапазону частотной характеристики. Конфигурации нерезонансных антенн включают галстук-бабочку, спираль и логарифмические периодические антенны. Оптические элементы, такая как гиперполусферическая кремниевая линза, также может использоваться для увеличения коэффициента связи.

ФП антенны используются не только для генерации и регистрации ТГц импульсов. Подобный прибор также может использоваться для генерации и регистрации непрерывного ТГц излучения, например в системе, где два непрерывных лазерных луча с различными частотами облучают одно и то же место ФП антенны. Биение этих двух лазерных излучений приводит к осцилляции лазерной интенсивности в области перекрытия пучков. Это вызывает колебания фототока, который испускает электромагнитную волну. ФП антенна действует как частотный смеситель, и узкополосное непрерывное ТГц излучение генерируется, если частота биений лежит в ТГц диапазоне.

В последние годы LT-GaAs является одним из основных материалов для создания фотопроводящих антенн для ТГц устройств. Среди характеристик LT-GaAs следует отметить, во-первых, ультракороткие времена жизни носителей, во-вторых, большое удельное сопротивление и, наконец, высокую подвижность носителей. Эти факторы в совокупности и определяют применимость LT-GaAs для создания ТГц устройств.

Низкотемпературными слоями GaAs принято называть эпитаксиальные слои, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), при относительно низких для МЛЭ температурах роста. Если характерные температуры роста для GaAs обычно составляют $T_G \sim 560 - 600 \text{ }^\circ\text{C}$, то к LT-GaAs относят эпитаксиальные слои выращенные при температурах от ~ 200 до $\sim 400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для выращенных при различных условиях образцов LT-GaAs проводились исследования временной динамики фотовозбужденных носителей. Именно с помощью этих изменений проводится оптимизация полупроводниковой структуры и конфигурация нанесённой на нее системы контактов. Для этого используется экспериментальная установка, реализующая схему «накачка-зондирование», в которой в качестве «накачки» использовалось импульсное лазерное излучение, а в качестве «зондирующего» — ТГц импульс (лазерная система Spectra-Physics: усилитель Spitfire Pro, накачка — Empower; задающий генератор — лазер Tsunami с накачкой от Millenia Pro) — см. рис.5.

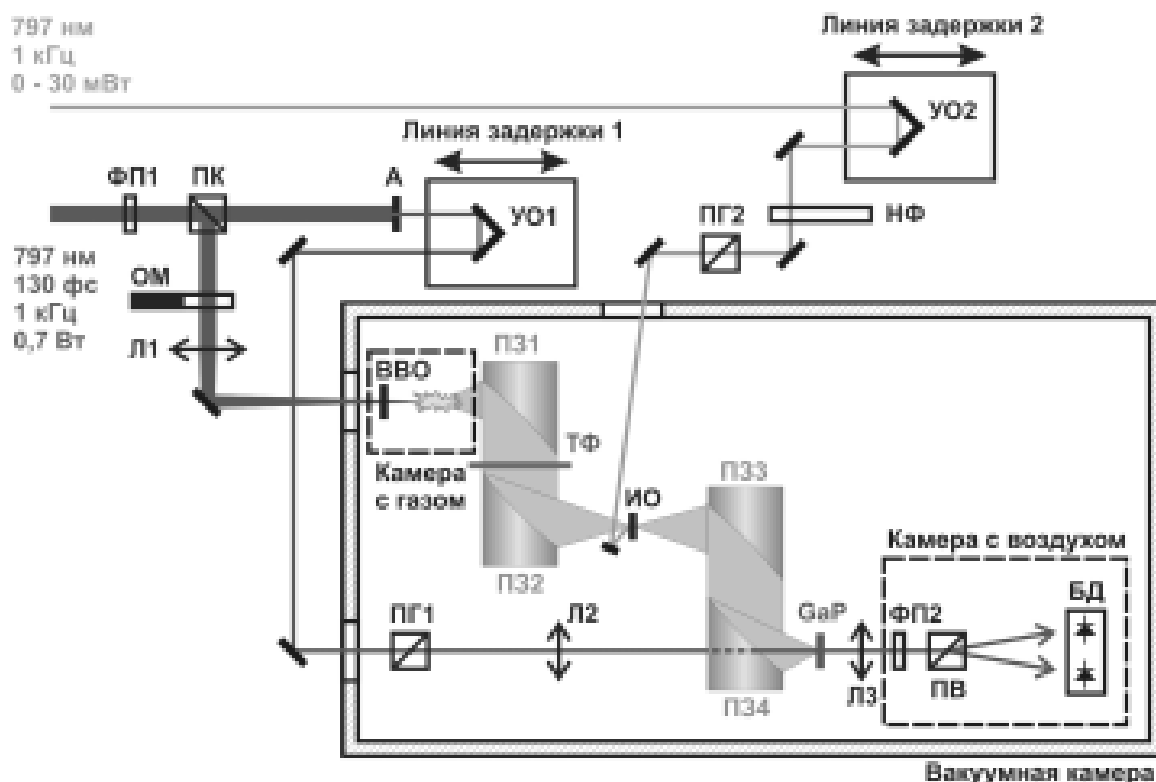


Рис. 5. Схема экспериментальной установки для исследования динамики фотовозбужденных носителей.

Анализ зависимости амплитуды прошедшего через образец ТГц сигнала от временной задержки между ТГц импульсом и импульсом оптической накачки позволяет получить информацию о временной динамике фотовозбужденных носителей и об эффективности генерации импульсного ТГц излучения.

В экспериментах регистрировалась максимальная амплитуда прошедшего через образец импульса ТГц излучения длительностью 1,5 пс при возбуждении образца 130 фс лазерными импульсами на длине волны 797 нм. Частота следования импульсов накачки и зондирования составляла 1 кГц, диаметр лазерного пучка 10 мм. Мощность оптического возбуждения регулировалась углом поворота кругового нейтрального фильтра с градиентным напылением и составляла величину от 0 до 30 мВт. Для изменения задержки импульса оптического возбуждения относительно пробного ТГц импульса использовалась линия оптической задержки с закрепленным на ней уголковым отражателем.

При отрицательной задержке, то есть когда ТГц импульс опережает лазерный импульс, эффекта от оптической накачки не наблюдается, ТГц импульс проходит сквозь образец как в случае отсутствия импульса оптической накачки. В случае положительной задержки, то есть когда импульс накачки попадает на поверхность образца раньше ТГц импульса, амплитуда прошедшего ТГц импульса зависит от временной задержки, так как со временем происходит рекомбинация электрон-дырочных пар, и как следствие, уменьшение концентрации фотовозбужденных носителей, что в свою очередь приводит к изменению удельной проводимости.

Измеренные зависимости амплитуды ТГц импульса, прошедшего через исследуемые образцы LT-GaAs, в зависимости от времени прихода возбуждающего оптического импульса показаны на рис. 6.

Используя многоэкспоненциальную модель, по полученным экспериментальным зависимостям для выращенных LT-GaAs образцов мы оценили величину, характеризующую время жизни носителей в возбужденном состоянии. Основываясь на экспериментально полученном значении времени релаксации возбужденных состояний, которое для образца первого типа составило $1,2 \pm 0,05$ пс, а для образца второго типа — $1,1 \pm 0,03$ пс, с помощью выражений (1) – (4) были определены значения подвижности носителей. Для образца первого типа эта величина составила 190 ± 5 см²/(В·с), а для образца второго типа — 150 ± 2 см²/(В·с). Эти значения хорошо согласуются с опубликованными ранее лучшими значениями [13] для этих величин.

На выращенных слоях LT-GaAs с использованием фотошаблонов было сформировано несколько ФП антенн. Расстояние между контактными площадками антенн составляет 4 мм, ширина полосы 5 мкм. Исследование изготовленных антенн проводилось на экспериментальной установке, представляющей собой стандартный импульсный ТГц спектрометр [14], в котором источником ТГц излучения являлась изготовленная антенна. Для оптимизации диаграммы направленности генерируемого ТГц излучения и формирования ТГц пучка исследуемая антенна состыковывалась с гиперпо-

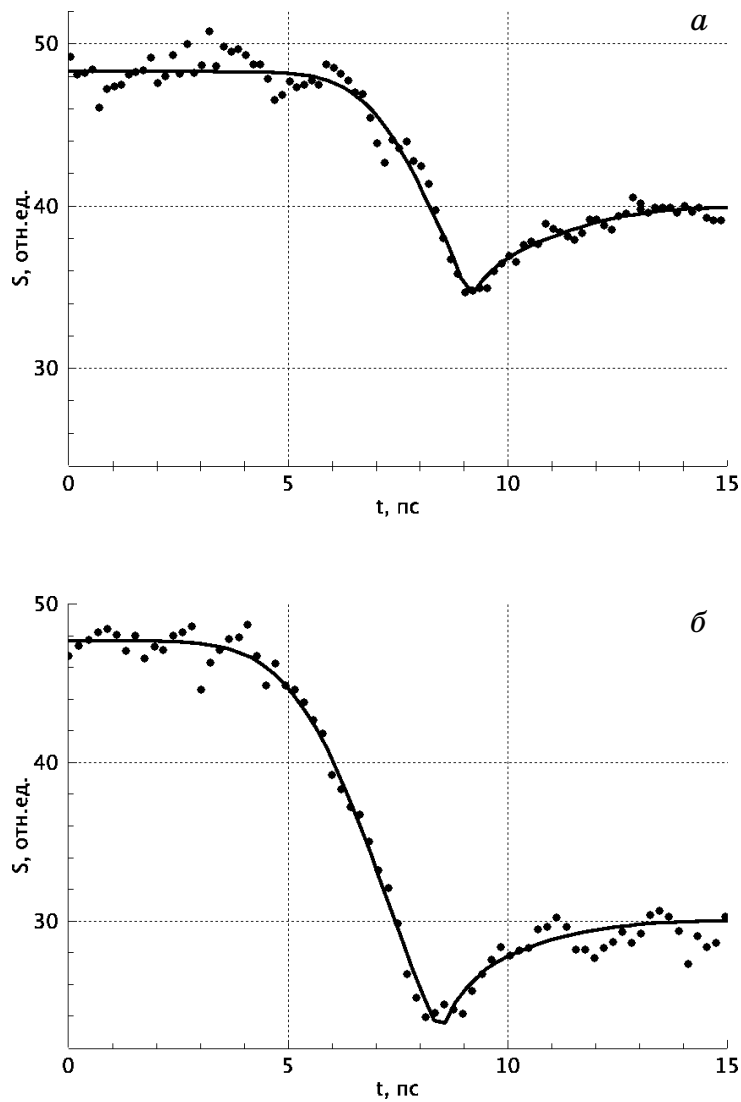


Рис. 6. Временная динамика носителей при фотовозбуждении на длине волны 797 нм, измеренная для образцов LT-GaAs, выращенных при следующих условиях: *a* — температура роста 240 °С, толщина LT-GaAs 2,4 мкм, структура содержит три δ -легированные кремнием прослойки, расположенные эквидистантно и разделяющие LT-GaAs слой на 4 одинаковые части, температура отжига 580 – 590 °С, время отжига 20 мин; *б* — образец содержит выращенный при температуре 600 °С буферный слой GaAs толщиной 0,2 мкм легированный кремнием с концентрацией $N_{\text{Si}} = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при температуре источника $T_{\text{Si}} = 1060 \text{ °C}$, температура роста 230 °С, температура отжига 590 °С, время отжига 20 мин. Точки — экспериментальные данные, линия — аппроксимация по многоэкспоненциальной модели.

лусферической линзой из кремния с удельным сопротивлением $R > 10$ кОм·см. Подбирая размеры линзы можно обеспечить эффективную передачу излучения в свободное пространство.

В экспериментах измерялся временной профиль ТГц импульсов $E(t)$, генерированных в исследуемых образцах. Спектральные характеристики антенн $S(f)$ получались при Фурье преобразовании массивов данных $E(t)$. Сравнительный анализ временных и спектральных характеристик образцов позволял делать выводы как о качестве материала LT-GaAs, являющегося основой генерирующих антенн, так и оптимальности выбора топологии самих антенн.

На рис. 7 показаны типичные спектры излучения антенн, сформированных на выращенных LT-GaAs структурах двух типов. Для удобства сравнения амплитуды сигнала в обоих случаях нормированы на максимальное значение. Топология сформированной антенны представлена на вставке рис. 7. Видно, что ширина регистрируемого спектра излучения (FWHM) для антенны, сформированной на LT-GaAs структуре второго типа, превышает 1,5 ТГц, тогда как для той же топологии антенны на структуре первого типа ширина спектра ограничена значением 1,0 ТГц.

Для обеспечения надежной фиксации и теплоотвода антенна и линза помещались в металлический корпус. На рис. 8 представлен спектр излучения, полученный с одной из антенн, сформированной на LT-GaAs структуре до и после корпусирования и стыковки с кремниевой линзой. Для удобства сравнения амплитуды спектров сигналов нормированы на максимальное значение. Как видно из приведенных графиков, использование

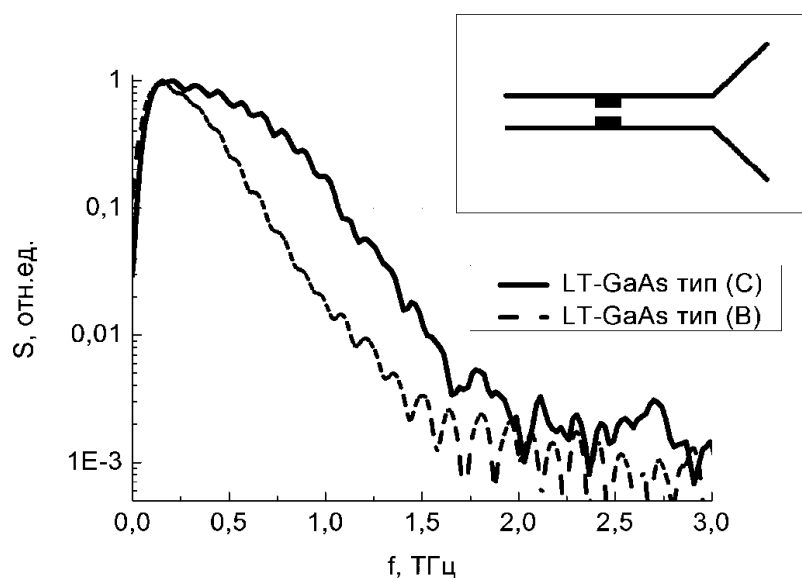


Рис. 7. Спектр излучения, полученный с антенной, сформированной на LT-GaAs структурах различного типа. Вставка иллюстрирует топологию используемой антенны.

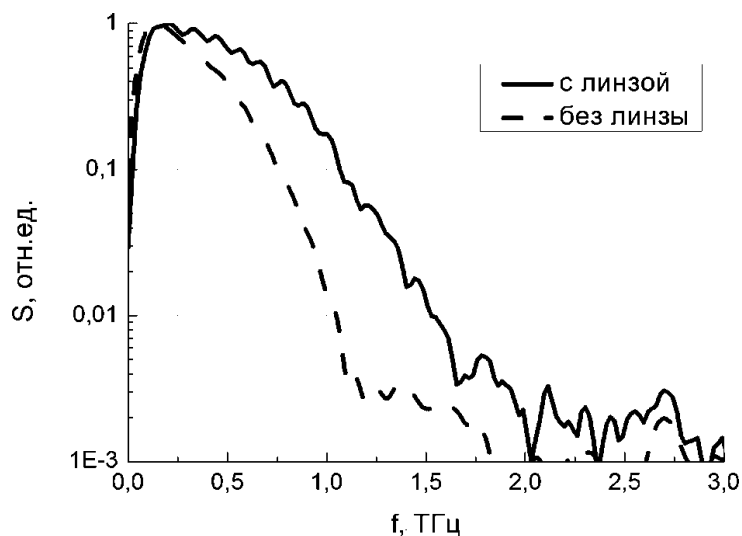


Рис. 8. Спектр излучения, зарегистрированный с антенной, сформированной на LT-GaAs структуре до и после корпусирования.

коллимирующей кремниевой линзы существенно увеличивает эффективность генерации в высокочастотной части спектра.

3. Полимерные устройства доставки терагерцового излучения

Одной из важнейших проблем в области ТГц фотоники является создание систем передачи ТГц излучения в заданную точку пространства с наименьшими потерями. Например, в работе [15] впервые была предложена конструкция показанного на рис. 9 гибкого ТГц эндоскопа для медицинских приложений, в котором для доставки ТГц сигнала от внешнего источника к

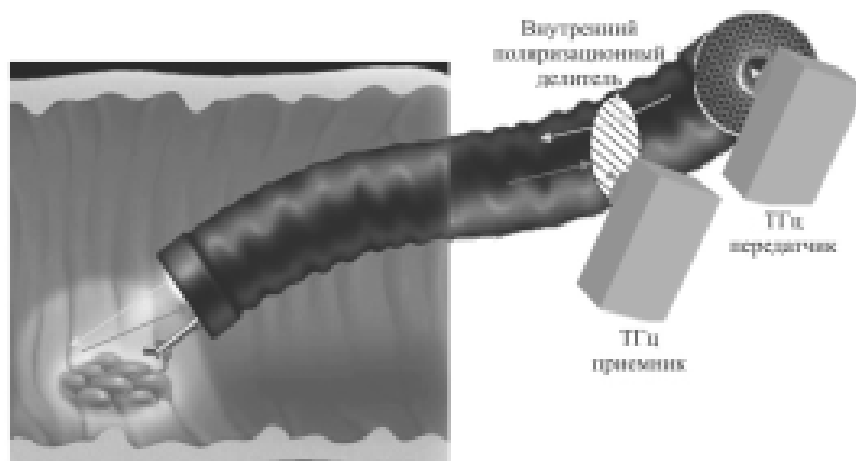


Рис. 9. Гибкий ТГц медицинский эндоскоп с использованием поляризационной развязки для разделения каналов ТГц передачи и приема [15].

исследуемому участку организма и одновременной транспортировки отраженного ТГц сигнала к детектору используется гибкий микроструктурированный волоконный световод с поляризационной развязкой. Используя такую конструкцию, авторы [15] исследовали возможность построения изображения на фиксированной ТГц частоте или получения спектроскопической информации при сканировании ТГц частоты.

Для передачи ТГц излучения могут быть использованы также предложенные в [16] концентрические металло-диэлектрические волноводные структуры, имеющие низкие потери в субмиллиметровом диапазоне частот. Хорошие перспективы имеют и полимерные волоконные световоды, поскольку они потенциально способны передавать широкополосные ТГц импульсы на расстояния до нескольких метров. Основная сложность в создании полимерных ТГц гибких волноводов состоит в том, что даже самые прозрачные полимерные материалы имеют высокий коэффициент поглощения в ТГц области спектра. Так, собственное поглощение наиболее прозрачных полимеров на частоте 1 ТГц составляет $\alpha \approx 0,07 - 2 \text{ см}^{-1}$ [17]. В настоящее время наиболее перспективными материалами для ТГц диапазона частот с точки зрения их оптической прозрачности являются следующие полимеры: полиэтилен (ПЭ), полипропилен (ПП), сополимеры этилена и норборнена (Топас) и полиметилпентен (ПМП). Химические формулы этих полимеров приведены в таблице 1.

Таблица 1

Химические формулы полиэтилена, полипропилена, сополимера этилена и норборнена, полиметилпентена. Температуры используемые для экструзии преформы и для вытягивания волокон

Название и обозначение (рус., англ.)	Состав	Температура экструзии из гранулята, °С	Температура, применявшаяся для вытягивания волокон, °С
Полиэтилен (ПЭ, PE)	$\left[\text{CH}_2 - \text{CH}_2 \right]_n$	200 – 240	160 – 200
Полипропилен (ПП, PP)	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array} \right]_n$	260 – 280	200 – 240
Сополимеры этилена и норборнена (Топас, СОС-)	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH} - \text{CH} \\ \quad \\ \text{Cyclopentane ring} \end{array} \right]_x \left[\begin{array}{c} \text{CH} - \text{CH} \\ \quad \\ \text{Cyclopentane ring} \end{array} \right]_y$	240 – 260 (СОС-5)	240 – 280 (СОС-5)
		180 – 200 (СОС-8)	220 – 240 (СОС-8)
Полиметилпентен (ПМП, ТРХ)	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_2 - \text{CH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH} \\ / \quad \backslash \\ \text{CH}_3 \quad \text{CH}_3 \end{array} \right]$	260 – 300	200 – 240

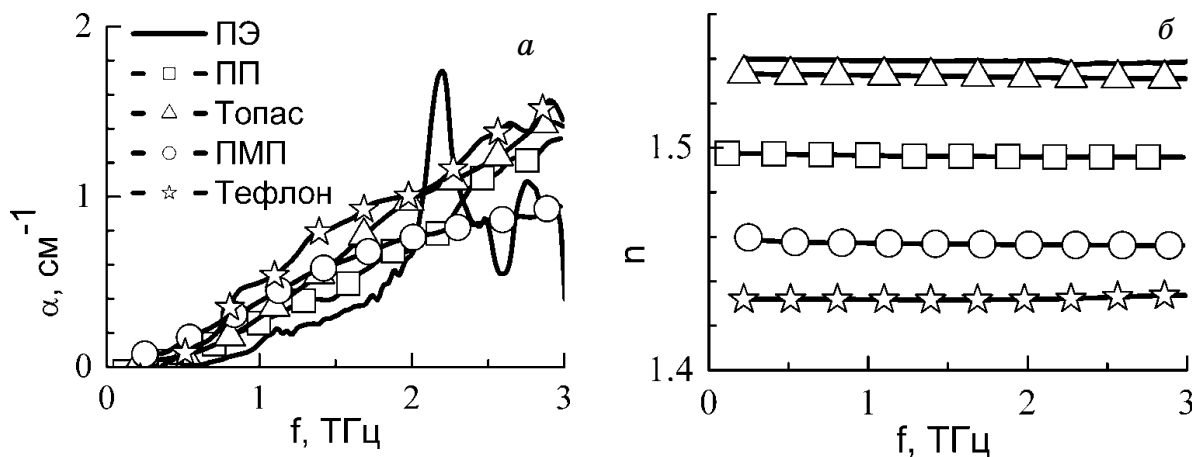


Рис. 10. Коэффициент поглощения α (а) и показатель преломления n (б) полиэтилена, полипропилена, сополимера норборнена и этилена, полиметилпентена и тефлона. Коэффициент поглощения приведен для мощности.

Оптические свойства этих материалов исследовались в рамках этой работы в диапазоне частот 0,1 – 2,5 ТГц с помощью такого же ТГц спектрометра, как и для исследования антенн [14]. Образцы, имеющие форму цилиндров с диаметром 15 мм и длиной 30 мм, были изготовлены из полимерного гранулята с помощью созданного лабораторного экструдера. Каждый термопласт требует свою температуру обработки, эти данные приведены в таблице 1. Из всех исследованных полимеров были вытянуты в специальной вытяжной башне монолитные волокна диаметром 2 мм и длиной более 1 м. Измерения пропускания отрезков волокна длиной 11 см позволило более точно посчитать оптические характеристики каждого материала. Для повышения прозрачности также изготавливались волокна с воздушными субволновыми каналами, но это тема отдельной публикации.

На рис.10 представлены зависимости коэффициента поглощения a и показателя преломления n от частоты f . Для Топаса исследовалось две модификации (СОС-5 и СОС-8), различающиеся в основном температурными характеристиками. Полученные результаты суммируются в таблице 2.

Как видно из рис. 10а, полиэтилен наиболее прозрачен в низких частотах, но имеет пик поглощения вблизи 2,2 ТГц, обусловленный его кристаллической структурой. Из рис. 10б видно, что полимеры имеют слабую и аномальную дисперсию в ТГц диапазоне частот, причем в случае полиэтилена наблюдается характерный «изгиб» $n(f)$ вблизи пика поглощения. Как видно из таблицы 2, материальная дисперсия полимеров не превышает $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}^{-1}$. Это позволяет пропускать по материалу широкополосные ТГц импульсы на расстояния 20 – 50 см без существенных искажений их формы и длительности.

Таблица 2

Коэффициент поглощения α , показатель преломления n и дисперсия преломления $dn/d\lambda$ для ряда полимерных материалов на частоте 1,5 ТГц

Материал	Коэффициент поглощения α , см ⁻¹	Показатель преломления n	Дисперсия $dn/d\lambda$, 10 ⁻³ , мм ⁻¹
Полиэтилен	0,3	1,539 ± 0,005	1,62 ± 0,01
Полипропилен	0,42	1,496 ± 0,005	6,41 ± 0,01
Топас	0,84 (СОС-5)	1,537 ± 0,005	3,78 ± 0,01
	0,73 (СОС-8)	1,526 ± 0,005	3,62 ± 0,01
Полиметилпентен	0,85	1,456 ± 0,005	3,15 ± 0,01
Тефлон	0,9	1,425 ± 0,005	-6,2 ± 0,2

Для обеспечения эффективного ввода широкополосного излучения из антенны в полимерный волновод необходимо использовать материалы с высоким показателем преломления. Для прозрачных полимеров показатель преломления n в ТГц диапазоне частот в соответствии с данными таблицы 2 лежит в пределах от 1,41 до 1,54. Показатель преломления можно существенно повысить путем введения в полимеры наночастиц полупроводниковых материалов, обладающих высоким значением n , например кремния ($n = 3,41$ при $f = 1$ ТГц) или германия ($n = 3,88$ при $f = 1$ ТГц). При этом, поскольку данные полупроводниковые материалы имеют коэффициент поглощения ниже, чем полимеры, а размеры частиц на 3 – 4 порядка меньше длины волны ТГц излучения, затухание света в композитном полимерном материале, обусловленное поглощением и рассеянием электромагнитного излучения, может быть невелико.

Для создания композитных полимерных материалов мы использовали полиэтилен в виде микропорошка, а также нанопорошок кремния (нк-Si) с размером частиц в диапазоне 20 – 30 нм производства компании Nanostructured & Amorphous Materials Inc. (США).

Для изготовления сложных опто-электронных устройств существует три технологичных метода, использующих термополимеризацию, фотополимеризацию и термоформирование из заранее полимеризованного термопласта. Достаточно прозрачного в ТГц диапазоне и способного к фотополимеризации вещества пока не было найдено. Мы использовали оптически прозрачный фотополимер (ОКМ-2+1% ирракура), коэффициент поглощения которого составляет $\alpha = 8$ см⁻¹. Здесь и далее все «оптические» параметры приводятся для частоты 1 ТГц. Преимущество ОКМ-2 в том, что он обладает хорошей смачиваемостью с кремниевыми частицами, что позволило получить плёнки с наночастицами с их объёмной концентрацией до $f_v = 0,04$, прозрачные в оптическом диапазоне частот. Важным условием для получения оптически прозрачного раствора наночастиц явилось использование мощного (20 Вт) ультразвукового диспергатора (Sonics, VCX130BP). Ограничением метода

фотополимеризации является глубина проникновения оптического (350-450 нм) излучения в композит, поскольку наночастицы заметно ослабляют излучение в этом диапазоне длин волн. Однако, преимуществом метода является возможность управлять распределением наночастиц в мономере за счёт градиентов интенсивности или температуры при лазерной подсветке.

Для изготовления объёмных образцов сложной формы лучше подходит метод термополимеризации, при этом расширяется набор жидких мономеров пригодных для такого метода. Из множества исследованных «термополимеров» наиболее прозрачным в ТГц диапазоне оказался полистирол ($\alpha = 1 \text{ см}^{-1}$), но его недостатком является плохая смачиваемость с кремниевыми частицами, приводящая к агломерации в композитах. В качестве термоинициатора использовался 1% бензоилакрилата, образец выдерживался в течение 120 минут при температуре 95 °С.

Во всех случаях приготовления композитов из жидких мономеров после перемешивания в диспергаторе производилась откачка пузырей воздуха с помощью форвакуумного насоса. Для приготовления композитов из прозрачных полимеров-термопластов наиболее практичный способ это перемешивание микропорошков (частиц полимера и частиц полупроводника) и последующее прессование смеси при температуре близкой к плавлению. Наиболее прозрачные композиты (наночастицы кремния в полиэтилене) удалось изготовить именно таким способом. Для полимера Топас кроме прессования из порошка также использовалось растворение полимера в хлороформе, смешивание с наночастицами и последующее выпаривание растворителя. В качестве наиболее прозрачной матрицы в ряде случаев использовался парафин.

Микрочастицы (кремния и других материалов) изготавливались путём дробления в керамической ступке до размеров 20 – 100 мкм. Далее порошок просеивался через ряд сит с размерами ячейки 50 и 40 мкм. Отсутствие воздушных пор в композитах контролировалось по сравнению плотности композитного материала и удельных плотностей компонент.

Полученные на частоте 1 ТГц зависимости коэффициента поглощения от показателя преломления для ряда композитных материалов из микро- и наночастиц представлены на рис. 11.

В случае микрочастиц при пропускании ТГц излучения доминируют потери на рассеяние, поскольку размер частиц (40 – 50 мкм) не достаточно мал по сравнению с длиной волны. По нашим оценкам и анализу модельного описания рассеяния оптимальный диаметр микрочастиц для диапазона 0,1 – 3 ТГц составляет 1 – 10 мкм.

Из созданного композитного полимерного материала были изготовлены линзы с высоким показателем преломления для сопряжения источников ТГц излучения (антенн) с полимерными волокнами. Фотографии этих линз представлены на рис. 12.

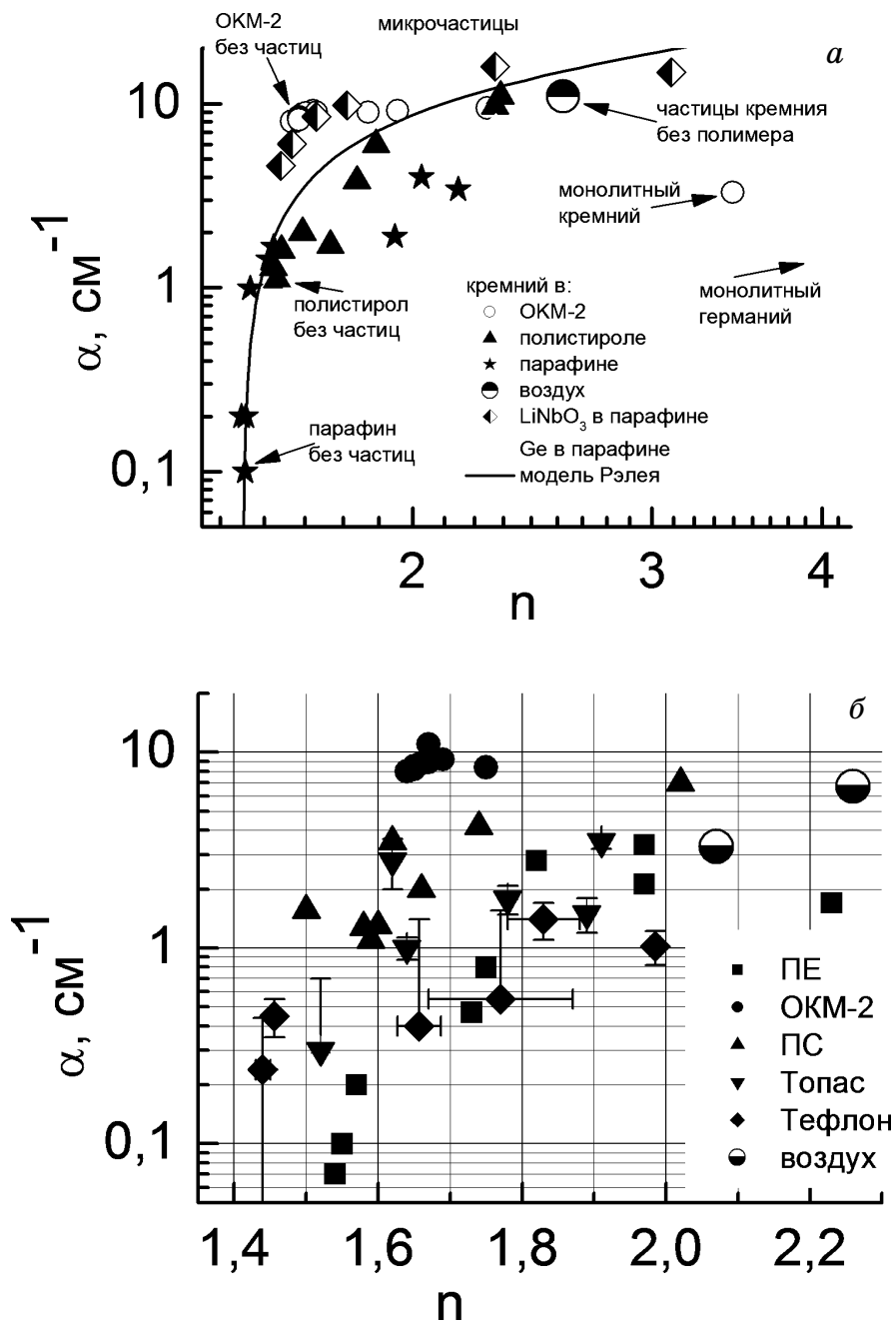


Рис. 11. Зависимость коэффициента поглощения от показателя преломления для ряда композитных материалов из микро-частиц (а) и наночастиц (б). Данные для частоты 1 ТГц.



Рис. 12. Фотографии микролинз из полимерного материала с внедренными наночастицами кремния и микролинз из чистого ПЭ.

Линзы были изготовлены методом прессования нагретого материала. Из композитного материала с показателем преломления 2,2 и коэффициентом поглощения 2 см^{-1} (смесь наночастиц кремния и нанопорошка полиэтилена при их отношении масс 2/1 с использованием разработанного много-ступенчатого алгоритма перемешивания, нагрева и прессования) были изготовлены полусферы с добавочной подставкой (0,16, 0,8, 1,14 мм) см. рис.12. Для формирования таких линз была изготовлена специальная прессформа в виде полусферической «ямки» в цилиндре. Прессформа и заготовка для линзы, представляющая собой прессованную таблетку из композитного материала, нагревались до температуры $180 \text{ }^\circ\text{C}$. После равномерного нагрева заготовка перепрессовывалась в пресс-форме с «ямкой» гидравлическим ручным прессом под давлением 3 тонны. Величина «подставки» линзы определялась объемом заготовки.

Было проведено измерение эффективности изготовленных линз. В экспериментах измерялись спектры генерации, полученные при использовании для сбора ТГц излучения антенны двух типов линз: из смеси наночастиц кремния и нанопорошка полиэтилена — материала с преломлением 2,2 и линзы из ПЭ с преломлением 1,5 (обе с подставкой $d = 0,8 \text{ мм}$), и сравнивались со случаем генерации антенны в свободное пространство без линзы. Полученные зависимости представлены на рис. 13. Видно, что использование линз позволяет увеличить амплитуду собираемого сигнала в 5 раз по сравнению со случаем отсутствия линзы. Использование нк-Si повысило амплитуду в 2 – 3 раза по сравнению с случаем чистого ПЭ. Из рис. 13 также следует, что потери на поглощение в таких линзах невелики, поскольку высокие частоты не претерпевают дополнительных потерь.

Была экспериментально показана возможность сопряжения антенны, линзы и волновода и создано компактное комбинированное устройство для генерации и доставки ТГц излучения. Для характеристики этого устройства был собран стенд, показанный на рис. 14.

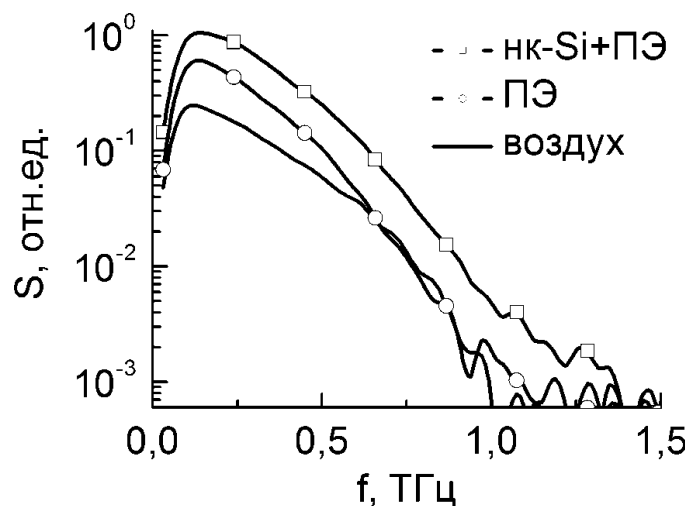


Рис. 13. Спектр ТГц излучения, прошедшего через линзы из нанокompозитного полимерного материала.

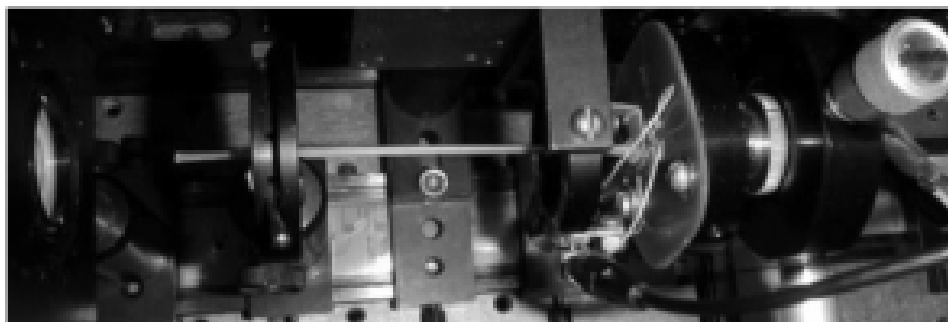


Рис. 14. Фотография установки для совмещения антенны, линзы и волновода и измерения пропускания ТГц импульса.

К выходной гладкой поверхности антенны “А” с помощью эластичного держателя “D”, присоединённого к двумерному (X - Y) транслятору, прижималась линза “L”. По максимуму ТГц сигнала определялось положение (x, y) центра линзы относительно излучающего диполя антенны. Для линз с такой большой кривизной поверхности было очень важно точно совместить центр линзы и излучающий диполь антенны. К линзе подводился торец волновода с выемкой, которая по форме точно совпадала с формой линзы. Для создания оптического контакта применялась иммерсионная жидкость. Выходящее из волновода ТГц излучение коллимировалось и передавалось в детектор. Был измерен ТГц, импульс прошедший через ПП волокно диаметром 4 мм и длиной 95 мм. Данные представлены на рис. 15. Сравнивались два случая. В первом — в торце волновода было сформировано углубление, в котором находилась прижатая к антенне линза, а во втором — плоский торец волновода непосредственно прижимался к антенне. При

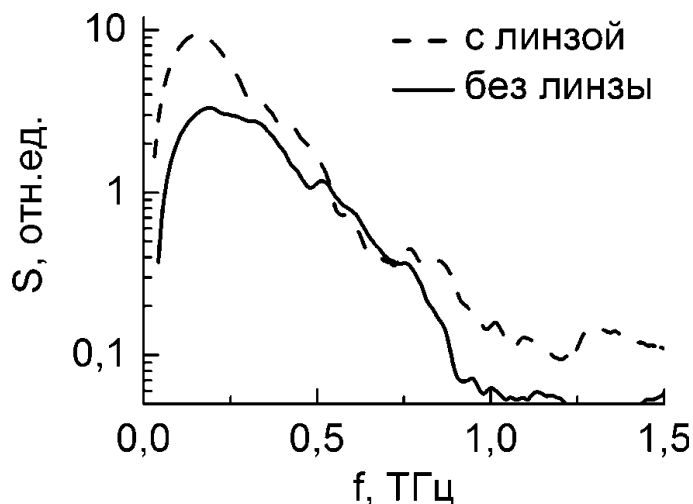


Рис. 15. Спектры ТГц излучения в комбинированном устройстве.

добавлении линзы в систему, сигнал на выходе из волновода увеличивался вдвое.

4. Применение ТГц излучения для разработки систем безопасности

Развитие методик дистанционного обнаружения взрывчатых и других опасных веществ становится все более актуальной задачей в последнее время в связи с растущим вниманием к вопросам контроля безопасности в местах массового сосредоточения людей. Взрывные устройства имеют различные конструкции, несмотря на разнообразие их видов и конструкций, их объединяет одна общая черта: все они содержат взрывчатое вещество. Молекулы взрывчатых веществ, являются органическими соединениями имеют вращательные и коллективные колебательные линии поглощения в области частот ТГц диапазона, что обуславливает наличие характерных спектральных особенностей в этой области. Эти особенности могут использоваться для идентификации вещества по форме его ТГц спектра поглощения.

Продемонстрируем основные принципы использования ТГц для идентификации веществ на примере геометрии «на пропускание». Аналогичным образом работает техника анализа и отраженного сигнала. Широкополосное ТГц излучение можно представить как сумму монохроматических волн, каждая из которых имеет вид

$$\tilde{E}_0(\omega) = A(\omega) \exp(-i(\omega t - kz + \phi_0(\omega))), \quad (6)$$

где $k = \omega/c$ — волновой вектор, ϕ_0 — начальная фаза волны, t и z — текущие время и координата волны соответственно. Электрическое поле прошедшей через образец волны будет выражаться следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{E}_s(\omega) &= \tilde{t}_1 \tilde{t}_2 A(\omega) \exp(-i(\omega t - kz + \phi_0(\omega))) \exp(ik(\tilde{n} - 1)d) = \\ &= \tilde{t}_1 \tilde{t}_2 \tilde{E}_0(\omega) \exp(-kkd) \exp(ik(\tilde{n} - 1)d), \end{aligned} \quad (7)$$

где \tilde{t}_1 и \tilde{t}_2 — амплитудные коэффициенты пропускания ТГц излучения через переднюю и заднюю поверхности исследуемого объекта соответственно, $\tilde{n} = n + ik$ — комплексный показатель преломления вещества. Если пренебречь потерями на отражение, то взаимодействие ТГц волны с объектом сводится к уменьшению ее амплитуды и изменению фазы. Первый процесс определяется мнимой частью показателя преломления, а второй — действительной. Затухание ТГц поля связано с коэффициентом поглощения объекта $\alpha = k\kappa$. Коэффициент поглощения α можно выразить различными способами в зависимости от характеристик образцов. Например, для однородных объектов коэффициент поглощения можно определить, используя толщину образца, в других случаях его можно связать с данными о массе или плотности вещества объекта.

На рис. 16 приведены ТГц поглощения 4 различных взрывчатых веществ в области частот от 0,2 до 3 ТГц. Спектр каждого из рассмотренных веществ имеет ярко выраженные индивидуальные особенности в области низких ТГц частот («отпечатки пальцев»). Таким образом, спектроскопия ТГц

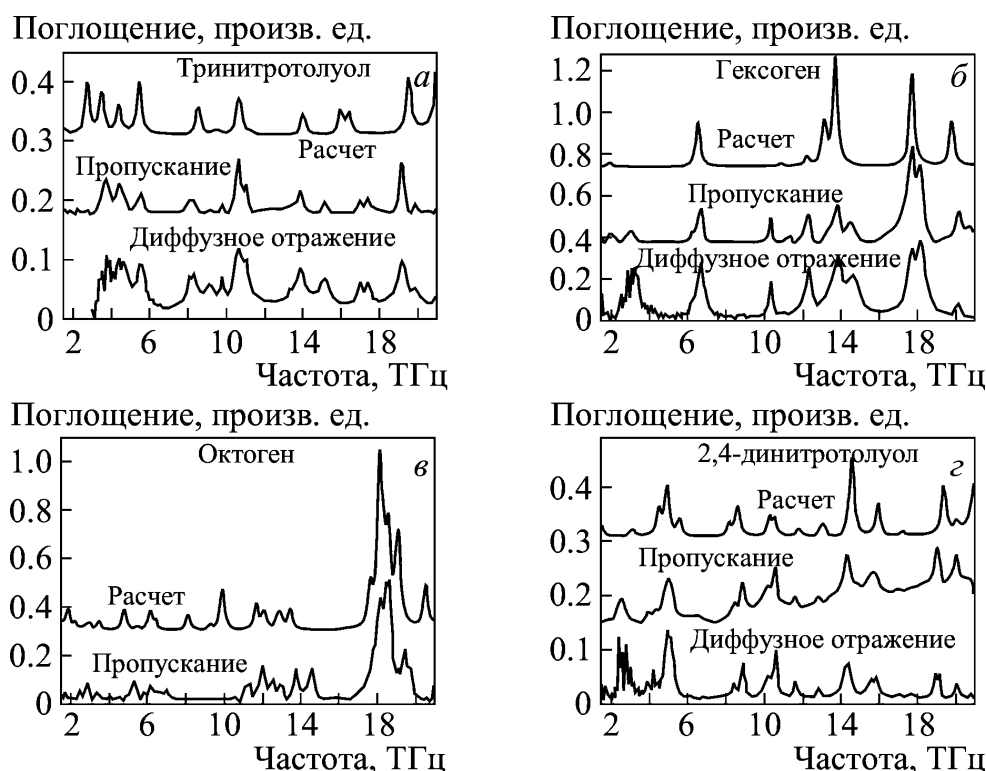


Рис. 16. Спектры поглощения взрывчатых веществ по данным импульсной ТГц спектроскопии (0,2 – 3 ТГц).

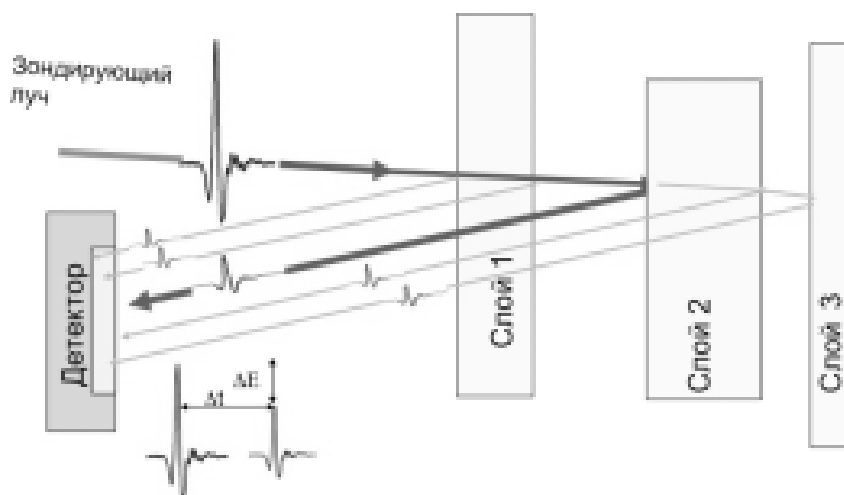


Рис. 17. Принцип радиолокационного зондирования с помощью ТГц импульсов.

диапазона потенциально позволяет идентифицировать основные взрывчатые вещества по характерным особенностям их спектров. Этот принцип может быть положен в основу устройства для детектирования как стандартных, так и самодельных взрывных устройств.

Однако в действительности возможны ситуации, когда ТГц волна не в состоянии пройти сквозь объект исследования. Например, при досмотре пассажиров ТГц волны не проникают сквозь тело человека, и тогда единственно возможным вариантом представляется использование «геометрии на отражение».

Типичная схема дистанционного обнаружения с помощью ТГц импульсов показана на рис. 17. В ТГц спектроскопии отражения анализируются спектры зеркального или диффузного отражения от исследуемого образца. Зеркальным называется отражение от гладких поверхностей, диффузным — отражение от шероховатых поверхностей.

Как известно, отражение от поверхности объекта описывается формулами Френеля:

$$\tilde{r}_{\parallel} = \frac{n \cos \theta_i - \cos \theta_t}{n \cos \theta_i + \cos \theta_t}, \quad \tilde{r}_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - n \cos \theta_t}{\cos \theta_i + n \cos \theta_t}, \quad (8)$$

где r_{\parallel} и r_{\perp} — коэффициенты отражения для p - и s -поляризаций соответственно, n — показатель преломления материала, θ_i и θ_t — углы падения и преломления соответственно. Если образец непрозрачен для ТГц-излучения, то его показатель преломления является комплексной величиной и отражение будет иметь как амплитудную, так и фазовую составляющие. В случае нормального падения формулы (8) упрощаются и приводятся к виду

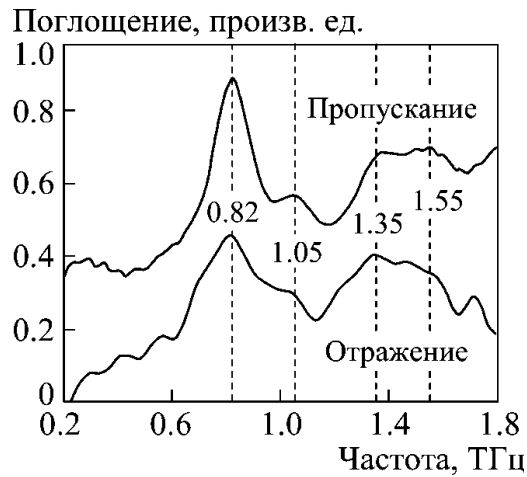


Рис. 18. Спектры гексогена по данным импульсной ТГц спектроскопии в схемах отражения и пропускания. Штриховыми линиями показаны положения максимумов поглощения.

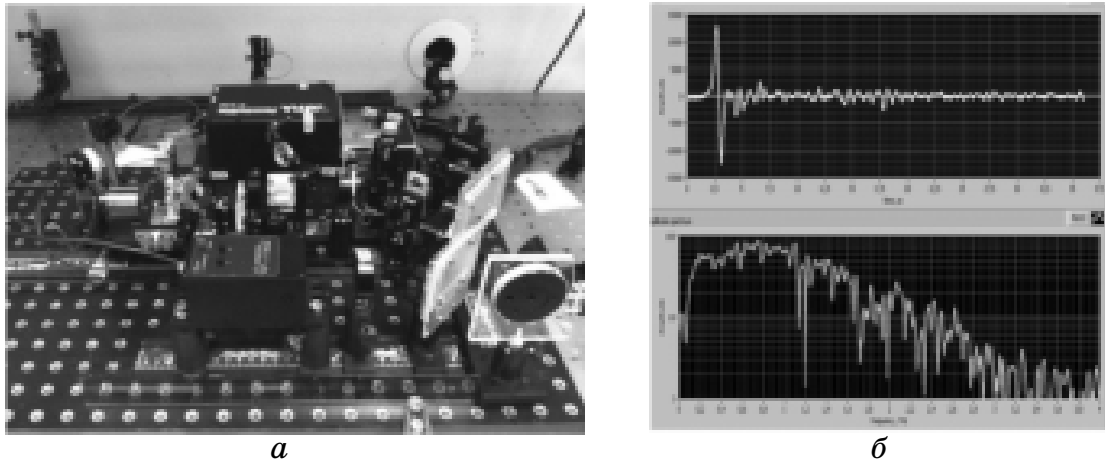


Рис. 19. Фотография макета ТГц спектрометра-рефлектометра (а) и типичный вид полученного временного профиля (б) сверху и спектрального профиля (б) снизу терагерцового импульса.

$$\tilde{r}_{\parallel} = -\tilde{r}_{\perp} = \frac{n^2 + \kappa^2 - 1}{(n + 1)^2 + \kappa^2} + i \frac{2\kappa}{(n + 1)^2 + \kappa^2}. \quad (9)$$

Отсюда следует, что спектральные особенности вещества мишени должны проявляться как в амплитудной, так и в фазовой составляющей спектра отражения. На рис.18 приведены спектры поглощения гексогена, полученные по данным отражения, а также для сравнения — по данным пропускания. Как видно, полученные спектры имеют много общего.

С использованием технологий, описанных в разделах 2 и 3, и, развивая приведенные в данном разделе методики, был создан макет ТГц спектрометра-рефлектометра для решения задач ТГц визуализации и контроля. Фотография макета и типичный вид временного и спектрального профиля ТГц импульса показаны на рис. 19.

5. Заключение

Лазерные ТГц технологии являются современным методом получения изображений в дополнение к методам рентгеноскопии и инфракрасного видения. Имеются определенные материалы, для которых ТГц волны дают лучшее изображение по сравнению с рентгеновским и инфракрасным излучением. Например, для малоcontrastных материалов, таких как теплоизоляционный пенопласт малой плотности, ТГц волны обеспечивают лучшую контрастность изображений (амплитудную и фазовую), чем рентгеновское излучение. Для некоторых оптически непрозрачных материалов, таких как бумага, пластики, ткани, проникающая способность ТГц волн лучше. По этой причине, тенденция развития сканеров тела человека, которые в настоящее время используют для визуализации миллиметровые волны, смещается в субтерагерцовый или ТГц диапазон. Хотя ТГц диапазон не является столь широким как инфракрасный, некоторые материалы имеют молекулярные резонансы и/или фононные колебания (кристаллов или микрокристаллов) в терагерцовом частотном диапазоне. Например, ТГц спектроскопия позволяет определить является ли материал гексогеном (взрывчатое вещество) или нет.

Уже скоро исполнится 100 лет пионерским работам профессора Московского университета А.А.Глаголевой-Аркадьевой, но «терагерцовое сообщество» все еще в начале пути развития своей новой области знаний. Необходимо еще разработать множество различных устройств фотоники ТГц диапазона, а также электронных и плазмонных устройств для создания новых ТГц систем с рабочими характеристиками на порядки выше и со стоимостью ниже, чем у существующих систем. Слияние ТГц фотоники, электроники и плазмоники в ТГц системах является новой концепцией. Её признание в таких применениях как медицина, безопасность и промышленность уже просматривается на горизонте.

Уже в 20-м веке имеются две важные вехи после появления лазеров сверхкоротких импульсов. Первой из них была демонстрация в конце 80-х в начале 90-х импульсного ТГц излучения с помощью коротких лазерных импульсов видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Это впервые сделали Gerard Mourou, David Auston и Daniel Grischkowsky. Второй вехой было создание ТГц квантово-каскадного лазера (ККЛ), предсказанного в стенах Ленинградского физико-технического института. Генерация инфракрасного излучения ККЛ была впервые экспериментально продемонстрирована группой Federico Capasso в 1997. Первая генерация

ТГц излучения в ККЛ была получена группой Alessandro Tredicucci в 2002, а вскоре более искусный и надежный ККЛ создал Qing Hu в Массачусетском технологическом институте. Это открыло дверь для промышленных применений ТГц излучения. После этих ключевых событий было сделано много достижений в исследованиях и разработках. Возможно, что источники интенсивных ТГц волн будут третьей вехой. Высокие пиковые поля, генерируемые наклонным оптическим фронтом в LiNbO_3 или двух-волновым лазерным смешением, открывают новые возможности для научных исследований ТГц волн. В настоящее время, высокоинтенсивное ТГц излучение генерируется с использованием лазерных систем с усилителями, которые могут усилить лишь небольшое число групп. Чтобы пользоваться ТГц излучением высокой интенсивности порядка 100 кВ/см или выше, необходимо получить доступ к синхротронному оборудованию в национальных лабораториях. Если цена волоконных лазеров, являющихся наиболее дорогими компонентами, снизится или если будет разработана более доступная лазерная система для высокоинтенсивного ТГц излучения, — это будет действительно новой вехой.

Мы заранее не можем предсказать, что произойдет при воздействиях высокоинтенсивного ТГц излучения. Имеется много эмоций и предположений относительно этого. Например, ТГц визуализация в настоящее время основана на линейных явлениях. Представляет интерес узнать как нелинейные эффекты индуцируются ТГц излучением. Имеется немного статей, описывающих нелинейную ТГц визуализацию. Высокоинтенсивное ТГц излучение могло бы открыть путь для нелинейной ТГц спектроскопии. Если нелинейная ТГц визуализация сможет дать новую и полезную информацию, которая не может быть получена традиционной ТГц визуализацией, — это привлекло бы многочисленных квалифицированных специалистов из разных научных областей в новую ТГц науку. Открытия в этой области ТГц знаний еще впереди!

Литература

1. Sensing with Terahertz Radiation, by Daniel Mittleman (Editor). ISBN: 978-3-540-43110-7.
2. Principles of Terahertz Science and Technology, by Yun-Shik Lee. ISBN-13: 978-0387095394.
3. *Glagolewa-Arkadiewa A.* Short electromagnetic waves of wave-length up to 82 microns // Nature. 1924. V. 113, №2844. – 640p.
4. *Глаголева-Аркадьева А.А.* Новая шкала электромагнитных волн // Успехи физических наук. 1926. Т.6, №3. С. 216 – 241.
5. THz Sensing Technology, by Dwight L Woolard, William R Loerop, and Michael S Shur (Editors). ISBN-13: 978-9812386113.
6. Terahertz Spectroscopy: Principles and Applications (Optical Science and Engineering Series), by Susan L. Dexheimer (Editor). ISBN-13: 978-0849375255

7. Terahertz Plasmonics: Metamaterials and Guided-wave devices by Amit Agarwal and Ajay Nahata. ISBN-13: 978-3639129533.
8. Terahertz Optoelectronics, by Kiyomi Sakai (Editor). ISBN-13: 978-3540200130.
9. J.T. Darrow, X.-C. Zhang, D.H. Auston, J.D. Morse Saturation properties of large-aperture photoconducting antennas // *IEEE J. Quantum Electron.* 1992. 28, 1607 .
10. J. Hebling, K.-L. Yeh, M. C. Hoffmann, B. Bartal, K. A. Nelson Generation of high-power terahertz pulses by tilted-pulse-front excitation and their application possibilities // *J. Opt. Soc. Am.* 2008. B. 25(7), B6.
11. D.J. Cook, R.M. Hochstrasser Intense terahertz pulses by four-wave rectification in air // *Opt. Lett.* 2000. 25, 1210.
12. D.S. Kim, D.S. Citrin Coulomb and radiation screening in photoconductive terahertz sources // *Appl. Phys. Lett.* 2006. 88, 161117 – 161119.
13. D. C. Look, D. C. Walters, G. D. Robinson, M. G. M. J. R. Szelove, C. E. Stutz // *J. Appl. Phys.* 1993. 74, 306.
14. Назаров М.М., Шкуринов А.П., Ангелуц А.А., Сапожников Д.А. - Известия ВУЗов: Радиофизика. 2009. Т. 52. № 8. С. 595 – 606.
15. Peter H. Siegel, Cavour Yeh, Fred Simabukuro, Scott E. Fraser Hollow-Core Periodic Bandgap Flexible Dielectric Waveguide for Low-Loss THz Signal Transmission // Proceedings of the JPL NTR 41299 September 13. 2004.
16. Nuria Llombart, Agnese Mazzinghi, Peter H. Siegel Angelo Freni Design of a Low Loss Metallo-Dielectric EBG Waveguide at Submillimeter Wavelengths // *IEEE MICROWAVE AND WIRELESS COMPONENTS LETTERS.* V. 19, NO. 7. JULY 2009. P. 437 – 439.
17. S. Atakramians, S. Afshar V., T.M. Monro, D. Abbott. Terahertz dielectric waveguides // *Advanced optics and Photonics.* 2013, V.5. P.169 – 215.

Ахманов Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук Института проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук, e-mail: asakhmanov@mail.ru.

Ангелуц Андрей Александрович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Физического факультета и Международного лазерного центра Московского Государственного университета имени М.В.Ломоносова, e-mail: andrew_aa@inbox.ru.

Балакин Алексей Вячеславович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Московского Государственного университета имени М.В.Ломоносова, e-mail: a.bal@lasmed.phys.msu.ru.

Назаров Максим Михайлович, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук, e-mail: nazarovmax@mail.ru.

Ожередов Илья Александрович, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель Московского Государственного университета имени М.В.Ломоносова, e-mail: ilya@lasmed.phys.msu.ru.

Панченко Владислав Яковлевич, академик, доктор физико-математических наук, профессор, директор Института проблем лазерных и информационных технологий Российской Академии наук, e-mail: panch@laser.ru

Сапожников Дмитрий Александрович, младший научный сотрудник Международного лазерного центра Московского Государственного университета имени М.В.Ломоносова, e-mail: dmitry@lasmed.phys.msu.ru.

Соколов Виктор Иванович, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук, e-mail: visokol@rambler.ru.

Хайдуков Евгений Валерьевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Института проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук, e-mail: khaydukov@mail.ru.

Шкуринов Александр Павлович, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией Института проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук, e-mail: ashkurinov@gmail.com.