

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

К 50-летию создания лазера

Научная сессия Общего собрания Отделения физических наук
Российской академии наук, 13 декабря 2010 г.

PACS number: 01.10.Fv

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201108e.0867

13 декабря 2010 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (РАН) состоялась научная сессия Общего собрания Отделения физических наук РАН, посвящённая 50-летию создания лазера.

PACS numbers: 07.57. – c, 42.62. – b, 84.40. Ik

DOI: 10.3367/UFNr.0181.201108f.0867

Освоение терагерцевого диапазона: источники и приложения

В.Л. Братман, А.Г. Литвак, Е.В. Суворов

1. Матвеев В.А., Багаев С.Н. *Вступительное слово.*

2. Братман В.Л., Литвак А.Г., Суворов Е.В. (Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород). *Освоение терагерцевого диапазона: источники и приложения.*

3. Балыкин В.И. (Институт спектроскопии РАН, г. Троицк, Московская обл.). *Ультрахолодные атомы и атомная оптика.*

4. Леденцов Н.Н. (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург). *Новое поколение вертикально-излучающих лазеров как ключевой элемент компьютерно-коммуникационной эры.*

5. Красильник З.Ф. (Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород). *Лазеры для кремниевой оптоэлектроники.*

6. Шалагин А.М. (Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск). *Мощные лазеры на парах щелочных металлов с диодной накачкой.*

7. Кульчин Ю.Н. (Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток). *Фотоника самоорганизующихся биоминеральных наноструктур.*

8. Колачевский Н.Н. (Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва). *Лазерное охлаждение редкоземельных атомов и прецизионные измерения.*

Статьи, написанные на основе докладов 2–4, 7, 8, публикуются ниже*.

* Статья, написанная на основе доклада 6, в связи с её поздним поступлением в редакцию журнала "Успехи физических наук" будет опубликована в сентябрьском номере УФН вместе с материалами научной сессии Отделения физических наук РАН от 22 декабря 2010 г. (Примеч. ред.)

1. Введение

Терагерцевый диапазон, занимающий промежуточное положение между микроволновым и оптическим участками спектра электромагнитных волн, оставался в течение долгого времени наименее освоенным и казался слишком коротковолновым для методов классической вакуумной электроники и слишком низкочастотным для методов квантовой электроники. Вместе с тем этот диапазон обладает рядом специфических особенностей, делающих его весьма привлекательным для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики, химии, биологии и медицины [1–3]. Действительно, в этом диапазоне находится большое число сильных линий вращательных переходов молекул, а также линии колебательных и колебательно-вращательных переходов больших молекул, в том числе органических, что открывает возможности как для их исследования, так и для селективного воздействия на них. Терагерцевые волны перспективны для диагностики и спектроскопии различных сред, включая развитие методов электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) высокого разрешения. Мощное терагерцевое излучение может быть использовано для создания плотной плазмы и управления её параметрами (управляемый термоядерный синтез, "точечные" плазменные источники рентгеновского излучения).

Вследствие малой энергии квантов терагерцевого излучения является сравнительно безопасным для живых организмов, и оно может быть применено для выявления патологий и инородных образований методами терагерцевой томографии [4, 5]. Терагерцевое излучение обладает достаточно высокой проникающей способностью, поэтому его можно использовать для обнаружения и идентификации предметов, скрытых одеждой, багаж-

В.Л. Братман, А.Г. Литвак, Е.В. Суворов.
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород, РФ
E-mail: bratman@appl.sci-nnov.ru

ными упаковками и даже бетонными стенами. Методы терагерцевой "time-domain"-спектроскопии, основанные на применении широкополосных когерентных импульсов, обеспечивают быстрое перекрытие широкого частотного диапазона, позволяя тем самым выявлять характерные спектральные особенности ("отпечатки пальцев") различных молекул, что важно для обнаружения и идентификации пластиковой взрывчатки, опасных химических веществ, наркотиков, проведения экспресс-анализа состава выдыхаемых газов с целью диагностики различных заболеваний, контроля качества пищевых и сельскохозяйственных продуктов и т.п. [6, 7]. Короткие когерентные импульсы терагерцевого излучения позволяют исследовать быстропротекающие процессы. Круг возможных приложений, связанных с использованием терагерцевого излучения, не исчерпывается указанными областями и постоянно расширяется [1, 2].

Под терагерцевым диапазоном подразумевают область частот от 0,1 до 10 ТГц (длины волн от 3 до 0,03 мм), которая охватывает коротковолновую часть миллиметрового диапазона, хорошо освоенную вакуумной электроникой, а также весь субмиллиметровый диапазон и часть дальнего инфракрасного диапазона. Освоение терагерцевого диапазона включает в себя создание источников и средств регистрации, а также разработку различных приложений. В настоящем сообщении дан краткий обзор результатов по генерации терагерцевого излучения методами классической вакуумной электроники и оптоэлектроники¹, а также отдельных приложений терагерцевого излучения.

Среди вакуумных источников когерентного терагерцевого излучения наиболее распространёнными являются лампы обратной волны (ЛОВ), основанные на стимулированном черенковском излучении прямолинейных электронных пучков, а также мощные лазеры на свободных электронах (ЛСЭ) и гиротроны, основанные на стимулированном тормозном излучении криволинейных пучков. Все эти приборы хорошо развиты в России. Низковольтные ЛОВ с частотой генерации до 1,4 ТГц [9], производимые Научно-производственным предприятием "Исток", широко используются во множестве приложений в нашей стране и за рубежом. ЛСЭ с энергией частиц 12 МэВ, созданный в Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера (ИЯФ) СО РАН, обеспечивает в настоящее время рекордно высокий уровень средней мощности когерентного излучения в диапазоне 1,2–1,8 ТГц на основной гармонике частоты осцилляций частиц, а также работает на гармониках этой частоты [10]. Как будет показано в разделе 2, создаваемые в Институте прикладной физики (ИПФ) РАН гиротроны демонстрируют возможность мощной генерации когерентного излучения, по крайней мере до частот порядка 1,5 ТГц, при значительно более низких, чем в ЛСЭ, энергиях частиц (несколько десятков кэВ) [11]. Несмотря на более позднее, чем за рубежом, начало работ по использованию в терагерцевом диапазоне методов оптоэлектроники, это направление быстро вышло в нашей стране на современный уровень в области поиска новых материалов, методов и схем генерации, а также в демонстрации возможных приложений.

2. Классические вакуумные источники

Низковольтные и компактные ЛОВ [9] обеспечивают мощность излучения порядка 30–1 мВт на волнах с частотой 0,1–1,4 ТГц. Существует также более мощный, но менее распространённый вариант ЛОВ с электронным пучком, наклонённым к замедляющей структуре, — клинотрон, работающий при частотах вплоть до значений порядка 0,5 ТГц [12]. В этом генераторе, однако, для увеличения эффективности, как правило, используется режим со значительными отражениями рабочей волны от концов структуры, что делает прибор критичным по отношению к перестройке частоты излучения. Среди перспективных для терагерцевого диапазона приборов с прямолинейными пучками электронов отметим также клистроны с распределённым взаимодействием [13], демонстрирующие очень высокие параметры во всем миллиметровом диапазоне, и оротроны (или генераторы дифракционного излучения). Развиваемые в последние годы в ИПФ совместно со Всероссийским научно-исследовательским институтом физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) и Институтом спектроскопии РАН (ИСАН) импульсные оротроны достигли частоты излучения 0,4 ТГц при сравнительно плавной электромеханической перестройке частоты излучения в очень широком диапазоне (до 1–1,5 октав) и мощности излучения в несколько сотен мВт [14].

В отличие от приборов с прямолинейными электронными пучками, ЛСЭ и гиротроны используют стимулированное тормозное излучение электронов, движущихся по периодическим траекториям. В этих приборах частицы взаимодействуют с быстрыми собственными волнами, что позволяет применять в качестве электродинамических структур открытые резонаторы или волноводы большого объёма и возбуждать их интенсивными электронными пучками, движущимися далеко от стенок структур. Благодаря этому можно получать очень большие мощности излучения.

В гиротроне (рис. 1) электроны движутся вдоль винтовых траекторий в однородном магнитном поле соленоида B_0 и взаимодействуют с высокочастотным полем цилиндрического резонатора в условии циклотронного резонанса

$$\omega \approx s\omega_c. \quad (1)$$

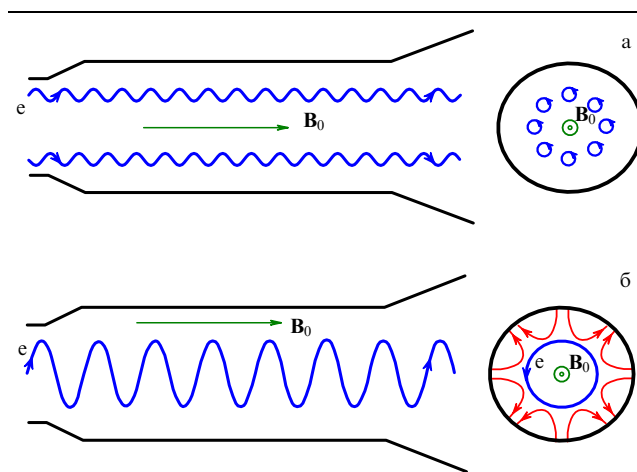


Рис. 1. Рабочее пространство традиционного гиротрона с полисекционным электронным пучком (а) и гиротрона с большой орбитой с моноосевым электронным пучком (б).

¹ Обзор работ по полупроводниковым терагерцевым генераторам см., например, в [8].

Здесь ω — частота поля, s — номер резонансной циклотронной гармоники, $s = 1, 2, \dots$, $\omega_c = eB_0/m\gamma$ — циклотронная частота, где e , m , γ — заряд, масса и релятивистский фактор электрона соответственно. При любых энергиях частиц принципиальную роль играет обусловленная релятивистской зависимостью циклотронной частоты от энергии неизохронность циклотронного вращения, приводящая к азимутальной группировке частиц на ларморовских окружностях под влиянием усиливаемой (затравочной) волны. Для развития этой группировки вращательная скорость электронов и длина пространства взаимодействия должны быть достаточно большими.

Для минимизации доплеровского уширения линии циклотронного резонанса в гиротронах используются моды с минимальным продольным волновым числом. Соответственно, при длине резонатора, много большей длины волны, поле рабочей моды образуется волнами, распространяющимися почти поперёк магнитного поля. Поэтому при условии резонанса (1) можно пренебречь доплеровской поправкой к частоте (в детальных расчётах, особенно для пучков со значительным разбросом скоростей частиц, этот сдвиг частоты, приводящий, в частности, к неоднородному уширению линии циклотронного резонанса, необходимо учитывать).

Из условия (1) следует формула для резонансного значения магнитного поля

$$B_0(T) = 35,7 \frac{\gamma}{s} f \text{ [ТГц]}, \quad (2)$$

из которой видно, что для терагерцевых гиротронов на основном ($s = 1$) циклотронном резонансе требуются очень высокие магнитные поля: например, для получения частоты 1 ТГц необходимо поле величиной более 36 Тл. В настоящее время такие поля могут создаваться главным образом импульсными соленоидными. Однако при обеспечении эффективной дискриминации паразитных мод высокочастотная генерация может быть также получена на высоких гармониках, когда рабочее магнитное поле в s раз меньше и оно может быть создано в современных криомагнитных системах. В результате при намного меньших энергиях частиц и размерах приборов на частотах до 1–1,5 ТГц гиротроны, согласно оценкам, способны генерировать в импульсном и непрерывном режимах такой же или даже более высокий уровень мощности, как и ЛСЭ.

В первых экспериментах с терагерцевыми гиротронами, выполненных в ИПФ ещё в 1970–1980-х годах, были продемонстрированы непрерывная генерация на второй гармонике на частоте 0,33 ТГц с мощностью киловаттного уровня [15] и генерация в разовых импульсах длительностью 50 мкс на основном циклотронном резонансе на частотах вплоть до 0,65 ТГц с пиковой мощностью 10^4 – 10^5 Вт [16]. После этих работ высокочастотные гиротроны начали развиваться также рядом групп США, Австралии и Японии. В настоящее время несколько организаций, включая ИПФ, создают непрерывные гиротроны с частотами в диапазоне 0,14–0,52 ТГц для ЭПР-спектроскопии и динамической поляризации ядер (ДПЯ) при высокополевой ЯМР-спектроскопии [17–20], а также для других приложений. В совместном эксперименте ИПФ и университета г. Фукуи (Япония) создан эффективный непрерывный гиротрон на основном циклотронном резонансе с частотой 0,3 ТГц и

мощностью 2,7 кВт, в котором используется так называемый сухой криомагнит с полем 12 Тл [21]. Недавно гиротроны, работающие на основной [22], второй [23] и третьей [24] циклотронных гармониках, преодолели частотный рубеж 1 ТГц. Несмотря на проблемы, связанные с созданием сильных магнитных полей, такие генераторы являются сравнительно простыми, доступными и легко тиражируемыми источниками мощного излучения.

Следует также отметить, что наиболее востребованными в настоящее время являются мощные субтерагерцевые гиротроны, предназначенные для электронно-циклотронного нагрева и управления параметрами плазмы в установках управляемого термоядерного синтеза; при работе в квазинепрерывном режиме они обеспечивают мощность 1 МВт на довольно высокой частоте (170 ГГц) [25]. При достигнутом в гиротронах уровне дискриминации паразитных мод резонатора при повышении частоты пиковая мощность излучения снижается сравнительно медленно, но средняя мощность уменьшается по крайней мере как $\lambda^{5/2}$ вследствие тепловых проблем, связанных с уменьшением поверхности резонатора и возрастанием доли омических потерь в его стенках.

Для повышения частоты излучения гиротронов в ИПФ был усовершенствован использовавшийся ранее [16] компактный и высокопрочный импульсный соленоид, что позволило вдвое увеличить магнитное поле — до 50 Тл — и при энергии частиц до 24 кэВ возбудить на основном циклотронном резонансе в режиме разовых импульсов ряд мод с частотами в диапазоне 1–1,3 ТГц и пиковыми мощностями 5–0,5 кВт (рис. 2а) [22, 11]. В ИПФ развивается также технология, которая, согласно расчётам, обеспечит создание достаточно простых импульсных соленоидов с магнитным полем величиной до 30 Тл и частотой повторения импульсов до 0,1 Гц. Это позволит реализовать традиционные гиротроны на основном циклотронном резонансе и второй гармонике с частотой генерации до 0,8–1,6 ТГц при пиковой мощности в несколько сотен киловатт и средней мощности порядка 1 Вт.

При работе на основном циклотронном резонансе и второй гармонике в терагерцевых гиротронах, как и в миллиметровом диапазоне, наиболее часто используются трубчатые полиосевые электронные пучки (рис. 1а). При работе на высоких гармониках более высокие уровни связи электронов с волной и уровень дискриминации паразитных мод реализуются при близкой к моноосевой (рис. 1б) конфигурации электронного пучка, ось которого совпадает с осью аксиально симметричного резонатора. При такой геометрии, применяемой в так называемых гиротронах с большой орбитой (ГБО), вблизи оси поле вращающейся по азимуту моды с азимутальным индексом s идеально совпадает с полем $2s$ -го вращающегося мультиполя, вместе с которым при резонансном магнитном поле синхронно вращаются по ларморовской окружности электроны. Благодаря этому для таких мод реализуется наибольшая связь с электронами, а моды с другими азимутальными индексами не возбуждаются (сильное правило отбора).

Созданный в ИПФ гиротрон с большой орбитой с энергией частиц 50–80 кэВ и полем 10–14 Тл позволил селективно возбудить на второй и третьей гармониках несколько мод на рекордно высоких для этого типа

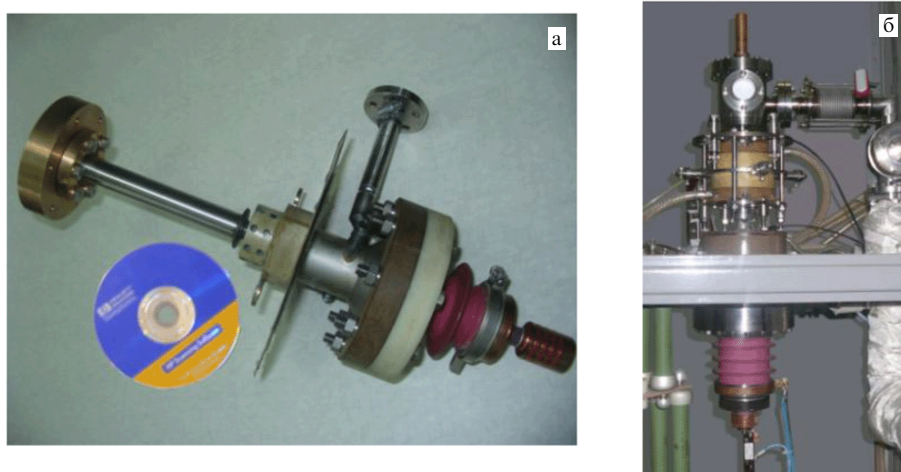


Рис. 2. Фотографии созданных в ИПФ импульсных терагерцевых гиротронов, работающих на основном циклотронном резонансе (а) и на высоких гармониках (б).

приборов частотах 0,55–1,0 ТГц с пиковой мощностью 0,3–1,8 кВт в импульсах длительностью 8 мкс при частоте повторения 0,1 Гц (рис. 2б) [24]. Подобные системы могут работать при сравнительно низких магнитных полях, доступных для современных криомагнитных систем. Сейчас в ИПФ изготавливается ГБО с более низкими энергией частиц (30 кэВ) и магнитным полем (5 Тл), рассчитанный на получение непрерывной генерации с мощностью 3–0,1 кВт на частотах 0,26–0,52 ТГц при работе на второй, третьей и четвертой циклотронных гармониках. При сравнительно доступных в настоящее время криомагнитах с полем 15 Тл возможно создание подобного источника с частотами до 1,6 ТГц.

Ограничения мощности излучения терагерцевых гиротронов, связанные с созданием сверхсильных магнитных полей, дискриминацией паразитных мод в сверхразмерных электродинамических системах и омическим нагревом резонаторов, приводят к тому, что средняя мощность излучения на основном циклотронном резонансе будет снижаться до величины 200–70 кВт на частотах 0,3–0,5 ТГц. При работе на второй и третьей циклотронных гармониках (в том числе, при использовании ГБО) возможно достижение частот 1–1,6 ТГц со средней мощностью киловаттного уровня.

3. Генерация и детектирование когерентных широкополосных импульсов терагерцевого диапазона методами оптоэлектроники

Возникновение и развитие фемтосекундной лазерной техники, которая при небольших средних мощностях позволяет получать высокие пиковые мощности, обеспечили бурный прорыв в освоении терагерцевого диапазона благодаря возможности использования нелинейных эффектов в различных средах как для генерации, так и для детектирования импульсного когерентного широкополосного излучения. В качестве примера можно указать параметры излучения, обеспечиваемого лазерной системой "Spitfire-Pro", используемой в специализированной установке ИПФ для исследований по оптоэлектронике: длина волны 0,8 мкм, энергия 2–3 мДж в импульсах длительностью 50 фс, частота следования импульсов 1 кГц, что соответствует пиковой мощности 50 ГВт и интенсивности 5–10 ГВт см⁻²

при фокусировании в пятно с характерным размером 100 мкм.

Первые демонстрационные эксперименты по генерации импульсного терагерцевого излучения в свободном пространстве и его детектированию были проведены в начале 1980-х годов с использованием "быстрых" фотопроводников (с характерным временем нарастания и спада фотопроводимости в пикосекундном диапазоне) [26] и нелинейных электрооптических кристаллов [27]. Генерация обеспечивается "выпрямлением" (нелинейным детектированием) фемтосекундных лазерных импульсов. Вследствие этого при регистрации импульсного терагерцевого излучения появляется уникальная возможность измерения так называемой волновой формы терагерцевых импульсов, т.е. зависимости электрического поля от времени, что обусловлено высокой частотой следования генерируемых терагерцевых импульсов и их высокой воспроизводимостью от импульса к импульсу. Это позволяет осуществлять "оптическое сканирование", изменяя задержку пробных оптических импульсов относительно терагерцевых импульсов, проходящих через фотопроводник, в котором наведённое напряжение определяется величиной и знаком низкочастотного (ТГц) электрического поля, или через нелинейный электрооптический кристалл, в котором наведённое двояколучепреломление также определяется величиной и знаком низкочастотного электрического поля (линейный эффект Поггеля). На рисунке 3 схематически представлен принцип оптического стробирования для измерения "волновой формы" и приведены примеры измеренных волновых форм с различными характерными временными масштабами.

Иллюстрацией высокой повторяемости генерируемых терагерцевых импульсов могут служить результаты работы [28] по фазовой стабилизации непрерывного излучения диапазона 100 ГГц, в которой опорными сигналами являлись высокие гармоники частоты следования терагерцевых импульсов (около 100 МГц), которые были чётко разрешены при номерах гармоник порядка нескольких тысяч. Использование такой системы стабилизации позволило получить рекордно узкую линию непрерывного излучения (порядка 10 Гц на уровне половинной мощности).

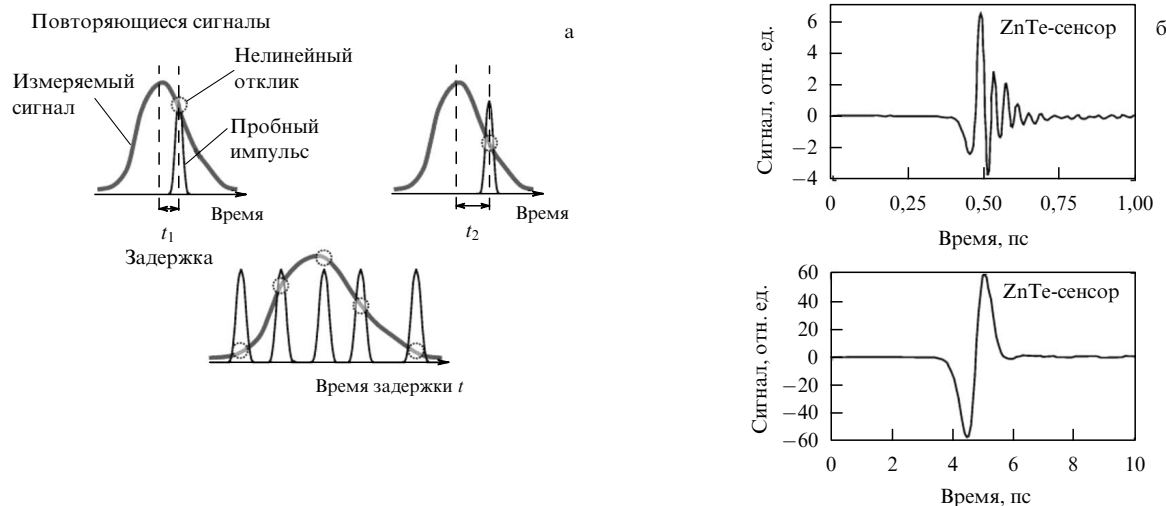


Рис. 3. Принцип оптического стробирования для измерения "волновых форм" терагерцевых импульсов (а) и примеры измеренных "волновых форм" с разными характерными временными масштабами (б).

Сравнение "волновых форм" опорного терагерцевого излучения и излучения, прошедшего через исследуемые образцы, лежит в основе многочисленных приложений, связанных с терагерцевым "радиовидением" и измерением спектров исследуемых веществ в широком частотном диапазоне (так называемая time-domain-спектроскопия); следует подчеркнуть, что фурье-обработка "волновых форм" даёт возможность одновременного измерения действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости. Регистрация терагерцевого излучения с использованием фотопроводников или нелинейных электрооптических кристаллов, являющаяся в настоящее время хорошо отработанной и общепринятой, применяется в ряде коммерческих приборов. В то же время продолжают интенсивные исследования, направленные на поиск новых нелинейных материалов, новых схем генерации, на достижение оптимальных параметров, а также фундаментальные исследования. Ниже мы кратко остановимся на некоторых из них.

В кристаллах, в которых групповая скорость оптического излучения превышает фазовую скорость терагерцевых волн, возможен черенковский механизм генерации в случае, когда низкочастотный импульс нелинейной поляризации среды движется со скоростью, большей фазовой скорости терагерцевого излучения. Такая ситуация реализуется, например, в планарных сэндвич-структурах, разработанных ИПФ в кооперации с Нижегородским государственным университетом. Эти структуры состоят из стеклянной (BK7) [29] либо металлической [30] подложки, слоя нелинейного кристалла (LiNbO_3) толщиной в несколько десятков микрон и кремниевой призмы. При выпрямлении оптического излучения в слое LiNbO_3 наводится нелинейная поляризация, затем черенковский клин терагерцевых волн проходит через кремниевую призму; вывод терагерцевого излучения осуществляется через скошенную поверхность призмы. Получена рекордно высокая эффективность конверсии оптического излучения в терагерцевое — порядка 10^{-3} . Теоретически ожидаемая эффективность генерации примерно на порядок выше [31, 32], поэтому можно надеяться на увеличение эффективности в эксперименте при улучшении технологии изготовления сэндвич-струк-

тур. При использовании металлической подложки можно также управлять спектром терагерцевого излучения, изменяя зазор между нелинейным кристаллом и подложкой.

Рекордно высокие значения энергии терагерцевых импульсов (до 10 мкДж), что соответствует рекордно большой напряжённости терагерцевого поля (до 10^7 В см $^{-1}$ при фокусировке в пятно диаметром 200 мкм), получены в Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН (ИОФ) [33]. Схема генерации основана на оптическом выпрямлении высокоэнергичных (30 мДж) фемтосекундных лазерных импульсов с наклонным фронтом интенсивности, распространяющихся в широкоапертурном (с размерами $30 \times 10 \times 10$ мм 3) нелинейном кристалле ниобата лития. Угол наклона фронта интенсивности соответствует черенковскому условию, что значительно увеличивает время взаимодействия излучаемого терагерцевого импульса с возбуждаемой в среде нелинейной низкочастотной поляризацией.

В последнее время интенсивно исследуются плазменные механизмы генерации терагерцевого излучения, связанные с пробоем атмосферного воздуха сфокусированным фемтосекундным излучением. Эти способы генерации обладают, по сравнению с нелинейным выпрямлением в твёрдом теле, такими преимуществами, как отсутствие "порога разрушения", позволяющее в принципе использовать сколь угодно большие интенсивности лазерного излучения, отсутствие ярко выраженных резонансов, "вырезающих" целые участки в спектрах генерируемого терагерцевого излучения, высокая эффективность генерации в ряде схем. Кроме того, в системах дистанционного контроля можно максимально приблизить плазменный источник и детектор терагерцевого излучения к исследуемым объектам. Специфика современного этапа исследований генерации терагерцевого излучения в лазерной искре состоит в том, что иногда экспериментальные исследования опережают теоретические, а рассматриваемые теоретические модели, как правило, не дают количественной интерпретации всей совокупности экспериментальных данных. Одна из сложностей здесь связана с необходимостью трёхмерного

моделирования самосогласованной динамики сфокусированного лазерного поля и возникающей в процессе ионизации воздуха плазмы, а другая — с нахождением распределения ответственных за терагерцевое излучение низкочастотных токов, которые появляются в результате релаксации в сформировавшемся плазменном столбе первоначальной волны, созданной при прохождении короткого ионизирующего оптического импульса.

На специализированной установке ИПФ РАН, созданной для исследований в области оптоэлектроники, проведён широкий круг экспериментальных исследований по генерации терагерцевого излучения в лазерной искре. Показано, в частности, что при наложении на область искры статического электрического поля порядка 10 кВ см^{-1} (близкого к порогу пробоя воздуха при атмосферном давлении) эффективность генерации возрастает более чем в 200 раз [34], а добавление к оптическому излучению второй гармоники на уровне 10 % (при соответствующей фазировке полей 1-й и 2-й гармоник) приводит к повышению эффективности более чем на четыре порядка [34, 35]. Кроме того, получены оригинальные результаты, касающиеся диаграммы направленности и поляризации терагерцевого излучения из лазерной искры, опровергающие сложившиеся представления об аксиальной симметрии характеристик терагерцевого излучения и соответствующей симметрии распределения низкочастотных токов в лазерной искре, ответственных за это излучение.

В ИПФ разработаны теоретические модели, учитывающие специфику формирования электронной функции распределения в условиях туннельной ионизации в поле оптического излучения. Так, в нульмерном приближении на основе одномерного уравнения Больцмана для плазмы, возникающей при туннельной ионизации, получены приближённые выражения для источника квазистационарного тока и проведён анализ эффективности возбуждения тока в бихроматической схеме пробоя в зависимости от параметров лазерного излучения (относительная разность фаз, поляризация, амплитуда гармоник) [34–36]. Получено хорошее качественное согласие теоретических результатов с экспериментальными.

Предложен новый механизм формирования низкочастотных токов в плазме лазерной искры, связанный с тем, что при полевой (туннельной) ионизации газа в поле линейно поляризованного лазерного излучения возникает анизотропное давление в электронной подсистеме (с выделенным направлением вдоль оптического поля). При релаксации анизотропии возбуждаются низкочастотные токи и в направлении, перпендикулярном оптическому полю, что заметно меняет диаграмму направленности и спектр терагерцевого излучения. Разработан численный код [37], использование которого позволило детально объяснить формирование квадрупольной диаграммы направленности терагерцевого излучения и её модификацию при наложении внешнего электростатического поля, полученные в экспериментах [34].

4. Применения терагерцевого излучения

В последние годы субтерагерцевые и терагерцевые источники когерентного излучения находят всё больше различных применений. Так, гиротроны мегаваттного уровня мощности с частотами до 0,17 ТГц применяются в системах электронно-циклотронного нагрева практически всех современных установок управляемого термо-

ядерного синтеза (УТС) с магнитным удержанием. Высокостабильные и сравнительно маломощные гиротроны используются для значительного повышения чувствительности высокополевых ЯМР-спектрометров за счёт поляризации парамагнитной подсистемы с последующей передачей состояния поляризации ядерной подсистеме (динамическая поляризация ядер). Недавно разработанный в ИПФ гиротрон на второй гармонике с частотой излучения 260 ГГц и мощностью около 100 Вт в непрерывном режиме генерации [20] успешно использован для этой цели в экспериментах [38].

Разработан гиротрон на основном циклотронном резонансе с высокой рабочей частотой (0,67 ТГц) и большой импульсной мощностью (300 кВт), который предполагается использовать в экспериментах по дистанционному обнаружению скрытых источников ионизирующего излучения с помощью предложенного в [39] метода. Согласно этому методу мощный терагерцевый волновой пучок фокусируется в малый объём, в котором в отсутствие ионизирующего излучения вероятность нахождения свободных электронов и возникновения разряда мала, а при наличии ионизирующего излучения вероятность пробоя значительно повышается.

В ИПФ начаты работы по исследованию возможностей создания источника экстремального ультрафиолетового излучения с малыми геометрическими размерами ("точечного") для проекционной литографии высокого разрешения на основе линейчатого излучения многозарядных ионов в разряде, создаваемом излучением терагерцевого гиротрона; проведено комплексное исследование самостоятельного и инициированного разрядов, поддерживаемых сходящимся пучком терагерцевого излучения в аргоне и смесях газов при давлениях, близких к атмосферному.

На рисунке 4 схематически представлена установка ИПФ, предназначенная для получения спектров и изображений исследуемых образцов при прохождении через них терагерцевого излучения. Длительность одного сканирования для получения спектра в интервале частот 0–10 ТГц с разрешением 1,5 ГГц порядка 100 с. В демонстрационных экспериментах было идентифицировано более ста линий воды и серооксида углерода в газообразном состоянии, совпадающих с данными известных каталогов. В качестве примера на рис. 5 показаны "спектральные портреты" некоторых растворителей и белков в растворах [40]. Двумерные радиоизображения объектов получают путём поточечного сканирования при перемещении исследуемого образца по двум поперечным координатам (положение S1 на рис. 4); примеры изображений при разных способах представления результатов обработки показаны на рис. 6 [41]. Время получения одного изображения объекта размером несколько квадратных сантиметров с разрешением порядка $1 \times 1 \text{ мм}^2$ при таком способе доходит почти до десяти часов, что пригодно только в качестве демонстраций. В связи с этим в настоящее время в ИПФ ведётся разработка системы построения изображений на основе использования широкоапертурных терагерцевых пучков и быстродействующих ПЗС-матриц (ПЗС — прибор с зарядовой связью), которая позволит получать двумерные изображения в реальном времени с разрешением, близким к дифракционному пределу.

Одним из наиболее перспективных, с точки зрения приложений, направлений, которое интенсивно разви-

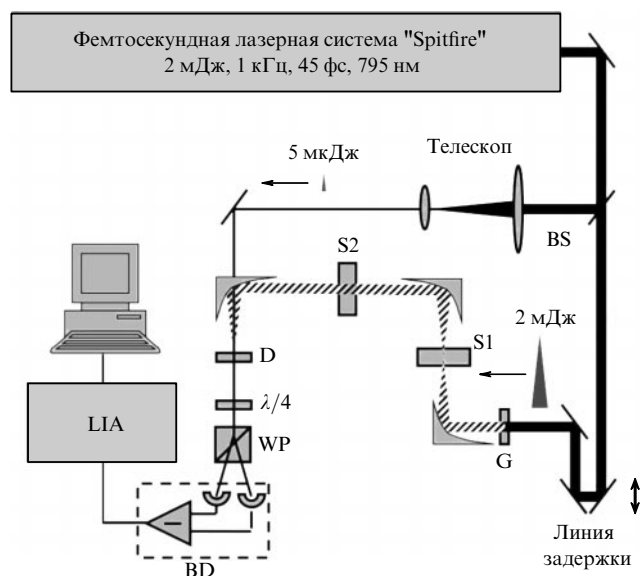


Рис. 4. Блок-схема установки ИПФ для исследований по оптоэлектронике: линия задержки позволяет осуществлять оптическое стробирование (от импульса к импульсу), помещение образца (S1) в перетяжке терагерцевых импульсов позволяет получать радиоизображения "на просвет" путём поточечного сканирования, помещение однородного образца в положение S1 обеспечивает его time-domain-спектроскопию. Акустооптический модулятор: BS — делитель пучка, WP — призма Волластона, G — 1-миллиметровый ZnTe-[110]-генератор, D — 1-миллиметровый ZnTe-[110]-детектор, λ/4 — четвертьволновая пластина, S1, S2 — образцы, WD — сбалансированные детекторы, LIA — синхронный усилитель. Параметры ТГц-импульса: центральная частота 0,75–1 ТГц, спектральная ширина — 1–2 ТГц, длительность 0,5–1 пс, поле 20 кВ см⁻¹, пиковая мощность 3 кВт, эффективность преобразования 10⁻⁶.

вается во многих странах, является трёхмерная томография исследуемых объектов, основанная на регистрации и обработке отражённого (рассеянного назад) терагерцевого излучения. Среди возможных приложений можно отметить: контроль за многослойными полупроводниковыми структурами в процессе их изготовления, обнаружение неоднородностей в каменных и бетонных конструкциях (дефектоскопия новых сооружений и исторических памятников, археология и т.п.), исследование произведений искусства (обнаружение скрытых под более поздними наслоениями изображений, исследование состояния произведений искусства перед реставрацией, обнаружение древней настенной живописи под поздними наслоениями, в том числе под штукатуркой), проведение антитеррористических мероприятий (идентификация и обнаружение пластиковой взрывчатки, ядовитых веществ, наркотиков, инспекция багажа, конвертов и укрытых под одеждой предметов) и др. Отечественные исследования по этому направлению только начинаются; требуется их значительная интенсификация в ближайшее время.

5. Заключение

Терагерцевый "зазор" (THz-gap) в настоящее время эффективно заполняется как со стороны традиционной вакуумной электроники, так и со стороны оптоэлектроники. Отечественные разработки в области вакуумной электроники занимают передовые позиции в мировой науке. Субтерагерцевые гиротроны эффективно используются в установках УТС с магнитным удержанием, а также в ДПЯ-ЯМР-спектрометрах. В импульсном режиме получены мощности 10²–10⁴ Вт в сравнительно компактных и доступных гиротронах на частотах до 1–1,3 ТГц; разрабатываются непрерывные гиротроны

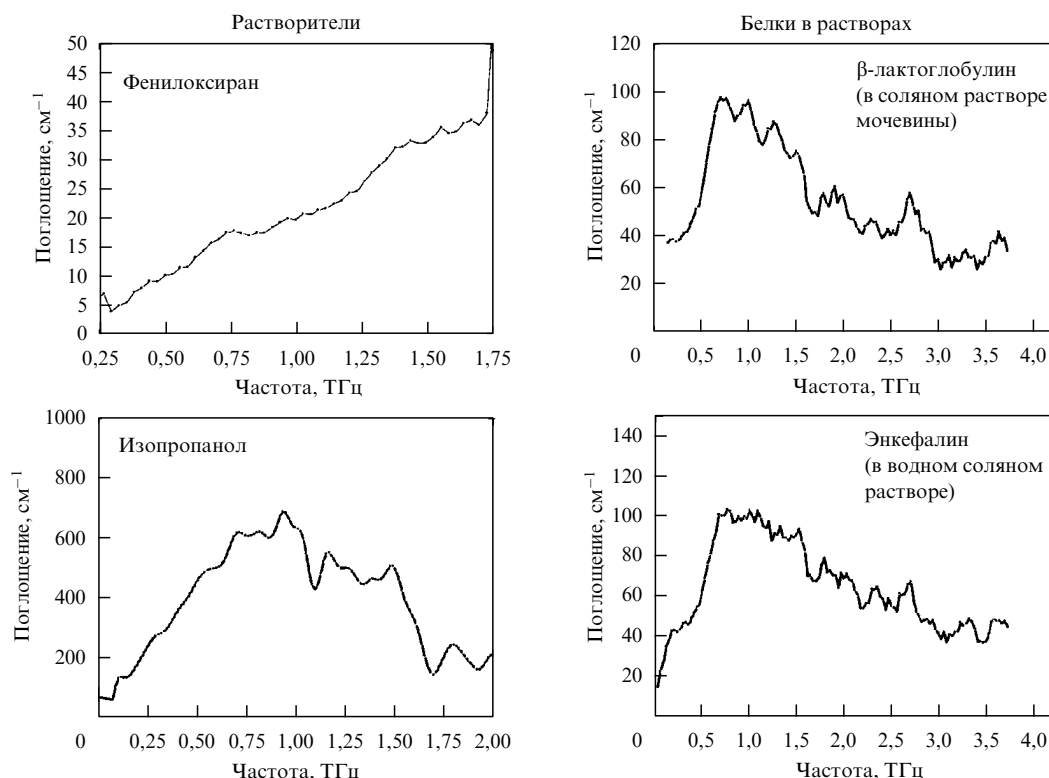


Рис. 5. Примеры "спектральных портретов" некоторых растворов и белков в растворах.

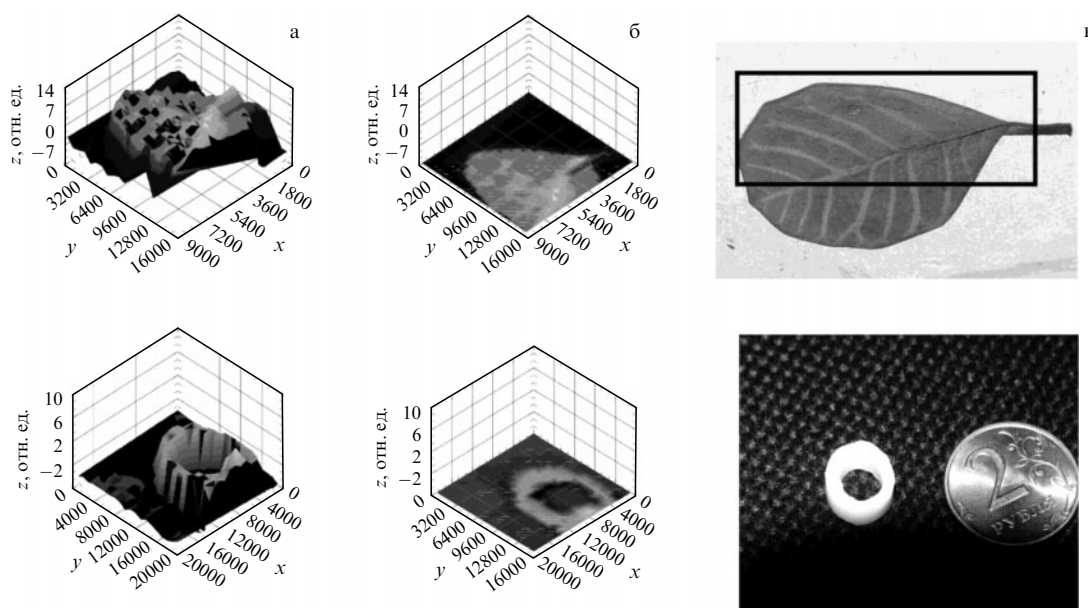


Рис. 6. Примеры радиоизображений в ТГц-диапазоне, полученных "на просвет": (а, б) ТГц-радиоизображения при разных способах представления; (в) оптические изображения.

киловаттного уровня мощности на частотах до 1 ТГц. За короткий срок отечественная фемтосекундная оптоэлектроника вышла на современный уровень в области поиска новых материалов, методов и схем генерации, а также демонстрации возможных приложений, что позволяет сделать естественный переход к следующей стадии — отечественным разработкам приборов для конкретных приложений.

Список литературы

1. Tonouchi M *Nature Photon.* **1** 97 (2007)
2. Reimann K *Rep. Prog. Phys.* **70** 1597 (2007)
3. Roskos H G et al. *Laser Photon Rev.* **1** 349 (2007)
4. Humphreys K et al. "Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering" *Conf. Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.* **2** 1302 (2004)
5. Knobloch P et al. *Phys. Med. Biol.* **47** 3875 (2002)
6. Hight W A R et al., in *53rd Ohio State Univ. Intern. Symp. on Molecular Spectroscopy* Vol. 53 (1998) p. 158
7. Globus T R et al. *J. Appl. Phys.* **91** 6105 (2002)
8. Belkin M A et al. *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.* **15** 952 (2009)
9. Голант М Б, Алексеенко З Т, Короткова З С *ПТЭ* **12** (3) 231 (1969)
10. Gavrilov N G *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* **575** 54 (2007)
11. Bratman V L et al. *J. Infrared Millimeter Terahertz Waves* **32** 371 (2011)
12. Лысенко Е Е и др. *Электромагнитные волны и электронные системы* (11) 63 (2010)
13. Dobbs R et al., in *IEEE Intern. Vacuum Electronics Conf., Monterey, CA, USA* (2010) p. 181
14. Bratman V L et al. *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1466 (2010)
15. Зайцев Н И и др. *Радиотехника и электроника* **19** 103 (1974)
16. Flyagin V A, Luchinin A G, Nusinovich G S *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **4** 629 (1983)
17. Maly T et al. *J. Chem. Phys.* **128** 052211 (2008)
18. Blank M et al., in *Joint 34th Intern. Conf. on IR and MM Waves and 17th Intern. Conf. on Terahertz Electronics, Busan, Korea* (2009) p. W3D02.0112
19. Ogawa I et al., in *Joint 34th Intern. Conf. on IR and MM Waves and 17th Intern. Conf. on Terahertz Electronics, Busan, Korea* (2009) p. W3D03.0309
20. Zapevalov V E et al., in *Joint 34th Intern. Conf. on IR and MM Waves and 17th Intern. Conf. on Terahertz Electronics, Busan, Korea* (2009) p. W3D04.0389
21. Saito T et al. *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **28** 1063 (2007)
22. Glyavin M Yu, Luchinin A G, Golubiatnikov G Yu *Phys. Rev. Lett.* **100** 015101 (2008)
23. Idehara T et al. *Int. J. Infrared Millimeter Waves* **29** 131 (2008)
24. Bratman V L, Kalynov Yu K, Manuilov V N *Phys. Rev. Lett.* **102** 245101 (2009)
25. Denisov G G et al. *Nucl. Fusion* **48** 054007 (2008)
26. Auston D H, Cheung K P, Smith P R *Appl. Phys. Lett.* **45** 284 (1984)
27. Valdmanis J A, Mourou G, Gabel C W *Appl. Phys. Lett.* **41** 211 (1982)
28. Третьяков М Ю и др. *Письма в ЖЭТФ* **91** 240 (2010) [Tretyakov M Yu et al. *JETP Lett.* **91** 222 (2010)]
29. Bodrov S B et al. *Opt. Express* **17** 1871 (2009)
30. Suvorov E V et al., in *Strong Microwaves: Sources and Applications: Proc. of the VII Intern. Workshop, Nizhniy Novgorod, 27 July–2 August 2008* Vol. 2 (Ed. A G Litvak) (Nizhniy Novgorod: Russian Academy of Sciences, Institute of Applied Physics, 2009) p. 529
31. Бодров С Б и др., в сб. *Сборник трудов Международного оптического конгресса "Оптика — XXI век"* (Под ред. В Г Беспалова, С А Козлова) (СПб: СПбГУ ИТМО, 2008) с. 298
32. Bakunov M I, Bodrov S B *Appl. Phys. B* **98** 1 (2010)
33. Гарнов С В, Щербаков И А *УФН* **181** 97 (2011) [Garnov S V, Shcherbakov I A *Phys. Usp.* **54** 91 (2011)]
34. Ахмеджанов Р А и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **52** 536 (2009) [Akhmedzhanov R A et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **52** 482 (2009)]
35. Ахмеджанов Р А и др. *ЖЭТФ* **136** 431 (2009) [Akhmedzhanov R A et al. *JETP* **109** 370 (2009)]
36. Фадеев Д А, Миронов В А *Опт. журн.* **77** (10) 32 (2010) [Fadeev D A, Mironov V A *J. Opt. Technol.* **77** 615 (2010)]
37. Zharova N A, Mironov V A, Fadeev D A *Phys. Rev. E* **82** 056409 (2010)
38. Denysenkov V et al. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **12** 5786 (2010)
39. Granatstein V L, Nusinovich G S *J. Appl. Phys.* **108** 063304 (2010)
40. Ахмеджанов Р А и др. *Изв. вузов. Радиофизика* **48** 939 (2005) [Akhmedzhanov R A et al. *Radiophys. Quantum Electron.* **48** 837 (2009)]
41. Ахмеджанов Р А, Иляков И Е, Шишкин Б В, в сб. *Нелинейные волны — 2006* (Отв. ред. А В Гапонов-Грехов, В И Некоркин) (Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2007)