

# Терагерцовая когерентная спектроскопия и томография

Н. Н. Зиновьев

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург, Россия

В докладе рассматриваются физические принципы аппаратурной реализации спектральных систем, систем получения изображения, томографических и микроскопических систем. Представлен анализ пороговых параметров, отношение сигнал/шум, линейность фото-отклика и динамический диапазон, проведено сравнение систем, использующих некогерентные источники и детекторы и методы обработки сигнала и системы когерентной диагностики. Обсуждаются различные возможные применения появляющейся новой технологии — терагерцовой когерентной спектральной томографии и микроскопии.

## План лекции

- 1 Введение
  - 1.1 Терагерцовый диапазон электромагнитного спектра.
  - 1.2 Квантовые и классические принципы построения приборных устройств терагерцового диапазона.
- 2 Источники когерентного терагерцового излучения.
  - 2.1 Генерация разностной частоты при нелинейно-оптическом смешении.
  - 2.2 Оптическое выпрямление.
  - 2.3 Генерация полупроводниковыми микро-антеннами.
- 3 Когерентное детектирование терагерцового излучения.
  - 3.1 Динамический линейный и квадратичный электро-оптические эффекты.
  - 3.2 Детектирование полупроводниковыми микро-антеннами.
- 4 Когерентная терагерцовая спектральная томография.
- 5 Заключение: перспективы практической реализации терагерцовой диагностики.

## Тезисы лекции

Терагерцовый (ТГц) диапазон занимает место между микроволновой и инфракрасной частью электро-магнитного спектра, что соответствует области частот  $\sim 10^{10}$ – $10^{14}$  Гц. Эта область спектра продолжает оставаться наиболее неосвоенной как в смысле утилизации ее в фундаментальных исследованиях в оптике, так и в большом количестве смежных научных дисциплин и технологических приложений. Необходимость освоения ТГц диапазона обуславливается следующими причинами.

- Огромное большинство характерных спектральных особенностей различных конденсированных сред (твердые тела, жидкости, био-медицинские ткани и среды, водные растворы и смеси, химические соединения различной агрегации, комплексные макро-молекулы), характеристические энергии связи различных инородных включений в конденсированных средах и многие другие характеристики попадает именно в ТГц диапазоне. Эти особенности могли бы быть использованы в качестве селективной диагностической специфичности, спектральной специфичности, в различных применениях ТГц технологии. Это существенным образом отличало бы ТГц диагностику от существующих методов (рентгеновская, ультразвуковая и магнеторезонансная томографии), где в качестве тестируемой специфичности используется локальное значение такой усредненной субстанциональной характеристики, как плотность вещества (рентген и ультразвук), концентрация спинов (магнеторезонансная томография) и т.п.
- ТГц излучение испытывает значительно меньшую эффективность Релевского рассеяния,  $\propto \lambda^{-4}$ , нежели излучения инфракрасного и видимого диапазонов. В то же время, ТГц излучение сохраняет большое преимущество над микроволновым диапазоном длин волн в пространственном разрешении, определяемым критерием Аббе. Большое количество сред обладает значительно меньшими коэффициентами поглощения в ТГц диапазоне по сравнению с характеристиками ближнего инфракрасного и видимого излучения. Вся сумма подобных факторов позволяет достигнуть максимальной комбинации достаточно высокого пространственного разрешения и глубокого проникновения ТГц излучения в исследуемый объект, что является благоприятным фактором для использования ТГц излучения в качестве инструмента диагностики различных объектов.
- Свойства спектральной специфичности ТГц диагностики определяют ее важность с точки зрения различных применений в технологиях безопасности, биомедицинских технологиях, фармацевтике, нанотехнологиях, микро- и нано- электронике, контроле продуктов питания, мониторинга

климата, решения задач астрономии, космических исследований и связи и многих других областях.

- Терагерцовое излучение неинвазивно — не обладает вредными для биологических факторами, подобно рентгену и гамма-квантам.

Проблема построения практических систем, работающих в ТГц области спектра, обусловлена рядом факторов. Область частот ТГц диапазона соединяет две спектральные области с совершенно различными физическими принципами построения приборов. В области микроволн (частоты  $\Omega_{\text{THz}}/2\pi \lesssim 10^{10}$  Гц) — электроники — приборы строятся на принципах электронного транспорта носителей заряда. Сам принцип транспорта носителей налагает фундаментальное ограничение на верхнюю частоту функционирования электронных устройств, обусловленное временем пролета носителя заряда между электродами и постоянной времени, связанной с размерами и сопротивлением как самого прибора, так и контактных элементов. Это принципиально ограничивает применение таких устройств в будущих компьютерах и других важных применениях, требующих проникновения в область ТГц и смежных с ней частот. С другой стороны, в видимом и инфракрасном диапазоне (частоты  $\Omega_{\text{THz}}/2\pi \gtrsim 10^{14}$  Гц), области фотоники, приборы и устройства основаны на квантово-механических принципах — переходах между активными энергетическими уровнями и явлении симулированного излучения. Так для функционирования как лазера, оптического квантового генератора, так и квантового детектора важным является обеспечение необходимой разности заселенностей. Определяющее влияние на этот параметр оказывает средняя тепловая энергия —  $kT$ -фактор. В ТГц диапазоне величина этого параметра превышает энергетические расстояния между активными энергетическими уровнями, что делает весьма проблематичным использование принципов фотоники для построения твердотельных и полупроводниковых ТГц систем, функционирующих при комнатной температуре. Даже если и удастся создать твердотельный лазер ТГц диапазона, работающий при комнатной температуре, создание ТГц квантового детектора представляет собой едва ли преодолимую задачу из-за воздействия подавляющего фона окружающего теплового излучения. Окружающий фон теплового излучения неизбежно будет ограничивать пороговые характеристики ТГц детектора. Вследствие этого использование в ТГц диапазоне детектирующих устройств, построенных на принципах фотоники, вероятно всегда будет требовать криогенных температур, что делает практическое использование комплексных диагностических устройств “генератор–исследуемый объект–детектор” с использованием криофотоники малопродуктивным в практических приложениях. Существующие другие возможности реализации источника ТГц излучения с использованием материальных си-

стем, в которых релаксация инверсной заселенности вследствие  $kT$ -фактора менее эффективна, такие как газовые молекулярные лазеры с оптической накачкой, или электро-вакуумных приборов, использующих движение электронов в электрических и магнитных полях (приборы типа ламп обратной волны) не обладают нужными спектральными, временными характеристиками и возможностью широкополосной и плавной перестройки частоты излучения. Устройства, подобные лазеру на свободных электронах или синхротрону, позволяющие получить достаточно мощное ТГц излучение, являются очень дорогими проектами, как правило национального значения и масштаба, и, конечно, не могут претендовать на применения, требующие компактности и мобильности ТГц систем.

Решение проблемы практической утилизации уникальных возможностей ТГц диапазона относительно недавно проявилось и стало практически реальным с использованием методов и явлений когерентной и нелинейной оптики. Начиная с 1995 г. практические реализации новых идей привели к осязаемому прогрессу технологий фемтосекундных лазерных импульсов в коммерческих версиях лазерных систем. Это послужило катализатором для прогресса ТГц когерентных технологий. Как ТГц диапазон занимает промежуточное место между областями электроники и фотоники, так и нелинейная когерентная оптика использует в своем арсенале квантово-оптические методы, многие из которых были заимствованы из областей классической и квантовой радиофизики. Так, при распространении ультра-короткого лазерного импульса длительностью от единиц до несколько десятков фемтосекунд ( $\sim 10^{-14}$  с) через нелинейный кристалл выбранной симметрии и состава в результате когерентных биений частотных компонент ультра-короткого импульса удается получить достаточно мощное ТГц излучение (до 100 Ватт в пике). Большим преимуществом когерентных методов является также и возможность реализовать очень чувствительный когерентный ТГц детектор, основанный на динамическом электро-оптическом эффекте Покельса или динамическом электро-оптическом эффекте Керра. Использование нелинейных кристаллов и новых нелинейных материалов, фотопроводящих микро-антенн и технологий фемтосекундных лазерных импульсов открывает ряд возможностей по заимствованию методов микроволновой техники и модификации их к применениям когерентной широкополосной ТГц технологии. Все это подводит к уникальной возможности построить устройство, замкнутое на одном принципе — когерентного нелинейно-оптического преобразования и детектирования ТГц излучения. Более того, эти методы позволяют не просто детектировать амплитуду излучения, прошедшего или отраженного от объекта, но и его фазу — тем самым однозначно и одновременно, в ходе одного измерения, определить все

оптические характеристики и параметры объекта. Практическое использование таких технологий методов ложится в основу нового направления томографии — когерентной терагерцовой томографии.