

Особенности применения мощных ТГц импульсов для обнаружения и распознавания газов на открытых трассах

Д. С. Ситников^{1,2}

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

² Московский физико-технический институт (государственный университет), Институтский пер., 9, Долгопрудный 141701, Россия

E-mail: sitnik.ds@gmail.com

Статья поступила в редакцию 22 ноября 2018 г.

Аннотация. В статье представлена методика терагерцовой спектроскопии во временной области (Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS) для дистанционного контроля атмосферы помещений. Указанная методика использована для решения задач обнаружения и распознавания газов в присутствии линий поглощения водяного пара. В качестве рабочего газа использован аммиак. Эксперименты проведены при естественной влажности (нормальные условия: давление 1 атм, влажность 35%, температура 23 °C) в присутствии паров воды, затрудняющих детектирование. Достигнутое спектральное разрешение схемы составило ~5 ТГц, что позволило осуществить успешное обнаружение и распознавание указанного газа. Для генерации однопериодных терагерцевых импульсов с энергией до 10 мкДж использован органический кристалл ОН1 с коэффициентом преобразования 2%. Применение мощного источника широкополосного терагерцового излучения (0.1–3 ТГц) открывает новые перспективы для дальнейшего увеличения расстояний на открытом пространстве в области дистанционного зондирования. <https://doi.org/10.33849/2018130>

1. ВВЕДЕНИЕ

Терагерцовый диапазон частот обладает рядом отличительных свойств, преимущества и возможности использования которых для решения различных фундаментальных и прикладных задач физики, химии, экологии, биологии, медицины, а также сферы безопасности активно изучаются во всем мире последние десятилетия [1–3]. В терагерцовом диапазоне частот (в основном в диапазоне от 0.1 до 6 ТГц, многие материалы имеют характерные линии поглощения. В частности, в нем содержатся линии поглощения, соответствующие вращательным переходам в молекулах полярных газов [4, 5], а также линии колебательных и колебательно-вращательных переходов больших молекул, в том числе органических. Это открывает возможности их исследования, детектирования и селективного воздействия. Согласно [6], поглощение в ТГц диапазоне для газов в 10^2 – 10^3 раз сильнее по сравнению с поглощением в микроволновом диапазоне длин волн.

Применение ТГц спектроскопии для детектирования газов актуально во многих областях. Динамический анализ газов горения для повышения процессов сгорания важен в экологии и задачах сбережения энергии. Изучение спектра аммиака в ТГц диапазоне важно для астрономии, изучения состава и температуры атмосферы таких планет как Юпитер и Сатурн, определения концентраций аммиака в межзвездном пространстве [7]. Диагностика опасных, токсичных и воспламеняющихся газов в реальном времени в условиях задымления во избежание вторичных происшествий в случае пожара также имеет большую актуальность. При этом большинство существующих методов имеют ограничения. Так, газовая хроматография при своей высокой чувствительности не позволяет проводить анализ в режиме реального времени. В то же время эффективность достаточно быстрого способа диагностики – инфракрасной абсорбционной спектроскопии, ухудшается в условиях сильного рассеяния в аэрозоле. С учетом соотношений между

стандартными длинами волн терагерцового излучения и размерами частиц аэрозоля, данное излучение меньше подвергнуто рассеянию в аэрозоле [8, 9]. Таким образом, метод терагерцовой спектроскопии можно рассматривать в качестве перспективного метода динамического анализа молекулярных газов на трассах, содержащих аэрозоль в виде дыма, пыли и тумана.

2. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ СХЕМЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ГАЗОВ И ХИМИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Все многообразие схем генерации и детектирования терагерцового излучения с помощью ультракоротких лазерных импульсов можно свести к схеме, представленной на рисунке 1(а). В этой схеме лазерный импульс фемтосекундного (фс) лазера разделяют на два: импульс накачки (ИН) и зондирующий импульс (ЗИ). Более мощный импульс накачки используется для генерации терагерцового импульса. Генерация происходит, как правило, при воздействии лазерного импульса накачки на некоторый кристалл или специальную структуру (в виде антенны). Зондирующий пучок используется для детектирования терагерцового импульса. Для детектирования может использоваться кристалл или структура, аналогичная той, что применяется для генерации. Детектирование происходит за счет изменения некоторой характеристики (например, поляризации) ЗИ в присутствии терагерцового импульса.

В импульсной терагерцовой схеме волновая форма электрического поля терагерцового импульса $E(t)$ регистрируется путем получения выборки значений поля терагерцового импульса в различные моменты времени. Зондирующий лазерный импульс взаимодействует с определенным временным участком терагерцового импульса в детекторе, а электрическое поле терагерцового импульса регистрируется как функция временной задержки зондирующего импульса с помощью аналого-

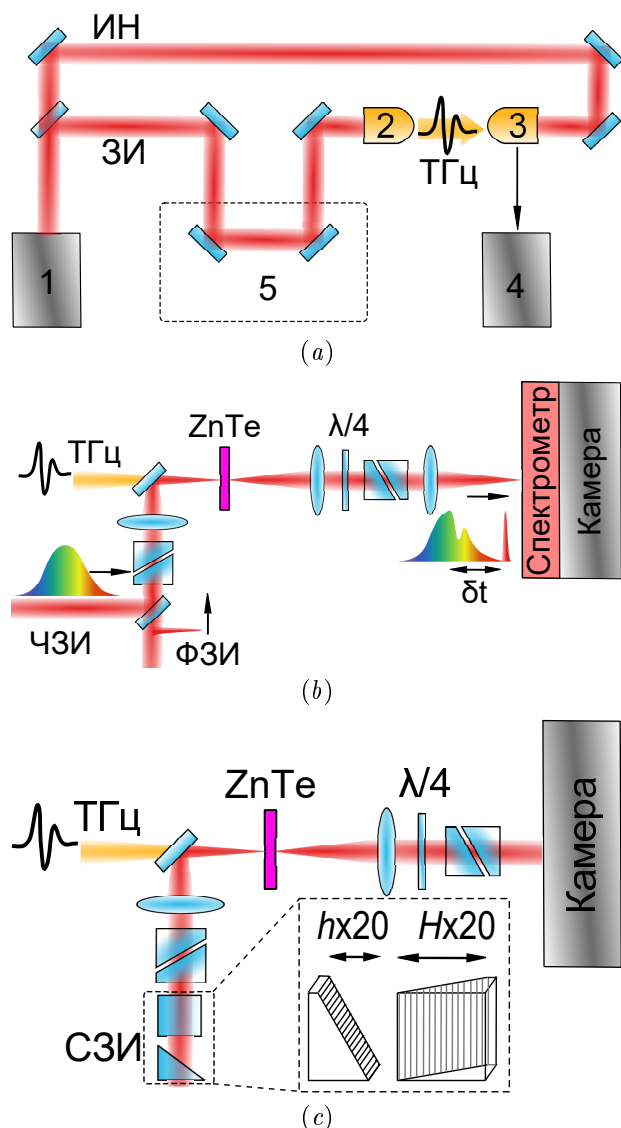


Рисунок 1. Принципиальные схемы: (а) генерации и детектирования терагерцового излучения с помощью ультракоротких лазерных импульсов: 1 — фемтосекундный лазер, 2 — источник ТГц излучения, 3 — приемник ТГц излучения, 4 — аналого-цифровой преобразователь, 5 — линия задержки, ЗИ — зондирующий импульс, ИН — импульс накачки; (б) одноимпульсной терагерцовой спектроскопии с использованием линейной спектральной интерферометрии: ЧЗИ — chirпированный зондирующий импульс, ФЗИ — фемтосекундный зондирующий импульс, 1 — спектрометр, 2 — камера, 3 — поляризатор; (в) одноимпульсной терагерцовой спектроскопии с использованием двух ступенчатых призм [10]: СЗИ — ступенчатый зондирующий импульс, 1 — ступенчатые призмы, 2 — камера, 3 — поляризатор.

цифрового преобразователя (АЦП). Для этого в схеме используется линия задержки, позволяющая изменять временной интервал между терагерцовым и зондирующим импульсом. Преобразование Фурье от временного профиля сигнала позволяет получить информацию о спектре терагерцового импульса. Если при прохождении импульса через исследуемую среду между источником и приемником имело место поглощение на определенных частотах, спектральный состав терагерцового излучения изменится, что неизбежно приведет к искажению временной формы ТГц импульса.

Существуют различные методики детектирования временной формы ТГц сигнала, наиболее распространенной из которых является электрооптическое детектирование. Такая регистрация временной формы ТГц импульса при его многократном зондировании фемтосекундными лазерными импульсами, имеет ряд особенностей. К ним, например, относится невозможность исследовать различные необратимые быстропротекающие явления (повреждение материала, необратимые химические реакции и фазовые переходы). Причина кроется в самом подходе к получению временного профиля ТГц импульса, основанном на его многократном зондировании фемтосекундными лазерными импульсами с различными временными задержками.

В связи с тем, что получение спектра происходит путем регистрации волновой формы (временного профиля) импульса, данный метод получил название терагерцовой спектроскопии во временной области (в англоязычной литературе — Terahertz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS). Осуществив запись волновой формы терагерцового импульса после его взаимодействия с некоторым объектом (в нашем случае с газом), а затем вычислив спектр с помощью прямого преобразования Фурье, можно получить спектральную характеристику исследуемого объекта в диапазоне частот, присутствующих в спектре терагерцового импульса.

Для получения высокого спектрального разрешения необходимо, чтобы временной профиль ТГц сигнала был достаточно длинным (0.1–10 нс). Это требование следует из свойств самого дискретного преобразования Фурье, которое определяют минимально разрешаемый частотный интервал $\delta\omega$ (1) и величину интервала регистрируемых частот Ω (2) [11]:

$$\delta\omega T = 2\pi, \quad (1)$$

$$\delta t \Omega = 2\pi, \quad (2)$$

где T — интервал сканирования временной задержки (временное окно регистрации сигнала), δt — временной шаг задержки (разрешение по времени).

С этой точки зрения перспективными выглядят методики, которые позволили бы получить информацию о спектре исследуемого вещества с нужным разрешением за один импульс. Они обеспечили бы возможность значительно сократить время исследований, повысить отношение сигнал-шум и обеспечить возможность регистрации необратимых явлений. Ниже представлены несколько из них.

Наиболее перспективными методами одноимпульсной терагерцовой спектроскопии представляются кодирование частоты-во-время с использованием линейной спектральной интерферометрии (англ. “frequency-to-time encoding with linear spectral interferometry”) и кодирование угла-во-время с использованием двух ступенчатых призм (англ. “angle-to-time encoding with dual echelons”).

В первом методе используется одновременно два зондирующих лазерных импульса: chirпированный и фемтосекундный лазерный импульс для линейной спектральной интерферометрии, рисунок 1(б). Лазерное излучение делится на два плеча, в одном из которых происходит chirпирование (растягивание широкополосного импульса в дисперсионной оптической среде) импульса

до 10 пс. Далее фемтосекундный и chirпированный импульсы объединяются в коллинеарной геометрии с временной задержкой между собой δt . Затем терагерцовое и оптическое излучения фокусируются на электрооптический кристалл с соответствующей временной задержкой, при этом информация о ТГц сигнале кодируется в chirпированном импульсе в виде поворота поляризации или фазовой модуляции (или комбинации обоих эффектов). Таким образом, ТГц сигнал кодируется в амплитуде или фазе chirпированного импульса, а извлечение ТГц временной формы возможно при наличии референсной интерферограммы в отсутствие ТГц импульса. На рисунке 1(б) после преобразования модуляции поляризации в амплитудную модуляцию с помощью поляризатора, chirпированный и фемтосекундный импульсы попадают в спектрометр, где спектральная интерференция регистрируется с помощью видеокамеры.

В этой схеме временное разрешение определяется длительностью фемтосекундного импульса, а временное окно задается длительностью chirпированного импульса, но ограничивается спектральным разрешением самого спектрометра. К особенностям данного метода, несколько ограничивающим его широкое практическое применение, относится тот факт, что метод требует очень точной юстировки и виброизоляции схемы для наблюдения стабильной интерференционной картины. Кроме этого, по сравнению со стандартной многоимпульсной методикой, метод спектральной интерферометрии дает более низкое значение отношения сигнал-шум [10].

Другой метод одноимпульсной спектроскопии, основанный на использовании ступенчатых призм достаточно прост в исполнении и обеспечивает соизмеримое отношение сигнал-шум. В качестве примера на рисунке 1(с) представлена схема из [10], позволяющая реализовать регистрацию временного профиля ТГц импульса в 22 раза (значение определяется параметрами призмы) быстрее, чем стандартный многоимпульсный метод с использованием линии задержки.

Здесь используются две скрепленные ступенчатые призмы, с 20-ю ступеньками каждая, что позволяет на выходе получить 400 зондирующих импульсов, разделенных одинаковыми временными интервалами в 25 фс. Таким образом, временное окно составляет 10 пс. Зондирующие импульсы и ТГц импульс коллинеарно фокусируются в одну и ту же область электрооптического кристалла, после чего разделяются в пространстве и переносятся на пространственный детектор.

Детектор представляет собой двумерный массив элементов. Таким образом, каждая его область считывает свой участок временного профиля ТГц импульса. Модуляция интенсивности последовательности импульсов во времени превращается в модуляцию интенсивности на детекторе, что позволяет отобразить всю ТГц временную форму за одно измерение.

Однако, реализация методики для решения задачи терагерцовой спектроскопии газов накладывает определенные ограничения. В частности, для достижения спектрального разрешения в 1 ТГц необходимо временное окно в 100 раз большее, чем в приведенных примерах, что требует использования специального дорогостоящего оборудования: больших ступенчатых призм (для временного окна в 1 нс потребуется 200 ступенек)

или применение ступенчатых призм на отражение и соответствующего детектора, спектрометра высокого разрешения и специальных дифракционных решеток для увеличения длительности chirпированного импульса.

В связи с вышеизложенными ограничениями и особенностями реализации схем, существующая методика терагерцовой спектроскопии, основанная на электрооптическом детектировании временной формы ТГц импульса при его многократном зондировании фемтосекундными лазерными импульсами представляется на данный момент оптимальной по совокупности параметров: отношению сигнал-шум и высокому спектральному разрешению, необходимому для детектирования узких линий поглощения в различных газах и химических веществах, а также простоте реализации.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СХЕМА ТЕРАГЕРЦОВОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Экспериментальная схема терагерцовой спектроскопии во временной области представлена на рисунке 2. Она собрана в специальном корпусе, разделенном на 2 части. Правая часть на рисунке является неосушаемой и все расположенные в ней элементы находятся при естественной влажности атмосферы помещения. В левой части корпуса (выделена серым цветом на рисунке) расположен кристалл для преобразования лазерного излучения в терагерцовое, а также газовая кювета, предназначенная для имитации распространения терагерцового излучения в атмосфере с неизвестным химическим веществом. В эту часть корпуса предусмотрена возможность подачи сухого воздуха. Для этого используется поршневой безмасляный компрессор 19 в сочетании с осушителем 20.

С помощью пары заводных зеркал лазерное излучение (длина волны 1240 нм, длительность импульса 80 фс, максимальная энергия импульсов 2 мДж, частота следования импульсов 100 Гц) направлялось в схему ТГц спектроскопии во временной области. С помощью клиновидной пластинки 2 излучение разделялось на два пучка: 4% энергии лазерного импульса (обусловленные Френелевским отражением на границе раздела сред воздух-стекло) направлялось в линию зондирования (красная ось на рисунке 2), а прошедшие 92% – в линию накачки (оранжевая ось). Ирисовые диафрагмы (поз. 1 и 3) являлись юстировочными и были предназначены для совмещения оптических осей лазерного пучка и схемы ТГц спектроскопии. В каждой линии для регулировки энергии лазерных импульсов был установлен поляризационный узел ослабления (поз. 4 и 7), состоящий из полуволновой пластинки и поляризатора (призма Глана-Томсона).

В линии накачки был установлен моторизованный линейный транслятор 5 (PI M 413.32S) с зеркалами, нормали которых перпендикулярны. Длина перемещения транслятора составляла 300 мм, что соответствовало максимальной задержке между терагерцовым и зондирующим лазерными импульсами 2 нс. Минимальный шаг перемещения был равен 5 мкм (таким образом, полный путь луча “туда-обратно” составлял 10 мкм), что соответствовало стробированию с шагом 33.4 фс.

Оптимальное преобразование лазерного излучения в терагерцовое в органическом кристалле ОН1 про-

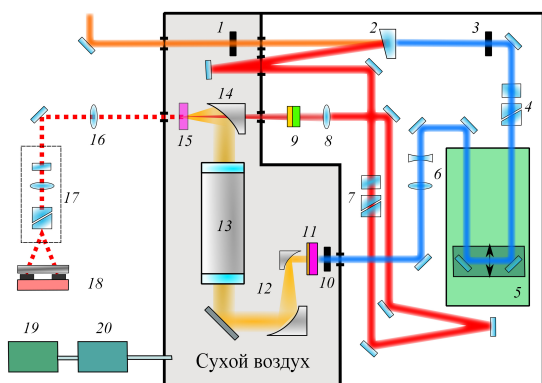


Рисунок 2. Экспериментальная схема терагерцовой спектроскопии во временной области: 1, 3, 10—ирисовые диафрагмы; 2—клиновидная пластинка; 4, 7—поляризационные ослабители; 5—линия задержки; 6—расширяющий телескоп; 8, 16—линзы; 9—кристалл ГВГ; 11—органический кристалл ОН1; 12—зеркальный телескоп; 13—газовая ячейка; 14—параболическое зеркало; 15—электрооптический кристалл GaP; 17—схема электрооптического детектирования; 18—балансные фотодиоды; 19—безмасляный компрессор; 20—осушитель.

исходит при плотности энергии лазерного импульса 3 мДж/см^2 . Для получения нужного значения в линии накачки был собран расширяющий телескоп 6 с коэффициентом увеличения 1:1.5. Для достижения максимальной эффективности преобразования в органическом кристалле необходимо использовать пучок с прямоугольным профилем интенсивности в поперечном сечении (вместо гауссова профиля). Для выполнения этого требования пучок диафрагмировался с помощью ирисовой диафрагмы 10. Выходной диаметр пучка при этом составлял 20 мм и обеспечивал полное заполнение апертуры ТГц кристалла 11. На ТГц кристалле был установлен фильтр, пропускающий только терагерцовый диапазон частот 0.1–10 ТГц. Для уменьшения расходимости ТГц излучения и согласования диаметра пучка со световым диаметром газовой кюветы 13 был собран зеркальный телескоп 12 с коэффициентом увеличения 1:10.

Прошедшее через газовую кювету ТГц излучение фокусировалось с помощью параболического зеркала 14 на электрооптический кристалл, ЭОК (GaP, толщиной 200 мкм). В этом параболоиде имелось сквозное отверстие, ось которого проходила через фокус параболической поверхности. Зондирующее излучение с помощью линзы 8 с фокусным расстоянием 250 мм сквозь указанное отверстие фокусировалось на ЭОК 15. Линза была установлена на линейном механическом трансляторе для обеспечения возможности точного совмещения положения перетяжек ТГц и зондирующего лазерного излучения вдоль оптической оси.

В схеме использовалась балансная методика детектирования на основе кремниевых диодов с размером фоточувствительной площадки 5 мм. Поскольку используемые кремниевые фотодиоды работают в диапа-

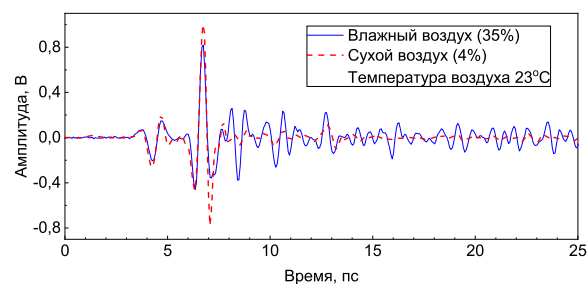


Рисунок 3. Временной профиль электрического поля ТГц импульса, записанного в условиях влажного (35%) и сухого (4%) воздуха. Комнатная температура 23 °C.

зоне длин волн 320–1060 нм, зондирующее излучение на длине волны 1240 нм с помощью кристалла генератора второй гармоники, ГВГ (материал DKDP) 9 преобразовывалось в излучение на длине волны 620 нм. Полосовой интерференционный светофильтр (полоса пропускания 10 нм по полувысоте) на 620 нм, установленный сразу после кристалла, использовался для отсека основной гармоники лазерного излучения.

Прошедшее через ЭОК зондирующее лазерное излучение несло информацию об изменении его поляризации полем ТГц импульса. Регистрация зондирующего импульса происходила в схеме электрооптического детектирования 17, состоящей из четвертьволновой пластинки и призмы Воластона, за пределами корпуса. Детектирование зондирующего импульса осуществлялось с помощью балансных фотодиодов 18.

Метод электрооптического детектирования основывается на эффекте Поッケляса — явлении возникновения двойного лучепреломления в оптических средах при наложении постоянного или переменного электрического поля, в нашем случае, квази-постоянного электрического поля ТГц импульса. Наведенное ТГц импульсом двойное лучепреломление в электрооптической среде (в ЭОК) пропорционально амплитуде электрического поля в определенных диапазонах, что позволяет измерять изменения эффекта двойного лучепреломления путем регистрации изменения поляризации проходящего через электрооптическую среду зондирующего лазерного импульса. Таким образом, регистрируя степень вращения поляризации как функцию задержки между ТГц импульсом и зондирующим лазерным импульсом, можно получить информацию о временном профиле электрического поля ТГц импульса. В качестве примера на рисунке 3 представлены временные профили электрического поля ТГц импульса, записанного в условиях влажного (влажность 35%) и сухого (влажность 4%) воздуха соответственно при температуре 23 °C.

Перед проведением экспериментов осуществлялась калибровка схемы электрооптического детектирования в отсутствие ТГц импульса. Под калибровкой понимается вращение четвертьволновой пластинки с целью компенсации эффекта двойного лучепреломления при прохождении ЭОК: зондирующий лазерный импульс становится эллиптически поляризованным в результате эффекта двойного лучепреломления. В этом случае после прохождения импульсом призмы Воластона на выходе балансных фотодиодов возникнет ненулевой сиг-

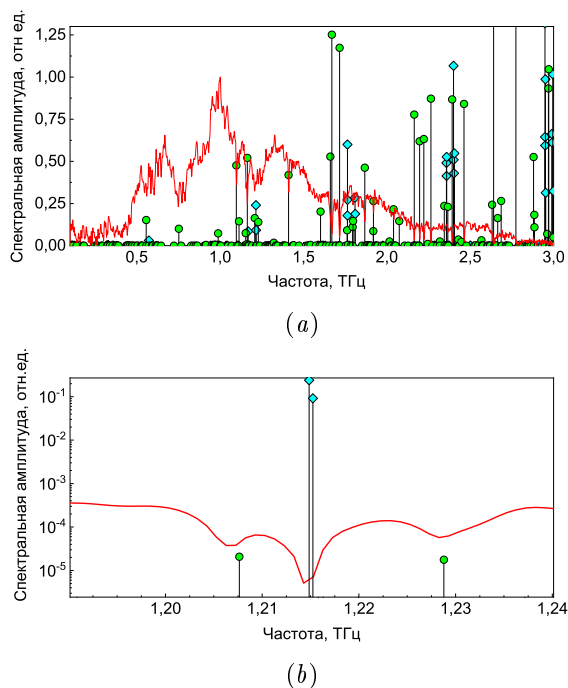


Рисунок 4. Спектр зарегистрированного ТГц импульса с наложенными линиями поглощения среды (а) в диапазоне 0.1–3 ТГц; (б) дуплет аммиака на частоте 1.215 ТГц; $\circ$ — линии поглощения паров воды, $\diamond$ — линии поглощения аммиака.

нал. Балансировка детектирующей схемы с помощью четвертьволновой пластинки осуществлялась таким образом, чтобы разностный сигнал на балансных диодах стал равным нулю. Это означает, что прошедшее через четвертьволновую пластинку излучение зондирующего импульса стало поляризованным по кругу (циркулярная поляризация), т.е. его s- и p-компоненты равны по амплитуде. Регистрация как разностного сигнала, так и отдельных сигналов с фотодиодов осуществлялась с помощью цифрового осциллографа с полосой пропускания 500 МГц.

4. ДЕТЕКТИРОВАНИЕ АММИАКА

В качестве рабочего газа для оценки возможности детектирования газов был выбран аммиак (NH_3). Он коммерчески доступен и имеет отдельные линии поглощения в исследуемом диапазоне 0.1–5 ТГц.

Особенностью работы с газами в реальных условиях является присутствие в атмосфере паров воды. Поэтому актуальной задачей является не просто детектирование аммиака в лабораторных условиях с влажностью, близкой к 0%, а распознавание его линий на фоне линий поглощения воды. На рисунке 4(а) представлены наиболее интенсивные линии поглощения аммиака и воды в спектральном диапазоне 0.1–3 ТГц (область эффективной генерации ТГц источника).

Кривая отображает нормированный спектр излучения ТГц источника, записанный при температуре 23 °С и влажности воздуха 4% (в осушаемой части схемы и газовой кювете). Из рисунка видно, что линии аммиака очень близко расположены к линиям воды, что затрудняет процесс детектирования этого газа при нормальных условиях.

Эксперимент проводился следующим образом. Газовая ячейка откачивалась до давления 1 мм рт.ст. После этого с помощью натекателя в нее подавался газ. Давление аммиака в ячейке составило 53 мм рт.ст., после чего суммарное давление в ячейке было доведено до атмосферного подачей воздуха, содержащего пары воды (влажность 35%, температура 23 °С).

Спектр зарегистрированного сигнала в диапазоне частот 1.19–1.24 ТГц представлен на рисунке 4(б). На данный диапазон приходятся 2 линии воды на частотах 1.208 и 1.229 ТГц, а также дуплет линий аммиака на частоте ≈ 1.215 ТГц (обозначен на рисунке условно двумя линиями). Видно, что дуплет на графике приборно не разрешен; тем не менее, спектральное разрешение экспериментальной схемы позволяет разрешить все три указанных пика и не хуже 5 ГГц. Таким образом, достигнутое спектральное разрешение позволяет решить задачу обнаружения газа в условиях естественной влажности. Дальнейшая идентификация газа/вещества осуществляется сопоставлением частоты зарегистрированного пика поглощения со значением, содержащимся в базах данных, например [12–16].

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ различных схем спектральных измерений в терагерцовой области. За основу экспериментального стенда взята схема терагерцовой спектроскопии во временной области с детектированием методом электрооптического стробирования. В качестве источника терагерцового излучения используется органический кристалл ОН1, осуществляющий преобразование лазерного излучения (длина волны 1240 нм, длительность 80 фс, плотность энергии на кристалле около 3 мДж/см²) в терагерцовое. Источник терагерцового излучения обеспечивает генерацию широкополосного излучения в диапазоне частот от 0.1 ТГц до 5 ТГц с энергией ТГц импульса 10 мкДж длительностью 1–2 пс. Обеспечена возможность моделирования условий реальных помещений (влажность, давление), для чего в его состав включена газовая кювета. Осуществлена калибровка детектирующей схемы стенда, для чего проведены измерения временного профиля терагерцового импульса как во влажном (естественная влажность помещения 35%), так и в сухом (референсный сигнал, влажность 4%) воздухе при температуре 23 °С.

В работе были проведены экспериментальные исследования спектрального состава ТГц излучения, прошедшего через атмосферу детектируемого газа. В качестве рабочего вещества выбраны пары аммиака, линии поглощения которого лежат в терагерцовой области генерации источника излучения.

Достигнутое спектральное разрешение методики составило ~ 5 ГГц. Эксперименты проведены при естественной влажности (нормальные условия: давление 1 атм, влажность 35%, температура 23 °С) в присутствии паров воды, затрудняющих детектирование. Осуществлено успешное обнаружение и распознавание газа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (ГР № АААА-А16-116051810070-4) для ОИВТ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Maagt P, Bolivar P H and Mann C 2005 Terahertz Science, Engineering and Systems-from Space to Earth Applications *Encycl. RF Microw. Eng.* (Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc.) URL <http://doi.wiley.com/10.1002/0471654507.eme518>
2. Гуляев Ю В, Креницкий А П, Бецкий О В, Майбородин А В и Киричук В Ф 2008 *Успехи современной радиоэлектроники* **9** 8–16
3. Woolard D L, Jensen J O, Hwu R J and Shur M S 2007 *Terahertz Science and Technology for Military and Security Applications (Selected Topics in Electronics and Systems vol 46)* (World Scientific)
4. Rothman L *et al* 1998 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **60** 665–710
5. Pickett H, Poynter R, Cohen E, Delitsky M, Pearson J and Müller H 1998 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **60** 883–890
6. De Lucia F 2003 Spectroscopy in the terahertz spectral region *Sens. with Terahertz Radiat.* Springer Series in Optical Sciences ed Mittleman D (Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg) pp 39–169 ISBN 978-3-642-07717-3 URL <http://link.springer.com/10.1007/978-3-540-45601-8>
7. Consolino L, Bartalini S, Beere H E, Ritchie D A, Vitiello M S and De Natale P 2013 *Sensors (Switzerland)* **13** 3331–3340
8. Hsieh Y D D, Nakamura S, Abdelsalam D G, Minamikawa T, Mizutani Y, Yamamoto H, Iwata T, Hindle F and Yasui T 2016 *Sci. Rep.* **6** 28114
9. Su K, Moeller L, Barat R B and Federici J F 2012 *J. Opt. Soc. Am. A* **29** 2360
10. Teo S M, Ofori-Okai B K, Werley C A and Nelson K A 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 051301
11. Царев М В 2011 *Генерация и Регистрация Терагерцового Излучения Ультракороткими Лазерными Импульсами* (Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,)
12. Gordon I E *et al* 2017 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **203** 3–69
13. Cologne database for molecular spectroscopy URL <http://www.ph1.uni-koeln.de/vorhersagen>
14. National institute of standards and technology URL <https://www.nist.gov/pml/molecular-microwave-spectral-databases>
15. Jet propulsion laboratory URL <http://spec.jpl.nasa.gov>
16. Gestion et étude des informations spectroscopiques et atmospheriques URL <http://ara.abct.lmd.polytechnique.fr/index.php?page=geisa-2>