

Многочастотный терагерцевый квантово-каскадный лазер для решения задач атмосферного зондирования и обнаружения малых примесей

В. Н. Аксенов,^{1,а} А. А. Ангелуц,¹ А. В. Балакин,¹ С. В. Иванов,²
И. А. Ожередов,¹ П. М. Солянкин,² А. П. Шкуринов¹

¹ Физический факультет и Международный лазерный центр Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. Россия, 119991, Москва, Ленинские Горы, д. 1.

² Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН — филиал Федерального научно-исследовательского центра «Кристаллография и фотоника» РАН. Россия, 140700, Шатура, ул. Святоозерская.

Поступила в редакцию 03.07.2019, после доработки 28.08.2019, принята к публикации 02.09.2019.

Описан многочастотный источник терагерцевого излучения на основе квантово-каскадных лазеров. Обсуждаются перспективы его применения для исследования атмосферных явлений, создания лидаров и аппаратуры дистанционного зондирования. С помощью описанного терагерцевого источника исследовано влияние ослабления излучения в трех частотных диапазонах при его распространении в атмосфере. Получены оценки влияния ширины спектральной линии источника лазерного излучения на измеренный коэффициент затухания терагерцевого излучения в атмосфере.

Ключевые слова: терагерцевое излучение, квантово-каскадный лазер, дистанционное зондирование, малые примеси в атмосфере.

УДК: 535.8. PACS: 42.68.-w.

ВВЕДЕНИЕ

В качестве источников терагерцевого (ТГц) излучения на практике применяются широкополосные импульсные генераторы с использованием фемтосекундных лазерных систем [1] или узкополосные непрерывные ТГц источники, например различные молекулярные лазеры [2].

При использовании импульсных источников излучения существенным преимуществом систем, построенных на их основе, является возможность регистрации одновременно амплитудного и фазового спектра прошедшего или отраженного ТГц-поля [3]. Однако недостатком этого метода является, как правило, низкая мощность ТГц-излучения, ограниченная единицами микроватт при использовании фотопроводящих излучателей с возбуждением фемтосекундными лазерными источниками. Также необходимо отметить ограниченную частотную ширину ТГц импульса, обычно до 2.5 ТГц, малую скорость сканирования, связанную с необходимостью использования механических линий задержки, а также зависимость от громоздких и дорогостоящих лазерных источников сверхкоротких лазерных импульсов, используемых для генерации и детектирования ТГц излучения.

Альтернативой системам с импульсными источниками являются ТГц установки, использующие узкополосные непрерывные или квазинепрерывные ТГц-источники. Современные ТГц-лазеры с оптической накачкой (в качестве источника накачки обычно используется перестраиваемый CO₂-лазер) — это компактные приборы, работающие в диапазоне до нескольких терагерц, с хорошей стабильностью частоты и выходной мощностью излучения порядка нескольких десятков милливольт. Типичные показатели эффективности для ТГц-лазеров с оптической накачкой составляют от 0.001% до 0.1%. Например, максимальная эффективность лазера на ме-

таноле (лучший результат) не превышает 1% [4]. В последние годы наметился прогресс в развитии ТГц-источников излучения с оптической накачкой, который связан с применением в качестве источника накачки инфракрасного квантово-каскадного лазера, работающего при комнатной температуре [5]. Кроме ТГц-источников с оптической накачкой, также применяются перестраиваемые источники ТГц-излучения на основе генерации разностной частоты с применением параметрических генераторов света (ПГС) [6], лампы обратной волны [7], диоды Ганна [8] и фотосмесители [9]. Преимуществом таких систем является компактность, высокое спектральное разрешение, потенциально более высокая скорость сбора данных. Тем не менее эти источники также, как правило, имеют малую мощность и ограничены по частотам субтерагерцевым диапазоном, кроме источников на базе ПГС.

В последние годы для генерации ТГц-излучения все чаще начинают применяться компактные и достаточно мощные источники с узкой спектральной линией — квантово-каскадные лазеры (ККЛ) [10, 11], в развитии технологии которых наблюдается существенный прогресс. Так, например, продемонстрирована возможность создания ККЛ в широком частотном диапазоне от 1.2 ТГц до 5.2 ТГц [12, 13] со средней мощностью, достигающей нескольких десятков милливольт [14].

Особого упоминания заслуживают ТГц ККЛ, работающие в одночастотном режиме генерации, так как созданные на их основе ТГц-спектрометры позволяют осуществлять спектральный анализ веществ во всех агрегатных состояниях [15]. Для уменьшения ширины линии генерации и получения одночастотного режима работы ККЛ применяются различные методы, среди которых наибольшее распространение получил метод создания распределенной обратной связи (РОС) [16]. Использование РОС в ККЛ позволяет добиться генерации в одночастотном режиме. Ширина линии генерации в ТГц ККЛ с РОС (РОС ККЛ) составляет всего несколько десятков килогерц.

^а E-mail: v.n.ak@yandex.ru

Для перестройки РОС ККЛ по частоте может быть использован, например, внешний резонатор с дифракционной решеткой [17]. При этом диапазон перестройки обычно не превышает $\sim 10\%$ от центральной частоты генерации.

Применение описываемых в данной работе источников терагерцевого излучения может быть в различных направлениях, основанных на том, что атмосфера имеет ряд линий поглощения в ТГц-диапазоне частот [18]. Во-первых, при разработке на основе узкополосных источников ТГц-излучения дистанционных диагностических систем необходимо по-возможности минимизировать влияние поглощения атмосферы при распространении излучения на количественную и качественную оценку получаемого от объекта отраженного сигнала. Во-вторых, применение нового типа источников ТГц-излучения, которые аналогичны описанным в данной статье, может быть вызвано исследованием самих свойств атмосферы, ее дополнительных примесей и загрязнений.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В эксперименте в качестве источника ТГц-излучения был использован созданный многочастотный ТГц ККЛ, состоящий из трех квантово-каскадных структур (LongWave Photonics, LLC). Первая ККЛ структура была рассчитана на генерацию ТГц-излучения вблизи 2 ТГц [19], вторая — вблизи 3 ТГц, третья структура представляла собой РОС ККЛ. На одном чипе такого ККЛ методом фотолитографии было изготовлено 20 структур, обеспечивающих РОС, каждая из которых была рассчитана на свою частоту генерации в диапазоне от 3.65 ТГц до 3.75 ТГц. Переключение между структурами такого ТГц-источника осуществлялось коммутацией питающего напряжения между различными выводами чипов. ККЛ структуры были помещены в вакуумную камеру, обеспечивающую уровень остаточного давления не выше 1 мбар и установлены на холодном пальце криостата замкнутого цикла К535 (RICOR — Cryogenic & Vacuum systems). Температура холодного пальца поддерживалась на уровне 50 К и контролировалась с помощью калиброванного кремниевого диода. Для вывода излучения ККЛ вакуумная камера была оборудована окошком из полипропилена, прозрачным в ТГц-диапазоне.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. С контроллера питания лазера PS на ККЛ

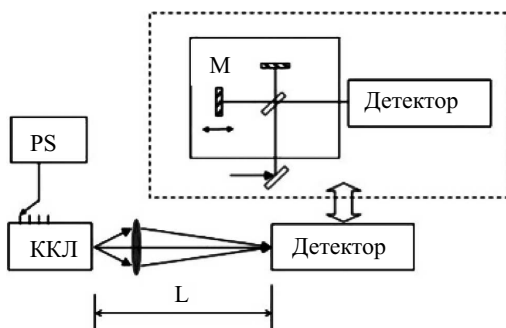


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

подавалось импульсное напряжение. С помощью установленной на выходе ККЛ кремниевой линзы, пространственное положение которой можно было изменять, формировался коллимированный или сфокусированный пучок ТГц-излучения.

В экспериментах по измерению спектров излучения РОС ККЛ коллимированное излучение лазера направлялось на интерферометр, собранный по схеме Майкельсона (вкладка на рис. 1). Длину одного из плеч интерферометра можно было плавно изменять с помощью шагового двигателя. Диапазон перемещения этого плеча определял спектральное разрешение интерферометра. Получаемая интерферограмма регистрировалась измерительной системой, состоящей из детектора и синхронного усилителя, который через АЦП был связан с персональным компьютером, где происходила ее обработка. В качестве детектора в измерениях использовалась акустооптическая ячейка Голея (GC-1P, Tydex), чувствительность которой постоянна во всем интересующем нас диапазоне частот.

В экспериментах по измерению поглощения излучения РОС ККЛ в атмосфере детектор перемещался вдоль оптического рельса длиной 100 см. Регистрировалась амплитуда ТГц-сигнала в зависимости от расстояния (L) от выходного окна вакуумной камеры с РОС ККЛ до апертуры детектора.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью интерферометра было проведено измерение спектральных характеристик используемых в эксперименте ККЛ структур. Ширина полосы генерации ККЛ может быть оценена с точностью до спектрального разрешения интерферометра, которое составляло 0.27 см^{-1} (8.1 ГГц).

Для структуры РОС ККЛ мощность генерации на разных частотах при одних и тех же значениях питающего напряжения существенно отличалась. Это, с одной стороны, объясняется различной эффективностью согласования периодов решетки, обеспечивающей РОС и определяющей частоту генерации, с параметрами полупроводниковой структуры ККЛ, а с другой — различным поглощением атмосферы в диапазоне 3.5–3.8 ТГц, которое существенно возрастает в области меньших частот по сравнению с его значением в окрестности 3.73 ТГц.

Мощность регистрировалась с помощью акустооптической ячейки Голея, установленной после кремниевой линзы (рис. 1) на расстоянии 20 см от выходного окна вакуумной камеры ККЛ. Наибольшая мощность излучения зарегистрирована на частотах 3.72–3.74 ТГц (рис. 2).

Влияние атмосферы на поглощение ТГц-излучения на разных частотах определялось в эксперименте по измерению мощности на различных расстояниях от детектора до вакуумной камеры ККЛ. При переключении между различными РОС ККЛ размер пучка на апертуре детектора контролировался с помощью терагерцевой камеры (IRV-0831, NEC) и при необходимости корректировался с помощью кремниевой линзы на выходе вакуумной камеры (рис. 1). Измерения проводились в лабораторных условиях при температуре 21°C и относительной влажности

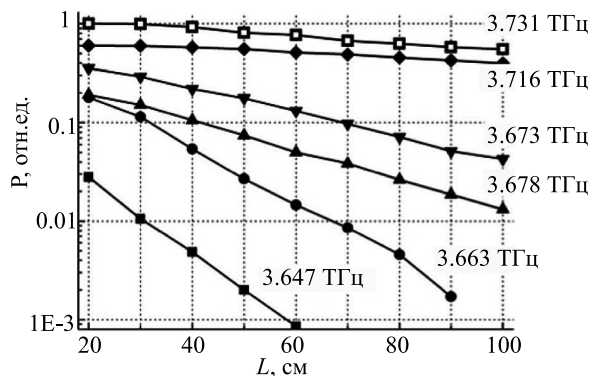


Рис. 2. Зависимость нормированной мощности генерации нескольких излучателей РОС ККЛ от расстояния от детектора до выходного окна вакуумной камеры

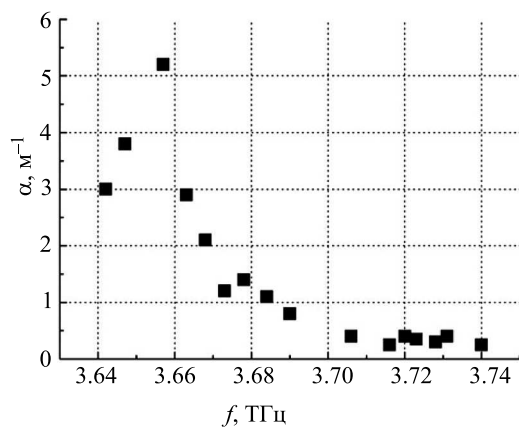


Рис. 3. Измеренный коэффициент поглощения ТГц излучения в атмосфере для частот в диапазоне 3.64–.74 ТГц ($P = 1$ атм, $T = 294.2$ К, $RH = 30\%$)

воздуха $RH = 21\%$, что соответствует относительной концентрации водяного пара $CH_2O = 72587$ ppmV. По полученным данным был определен коэффициент поглощения ТГц излучения атмосферой для различных длин волн генерации РОС ККЛ в диапазоне 3.64–3.74 ТГц. Результаты представлены на рис. 3. Видно, что в диапазоне 3.71–3.74 ТГц поглощение атмосферы минимально.

3. РАСЧЕТ СПЕКТРА ПОГЛОЩЕНИЯ АТМОСФЕРЫ В ТГц ДИАПАЗОНЕ

Предварительный анализ спектра поглощения атмосферы в ТГц-диапазоне [20] свидетельствует о том, что ослабление излучения может достигать в среднем величины 10^5 дБ/км. Разработка систем обнаружения, работающих в ТГц-диапазоне, обычно сопряжена с рядом трудностей. Как уже упоминалось, прежде всего — это сильное поглощение ТГц-излучения атмосферными газами, особенно водяным паром. Частотный диапазон 0.1–1.0 ТГц содержит большое количество индивидуальных линий водяного пара различной интенсивности (а также сильное континуальное поглощение вращательной полосы H_2O), поэтому потери при распространении излучения на частоте 0.8 ТГц составляют 30–40 дБ/км.

3.1. Коэффициент поглощения монохроматического излучения

В рассматриваемом ТГц-диапазоне частот основным поглощающим газом в атмосферном воздухе

является водяной пар H_2O (его континуум и поглощение на электрических дипольных вращательных переходах) и кислород O_2 (магнито-дипольные вращательные переходы). Влиянием же остальных газовых составляющих воздуха можно пренебречь.

Расчет коэффициента поглощения двухкомпонентной газовой смеси ($H_2O + O_2$) на частоте f монохроматического лазерного излучения проводился по стандартной методике *line-by-line* путем суммирования вкладов всех спектральных линий j всех поглощающих газов k :

$$\alpha(f) = \sum_{jk} \alpha_{jk}(f) + \alpha_c(f),$$

$$\alpha_{jk}(f) = S_{jk} \cdot F(f - f_{jk}) \cdot n_k,$$

$$\int_0^\infty F(f - f_{jk}) df = 1.$$

Здесь $\sum_{jk} \alpha_{jk}(f)$ и $\alpha_c(f)$ — спектральная и континуальная (медленно меняющаяся) составляющие поглощения на монохроматической лазерной частоте f ; f_{jk} и S_{jk} — центр и интегральная интенсивность j -й линии поглощения k -го газа концентрации n_k . Нормированная на единицу форма контура спектральной линии $F(f - f_{jk})$ моделировалась функцией Лоренца без учета столкновительно-индуцированного сдвига [18]:

$$F(f - f_{jk}) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma_{jk}}{(f - f_{jk})^2 + \gamma_{jk}^2}.$$

Здесь γ_{jk} — столкновительная полуширина (НWHM — полуширина по полувысоте) линии. Параметры линий f_{jk} , S_{jk} и γ_{jk} брались из спектроскопической базы данных HITRAN-96 [18]. Континуальное поглощение водяного пара моделировалось в рамках модели СКД [21].

Расчеты показали, что в районе микрокон прозрачности $f = 3.7$ –3.77 ТГц и $f = 3.87$ –3.92 ТГц (где поглощение минимально) заметный вклад в поглощение вносит континуум водяного пара. В остальных областях его влияние незначительно.

3.2. Коэффициент пропускания узкополосного немонохроматического излучения. Однородная горизонтальная трасса

Для определения степени монохроматичности лазерного излучения обычно используют следующий критерий: $\gamma_{las,i} \ll \gamma_{jk}$, где $\gamma_{las,i}$ — полуширина лазерной линии i . В случае если лазерные линии не удовлетворяют этому условию, для расчета пропускания в лазерной линии с номером i необходимо провести интегрирование по частоте f с учетом ее спектральной формы $G_{las}(f - f_i)$. Для однородной горизонтальной трассы длиной z пропускание в лазерной линии i имеет вид:

$$T_i = \frac{I_i}{I_{0,i}} = \int_0^\infty G_{las}(f - f_i) \cdot e^{-z \cdot \alpha(f)} df,$$

$$\int_0^\infty G_{las}(f - f_i) df = 1.$$

В настоящих расчетах спектральная форма каждой лазерной линии считалась гауссовой с полушириной $\gamma_{\text{las}} = 5 \text{ ГГц} = 0.167 \text{ см}^{-1}$:

$$G_{\text{las}}(f - f_i) = \frac{1}{\gamma_{\text{las}}} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} e^{-\ln 2 \cdot \left(\frac{f-f_i}{\gamma_{\text{las}}}\right)^2}.$$

При интегрировании по частоте использовалась квадратурная формула Гаусса—Эрмита на сетке из 30 узлов.

3.3. Сравнение с экспериментом

В эксперименте измерялось пропускание $T_i = \frac{I_i}{I_{0,i}}$. Используя монохроматический закон Бугера—Ламберта—Бэра $T(f) = \frac{I}{I_0} = e^{-\alpha(f) \cdot z}$, можно получить коэффициент поглощения $\alpha(f) = -\frac{1}{z} \ln[T(f)]$. Данная процедура корректна только тогда, когда линия лазера монохроматическая. Однако если лазерная линия имеет спектральную форму $G_{\text{las}}(f - f_i)$, то из такой процедуры получается некий «усредненный» или «экспериментальный» коэффициент поглощения:

$$\langle \alpha(f_i) \rangle = -\frac{1}{z} \ln \left[\int_0^\infty G_{\text{las}}(f - f_i) \cdot e^{-z \cdot \alpha(f)} df \right].$$

Этот «усредненный» коэффициент поглощения, во-первых, имеет ограниченный смысл (т.е. он годится только для данной формы линии лазера) и, во-вторых, не обязан совпадать с простым «сглаженным» («SMOOTHED») с помощью формы линии лазера $G_{\text{las}}(f - f_i)$ спектром монохроматического коэффициента поглощения $\alpha(f)$:

$$\alpha(f_i)_{\text{SMOOTHED}} = \int_0^\infty G_{\text{las}}(f - f_i) \alpha(f) df.$$

В микроокнах прозрачности различия между $\langle \alpha(f_i) \rangle$ и $\alpha(f_i)_{\text{SMOOTHED}}$ небольшие, однако в сильных линиях поглощения следует ожидать заметных различий этих величин. Результаты такого сравнения представлены на рис. 4, 5. Для справки на графики этого рисунка нанесены спектры поглощения атмосферного воздуха (кювета длиной 20 см, один проход), полученные с помощью фурье-спектрометра (IFS-66v, Bruker) в ИЯФ СО РАН, спектральное разрешение которого составляло 0.15 см^{-1} .

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из проведенного сравнения хорошо видно, что ширина линии лазера в рассмотренных случаях очень сильно влияет на измеряемое пропускание атмосферы. Сравнение измеренного коэффициента поглощения с данными, полученными с использованием приведенной выше модели, демонстрирует удовлетворительное соответствие, однако при этом полного совпадения не наблюдается.

Наблюдаемое различие в численных значениях может быть связано с несколькими факторами. Во-первых, при проведении измерений поглощения атмосферы на всех линиях генерации используемой РОС ККЛ-структуры температура и влажность в лабораторном помещении, возможно, были неодинаковы. Во-вторых, ширина и форма контура

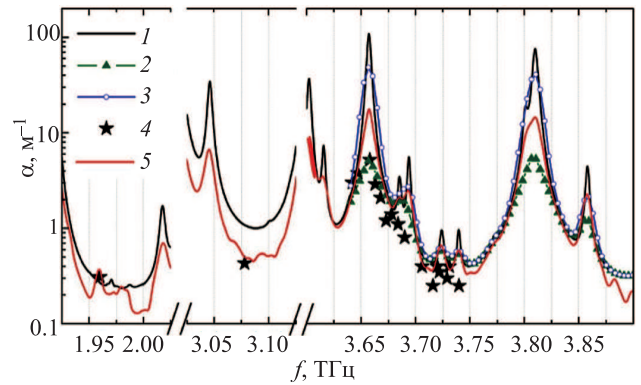


Рис. 4. Коэффициент поглощения атмосферы. Спектры приведены к условиям эксперимента (давление $P = 1 \text{ атм}$, температура $T = 294.2 \text{ К}$, относительная влажность $\text{RH} = 30\%$). 1 — монохроматическое поглощение (линии H_2O + континуум), 2 — расчет для гауссовой линии лазера $\text{HWHM} = 5 \text{ ГГц}$, 3 — сглаженный спектр монохроматического поглощения с использованием гауссова спектрального окна с $\text{HWHM} = 5 \text{ ГГц}$, 4 — экспериментальные данные, полученные с использованием различных ККЛ-структур, 5 — экспериментальные данные, полученные с использованием FTIR-спектрометра

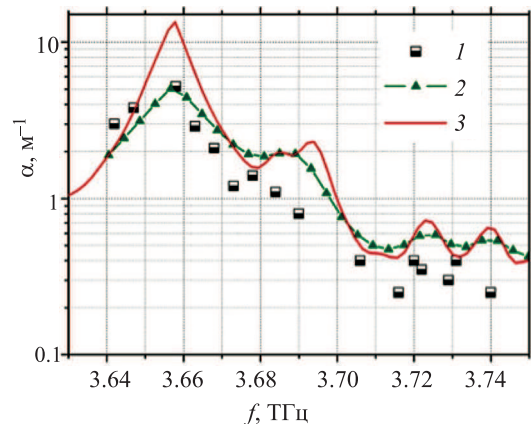


Рис. 5. Коэффициент поглощения атмосферы в районе 3.7 ГГц. 1 — экспериментальные данные, полученные с использованием РОС ККЛ (гауссова форма линии лазера с $\text{HWHM} = 5 \text{ ГГц}$), 2 — расчет для гауссовой линии лазера с $\text{HWHM} = 5 \text{ ГГц}$, 3 — экспериментальные данные, полученные с использованием FTIR-спектрометра

используемых лазерных линий также неодинакова. В экспериментах ширина линии генерации РОС ККЛ была оценена с точностью, определяемой аппаратной функцией интерферометра, которая составляла 8.1 ГГц. Такое невысокое разрешение прибора не позволило определить форму профиля линии генерации лазера. В-третьих, необходимо отметить, что в ККЛ-структурах, особенно в РОС ККЛ, из-за обратного отражения излучения от элементов экспериментальной установки может наблюдаться уширение линии генерации, которое достигает нескольких десятков мегагерц. Такое уширение может быть кратковременным, т.е. изменяться в течение времени измерения коэффициента поглощения на одной линии генерации. Еще один немаловажный фактор, приводящий к сдвигу максимума полосы генерации РОС ККЛ, — это изменение температуры излучателя ККЛ при его работе. Относительно заданной

температуры холодного пальца криостата, которая составляла 50 К, такое изменение может достигать нескольких градусов. Возникающий при этом сдвиг максимума полосы генерации РОС ККЛ мы оцениваем в 200 МГц/К. Наконец, к изменению спектральных характеристик излучения РОС ККЛ может приводить нестабильность источника питания лазера. При этом необходимо принимать во внимание величину 1 ГГц/В.

При построении модели поглощения форма контура спектральных линий H_2O моделировалась функцией Лоренца. При давлении ~ 1 атм это справедливо вблизи центра линии поглощения, но может не выполняться для ее крыла. В расчетах не учитывались столкновительно-индуцированный сдвиг центра линий поглощения, которым можно пренебречь из-за его малости [22, 23], интерференция (line-mixing) перекрывающихся линий поглощения воды [22], а также поглощение димеров воды, которое также пренебрежимо мало из-за малого количества двойных молекул воды в водяном паре при комнатной температуре [24]. Необходимо учитывать, что в расчетах были использованы параметры спектральных линий воды из базы данных HITRAN [18], в которой значения интенсивности и полуширины линий поглощения определены с точностью ~ 10 –20%. Отметим, что в современных — более поздних версиях этой базы точность определения этих параметров существенно не изменилась.

Проведенное исследование влияния влажности атмосферы на распространение ТГц-излучения показало возможность использования многочастотного источника на основе ККЛ для решения задач атмосферного зондирования. При этом представляет интерес использование ТГц-излучения для экспресс-диагностики содержания в атмосфере различных газов или аэрозолей, в первую очередь малых примесей, загрязнений и пр. Основная проблема здесь оказывается связанной с малыми концентрациями указанных веществ, обычно это величины порядка ppb или ppt, и поэтому они трудно обнаруживаемы на фоне основных атмосферных газов. В первую очередь «мешает» водяной пар, у которого линии поглощения можно найти практически во всем ТГц-диапазоне, из-за чего легче поддаются обнаружению газы и вещества, полосы поглощения которых лежат в локальных «окнах прозрачности» пара, например 83 – 86 cm^{-1} , 108 – 111 cm^{-1} , 112 – 117 cm^{-1} .

5. ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГЧАСТОТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИКИ

Можно отметить, что оптические методы диагностики различных примесей уже довольно давно разрабатываются и практически применяются для CH_4 , $HONO$, N_2O_5 , а также продуктов жизнедеятельности, хотя используется для этого излучение ИК-диапазона от хорошо разработанных и относительно дешевых лазеров. Нами проведена оценка поглощающих свойств различных малых примесей в диапазоне длин волн от 83 cm^{-1} до 133 cm^{-1} (2.5 – 4 ТГц), поскольку в этом интервале мощность

излучения ККЛ обычно максимальна. Для оценок использовалась база данных HITRAN, хотя не все потенциально представляющие интерес газы в ней описаны, при этом оценки показателя (коэффициента) поглощения вычислялись, если это не оговорено специально, для парциального давления газа в 10^{-6} атм, что позволяет относительно просто пересчитать это и для других не слишком отличающихся концентраций. В ТГц-диапазоне в районе 83.8 cm^{-1} у ОН (гидроксила) есть сильная линия с коэффициентом поглощения порядка 0.15 cm^{-1} что позволяет надеяться на вполне экспериментально надежно регистрируемое обнаружение примеси уже на базе «излучатель—приемник» в несколько десятков сантиметров. При этом интенсивность поглощения водяного пара (при парциальном давлении в 0.01 атм) на 8 порядков меньше, то есть линия лежит в локальном окне прозрачности пара. Наличие линий сильного поглощения у малых примесей может позволить реализовать относительно простой однопроходный метод зондирования, при этом излучатель и приемник можно разместить стационарно или на дроне [25]. Мобильный носитель особенно хорош для исследования локальных удаленных областей: зон особенного интереса, факелов выброса загрязнений и т.п., при этом компактные размеры перестраиваемого ТГц-спектрометра излучения и его малый вес дают определенные надежды на дальнейшее развитие данного направления дистанционного зондирования. В [25] указано, что, несмотря на определенные ограничения первого прототипа прибора, такой способ доставки прибора до точки наблюдения открывает реальный путь не только к развитию спектроскопического анализа для фундаментальных исследований, но и к развитию прикладных диагностических систем для контроля опасных зон. На рис. 6 приведены графики вычисленного коэффициента пропускания излучения при расстоянии между излучателем и приемником в 1 м и давлении пара в 0.015 атм. Видно, что для гидроксила может представлять интерес еще и линия поглощения в районе 118.4 cm^{-1} , где поглощение водяного пара также на несколько порядков меньше.

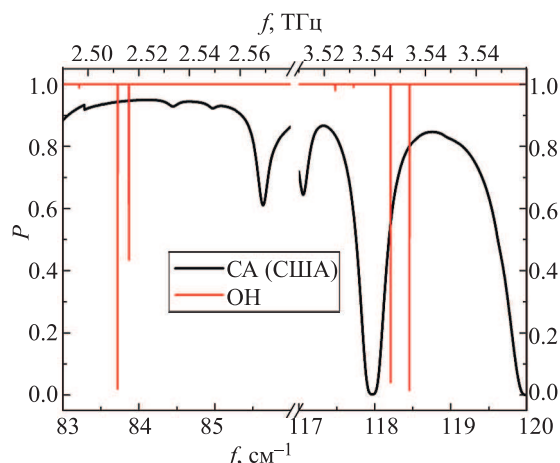


Рис. 6. Расчет коэффициента пропускания излучения в ОН при расстоянии между излучателем и приемником в 1 м и давлении пара в 0.015 атм в сравнении с атмосферой (модель стандартной атмосферы СА (США), среднеширотная зима)

Если коэффициент поглощения невелик, то можно прибегнуть к многопроходной методике измерений, так, например, в работах [26], за счет этого эффективная длина была увеличена до 70 м–1.2 км при длине одного прохода порядка 1 м. Это проще сделать для установок стационарного типа, когда, например, атмосферный («заборный») воздух прокачивается через измерительный объем и содержание примесей можно определять в режиме реального времени. Наконец, можно пойти по пути «накопления» данных, когда коэффициент пропускания измеряется путем интегрирования данных за десятки секунд или минуты. Например, у перекиси водорода H_2O_2 есть выраженные линии поглощения порядка 10^{-3} см^{-1} в районе 113.3 , 113.6 см^{-1} и 94.1 , 94.5 см^{-1} , что, скорее всего, потребует эффективной базы в десяток–другой метров (или «интегрирования»), при этом поглощение водяного пара здесь на 3–5 порядков меньше. Сходная ситуация и с НОВг с линиями поглощения в районе 84.25 см^{-1} , 112.8 см^{-1} и 115.6 см^{-1} , хотя «отстройка» от поглощения пара здесь хуже — 2–3 порядка. На рис. 7 приведены графики коэффициента пропускания этих газов в сравнении с паром. Там же приведены линии поглощения метана NH_3 , которые не слишком сильные при малых концентрациях, но вполне верифицируемы на фоне линий поглощения водяного пара и других газов. Надо при этом не забывать, что с помощью одного и того же перестраиваемого ТГц-лазера можно одновременно решать задачи по обнаружению целого набора газов в различных целях.

Сами по себе сильные поглощающие свойства водяного пара также не являются неразрешимой проблемой. В случае когда линии поглощения интересующих примесей или веществ совпадают с сильными линиями поглощения воды, от них можно попробовать избавиться, если определить вклад водяного пара в ослабление сигнала и вычистить его аппаратно. Для вычисления вклада пара можно либо измерить его содержание независимым методом и вычислить вклад пара, либо измерить его поглощения с по-

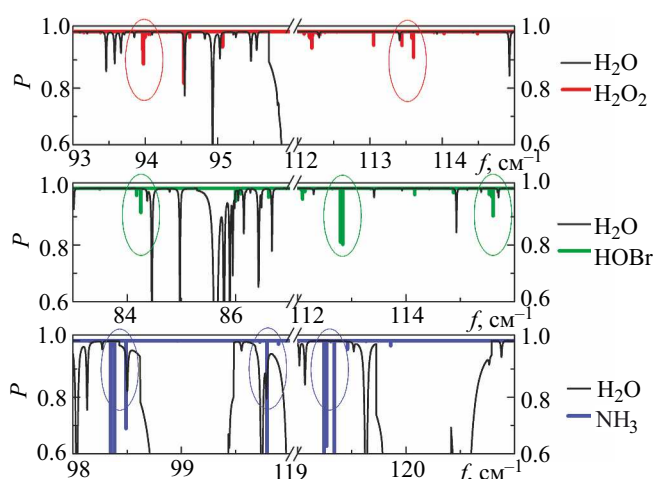


Рис. 7. Расчет коэффициента пропускания излучения в H_2O_2 , НОВг и NH_3 (концентрация ppm) в сравнении с водяным паром ($P = 0.015$ атм). Расстояние между излучателем и приемником 1 м

мощью того же перестраиваемого ККЛ в линиях преобладающего поглощения водяного пара и вычистить его вклад по подходящему для этого случая алгоритму.

Отметим, что приведенные оценки возможности использования ТГц-излучения для определения содержания в атмосфере малых примесей и загрязнений далеко не являются исчерпывающими, поскольку не по всем потенциально интересным газам мы такие оценки сделали, по некоторым не удалось найти данных об их поглощающих свойствах. Доступные оценки показывают, что есть ряд газов, практически не определяемых в ТГц-диапазоне, например ClONO_2 , SF_6 , CF_4 и некоторые другие, но по большинству, по-видимому, есть предмет для рассмотрения их поглощающих свойств в ТГц-диапазоне с целью обнаружения и диагностики содержания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование влияния влажности атмосферы на распространение ТГц-излучения. Сравнение расчетных зависимостей пропускания атмосферы от частоты ТГц-источника продемонстрировало удовлетворительное согласие с измеряемыми величинами. Показано, что при оценке затухания излучения во влажной атмосфере необходимо учитывать спектральную ширину линии лазера. Приведенные оценки уверенно демонстрируют возможность использования многочастотного ТГц ККЛ для атмосферного зондирования и дистанционного определения содержания в атмосфере различных газов или аэрозолей, в первую очередь малых примесей и загрязнений.

Авторы выражают благодарность Ю. А. Митягину и С. А. Савинову за помощь в постановке эксперимента, В. В. Кубареву за предоставленные данные, полученные с помощью фурье-спектрометра в ИЯФ СО РАН, Л. А. Скворцову за важные замечания по сути выполнения работы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 16-29-09593, 16-29-11800) и Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ангелуц А. А., Балакин А. В., Бородин А. В. и др. // Вестник РФФИ. 2014. **83**. С. 21.
2. Weiss C. O., Fourrier M., Gstaad C. et al. // Reviews of Infrared and Millimeter Waves: Optically Pumped Far-Infrared Lasers. V. 2. New York: Plenum Press. 1984.
3. Nazarov M. M., Cherkasova O. P., Shkurinov A. P. // Quantum Electronics. 2016. **4**. P. 488.
4. Вакс В. Л., Набиев Ш. Ш., Собакинская Е. А. и др. // Террагерцевая спектроскопия как метод обнаружения и идентификации взрывчатых веществ: подходы, возможности и перспективы // Препринт ИАЭ-6566/12. Москва, 2009.
5. Pagies A., Ducournau G., Lampin J.-F. // APL Photonics. 2016. **1**. 031302.
6. Watanabe Y., Kawase K., Ikari T. et al. // Applied Physics Letters. 2003. **83**. P. 800.
7. Dobroiu A., Yamashita M., Ohshima Y. N. et al. // Applied Optics. 2004. **43**. P. 5637.

8. *L'offler T., May T., Weg C. et al. // Appl. Phys. Lett.* 2007. **90**. 091111.
9. *Gregory I. S., Tribe W. R., Baker C. et al. // Appl. Phys. Lett.* 2005. **86**. 204104.
10. *Kohler R., Tredicucci A., Beltram F. et al. // Nature.* 2002. **417**. P. 156.
11. *Williams B. S. // Nature Photonics.* 2007. **1**. P. 517.
12. *Scalari G., Walther C., Fischer M. et al. // Laser Photonics Review.* 2008. **345**. P. 66.
13. *Chan C. W. I., Hu Q. Reno J. L. // Appl. Phys. Lett.* 2012. **101**. 151108.
14. *Wang X., Shen C., Jiang T. et al. // AIP Advances.* 2016. **6**. 075210.
15. *Khalatpour A., L. Reno J., P. Kherani N. et al. // Nature Photonics.* 2017. **11**. P. 555.
16. *Kao T.-Y., Cai X., Lee A. W. M. et al. // Optics Express.* 2015. **23**. P. 17091.
17. *Lee A., Williams B., Kumar S. et al. // Optics Letters.* 2010. **35**. P. 910.
18. *Rothman L. S., Rinsland C. P., Goldman A. et al. // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer.* 1998. **60**. P. 665.
19. *Orlova E. E., Solyankin P. M., Angeluts A. A. et al. // Laser Phys. Lett.* 2017. **14**. 045001.
20. *Beck R., English W., Gürs K.* Table of Laser Lines in Gases and Vapours. 3-d Revised and Enlarged Edition. Berlin-Heidelberg-New York: Springer. 1980.
21. *Clough S. A., Kneizys F. X., Davies R. W. // Atmospheric research.* 1989. **23**. P. 229.
22. *Hartmann J.M, Boulet C., Robert D.* Collisional effects on molecular spectra: laboratory experiments and models, consequences for applications. Amsterdam: Elsevier Science; 2008.
23. *Зув В. Е.* Распространение лазерного излучения в атмосфере. М.: Радио и связь, 1981.
24. *Третьяков М. Ю., Кошелев М. А., Серов Е. А. и др. // УФН.* 2014. **184**. С. 1199.
25. *Demers J. R., Garet F., Coutaz J. L. // IEEE Sensors Lett.* 2017. **1**. P. 1.
26. *Hindle F., Cuisset A., Bocquet R. et al. // C. R. Physique.* 2008. **9**. P. 262.

Multi-Frequency Terahertz Quantum-Cascade Laser for Atmospheric Probing and Revelin of Small Impurities

V. N. Aksenov^{1,a}, A. A. Angeluts¹, A. V. Balakin¹, S. V. Ivanov², I. A. Ozheredov¹, P. M. Solyankin², A. P. Shkurinov¹

¹*Physics Department and International Laser Center, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

²*Institute on Laser and Information Technologies — Branch of the Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics» RAS. Shatura 140700, Russia.*
E-mail: ^a*v.n.ak@yandex.ru.*

A multi-frequency terahertz radiation source based on quantum-cascade lasers is described. The prospects of its application for the study of atmospheric phenomena and the creation of lidars and remote sensing equipment are discussed. The influence of radiation attenuation in the atmosphere for three frequency ranges was studied using the proposed terahertz source. Estimates of the influence of the laser spectral line width on terahertz radiation attenuation coefficient measurements in the atmosphere were obtained.

Keywords: terahertz radiation, quantum-cascade laser, remote sensing, small impurities in the atmosphere.

PACS: 42.68.-w.

Received 03 July 2019.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2019. **74**, No. 6. Pp. 631–638.

Сведения об авторах

1. Аксенов Владимир Николаевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: v.n.ak@yandex.ru.
2. Ангелуц Андрей Александрович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; e-mail: angeluts@physics.msu.ru.
3. Балакин Алексей Вячеславович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: a.v.balakin@physics.msu.ru.
4. Иванов Сергей Викторович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; e-mail: serg.ivanov.home@mail.ru.
5. Ожередов Илья Александрович — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; e-mail: ozheredov@physics.msu.ru.
6. Солянкин Петр Михайлович — науч. сотрудник; e-mail: soluankp@yandex.ru.
7. Шкуринов Александр Павлович — доктор физ.-мат. наук, профессор; e-mail: ashkurinov@physics.msu.ru.