

Новое поколение газоаналитических систем на основе диодных лазеров

Я. Я. Понуровский, к. ф.-м. н., ИОФ им. А. М. Прохорова РАН, Москва
Ponur1960@yandex.ru

УДК 543.4

Рассмотрены тенденции развития диодной лазерной спектроскопии (ДЛС) в области аналитической химии и газоанализа. Приведены результаты работ Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН по созданию семейства газоанализаторов на основе диодных лазеров (ДЛ) применительно к задачам экологии, медицины и контроля технологических процессов. Описаны уникальные разработки последних лет: семейство ДЛ-газоанализаторов для контроля примесей в процессе получения высокочистых летучих гидридов, многокомпонентные ДЛ-газоанализаторы для медицинской диагностики выдыхаемого воздуха, программно-аппаратный ДЛ-комплекс для самолета-лаборатории Росгидромета для измерения высотных профилей концентраций парниковых газов, беспилотный дистанционный лазерный газоанализатор метана и т. д. Намечены перспективы дальнейшего развития и расширения области аналитического применения технологий на основе ДЛ.

ВВЕДЕНИЕ

Современная аналитическая химия широко использует новые физико-химические и физические методы исследования. Сегодня диодная лазерная спектроскопия (ДЛС) – динамично развивающаяся область лазерной физики применительно к задачам аналитической химии и газоанализа. Прогресс в технологии изготовления диодных лазеров (ДЛ) в ближнем и среднем ИК-диапазонах и развитие методов высокочувствительной ИК-спектрометрии поглощения привел к созданию нового поколения газоаналитических систем на основе ДЛ. Отдел ДЛС Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН более 30 лет проводит исследования области ДЛС, разрабатывает приборы на основе ДЛ, предназначенные для решения широкого круга аналитических и диагностических задач экологии, медицины, контроля технологических процессов и т. д. Проверку качества самые передовые и уникальные достижения и разработки на основе ДЛ проходят на всероссийских и международных семинарах, конференциях и симпозиумах по ДЛС.

ПРИНЦИП РАБОТЫ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА НА ОСНОВЕ ДИОДНОГО ЛАЗЕРА

В ДЛ все необходимые компоненты лазера – активный элемент, накачка, резонатор – находятся в одном миниатюрном полупроводниковом чипе. По сравнению с другими типами лазеров эффективность генерации на полупроводниковом

активном элементе максимальна, и при оптимизированной инжекционной накачке КПД ДЛ достигает 70%. Во встроенном резонаторе ДЛ отсутствуют типичные для других лазеров технические шумы и достигается фундаментальный предел чувствительности, обусловленный квантовыми шумами излучения. Перечисленные преимущества делают ДЛ уникальным инструментом для спектроскопических исследований и газоанализа.

Современные типы ДЛ перекрывают огромный спектральный диапазон от ближней УФ до ТГц-области, где располагаются полосы поглощения различных молекул. Это позволяет проводить их детектирование на единой аппаратной и методической основе. Практически все молекулы имеют ИК-полосы поглощения в ближнем ИК-диапазоне в интервале 1–2 мкм. Расположенные в этой спектральной области обертона и составные частоты являются характеристическими для связей C–H, C–C, N–H, O–H и т. д. Здесь же работают выпускаемые промышленностью ДЛ. На рис. 1^{*} представлены спектры поглощения наиболее известных молекул в ближней ИК-области. Кружки над спектрами показывают ДЛ, имею-

* Надеждинский А. И., Понуровский Я. Я. Работы по аналитическому использованию диодной лазерной спектроскопии в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН // ЖАХ РАН. 2017. Т. 72. № 1. С. 84–89.

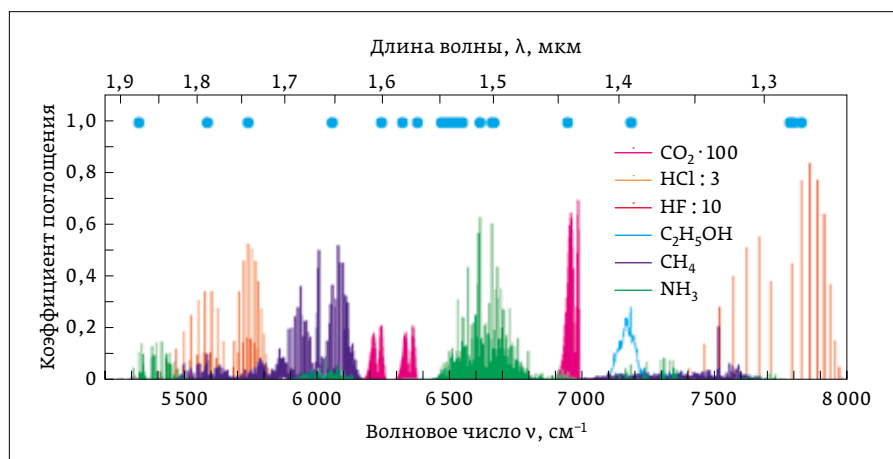


Рис. 1. Спектры поглощения наиболее известных молекул в ближней ИК-области

щиеся в отделе ДЛС ИОФ РАН. Наиболее известные фирмы, выпускающие ДЛ для спектроскопических приложений: Laser Components (Германия) [1], Eblana Photonics (Ирландия) [2], Ntt Electronics (Япония) [3]. Выпускаемые в этом спектральном диапазоне ДЛ работают при комнатных температурах, срок службы более 50 тыс. ч, вывод излучения может происходить как обычным способом, так и с помощью стекловолокон. ДЛ сочетают в себе высокую спектральную яркость при небольшой излучательной мощности (до 50 мВт), что важно на практике, поскольку ближний ИК-диапазон излучения при небольших мощностях безопасен для глаз.

Для регистрации молекулярного поглощения методом ДЛС необходимы два основных оптоэлектронных компонента – источник излучения (ДЛ) и фотоприемник.

В современных фотоприемных устройствах ближнего ИК-диапазона используются InGaAs пин-фотодиоды. При площади активной площадки 0,5–2,0 мм² величина удельной обнаружительной способности D^* у этих устройств не менее $2 \cdot 10^{12}$ см² · Гц^{1/2} · Вт⁻¹.

На рис. 2 на примере молекулы HF (линия R1, полоса $\nu = 7823,8212$ см⁻¹) показан принцип работы спектрометра на основе ДЛ. На левом фрагменте представлены регистрируемый фотоприемником сигнал после прохождения излучения через среду: W_0 – без поглощения и W – при наличии поглощения. Форма сигнала повторяет трапецевидный импульс тока накачки ДЛ. Длина импульса варьируется в пределах 1–10 мс, частота повторения ~50 Гц. Величина тока накачки небольшая и не превышает 50 мА. За это время ДЛ успевает перестроиться на величину, в десятки раз превышающую ширину линии поглощения регистрируемой

молекулы, что в величинах волновых чисел соответствует 1,5–5 см⁻¹. Перестройка ДЛ на рис. 2 оптимизирована на две ширины линии поглощения HF. Правый рисунок – спектр поглощения молекулы, полученный на основании закона Бугера-Ламберта. Он несет информацию о параметрах спектральной линии поглощения (центр линии, ширина, интенсивность), а также о концентрации исследуемого газа. В примере использовалась кювета оптической длины 7 см, полное давление смеси HF с воздухом – 1 Бар. Измеренное парциальное давление HF – 8,3 мБар.

ПРИМЕНЕНИЯ ДЛС В АНАЛИТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ И ГАЗОАНАЛИЗЕ

Преимущества ДЛС в газоанализе молекулярных объектов – это высокая точность измерений в сочетании с быстроедействием. ДЛ-газоанализаторы с волоконным выводом излучения очень компактны, имеют автономное питание и могут встраиваться в любые системы газоанализа (ректификационные колонны, центрифуги для изотопселекции и т. д.), устанавливаться на мобильные платформы: автомобиль, вертолет, беспилотные летательные платформы, и т. д. Ниже представлены ДЛ-газоанализаторы, созданные в отделе ДЛС ИОФ РАН за последние 7 лет [4].

Государственный стандарт газовых смесей

Разработан и внедрен в эксплуатацию ДЛ-газоанализатор, предназначенный для высокоточного измерения состава образцовых газовых смесей CO₂ : N₂. На этом приборе продемонстрирована возможность измерения состава газовых смесей с абсолютной точностью не хуже 0,3%. С техниче-

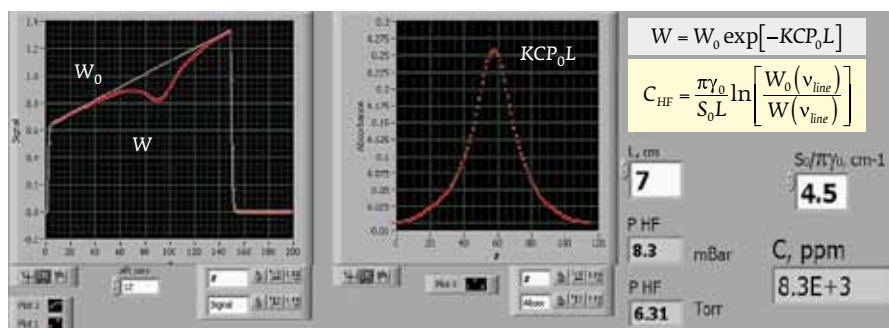


Рис. 2. Принцип работы ДЛС на примере молекулы HF. Линия R1, полоса $\nu = 7823,8212$ см⁻¹. K – коэффициент поглощения, C – концентрация молекул, P_0 – полное давление смеси, ν_{line} – центр спектральной линии поглощения, g_0 – коэффициент уширения линии в воздухе, S_0 – интенсивность линии поглощения

скими характеристиками и результатами применения газоанализатора можно ознакомиться в работе [5].

Измерение изотопического состава UF_6 (для МАГАТЭ)

Портативный прибор с квантово-каскадным (QCL) ДЛ ($\lambda = 7,75$ мкм), предназначенный для измерения изотопического состава UF_6 , создан в рамках деятельности рабочей группы МАГАТЭ по внедрению методов ДЛС в системы контроля МАГАТЭ. Методика определения изотопного состава $^{235}U/^{238}U$ основана на измерении изотопического сдвига между спектрами поглощения Q-ветвей полос гексафторида урана $^{235}UF_6$ и $^{238}UF_6$, который равен $0,59$ см $^{-1}$. Декларируемая в приборе относительная точность измерения изотопного сдвига $^{235}UF_6/^{238}UF_6$ на уровне $0,0002$ см $^{-1}$ обеспечивает точность определения изотопного состава $^{235}U/^{238}U$ на уровне $0,3\%$ в диапазоне обогащения ^{235}U от $0,27$ до 20% . Время измерения не более 1 с. Прибор прошел апробацию в лабораториях ИМФ РНЦ «Курчатовский институт», МАГАТЭ (Сайсбердорф, Австрия) [6]. На рис. 3 представлен прототип прибора для измерения изотопического состава UF_6 .

Скрининговая ДЛС-диагностика заболеваний по выдыхаемому воздуху

Идея скрининговой ДЛС-диагностики состоит в следующем. В человеческом организме происходят сложные биохимические процессы, которые приводят к появлению в крови следовых количеств ряда молекул. Для здорового организма содержание этих молекул фиксировано, а при заболевании их концентрация сдвигается от равновесного значения. Как увеличение, так и уменьшение концентрации этих молекул являются сигналом возникновения заболевания. Основные выдыхаемые биомаркеры и связанные с ними патологии [7]:

- H_2O – водяной пар, метаболизированная вода;
- NH_3 – аммиак отражает состояние азотистого обмена в организме;

- $^{12}CO_2$ – двуокись углерода, основной биомаркер выдыхаемого воздуха (ВВ), характеризует степень функционирования альвеол легких;
- $^{13}CO_2$ – двуокись углерода, содержащая «тяжелую» фракцию углерода, образуется в основном в желудочно-кишечном тракте (ЖКТ) и ассоциирована с деятельностью бактерии *Helicobacter pylori*;
- CH_4 – метан образуется в организме человека (кишечник, корни зубов в полости рта) путем «метанового брожения» при разложении органических веществ. В выдыхаемом воздухе содержание метана зависит от характера питания и наличия патологии ЖКТ;
- H_2S – присутствие сероводорода в ВВ свидетельствует о гнилостных процессах в полости рта, респираторных путях или ЖКТ.

Разработаны два типа ДЛ-спектроанализаторов для скрининговой диагностики:

- а) выделяемых газовых компонент NH_3 и H_2O , содержащихся в испарениях пота с поверхности кожи ладоней;
- б) выдыхаемого воздуха по биомаркерам: $^{12}CO_2$, $^{13}CO_2$, CH_4 , H_2S , NH_3 и H_2O .

В первом варианте прибор измеряет потоки аммиака и паров воды с ладони пациента, проводит нормировку и калибровку измеренной концентрации с эталонной базой данных «нормы». Для этих целей используются два диодных лазера с волоконным выводом излучения, генерирующих на длинах волн $1,39$ и $1,51$ мкм, и многоходовая кювета С. М. Чернина с полной длиной оптического пути 39 м.

ДЛ-спектроанализатор для скрининговой диагностики выдыхаемого воздуха по биомаркерам $^{12}CO_2$, $^{13}CO_2$, CH_4 , H_2S , NH_3 и H_2O – это трехканальный спектроанализатор, который определяет концентрации биомаркеров на длинах волн излучения ДЛ $1,60$, $1,51$ и $1,65$ мкм. Газовые компоненты определяются одновременно, время измерения пробы ВВ не более 20 с; для увеличения точности определения концентраций используют многопроходную оптическую кювету Эррио с базой 30 см и полной длиной оптического пути 26 м (рис. 4). Программа управления газоанализаторами написана на базе языка графического программирования LabView 12.0 и драйверов National Instruments (www.ni.com).



Рис. 3. Прототип прибора для измерения изотопического состава UF_6



Рис. 4. ДЛС для диагностики выдыхаемого воздуха по биомаркерам: $^{12}CO_2$, $^{13}CO_2$, CH_4 , H_2S , NH_3 и H_2O

Совместно с РГМУ им. Н. И. Пирогова и ГKB №12 им. В. М. Буянова проводились клинко-физиологические испытания разработанных приборов с целью определения границ «нормы» и нахождения корреляций между отклонениями от «нормы» и наличием тех или иных заболеваний. С полученными результатами можно ознакомиться в работах [8, 9]. На диаграмме (см. рис. 5) в качестве примера приведено сравнение измеренной концентрации аммиака в выдыхаемом воздухе у людей относительно здоровых и с язвенной болезнью в фазе ремиссии и обострения.

ДЛ-газоанализаторы для определения примесей CH_4 , C_2H_4 , H_2O , NH_3 , H_2S и CO_2 в процессе получения высокочистых гидридов

Высокочистые гидриды: NH_3 , PH_3 , AsH_3 , SiH_4 , GeH_4 являются важными компонентами в электронной и оптоэлектронной промышленности, концентрация которых в конечном продукте не должна превышать десятки ppb (одна миллиардная доля). С важной задачей контроля примесей в процессе ректификационной очистки гидридов в режиме реального времени успешно справляется технология газоанализа на основе диодных лазеров. В настоящий момент для ФГУП «НПП «Салют» в Нижнем Новгороде создана, апробирована и эксплуатируется линейка приборов (более 12 шт.)

на базе ДЛ с волоконным выводом излучения для непрерывного мониторинга примесей H_2O , CO_2 , CH_4 , NH_3 и др. Газоанализаторы встраиваются непосредственно в ректификационные колонны, что позволяет проводить непрерывный контроль примесей в процессе очистки гидридов [10] онлайн и оптимизировать время очистки. Длительность очистки зависит от физико-химических свойств гидридов и составляет более 10 ч. В табл. 1 приведен перечень измеряемых примесей методами ДЛС.

Диодный лазерный спектрометр самолетного базирования для измерения высотных профилей концентраций парниковых газов

В рамках проекта создания самолета-лаборатории для Росгидромета разработан ДЛС-комплекс самолетного базирования для измерения высотных профилей концентраций парниковых газов: изотопомеров паров воды (H_2^{16}O , H_2^{18}O , HDO , H_2^{17}O), CO_2 , CH_4 [11]. Комплекс измеряет концентрации в стационарном полете, а также во время резкого снижения или подъема для определения высотных профилей концентраций. Исходя из этих требований, скорость измерения концентраций должна быть высокой (более 10 измерений за 1 с), а абсолютная погрешность не должна превышать 1%.

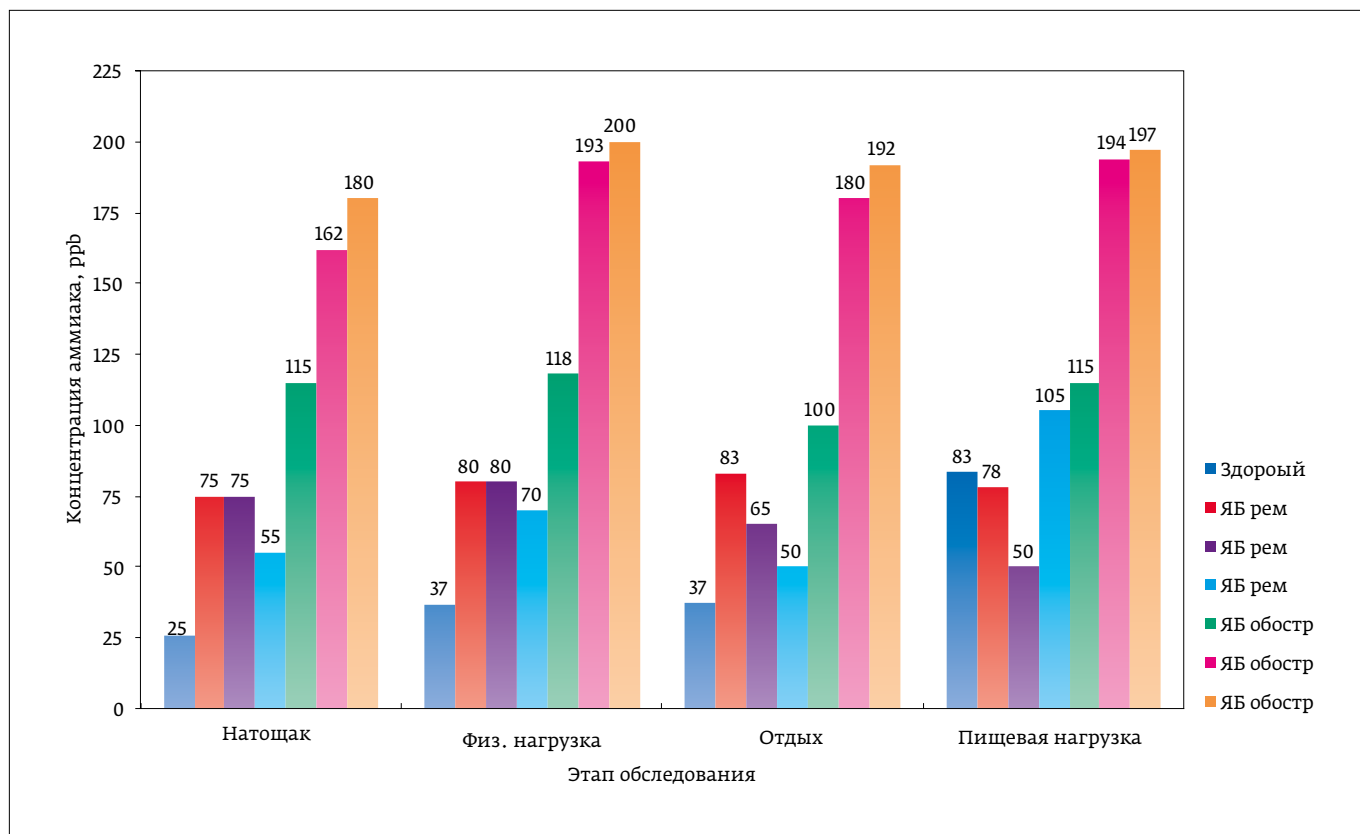


Рис. 5. Сравнение измеренной концентрации аммиака в выдыхаемом воздухе у людей относительно здоровых и с язвенной болезнью в фазе ремиссии и обострения

Таблица 1. Примеси, измеряемые с помощью ДЛ-газоанализаторов

Примесь	Длина волны регистрации, нм	Гидриды	Чувствительность, % объемные
H ₂ O	1391	NH ₃ , PH ₃	1·10 ⁻⁴
NH ₃	1512	AsH ₃	5·10 ⁻⁵
C ₂ H ₄	1635	SiH ₄	2·10 ⁻⁴
CH ₄	1651	SiH ₄	4·10 ⁻⁵
CO ₂	2004	PH ₃ , SiH ₄ , AsH ₃	1·10 ⁻⁴
H ₂ S	1601	AsH ₃	1·10 ⁻³
C ₂ H ₂	1531	PH ₃ , SiH ₄	1·10 ⁻⁴

На рис. 6 представлены фото ДЛС-модуля для измерения парниковых газов в составе самолета-лаборатории. Полученные результаты измерения вертикальных профилей концентраций метана, углекислого газа в арктической зоне России уникальны [12]. На рис. 6 (справа) показаны данные мониторинга высотных профилей концентрации углекислого газа и метана в октябре 2015 года в районе полуострова Новая Земля.

Абсорбционный спектрометр на основе ДЛ для измерения двумерной карты распределения температуры и концентрации паров воды

Задача измерения температуры в нестационарных сверхзвуковых газовых потоках актуальна для создания высокоэффективных двигателей в самолетостроении и космонавтики. Совместно с коллегами из Института спектроскопии РАН разработаны на базе ДЛ ближнего ИК-диапазона двухканальные сверхскоростные спектроанализаторы для

измерения концентрации паров воды, температуры и давления в зонах горения смешивающихся сверхзвуковых потоков топлива и окислителя. Конструкция прибора позволяет значительно снизить влияние поглощения паров воды на трассе зондирующего лазерного луча вне камеры сгорания. Разработаны оптическая схема для «сшивания» результатов измерения в разных пусках процесса горения смеси, а также новый алгоритм получения информации о температуре смеси путем построения функций корреляции экспериментального спектра со спектрами, смоделированными на основе спектральных баз данных. Впервые получена двумерная карта распределения температуры в тестовой камере в условиях плазменно-индуцированного горения смеси этилена и воздуха [13].

Волоконно-оптический детектор метана на основе диодного лазера

Контроль концентрации метана в промышленно-опасных зонах – чрезвычайно важная задача в угольной, нефтяной и газовой отраслях. Минимальная взрывоопасная концентрация CH₄ в воздухе составляет не более 5%. Требования к датчикам метана очень жесткие: отсутствие электрических контактов, дистанционное управление и контроль, высокая чувствительность при широком диапазоне температур (от -40 до 50 °С), высокой влажности и запыленности. Совместно с предприятиями группы компаний ОАО «АК «Транснефть» разработан газоанализатор для детектирования метана методом абсорбцион-

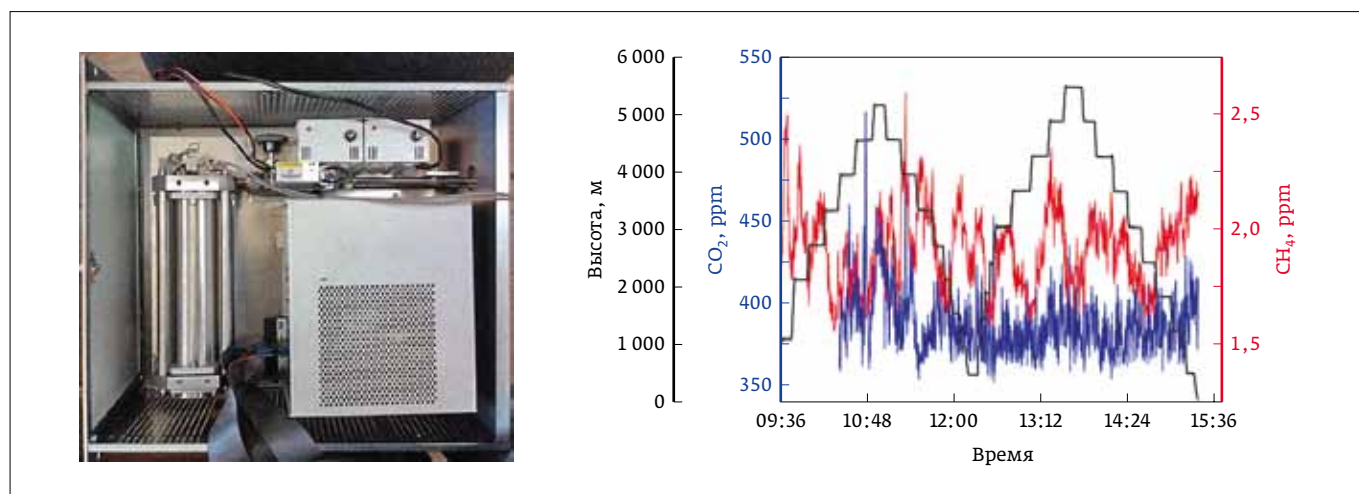


Рис. 6. Слева – ДЛС-модуль для измерения парниковых газов в составе самолета-лаборатории Росгидромета, справа – высотные профили концентрации углекислого газа и метана в районе полуострова Малая Земля, октябрь 2015 года

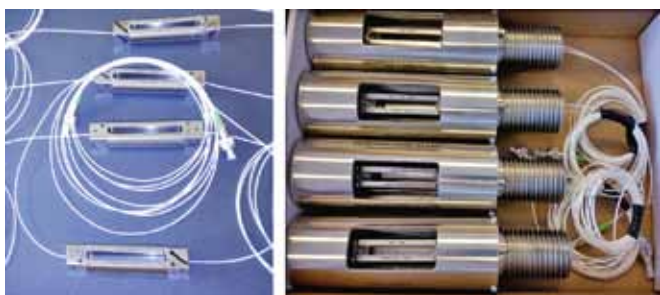


Рис. 7. Оптические кюветы с волоконным вводом и выводом для детектора метана на основе ДЛ

ной спектроскопии с использованием диодного лазера ближнего ИК-диапазона и выносного датчика – однопроходной оптической кюветы длины 50 мм с волоконным входом и выходом излучения удаленностью более 50 км [14]. На рис. 7 показан основной элемент детектора – оптические кюветы с волоконным вводом и выводом, специально изготовленные для этих целей. Фотография справа – кюветы в пылевлагозащищенном корпусе. Прибор сертифицирован и прошел успешные испытания на газопроводе.

Беспилотный летательный комплекс для обнаружения утечек метана на газопроводах

Очевидна актуальность проблемы оперативного мониторинга утечек метана на предприятиях газодобычи и транспортировки природного газа. Общая протяженность Единой газопроводной системы России превышает 170 тыс. км. При средней продолжительности жизни газопровода 30 лет более 40 тыс. км линий в настоящий момент превысило срок службы и требует замены или ремонта. Один из методов решения этой проблемы состоит в оперативном контроле утечек с использованием беспилотных летательных аппаратов (БЛА), оснащенных трассовыми измерителями метана на основе диодных лазеров. ИОФ РАН совместно с ООО «Инованте» (Екатеринбург) разрабатывает уникальный трассовый детектор утечек метана на основе ДЛ и рамановского волоконного усилителя на длине волны 1,65 мкм. На рис. 8 представлена схемная реализация трассового детектора метана с использованием БЛА.

Достигнутые на сегодняшний день характеристики детектора: мощность излучателя ~400 мВт, дальность зондирования более 100 м, чувствительность 100 ppm/м при скорости летательного аппарата ~100 км/ч. Прототип прибора проходит лабораторные тестовые испытания [15].

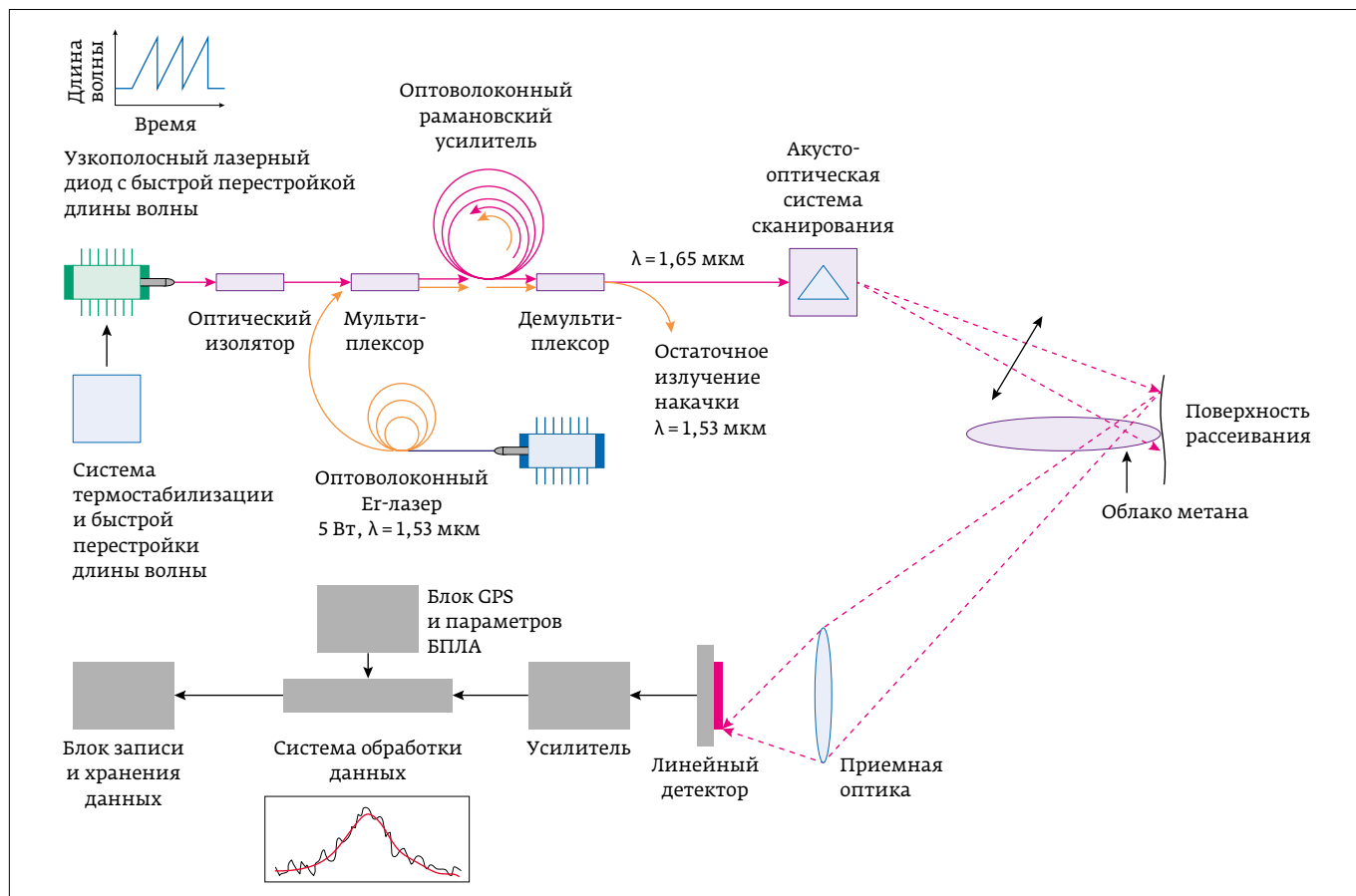


Рис. 8. Схемная реализация трассового детектора метана с использованием БЛА

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены тенденции развития диодной лазерной спектроскопии в области аналитической химии и газоанализа. Дано описание перспективных разработок, созданных в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН на базе диодных лазеров ближнего и среднего ИК-диапазонов. Развитие технологии изготовления ДЛ, несомненно, будет расширять область их аналитических применений. Прежде всего это создание генерирующих при комнатных температурах квантовокаскадных лазеров среднего и дальнего ИК-диапазонов и неохлаждаемых приемников излучения в этих спектральных областях.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. <http://www.lasercomponents.com/> (дата обращения 12.04.2017).
2. <http://www.eblanaphotonics.com/> (дата обращения 01.03.2017).
3. <http://www.ntt-electronics.com> (дата обращения 20.05.2017).
4. **Ponurovskiy I.** The development of tunable diode laser spectroscopy in gas analysis and high resolution spectroscopy / Invited ICONO/LAD2016. Minsk, Belarus. 26–30. September.
5. **Konopelko L., Nadezhdinskii A., Popov I., Ponurovskiy I., Shapovalov Yu., Stavrovskii D., Vyazov I.** TDLS system to measure CO₂:N₂ gas mixtures with 0.12% accuracy / Abstracts of Papers, 8th International Conference on Tunable Diode Laser Spectroscopy. July 11–15. 2011. Zermatt. Switzerland. p. 26.
6. **Nadezhdinskii A., Ponurovskii Ya., Kadner S.** Gaseous uranium hexafluoride isotope measurement by diode laser spectroscopy. Patent US7535006 B2. Application number US10/457,646. Filing date 09.06.2003. Publication date 19.05.2009.
7. **Pleil J. D., Stiegel M. A., and Risby T. H.** Clinical breath analysis: discriminating between human endogenous compounds and exogenous (environmental) chemical confounders // Journal of Breath Research. 2013. vol. 7. no. 1. Article ID017107.
8. **Karabinenko A. A., Bogomolova A. A., Nadezhdinskii A. I., Ponurovskiy Ya. Ya., Zaslavskiy V. Ya., Shastun S. A.** Qualitative and quantitative feature of biomarkers of human exhaled air at different functional states // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 2016. № 4. P. 48.
9. **Karabinenko A. A., Petrenko Yu. M., Ilichenko L. Yu., Nadezhdinskii A. I., Ponurovskiy Ya. Ya., Presnova E. D., Nikitin I. G.** Phenomena detected by the method of diode laser spectrometry of gaseous metabolites of the exhaled air of a human being // Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe. 2018. V. 29. No 1. P. 30.
10. **Berezin A. G., Nadezhdinskii A. I., Stavrovskii D. B., Vyazov I. E., Kotkov A. P., Ivanov V. A., Grishnova N. D., Ponurovskiy I. I., Polezhaev D. M., Sidorov V. A.** Detection of water content in high-purity ammonia by means of diode-laser spectroscopy // Appl. Phys. B. 2008. V. 90. P. 317.
11. **Nadezhdinskii A. I., Ponurovskiy Ya. Ya., Kuzmichev A. S.** Preliminary results of an aircraft system based on near-IR diode lasers for continuous measurements of the concentration of methane, carbon dioxide, water and its isotopes // Appl. Phys. B. 2012. V. 109. P. 505.
12. **Kuzmichev A., Nadezhdinskii A., Ponurovskiy Ya., Stavrovskii D., Shapovalov Y., Zaslavskii V., Khattatov V., Galaktionov V.** Preliminary results of measurement of methane and carbon dioxide in the archipelago new earth and in Moscow region by diode laser spectroscopy from the aircraft-laboratory Yak-42d «Roshydromet» / ICONO/LAD2016. Minsk. Belarus.
13. **Bolshov M. A., Kuritsyn Yu. A., Liger V. V., Mironenko V. R., Nadezhdinskii A. I., Ponurovskii Ya. Ya., Leonov S. B., Yarantsev D. A.** Measurement of transient gas flow parameters by diode laser absorption spectroscopy // QUANTUM ELECTRON, 2015 45 (4). P. 377–384.
14. **Kulakov A. T., Nadezhdinskii A. I., Pleshkov D. I., Shapovalov Y. P., Ponurovskiy Ya. Ya.** Device and Method for Measuring the Concentration of Gaseous Substances. Patent RF 2598 694 C2. Publication date 17.12.2014.
15. **Mineev A. P., Stelmakh O. M., Ponurovskiy Ya. Ya., Stavrovskiy D. B., Melkumov M. A., Hegay A. M., Kamynin V. A., Trikshev A. I., Ermakov A. A.** DDLAS remote methane gas analyzer for UAV / 2018 International Conference Laser Optics (ICLO), St. Petersburg, Russia, June 04–08, 2018, paper ThR7-p04.



Вышел в свет очередной выпуск журнала «Журнал аналитической химии» 2019, т. 74, № 2, ISSN: 0044-4502

Читайте в номере:

Мугинова С. В., Вахранева Е. С., Мясникова Д. А., Шеховцова Т. Н.
Флуориметрическое определение артемизинина с использованием системы пиронин-Б-микропероксидаза-11

Дедкова В. П., Швоева О. А., Гречников А. А.
Органические реагенты и двухслойные носители в последовательном сорбционно-спектроскопическом определении Ti(IV), V(V), Mo(VI) и Ni(II) из одной пробы

Солдатов М. А., Носова В. М., Монин Е. А., Стороженко П. А.
Использование обращенно-фазовой ВЭЖК для качественного и количественного контроля получения N-октадецил-1,3-диаминопропана

Андреев Е. А., Комкова М. А., Никитина В. Н., Карякин А. А.
Безреагентные импедансометрические сенсоры на основе минофенилборных кислот

Каменев А. И., Осипова Е. А., Витер И. П.
Развитие инверсионно-вольтамперометрических методов определения элементов

Ревельский И. А., Чиварзин М. Е., Ревельский А. И., Буряк А. К.
Новые подходы к аналитическому контролю, основанные на определении суммарного содержания галоген- и серосодержащих органических соединений на уровне следов

Серегина И. В., Осипов К., Большов М. А., Филатова Д. Г., Ланская С. Ю.

Матричные помехи при определении элементов в биологических образцах методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и пути их устранения

Ревельский И. А., Яшин Ю. С., Ревельский А. И.
Масс-спектрометрия фотоионизацией при атмосферном давлении: новые возможности установления числа компонентов сложных смесей и их идентификации

Иванов А. В., Большаков Е. С., Апяри В. В., Козлов А. А., Горбунова М. В., Абдуллаев С. Д.
Аналитический отклик сенсорных матриц на основе фотонных кристаллов: измерение диффузного отражения



ТЕХНОСФЕРА
РЕКЛАМНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

100% ГАРАНТИЯ
ПОЛУЧЕНИЯ ВСЕХ НОМЕРОВ



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 10 номеров в год
www.electronics.ru



Стоимость 957 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.photonics.ru



Стоимость 803 р. за номер
Периодичность: 6 номеров в год
www.j-analytics.ru

ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛЫ

www.technosfera.ru



Стоимость 880 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.lastmile.ru



Стоимость 803 р. за номер
Периодичность: 8 номеров в год
www.nanoindustry.ru



Стоимость 1430 р. за номер
Периодичность: 4 номера в год
www.stankoinstrument.ru