

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор
МГТУ им. Н.Э. Баумана,
д.э.н., проф.

П.А. Дроговоз

«08» февраля 2026 г.

О Т З Ы В
ведущей организации

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана»

на диссертационную работу Шерстова Игоря Владимировича «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.6 «Оптика»

1 Вводные положения

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), г. Новосибирск.

На отзыв ведущей организации представлены:

- диссертация – 1 том, 257 листов;
- автореферат – брошюра, 1 усл. печ. лист.

2 Актуальность работы

Детектирование примесей различных газов в воздухе чрезвычайно важно для контроля различных технологических процессов, обнаружения течей, и проч. Поэтому создание методов высокочувствительного детектирования газовых примесей, основанными на лазерной спектроскопии, является актуальным. С развитием лазерных технологий появился ряд методов газоанализа, которые позволяют проводить исследования в реальном времени и в полевых условиях.

Метод лазерной оптико-акустической спектроскопии (ЛОАС) является одним из наиболее чувствительных методов лазерного газоанализа атмосферы, позволяющих локально измерять микроконцентрации различных газов в режиме реального времени. С появлением перестраиваемых полупроводниковых лазеров ближнего и среднего ИК диапазонов появилась возможность создания портативных высокочувствительных оптико-акустических газоанализаторов, которые по ряду основных параметров превосходят существующие традиционные переносные газоанализаторы и течеискатели.

Диссертация Шерстова Игоря Владимировича посвящена разработке и исследованию лазерных оптико-акустических (ОА) газоанализаторов, построенных на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора (ОАД) при использовании различных источников излучения среднего ИК диапазона.

В работе представлены обзор современного состояния лазерной оптико-акустической спектроскопии, исследованы процессы формирования акустических мод в

разных типах резонансных ОАД, обоснован выбор оптимальной конструкции резонансного дифференциального ОАД для применения его в составе новых моделей высокочувствительных лазерных ОА-газоанализаторов, предложены новые оптические схемы построения лазерного ОА-газоанализатора с использованием отпаянных газонаполненных ячеек, обеспечивающие значительное снижение погрешности измерения поглощения газа-маркера в условиях нестабильности длины волны излучения лазера, реализован ряд разработок новых высокочувствительных ОА-газоанализаторов на основе различных лазеров с использованием резонансного дифференциального ОАД собственной конструкции.

Таким образом, актуальность темы диссертации Шерстова Игоря Владимировича несомненна.

3 Цели исследования

1) Разработка компактных высокочувствительных лазерных оптико-акустических газоанализаторов на основе перестраиваемых лазеров среднего ИК диапазона и резонансного дифференциального оптико-акустического детектора, обеспечивающих работу в режиме реального времени и в полевых условиях.

2) Повышение точности и воспроизводимости измерения поглощения газа лазерными ОА-газоанализаторами в условиях нестабильности длины волны лазерного излучения, изменения температуры и состава исследуемых газовых смесей.

3) Расширение сфер применения лазерных ОА-газоанализаторов.

4 Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, трех Приложений, в т. ч. Акты внедрения. Диссертация занимает 257 страниц, содержит иллюстрации, таблицы, формулы, список из 224 литературных источников.

Во Введении дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы актуальность, цели и задачи исследования, защищаемые положения, описаны методы исследования, определены степень достоверности, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, представлены апробация результатов исследования, личный вклад автора.

В первой главе проведен обзор литературы и анализ современного состояния лазерной оптико-акустической спектроскопии за последние 30–35 лет. В ходе обзора показано, что в настоящее время наивысшая чувствительность лазерных ОА-газоанализаторов получена при использовании несколько вариантов резонансных ОАД (или их аналогов). Традиционные резонансные ОАД ввиду своей простоты и надежности имеют определенный потенциал для построения высокочувствительных лазерных ОА-газоанализаторов, пригодных для работы в полевых условиях, в т.ч. для установки на БПЛА. В последнее время широкое использование в различных лабораториях мира резонансного дифференциального ОАД с малой длиной буферных полостей (модель *ОАД-90*; разработана и реализована соискателем в 2006–2007 гг.) для построения высокочувствительных лазерных ОА-газоанализаторов на основе квантово-каскадных лазеров (и др.) подтверждает этот вывод.

Во второй главе проведено исследование акустических мод резонансных ОАД различных типов. Показано, что в резонансном дифференциальном ОАД формируются резонансные акустические моды типа А, траектория распространения которых имеет кольцевую форму, проходящую через оба акустических резонатора детектора, колебания давления в разных акустических резонаторах противофазны. Кольцевые акустические моды типа А выступают из акустических резонаторов в буферные полости на расстояние $\sim 1...2$ мм и не достигают фланцев (окон) детектора, что снижает чувствительность резонансного дифференциального ОАД к поглощению в окнах детектора. Определены оптимальные соотношения между длиной и диаметром акустических резонаторов и длиной буферных полостей модернизированного варианта резонансного дифференциального ОАД, реализованные в конструкции детектора *ОАД-90*. Разработан и испытан алгоритм оперативного измерения текущей низшей резонансной частоты ОАД практически в реальном времени. Процесс измерения занимает не более 0,1 с, погрешность измерения низшей резонансной частоты ОАД не превышает 0,1 Гц.

В третьей главе представлены результаты разработки и исследования высокочувствительного лазерного ОА-течеискателя SF_6 . Совпадение сильной широкой полосы поглощения SF_6 вблизи 10,6 мкм и 10Р полосы генерации CO_2 лазера позволило построить высокочувствительный лазерный ОА-газоанализатор элегаза с пороговой чувствительностью ~ 100 ppt SF_6 . Для снижения погрешности измерения концентрации SF_6 предложено проводить нормировку сигналов поглощения в измерительном ОАД по сигналам поглощения в отпаянной газонаполненной ОА-ячейке (*Ref-ячейка*), заполненной газовой смесью с примесью SF_6 . Показано, что для уверенного детектирования малых концентраций SF_6 с помощью разработанного лазерного ОА-газоанализатора уровень необходимой мощности излучения CO_2 лазера составляет не менее 150 мВт. Оптическая схема ОА-газоанализатора с комбинацией детекторов *Ref-PAD* имеет верхний предел измерения концентрации ~ 50 ppm SF_6 . Для расширения динамического диапазона измерения концентрации до 1000 ppm SF_6 (уровень ПДК) в оптической схеме ОА-газоанализатора предложено использовать дополнительный ОА-детектор с малой оптической базой ($\sim 0,5...1$ мм). Показана возможность расширения динамического диапазона измерения концентрации элегаза до ~ 10 декад от ~ 100 ppt до 100 % SF_6 , используя эффект изменения скорости звука в газовых смесях с высоким содержанием примеси SF_6 (от 0,1 до 100 %). Проведена разработка и испытания новой серии переносных высокочувствительных лазерных ОА-течеискателей SF_6 (серия «*KARAT*»). Одна из моделей лазерного ОА-течеискателя («*SF₆ LaserGasTest*») прошла апробацию на производстве, зарегистрирована в реестре Средств измерений Росстандарта.

В четвертой главе описаны результаты разработки и исследования лазерного ОА-газоанализатора «*ЛазерБриз*», построенного на основе широкополосного перестраиваемого параметрического генератора света (ПГС, $\lambda = 2,5...10,8$ мкм, разработка Д.Б. Колкера) и резонансного дифференциального детектора *ОАД-90*. ОА-газоанализатор «*ЛазерБриз*» предназначен для использования в медицине для экспресс-диагностики проб выдоха пациентов, страдающих различными хроническими заболеваниями. Экспериментально исследованы спектры поглощения 24 различных газов. Пороговая чувствительность газоанализатора «*ЛазерБриз*» составила ~ 1 ppb SF_4 (при $\lambda = 7,795$ мкм). Начиная с 2013 г. лазерный ОА-газоанализатор «*ЛазерБриз*» активно используется для

исследования проб выдоха, взятых у добровольцев (здоровых людей) и пациентов медицинских клиник г. Томска.

В пятой главе представлены результаты разработки аэромобильного лазерного ОА-газоанализатора метана, построенного на основе квантово-каскадного лазера (ККЛ, $\lambda = 7,7$ мкм) и дифференциального детектора *ОАД-90*. Пороговая чувствительность ОА-газоанализатора метана составила $(26,64 \pm 8,39)$ ppb CH_4 , что соответствует величине параметра ($NNEA$) $= 8,22 \times 10^{-10} \text{ см}^{-1} \cdot \text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$. Разработан экспериментальный образец аэромобильного Сенсора метана (габаритные размеры $315 \times 165 \times 110$ мм; масса 3,1 кг). Питание Сенсора метана производится от внешнего источника постоянного тока (аккумулятор) напряжением от +9 до +60 В; потребляемая мощность не превышает 20 Вт.

В Заключении подводятся итоги диссертационной работы, формулируются ее основные результаты.

5 Научная новизна результатов диссертационного исследования

По результатам рассмотрения диссертации и доступных публикаций автора можно выделить ряд результатов исследований, претендующих на научную новизну:

- В резонансном дифференциальном ОАД, содержащем два параллельных продольных акустических резонатора и две буферные полости по краям, на низшей резонансной частоте формируется стоячая звуковая волна (типа А) с кольцевой конфигурацией распространения колебаний давления через оба акустических резонатора, которая выступает из акустических резонаторов в буферные полости детектора на расстояние $\sim 1...2$ мм (где расположены узлы колебаний) и не достигает фланцев (окон) резонансного дифференциального ОАД, что значительно снижает чувствительность данного детектора к поглощению в окнах.

- В резонансном продольном ОАД, содержащем один продольный акустический резонатор и две буферные полости по краям, в резонансе формируются только продольные стоячие акустические волны (типа С), которые распространяются по всей длине детектора, включая буферные полости, отражаются от фланцев ОАД, где расположены пучности колебаний давления, что существенно повышает чувствительность данного детектора к поглощению в окнах.

- Разработан специальный метод оперативного измерения низшей резонансной частоты ОАД, обеспечивающий стабильность отклика измерительного детектора в условиях изменения температуры, состава исследуемых газовых смесей и повышение точности измерения поглощения газа.

- Предложены новые оптические схемы построения лазерного ОА-газоанализатора с использованием отпаянных газонаполненных ОА-ячеек. В условиях спонтанной перестройки длины волны излучения лазера экспериментально и теоретически подтверждены точностные характеристики разработанных оптических схем ОА-газоанализатора с нормировкой сигналов поглощения в измерительном ОАД по сигналам поглощения в отпаянной газонаполненной *Ref*-ячейке вместо традиционной нормировки по мощности излучения лазера.

- Экспериментально показана возможность расширения динамического диапазона измерения концентрации гексафторида серы с помощью разработанного лазерного ОА-газоанализатора SF_6 до ~ 10 декад (от ~ 100 ppt до 100 % SF_6), реализованная в одном приборе.

6 Значимость для науки полученных автором диссертации результатов

Диссертация посвящена исследованию, обоснованию и разработке технического облика класса ОА-газоанализаторов, предназначенных для высокочувствительных оперативных измерений в полевых условиях.

В результате работы решена крупная научная проблема, имеющая большое хозяйственное значение.

7 Практическая значимость полученных результатов

В ходе исследований автором разработан оригинальный вариант резонансного дифференциального ОАД с малой длиной буферных полостей, сравнимой с диаметром акустических резонаторов, который имеет минимальную чувствительность к поглощению в окнах, что расширяет сферу и повышает эффективность применения детекторов этого вида. Изготовленные образцы по этому варианту детектора в настоящее время активно используются различными группами исследователей в мире.

Разработан метод оперативного измерения низшей резонансной частоты ОАД, который позволяет практически в реальном времени ($\sim 0,1$ с) с высокой точностью и воспроизводимостью ($\pm 0,1$ Гц) настроиться на рабочую точку измерительного резонансного ОАД (низшая резонансная частота) в условиях изменения температуры и состава газовых смесей, что обеспечивает повышение точности измерения поглощения газа-маркера.

Для снижения погрешности измерения концентрации газа-маркера, связанной с нестабильностью длины волны излучения лазера, разработаны новые оптические схемы построения ОА-газоанализатора, в которых для нормировки сигналов поглощения в измерительном ОАД используется отпаянная газонаполненная ОА-ячейка, заполненная газовой смесью с примесью исследуемого газа-маркера, вместо измерителя мощности лазера.

Для снижения энергопотребления ОА-газоанализатора SF₆ на основе волноводного СО₂ лазера предложено установить частоту повторения импульсов излучения равной одной из субгармоник низшей резонансной частоты измерительного ОАД при оптимальном уровне средней мощности излучения СО₂ лазера не менее 150 мВт.

Разработан переносной высокочувствительный лазерный ОА-течеискатель SF₆ с пороговой чувствительностью ~ 100 ppt SF₆, которая превышает чувствительность лучших коммерческих течеискателей SF₆ в мире как минимум в 1000 раз. Разработанный лазерный ОА-течеискатель элегаза «KARAT» / «SF₆ LaserGasTest» зарегистрирован в реестре Средств измерения Росстандарта, используется в электроэнергетике в России и за рубежом.

Разработан лазерный ОА-газоанализатор медицинского назначения на основе широкополосного перестраиваемого ПГС ($\lambda = 2,5 \dots 10,8$ мкм) для проведения многокомпонентного экспресс-анализа выдоха пациентов, страдающих различными заболеваниями, который активно используется по назначению в медицинских клиниках г. Томска.

Для сбора и осушения проб выдоха пациентов разработана универсальная система пробоподготовки, основанная на вымораживании проб выдыхаемого воздуха в пробоотборном пакете, помещенном на определенное время в низкотемпературный

морозильник. После охлаждения осушенная проба выдоха переносится в газоанализатор с помощью шприца.

Разработан аэромобильный высокочувствительный ОА-газоанализатор метана на основе квантово-каскадного лазера ($\lambda \approx 7,7$ мкм), резонансного дифференциального ОАД, отпаянной газонаполненной ОА-ячейки, предназначенный для выполнения ряда геолого-геофизических работ в полевых условиях на борту БПЛА.

На предложенные оригинальные технические решения автором получен ряд патентов (в соавторстве и индивидуально). Разработанные при определяющем участии соискателя лазерные ОА-газоанализаторы нашли применение в науке, технике и медицине.

8 Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации

Полученные результаты и разработанные на их основе приборы могут быть использованы для импортозамещения а аэромобильных системах оперативного мониторинга, на предприятиях энергетики, на предприятиях химической и газовой промышленности, для геологической разведки, в МЧС, МО и др.

9 Замечания

По существу работы:

- 1) Не сделан сравнительный анализ существующих спектроскопических систем анализа выдыхаемого воздуха;
- 2) Не исследовано влияние атмосферных газов на работу ОА-газоанализатора метана;
- 3) Не были проведены полевые испытания ОА-газоанализатора метана;
- 4) Не ставилась и не обсуждалась задача определения концентраций газов в многокомпонентных смесях с перекрывающимися спектрами поглощения газов.

Отмеченные недостатки не являются основанием для сомнения в достоверности результатов диссертации и сделанных на их основе выводов.

10 Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней

Диссертационная работа Шерстова Игоря Владимировича «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора» выполнена на высоком научном уровне и является законченным исследованием, посвященным разработке и исследованию лазерных ОА-газоанализаторов на основе резонансного дифференциального ОАД (собственной разработки) при использовании различных источников излучения среднего ИК диапазона. Совокупность полученных автором работы результатов может быть квалифицирована как научное достижение высокого уровня.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней и является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение задачи, имеющей важное значение для дальнейшего развития лазерной оптико-акустической спектроскопии и создания новых образцов высокочувствительных лазерных ОА-газоанализаторов.

Таким образом, диссертационная работа Шерстова Игоря Владимировича на тему «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена крупная научная проблема, имеющая большое хозяйственное значение, изложены новые оригинальные научно обоснованные технические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие и укрепление технологического суверенитета страны.

Результаты исследований апробированы на российских и международных научных конференциях.

Основные результаты диссертационной работы в достаточной степени отражены в опубликованных автором научных трудах, в том числе – в рецензируемых научных изданиях, входящих в соответствующий перечень. Уровень и объем публикаций соответствует требованиям п. 11 и п. 13 Положения.

По результатам рассмотрения диссертации не обнаружены какие-либо факты использования заимствованных материалов без ссылки на источники, т.е. диссертация соответствует требованиям п. 14 Положения.

Автореферат диссертации, в целом, отражает ее содержание и соответствует требованиям п. 25 Положения.

Работа соответствует заявленной специальности 1.3.6 «Оптика» в области технических наук и в полной мере отвечает требованиям Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Ее автор, Шерстов Игорь Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук.

Отзыв составлен на основании обсуждения диссертационной работы на семинаре кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» (РЛ-2) МГТУ им. Н.Э. Баумана 09.02.2026 г., протокол № 04.41-04/3.

Зав. кафедрой «Лазерные и
оптико-электронные системы» (РЛ-2)
МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н. (специальность – 2.2.6)

Барышников Н.В.

Профессор
кафедры «Лазерные и
оптико-электронные системы» (РЛ-2)
МГТУ им. Н.Э. Баумана, д.т.н. (специальность – 2.2.6)

Белов М.Л.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Адрес: 105005, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1

Телефон: +7 (499) 263-63-91

E-mail: bauman@bmstu.ru

Оф. сайт: <https://bmstu.ru>