

ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ И ДРУГИЕ ВОПРОСЫ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Лазерный двухканальный газоанализатор

Б.Г.Агеев, А.Н.Грицута, А.В.Климкин, А.Н.Куряк,
К.Ю.Осипов, Ю.Н.Пономарёв, Г.В.Симонова

Описана техническая схема лазерного дистанционного газоанализатора паров опасных и вредных веществ на базе двух источников ИК излучения – перестраиваемых изотопного $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера и квантово-каскадного лазера. Разработанная оптическая схема прибора, единая для обоих излучателей, даёт возможность создать достаточно компактный прибор. Использование двух каналов позволяет существенно расширить области применения газоанализатора. Предусмотрена возможность использования прибора в стационарном и мобильном вариантах.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, лазерный газоанализатор, ИК спектроскопия, абсорбционная спектроскопия.

1. Введение

Быстрое и точное дистанционное обнаружение следов опасных и вредных веществ (ОВВ) очень важно для обеспечения безопасности при природных и техногенных катастрофах, при утилизации отходов сельскохозяйственного производства, при террористических актах, в экологии и в медицине. К настоящему времени предложено большое количество различных методов и средств обнаружения таких веществ, однако не существует технического метода, способного обеспечить 100%-ную вероятность их обнаружения. Вследствие этого актуальной является разработка новых методов и технических средств, которые могут повысить эффективность обнаружения ОВВ.

Наибольшими возможностями в решении проблемы дистанционного детектирования и идентификации следов различных типов ОВВ обладают методы, использующие лазерные источники зондирования. Существует множество лазерных дистанционных методов, большинство из которых описано в опубликованных за последнее время обзорных работах [1, 2]. Значительный практический интерес для обнаружения и идентификации ОВВ представляют методы лазерной ИК спектроскопии. В средней ИК области колебательно-вращательные спектры поглощения молекул некоторых ОВВ, таких, например, как взрывчатые вещества, характеризуются высокой специфичностью, определяемой их симметрией и химическим составом [3]. Излучение ИК диапазона невидимо для не-

вооруженного глаза, что позволяет проводить дистанционное обнаружение, незаметное для наблюдателя. Для реализации данного метода необходимы перестраиваемые лазерные источники ИК излучения высокой мощности. Перспективными для применения в системах детектирования ОВВ с использованием методов лазерной спектроскопии в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра являются твердотельные лазеры на основе активированных кристаллов, эксимерные и диодные лазеры, He–Ne-лазеры и лазеры на красителях, а в среднем ИК диапазоне – газовые лазеры на парах металлов, He–Ne-лазеры, СО- и СО₂-лазеры [4, 5]. Появление параметрических и квантово-каскадных лазеров (ККЛ) высокой мощности также позволяет развивать новые направления дистанционного обнаружения следов ОВВ [6].

В последние годы разработан ряд дистанционных лазерных газоанализаторов, способных детектировать ОВВ с использованием методов лазерной ИК спектроскопии [7–9]. Целью настоящей работы являлось создание компактного дистанционного оптического лазерного газоанализатора, предназначенного для обнаружения большого набора ОВВ. Прибор сможет обеспечивать большую селективность благодаря расширению диапазона длин волн генерации лазеров и области их перестройки, а также благодаря увеличению числа каналов регистрации поглощения на трассе с изменяемой дистанцией 50–100 м.

2. Схема газоанализатора

Газоанализатор состоит из блока лазерного излучения, блока приёма излучения, а также блока обработки данных и управления. Блок лазерного излучения газоанализатора содержит два источника зондирующего излучения: перестраиваемый в диапазоне 10.99–11.4 мкм изотопный $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазер и перестраиваемый в диапазоне 7.1–7.6 мкм диодный ККЛ мощностью 0.5 и 0.2 Вт соответственно. В диапазон генерации газового лазера попадают интенсивные линии поглощения таких веществ, как ацетон, метанол, бензол, нитробензол, хлор, толуол и ряд других [10, 11]. В области перестройки длины волны генерации диодного лазера находятся полосы поглощения

Б.Г.Агеев, А.Н.Грицута, А.В.Климкин, А.Н.Куряк, К.Ю.Осипов. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634055 Томск, пл. Акад. Зуева, 1; e-mail: tosha@asd.iao.ru
Ю.Н.Пономарёв. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634055 Томск, пл. Акад. Зуева, 1; Национальный исследовательский Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36
Г.В.Симонова. Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 10/3

Поступила в редакцию 26 мая 2017 г., после доработки – 7 августа 2017 г.

ацетона, диоксида серы, метанола, пропана, а также паров суррогатных и промышленных взрывчатых веществ [11, 12].

Для вывода излучения на трассу зондирования используется один перестраиваемый коллиматор, состоящий из вогнутого и выпуклого сферических зеркал, излучение указанных лазеров фокусируется на диффузно отражающую мишень. Отраженное от мишени излучение, собранное зеркальным объективом, формирует аналитический сигнал. Сигнал регистрируется блоком приёма, связанным с блоком обработки данных и управления.

Дополнительно для обеспечения точного наведения газоанализатора на диффузно отражающую мишень, блок лазерного излучения оснащён диодным лазерным излучателем видимого диапазона (длина волны 0.532 мкм).

На рис.1 представлена блок-схема газоанализатора, содержащая блок лазерного излучения 1, включающий в себя три лазера – два зондирующих и лазер точного наведения, а также зеркальный коллиматор 2; блок приёма излучения, состоящий из приёмного объектива 3 и фотоприёмного модуля 4; блок обработки данных и управления, включающий в себя плату АЦП 5 и компьютер 6; несущую конструкцию – оптическую плиту 7.

На рис.2 приведена оптическая схема газоанализатора, содержащая блок лазерного излучения, состоящий из трёх источников излучения (1, 2, 3) и зеркального коллиматора 4; диффузно отражающую мишень 5; блок приёма излучения, представляющий собой зеркальный объектив Кассегрена 6 с фотоприёмным модулем, который состоит из компенсационного клина 7, делительной плоскопараллельной пластины и двух фотоприёмников 8, охлаждаемых азотом с помощью микрокриогенных систем замкнутого типа на основе газовых криогенных машин, работающих по циклу Стирлинга. Каждый фотоприёмник фотоприёмного модуля имеет максимальную чувствительность на длине волны, соответствующей основной длине волны одного из зондирующих лазеров. Пучки излучения

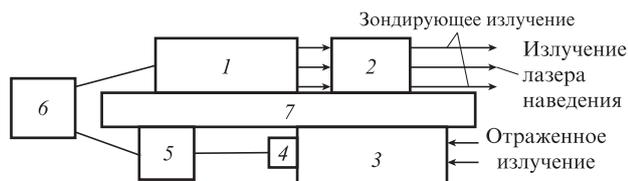


Рис.1. Схема двухканального газоанализатора: 1 – блок лазерного излучения; 2 – коллиматор; 3 – приёмный объектив; 4 – фотоприёмный модуль; 5 – плата АЦП; 6 – компьютер; 7 – оптическая плита.

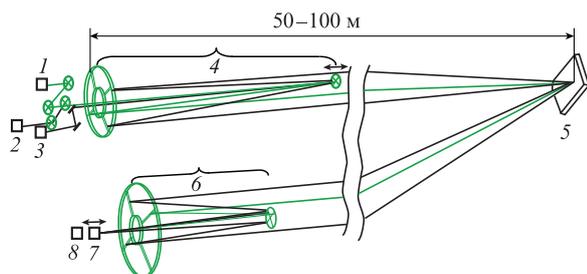


Рис.2. Оптическая схема газоанализатора: 1, 2 и 3 – источники лазерного излучения; 4 – зеркальный коллиматор; 5 – диффузно отражающая мишень; 6 – зеркальный объектив; 7 – компенсационный клин; 8 – фотоприёмники.

этих лазеров распространяются симметрично относительно оптической оси зеркального коллиматора. Кроме того, оси пучков ИК излучения зондирующих лазеров равноудалены от оси пучка видимого излучения лазера наведения.

Автоматическая подфокусировка лазерного излучения на диффузно отражающую мишень (дистанция 50–100 м) обеспечивается перемещением вторичного зеркального компонента коллиматора вдоль оптической оси. Для перемещения используется линейный транслятор с шаговым двигателем. Такой выбор диапазона зондируемых дистанций обусловлен максимальной длиной доступной авторам закрытой контролируемой трассы – 100 м, а также тем, что уменьшение передней границы диапазона привело бы к виньетированию излучения на главном зеркале объектива и, как следствие, к увеличению его размера и размера чувствительных площадок фотоприёмников.

Зеркальный объектив 6 в блоке приёма излучения сфокусирован на дистанцию 75 м. При этом оптические оси зеркального коллиматора 4 и объектива 6 пересекаются также на дистанции 75 м. По этой причине при зондировании на дистанциях, отличных от 75 м, изображения пятен принимаемого эхо-сигнала перемещаются, что вызывает виньетирование излучения на площадках фотоприёмников. Для исключения виньетирования за приёмным объективом размещают компенсационный клин, изготовленный из германия. Автоматическое перемещение клина осуществляется двухкоординатным линейным транслятором с шаговыми двигателями. Включение в оптическую схему перемещаемого компенсационного клина позволяет в зависимости от дистанции до диффузно отражающей мишени проецировать пятна принимаемого сигнала, не выходя за пределы чувствительных площадок каждого из двух фотоприёмников (1 × 1 мм). При этом сами фотоприёмники разнесены и стационарно закреплены в приёмном модуле (рис.3). Разделение пучков лазерного излучения проводится плоскопараллельной делительной пластиной. На пластину нанесён просветляющий слой для рабочих длин волн одного из зондирующих лазеров.

При необходимости (для выделения излучения одного зондирующего лазера на фоне излучения другого лазера) излучение каждого зондирующего лазера может быть промодулировано. Такая необходимость может возникнуть, например, при многократном превышении мощностью излучения CO₂-лазера мощности излучения ККЛ. В этом случае, несмотря на обеспечение более благоприятных условий для прохождения излучения ККЛ в соответствующем канале, на фотоприёмнике данного канала

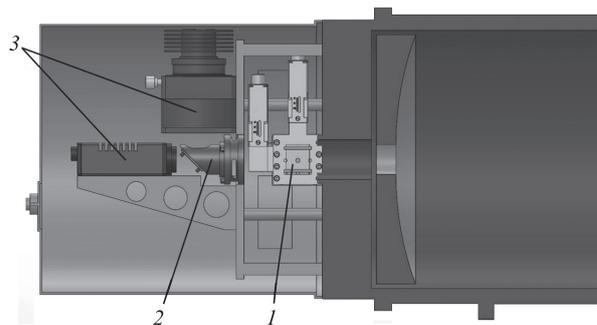


Рис.3. Закрепленный на заднем фланце приёмного объектива фотоприёмный модуль: 1 – компенсационный клин на двухкоординатном линейном трансляторе; 2 – узел делительной пластины; 3 – фотоприёмники.

ла мощность рассеянного излучения CO_2 -лазера может быть сравнима с мощностью излучения ККЛ и даже превышать её.

Для автоматической подфокусировки коллиматора в блоке лазерного излучения и объектива в блоке приёма излучения проводится компьютеризированный расчёт дистанции до диффузно отражающей мишени. Расчёт выполняется по времени задержки момента регистрации импульса CO_2 -лазера фотоприёмником относительно момента его генерации.

Блок обработки данных и управления обеспечивает передачу, обработку и хранение данных; управление работой шаговых двигателей линейных трансляторов подфокусировки коллиматора и объектива; управление работой зондирующих лазерных источников – изменение частоты следования импульсов и мощности, перестройка длины волны зондирующего излучения.

3. Принцип работы газоанализатора

Газоанализатор работает следующим образом. Зондирующее лазерное излучение с помощью зеркального коллиматора фокусируется на диффузно отражающую мишень и, отразившись от неё в обратном направлении, собирается объективом и регистрируется фотоприёмником. Перестройкой частоты излучения зондирующих лазеров формируется частотный спектр эхо-сигналов. При появлении на трассе зондирования облака ОВВ (или вещества-маркёра ОВВ) спектр эхо-сигналов будет содержать провалы, вызванные поглощением лазерного излучения на характерных для каждого вещества длинах волн. В результате обработки эхо-сигналов получается спектр селективного поглощения молекулами ОВВ (или вещества-маркёра ОВВ) зондирующего излучения. Компьютерное сравнение спектров эхо-сигналов на «чистой» трассе зондирования и в присутствии на ней молекул ОВВ (или вещества-маркёра ОВВ) позволяет газоанализатору работать в автоматическом режиме.

Минимальное время непрерывного сканирования всего диапазона спектра – 30 с. Предусмотрена возможность сканирования по линиям генерации газового лазера, что увеличивает время сканирования, но повышает чувствительность прибора.

Напряжение питания газоанализатора составляет 24 В, потребляемая им мощность равна 1 кВт. Газоанализатор имеет габариты 1000 × 1000 × 700 мм и вес 100 кг. Такие характеристики прибора позволяют использовать его, в том числе, в передвижном варианте – при установке на мобильном носителе с питанием от бортовой сети.

4. Контрольный эксперимент

Для проверки работоспособности газоанализатора использовался аммиак (NH_3). Это вещество было выбрано по следующим причинам: его полоса поглощения лежит в диапазоне рабочих длин волн зондирующих лазеров, оно вредно само по себе, а также применяется при изготовлении, например, некоторых суррогатных взрывчатых веществ и является веществом-маркёром для выявления таких взрывчатых веществ при их деградации.

Эксперимент проводился по отработанной ранее схеме [13], в которой лазерный пучок из блока излучения газоанализатора проходит через абсорбционную кювету, расположенную на трассе зондирования и содержащую

пары тестируемого вещества, попадает на диффузно рассеивающую мишень и рассеивается на ней. Рассеянное на мишени излучение, содержащее информацию о поглощении на трассе, частично возвращалось в приёмный блок газоанализатора. Абсорбционная кювета представляла собой металлическую трубу диаметром 68 мм и длиной 620 мм. На торцах трубы установлены окна из ZnSe, на стенках кюветы – штуцеры прокачки. Для контрольного эксперимента была приготовлена тестовая смесь аммиак – воздух с содержанием аммиака ~200 ppm. Этой смесью при общем давлении 1 атм заполнялась кювета. Мишенью служил матовый дюралевый лист, обработанный пескоструйным методом. Она была расположена на расстоянии 75 м от газоанализатора, а кювета – на расстоянии 65 м от него.

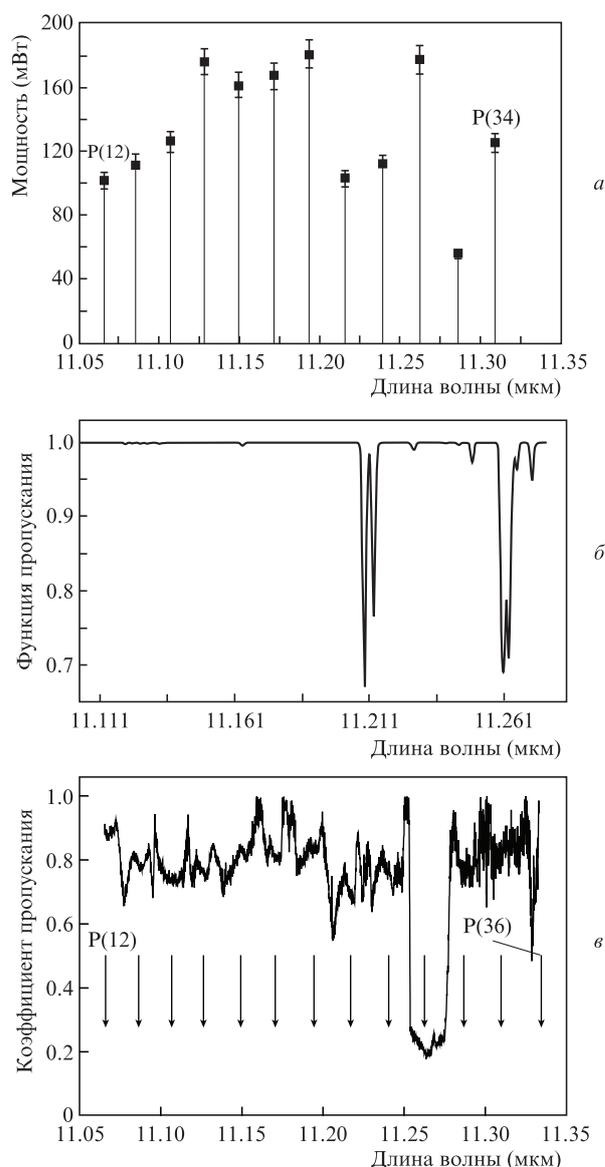


Рис.4. Распределение мощности излучения по линиям генерации $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера (а), функция пропускания аммиака, рассчитанная с помощью информационной системы Spectra [14] для условий эксперимента (б), а также зависимость эхо-сигнала (коэффициента пропускания кюветы длиной 620 мм со смесью паров аммиака (~200 ppm) и воздуха при давлении 1 атм и температуре 18 °С) от длины волны генерации $^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$ -лазера, полученная на дистанции 65 м (в). Стрелками на рис.4,в указаны длины волн используемых линий генерации.

На рис.4 приведен зарегистрированный в ходе эксперимента спектр эхо-сигнала, содержащий характерный провал, вызванный поглощением лазерного излучения парами аммиака. Проводилось сканирование по линиям генерации лазера с «задержкой» на линии, равной 1 с. Частота следования лазерных импульсов составляла 100 Гц. Время сканирования было равно 45 с. Оценка предельной чувствительности по аммиаку в условиях проведенного эксперимента составила ~ 40 ppm.

5. Заключение

Преимущества предложенного газоанализатора заключаются в том, что разработанная оптическая схема прибора, являясь единой для трёх излучателей, позволяет создать достаточно компактный прибор. Использование двух перестраиваемых лазеров ИК диапазона даёт возможность определить присутствие в атмосфере паров веществ, в том числе ОВВ, спектры поглощения которых расположены в среднем ИК диапазоне. Перестройка длины волны излучения лазеров повышает селективность газоанализатора за счёт регистрации спектральных особенностей молекул ОВВ (или вещества-маркёра ОВВ), отличающих их от других, схожих по оптическим свойствам молекул. Это позволяет снизить число ложных срабатываний прибора.

Применение зеркальной оптики в передающей и приёмной системах газоанализатора даёт возможность использовать различные источники излучения и фотоприёмники, что способствует развитию новых эффективных подходов к созданию комбинированных систем, основанных на применении различных лазерных технологий для обнаружения ОВВ. По всей видимости, в будущем именно такие системы будут играть определяющую роль.

Работа выполнена в рамках Проекта VIII.80.1.3 Программы фундаментальных исследований государственных академий наук.

1. Munson C.A., Gottfried J.L., De Lucia F.C. Jr., McNesby K.L., Miziolek A.W., in *Counterterrorist Detection Techniques of Explosives* (Amsterdam: Elsevier, 2007).
2. Скворцов Л.А. *Квантовая электроника*, **42**, 1 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 1 (2012)].
3. Набиев Ш.Ш., Ставровский Д.Б., Палкина Л.А., Збарский В.Л., Юдин Н.В., Голубева Е.Н., Вакс В.Л., Домрачева Е.Г., Черняева М.Б. *Оптика атмосферы и океана*, **26**, 273 (2013).
4. Межерис Р.М. *Лазерное зондирование атмосферы* (М.: Мир, 1987).
5. Бобровников С.М., Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Сериков И.Б., Суханов А.Я. *Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы* (Томск: изд-е ИОА СО РАН, 2014).
6. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Зенов К.Г., Пустовалова Р.В. *Квантовая электроника*, **47**, 14 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 14 (2017)].
7. Скворцов Л.А. *Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел* (М.: Техносфера, 2014).
8. Сакович Г.В., Резнев А.А., Чернов А.И., Максимов Е.М., Передерий А.Н., Степанов Е.В., Силантьев С.В., Ворожцов А.Б., Павленко А.А., Максименко Е.В., Ворожцов Б.И., Бобровников С.М., Горлов Е.В., Макогон М.М., Клишкин А.В., Осипов К.Ю., Пономарев Ю.Н., Капитанов В.А., Агеев Б.Г. В кн.: *Фундаментальные и прикладные проблемы технической химии: к 10-летию Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН* (Новосибирск: Наука, 2011).
9. Сакович Г.В., Чернов А.И., Силантьев С.В., Ворожцов А.Б., Павленко А.А., Максименко Е.В., Макогон М.М., Клишкин А.В., Осипов К.Ю., Пономарев Ю.Н., Капитанов В.А., Агеев Б.Г. *Ползуновский вестник*, **4**, 38 (2010).
10. Старовойтов В.С., Трушин С.А., Чураков В.В. *ЖПС*, **50**, 504 (1993).
11. Козинцев В.И., Белов М.Л., Городничев В.А., Федотов Ю.В. *Лазерный оптико-акустический анализ многокомпонентных газовых смесей* (М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2003).
12. Janni J., Gilbert B.D., Field R.W., Steinfeld J.I. *Spectrochim. Acta Part A*, **53**, 375 (1997).
13. Агеев Б.Г., Клишкин А.В., Куряк А.Н., Осипов К.Ю., Пономарев Ю.Н. *Оптика атмосферы и океана*, **30**, 204 (2017).
14. Goyal A.K., Kotidis P., Deutsch E.R., Zhu N., Norman M., Ye J., Zafiriou K., Mazurenko A. *Proc. SPIE*, **9455**, 94550L (2015).