

Стабилизация линии излучения волноводного CO₂-лазера для лазерного оптико-акустического детектора утечек SF₆

Д.А. Каштанов, В.А. Васильев, А.И. Карапузиков, И.В. Шерстов*

*Институт лазерной физики СО РАН
630090, г. Новосибирск, пр. Академика М.А. Лаврентьева, 13/3*

Поступила в редакцию 30.11.2010 г.

Для повышения точности измерений концентрации SF₆ в воздухе с помощью лазерного оптико-акустического детектора разработан компактный импульсно-периодический волноводный CO₂-лазер с ВЧ-возбуждением, автоматической настройкой и удержанием длины волны на линии 10P(16). В лазере был использован неселективный резонатор. Для определения требуемой линии излучения длина резонатора менялась с помощью пьезокерамического актуатора. Для идентификации требуемой линии генерации в качестве репера использовалась отпаянная оптико-акустическая ячейка, заполненная SF₆. Разработан алгоритм определения и удержания длины волны. Установлено влияние различных факторов на параметры работы лазера. Показано, что при использовании такого лазера погрешность измерения концентрации SF₆ в воздухе не превышает 3%. Обсуждается возможность применения данного алгоритма для стабилизации других линий генерации CO₂-лазера, в частности линий, необходимых для детектирования этилена и паров ацетона.

Ключевые слова: SF₆, лазерный оптико-акустический детектор, стабилизация линии излучения CO₂-лазера, пьезокерамический актуатор; SF₆, laser photo-acoustic detector, waveguide CO₂ laser wavelength stabilization, piezoceramic actuator.

Введение

Детекторы малых концентраций элегаза (SF₆) в воздухе находят все большее применение в энергетике для определения мест утечек и интенсивности течей в элегазовом оборудовании (высоковольтные коммутаторы, изоляторы, трансформаторы тока и т.д.). В ряде случаев методика измерений годовых утечек объектов предусматривает определение концентрации элегаза в заданном объеме. По известной концентрации и скорости ее изменения можно оценить годовую утечку элегаза и сделать вывод относительно пригодности объекта для длительной эксплуатации. Помимо этого элегаз является сильным поглотителем ИК-излучения и входит в число парниковых газов, выброс которых ограничен Киотским протоколом.

Лазерные оптико-акустические детекторы (ОАД) утечек элегаза [1–3] начинают успешно применяться на объектах энергетики [4], поскольку позволяют оперативно измерять концентрацию элегаза в воздухе в области забора пробы. Так как коэффициент поглощения SF₆ существенным образом зависит от длины волны лазера [5], для достижения требуемой на практике точности измерений необходимо обеспечить работу лазера на заданной длине волны, желательнее совпадающей с максимальным значением

коэффициента поглощения элегаза в воздухе. Использование с этой целью селективного элемента, например дифракционной решетки, вносит потери в оптический резонатор, что ведет к увеличению габаритных размеров, стоимости лазера и прибора в целом. Вместе с тем для решения задачи достаточно обеспечить работу лазера на одной длине волны вблизи центральной линии 10P(20) полосы 10,6 мкм.

В настоящей статье предлагается использовать оптико-акустическую ячейку, заполненную элегазом, для селекции линий волноводного CO₂-лазера с неселективным резонатором. Как показано в ряде работ [6, 7], при изменении длины волны лазера последовательно возникает генерация на нескольких линиях вблизи линии 10P(20). Принцип селекции заключается в определении и последующем удержании диапазона длин резонатора, в котором происходит генерация требуемой линии. При изменении длины резонатора вследствие теплового дрейфа должен быть предусмотрен механизм коррекции длины резонатора для удержания выбранной линии генерации.

Предлагаемый способ селекции и стабилизации длины волны лазера является достаточно универсальным и может быть использован для задания других линий генерации CO₂-лазера. В этом случае для настройки схемы стабилизации на требуемую линию достаточно наполнить опорный детектор газом с нужным спектром поглощения. Так, например, для линии 10P(14) может быть использован этилен, а для линии изотопа ¹³CO₂ в области 11,2 мкм – пары ацетона.

* Дмитрий Александрович Каштанов (academik2006@yandex.ru); Вадим Анатольевич Васильев (vade@laser.nsc.ru); Александр Иванович Карапузиков (ir@laser.nsc.ru); Игорь Владимирович Шерстов (sherstov@laser.nsc.ru).

1. Схема экспериментальной установки

Фактически схема (рис. 1) является стендовым вариантом лазерного оптико-акустического детектора малых концентраций элгеза в воздухе.

В качестве источника излучения в экспериментах использовался компактный отпаянный волноводный CO_2 -лазер с ВЧ-возбуждением, размеры волновода $1,8 \times 1,8 \times 225$ мм. Резонатор лазера был образован двумя плоскими зеркалами, расположенными вблизи выходных торцов волновода (тип I по классификации, предложенной в работе [8]). Плотное зеркало было изготовлено на подложке из кремния и имело золотое покрытие. Выходное зеркало с коэффициентом пропускания 10% устанавливалось на юстировочном устройстве с пьезокерамическим актуатором, позволяющим менять длину резонатора в пределах 6 мкм.

В лазере применялась газовая смесь $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:5 + 5\% \text{Xe}$ при рабочем давлении 54 торр. Лазер работал в импульсно-периодическом режиме с большой скважностью импульсов. Мощность импульсов накачки достигала 200 Вт, мощность импульсов генерации – 8–10 Вт, средняя мощность лазера – порядка 2 Вт.

Для детектирования малых концентраций примесей элгеза в воздухе использовался резонансный ОАД прокачного типа (ОАД-1 на рис. 1), представляющий собой дифференциальный акустический резонатор [9], состоящий из двух цилиндрических каналов диаметром 8 мм и длиной 90 мм. Каналы располагались параллельно друг другу в массивном металлическом корпусе и соединялись у торцов одинаковыми полостями. В середине каждого канала были установлены электретенные микрофоны. Для герметизации ОАД и ввода лазерного излучения в рабочий канал использовались окна из просветленного селенида цинка.

Для получения информации о мощности лазерного излучения на различных линиях генерации применялась отпаянная нерезонансная ячейка (ОАД-2), заполненная смесью азота с небольшой добавкой SF_6 .

ОАД-2 имел длину 10 мм и также герметизировался окнами из просветленного селенида цинка. На корпусе ОАД-2 располагался микрофон.

Задание режима работы лазера и управление пьезокерамическим актуатором производились от компьютера с помощью специализированного контроллера. В ходе экспериментов длительность импульсов накачки менялась в пределах от 20 до 150 мкс, частота следования импульсов от 100 до 850 Гц, напряжение на актуаторе в пределах ± 250 В. Измерение откликов ОАД-1 и ОАД-2 выполнялось с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) под управлением компьютера, где производилась последующая обработка и вывод на монитор результатов измерений. Модернизированный монохроматор типа ИКС-12 использовался для контроля линии генерации лазера.

Для калибровки экспериментального макета ОАД применялась контрольная элгезовая течь (производство НИИ «Гермес», ТУ 103.62.042.00.000) с интенсивностью потока элгеза $6,0 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$. Скорость забора пробы воздуха в процессе экспериментов поддерживалась равной $10 \text{ см}^3/\text{с}$. При таких условиях внутри рабочего канала ОАД-1 устанавливалась концентрация SF_6 на уровне 60 ppb.

В ходе экспериментов регистрировался отклик резонансного ОАД в зависимости от времени, длительности и частоты следования импульсов накачки и других факторов, влияющих на режим работы лазера (средняя мощность, интенсивность охлаждения корпуса и т.д.). Обработка полезных сигналов производилась методом цифрового синхронного детектирования. Сигнал с резонансного ОАД нормировался на опорный сигнал с ОАД-2 для ослабления влияния флуктуаций длины волны и мощности лазера (табл. 1).

Для ослабления переходных процессов в излучателе вследствие теплового нагрева и для уменьшения потребляемой мощности большинство экспериментов проводились при работе лазера на субгармониках. В этом случае частоты следования лазерных импульсов были кратными резонансной частоте ОАД-1, равной примерно 1700 Гц. Переход к работе на субгармониках до определенных частот

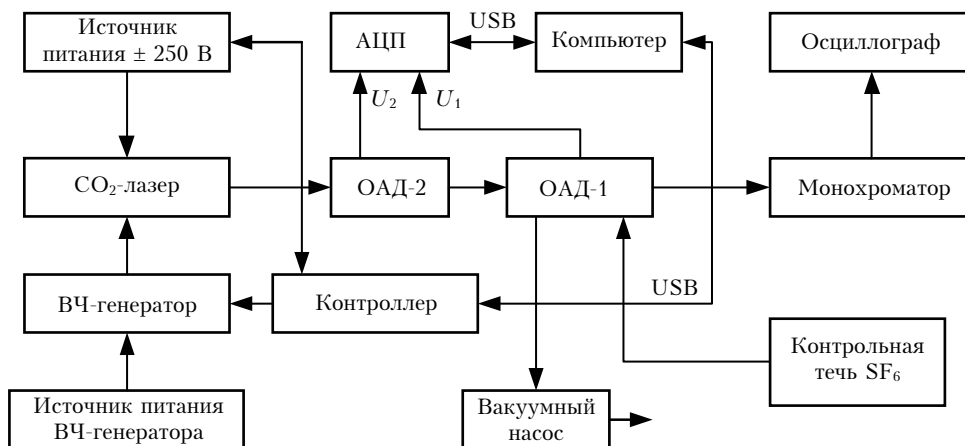


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Таблица 1

Линия генерации лазера	Длина волны, мкм	$\alpha(\lambda)$, $\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$	$C_1 = 0,06 \text{ ppm}$		$C_1 = 10 \text{ ppm}$		$\Delta(1 - \tau_2)$, %
			U_1/U_2	$\Delta(U_1/U_2)$, %	U_1/U_2	$\Delta(U_1/U_2)$, %	
1	2	3	4	5	6	7	8
10P(26)	10,653	83,6	0,035	126,20	2,176	3,22	2,31
10P(24)	10,632	182,4	0,023	48,52	2,155	2,25	1,90
10P(22)	10,611	304	0,019	21,93	2,141	1,56	1,40
10P(20)	10,591	402,8	0,017	11,97	2,131	1,08	1,00
10P(18)	10,571	456	0,017	8,34	2,126	0,84	0,78
10P(16)	10,551	646	0,015	0,00	2,108	0,00	0,00
10P(14)	10,532	326,8	0,018	19,12	2,138	1,44	1,31
10P(12)	10,513	190	0,023	45,88	2,154	2,20	1,87
10P(10)	10,494	10,64	0,187	1105,62	2,334	10,72	2,61

не приводил к потере пороговой чувствительности детектора, так как при этом пропорционально снижался уровень фонового сигнала.

2. Оценка погрешности измерений малых концентраций SF₆ лазерным оптико-акустическим детектором «КАРАТ»

Рассмотрим упрощенную оптическую блок-схему экспериментальной установки (см. рис. 1). Сигналы с микрофонов детекторов ОАД-1 и ОАД-2

$$U_1 = P_0(\lambda) [\tau_\phi + T^3(1 - \tau_2)\tau_1] S_1(f), \quad (1)$$

$$U_2 = P_0(\lambda) T \tau_2 S_2(f). \quad (2)$$

Здесь $P_0(\lambda)$ – мощность лазерного излучения на заданной линии, Вт; τ_ϕ – поглощение, соответствующее фоновому сигналу; τ_1 – поглощение в канале резонансного детектора ОАД-1, τ_2 – поглощение в опорном детекторе ОАД-2; U_1 и U_2 – напряжения на выходе соответствующих детекторов, В; $S_1(f)$ и $S_2(f)$ – чувствительности детекторов, В/Вт; T – коэффициент пропускания окон детекторов;

$$\tau_1 = C_1 \alpha(\lambda) l_1 \cdot 10^{-6}, \quad (3)$$

$$\tau_2 = C_2 \alpha(\lambda) l_2 \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

$$\tau_\phi = C_\phi \alpha(\lambda) l_1 \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

где C_1 , C_2 – концентрации поглощающего газа в детекторах ОАД-1 и ОАД-2 соответственно, ppm; C_ϕ – эквивалентная концентрация газа, соответствующая фоновому поглощению; $\alpha(\lambda)$ – коэффициент поглощения газа, $\text{см}^{-1} \cdot \text{атм}^{-1}$; l_1 , l_2 – длина области поглощения детекторов.

Для оценки влияния изменения длины волны в области 10,6 мкм на погрешность измерения концентрации SF₆ в воздухе найдем значение отношения U_1/U_2 при двух значениях концентрации C_1 : 0,06 и 10 ppm для различных длин волн. Для определенности примем l_1 , l_2 соответственно равными 9 и 1 см, концентрацию $C_2 = 40$ ppm, а $T = 0,98$, что близко к реальным условиям измерений в экс-

периментальной установке. Будем также считать, что $S_1(f)$ и $S_2(f)$ не влияют на погрешность измерений и их отношение может быть положено равным 1. Величину C_ϕ примем равной 0,02 ppm ($\tau_\phi = 7,25 \cdot 10^{-5}$ для линии 10P(20) и не зависит от длины волны). Это примерно соответствует фоновому сигналу реального детектора. Результаты вычислений для различных длин волн в окрестности линии 10P(20), которые, как правило, выходят в генерацию в лазерах без селективных элементов, представлены в табл. 1. Данные по коэффициентам поглощения газа SF₆ взяты из работы [5].

Как следует из табл. 1, погрешность измерений $\Delta(U_1/U_2)$ относительно линии 10P(16) для нескольких линий вблизи центра полосы излучения лазера существенно выше для малых концентраций измеряемого SF₆ (стб. 5 табл. 1). Причиной является наличие фонового сигнала, сравнимого по величине с полезным сигналом. При измерении более высоких концентраций газа погрешность уменьшается (стб. 7 табл. 1) и определяется зависящим от длины волны изменением мощности лазера в опорном детекторе за счет поглощения. В этом случае можно пренебречь фоновым поглощением и отношение U_1/U_2 может быть записано в виде

$$U_1/U_2 = \frac{S_1(f)}{S_2(f)} \frac{T^2(1 - \tau_2)\tau_1}{\tau_2}. \quad (6)$$

Поскольку отношение τ_1/τ_2 не зависит от длины волны, погрешность измерений в этом случае определяется величиной $1 - \tau_2$. Изменение $\Delta(1 - \tau_2)$ относительно линии 10P(16) представлено в стб. 8 табл. 1. Оно соответствует минимально возможной погрешности измерений концентрации SF₆ в лазерном оптико-акустическом детекторе элегаза без стабилизации линии излучения лазера. Как следует из табл. 1, при изменении длины волны значения $\Delta(1 - \tau_2)$ и $\Delta(U_1/U_2)$ близки при измеряемой концентрации 10 ppm, что подтверждает высказанное выше предположение.

Таким образом, основной целью использования лазера с фиксированной длиной волны является уменьшение погрешности измерений малых концентраций SF₆ лазерным оптико-акустическим детектором на основе CO₂-лазера с неселективным резонатором. Оптимальной является линия 10P(16), на

которой наблюдается максимальное значение коэффициента поглощения SF_6 .

3. Выбор оптимального режима работы лазера

Особенности работы CO_2 -лазеров с неселективным резонатором в непрерывном и импульсно-периодическом режимах, включая спектральный состав излучения, детально рассматривались в ряде работ [6, 7, 10, 11]. Так, в работе [11] отмечается периодическое скачкообразное изменение показателя преломления среды лазера вследствие монотонного роста температуры и давления внутри волноводного канала.

Для лазера, рассматриваемого в настоящей статье, перескоки по линиям наблюдались при возбуждении разряда длинными импульсами. При длительности импульса ВЧ-накачки 100 мкс (рис. 2, б) имеет место последовательная генерация трех различных лазерных линий, что обуславливает повышение погрешности измерений детектора SF_6 с таким лазерным источником. В этом плане представляется естественным переход к возбуждению активной среды лазера более короткими импульсами, в течение которых не происходит перескока длины волны. Форма такого импульса при длительности его накачки 25 мкс представлена на рис. 2, а.

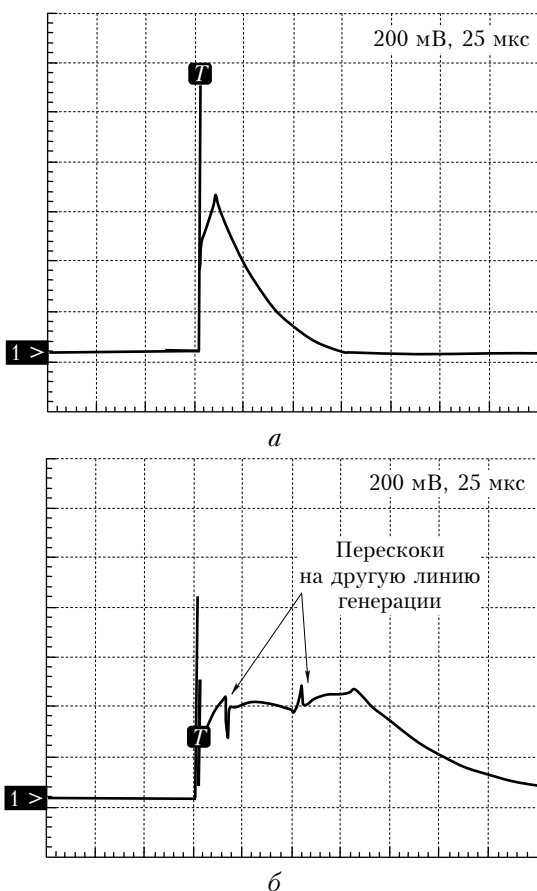


Рис. 2. Осциллограммы импульсов генерации лазера: а – длительность импульсов ВЧ-возбуждения 25 мкс; б – длительность импульсов ВЧ-возбуждения 100 мкс

Обычно для выделения и удержания заданной линии используются дифракционная решетка [7] и дополнительные оптические элементы, что ведет к усложнению системы стабилизации и увеличению ее габаритных размеров. Преимуществом такой схемы стабилизации является возможность выбора ряда длин волн в окрестности линии генерации $10P(20)$. Однако для достижения целей эксперимента важна только одна линия $10P(16)$.

В настоящей статье показана возможность задания и стабилизации линии генерации лазера $10P(16)$ с помощью нерезонансного отпаянного оптико-акустического детектора, заполненного смесью SF_6 и азота. В этом случае селекция требуемой линии производится по существенному отличию коэффициента поглощения в SF_6 (см. табл. 1) на линии $10P(16)$ от коэффициентов других линий генерации CO_2 -лазера в спектральном диапазоне в области 10,6 мкм. Этот факт наглядно демонстрируется в табл. 2, где представлены отношения коэффициентов поглощения на различных линиях P -ветви по сравнению с линией $10P(16)$.

Таблица 2

Линия генерации	$10P(14)$	$10P(16)$	$10P(18)$	$10P(20)$	$10P(22)$	$10P(24)$
Отношение $\frac{10P(16)}{10P(i)}$	1,97	1	1,31	1,6	2,12	3,54

4. Алгоритм автоматического поиска и удержания линии генерации $10P(16)$ для волноводного CO_2 -лазера с неселективным резонатором

Для автоматического поиска и удержания линии генерации $10P(16)$ был разработан алгоритм, включающий 4 этапа.

1. Измерение зависимости сигнала с опорного детектора ОАД-2 от длины резонатора при сканировании напряжения на пьезокерамическом актуаторе ($U_{п.а}$) в пределах от -250 до $+250$ В. Напряжение менялось с шагом 15,62 В, что позволяло проходить указанный интервал за 32 шага. Полученные данные запоминались в виде массива $f(i)$, где i – номер шага, и выводились на экран в виде кривой. На рис. 3 представлена подобная кривая, отражающая перестройку лазера по линиям генерации, на которой выделяются три максимума, соответствующие различным линиям генерации.

Из-за процесса температурного дрейфа лазерной смеси форма графика функции $f(i)$ постоянно меняется. Скорость изменения $f(i)$ зависит от скорости нагрева рабочей смеси лазера [11], поэтому для сокращения времени поиска линии $10P(16)$ лазер работал в режиме повышенного энергопотребления (за счет высокой частоты повторения импульсов) при постоянной длительности импульса ВЧ-накачки.

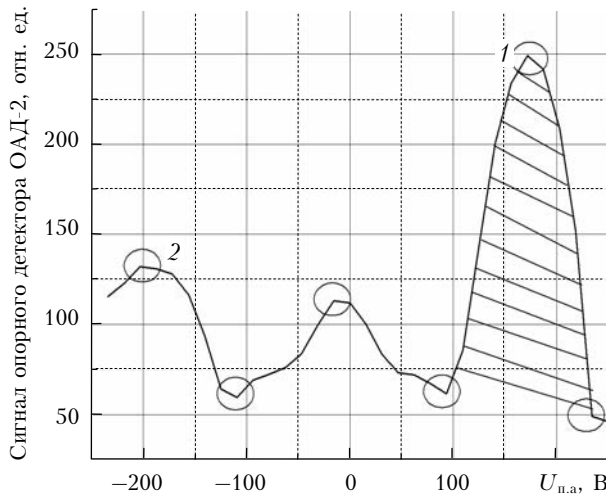


Рис. 3. Зависимость сигнала опорного детектора ОАД-2 от напряжения на пьезокерамическом актуаторе (функция $f(i)$)

2. Поиск экстремумов графика по известному критерию $(f(i+1) - f(i))(f(i) - f(i-1)) < 0$ и переход к массиву $f_1(i)$, в котором не экстремальные точки заменялись нулевыми значениями. Поиск отношения двух элементов в массиве $f_1(i)$, имеющих максимальные значения (вершины 1 и 2 на рис. 4). Проверка принадлежности полученной величины заданному интервалу значений от 1,6 до 3,54 (данный интервал определен в процессе измерений).

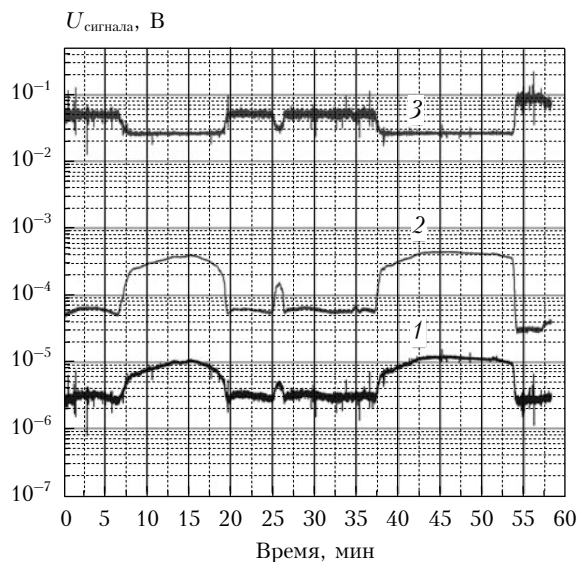


Рис. 4. Результаты измерения относительной концентрации SF_6 в газовой пробе в схеме с опорным детектором: 1 – сигнал ОАД-1; 2 – сигнал опорного детектора ОАД-2; 3 – отношение сигналов ОАД-1 и ОАД-2, отн. ед.

При одномодовом режиме работы лазера отношения коэффициентов поглощения на различных линиях по сравнению с линией $10P(16)$ (см. табл. 2) лежат в пределах от 1,6 до 3,54. Предложенный алгоритм не дает возможности однозначного сопоставления максимумов кривой перестройки и номеров

линии спектра генерации лазера, но позволяет осуществлять контроль соотношений вершин (максимумов мощности) линий, т.е. отношение двух максимальных вершин должно принадлежать интервалу значений от 1,6 до 3,54, если в процессе сканирования линия $10P(16)$ уверенно выходит в генерацию.

3. Определение ширины контура (заштрихованная область на рис. 3) с максимальной плавной вершиной (величина производной в точке максимума равна 0). Ширина контура определялась между двумя соседними минимумами и не должна была превышать 10–12 шагов (150–200 В по напряжению). В противном случае наблюдалась генерация одной или двух линий, отличных от линии $10P(16)$.

4. Проверка равенства максимальных элементов массивов $f(i)$ и $f_1(i)$. Данное условие позволяло отслеживать и исключать из рассмотрения края динамического диапазона перестройки. Точный вывод о долговременных тенденциях изменения кривой перестройки можно сделать только при наличии точки перегиба функции. Если максимальный элемент массива $f_1(i)$ был меньше какого-либо элемента массива $f(i)$, алгоритм повторялся с первого этапа.

При удачном завершении этапов 1–4 алгоритма на пьезокерамическом актуаторе выставлялось напряжение, соответствующее максимальному значению массива $f_1(i)$ (максимальному экстремуму функции), которое в случае, представленном на рис. 3, равно +180 В. После этого в несколько раз (от 2 до 5) уменьшалась частота следования импульсов ВЧ-качки, что переводило лазер в режим малого энергопотребления и уменьшало переходные тепловые процессы. Система автоматической подстройки частоты (АПЧ) за счет плавного изменения напряжения на актуаторе в режиме реального времени удерживала в пределах динамического диапазона сигнал опорного детектора вблизи максимального экстремума. На краях динамического диапазона (–248 или +248 В) происходил автоматический перезапуск алгоритма с первого этапа.

Проверка работы алгоритма производилась путем измерения заданной концентрации SF_6 в воздухе с использованием экспериментальной установки (см. рис. 1). Измерения концентрации проводились в трех режимах:

- 1) без использования указанного алгоритма стабилизации;
- 2) с использованием алгоритма стабилизации при естественном охлаждении лазера;
- 3) с использованием алгоритма стабилизации при принудительном воздушном охлаждении лазера с помощью вентилятора.

В первом случае точность измерений обеспечивалась нормировкой сигналов с ОАД-1 на сигнал с ОАД-2. При периодической флуктуации мощности излучения амплитуды сигналов ОАД-1 и ОАД-2 изменялись синхронно, а их отношение (при постоянстве длины волны) оставалось на одном уровне (см. рис. 4, кривая 3). В случае изменения длины волны, как это было показано выше, отношение менялось. Поскольку в ходе экспериментов в рабочем канале детектора ОАД-1 устанавливалась относительно

небольшая концентрация SF₆ на уровне 60 ppb, изменение отношения достигало нескольких десятков процентов. В частности, для случая, представленного на рис. 5, дисперсия среднего значения измеренной концентрации SF₆ составляла 42%. Полученный результат в целом согласуется с теоретическими оценками, сделанными выше (см. табл. 1, стб. 5).

Результаты экспериментов с использованием алгоритма стабилизации при различных тепловых режимах работы лазера представлены на рис. 5.

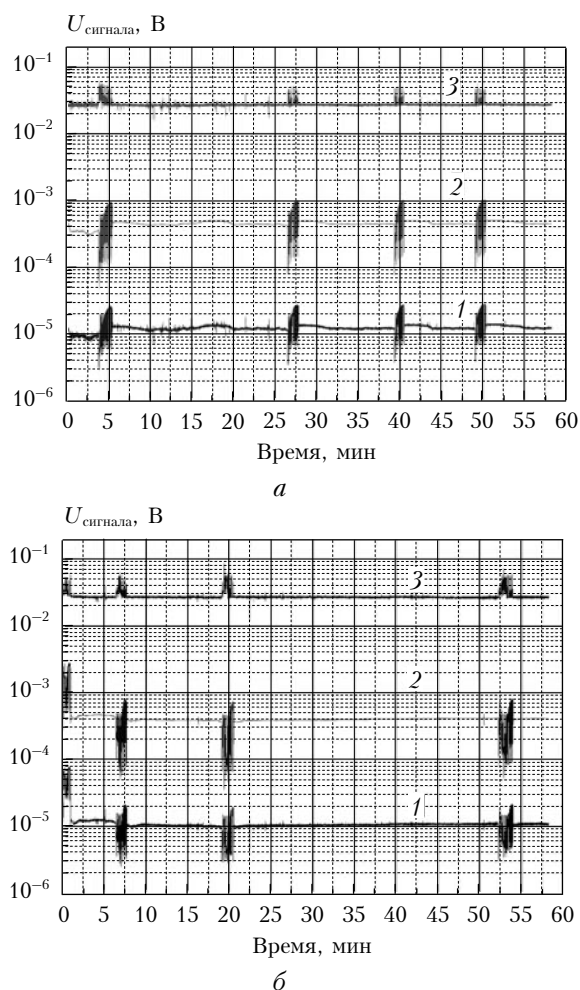


Рис. 5. Результаты измерения относительной концентрации SF₆ в газовой пробе в схеме со стабилизацией длины волны: *а* – естественное охлаждение лазера; *б* – принудительное охлаждение лазера вентилятором. 1 – сигнал с ОАД-1; 2 – сигнал с опорного детектора ОАД-2; 3 – отношение сигналов ОАД-1 и ОАД-2, отн. ед.

Стабилизация линии излучения существенно уменьшала дисперсию измерений концентрации тестовой газовой смеси по сравнению с режимом 1 (см. рис. 4). Минимальная дисперсия наблюдалась при принудительном охлаждении лазера с помощью вентилятора (рис. 5, *б*), что, видимо, связано с более стационарным тепловым режимом. На рис. 5 видны периоды вынужденной перестройки системы АПЧ краев динамического диапазона и включения алгоритма захвата и удержания линии 10P(16).

При определении дисперсии измеряемой концентрации исключались области вынужденной перестройки системы. В частности, для случая, представленного на рис. 5, *а*, дисперсия измерений определялась в интервале от 7-й до 25-й мин и составила по кривой 1 6,28%, а по нормированной кривой 3 – 3,24%. За время работы экспериментальной установки оптическая длина резонатора лазера подстраивалась 4 раза. Таким образом, нормировка сигналов с измерительного детектора ОАД-1 на сигналы с опорного детектора ОАД-2 позволила повысить точность измерения относительной концентрации элегаза в пробе воздуха в 1,9 раза. В данном случае отношение сигналов ОАД-1 и ОАД-2 не зависит от длины волны, так как она постоянна. По этой причине уменьшение дисперсии измерений достигается за счет подавления флуктуаций мощности лазера на линии 10P(16).

Для вычисления дисперсии измерений при работе лазера с принудительным воздушным охлаждением (рис. 5, *б*) был выбран интервал от 25-й до 50-й мин. Дисперсия концентрации на этом участке составила 2,94% для кривой 1 и 2,08% для нормированной кривой 3. Обращает на себя внимание, что отвод тепла от корпуса лазера с помощью вентилятора снижает флуктуации мощности излучения и позволяет системе реже включать алгоритм вынужденной корректировки линии генерации лазера (3 раза за 60 мин).

На рис. 4 и 5 видны случайные выбросы сигналов измерительного и опорного детекторов, которые в какой-то мере влияют на результаты расчета дисперсии. Данные выбросы могут быть связаны с шумами АЦП, внешними акустическими помехами и электромагнитными наводками от ВЧ-генератора лазера.

Однако основными причинами остаточной дисперсии измеряемой концентрации на уровне порядка 2%, на наш взгляд, являются флуктуации мощности лазерных импульсов, периодическое (с частотой 32 Гц в условиях эксперимента) включение АПЧ, неоптимальность используемого математического алгоритма усреднения результатов измерений и, вероятно, конструктивные особенности детекторов. В результате сигнал опорного детектора не вполне адекватно отслеживает флуктуации мощности лазера и при нормировке появляется остаточная дисперсия.

Заключение

В статье рассмотрены вопросы установки и долговременной стабилизации линии излучения CO₂-лазера, предназначенного для работы в составе лазерного оптико-акустического детектора SF₆. При использовании в лазерном ОА-детекторе SF₆ CO₂-лазера без селектора длин волн дисперсия измерений при измерении малых концентраций SF₆ может достигать десятков процентов при переходе лазера с одной линии генерации на другую в окрестности линии 10P(20). Для повышения точности измерений предложен метод поиска и удержания требуемой линии генерации лазера с помощью внешней отпаянной

нерезонансной оптико-акустической ячейки, заполненной смесью SF₆ и азота. Для селекции длин волн лазера таким способом разработан алгоритм определения и удержания длины волны. Результатом действия алгоритма были задание и последующее удержание с помощью пьезоэлектрического актуатора длины резонатора, соответствующей линии генерации 10P(16). Дополнительно для исключения влияния перескоков линий генерации в течение длительности импульсов предложено уменьшить длительность импульсов накачки до 25 мкс. Стабилизация линии излучения в схеме лазерного оптико-акустического детектора позволила снизить дисперсию измеряемой концентрации SF₆ в газовой пробе до уровня порядка 2%.

Необходимо отметить, что предлагаемый алгоритм стабилизации длины волны CO₂-лазера может быть использован для детектирования этилена, оптимальная линия генерации – 10P(14). В этом случае его действие будет еще более эффективным, поскольку пик поглощения этилена в этой области имеет существенно меньшую ширину по сравнению с SF₆. По этой причине поглощение на соседних линиях 10P(12) и 10P(16) падает по сравнению с 10P(14) примерно на порядок. По-видимому, такой алгоритм стабилизации можно рассмотреть применительно к детектору паров ацетона и его производных на линии изотопа ¹³CO₂ вблизи длины волны 11,2 мкм, а также в других случаях, когда необходимо задать длину волны CO₂-лазера вблизи центральных линий генерации в P- либо R-ветви и имеется газовый репер требуемой длины волны.

1. Lee Ch.M., Bychkov K.V., Kapitanov V.A., Karapuzikov A.I., Ponomarev Yu.N., Sherstov I.V., Vasiliev V.A. High-Sensitivity Laser Photoacoustic Leak Detector // Opt. Eng. 2007. V. 46. 064302.
2. Пат. РФ на полезную модель № 38228, 51746, 90905.
3. Карпузииков А.И., Шерстов И.В., Агеев Б.Г., Капитанов В.А., Пономарев Ю.Н. Лазерные сенсоры-газоанализаторы на основе интеллектуальных волноводных CO₂-лазеров и резонансных оптико-акустических детекторов и их приложения // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 5. С. 453–458.
4. Долин А.П., Карпузииков А.И., Ковалькова Ю.А. Эффективность использования лазерного течеискателя газа «КАРАТ» для определения места и уровня развития дефектов электрооборудования // Электро. 2009. № 6. С. 25–28.
5. Cox D.M., Gnauck A. Continuous-wave CO₂ laser spectroscopy of SF₆, WF₆, and UF₆ // J. Mol. Spectrosc. 1980. V. 81, N 1. P. 207–215.
6. Buholz N.E. Selected two-color operation of a CO₂ laser // IEEE J. Quantum Electron. 1980. V. 16, N 8. P. 835–837.
7. Buholz N.E. Five Color CO₂ Laser Stabilization and Switching // IEEE J. Quantum Electron. 1982. V. 18, N 9. P. 1326–1331.
8. Degnan J.J. The waveguide Laser: A Review // Appl. Phys. 1976. V. 11. P. 1–33.
9. Miklos A., Hess P., Bozoki Z. Application of Acoustic Resonators in Photoacoustic Trace Gas Analysis and Metrology // Rev. Sci. Instrum. 2001. V. 72, N 4. P. 1937–1955.
10. Plinski E.F. The laser pulse from a rf waveguide CO₂ laser // Appl. Phys. B. 2003. V. 76, N 4. P. 375–382.
11. Wojaczek D.A., Plinski E.F. Thermodynamic and optical parameters of the RF pulse excited slab-waveguide CO₂ laser // Opt. Appl. 2005. V. XXXV, N 2. P. 215–224.

D.A. Kashtanov, V.A. Vasiliev, A.I. Karapuzikov, I.V. Sherstov. Stabilization of waveguide CO₂ laser line for laser PA SF₆ leak detector.

Compact RF pumped waveguide pulse-periodic CO₂ laser emitted on the 10P(16) line with automatic control system were designed for increasing the accuracy of SF₆ concentration measurements in air using the photoacoustic detector. Non-selective cavity was used in the laser. Cavity length was tuned by PZT. Sealed-off SF₆-filled photo-acoustic cell was used as a reference point for identification of 10P(16) laser emission line. An algorithm of search and confinement of laser emission line was developed. Influence of various factors on parameters of laser spectra was defined. The measurement error of SF₆ concentration in air is less than 3% when using the developed laser stabilization algorithm. Capability of using this algorithm for CO₂ laser stabilization on another emission lines is discussed, in particular for ethylene or acetone impurity detection.