

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ И РАДИООПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

УДК 621.373.826

**Оптимизация спектрального состава излучения
малогабаритного CO₂-лазера для оптико-акустического
газоанализатора SF₆**

**К.Г. Зенов¹, А.И. Карапузиков^{1, 2}, М.Б. Мирошниченко^{✉ 1},
Е.Г. Нехорошева^{3*}**

¹ООО «Специальные технологии»

630060, г. Новосибирск, Зеленая горка, 1/3

²Институт лазерной физики СО РАН

630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 15Б

³Новосибирский государственный технический университет

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Поступила в редакцию 5.05.2023 г.;

после доработки 20.06.2023 г.;

принята к печати 23.06.2023 г.

Представлены упрощенная математическая модель и результаты экспериментальных исследований спектрального состава излучения малогабаритного волноводного CO₂-лазера с ВЧ-возбуждением для лазерного оптико-акустического газоанализатора с целью повышения точности измерений путем исключения из спектра излучения лазера нежелательных линий 10R-ветви. Измерены сигнатуры лазерного излучения при различных параметрах резонатора и активной среды без использования дополнительных элементов селекции. Показано, что оптимальные сигнатуры могут быть достигнуты путем выбора соответствующего давления газовой смеси и коэффициента пропускания выходного зеркала, а также оптимальной длины резонатора, которая может быть получена методом варьирования номинальной (базовой) длины в пределах 2 мм. Эффективность оптимизации спектрального состава лазерного излучения подтверждена на практике статистическими данными для 64 лазеров. Полученные результаты открывают новые возможности для повышения точности измерений оптико-акустического лазерного газоанализатора SF₆ и его применения в различных областях науки и техники.

Ключевые слова: CO₂-лазер, стабилизация, газоанализ, сигнатура, селекция длин волн, средний ИК-диапазон; CO₂ laser, stabilization, gas analysis, signature, wavelength selection, mid-infrared range.

Введение

Гексафторид серы, или элегаз (SF₆), широко используется в высоковольтной электротехнике благодаря высокому напряжению пробоя. Для предотвращения техногенных аварий необходимо контролировать утечки газа в процессе производства и эксплуатации электротехнического оборудования. Оптико-акустическая спектроскопия является одним из наиболее чувствительных методов контроля концентрации SF₆. Метод основан на преобразовании поглощенного лазерного излучения в энергию звуковой волны. По амплитуде звуковой волны можно судить о концентрации исследуемого вещества.

Для эффективного мониторинга элегаза необходим лазер, способный генерировать излучение с дли-

ной волны ~10,6 мкм, в которой расположены основные линии поглощения SF₆ в воздухе [1]. При создании газоанализатора SF₆ на основе такого лазера необходимо обеспечить ряд технических характеристик, таких как высокая чувствительность, компактность, низкое энергопотребление, высокая надежность и другие параметры, которые сделают возможным широкое применение данного газоанализатора.

Для решения этой задачи наилучшим образом подходит CO₂-лазер благодаря расположению ряда центральных линий излучения в полосе 10P в области максимального поглощения молекулы SF₆. С его помощью в [2] были измерены концентрации SF₆ в атмосфере менее 1 ppb. Идеальным для мониторинга SF₆ был бы стабилизированный волноводный CO₂-лазер, работающий на линии 10P(16) (10,5514 мкм). Конструкция такого лазера требует использования специальных элементов селекции, что неизбежно увеличивает габаритные размеры и повышает стоимость изделия. В ряде случаев при создании коммерчески доступных приборов широкого применения можно использовать более дешевые

* Константин Георгиевич Зенов (zkg@ngs.ru); Александр Иванович Карапузиков (karapuzikov@mail.ru); Максим Борисович Мирошниченко (mirmb1989@gmail.com); Екатерина Григорьевна Нехорошева (k.nehoroshewa2017@yandex.ru).

модели CO₂-лазеров, удовлетворяющие определенным требованиям.

CO₂-лазеры для портативных лазерных оптико-акустических газоанализаторов SF₆ в атмосфере должны быть компактны, просты, иметь относительно низкую себестоимость, обеспечивать возможность работы в импульсно-периодическом (ИП) режиме генерации при большой скважности импульсов, генерировать импульсы излучения достаточной мощности (средняя мощность порядка сотен мВт) на линиях, попадающих в полосу поглощения SF₆. ИП-режим с большой скважностью (~ 100) позволяет существенно уменьшить энергопотребление прибора [3].

Почти всеми этими свойствами обладают волноводные CO₂-лазеры с ВЧ-разрядом, которые отличаются отсутствием высокого напряжения, возможностью получения ИП-режима путем модуляции ВЧ-мощности, длительным сроком службы, компактностью конструкций. Однако спектр излучения таких лазеров при отсутствии элементов селекции длин волн в общем случае может содержать линии 10R-ветви, на которых отсутствует поглощение молекул SF₆. Эта ситуация усугубляется при уменьшении размеров лазера, особенно длины резонатора, так как при этом усложняется селекция длин волн в связи с увеличением частотного интервала между продольными модами. Дополнительным негативным фактором является ИП-режим генерации, поскольку в таком режиме возможна перестройка резонатора в течение импульса.

Цель настоящей работы состоит в повышении точности измерений оптико-акустического газоанализатора на основе CO₂-лазера путем исключения нежелательных линий из спектра излучения лазера.

Одними из главных факторов, влияющих на точность измерений оптико-акустического газоанализатора, являются стабильность и мощность источника излучения, в нашем случае CO₂-лазера. Для оптимизации работы CO₂-лазера в качестве источника излучения требовалось подобрать ряд параметров лазера, включая рабочее давление, пропускание выходного зеркала и длину резонатора, обеспечивающих генерацию требуемого набора спектральных линий без применения специальных элементов селекции (дифракционные решетки, пьезокерамические элементы, селективные зеркала) для работы оптико-акустического газоанализатора SF₆.

Для этого теоретически рассмотрены на качественном уровне факторы, определяющие изменение сигнатуры лазера; проведены эксперименты по подбору параметров для создания условий генерации сигнатур, обеспечивающих оптимальный набор линий для лазерного оптико-акустического газоанализатора SF₆.

1. Сигнатура выходного излучения малогабаритного CO₂-лазера

Для CO₂-лазера характерно усиление на переходах полос (00⁰1–10⁰0) и (00⁰1–02⁰0). Следовательно, при отсутствии элементов селекции может

наблюдаться генерация лазерного излучения на многих переходах (или линиях). Из-за сильной связи между вращательными уровнями и однородного уширения, как правило, одновременно возможна генерация только на одной линии. Если медленно увеличивать длину резонатора CO₂-лазера, можно наблюдать определенную последовательность появления линий и вариации мощности лазерного излучения. При изменении расстояния между зеркалами приблизительно на 5,3 мкм (т.е. на половину длины волны), последовательность линий повторяется с небольшими изменениями. Сигнатурой лазера называется профиль изменения выходной мощности при небольших изменениях длины резонатора [4].

Работы многих авторов (например, [5, 6]) посвящены прогнозированию лазерных сигнатур. Мы взяли за основу подход, представленный в работе [5]. Оценки проводились для волноводного CO₂-лазера с номинальной длиной резонатора d_0 порядка 156–158 мм, работающего при давлении газовой смеси $p = 120$ торр. Для типичных газовых смесей волноводного CO₂-лазера ширина линии $\Delta\nu$ растет с увеличением давления примерно на 5 МГц/торр, т.е. для $p = 120$ торр $\Delta\nu \approx 600$ МГц.

Резонатор лазера фактически представляет собой интерферометр Фабри–Перо (ИФП). Для оценки положения основных продольных мод ИФП будем считать, что расстояние между модами в частотной области равно c/d_0 (c – скорость света в вакууме). Это соответствует изменению d_0 на $\lambda_i/2$, где λ_i – длина волны излучения. Будем считать положение центров линий генерации на линиях λ_i совпадающими с максимумами пропускания ИФП на данных линиях. Таким образом, для каждой длины волны существуют «гребенки» резонансов ИФП, расположенных через $\lambda_i/2$. Для определенности далее будем рассматривать по семь линий в P- и R-ветвях переходов 10 мкм CO₂ (от 10R(14) до 26R(26) и от 10P(14) до 10P(26)). Именно на этих линиях генерация в нашем лазере наиболее вероятна.

Для привязки положения рассматриваемых линий к длине ИФП рассмотрим остаток от деления d_0 на $\lambda_i/2$, $d_{xi} = \text{mod}(d_0; \lambda_i/2)$. Для всех длин волн d_{xi} лежит в интервале $0 \leq d_{xi} \leq \lambda_i/2$.

Обозначим через Δd «геометрическую» ширину линии усиления [4]:

$$\Delta d = \Delta\nu\lambda_i d_0 / c. \quad (1)$$

Для $\lambda_i = 10,6$ мкм и $d_0 = 156$ мм $\Delta d \approx 3,3$ мкм. Примем данное значение для всех рассматриваемых линий генерации, поскольку эта величина не влияет на положение центров линии генерации.

Запишем функцию Лоренца через Δd :

$$g_i(d) = \frac{g_{0i}(\Delta d/2)^2}{(d - d_{xi})^2 + (\Delta d/2)^2}, \quad (2)$$

где g_{0i} – коэффициент усиления слабого сигнала в центре i -й линии; d – изменение номинальной длины ИФП d_0 .

Для моделирования сигнатуры лазера воспользуемся формулой Ригрода для мощности излучения [7]:

$$P_{li} = \frac{P_s}{2} \frac{T\sqrt{1-a}}{(T+a-Ta)} [2g_i d_0 + \ln(1-T-a+aT)], \quad (3)$$

где P_{li} — выходная мощность лазера на i -й линии; P_s — мощность насыщения; a — полные диссипативные потери за двойной проход излучения по резонатору; g_i — коэффициент усиления малого сигнала на i -й линии; T — коэффициент пропускания выходного зеркала резонатора.

Таким образом, зная коэффициент усиления на соответствующей линии генерации, можно построить для каждой линии контур выходной мощности в зависимости от коэффициента усиления. Пример подобного построения, без учета взаимного влияния линий генерации, представлен на рис. 1. Для расчета были использованы экспериментально измеренные значения коэффициентов усиления g_{0i} из работы [5] для указанных выше линий генерации. Параметр насыщения был принят равным 400 Вт, коэффициент пропускания выходного зеркала — 5%, диссипативные потери резонатора — 2%. При таких параметрах активной среды и резонатора расчетная выходная мощность лазера сравнима с мощностью импульсов генерации реального лазера, которая рассмотрена в п. 2.

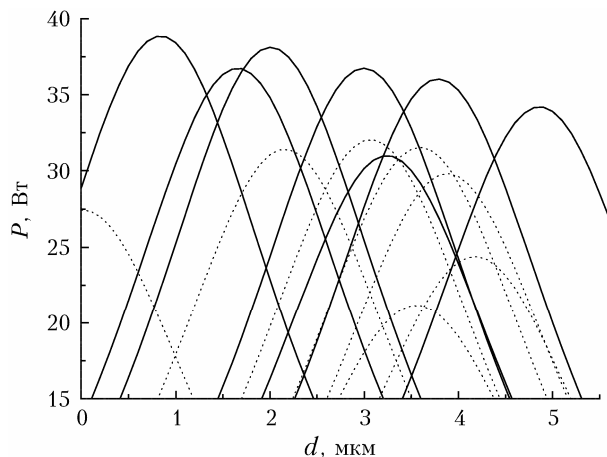


Рис. 1. Семейство линий генерации 10P- (сплошные кривые) и 10R-ветвей (пунктирные), рассчитанных по [5] для $d_0 = 157454$ мкм

Как видно из рис. 1, линии генерации 10R-ветви имеют существенно меньшую амплитуду, что, в принципе, облегчает задачу селекции. Тем не менее существует область длин резонатора, в которой амплитуды линий 10P- и 10R-ветвей сопоставимы, что повышает вероятность генерации нежелательных линий 10R-ветви.

Если исключить из этого семейства кривых контуры линий, расположенные ниже контуров более мощных линий, и ограничить для каждой линии область существования генерации до точки пересечения с соседней линией, можно построить зависимости, представленные на рис. 2 для двух значений d_0 ,

которые фактически являются смоделированными сигнатурами лазера, наблюдаемыми при изменении номинальной длины резонатора на 5 мкм. Отличия представленных сигнатур заключаются в отсутствии на рис. 2, а линий 10R-ветви, что является необходимым условием для правильной работы лазерного оптико-акустического газоанализатора SF₆.

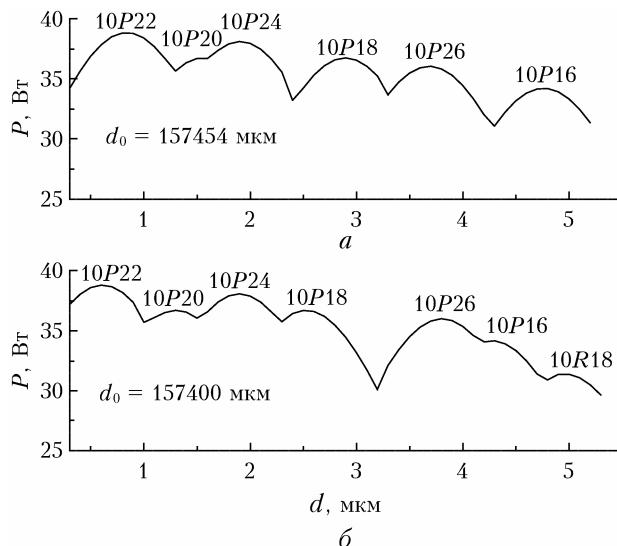


Рис. 2. Расчетные сигнатуры линий генерации при изменении номинальной длины ИФП d_0 на 5 мкм: а — $d_0 = 157454$ мкм (линии 10R-ветви отсутствуют); б — $d_0 = 157400$ мкм (наблюдается нежелательная линия 10R18)

Расчетные сигнатуры линий на рис. 2 в целом сопоставимы с сигнатурой, представленной на рис. 3 в работе [5], где линии генерации задаются параболой. При моделировании сигнатур исключение нежелательных линий может быть получено незначительным изменением номинальной длины ИФП d_0 . Более того, были обнаружены области длин d_0 , в которых нежелательные линии генерации не появлялись при изменении d_0 в пределах нескольких десятков микрометров. Конечно, сигнатуры лазера, полученные с помощью представленной модели, являются достаточно грубым приближением к сигнатурам реально работающего лазера, поскольку не учитывается зависимость параметра насыщения от длины волны и другие факторы. Однако наличие достаточно протяженных областей, в которых отсутствуют нежелательные линии генерации, является основанием для экспериментальной проверки.

2. Описание эксперимента

Схема экспериментальной установки для исследования лазерных сигнатур представлена на рис. 3. В ходе экспериментальных исследований решались две задачи.

1. Определение параметров активной среды и резонатора для достижения генерации исключительно на сильных линиях 10P-ветви диапазона 10 мкм.
2. Определение влияния изменения длины резонатора в пределах 2 мм для полного исключения генерации нежелательных линий R-ветви.

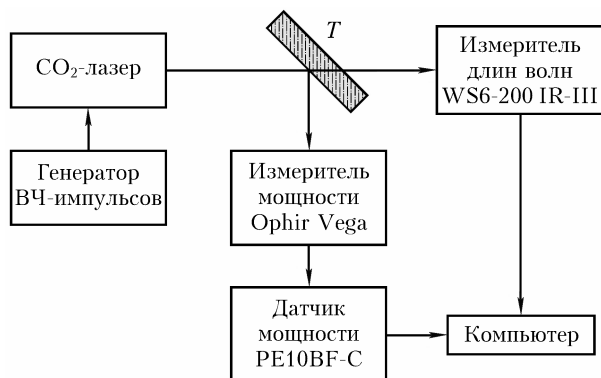


Рис. 3. Схема экспериментальной установки; T — 50%-й светоделитель (пластинка из ZnSe)

Для оптимизации параметров активной среды и резонатора были проведены эксперименты по наблюдению лазерных сигнатур при различных коэффициентах пропускания выходного зеркала ($T = 3, 5$ и 8% на длине волны $10,6$ мкм) при изменении рабочего давления газовой смеси $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} = 1:1:5 + 5\%\text{Xe}$ в диапазоне $60\text{--}180$ торр.

Для получения лазерных сигнатур лазер работал в ИП-режиме с частотой следования импульсов генерации 220 Гц и длительностью импульсов 30 мкс. Мощность импульсов возбуждения составила ~ 300 Вт. Длительность серии измерений колебалась в пределах от 500 с до 30 мин. В результате поглощения в активной среде ВЧ-импульсов накачки алюминиевый корпус лазера постепенно нагревался, вызывая изменение длины резонатора и соответствующее скачкообразное изменение линий генерации в лазерной сигнатуре. В экспериментах использовалось начальное (холодное) состояние лазера.

Измеритель длин волн WS6-200 IR-III, использованный в эксперименте, не давал информации о средней мощности лазерного излучения. Поэтому для сопоставления экспериментальных лазерных сигнатур с расчетными значениями мощности генерации мощность и длина волны измерялись одновременно двумя независимыми датчиками (рис. 3). На рис. 4 показаны типичные зависимости средней мощности лазерного излучения и длин волн в лазерной сигнатуре, наблюдаемой в течение 500 с. В таблице приведены величины дисперсии средней мощности на различных линиях экспериментальной лазерной сигнатуры.

Отметим, что графики на рис. 4 были получены для лазера с оптимизированными параметрами активной среды (давление газовой смеси — 150 торр) и резонатора (коэффициент пропускания выходного зеркала — 5%). Характерными особенностями такого лазера являются полное отсутствие линий генерации на R -ветви и относительно небольшая дисперсия средней мощности на различных линиях генерации (таблица). Более подробно этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Для определения оптимальных параметров активной среды и резонатора были проведены серии экспериментов при различных давлениях активной среды и различных коэффициентах пропускания

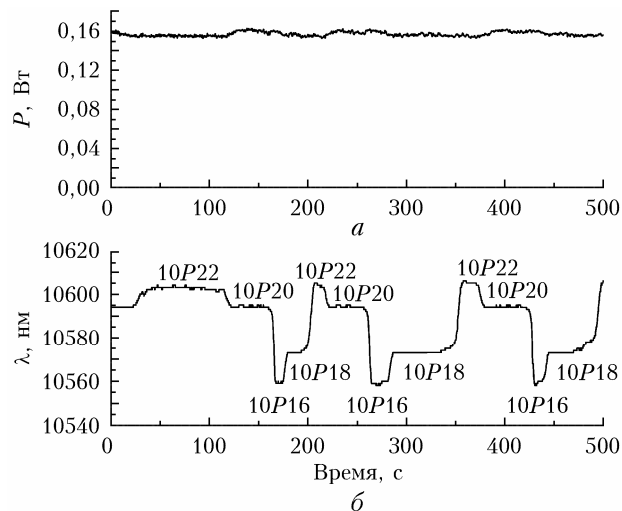


Рис. 4. Типичные зависимости от времени средней мощности генерации (a) и длины волн лазерного излучения (b)

Дисперсия средней мощности на различных линиях лазерной сигнатуры

Линия генерации	Длина волны, мкм	Средняя мощность, мВт	Дисперсия, мВт (%)
10P22	10,611	155	0,20 (0,13)
10P20	10,591	160	0,55 (0,30)
10P18	10,571	155	0,25 (0,16)
10P16	10,551	157	0,13 (0,08)

выходных зеркал резонатора. При этом измерялись только длины волн в лазерных сигнатурах, поскольку характер изменения мощности генерации оставался примерно таким, как на рис. 4, a .

Абсолютные значения средних мощностей генерации при различных давлениях и коэффициенте пропускания выходного зеркала, равном 5% , представлены на рис. 5, из которого следует, что оптимальным по мощности генерации является давление газовой смеси $p \approx 140\text{--}160$ торр. Для более устойчивой работы лазера в качестве рабочего давления было выбрано давление $p = 150$ торр, которое оставалось неизменным для всех лазеров.

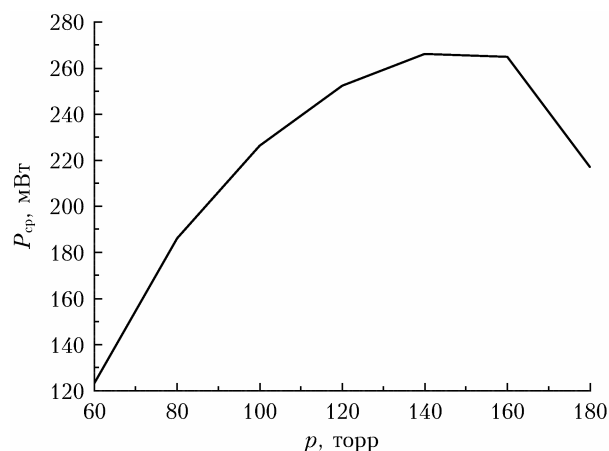


Рис. 5. Зависимость средней мощности излучения лазера от давления смеси для выходного зеркала с пропусканием 5% (мощность импульсов — 355 Вт, частота следования импульсов — 220 Гц, длительность импульсов — 30 мкс)

Измерение длины волны осуществлялось после юстировки лазера и длилось 30 мин для увеличения количества линий в сигнатуре. В общем случае генерация лазерного излучения могла происходить на нескольких центральных линиях $10P$ - и $10R$ -ветвей в зависимости от p газовой смеси и коэффициента пропускания выходного зеркала.

Изменение спектрального состава излучения в зависимости от p для различных T представлено на рис. 6 для P - и R -ветвей. Для обеих ветвей приведено количество генерируемых линий.

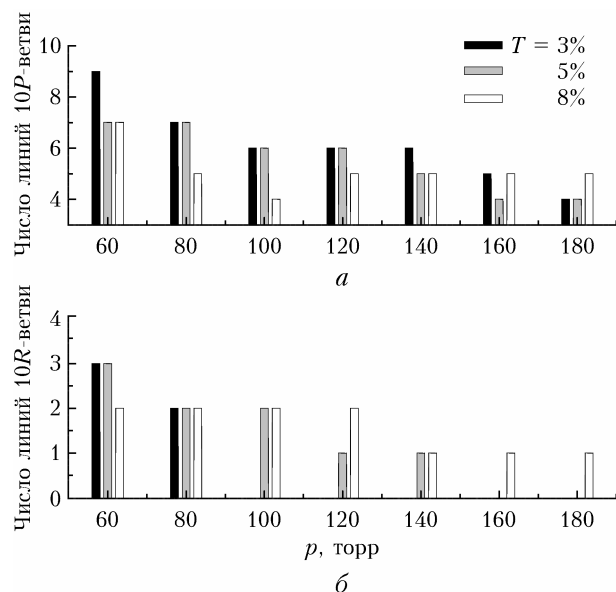


Рис. 6. Диаграммы зависимости числа генерируемых линий излучения P - (a) и R -ветвей (b) от давления газовой смеси при различных значениях пропускания зеркала

Из рис. 6 видно, что с увеличением давления газовой смеси уменьшается количество генерируемых линий как для $10P$ -, так и для $10R$ -ветвей из-за уширения контура усиления. При $p > 140$ торр для $T = 5$ и 3% практически отсутствуют линии $10R$ -ветви. По этой причине для обеспечения долговременной работы лазера без появления нежелательных линий $10R$ -ветви были выбраны $T = 5\%$ и $p = 150$ торр, учитывая ряд соображений, связанных со стабильностью, временем задержки зажигания разряда и мощностью генерации.

При таких параметрах активной среды и резонатора иногда наблюдалась кратковременная генерация на линиях $10R$ -ветви (см. рис. 6). Для полного исключения линий этой ветви были проведены эксперименты по изменению длины резонатора в пределах 2 мм. Для этого выходное зеркало резонатора устанавливалось на шайбы различной толщины, как показано на рис. 7, что позволяло менять длину резонатора от номинального значения ~ 157 мм с шагом около 0,1 мм.

Результаты оптимизации длины резонатора, исключающей генерацию нежелательных линий $10R$ -ветви, представлены в виде диаграммы на рис. 8.

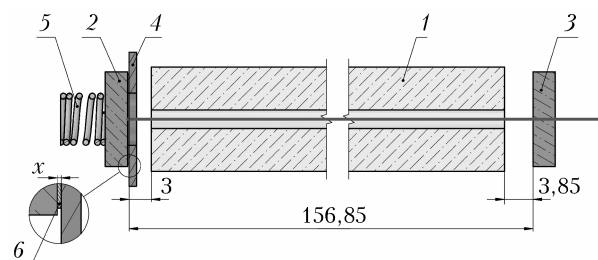


Рис. 7. Оптический резонатор лазера: 1 – волновод; 2 – заднее зеркало; 3 – выходное зеркало ($T = 5\%$); 4 – элемент конструкции лазера; 5 – упругий элемент для фиксации зеркала; 6 – шайба толщиной x (от 0,1 до 1,8 мм)

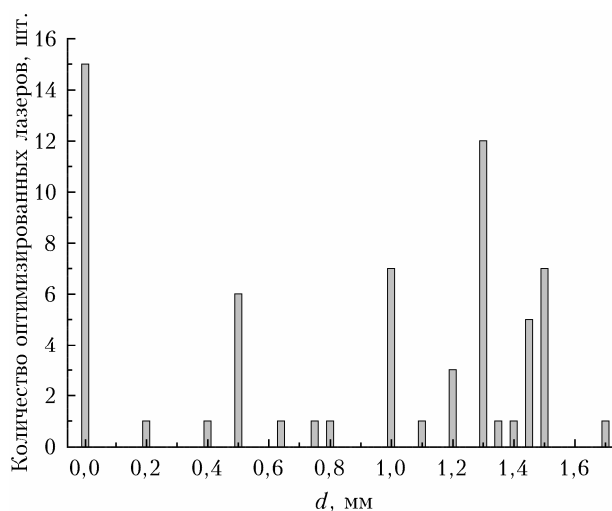


Рис. 8. Количество оптимизированных лазеров путем изменения базовой длины резонатора ($d_0 = 157$ мм)

Всего было оптимизировано 64 лазера производства ООО «Специальные технологии». Эксперименты проводились с 2019 по 2023 г.

3. Результаты и обсуждение

Как следует из рис. 8, распределение числа оптимизированных лазеров является неравномерным, поскольку для различных лазеров оптимальный результат достигался при различных длинах резонатора. Для нескольких лазеров требовалась индивидуальная подгонка длины резонатора. Этот факт можно объяснить технологическим допуском на линейные размеры конструктивных элементов лазеров, а также некоторыми изменениями конструкции лазеров за обозначенный период измерений. Кроме того, различным могло быть положение волновода относительно зеркал резонатора, возникающее при сборке лазеров. Это вызывает изменение расстояния от конца волновода до зеркал резонатора, что, как показано в работе [6], также приводит к изменению сигнатуры лазерного излучения. Для уменьшения влияния данных факторов перспективным можно считать повышение требований к точности изготовления деталей лазеров и точности позиционирования волновода в оптический резонатор

при сборке. Это позволит уменьшить разброс оптимальных длин резонатора и таким образом оптимизировать производство.

Заключение

На основе комплекса теоретических и экспериментальных исследований был разработан алгоритм оптимизации параметров активной среды и резонатора малогабаритного волноводного CO₂-лазера с ВЧ-возбуждением, который позволяет управлять сигнатурами лазерного излучения и, в частности, исключать генерацию на линиях 10 мкм 10R-ветви без использования дополнительных элементов селекции. Это важно для лазеров, применяемых в составе лазерного оптико-акустического газоанализатора SF₆. В ходе проведенных работ в течение более трех лет были измерены параметры различных лазеров с небольшими изменениями номинальной длины резонатора и взаимного расположения конструктивных элементов, что позволило собрать соответствующую статистику. За указанный период не было зарегистрировано отказов лазеров такого типа, изготовленных по предложенной технологии, что свидетельствует о высокой надежности изделий и дает основание для расширения областей их применения.

Список литературы

1. 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. DOI: 10.1016/0022-2852(80)90338-0.
2. Sherstov I.V., Vasiliev V.A. Highly sensitive Laser Photo-acoustic SF₆ gas analyzer with 10 decades dynamic range of concentration measurement // Infrared Phys. Technol. 2021. V. 119. P. 103922. DOI: 10.1016/j.infrared.2021.103922.
3. Шерстов И.В., Васильев В.А., Карапузиков А.И., Зенов К.Г., Пустовалова Р.В. Снижение энергопотребления лазерного оптико-акустического газоанализатора SF₆ // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 4. С. 117–124.
4. Plinski E.F., Wojaczek D.A., Witkowski J.S., Izworowski A. The information system in investigations of the laser signature phenomenon // Proc. Institute of Telecommunications and Acoustics; Institute of Engineering Cybernetics, Wrocław University of Technology. 2005. V. 27. P. 50–370. URL: <http://www.dgao-proceedings.de>.
5. Schiffner G. Prediction of CO₂ laser signatures // IEEE J. Quant. Electron. 1972. V. 8. P. 877.
6. Waksberg A.L., Boag J.C., Sizgoric S. Signature variations with mirror separation for small sealed CO₂ lasers // IEEE J. Quant. Electron. 1971. V. 7. P. 29–35.
7. Wang J.H.S., Paranto J.N. RF-pumped infrared using transverse gas flow // J. Quant. Electron. 1984. V. 20. P. 284288.

K.G. Zenov, M.B. Miroshnichenko, A.I. Karapuzikov, E.G. Nehorosheva. Optimization of the spectral composition of radiation from a compact CO₂ laser for an optoacoustic gas analyzer of SF₆.

A simplified mathematical model and the results of experimental studies on the spectral composition of radiation from a compact waveguide CO₂ laser with RF excitation for a laser opto-acoustic gas analyzer are presented. The aim is to improve measurement accuracy by eliminating unwanted 10R-branch lines from the laser spectrum. Laser radiation signatures are measured under various resonator and active medium parameters without the use of additional selection elements. It is demonstrated that optimal signatures can be achieved by selecting the appropriate pressure of the gas mixture, the transmittance coefficient of the output mirror, and the optimal resonator length, which can be obtained by varying the nominal (base) length within a range of 2 mm. The effectiveness of optimizing the spectral composition of laser radiation is practically confirmed by statistical results for 64 lasers. The open up new possibilities for improving the measurement accuracy of SF₆ laser opto-acoustic gas analyzers and extending its application in various fields of science and technology.