

УДК 621.373.826

АНАЛИЗАТОР ВЫДЫХАЕМОГО ВОЗДУХА: БОРЬБА С ШУМАМИ И ПОМЕХАМИ

Е. Ю. Хаджийская, аспирант РТУ МИРЭА, базовая кафедра № 343 ИОФ РАН, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0002-9115-9871, e-mail: lizahajiiskaya@yandex.ru

Е. В. Степанов, д.ф.-м.н, профессор, заведующий отделом ИОФ РАН, Москва, Россия;
orcid.org/0000-0002-9297-4093, e-mail: eugenestepanov@yandex.ru

Рассмотрен метод повышения чувствительности регистрации слабого резонансного поглощения в выдыхаемом воздухе с использованием перестраиваемых диодных лазеров (ПДЛ) в импульсно-периодическом режиме. Цель работы – минимизация влияния белого шума и интерференционных помех при измерении изотопного состава углекислого газа ($\delta^{13}\text{CO}_2$) в дыхательных пробах. Описаны характеристики используемого ПДЛ с распределённой обратной связью, методы подавления шумов и повышения точности измерений, включающие аппаратные (накопление сигнала, дифференцирование, интегрирование, отбор лазеров, юстировка оптической схемы) и программные подходы (фурье-фильтрация и программное дифференцирование). Проведены экспериментальные исследования зависимости отношения сигнал-шум от числа отражений лазерного луча и количества накоплений. Установлено, что при числе отражений 6 и 200 накоплениях достигается оптимальный баланс между увеличением оптической длины пути и снижением интерференционных искажений. Полученные результаты подтверждают эффективность предложенного подхода и демонстрируют перспективность применения ПДЛ для неинвазивного анализа изотопного состава выдыхаемого воздуха с высокой точностью и чувствительностью.

Ключевые слова: перестраиваемый диодный лазер, импульсно-периодический режим, $\delta^{13}\text{CO}_2$, выдыхаемый воздух, шумы, фурье-фильтрация, газоанализ.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-228-237

Введение

Анализ выдыхаемого воздуха признан перспективным неинвазивным (то есть не требующим проникновения внутрь пациента) методом ранней диагностики различных заболеваний. В частности, изотопные показатели углекислого газа $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ уже используются в клинической диагностике – достаточно упомянуть дыхательный тест с меченой мочевиной для диагностики *Helicobacter pylori* (основан на измерении изотопического отношения углекислого газа $\delta^{13}\text{CO}_2$) [1]. Для клинического применения таких тестов требуется высокая точность определения изотопных отношений, обычно лучше 1‰ (0,1 %).

Существуют различные методы для определения $\delta^{13}\text{CO}_2$, такие как масс-спектрометрия в сочетании с газовой хроматографией (МС-ГХ), газовая хроматография (ГХ), электрохимические сенсоры (ЭХ), ультрафиолетовая хемотропная люминесценция (УФХЛ) и инфракрасная спектроскопия (ИКС) [2]. У каждого метода есть свои плюсы и минусы. Например, метод МС-ГХ не пригоден для проведения теста в реальном времени. В последние годы активно развивается альтернативный метод на основе диодно-лазерной спектроскопии (TDLAS – Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy), способный непосредственно и быстро измерять изотопный состав CO_2 в выдыхаемом воздухе без пробоподготовки. Также среди достоинств данного метода можно отметить высокую точность проводимых измерений, работу в непрерывном режиме, бесконтактность.

Так как в выдыхаемом воздухе концентрация углекислого газа составляет только 3 %, то требуется высокая точность измерения. Значительной проблемой являются различные шумы и помехи, которые существенно искажают конечные результаты. Самыми неприятными яв-

ляются внутренние шумы системы цифровой регистрации, которые имеют спектр белого шума. Именно борьбе с этим определенным видом помех посвящена данная статья.

Теоретическая часть

В разработанной экспериментальной установке использовался перестраиваемый диодный лазер (ПДЛ) с распределенной обратной связью, работающий при комнатных температурах вблизи длины волны 2,05 мкм (Laser Components, Германия). Точная подстройка оптической частоты излучения осуществлялась за счёт регулирования температуры лазера в диапазоне $-10...+50$ °С с использованием термоэлектрического элемента.

Лазер функционировал в импульсно-периодическом режиме для осуществления сканирования частоты. Частота повторения импульсов составляла 200 – 300 Гц при их длительности 3 – 4 мс. Накачка производилась импульсами тока с линейно возрастающей амплитудой, что обеспечивало равномерную перестройку частоты в пределах одного импульса. При таком режиме скорость перестройки достигала примерно $2 \text{ см}^{-1}/\text{мс}$, и за время импульса частота излучения изменялась в диапазоне $5 - 8 \text{ см}^{-1}$. Средняя мощность излучения составляла около 0,5 мВт [3].

Температура диодного лазера поддерживалась с точностью порядка 10^{-3} °С. В сочетании с высокой стабильностью параметров токовой накачки – длительности, частоты следования и амплитуды импульсов – это обеспечивало необходимую воспроизводимость частотной перестройки, амплитуды излучения и получаемых спектров пропускания [4].

У ПДЛ есть два основных режима работы: непрерывный и импульсно-периодический.

Импульсно-периодическая генерация перестраиваемых диодных лазеров широко используется в молекулярной спектроскопии и газоанализе благодаря ряду существенных преимуществ. К ним относятся высокая скорость перестройки частоты, возможность регистрации широких спектральных диапазонов, простота фиксации оптического нуля, снижение требований к параметрам самих лазеров, а также удобство реализации мультиплексирования и коммутации сигналов. Эти особенности делают спектральные системы на основе ПДЛ значительно проще и экономичнее в сравнении с традиционными аналогами.

В импульсном режиме одним из определяющих факторов является достижимая чувствительность к изменениям оптической плотности. Методы, эффективные при непрерывной генерации, такие как частотная модуляция высокой частоты или синхронное детектирование, в данном случае не применимы. Для корректной регистрации сигнала требуется широкополосная детекция (порядка 1 МГц), позволяющая сохранить временную структуру импульса, важную для анализа. При этом операции интегрирования и дифференцирования выполняются аппаратно – с использованием радиочастотных фильтров, что обеспечивает адекватную обработку импульсных сигналов в реальном времени.

Специфика импульсно-периодического режима работы диодных лазеров требует применения особых подходов к регистрации спектров. В этом случае форма лазерного импульса, содержащая информацию о резонансном поглощении, фиксируется с помощью высокоскоростных цифровых систем регистрации. Несмотря на возможные искажения, связанные с процессом дискретизации, использование цифровых методов открывает возможности для применения эффективных алгоритмов обработки сигналов, направленных на повышение чувствительности измерений.

В работе [5] был проведён подробный анализ источников шумов и помех, возникающих при импульсно-периодической накачке ПДЛ. Авторы проанализировали влияние различных источников шумов на снижение чувствительности при регистрации слабого резонансного поглощения и предложили способы их уменьшения или компенсации. Такой комплексный подход позволяет определить требования как к конструкции приборов, так и к алгоритмам цифровой обработки данных, что в итоге обеспечивает получение высокоточных и чувствительных спектроскопических измерений.

Основные источники шумов и помех при регистрации сигналов в газоанализаторе на основе перестраиваемого диодного лазера можно разделить на несколько категорий: 1) амплитудные шумы ПДЛ; 2) шумы фотоприемников; 3) шумы предварительных усилителей; 4) шумы цифровой регистрации; 5) оптические (интерференционные) помехи.

1. Спектр амплитудных шумов полупроводникового лазера характеризуется наличием «белого» плато в диапазоне средних частот, максимум которого наблюдается в области релаксационного резонанса (примерно 3 – 10 ГГц), а также фликкерной составляющей типа $1/f$, преобладающей на частотах ниже 1 МГц. Интенсивность шумов в зоне белого плато определяется выходной мощностью лазера. При мощности излучения 0,3 – 0,5 мВт плотность относительной интенсивности шумов находится в пределах $10^{-12} - 10^{-14} \text{ Гц}^{-1}$, что эквивалентно относительному уровню $10^{-6} - 10^{-8}$ в полосе 1 МГц. Вклад квантовых шумов в общий спектр незначителен (менее 10^{-14} Гц^{-1}) и уменьшается по мере увеличения мощности излучения [5].

В импульсно-периодическом режиме снижения влияния низкочастотной фликкерной компоненты достигают с помощью дифференцирования сигнала (высокочастотной фильтрации), а подавление резонансных эффектов обеспечивается ограничением полосы пропускания фотоприемников и усилителей до 5 МГц. При многомодовом излучении уровень амплитудных шумов может возрастать на 3 – 4 порядка вследствие конкуренции мод. Дополнительный вклад (до 10^{-5} от уровня сигнала) дают «технические» шумы, связанные с нестабильностью электрических контактов и шумами источников питания. Минимизация этих эффектов достигается использованием одномодовых лазеров с заранее контролируемыми шумовыми характеристиками.

2. Для регистрации излучения перестраиваемого диодного лазера в среднем инфракрасном диапазоне используют охлаждаемые фотодиоды на основе CdHgTe или InSb, работающие при температуре жидкого азота (около 77 К). Основным источником шумов в таких детекторах являются дробовые шумы, амплитуда которых зависит от мощности лазера и ширины полосы детектирования – чем они больше, тем выше уровень шума. В диапазоне длин волн 4 – 5 мкм при мощности излучения 0,3 – 0,5 мВт и полосе 2 – 5 МГц эти шумы составляют примерно $(0,2 - 1) \times 10^{-5}$ от мощности падающего сигнала и имеют равномерный (белый) спектр.

3. Для усиления сигнала с фотоприемников применяются токовые усилители с коэффициентом усиления 1 – 10 и рабочей полосой до 3 МГц. Их собственные шумы не превышают 0,5 мВ и также относятся к белым шумам. При использовании дифференциальных усилителей можно устранить постоянную составляющую лазерного сигнала и увеличить коэффициент усиления на 1 – 2 порядка без существенного роста уровня шумов – он остаётся ниже 1 мВ.

4. При измерении формы лазерного импульса и амплитуды резонансного поглощения точность ограничивается характеристиками аналого-цифровой системы: разрядностью АЦП и внутренними шумами регистратора. Для повышения точности применяются два подхода.

1. Свипирование нулевого уровня. Дополнительный цифроаналоговый преобразователь осуществляет контролируемое смещение нулевого уровня с амплитудой, равной минимальному шагу квантования (0,01 В). За один цикл измерений уровень сдвигается на 1/8 этой величины, что эквивалентно увеличению разрядности АЦП с 8 до 11 бит и уменьшению относительной дискретности до 1/2048. При восьми накоплениях точность улучшается до $\sim 6 \times 10^{-5}$.

2. Накопление сигналов. При наличии белого шума, сравнимого по амплитуде с шагом квантования, относительная погрешность уменьшается обратно пропорционально числу накоплений ($d_n = d_0/N$). При 256 накоплениях стандартное отклонение, обусловленное внутренними шумами системы, составляет $\sim 1,2 \times 10^{-5}$ [5].

Таким образом, при достаточном числе накоплений квантование перестает быть лимитирующим фактором – доминирующую роль начинают играть внутренние шумы цифрового тракта, обладающие белым спектром.

5. На точность регистрации сигнала существенно влияет интерференция, возникающая между основным лазерным пучком и его отражениями от различных оптических элементов системы, таких как окна криостата, стенки кювет, линзы и поверхности фотоприёмников. При наличии нескольких таких поверхностей в схеме могут возникать множественные осциллирующие модуляции с различными частотами повторения. В результате формируется сложная, нестабильная интерференционная картина, которая приводит к модуляции интенсивности и искажению формы зарегистрированного сигнала.

Методы повышения чувствительности при регистрации слабого резонансного поглощения с использованием перестраиваемых диодных лазеров можно условно разделить на два основных класса.

Аппаратные методы основаны на совершенствовании характеристик самого лазера, элементов оптической схемы и системы регистрации спектрального сигнала. Они направлены на оптимизацию параметров излучения, уменьшение шумов и повышение стабильности измерений за счёт конструктивных и схемотехнических решений.

Программные методы реализуются на этапе обработки данных и предполагают применение специальных алгоритмов цифровой фильтрации и математического анализа. Их цель – минимизация влияния помех и случайных шумов, а также выделение полезного сигнала на фоне флуктуаций, что обеспечивает повышение точности и воспроизводимости измерений без изменения аппаратной части установки. Классификация методов повышения чувствительности приведена на рисунке 1.

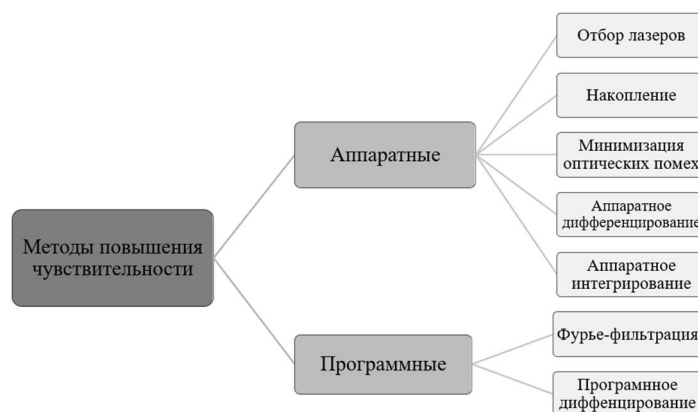


Рисунок 1 – Методы повышения чувствительности и точности
Figure 1 – Methods for sensitivity and accuracy increase

Для проведения измерений подбираются лазеры с максимально возможной выходной мощностью и устойчивым одномодовым режимом генерации. Из дальнейшего использования исключаются образцы, демонстрирующие повышенный уровень амплитудных шумов, возникающих вследствие межмодовой конкуренции, нестабильности электрических контактов или других технических факторов. Такой предварительный отбор позволяет обеспечить работу системы при относительно низких коэффициентах линейного и дифференциального усиления приемного тракта, что переводит измерения в режим, ограниченный собственными шумами системы регистрации. В этом случае достигается наиболее эффективное использование её динамического диапазона, составляющего 524 288 уровней (2^{19}) при 256 накоплениях и применении свипирования младшего разряда АЦП [6].

При накоплении сигнала, поскольку уровень белого шума уменьшается обратно пропорционально квадратному корню из числа накоплений ($1/\sqrt{N}$), увеличение количества усреднений существенно повышает отношение сигнал-шум. При числе накоплений $N = 256$ вклад амплитудных шумов одномодовых диодных лазеров становится практически незначительным – на уровне порядка 10^{-7} , тогда как дробовые шумы фотоприёмников проявляются в пределах $10^{-6} - 10^{-7}$. При малых коэффициентах усиления шумы приёмного тракта оказыва-

ются в 2 – 3 раза ниже внутренних шумов цифровой системы регистрации, так как их стандартное отклонение не превышает примерно $0,5 \times 10^{-5}$. В обычных условиях увеличение числа накоплений не приводит к искажению полезного сигнала и не снижает глубину модуляции, обусловленную интерференционными эффектами.

Для снижения интерференционных искажений необходимы точная юстировка всей оптической системы и использование элементов, которые не создают плоско-параллельных отражающих поверхностей. Фокусировка излучения выполняется с помощью зеркальных схем, а отражённое излучение выводится за пределы оптического тракта. Кроме того, при работе с накоплением сигнала можно уменьшить контрастность интерференционной картины за счёт контролируемого перемещения лазера вдоль оптической оси – на расстояние, превышающее половину длины волны его излучения. Главная цель состоит в том, чтобы амплитуда интерференционных помех оставалась ниже уровня шумов системы после накопления. Трудность заключается в том, что величина этих помех напрямую связана с точностью юстировки, и по мере её улучшения интерференционные искажения становятся заметны лишь после длительного накопления, что затрудняет настройку системы в реальном времени.

Для аппаратного выделения слабых изменений спектров пропускания применяется дифференциальное усиление – метод, позволяющий эффективно обрабатывать быстро изменяющиеся во времени сигналы. Этот подход обеспечивает несколько важных преимуществ:

- ослабление высокочастотной составляющей белого шума за счёт фильтрации;
- повышение контрастности слабых линий поглощения на фоне интенсивных соседних;
- смещение динамического диапазона в область малых амплитуд, что улучшает точность фиксации слабых сигналов [7].

Интегрирование сигнала аппаратным способом направлено на подавление высокочастотных шумов и позволяет сократить время накопления без потери чувствительности. Для этого используются электрические RC-цепи, настроенные на фильтрацию низких частот в нужном диапазоне, что обеспечивает более плавный сигнал и повышает стабильность измерений.

Фурье-фильтрация в цифровой форме служит для выделения полезного сигнала путём удаления высокочастотных шумов и помех. При обработке данных, полученных с перестраиваемых диодных лазеров, наиболее эффективным методом является фильтрация на основе быстрого преобразования Фурье (БПФ), реализованная в стандартных математических пакетах. Она даёт два основных преимущества: значительное увеличение отношения сигнал/шум при регистрации резонансных линий поглощения и снижение амплитуды интерференционных модуляций, что делает спектры более устойчивыми и точными.

Программное дифференцирование применяется к цифровым массивам спектральных данных, получаемых при помощи перестраиваемых диодных лазеров. Оно реализуется с использованием стандартных программ для обработки экспериментальных данных и обязательно сопровождается предварительным сглаживанием – например, с применением фурье-фильтрации. Это позволяет снизить уровень случайных шумов и повысить точность вычисления производных спектральных зависимостей, обеспечивая корректное выделение слабых спектральных особенностей [5].

Экспериментальные исследования

Исследования проводились в линейном канале регистрации лазерного излучения при температуре 38°C , выбранной в качестве опорной для стабилизации условий. Для проведения эксперимента была вскрыта аналитическая кювета, что позволило варьировать параметры прохождения излучения. Сигнал измерялся в пустой кювете, без пробы воздуха. На рисунке 2 приведена схема экспериментальной установки.

Помимо температуры были заданы другие параметры для проведения измерений, такие как: временные параметры лазера, управление током, число суммирований. Все используемые значения для экспериментальной установки приведены в таблицах 1 и 2.

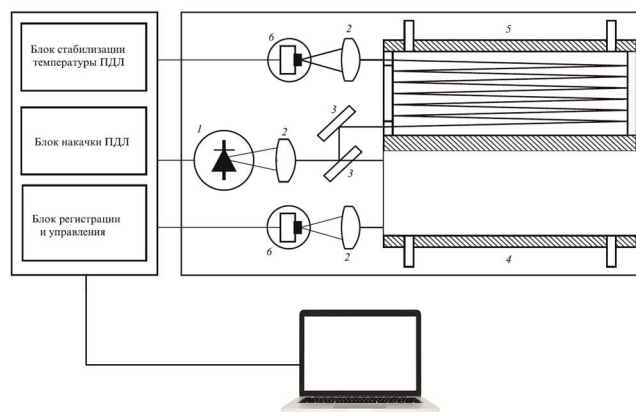


Рисунок 2 – Схема установки: 1 – ПДЛ; 2 – асферические микролинзы; 3 – зеркала; 4 – референсная кювета; 5 – аналитическая кювета; 6 – фотоприемники
Figure 2 – Schematic diagram of setup: 1 – tunable diode laser; 2 – aspherical microlenses; 3 – mirrors; 4 – reference cuvette; 5 – analytic cuvette; 6 – photodetectors

Таблица 1 – Временные параметры лазера в мкс
Table 1 – Time parameters of the laser (μs)

	Начало	Длина	Окончание
Период	0	12000	12000
Импульс	100	9000	9100
Запись	50	10000	10050

Таблица 2 – Параметры установки
Table 2 – Installation parameters

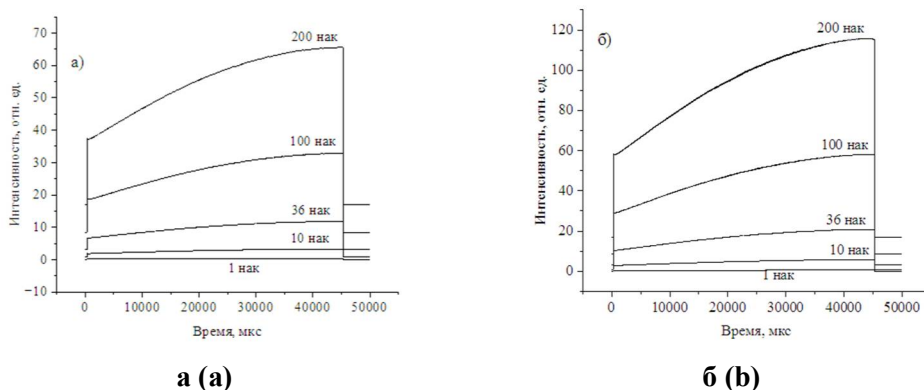
Управление током	
Начальный ток, мА	55
Наклон тока, мА/мкс	0,01
Конечный ток, мА	1,45
Число суммирований	
Аппаратных	1, 10, 36, 100, 200
Программных	1

Для каждого фиксированного значения числа отражений регистрировались спектры при различных режимах аппаратного накопления: 1, 10, 36, 100 и 200.

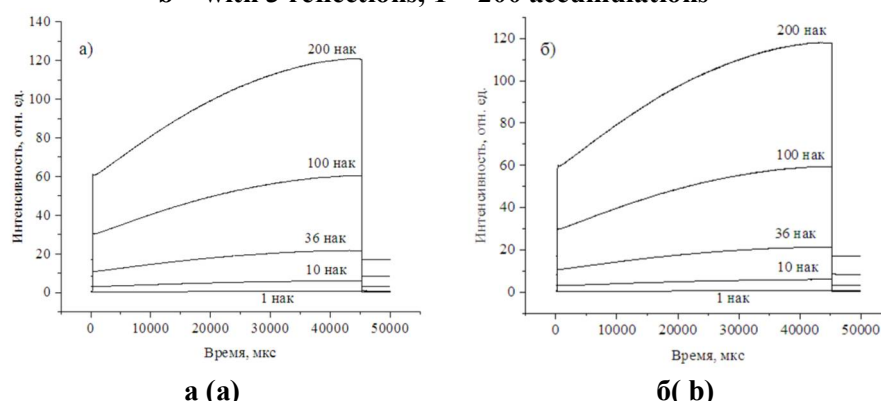
Такой подход позволил оценить влияние сразу двух факторов – числа проходов через оптическую систему и глубины усреднения сигнала – на качество получаемых данных. Все спектры сохранялись в текстовых файлах с целью последующей цифровой обработки (рисунок 3).

В ходе эксперимента была исследована зависимость качества спектральных данных от двух ключевых параметров: числа отражений лазерного луча в кювете и величины аппаратных накоплений. Особое внимание было уделено режимам с высоким числом накоплений, так как они обеспечивают уменьшение вклада белого шума и позволяют более надёжно выделять слабые спектральные особенности.

Анализ показал, что при малом числе отражений (2 – 3 прохода) (рисунок 3) регистрируемый сигнал обладает недостаточной интенсивностью, что приводит к ограниченной информативности спектра и затрудняет выделение слабых резонансных линий. При увеличении числа отражений до 4 – 5 (рисунок 4) форма спектров становится более выразительной, а линии – отчётливее, что связано с увеличением эффективной длины оптического пути.

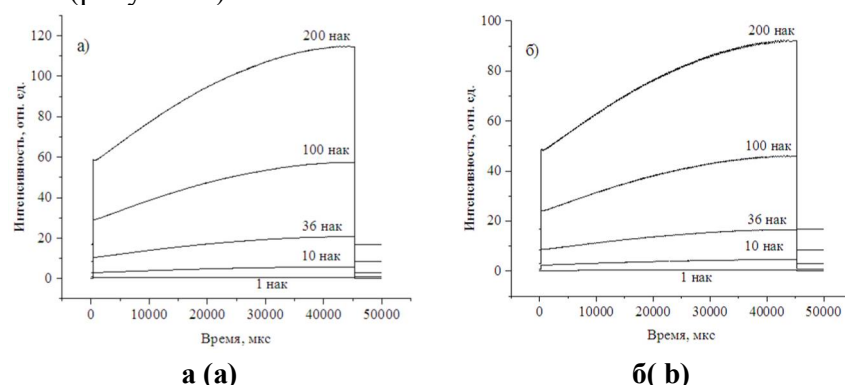


а (а) б (б)
Рисунок 3 – Лазерный сигнал: а – при 2 отражениях, 1 – 200 накоплениях;
б – при 3 отражениях, 1 – 200 накоплениях
Figure 3 – Laser signal: а – with 2 reflections, 1 – 200 accumulations;
б – with 3 reflections, 1 – 200 accumulations



а (а) б (б)
Рисунок 4 – Лазерный сигнал: а – при 4 отражениях, 1 – 200 накоплениях;
б – при 5 отражениях, 1 – 200 накоплениях
Figure 4 – Laser signal: а – with 4 reflections, 1 – 200 accumulations;
б – with 5 reflections, 1 – 200 accumulations

Однако дальнейшее повышение числа отражений (при 7 отражениях) сопровождается ростом интерференционных искажений, вызванных многократными отражениями в оптической системе (окна кюветы, линзы, поверхности фотоприёмника). В этом случае заметно снижается отношение сигнал/шум: полезные спектральные линии перекрываются паразитными модуляциями (рисунок 5).



а (а) б (б)
Рисунок 5 – Лазерный сигнал: а – при 6 отражениях, 1 – 200 накоплениях;
б – при 7 отражениях, 1 – 200 накоплениях
Figure 5 – Laser signal: а – with 6 reflections, 1 – 200 accumulations;
б – with 7 reflections, 1 – 200 accumulations

Вторым фактором, существенно влияющим на результаты, является число аппаратных накоплений. При малых значениях (1 – 10) спектры характеризуются высокой дисперсией и выраженным шумовым фоном. Увеличение числа накоплений до 100 – 200 приводит к ожи-

даемому снижению вклада белого шума и формированию более стабильного сигнала. Однако даже при максимальном накоплении влияние оптических интерференционных помех остаётся определяющим при избыточном числе отражений.

После окончания эксперимента была проведена обработка полученных данных в программе OriginLab, которая включала в себя корректировку оптического нуля, заднего и переднего фронтов, нормирование и фильтрацию, основанную на преобразование Фурье (FFT Filter, 300 точек).

Сравнение обработанных спектров, зарегистрированных при 5, 6 и 7 отражениях и 200 накоплениях (рисунок 6), позволило выявить оптимальный режим. При пяти отражениях сигнал оказывается недостаточно интенсивным, при семи – чрезмерно зашумлённым из-за интерференции. Наиболее устойчивый результат наблюдается при шести отражениях, когда достигается оптимальный баланс между увеличением пути распространения излучения и минимизацией паразитных эффектов.

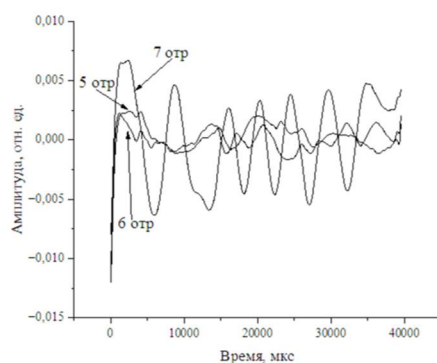


Рисунок 6 – Сравнение спектров при 5 – 7 отражениях и 200 накоплениях
Figure 6 – Comparison of spectra with 5 – 7 reflections and 200 accumulations

Таким образом, проведённый анализ подтверждает, что выбор оптимального числа отражений является критическим параметром при использовании многопроходных кювет в сочетании с импульсно-периодическим режимом генерации ПДЛ. В установленных условиях 6 отражений и 200 накоплений обеспечивают наилучшее соотношение сигнал-шум и формируют спектры с высокой информативностью для дальнейшего анализа.

Заключение

Проведённое исследование показало, что использование перестраиваемого диодного лазера в импульсно-периодическом режиме обеспечивает высокую чувствительность регистрации слабого резонансного поглощения, необходимую для анализа изотопного состава углекислого газа в выдыхаемом воздухе. Определены основные источники шумов и помех, ограничивающие точность измерений, и предложены эффективные методы их минимизации. Установлено, что сочетание аппаратных и программных способов обработки сигналов, таких как накопление, фурье-фильтрация и дифференцирование, позволяет значительно повысить отношение сигнал-шум и стабильность спектров. Экспериментально подтверждено, что оптимальными условиями регистрации являются шесть отражений лазерного луча в кювете и 200 накоплений, при которых достигается наилучшее качество спектров без существенных интерференционных искажений.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке высокоточных лазерных газоанализаторов и дыхательных диагностических систем, работающих в реальном времени и не требующих пробоподготовки.

Библиографический список

1. Liu Y. et al. A Laser-Locked Hollow Waveguide Gas Sensor for Simultaneous Measurements of CO₂ Isotopologues with High Accuracy, Precision, and Sensitivity // Analytical Chemistry. 2021. Т. 93. № 46. С. 15468-15473.

2. Хаджийская Е.Ю., Иванов В.С. Существующие методы высокочувствительного газового анализа // Фундаментальные, поисковые, прикладные исследования и инновационные проекты: Сборник трудов Национальной научно-практической конференции, Калининград, 27-31 мая 2025 года. Москва: Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского содействия сохранению исторического и научного наследия ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского, 2025. С. 435-439.

3. Ивашкин В.Т., Касоев С.Г., Степанов Е.В. Анализ изотопического состава выдыхаемого воздуха методами диодной лазерной спектроскопии в районе 2 μm для диагностики *Helicobacter pylori*-ассоциированных заболеваний // Оптика и спектроскопия. 2019. Т. 126. № 6. С. 788-798.

4. Дьяченко А.И., Степанов Е.В., Шулагин Ю.А. Мониторинг быстрых вариаций содержания эндогенного СО в выдыхаемом воздухе методами диодной лазерной спектроскопии // Оптика и спектроскопия. 2020. Т. 128. № 7. С. 1042-1054.

5. Степанов Е.В. Диодная лазерная спектроскопия и анализ молекул-биомаркеров / Е. В. Степанов. М.: Физматлит, 2009. 416 с. ISBN 978-5-9221-1152-2.

6. Степанов Е.В., Понуровский Я.Я., Селиванов Ю.Г. Управление параметрами излучения перестраиваемых диодных лазеров на основе солей свинца с двойной гетероструктурой при работе в импульсно-периодическом режиме // Труды ИОФАН. М.: Наука. 2005. Т. 61. С. 48-65.

7. Степанов Е.В. Спектральные свойства газообразных биомаркеров и выбор оптимальной аналитической линии при интерференции спектров детектируемых газов // Труды ИОФАН. М.: Наука, 2005. Т. 61. С. 107-134.

UDC 621.373.826

EXHALED AIR ANALYZER: NOISE AND INTERFERENCE REDUCTION

E. Y. Khadzhiyskaya, post-graduate student, RTU MIREA, Basic Department No. 343 Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
orcid.org/0000-0002-9115-9871, e-mail: lizahajiiskaya@yandex.ru

E. V. Stepanov, Dr. in physics and mathematics, Professor, Head of Department, Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
orcid.org/0000-0002-9297-4093, e-mail: eugenestepanov@yandex.ru

*This study presents the method for enhancing the sensitivity of weak resonant absorption detection in exhaled air using tunable diode lasers (TDLAS) operated in a pulse-periodic mode. **The aim of the work is to minimize the influence of white noise and interference effects in the process of measuring carbon dioxide isotopic ratio ($\delta^{13}\text{CO}_2$) in breath samples.** The characteristics of distributed feedback TDL being used in the experiments are described along with the techniques for noise suppression and measurement accuracy improvement including hardware approaches (signal averaging, differentiation, integration, laser selection, and optical alignment) and software methods (Fourier filtering and numerical differentiation). Experimental studies to evaluate the dependence of signal-to-noise ratio on the number of optical reflections and accumulation cycles were conducted. Six reflections and 200 accumulations are established to provide the optimal balance between extended optical path length and minimized interference distortions. The results confirm the effectiveness of proposed approach and demonstrate the potential of TDL-based systems for non-invasive, high-precision, and highly sensitive analysis of isotopic composition of exhaled carbon dioxide.*

Keywords: tunable diode laser, pulse-periodic mode, $\delta^{13}\text{CO}_2$, exhaled breath, noise, Fourier filtering, gas analysis.

DOI: 10.21667/1995-4565-2025-94-228-237

References

1. Liu Y. et al. A Laser-Locked Hollow Waveguide Gas Sensor for Simultaneous Measurements of CO_2 Isotopologues with High Accuracy, Precision, and Sensitivity. *Analytical Chemistry*. 2021, vol. 93, no. 46, pp. 15468-15473.

2. **Khadzhiyskaya E.Y., Ivanov V.S.** Sushchestvuyushchie metody vysokochuvstvitel'nogo gazovogo analiza. Fundamental'nye, poiskovye, prikladnye issledovaniya i innovatsionnye proekty: *Sbornik trudov Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii (Kaliningrad, May 27-31, 2025)*. Moscow: Assotsiatsiya vypusnikov i sotrudnikov VVIA im. professora N. E. Zhukovskogo. 2025, pp. 435-439. (in Russian).

3. **Ivashkin V.T., Kasoev S.G., Stepanov E.V.** Analiz izotopicheskogo sostava vydykhaemogo vozdukhа metodami diodnoy lazernoy spektroskopii v rayone 2 μm dlya diagnostiki *Helicobacter pylori*-assotsiirovannykh zabolevaniy. *Optika i spektroskopiya*. 2019, vol. 126, no. 6, pp. 788-798. (in Russian)

4. **Dyachenko A.I., Stepanov E.V., Shulagin Yu.A.** Monitoring bystrykh variatsiy sodержaniya endogenogo CO v vydykhaemom vozdukhе metodami diodnoy lazernoy spektroskopii. *Optika i spektroskopiya*. 2020, vol. 128, no. 7, pp. 1042-1054. (in Russian).

5. **Stepanov E.V.** Diodnaya lazernaya spektroskopiya i analiz molekul-biomarkerov. Moscow: Fizmatlit. 2009, 416 p. ISBN 978-5-9221-1152-2.

6. **Stepanov E.V., Ponurovskiy Ya. Ya., Selivanov Yu.G.** Upravlenie parametrami izlucheniya perestraivayemykh diodnykh lazerov na osnove soley svintsa s dvoynoy geterostrukturoy pri rabote v impul'sno-periodicheskom rezhime. *Trudy IOFAN, Moscow: Nauka*. 2005. vol. 61, pp. 48-65. (in Russian).

7. **Stepanov E.V.** Spektral'nye svoystva gazoobraznykh biomarkerov i vybor optimal'noy analiticheskoy linii pri interferentsii spektrov detektiruemykh gazov. *Trudy IOFAN, Moscow: Nauka*. 2005, vol. 61, pp. 107-134. (in Russian).