

ХАРАКТЕРИСТИКИ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА ЛАЗЕРНОГО СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СЛАБОГО ПОГЛОЩЕНИЯ

О. М. Вохник¹, П. В. Короленко^{1,2*}, Р. Т. Кубанов¹

УДК 621.373.8

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2022-89-1-125-128>

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

² Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской АН, Москва, Россия;

e-mail: pvkorolenko@rambler.ru

(Поступила 27 октября 2021)

Рассмотрены характеристики спектрометра для измерения слабого поглощения, состоящего из перестраиваемого по частоте диодного лазера и внешнего аналитического резонатора. Показано, каким образом параметры резонатора и скорость перестройки частоты влияют на чувствительность спектрометра и воспроизведение формы и ширины регистрируемой линии.

Ключевые слова: оптический резонатор, спектрометр, лазер с перестраиваемой частотой, качество спектральных измерений.

The characteristics of a weak absorption spectrometer consisting of a frequency-tunable diode laser and an external analytical resonator are considered. It is shown how the resonator parameters and the frequency tuning rate affect the sensitivity of the spectrometer and the reproduction of the shape and width of the recorded line.

Keywords: optical resonator, spectrometer, tunable frequency laser, quality of spectral measurements.

Введение. Диодная лазерная спектроскопия, позволяющая регистрировать присутствие в тех или иных средах веществ с малой концентрацией [1—4], широко применяется в экологии, биомедицине, а также во многих других областях науки и индустрии. Среди различных схем диодной спектроскопии хорошо зарекомендовала себя версия спектрометра слабого поглощения, состоящего из перестраиваемого по частоте диодного лазера и внешнего аналитического резонатора с исследуемым веществом [2—4]. Регистрируя изменения во времени интенсивности излучения после прохождения резонатора, можно получить спектр поглощения вещества без традиционного спектрального прибора. Несмотря на большое количество публикаций по использованию такой спектральной системы, ряд особенностей регистрации оптических спектров при различных скоростях изменения частоты нуждаются в уточнении.

Цель данной работы — оценка на основе численного моделирования влияния добротности резонатора и скорости сканирования частоты лазера на чувствительность измерений и форму регистрируемых спектральных линий.

Расчетная схема. Схема расчета характеристик аналитического резонатора основана на методе сложения на выходе резонатора амплитуд парциальных пучков, сформированных в результате многократных отражений входного излучения от зеркал резонатора [5]. Для выявления наиболее существенных факторов, влияющих на процесс измерений, анализ проводился в общем виде с использованием безразмерных величин в приближении плоских волн. Процедура сложения парциальных пуч-

CHARACTERISTICS OF THE ANALYTICAL RESONATOR OF A WEAK ABSORPTION SPECTROMETER

О. М. Vokhnik¹, П. В. Korolenko^{1,2*}, Р. Т. Kubanov¹ (¹ M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ² P. N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: pvkorolenko@rambler.ru)

ков приводит к следующему выражению для амплитуды поля S выходного пучка:

$$S(k) = \frac{a(1-R^2)e^{i[\delta(k)d+\Phi]}p(k)}{1-R^2e^{2i[\delta(k)d+\Phi]}p(k)^2}, \quad (1)$$

где k — дискретное время с интервалом дискретизации d ; a и Φ — амплитуда и фаза падающей на резонатор волны; R — коэффициент отражения зеркал резонатора по амплитуде (потери в зеркалах считаются пренебрежимо малыми); $\delta = 2\pi L\nu$ — скорость изменения фазы в расчете на проход (L — длина резонатора, $\nu = df/dk$ — скорость сканирования частоты f лазера). Считая скорость приращения фазы пропорциональной времени (обычно частота изменяется по закону, близкому к линейному), можно записать $\delta = xk$, где x — эффективная скорость изменения частоты. Коэффициент передачи внутрирезонаторной поглощающей среды $p(k)$ задается соотношением $p(k) = \exp[-p'(k)\alpha - i\varphi_n(k)]$, $p'(k)$ — форм-фактор линии поглощения; α — коэффициент поглощения в центре линии; $\varphi_n(k)$ — дополнительный фазовый набег, обусловленный изменением показателя преломления в области поглощения (как правило, при невысоких коэффициентах поглощения им можно пренебречь). В расчетах использованы гауссов $p'_G(k) = \exp\left(-\frac{(k-k_0)^2}{\Delta^2}\right)$ и лоренцев $p'_L(k) = \exp\frac{(\Delta\sqrt{\ln 2})^2}{(k-k_0)^2 + (\Delta\sqrt{\ln 2})^2}$ контуры линии поглощения одинаковой ширины, k_0 — момент прохождения частоты лазера через центр линии, Δ — ее ширина.

Скорость сканирования частоты значительно изменяет временной интервал между последовательно возбуждаемыми в резонаторе модами, поэтому при анализе качества регистрируемых спектров следует различать два режима работы спектрометра. Первый характеризуется временным интервалом между возбуждением соседних резонансных пиков, который превосходит время затухания излучения в резонаторе, второй — временным интервалом, сопоставимым с этим временем. При втором режиме межмодовая связь, обусловленная наложением полей соседних мод, влияет на характеристики регистрируемого спектра, что приводит к снижению чувствительности спектральной системы и искажению исследуемой формы линии поглощения.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1, *a* представлены типичная для первого режима последовательность резонансных пиков при гауссовом форм-факторе линии поглощения, формирующаяся на выходе резонатора и соответствующая его продольным модам, и кривая, характеризующая снижение амплитуд резонансных пиков $|S(k)|$ вблизи минимального значения. Количество резонансных пиков, попадающих в контур поглощения, определяется скоростью сканирования частоты лазера. С ее увеличением плотность мод в анализируемой области спектра возрастает, что улучшает разрешающую способность спектральной системы.

В качестве параметра, характеризующего чувствительность спектрометра, выбрана разность Y между амплитудой $|S(k)|$ вдали от линии поглощения и амплитудой в центре линии (рис. 1, *a*). Для удобства определения Y центр линии поглощения совмещался с одним из пиков в “гребенке” резонансов. Такая привязка центра линии поглощения не влияет на форму и глубину минимума в распределении резонансов. Точность воспроизведения формы линии поглощения оценивалась с помощью отношения Δ'/Δ , где Δ — ширина изначально задаваемого контура линии поглощения, Δ' — ширина контура, определяемого из распределения амплитуд резонансов.

В спектрометре слабого поглощения Y быстро убывает с уменьшением коэффициента поглощения α и точность ее определения падает. Типичная зависимость $Y(\alpha)$ при скорости сканирования частоты x , близкой к 10^{-3} , и различных добротностях используемого аналитического резонатора представлена на рис. 2, *a* (кривые 1—4). Расчеты выполнены для $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$ — $2.5 \cdot 10^{-2}$. В области $\alpha \sim 5 \cdot 10^{-4}$ чувствительность спектрометра невелика, поскольку величина Y , составляющая всего несколько процентов, плохо измерима (кривые 1—3). Для увеличения чувствительности необходимо повышать добротность резонатора, увеличивая коэффициент отражения R зеркал аналитического резонатора (кривая 4). При $\alpha \sim 5 \cdot 10^{-4}$ измеренная $Y = 30$ — 40 %, и, что важно, зависимость $Y(\alpha)$ носит линейный характер (рис. 2, *b*). Однако по мере увеличения коэффициента поглощения величина Y перестает зависеть от α (рис. 2, *a*, кривая 4). Чтобы зависимость $Y(\alpha)$ сохраняла линейный характер при измерениях в области больших α , необходимо использовать зеркала с меньшими коэффициентами отражения. Так, в области $\alpha \sim 5 \cdot 10^{-3}$ зависимость $Y(\alpha)$ остается линейной при $R = 0.990$ (рис. 2, *в*).

С чувствительностью и линейностью зависимости $Y(\alpha)$ тесно связана регистрируемая форма исследуемой линии поглощения. Нелинейность зависимости $Y(\alpha)$ приводит к значительному искажению контура линии поглощения и его ширины по сравнению с исходно задаваемым контуром. Особенно наглядно это проявляется в случае высокодобротного резонатора ($R = 0.999$). На рис. 1, б представлены контуры линии поглощения, полученные трассировкой амплитуд резонансных пиков в области поглощения, и исходный гауссов контур коэффициента передачи среды $p(k)$. Для коэффициента поглощения α , лежащего в линейной области зависимости $Y(\alpha)$, расчетный контур линии поглощения 1 практически совпадает с кривой 4. Если коэффициент поглощения оказывается в нелинейной области зависимости $Y(\alpha)$, то рассчитанный контур линии 2, сохраняя гауссову форму, значительно превышает исходный по ширине.

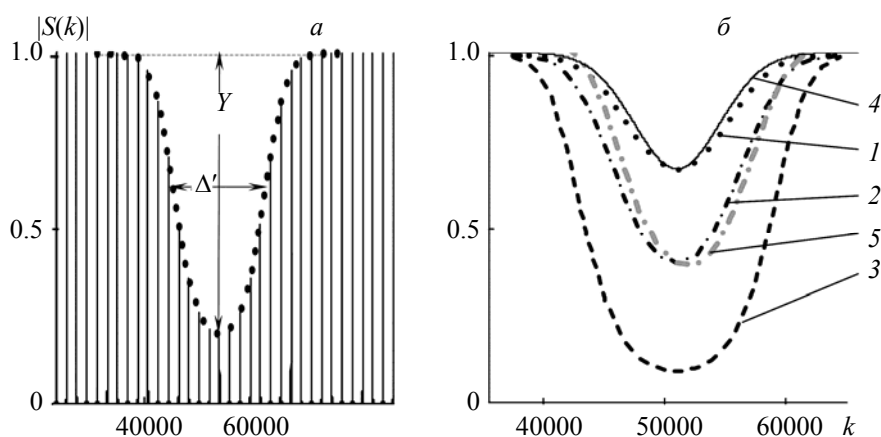


Рис. 1. а — Последовательность резонансных пиков в области исследуемой линии поглощения; $a = 1$, $\Phi = 0$, $k_0 = 5 \cdot 10^4$, $\Delta = K/20$, $K = 10^5$, $\alpha = 0.004$, $x = (2\pi/3) \cdot 10^{-3}$, $\varphi_n(k) = 0$; б — рассчитанные контуры линии поглощения для $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$ (1), $1.5 \cdot 10^{-3}$ (2), 10^{-2} (3), исходный контур линии $p(k)$ при $\alpha = 5 \cdot 10^{-4}$ (4) и контур линии, рассчитанный с учетом межмодового взаимодействия (5)

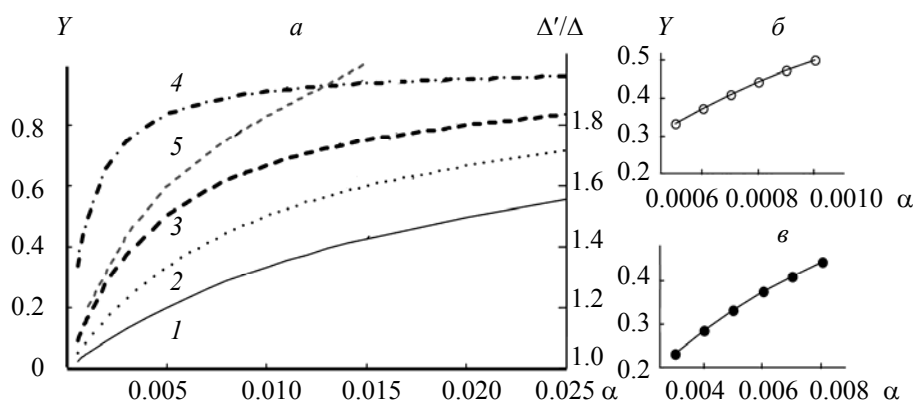


Рис. 2. Зависимость чувствительности спектрометра Y от коэффициента поглощения α : а — при коэффициентах отражения зеркал резонатора $R = 0.980$ (1), 0.990 (2), 0.995 (3) и 0.999 (4); 5 — зависимость Δ'/Δ от α при $R = 0.999$; б и в — зависимости $Y(\alpha)$ при $R = 0.999$ и 0.990

При дальнейшем росте α расчетный контур уже не аппроксимируется гауссовой кривой, отличается от исходного гауссова и по форме, и по ширине Δ' . Зависимость отношения Δ'/Δ от α при $R = 0.999$ представлена на рис. 2, а (кривая 5). Видно, что с увеличением коэффициента поглощения происходит уширение рассчитанного контура линии. Выявленные закономерности показывают, что для каждого диапазона подлежащих измерению величин α следует подбирать оптимальные зна-

чения R . Учет межмодового взаимодействия, возникающего по мере увеличения скорости и вызывающего наложение полей соседних мод, приводит к дальнейшему искажению рассчитываемого контура (рис. 1, б, кривая 5).

Аналогичные выводы справедливы и для лоренцева контура линии поглощения с той лишь разницей, что для нелинейной области $Y(\alpha)$ имеет место только уширение линии поглощения без заметного изменения ее формы. Это подтверждается высоким коэффициентом корреляции между факторами линий при наличии и в отсутствие наложения полей соседних мод, который для рассмотренных режимов составляет 0.98—0.99. Устойчивость формы лоренцевых линий объясняется их широкими боковыми крыльями, в области которых межмодовая передача энергии осуществляется с меньшей интенсивностью.

Заключение. Анализ качества регистрируемых спектров слабого поглощения показывает, что чувствительность измерений и погрешности в определении формы и ширины спектральных линий зависят от добротности аналитического резонатора и скорости сканирования частоты задающего лазера. Установлено, что при невысокой скорости сканирования, когда взаимодействием возбуждающихся в резонаторе продольных мод можно пренебречь, чувствительность измерений и точность воспроизведения формы линии определяются соотношением между коэффициентом поглощения и добротностью резонатора. Межмодовое взаимодействие, возникающее при повышении скорости сканирования, приводит к дополнительному искажению регистрируемой формы линии поглощения.

Полученные результаты могут служить ориентиром при проведении оптимизации параметров спектрометра слабого поглощения.

Авторы выражают благодарность профессору В. Н. Очкину за ряд ценных советов и замечаний.

Работа выполнена при содействии Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-02-00540).

- [1] T. Zhang, G. Zhang, X. Liu, G. Gao, T. Cai. Журн. прикл. спектр., **87**, № 4 (2020) 617—622 [T. Zhang, G. Zhang, X. Liu, G. Gao, T. Cai. J. Appl. Spectr., **87**, N 4 (2020) 674—679]
- [2] A. O'Keefe, J. J. Scherer, J. B. Paul. Chem. Phys. Lett., **307** (1999) 343—349
- [3] П. В. Короленко, В. В. Лагунов, И. В. Николаев, В. Н. Очкин, С. Н. Цхай, А. Н. Яцкевич. Квант. электрон., **46**, № 3 (2016) 255—258 [P. V. Korolenko, V. V. Lagunov, I. V. Nikolaev, V. N. Ochkin, S. N. Tshai, A. N. Yatskevich. Sov. J. Quantum Electron., **46**, N 3 (2016) 255—258]
- [4] V. V. Lagunov, I. V. Nikolaev, V. N. Ochkin. Spectrochim. Acta A: Mol. Biomol. Spectr., **246** (2021) 119060
- [5] М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики, пер. с англ., Москва, Наука (1973) [M. Born, E. Wolf. Principles of Optics, Cambridge University Press, 7th ed. (1999)]