

Оптимизация параметров внешнего резонатора лазерного спектрометра слабого поглощения

П.В.Короленко, В.В.Лагунов, И.В.Николаев, В.Н.Очкин, С.Н.Цхай, А.Н.Яцкевич

Рассмотрены особенности процедуры оптимизации параметров внешнего оптического резонатора лазерного спектрометра, обусловленные использованием трехлучевой схемы измерений и наличием потерь в зеркалах. Установлено, что достижение максимальной чувствительности к поглощению внутрирезонаторной среды возможно лишь при определенном выборе величины и соотношения коэффициентов отражения зеркал. На примере регистрации спектров примеси метана в атмосфере показано, что в соответствии с расчетной моделью при одной и той же добротности резонатора использование входного зеркала с меньшим коэффициентом отражения позволяет примерно вдвое увеличить чувствительность измерений.

Ключевые слова: диодные лазеры, внешний оптический резонатор, абсорбционная спектроскопия, малые концентрации.

1. Введение

Для измерения малых концентраций газовых примесей широко применяется абсорбционная спектроскопия, основанная на регистрации поглощения излучения во внешнем оптическом резонаторе, содержащем исследуемый газ [1]. Путем измерения времени жизни фотона в резонаторе (метод cavity ring-down spectroscopy – CRDS [2]) достигнута чувствительность измерения концентрации метана 29 ppt, что эквивалентно показателю поглощения $4.4 \times 10^{-12} \text{ см}^{-1}$ при оптимальном времени усреднения 32.4 мин [3]. Существует так называемая интегральная модификация этого метода (integrated cavity output spectroscopy – ICOS [4]), позволяющая заменить временные измерения амплитудными. Методика ICOS, в отличие от метода CRDS, где спектр записывается по точкам при фиксированных частотах, дает возможность регистрировать спектры при непрерывной перестройке частоты излучения лазера. В варианте PS-CRDS (phase shift CRDS) существуют способы регистрации спектра при непрерывной перестройке частоты, но они требуют довольно сложной математической обработки сигнала [5].

Точность, чувствительность и надежность измерений существенно зависят от правильности выбора коэффици-

ентов отражения зеркал внешнего резонатора. К настоящему времени развиты технологии изготовления зеркал с коэффициентом отражения $r = 0.9999$ и выше в различных спектральных диапазонах, что обеспечивает высокую чувствительность указанных выше измерений. Однако в процессе эксплуатации такие отражающие покрытия имеют тенденцию к деградации, которая может быть существенной.

Обычно считается, что чувствительность измерений поглощения сохраняется при условии сохранения добротности пустого резонатора, зависящей от произведения коэффициентов отражения зеркал ($r_1 r_2 = \text{const}$) и определяющей эффективное число проходов излучения в резонаторе. Это справедливо в случае лазерного резонатора, где диссипативные потери в зеркалах компенсируются усилением активной среды. Для пассивного резонатора с внешним возбуждением ситуация иная, и она анализируется в настоящей работе. Такой анализ имеет своей целью разработку и экспериментальную проверку метода оптимизации параметров резонатора, позволяющего обеспечить приемлемую величину измеряемых сигналов и необходимую точность измерений поглощения.

2. Пропускание и отражение излучения резонатором

В основу процедуры оптимизации коэффициентов отражения зеркал резонатора могут быть положены известные формулы, описывающие отражение и пропускание излучения резонатором [6]:

$$r_c = \frac{\sqrt{r_1} [1 - (\sqrt{r_1 r_2} + \sqrt{r_1 / r_2} t_1) t_m \exp(i2\delta)]}{1 - \sqrt{r_1 r_2} t_m \exp(i2\delta)}, \quad (1)$$

$$t_c = \frac{\sqrt{t_1 t_2} \sqrt{t_m} \exp(i\delta)}{1 - \sqrt{r_1 r_2} t_m \exp(i2\delta)}. \quad (2)$$

Здесь r_c и t_c – соответственно амплитудные коэффициенты отражения и пропускания резонатора (отвечающие им коэффициенты по мощности $R = |r_c|^2$ и $T = |t_c|^2$); t_1 , t_2 – коэффициенты пропускания по мощности зеркал;

П.В.Короленко, В.В.Лагунов. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: pvkoroenko@rambler.ru

А.Н.Яцкевич. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

И.В.Николаев, С.Н.Цхай. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: tskhai@sci.lebedev.ru

В.Н.Очкин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141700 Долгопрудный, Институтский пер., 9

Поступила в редакцию 1 июля 2015 г., после доработки – 16 ноября 2015 г.

r_1, r_2 – коэффициенты отражения зеркал (по мощности); t_m – коэффициент пропускания внутрирезонаторной среды (по мощности); δ – фазовый набег за один проход волны в резонаторе. Коэффициенты пропускания и отражения зеркал связаны между собой соотношением $1 - r_{1,2} - t_{1,2} = a_{1,2}$, где $a_{1,2}$ – потери в зеркалах, которые в дальнейшем будем считать одинаковыми: $a_1 = a_2 = a$. Коэффициенты r_c и t_c , как следует из формул (1) и (2), являются функциями фазовых набегов δ (в эксперименте изменение фазовых набегов осуществляется путем изменения частоты падающего излучения). Из (1), (2) получаем выражения для R и T :

$$R = \left| \frac{-\sqrt{r_1/r_2} \{ 1 - [\sqrt{r_1 r_2} + (\sqrt{r_2/r_1} - \sqrt{r_1 r_2} - a\sqrt{r_2/r_1})] t_m \exp(i2\delta) \}^2}{[1 - \sqrt{r_1 r_2} t_m \exp(i2\delta)]^2 / \sqrt{r_1 r_2}} \right|, \quad (3)$$

$$T = \left\{ [(1/\sqrt{r_1 r_2} - \sqrt{r_1 r_2} - a/\sqrt{r_1 r_2})(1/\sqrt{r_1 r_2} - \sqrt{r_2/r_1} - a/\sqrt{r_1 r_2}) \times r_1 r_2 t_m \exp(i2\delta)]^{1/2} / [1 - \sqrt{r_1 r_2} t_m \exp(i2\delta)] \right\}^2. \quad (4)$$

Из них видно, что указанные коэффициенты при заданных потерях a зависят как от произведения $r_1 r_2$, непосредственно определяющего добротность резонатора, так и от отношения r_1/r_2 , которое может меняться при фиксированной добротности резонатора. Используем эти соотношения для анализа схемы конкретного спектрометра.

3. Анализ трехлучевой схемы R-ICOS

Рассмотрим задачу оптимизации резонатора для случая, когда используется одна из последних модификаций метода ICOS – так называемый метод R-ICOS [7]. Принципиальная схема метода приведена на рис.1 (более подробную экспериментальную схему и технику работы с ней см. в [7]). В данном методе помимо интенсивности I_1 прошедшего через резонатор излучения (как в методе ICOS) регистрируются также интенсивность I_3 , пропорциональная интенсивности излучения, отраженного от резонатора, и интенсивность I_2 , пропорциональная интенсивности лазерного излучения I_0 (базовая линия). Это позволяет определить долю поглощаемой в резонаторе мощности U как разностный сигнал:

$$U = 1 - R - T. \quad (5)$$

По изменению величины U в ходе сканирования частоты лазерного излучения можно определить спектр поглощения исследуемой среды. При этом появляется возможность уменьшить флуктуации сигнала, регистрируемого на выходе резонатора (стандартный метод ICOS), которые вызваны фазовыми рассогласованиями излучения и

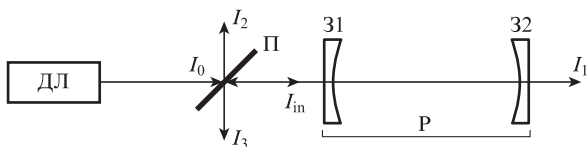


Рис.1. Принципиальная схема метода R-ICOS: ДЛ – диодный лазер; П – делительная пластинка; Р – резонатор с зеркалами 31 и 32; I_{in} и I_1 – интенсивности света, падающего на резонатор и прошедшего через него; I_2 и I_3 – интенсивности отраженного пластинкой света, пропорциональные интенсивностям лазерного излучения I_0 и излучения, отраженного резонатором.

собственных мод резонатора, за счет таких же нестабильностей в отраженном сигнале. Это дает возможность снизить время регистрации и расширить динамический диапазон интенсивностей измеряемых спектров [8]. При коэффициентах отражения зеркал резонатора 0.9–0.99 метод R-ICOS позволяет измерять коэффициенты поглощения с чувствительностью $2 \times 10^{-8} \text{ см}^{-1}$ при скорости записи спектра $\sim 10^6 \text{ см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$.

В работе [7], где был описан метод R-ICOS, применялся симметричный внешний резонатор с одинаковыми коэффициентами отражения зеркал. При этом возможность улучшения характеристик спектрометра путем перехода к несимметричному резонатору с различными коэффициентами отражения зеркал не исследовалась. Вместе с тем такой переход представляется целесообразным с точки зрения выполнимости двух требований. Первое состоит в обеспечении сопоставимых интенсивностей прошедшего через резонатор и отраженного от него излучений при достаточном уровне их мощности (в этом случае наилучшим образом осуществляется взаимная компенсация фазовых флуктуаций коэффициентов пропускания и отражения резонатора). Второе требование обусловлено необходимостью получения максимальной величины производной разностного сигнала по внутрирезонаторным потерям (это дает возможность регистрировать изменения потерь в резонаторе с наибольшей точностью). Одновременное выполнение указанных требований сводится к поиску компромисса при выборе параметров резонатора для достижения приемлемых величин регистрируемых сигналов и чувствительности измерений. В этом отношении манипуляции с коэффициентами отражения различных зеркал обеспечивают большую гибкость поиска.

Выбор коэффициентов отражения требует многопараметрического анализа поведения величины разностного сигнала на основе соотношений (3), (4). Такой анализ может быть сведен к построению функционала F , максимальные значения которого при заданном уровне диссипативных потерь a будут определять оптимальную область изменения коэффициентов r_1 и r_2 . Выполнение перечисленных выше требований можно обеспечить, представив функционал в виде произведения:

$$F(r_1, r_2) = R(r_1, r_2) T(r_1, r_2) U_0(r_1, r_2) B_1(r_1, r_2) B_2(r_1, r_2), \quad (6)$$

где U_0 – то же, что U (5), но в отсутствие среды в резонаторе, а вспомогательные функции $B_1(r_1, r_2)$ и $B_2(r_1, r_2)$ определяются выражениями

$$B_1(r_1, r_2) = \exp\{-[R(r_1, r_2) - T(r_1, r_2)]^2 / [R(r_1, r_2) T(r_1, r_2)]\}, \quad (7)$$

$$B_2(r_1, r_2) = dU/dt_m. \quad (8)$$

Первая из них характеризует баланс мощности прошедшего и отраженного излучений и принимает максимальное значение, равное единице, когда $R(r_1, r_2) = T(r_1, r_2)$. Вторая функция определяет чувствительность оптической схемы к малым изменениям (в спектре) пропускания внутрирезонаторной среды. Функции, входящие в выражение (6), вычисляются в условиях резонанса при $\delta = \pi n$ (n – целое число). Экстремумы функционала в общем случае различаются величиной и положением на плоскости $r_1 r_2$. Поэтому поиск максимального значения функционала F позволяет дать общую оценку влияния различных (часто противоречащих друг другу) факторов на характе-

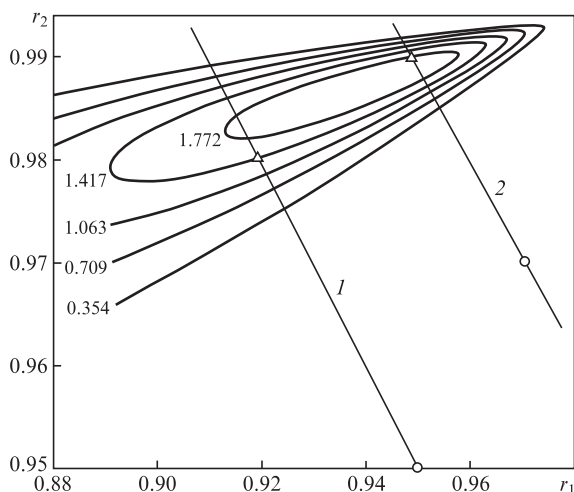


Рис.2. Зависимость значений функционала F от коэффициентов отражения r_1 и r_2 при $a = 0.005$. Наклонные линии отвечают выражениям $r_1 r_2 = 0.903$ (1) и 0.941 (2). Метки \circ и Δ относятся соответственно к симметричному и несимметричному резонаторам, использованным в экспериментах.

ристики резонатора. На рис.2 представлена зависимость значений функционала от коэффициентов отражения зеркал для $a = 0.005$. Максимум функционала F_{\max} соответствует $r_1 = 0.945$, $r_2 = 0.988$ и равен 2.126. При этом разностный сигнал $U_0 = 0.4$, а производная $dU/dt_m = 58.53$. В процессе измерений разностный сигнал, представляющий собой систему эквидистантных пиков, будет промодулирован контурами регистрируемых линий поглощения.

Наглядное представление о поведении как самого функционала, так и образующих его функций дает рис.3, где приведены их зависимости от r_2 при фиксированном $r_1 = 0.935$. Видно, что максимальные значения находятся в области, где пересекаются кривые $R(r_2)$ и $T(r_2)$ и величины U_0 и dU/dt_m достаточно большие.

Положение экстремума функционала существенно зависит от величины потерь a . Уменьшение a , приводящее к повышению добротности резонатора, вызывает смещение максимального значения функционала в область больших значений r_1 и r_2 . Так, при $a = 0.001$ максимум функционала $F_{\max} = 10.463$ достигается при $r_1 = 0.985$ и $r_2 = 0.994$ (рис.4). При этом $U_0 = 0.47$, а $dU/dt_m = 316$. Видно, что переход к более добротному резонатору, лишь незначительно увеличивая разностный сигнал, существенно увеличивает производную dU/dt_m , что означает повышение чувствительности измерений.

Результаты расчетов показывают, что наибольшие чувствительность и точность измерений достигаются при

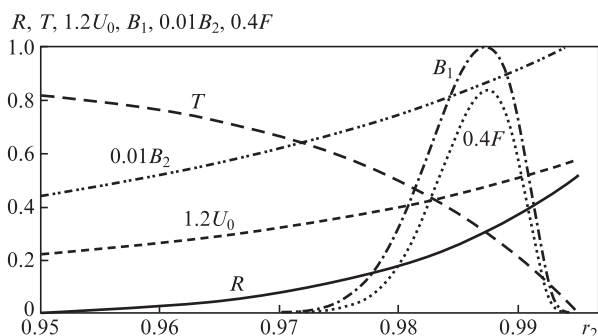


Рис.3. Зависимости функционала F и образующих его функций от r_2 при $r_1 = 0.935$ и $a = 0.005$.

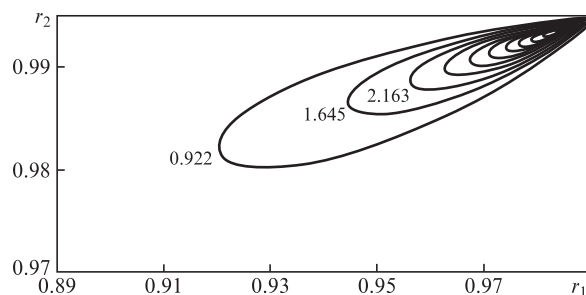


Рис.4. Зависимость значений функционала F от коэффициентов отражения r_1 и r_2 при $a = 0.001$.

использовании несимметричного резонатора (при $r_1 < r_2$). Действительно, если в рассмотренном случае, когда $a = 0.005$, перейти к симметричному резонатору с коэффициентами отражения $r_1 = r_2 = 0.961$, не меняя его добротности (она определяется произведением $r_1 r_2$), то разностный сигнал и его производная уменьшаются: $U_0 = 0.24$ и $dU/dt_m = 35$. При более высокой добротности, когда $a = 0.001$, переход к симметричному резонатору с $r_1 = r_2 = 0.989$ дает $U_0 = 0.24$ и $dU/dt_m = 167$, что примерно в два раза меньше соответствующих параметров оптимизированного несимметричного резонатора.

4. Эксперимент

Для проверки результатов оптимизации резонатора на основе рассмотренной процедуры применялся спектрометр, подробное описание которого приведено в работе [7]. Его внешний резонатор имел длину $L = 50$ см и был образован двумя зеркалами диаметром 25 мм с радиусами кривизны 1 м. Резонатор просвечивался излучением диодного лазера с вертикальным выводом излучения (VCSEL, Vertilas, мощность до 1.5 мВт в области спектра вблизи 1650 нм (6060 см^{-1})). Спектральная ширина лазерной линии составляла 10 МГц. Диапазон перестройки частоты излучения лазера равен 1.15 см^{-1} . При тестировании оптической схемы регистрировался участок спектра метана вблизи длины волны $\lambda = 1650$ нм при его содержании в воздухе 2.5×10^{-5} . Использовался набор зеркал с коэффициентами отражения 0.92–0.99 на указанной длине волны. В экспериментах применялись как симметричные, так и несимметричные резонаторы. При этом сопоставлялись свойства резонаторов с одинаковой добротностью. Во всех случаях, как и предсказывает описанная выше процедура оптимизации, наилучшее качество спектров достигалось, когда входное зеркало имело меньший коэффициент отражения.

Эксперименты проводились с двумя наборами зеркал. В первом наборе зеркала имели коэффициенты отражения $r_1 = r_2 = 0.95$ для симметричного резонатора и $r_1 = 0.92$, $r_2 = 0.98$ – для несимметричного, а во втором наборе $r_1 = r_2 = 0.97$ (симметричный резонатор) и $r_1 = 0.95$, $r_2 = 0.99$ (несимметричный резонатор). Предполагалось, что для такого класса зеркал $a = 0.005$. На рис.2 значения коэффициентов отражения, соответствующих добротностям используемых резонаторов, лежат на дополнительных наклонных кривых. Для удобства сравнения характеристик резонаторов точки, соответствующие коэффициентам отражения их зеркал, отмечены на этих кривых специальными метками. Их положение подтверждает преимущество несимметричной схемы. При расчете в области меток симметричный резонатор с первым набором зеркал

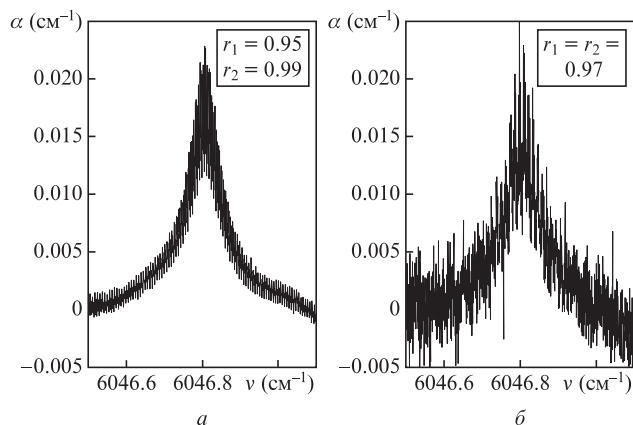


Рис.5. Спектры поглощения на линии метана с $\lambda = 1650$ нм, зарегистрированные с использованием несимметричного (а) и симметричного (б) резонаторов.

характеризуется величинами $U_0 = 0.18$, $dU/dt_m = 28$, а несимметричный – величинами $U_0 = 0.3$, $dU/dt_m = 46.7$. При втором наборе зеркал для симметричного резонатора $U_0 = 0.29$, $dU/dt_m = 36.7$, а для несимметричного $U_0 = 0.52$, $dU/dt_m = 67.3$. Величина экспериментально регистрируемого сигнала U для несимметричного резонатора примерно в 1.4 раза больше, чем для симметричного с первым набором зеркал, а в случае второго набора зеркал соответствующая величина примерно в два раза больше. Эти данные близки к расчетным.

Преимущество несимметричного резонатора, которое продемонстрировали приведенные оценки, подтверждают и экспериментальные данные. Это иллюстрирует рис.5, на котором показан участок спектра поглощения метана вблизи линии с $\lambda = 1650$ нм. Спектр записан с помощью несимметричного ($r_1 = 0.95$ и $r_2 = 0.99$) и симметричного ($r_1 = r_2 = 0.97$) резонаторов. Видно, что переход к несимметричному резонатору позволяет в несколько раз увеличить отношение сигнал/шум, а следовательно, и

улучшить чувствительность спектрометра к слабому поглощению. Присутствующая на контуре линии (рис.5,а) слабо выраженная интерференционная картина обусловлена упоминавшимся выше пиковым характером разностного сигнала, ее контраст зависит от быстродействия регистрирующей аппаратуры.

5. Заключение

Результаты расчета и экспериментов показывают, что при условии одинаковой добротности внешних оптических резонаторов можно повысить чувствительность абсорбционных лазерных измерений, если использовать зеркала с различными коэффициентами отражения. Физическая причина этого состоит в значительном снижении мощности излучения, поглощаемого в выходном зеркале при его более высоком коэффициенте отражения. Данное обстоятельство может оказаться полезным для оптимизации параметров внешнего резонатора спектрометра слабого поглощения при проведении прецизионных спектральных измерений с использованием метода диодной лазерной спектроскопии R-ICOS.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-02-00553, а также программы фундаментальных исследований Отделения физических наук РАН «Фундаментальная оптическая спектроскопия и ее приложения».

1. Gagliardi G., Loock H.-P. (Eds) *Cavity-Enhanced Spectroscopy and Sensing* (Berlin, Springer, 2014).
2. Berden G., Engeln R. *Cavity Ring-Down Spectroscopy. Techniques and Application* (Great Britain: Blackwell Publishing Ltd, 2009).
3. Huang H., Lehmann K.K. *Appl. Opt.*, **49**, 1378 (2010).
4. O'Keefe A. *Chem. Phys. Lett.*, **293**, 331 (1999).
5. O'Keefe A., Scherer J.J., Paul J.B. *Chem. Phys. Lett.*, **307**, 343 (1999).
6. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М.: Наука, 1973).
7. Короленко П.В., Николаев И.В., Очкин В.Н., Цхай С.Н. *Квантовая электроника*, **44**, 353 (2014).
8. Kostenko A.S., Ochkin V.N., Nikolaev I.V., Tskhai S.N., Zaytsev A.A. *Laser Phys. Lett.*, **12**, 015702 (2015).