

Л.Н. Сеница, А.М. Солодов

Высокочувствительный спектрометр с высокодобротным резонатором в области 0,9 мкм

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 16.04.2007 г.

Разработан спектрометр с внешним высокодобротным оптическим резонатором и некогерентным источником излучения в области 0,9 мкм со спектральным разрешением $0,08 \text{ см}^{-1}$; зарегистрированы спектры поглощения атмосферного воздуха и этанола. В качестве источника излучения использовалась галогеновая лампа мощностью 100 Вт. Коэффициент увеличения контрастности сигнала спектрометра по сравнению с контрастностью измерений классическим спектрофотометрическим методом с кюветой такой же длины составил 65.

В последние годы предложены и получили бурное развитие спектрометры, в которых свет вводится в моду оптического резонатора. Такие спектрометры характеризуются чрезвычайно высокой пороговой чувствительностью к поглощению — $10^{-7} - 10^{-9} \text{ см}^{-1}$. Первым был предложен метод затухания излучения в резонаторе, в котором короткий импульс узкополосного лазерного излучения (время лазерного импульса t_p меньше или сравнимо со временем полного обхода резонатора) запускался в оптический резонатор с коэффициентом отражения зеркал $R = 0,9999$, и по времени затухания оптического излучения на выходе резонатора определялся коэффициент поглощения среды, расположенной между зеркалами резонатора [1].

В методе резонаторного увеличения поглощения (РУП) узкополосное излучение непрерывного перестраиваемого лазера вводится в резонатор при случайных совпадениях частот лазера с частотой одной из мод резонатора. Информация о поглощении извлекается из зарегистрированной временной развертки интенсивности излучения лазера, выходящей из резонатора [2].

Использование в РУП-спектроскопии в качестве источника некогерентного оптического излучения (лампы высокой яркости) позволяет перекрыть весь спектральный диапазон от УФ- до дальней ИК-области [3]. В этом случае оптическое излучение источника имеет непрерывный набор частот, часть из которых совпадает с собственными частотами резонатора и эффективно вводится внутрь резонатора.

В данной статье описан широкополосный высокочувствительный спектрометр с высокодобротным резонатором в области 0,9 мкм.

Эксперимент

В нашем эксперименте в качестве источника излучения использовалась 100-Вт ксеноновая лампа (рис. 1). Подбором абсорбционных светофильтров

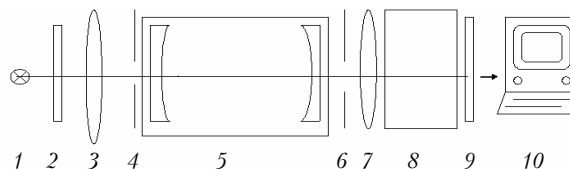


Рис. 1. Схема спектрометра: 1 — галогеновая лампа; 2 — светофильтр КС-19; 3, 7 — линзы; 4, 6 — ирисовые диафрагмы; 5 — высокодобротный сферический резонатор; 8 — монохроматор; 9 — фотодиодная линейка; 10 — компьютер

выделялся спектральный участок, который соответствовал максимальному отражению диэлектрических зеркал, образующих оптический стабильный резонатор. В качестве высокодобротного резонатора использовался интерферометр Фабри—Перо со сферическими зеркалами. Длина оптического резонатора составляла 44 см, радиус кривизны зеркал — 1,5 м, коэффициент пропускания зеркал $\Theta = 0,007$. Фильтр также отрезал излучение меньше 0,45 мкм, которое соответствовало излучению, отраженному во втором и третьем порядке дифракционной решетки. Излучение, вышедшее из интерферометра, направлялось на полихроматор с фокусным расстоянием объектива 1200 мм. В полихроматоре использовалась дифракционная решетка 600 штр/мм, работающая в третьем порядке, что обеспечивало спектральное разрешение $\sim 0,1 \text{ см}^{-1}$. Для калибровки длины волны использовалось излучение He—Ne-лазера и неоновой лампы, которое заводилось в полихроматор под тем же углом, что и основное излучение из резонатора. Вследствие потерь из-за отражения зеркал интенсивность излучения ослаблялась в $0,5(1 - R)$ раз после резонатора, а далее уменьшалась за счет прохождения света через полихроматор до величины порядка $10^{-5} I_0$, поэтому на выходе резонатора использовалась фотодиодная линейка с низким уровнем шумов и повышенной чувствительностью, сигнал с которой направлялся в компьютер. Более подробное описание фотосчитывателя на основе фотодиодной линейки приведено

в работе [4]. После накопления и усреднения излучения, прошедшего через кювету, получался спектр поглощения вещества. На рис. 2 приведен участок спектра пропускания атмосферного воздуха длиной 44 см при однопроходной схеме измерений (1) и с высокооборотным оптическим резонатором (2).

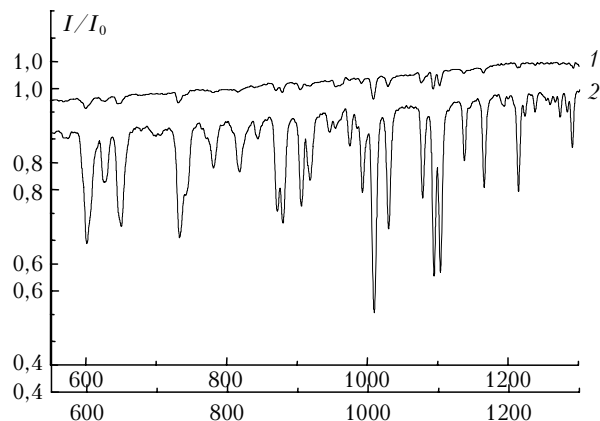


Рис. 2. Нормированный спектр пропускания атмосферного воздуха в области 0,9 мкм, зарегистрированный без применения (1) и с применением (2) оптического резонатора длиной 44 см, увеличивающего чувствительность в 65 раз.

По оси X отложены номера ячеек двудной линейки

Коэффициент увеличения контрастности сигнала с данными зеркалами по сравнению с измерением классическим спектрофотометрическим методом с кюветой такой же длины составил 65.

Чувствительность спектрометра

Рассмотрим формирование провала в высокооборотном оптическом резонаторе при широкополосном некогерентном свете, основываясь на подходе, сформулированном в [5]. Предполагается, что нелинейные эффекты пренебрежимо малы и что ширина спектра излучения $\Delta\nu$ существенно больше ширины свободного интервала резонатора $\delta\nu$ для того, чтобы быть нечувствительным для детектирования вариации интенсивности вследствие модовой структуры резонатора.

Мы рассмотрим оптически стабильный резонатор длины d , сформированный двумя зеркалами с коэффициентом отражения R , коэффициентом пропускания зеркала Θ и коэффициентом потерь в зеркале α ($R + \Theta + \alpha = 1$) (задние поверхности зеркал просветлены), который непрерывно освещается некогерентным излучением интенсивности I_0 .

Интенсивность излучения, прошедшего высокооборотный резонатор при $\alpha = 0$, описывается следующим выражением:

$$I = \frac{t\Theta^2}{(1 - Rt)^2 + 4Rt \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right)} I_0, \quad (1)$$

где t — коэффициент пропускания среды, расположенной в резонаторе; $\Phi = 2nd \cos\varphi$ — разность фаз соседних интерферирующих лучей; n — показатель

преломления вещества в резонаторе; φ — угол между распространением луча в резонаторе и осью резонатора.

При отсутствии среды в резонаторе ($t = 1$) интенсивность прошедшего резонатор излучения в интерференционных максимумах ($\Phi = 2k\pi$) равна падающему излучению:

$$I = I_0. \quad (2)$$

При введении в резонатор поглощения интенсивность прошедшего резонатор излучения в интерференционных максимумах определяется следующим выражением:

$$I = \frac{t(1 - R)^2}{(1 - Rt)^2} I_0. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что никаких приближений для t и R не было сделано, поэтому (3) выполняется как для большого поглощения, так и для малых коэффициентов отражения зеркал R .

На рис. 3 представлена зависимость глубины провала $1 - I/I_0$ в спектре пропускания резонатора как функция поглощения исследуемой среды ($1 - t$). Видно, что для малых коэффициентов поглощения (коэффициент пропускания близок к 1), когда провал в спектре пропускания резонатора $1 - I/I_0$ не превышает 20%, глубина провала линейно связана с коэффициентом пропускания. При больших значениях $1 - t$ линейность начинает нарушаться.

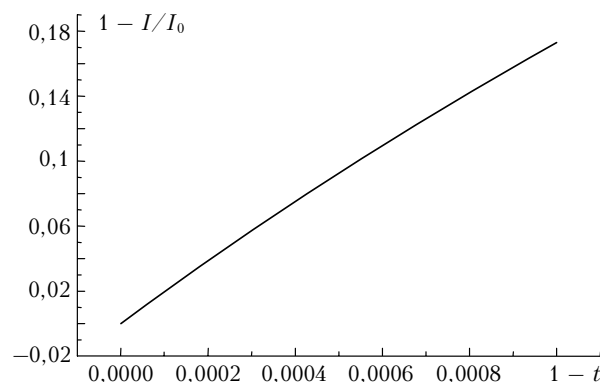


Рис. 3. Зависимость глубины провала $1 - I/I_0$ в спектре излучения от $1 - t$ для коэффициента отражения зеркал $R = 0,99$

Определим коэффициент увеличения контрастности β нового метода по отношению к однопроходной спектроскопии, который представляет собой отношение глубины провала $1 - I/I_0$ в спектре пропускания резонатора к глубине провала в однопроходном случае $1 - t$:

$$\beta = (1 - I/I_0)/(1 - t).$$

На рис. 4 представлена зависимость коэффициента увеличения контрастности β спектрометра при разных значениях коэффициента отражения зеркал резонатора. При коэффициенте отражения зеркал $R = 0,9999$ коэффициент увеличения контрастности достигает 10^4 и быстро уменьшается практически

по экспоненциальному закону при уменьшении R , достигая 98 при $R = 0,98$ и 19 при $R = 0,9$.

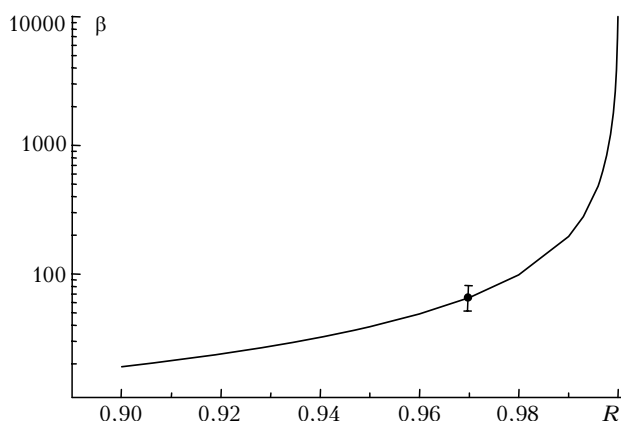


Рис. 4. Увеличение контраста β в высокочастотном резонаторе как функция коэффициента отражения зеркал R

Таким образом, даже при использовании обычных диэлектрических зеркал с коэффициентами отражения 0,9...0,99 можно получить заметное увеличение контрастности в 20...100 раз. Резкое увеличение контрастности в 1000 раз и более возникает, когда коэффициент отражения зеркал превышает 0,999. В нашем случае увеличение контрастности составило 65 раз, что соответствует коэффициенту отражения зеркал $R = 0,97$ и указывает на то, что данные зеркала характеризуются серьезными потерями α , достигающими 0,027. На рис. 4 доверительный интервал измеренного значения соответствует измерениям, проведенным по нескольким спектральным линиям.

Полученное увеличение контрастности даже с зеркалами невысокого качества сравнимо с увеличением контрастности спектрометра при использовании многоходовых кювет, которое типично составляет 100. Таким образом, использование внешних оптических резонаторов вместо многоходовых кювет позволяет создать простой и эффективный высококонтрастный спектрометр даже с не очень высокоотражающими зеркалами, что делает метод резонаторного увеличения поглощения эффективным для создания газоанализаторов.

Л.Н. Сеница выражает благодарность Ю.А. Поплавскому и А.П. Щербакову за предоставление фотосчитывателя на ПЗС-линейке и программного обеспечения для обработки результатов измерений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 06-02-08073, 05-03-32782).

1. O'Keefe A., Deacon D.A.G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources // Rev. Sci. Instrum. 1988. V. 59. N 12. P. 2544–2551.
2. Engeln R., Berden G., Peeters R., Meijer G. Cavity enhanced absorption and cavity enhanced magnetic rotation spectroscopy // Rev. Sci. Instrum. 1998. V. 69. N 11. P. 3763–3769.
3. Fiedler S.E., Hese A., Ruth A.A. Incoherent broadband cavity-enhanced absorption spectroscopy // Chem. Phys. Lett. 2003. N 371. P. 284–294.
4. Поплавский Ю.А., Сердюков В.И., Сеница Л.Н., Щербаков А.П., Матюльян Ю.А. Фотоэлектрическая регистрирующая система на основе ПЗС-линейки // Наука – производству. 2003. Т. 65. № 9. С. 28–29.
5. Лансберг Г.С. Оптика. М.: Наука, 1976. 926 с.

L.N. Sinitza, A.M. Solodov. High-sensitive spectrometer with high-Q resonator within 0.9 μm .

A spectrometer with outer high-Q optical resonator and non-coherent radiation source in the range 0.9 μm and spectral resolution of 0.08 cm^{-1} is designed. A halogen lamp of 100 W was used as the radiation source. Absorption spectra of atmospheric air and ethanol near 0.9 μm were recorded with the use of the spectrometer. The signal contrast coefficient of the spectrometer turned out to be 65 comparative to standard spectrophotometric method.