

Т.М. Петрова, Л.Н. Сеница, А.М. Солодов

## Внутрирезонаторный лазерный спектрометр на основе лазера на $F_2^+$ -центрах окраски в кристалле LiF с ламповой накачкой

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 07.07.2005 г.

Впервые запущен внутрирезонаторный лазерный спектрометр на  $F_2^+$ -центрах окраски в кристалле LiF с ламповой накачкой. Спектрометр работает на стабильных центрах окраски при комнатной температуре. Накачка активных центров производится с помощью люминесцентного преобразователя на растворе родамина 6G в этиловом спирте. Получена квазинепрерывная генерация в области  $10450\text{--}10580\text{ см}^{-1}$  длительностью до 20 мкс, что обеспечило пороговую чувствительность к поглощению  $5 \cdot 10^{-7}\text{ см}^{-1}$ .

Одним из самых высокочувствительных методов лазерной спектроскопии является метод внутрирезонаторного поглощения. Метод широкополосной внутрирезонаторной (ВР) лазерной спектроскопии состоит в тушении лазерного излучения на частотах линий поглощения вещества, помещенного внутрь резонатора многомодового лазера [1]. Спектр лазерного излучения имеет резкие провалы на частотах линий поглощения, и его можно описать выражением

$$J(\nu, t) = J(\nu, t_0) \exp[-K(\nu)L_{\text{эф}}], \quad (1)$$

где  $J(\nu, t_0)$  – спектр излучения лазера, сформированный к началу импульса генерации;  $K(\nu)$  – спектральный коэффициент поглощения.

Эффективная длина поглощающего слоя в ВР-спектроскопии определяется длительностью квазинепрерывной генерации лазера  $t$ :

$$L_{\text{эф}} = ctL_{\text{п}}/L_{\text{р}},$$

где  $c$  – скорость света;  $L_{\text{п}}$  – длина поглощающего слоя,  $L_{\text{р}}$  – длина резонатора.

Лазер имитирует многоходовую поглощающую кювету, но со значительно большей эффективной длиной  $L_{\text{эф}}$ . При длительности генерации  $t = 1\text{ мс}$  и  $L_{\text{п}}/L_{\text{р}} = 1$  эффективная длина поглощающего слоя  $L_{\text{эф}}$  равна 300 км.

Метод хорошо зарекомендовал себя в видимой и ближней ИК-областях спектра, где имеются многоканальные фотоприемные линейки типа CCD-камер. Кроме высокой чувствительности метод ВР-спектроскопии обладает рядом других достоинств: за импульс генерации наблюдается широкий спектр (свыше  $100\text{ см}^{-1}$ ), в котором регистрируются одновременно десятки линий поглощения, малые размеры кюветы позволяют исследовать вещество при внешнем возбуждении.

Одними из наиболее перспективных лазеров для ВР-спектроскопии являются лазеры на центрах ок-

раски, обладающие чрезвычайно широкой полосой генерации (до  $1000\text{ см}^{-1}$ ) и широким однородным контуром усиления, что необходимо для реализации высокой чувствительности ВР-метода. Первый ВР-спектрометр на основе лазеров на  $F_2^+$ -центрах окраски в кристалле LiF был запущен Э.А. Свириденковым с соавт. [2], с использованием рубинового лазера в качестве лазера накачки. В лазере на центрах окраски была достигнута длительность непрерывной генерации 1 мкс, что соответствует пороговой чувствительности к поглощению  $8 \cdot 10^{-5}\text{ см}^{-1}$  в спектральном диапазоне  $10100\text{--}11600\text{ см}^{-1}$ . Сотрудниками ИОА СО РАН был разработан ВР-спектрометр на основе лазеров на  $F_2^+$ -центрах окраски в кристалле LiF также с использованием в качестве лазера накачки рубинового лазера, но с длительностью генерации 80 мкс, что обеспечило пороговую чувствительность к поглощению  $10^{-7}\text{ см}^{-1}$  в том же спектральном диапазоне [3]. Использование ксенонного лазера в качестве лазера накачки позволило создать ВР-спектрометр на основе лазеров на  $F_2^+$ -центрах окраски в кристалле LiF с длительностью генерации 0,2 мкс, что ограничивает пороговую чувствительность к поглощению величиной  $10^{-5}\text{ см}^{-1}$  в диапазоне  $10430\text{--}11200\text{ см}^{-1}$  [4].

Ламповая накачка лазеров на кристаллах с центрами окраски дает возможность получать импульсы генерации с гладким временным контуром с длительностью десятки и сотни микросекунд, что открывает новые перспективы в создании ВР-спектрометров. Впервые генерация на  $F_2^+$ -центрах окраски в кристалле LiF с ламповой накачкой была получена в работе [5]. Активные элементы накачивались в осветителе шестью лампами ИНГ12-7/120 с энергией накачки до 1,5 кДж при длительности светового импульса 60 мкс. Максимальная энергия импульса генерации не превышала 10 мДж в диапазоне

перестройки  $9700\text{--}11200\text{ см}^{-1}$  при длительности генерации 12 мкс.

Эффективный способ улучшения характеристик лазера – трансформация спектра излучения ламп накачки с помощью люминесцентных преобразователей – использовался в работе [6] и был применен нами в данной работе при разработке ВР-спектрометра.

Схема спектрометра и его основные компоненты приведены на рис. 1.

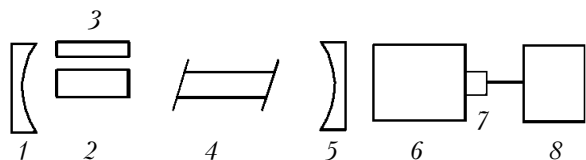


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 и 5 – зеркала резонатора; 2 – активный элемент; 3 – лампа вспышки; 4 – кювета; 6 – дифракционный монохроматор МДР-23; 7 – фотосчитыватель на основе ПЗС-линейки; 8 – персональный компьютер

Резонатор лазера образован двумя сферическими зеркалами с коэффициентами отражения 99,5 и 92%. Внутри резонатора размещена кювета длиной 35 см для напуска исследуемых газов. Активный элемент размером  $4,5 \times 4,5 \times 90$  мм из кристалла LiF помещен в стандартную лазерную головку типа квантрон. Оптическая накачка активного элемента осуществляется люминесценцией спиртового раствора органического красителя родамина 6G, возбуждаемого излучением импульсной лампы ИМП5/90А.

Раствор родамина 6G в этаноле является наиболее эффективным преобразователем для возбуждения  $F_2^+$ -центров. Полосы люминесценции родамина 6G совпадают со спектрами поглощения  $F_2^+$ -центров, кроме того раствор охлаждает кристалл и обрезает жесткое УФ-излучение ламп, тем самым защищая его от термохимической деградации.

Для регистрации спектров поглощения используется монохроматор МДР-23 с дифракционной решеткой 1200 штр./мм, работающей в первом порядке дисперсии и обеспечивающей обратную линейную дисперсию примерно  $10\text{ \AA}/\text{мм}$ . Для увеличения линейной дисперсии на выходе монохроматора устанавливался дополнительный высококачественный объектив из комплекта принадлежностей от интерферометрического стола СИН-1, что позволило во много раз повысить дисперсию и разрешение спектрального прибора. В фокальной плоскости объектива устанавливалась ПЗС-линейка SONY 1LX511, которая имеет 2048 ячеек и длину 28 мм. Более подробно описание работы фотоэлектронного считывателя приведено в работе [7].

Как уже указывалось выше, эффективная длина поглощающего слоя  $L_{\text{эф}}$  прямо пропорционально зависит от длительности генерации  $t$ . При этом подрастворяется, что в течение всего времени  $t$  лазер генерирует на стационарных модах резонатора, т.е. без скачков отдельных мод или групп мод. Из-за большого количества одновременно генерирующих мод этот эффект обычно завуалирован при регист-

рации временной развертки интенсивности излучения во всем спектральном интервале и, как правило, регистрируемая в эксперименте длительность импульса генерации принимается за время генерации на стационарных модах; тем самым дается завышенная оценка  $L_{\text{эф}}$  и, как следствие, чувствительности спектрометра к поглощению.

В данной работе для определения  $L_{\text{эф}}$  на выходе монохроматора вместо диодной линейки последовательно устанавливались оптическая щель и фотоумножитель ФЭУ-28, сигнал с которого регистрировался цифровым осциллографом С9-8 с временным разрешением 50 нс. Это время было гораздо меньше времени переходных процессов при возможных скачках генерирующих мод. С помощью оптической щели из всего спектра генерации лазера ( $100\text{--}150\text{ см}^{-1}$ ) выделялась очень узкая полоса частот ( $< 0,1\text{ см}^{-1}$ ) и из временной развертки интенсивности можно было сделать заключение о характере генерации.

Как видно из рис. 2, лазер генерирует на стационарных модах, т.е. без скачков частоты, и, следовательно,  $L_{\text{эф}}$  полностью определяется временем  $t$ .

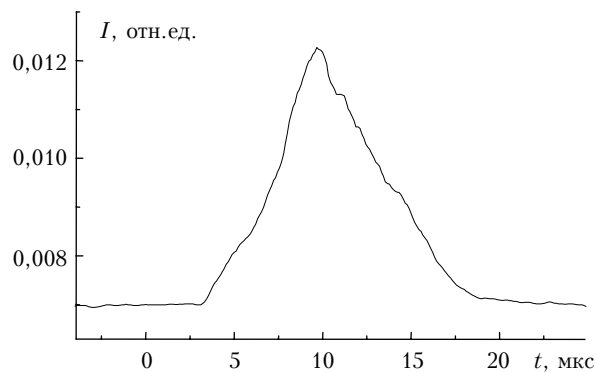


Рис. 2. Временная развертка интенсивности излучения лазера. Временное разрешение равно 50 нс, спектральное разрешение –  $0,1\text{ см}^{-1}$

Длительность импульса генерации в области  $10450\text{--}10580\text{ см}^{-1}$  составляла 15–20 мкс в зависимости от превышения порогового значения энергии накачки. Эта длительность генерации обеспечивает эффективную длину поглощающего слоя в кювете 1000 м при коэффициенте заполнения резонатора поглощающим веществом  $L_{\text{п}}/L_{\text{р}} = 0,3$ , что соответствует пороговой чувствительности к поглощению  $5 \cdot 10^{-6}\text{ см}^{-1}$ . Лазер мог работать с частотой повторения импульсов до 3 Гц, что позволяло реализовать режим накопления импульсов.

На данном спектрометре был зарегистрирован спектр поглощения атмосферного воздуха с содержанием паров водяного пара при давлении 4,5 торр (рис. 3).

Сравнение зарегистрированного спектра со спектрами, рассчитанными с помощью информационной системы «Спектроскопия атмосферных газов» [8], показало, что пороговая чувствительность спектрометра, которая составила  $5 \cdot 10^{-7}\text{ см}^{-1}$ , соответствует чувствительности спектрометра, полученной с помощью выражения (1).

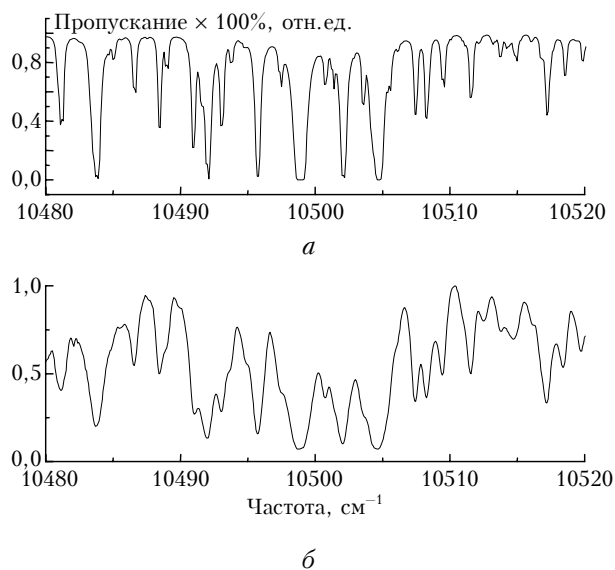


Рис. 3. Спектр поглощения атмосферного воздуха в области 10480–10520  $\text{см}^{-1}$ : *a* – рассчитанный с помощью [8]; *б* – полученный в данной работе

Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований № 03-02-16471-а и 05-03-32782.

1. Пахомычева Л.А., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф., Титова Л.В., Чурилов С.С. Линейчатая структура спектров генерации ОКГ с неоднородным уширением линии усиления // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 12. Вып. 2. С. 60–63.
2. Баев В.М., Гамалий В.Ф., Лобанов Б.Д., Мартынович Е.Ф., Свириденков Э.А., Сучков А.Ф., Хулугуров В.М. Применение лазеров на центрах окраски в щелочно-галогидных кристаллах для внутрирезонаторной лазерной спектроскопии // Квант. электрон. 1979. Т. 6. № 1. С. 92–97.
3. Кадошникова Т.М., Сердюков В.И., Сеница Л.Н. // Внутрирезонаторная лазерная спектроскопия атмосферного воздуха в области 0,88–1,03 мкм // Оптика атмосф. 1988. Т. 1. № 9. С. 43–48.
4. Baev V.M., Schröder H., Toschek P.F.  $\text{LiF:F}_2^+$ -center laser for intracavity spectroscopy // Opt. Commun. 1981. V. 36. N 1. P. 57–62.
5. Иванов Н.И., Исакова Е.Д., Карпушко Ф.В. и др. Лазер с ламповой накачкой на кристалле LiF со стабильными  $\text{F}_2^+$ -центрами окраски // Квант. электрон. 1986. Т. 13. № 11. С. 2328–2330.
6. Ivanov N.I., Inshlakov D.V., Khulugurov V.M. Lasers on  $\text{F}_2^+$ -centers in LiF with a transformer of the lamp spectrum // Laser Phys. 1997. V. 7. N 2. P. 416–417.
7. Поплавский Ю.А., Сердюков В.И., Сеница Л.Н., Матульян Ю.А., Щербаков А.П. Фотоэлектрическая регистрирующая система на основе ПЗС-линейки // Наука – производству. 2003. № 9. С. 28–29.
8. <http://spectra.iao.ru>

*T.M. Petrova, L.N. Sinitsa, A.M. Solodov. Intracavity laser spectrometer based on a laser at  $\text{F}_2^+$  centers in LiF crystal with lamp pumping.*

An intracavity laser spectrometer at  $\text{F}_2^+$  centers in a LiF crystal with lamp pumping is put in operation for the first time. Active centers are pumped with the help of a luminescent converter at a Rhodamine 6G solution in ethyl alcohol. Quasicontinuous lasing was obtained in a region of 10450–10580  $\text{см}^{-1}$  with a duration up to 20  $\mu\text{s}$ , which provided for the threshold absorption sensitivity of  $5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-1}$ .