

# Перестраиваемый Tm:YLF-лазер с диодной накачкой для задач спектроскопии газов в среднем ИК диапазоне

О.Н.Еремейкин, А.П.Савикин, К.Ю.Павленко, В.В.Шарков

*Экспериментально исследованы спектральные характеристики генерации Tm:YLF-лазера с продольной диодной накачкой. Осуществлена перестройка длины волны генерации в диапазоне 1860–1940 нм с шириной линии не более 1 нм. Исследовано влияние паров воды на спектральные характеристики.*

**Ключевые слова:** лазер на кристалле Tm:YLF, диодная накачка, внутрирезонаторная спектроскопия паров воды.

## 1. Введение

Дистанционная спектроскопия молекулярных газов по спектрам поглощения и/или рассеяния является одной из наиболее важных прикладных задач, при решении которых используются источники излучения в среднем ИК диапазоне. Для построения компактных и эффективных лазерных систем среднего ИК диапазона применяются лазеры на кристаллах, легированных ионами Tm<sup>3+</sup>. В частности, лазер на кристалле Tm:YLF генерирует мощное излучение на длине волны 1908 нм в пучках хорошего качества при высокой эффективности преобразования диодной накачки на длине волны 790–795 нм [1–3]. С целью расширения спектрального диапазона Tm:YLF-лазер может применяться для накачки кристалла Ho:YAG, излучающего на длине волны 2.1 мкм, что позволит в дальнейшем с помощью параметрических генераторов света перейти в диапазон длин волн 3–5 мкм [4, 5].

Представляется перспективным использование Tm:YLF-лазера для оптической накачки кристаллов халькогенидов (ZnS, ZnSe, CdSe и др.), легированных ионами металлов переходной группы (Cr, Co, Ni, Fe и др.). Это также даст возможность создать компактные и эффективные лазеры со спектральной перестройкой в диапазоне 2–5 мкм для задач спектроскопии газов, в том числе с помощью высокочувствительного метода внутрирезонаторной лазерной спектроскопии [6–9].

Поскольку спектр генерации Tm:YLF-лазера лежит в области колебательно-вращательных поглощающих переходов молекул воды, на него практически всегда влияют присутствующие в атмосфере пары воды [1]. Использование селективных резонаторов позволяет управлять шириной и положением спектра генерации и, тем самым, отстраиваться от линий поглощения паров воды.

**О.Н.Еремейкин.** Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; e-mail: eon@rambler.ru

**А.П.Савикин, К.Ю.Павленко, В.В.Шарков.** Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23; e-mail: savikin@rf.unn.ru

Поступила в редакцию 5 февраля 2010 г., после окончательного оформления – 16 апреля 2010 г.

В настоящей работе были проведены экспериментальные исследования спектральных характеристик генерации Tm:YLF-лазера с продольной диодной накачкой при использовании интерференционно-поляризационного фильтра. Исследовалось влияние паров воды на спектр генерации лазера, размещенного в боксе, который мог прокачиваться азотом.

## 2. Описание экспериментальной установки

Резонатор исследуемого лазера состоял из плоского «глухого» (1) и сферического выходного (2) зеркал с коэффициентом пропускания на длине волны генерации  $T \approx 11\%$  и радиусом кривизны 200 мм, длина резонатора  $L_r$  составляла 120 мм (рис. 1). Накачка кристалла Tm:YLF 3 (содержание ионов Tm<sup>3+</sup> около 2.5 мас.%, длина 18 мм, диаметр 3 мм), помещенного в медный радиатор со стабилизацией температуры около 15 °С, на длине волны 793 нм осуществлялась диодными линейками (Coherent FAP-800) с волоконным выводом 4. Излучение накачки заводилось через дихроичные зеркала 5, расположенные внутри резонатора под углом Брюстера и имеющие высокий коэффициент отражения на длине волны накачки, система линз 6 обеспечивала перенос изображения в отношении 1:1 с торца волокна 4 в кристалл Tm:YLF.

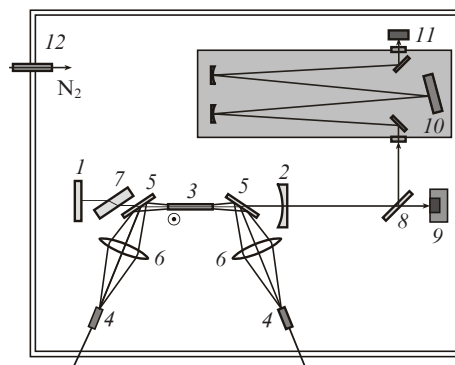


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – «глухое» зеркало; 2 – выходное зеркало; 3 – кристалл Tm:YLF; 4 – волоконные выводы диодных лазеров накачки; 5 – дихроичные зеркала; 6 – оптические конденсоры; 7 – фазовая пластинка; 8 – полупрозрачное зеркало; 9 – измеритель мощности; 10 – спектрограф МДР-41; 11 – фотоприемник ФСА-Г1; 12 – бокс с прокачкой азотом.

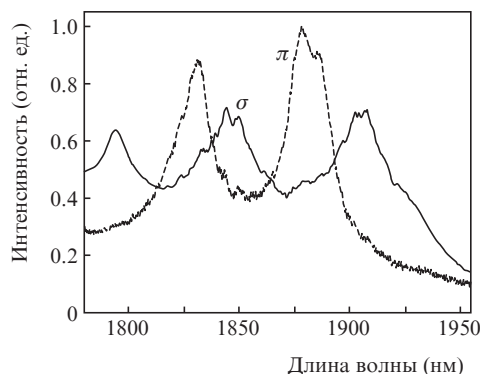


Рис.2. Спектр люминесценции кристалла Tm:YLF (спектральное разрешение  $\delta\lambda \sim 1$  нм).

Кристалл Tm:YLF является одноосным анизотропным и имеет интенсивные широкие линии излучения в спектральном диапазоне 1.75–1.95 мкм с  $\pi$ - и  $\sigma$ -поляризациями (рис.2). Для достижения генерации на длине волны 1908 нм оптическая ось кристалла была ориентирована перпендикулярно плоскости схемы. При этом дихроичные зеркала обладали наименьшими потерями для необходимой нам  $\sigma$ -поляризации. С целью перестройки спектра генерации лазера внутрь резонатора помещалась сапфировая фазовая пластинка 7 толщиной 5 мм, закрепленная на моторизованном поворотном столике (Standa, минимальный шаг  $1/200^\circ$ ).

Спектр генерации Tm:YLF-лазера измерялся спектрографом МДР-41 с минимальным спектральным разрешением  $\delta\lambda \sim 0.1$  нм в диапазоне длин волн 1.8–2 мкм. Излучение регистрировалось фоторезистором PbS (модель ФСА-Г1), помещенным на выходной щели спектрографа. Дистанционное управление двигателями спектрографа и поворотного столика с фазовой пластинкой и источником тока диодной линейки, а также сбор и обработка данных обеспечивались компьютерной системой на основе платы NI\_PCI\_6251; программа управления, обработки и графического отображения данных была написана в среде программирования LabVIEW.

Исследуемый лазер и схема регистрации излучения помещались в прокачиваемый азотом герметичный бокс (рис.1), в результате чего изменялось процентное содержание паров воды. Влажность внутри бокса контролировалась портативным цифровым измерителем CENTER 310.

### 3. Генерация Tm:YLF-лазера с неселективным резонатором

В описанной схеме получена генерация с дифференциальным КПД около 32% и параметром качества пучка  $M^2 \leq 2.5$  (рис.3). Излучение было поляризовано в горизонтальной плоскости, степень эллиптичности поляризации (не менее 1:200) определялась поляризующими свойствами дихроичных зеркал и анизотропией кристалла Tm:YLF. Режим генерации имел пиковый характер с периодом следования 30–50 мкс, длительность отдельного пика составляла  $\sim 5$  мкс при выходной мощности 2 Вт.

Форма и положение спектра генерации зависела от мощности накачки (рис.4). Вблизи порога спектр был локализован в области 1908.5 нм, а с увеличением мощности динамика спектра приобретала сложный характер: помимо плавного смещения и расширения спектра наблюдались изменения его формы. Такое поведение спектра



Рис.3. Зависимость выходной мощности лазера от мощности накачки.

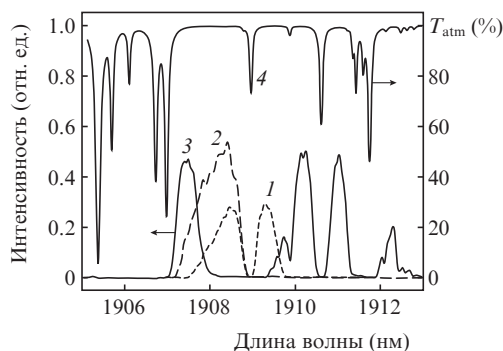


Рис.4. Спектры генерации Tm:YLF-лазера при мощности генерации  $P_{gen} = 1.2$  (1), 4 (2) и 6 Вт (3); 4 – спектр пропускания одного метра стандартной атмосферы  $T_{atm}$  [10].

можно объяснить как спектральной зависимостью коэффициента усиления от превышения мощности накачки над порогом, так и температурной зависимостью потерь, обусловленных поглощением на рабочем переходе.

В спектре генерации наблюдались провалы вблизи длин волн 1909, 1910, 1910.5 и 1911.5 нм. Это позволило сделать предположение о наличии больших внутрирезонаторных потерь, обусловленных поглощением излучения в атмосфере. Действительно, провалы в спектре генерации Tm:YLF-лазера совпадают с линиями поглощения паров воды (рис.4, табл.1) [1, 10].

С уменьшением влажности до 2% наблюдалось уменьшение глубины спектральных провалов. Это указывало на снижение влияния поглощения паров воды на спектральные характеристики вследствие уменьшения внутрирезонаторных потерь (рис.5).

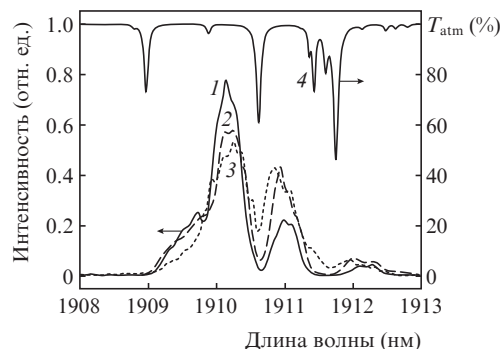


Рис.5. Спектры генерации Tm:YLF-лазера при относительной влажности воздуха  $\varphi = 23\%$  (1), 9% (2) и 2% (3); 4 – спектр пропускания одного метра стандартной атмосферы  $T_{atm}$  [10] ( $P_{gen} = 7.5$  Вт).

Табл.1. Наиболее интенсивные линии поглощения воды в спектральном диапазоне 1905–1914 нм [10].

Переход	Длина волны (нм)	Сечение поглощения (см <sup>2</sup> )	Ширина линии (см <sup>-1</sup> )
011–000	1913.76	$1.56 \times 10^{-20}$	0.087
	1911.75	$5.06 \times 10^{-21}$	0.090
	1910.61	$3.27 \times 10^{-21}$	0.087
	1906.98	$8.78 \times 10^{-21}$	0.085
	1906.73	$6.76 \times 10^{-21}$	0.091
	1905.38	$1.94 \times 10^{-20}$	0.091
110–000	1903.02	$1.77 \times 10^{-20}$	0.094
	1908.97	$1.94 \times 10^{-21}$	0.085

### 4. Генерация Tm:YLF-лазера с фазовой пластинкой внутри резонатора

Спектр генерации управлялся фазовой пластинкой из сапфира толщиной  $d = 5$  мм, вырезанной параллельно оптической оси кристалла и помещенной внутрь резонатора под углом Брюстера.

Фазовый сдвиг  $\Delta\varphi$  между обыкновенной и необыкновенной волнами при их прохождении через фазовую пластинку, определяемый длиной волны  $\lambda$ , показателями преломления  $n_o$  и  $n_e$ , а также толщиной  $d$ , приводит к изменению поляризации на выходе пластинки [11]. Если  $\Delta\varphi = 2\pi n$ , где  $n$  – целое число, то входная поляризация излучения для данной длины волны не изменяется. Перестройка спектра генерации осуществлялась поворотом фазовой пластинки вокруг нормали к ее поверхности вследствие зависимости показателя преломления необыкновенной волны  $n_e$  от угла  $\theta$  между оптической осью и вектором поляризации падающего излучения.

Селективные потери по поляризации определялись дихроичными зеркалами, анизотропией кристалла Tm:YLF и брюстеровскими поверхностями фазовой пластинки.

На длине волны генерации Tm:YLF-лазера 1908 нм экспериментально была исследована угловая зависимость коэффициента пропускания сапфировой пластинки  $T_{sap}$ , помещенной вне резонатора под углом Брюстера (измеренный период  $\sim 12^\circ$ ) (рис.6).

Область свободной дисперсии интерференционного поляризационного фильтра на основе фазовой пластинки

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{d(n_e - n_o)}. \tag{1}$$

Для нашей фазовой пластинки из сапфира с учетом ориентации под углом Брюстера ( $\lambda = 1908$  нм,  $n_e = 1.731$ ,  $n_o = 1.739$ ) имеем  $\Delta\lambda \approx 75$  нм. Учитывая, что измеренный

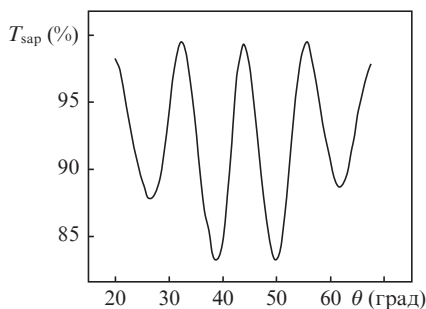


Рис.6. Зависимость коэффициента пропускания сапфировой пластинки  $T_{sap}$ , расположенной вне резонатора, от угла поворота  $\theta$ .

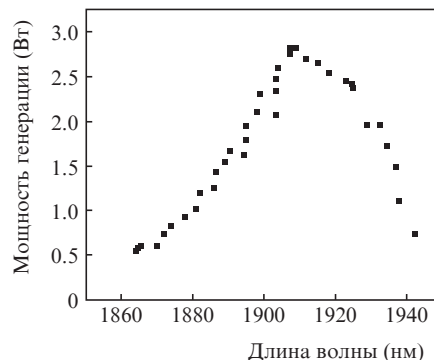


Рис.7. Кривая перестройки спектра генерации Tm:YLF-лазера с фазовой пластинкой при мощности накачки  $P_p = 18$  Вт.

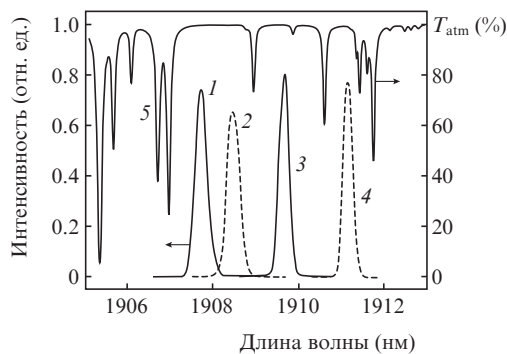


Рис.8. Спектры генерации Tm:YLF-лазера с фазовой пластинкой при изменениях угла  $\theta$ :  $\Delta\theta = 0$  (1),  $0.15^\circ$  (2),  $0.35^\circ$  (3) и  $0.55^\circ$  (4); 5 – спектр пропускания одного метра стандартной атмосферы  $T_{atm}$  [10] ( $P_{gen} = 2.2$  Вт).

угловой период коэффициента пропускания фазовой пластинки составляет около  $12^\circ$ , получаем коэффициент перестройки длины волны генерации, равный примерно 6 нм/град.

Использование фазовой пластинки внутри резонатора позволило осуществить перестройку спектра генерации в пределах полосы более 70 нм, при этом падение мощности в максимуме перестроечной кривой не превысило 1.5% (рис.7). Угловой период изменения спектра генерации также составлял  $12^\circ$ , а коэффициент перестройки соответствовал ранее оцененному значению. При отстройке от линий поглощения паров воды установлено, что ширина линии генерации с селективным резонатором  $\delta\lambda_{gen} \leq 1$  нм (рис.8).

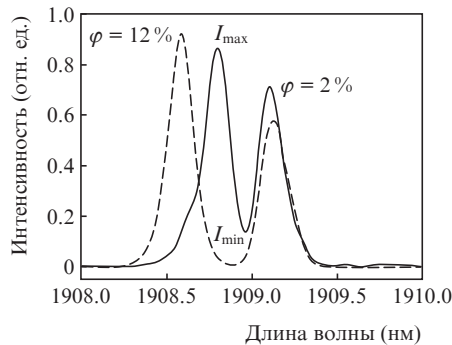


Рис.9. Спектры генерации Tm:YLF-лазера с фазовой пластинкой при настройке на линию паров воды 1908.9 нм и относительной влажности  $\varphi = 12\%$  и  $2\%$ ;  $P_{gen} = 2.2$  Вт,  $P_p = 16$  Вт, пороговая мощность накачки  $P_p^{th} = 8$  Вт.

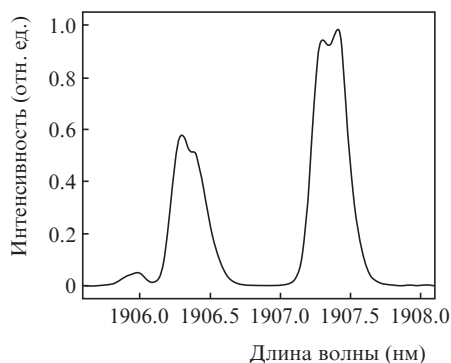


Рис.10. Спектр генерации Tm:YLF-лазера с фазовой пластинкой при настройке на линии паров воды 1906.7 и 1907 нм при относительной влажности  $\varphi = 2\%$ ;  $P_{\text{gen}} = 2.2$  Вт,  $P_p = 16$  Вт,  $P_p^{\text{th}} = 8$  Вт.

Настройка селективного резонатора на одну из линий поглощения паров воды приводила к уширению спектра генерации лазера со спектральным провалом в центре (рис.9). С уменьшением влажности до 2% наблюдалось уменьшение глубины спектрального провала на длине волны 1908.9 нм и ширины линии генерации, однако более интенсивные линии поглощения паров воды (на 1906.7 и 1907 нм) по-прежнему приводили к полному «выгоранию» спектра генерации (рис.10).

## 5. Обсуждение результатов

По своей сути экспериментальная установка представляла собой широкополосный вариант внутррезонаторного лазерного спектрометра, поглощающей ячейкой в котором являлось свободное пространство резонатора.

В ближней ИК области спектр поглощения молекул воды состоит из отдельных колебательно-вращательных линий с однородно уширенным за счет столкновений контуром. При атмосферном давлении ширина наблюдаемых линий поглощения паров воды  $\Delta\lambda_{\text{abs}} \sim 0.05$  нм [10, 12], что в два раза меньше ширины аппаратной функции спектрометра, использованного в эксперименте. Измеряемый провал в спектре генерации представляет собой интеграл свертки аппаратной функции и реальной ширины линии поглощения, что снижает чувствительность установки [12]. Отметим, что межмодовый интервал резонатора  $\Delta\lambda_r \sim 0.015$  нм, т.е. в полосу поглощения попадают несколько продольных мод резонатора.

Оценим чувствительность регистрации паров воды по линии с длиной волны 1908.97 нм (см. табл.1). Поскольку в эксперименте измерялась относительная влажность воздуха  $\varphi$ , то объемная концентрация паров воды  $N$  (в  $\text{см}^{-3}$ ) определялась выражением

$$N = 6.02 \times 10^{23} \varphi \frac{\rho_{\text{max}}}{M_{\text{H}_2\text{O}}}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{max}}$  – максимальная влажность паров воды при заданной температуре воздуха (находится из табличных данных);  $M_{\text{H}_2\text{O}}$  – молекулярный вес воды.

По провалу в спектре генерации найдем эффективную длину  $l_{\text{eff}}$  слоя паров воды, соответствующую наблюдаемому пропусканью  $T = I_{\text{min}}/I_{\text{max}}$  для  $\varphi = 2\%$  и  $N = 1.2 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$  (рис.9):

$$l_{\text{eff}} = [\ln(1/T)]/(\sigma N) \approx 10^5 \text{ см}, \quad (3)$$

где  $\sigma$  – сечение поглощения паров воды (табл.1).

Полученное значение  $l_{\text{eff}}$  коррелирует с оценкой эффективной длины поглощающего слоя, пропорциональной времени  $T$  стабильной генерации в окрестности линии поглощения, если за время  $T$  брать длительность пика генерации ( $\sim 5$  мкс) [12]:

$$l_{\text{eff}T} = cT\mu \approx 10^5 \text{ см}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – коэффициент заполнения резонатора поглощающей средой.

Отношение сигнал/шум для нашей измерительной системы позволяет уверенно регистрировать относительную глубину спектрального провала  $\Delta I/I_0 \sim 0.1$ . При этом пороговая чувствительность, т.е. наименьший коэффициент поглощения, соответствующий минимально регистрируемой глубине провала, может составлять  $\sim 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ .

Помимо поглощения лазерного излучения внутри резонатора, происходит также его поглощение на пути от выходного зеркала резонатора до фотоприемника (через спектрометр). Оценки показывают, что при влажности 2% коэффициент поглощения паров воды на длине пути 1 м не превышает 0.3%, вследствие чего этим поглощением можно пренебречь.

## 6. Заключение

Проведены экспериментальные исследования спектральных характеристик генерации лазера на кристалле Tm:YLF с продольной диодной накачкой и селективным резонатором. Осуществлена перестройка длины волны генерации в диапазоне 1860–1940 нм с шириной линии не более 1 нм. Определено влияние паров воды на спектральные характеристики выходного излучения. Показана возможность использования Tm:YLF-лазера для регистрации содержащихся в атмосфере паров воды методом внутррезонаторной лазерной спектроскопии.

Работа выполнена при финансовой поддержке АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект №2.1.1/3603), а также гранта Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ №НШ-2786.2008.2.

- Schellhorn M. *J. Appl. Phys. B*, **91**, 71 (2008).
- So S., Mackenzie J.I., Shepherd D.P., Clarkson W.A., Betterton J.G., Gorton E.K. *J. Appl. Phys. B*, **84**, 389 (2006).
- Захаров Н.Г., Антипов О.Л., Савикин А.П., Шарков В.В., Еремейкин О.Н., Фролов Ю.Н., Мищенко Г.М., Великанов С.Д. *Квантовая электроника*, **39**, 410 (2009).
- Lippert E., Rustad G., Nicolas S., Arisholm G., Stenersen K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5620**, 56 (2004).
- Schellhorn M., Hirth A., Kieleck C. *Opt. Lett.*, **28**, 1933 (2003).
- Акимов В.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Фролов М.П. *Квантовая электроника*, **35**, 425 (2005).
- Adams J.J., Bibeau C., Page R.H., Krol D.M., Furu L.H., Payne S.A. *Opt. Lett.*, **24**, 1720 (1999).
- Sennaroglu A. et al. *Opt. Commun.*, **268**, 115 (2006).
- Fedorov V.V. et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42**, 907 (2006).
- <http://spectra.iao.ru/>.
- Bloom A.L. *J. Opt. Soc. Am.*, **64**, 447 (1974).
- Лукияненко С.Ф., Макогон М.М., Синица Л.Н. *Внутррезонаторная лазерная спектроскопия. Основы метода и применения* (Новосибирск: Наука, 1985).