

МАЛОГАБАРИТНЫЙ Er:YLF-ЛАЗЕР С ПАССИВНЫМ Fe²⁺:ZnSe-ЗАТВОРОМ

© 2012 г. М. В. Иночкин*, канд. физ.-мат. наук; В. В. Назаров*, канд. техн. наук;
 Д. Ю. Сачков*; Л. В. Хлопонин*, канд. техн. наук;
 В. Ю. Храмов*, доктор техн. наук; Ю. В. Коростелин**, канд. техн. наук;
 А. И. Ландман**, канд. физ.-мат. наук; Ю. П. Подмарьков**;
 М. П. Фролов**, канд. физ.-мат. наук

* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

** Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), Москва

E-mail: l_khloponin@yahoo.com

В настоящей работе экспериментально исследована генерация Er:YLF-лазера на длинах волн 2,66, 2,71 и 2,81 мкм при селективной накачке излучением лазерных диодов на длине волны 0,98 мкм и пассивной модуляции добротности резонатора затвором на кристалле Fe²⁺:ZnSe. Получены моноимпульсы с энергией 3 мДж и длительностью 30 нс на длине волны 2,81 мкм.

Ключевые слова: эрбиевый лазер, диодная накачка, многочастотная генерация, пассивная модуляция добротности, Fe²⁺:ZnSe.

Коды OCIS: 140.3580, 140.3500, 140.3540.

Поступила в редакцию 27.07.2011.

Введение

Мощные лазеры, излучающие в области $\lambda = 3$ мкм, представляют интерес для лазерной медицинской техники и технологий [1–3]. В этой области спектра, в частности, получена генерация в кристаллах, активированных ионами Er³⁺. В настоящее время эрбиевые лазеры, работающие в режиме модуляции добротности резонатора, обеспечивают пиковую мощность на уровне 1,5–3,5 МВт [3, 4]. Для модуляции добротности резонатора в таких лазерах применяются активные затворы (на основе электрооптического эффекта [4], эффекта нарушенного полного внутреннего отражения [5] и др.) и пассивные затворы (на кристаллах A2B6, легированных ионами Fe²⁺ [6], полупроводниковых слоях InAs [7], жидкостные [8] и др.). Из пассивных затворов большие перспективы имеют кристаллы ZnSe, легированные ионами Fe²⁺.

В большинстве известных нам работ модуляция добротности резонатора осуществлялась в эрбиевых лазерах с ламповой накачкой (например [1–8]). Вместе с тем использование накачки лазерными диодами позволяет существенно увеличить срок службы излучателя, а также уменьшить габариты и энергопотреб-

ление лазера. Пассивная модуляция добротности резонатора Er:YAG-лазера с диодной накачкой была впервые описана в [9], причем энергия отдельных гигантских импульсов достигала лишь 3 мкДж. В рамках данной работы реализована генерация мощного малогабаритного Er:YLF-лазера с диодной накачкой в режиме модуляции добротности пассивным затвором на кристалле Fe²⁺:ZnSe, получены моноимпульсы с энергией 3 мДж и длительностью 30 нс.

Описание экспериментального лазера

Схема экспериментального Er:YLF-лазера приведена на рис. 1. В качестве источника накачки использовалась матрица лазерных диодов

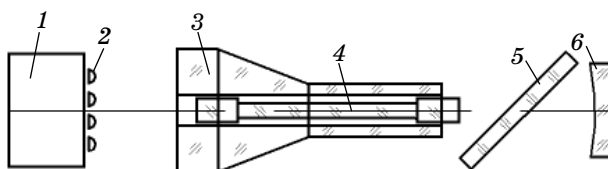


Рис. 1. Схема экспериментального Er:YLF-лазера: 1 – матрица лазерных диодов, 2 – микролинзы, 3 – призма полного внутреннего отражения, 4 – активный элемент (Er:YLF), 5 – Fe²⁺:ZnSe-затвор, 6 – сферическое выходное зеркало с радиусом кривизны $r = 1,2$ м.

дов 1, состоящая из четырех линеек. Диоды рассчитаны на работу в импульсно-периодическом режиме при длительности импульса тока до 1 мс. Импульсная мощность излучения матрицы при максимальном токе накачки составляла 700 Вт, средняя длина волны излучения – 975 нм при температуре корпуса матрицы 25 °С, ширина спектра – порядка 6 нм.

Активный элемент лазера 4 (Er:YLF, концентрация активатора 15 ат.%) имел форму цилиндра с размерами $\varnothing 2 \times 35$ мм. На один из торцов активного элемента было нанесено диэлектрическое покрытие, выполняющее роль глухого зеркала для излучения генерации и просветляющего покрытия для излучения накачки. На второй торец было нанесено просветляющее покрытие.

Ввод излучения накачки в активный элемент осуществлялся по продольно-поперечной схеме, реализованной с помощью системы призм полного внутреннего отражения 3. Для наилучшего согласования диаграммы направленности излучения матрицы диодов накачки 1 с геометрией осветительных призм на выходном окне матрицы 1 были установлены микролинзы 2, коллимирующие излучение вдоль “быстрой” оси диодов. Охлаждение активного элемента и диодной матрицы осуществлялось проточной водой.

Резонатор лазера был образован плоским глухим зеркалом, напыленным на торце активного элемента, и внешним сферическим выходным зеркалом 6 (радиус кривизны $r = 1,2$ м, коэффициент отражения $R_{out} 0,85$ или $0,95$). Длина резонатора лазера составляла 12 см.

В экспериментах использовались два $Fe^{2+}:ZnSe$ -затвора с различным начальным пропусканием (табл. 1). Материалом затворов служили монокристаллы $Fe^{2+}:ZnSe$, выращенные из паровой фазы методом свободного роста на монокристаллическую затравку с использова-

нием химического транспорта в водороде [10]. Легирование ионами Fe^{2+} осуществлялось непосредственно в процессе роста. Затворы были выполнены в виде плоскопараллельных пластин и располагались в резонаторе под углом Брюстера (для π -поляризации).

Результаты экспериментов

На рис. 2 приведена осциллограмма излучения лазера, полученная при длительности импульса накачки $T_p = 1$ мс. В данном эксперименте использовались пассивный $Fe^{2+}:ZnSe$ -затвор толщиной 0,9 мм и неселективное по спектру генерации сферическое выходное зеркало резонатора с коэффициентом отражения $R_{out} = 0,85$. Частота следования импульсов накачки составляла 10 Гц.

Как видно из рис. 2, на осциллограмме имеются моменты времени, когда интенсивность и частота следования пиков генерации скачкообразно изменяются. Исследование спектрального состава излучения Er:YLF-лазера показало, что в эти моменты времени изменяется и длина волны генерации в последовательности 2,66, 2,71 и 2,81 мкм (рис. 3). Результаты измерений параметров лазерного излучения на каждой длине волны приведены в табл. 2.

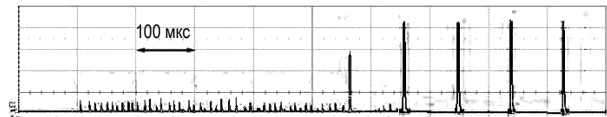


Рис. 2. Осциллограмма импульса генерации Er:YLF-лазера с пассивным $Fe^{2+}:ZnSe$ -затвором.

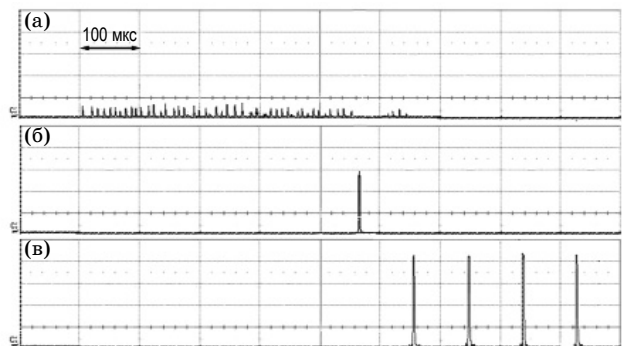


Рис. 3. Динамика генерации Er:YLF-лазера с $Fe^{2+}:ZnSe$ -затвором (0,9 мм) на трех длинах волн: а – импульс генерации на $\lambda = 2,66$ мкм, б – $\lambda = 2,71$ мкм, в – $\lambda = 2,81$ мкм.

Таблица 1. Начальное пропускание $Fe^{2+}:ZnSe$ -затворов, использованных в экспериментах. Результаты измерений для лазерного излучения π -поляризации, падающего на затвор под углом Брюстера (68°)

Толщина пластины (по нормали), мм	Пропускание на длине волны		
	2,66 мкм	2,71 мкм	2,81 мкм
0,9	0,96	0,95	0,93
1,85	0,94	0,93	0,91

Полученные данные показывают, что наименьшая пиковая мощность пиков генерации реализуется на длине волны 2,66 мкм, наибольшая – на длине волны 2,81 мкм.

Схожий результат был получен в эксперименте с использованием затвора толщиной 1,85 мм и выходного зеркала с коэффициентом отражения $R_{\text{out}} = 0,95$ (табл. 2). В данном опыте длительность импульса накачки была ограничена величиной 600 мкс, так как при более длинных импульсах накачки наблюдалось повреждение затвора. При указанных условиях генерация осуществлялась только на двух длинах волн: 2,66 и 2,71 мкм. Как и следовало ожидать, использование затвора большей толщины (с меньшим начальным пропусканием) позволяет увеличить пиковую мощность отдельных пиков генерации на всех длинах волн.

Наибольший интерес для медицинских приложений представляет длина волны 2,81 мкм, так как она находится наиболее близко к центру максимума поглощения воды. С целью реализации генерации только на длине волны 2,81 мкм было применено выходное спектрально-селективное зеркало с коэффициентом от-

ражения $R_{\text{out}} = 0,92$ на длине волны 2,81 мкм, а на длине волны 2,66 мкм – $R_{\text{out}} < 50\%$. С использованием данного зеркала и затвора толщиной 1,85 мм были получены моноимпульсы длительностью 30 нс и энергией 3 мДж с длиной волны 2,81 мкм. При этом время задержки начала генерации составляло 415 мкс, что позволило использовать импульс накачки длительностью 450 мкс. С увеличением длительности импульса накачки до 0,8 мс наблюдалась генерация трех импульсов с суммарной энергией 6,7 мДж. Длительность каждого моноимпульса по-прежнему составляла 30 нс.

Обсуждение

Изменение длины волны генерации эрбиевых лазеров в течение импульса накачки наблюдалось еще в первых работах [11, 12]. Данный эффект является следствием заселения нижнего лазерного уровня ${}^4I_{13/2}$ трехмикронного перехода ${}^4I_{11/2}$ – ${}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} . Напомним, что в эрбиевых кристаллах время жизни мультиплета ${}^4I_{13/2}$ (10 мс для $\text{Er}:\text{YLF}$ [13]) существенно превышает время жизни мультиплета ${}^4I_{11/2}$ (4 мс для $\text{Er}:\text{YLF}$ [13]).

Таблица 2. Параметры генерации $\text{Er}:\text{YLF}$ -лазера с $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -затворами

Параметр	Длина волны генерации, мкм	Условия эксперимента		
		$R_{\text{out}} = 0,85$ $T_p = 1 \text{ мс}$	$R_{\text{out}} = 0,95$ $T_p = 0,6 \text{ мс}$	
		$d = 0,9 \text{ мм}$	$d = 0,9 \text{ мм}$	$d = 1,85 \text{ мм}$
Суммарная энергия генерации E_{Σ} , мДж		31	4,7	5,6
Время задержки начала генерации t_d , мкс	2,66	130	55	100
	2,71	515	525	600
	2,81	595	—	—
Длительность пика генерации τ , нс	2,66	300	120	120
	2,71	100	50	50
	2,81	40	—	—
Импульсная мощность пика генерации P , кВт	2,66	0,6	0,67	1,7
	2,71	30	10	14
	2,81	75	—	—
Энергия отдельного пика генерации, мДж	2,66	0,17	0,08	0,2
	2,71	3	0,5	0,7
	2,81	3	—	—

Примечание: R_{out} – коэффициент отражения выходного зеркала, T_p – длительность импульса накачки, d – толщина затвора.

Таблица 3. Значения сечения поглощения σ_{as} $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ [15] и сечения вынужденного излучения σ_e $\text{Er}:\text{YLF}$ [16] для длин волн генерации, наблюдаемых в экспериментах

Длина волны, мкм	$\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe} \sigma_{as}, 10^{-19} \text{ см}^2$	$\text{Er}:\text{YLF} \sigma_e, 10^{-19} \text{ см}^2$	σ_{as}/σ_e
2,66	5,6	0,23	24
2,71	7,1	0,15	47
2,81	9,1	0,09	101

При отсутствии в резонаторе экспериментального $\text{Er}:\text{YLF}$ -лазера пассивного затвора и неселективным по спектру выходным зеркалом в течение импульса накачки наблюдалась смена длины волны генерации в последовательности 2,66, 2,71, 2,81 и 2,84 мкм [14]. В экспериментах по модуляции добротности резонатора $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -затвором последовательность длин волн генерации не изменилась. Ограничения по длительности импульса накачки, по видимому, не позволили получить длину волны генерации 2,84 мкм.

Как видно из табл. 2, в режиме модуляции добротности с увеличением длины волны генерации мощность пиков излучения возрастала, в то время как в режиме свободной генерации пиковая мощность импульсов на всех наблюдаемых длинах волн была примерно одинакова [14]. Указанное отличие многочастотной генерации $\text{Er}:\text{YLF}$ -лазера в режиме пассивной модуляции добротности $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -затвором от режима свободной генерации связано с тем, что сечение поглощения σ_{as} перехода ${}^5E-{}^5T_2$ иона Fe^{2+} в кристалле ZnSe и сечение вынужденного излучения σ_e перехода ${}^4I_{11/2}-{}^4I_{13/2}$ иона Er^{3+} в кристалле YLF существенным образом изменяются в области рассматриваемых длин волн

(табл. 3). Как видно из данных табл. 3, отношение σ_{as}/σ_e увеличивается с ростом длины волны. Кроме того, в рассматриваемой области спектра с ростом длины волны увеличивается и абсолютное значение сечения поглощения $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ (σ_{as}), т. е. начальное пропускание затвора уменьшается (см. табл. 1). Таким образом, с увеличением длины волны генерации $\text{Er}:\text{YLF}$ -лазера с пассивным $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ -затвором возрастает как оптическая плотность затвора в закрытом состоянии, так и отношение интенсивностей насыщения активной среды и затвора, что, очевидно, и приводит к росту пиковой мощности пиков генерации.

Заключение

В настоящей работе впервые реализована модуляция добротности резонатора малогабаритного $\text{Er}:\text{YLF}$ -лазера с диодной накачкой пассивным затвором на кристалле $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$. С использованием селективного по спектру выходного зеркала были получены импульсы излучения с пиковой мощностью порядка 100 кВт и длительностью 30 нс на длине волны 2,81 мкм.

В случае неселективных зеркал резонатора наблюдалась смена длины волны генерации $\text{Er}:\text{YLF}$ -лазера в течение импульса диодной накачки, происходящая в той же последовательности, что и в режиме свободной генерации, т. е. от коротких длин волн к более длинным. При этом в отличие от режима свободной генерации в том же лазере в режиме модуляции добротности мощность пиков генерации на длине волны 2,66 мкм оказалась меньше таковой на длине волны 2,81 мкм в 130 раз.

Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы”, грант № РНП 2.1.2/4302 № РНП. 2.1.2/11126.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Frieda N.M., Yanga Y., Chaneya Ch.A., Fried D. Transmission of Free-Running and Q-Switched Erbium:YSGG Laser Radiation Through Sapphire and Germanium Fibers // Proc. SPIE. 2004. V. 5317. P. 9–12.
2. Koranda P., Nemeč M., Jelinkova H., Sulc J., Cech M., Shi Y.-W., Matsuura Y., Miyagi M. Electro-optically Q-switched Er:YAG laser and its application // Proc. SPIE. 2005. V. 5777. P. 384–389.
3. Liu B., Eicher H.J., Sperlich O., Holschbach S., Kayser M. Compact erbium lasers in the IR photorefractive keractomy (PRK) // Proc. SPIE. 1996. V. 2887. P. 46–53.

4. *Zajac A., Skorczakowski M., Swiderski J., Nyga P.* Electrooptically Q-switched mid-infrared Er:YAG laser for medical applications // *Opt. Exp.* 2004. V. 12. № 21. P. 5125–5130.
5. *Hogele A., Horbe G., Lubatschowski H., Welling H., Ertmer W.* 2,70 μm CrEr:YSGG laser with high output energy and FTIR-Q-switch // *Opt. Commun.* 1996. V. 125. P. 90–94.
6. *Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Полушкин В.Г., Фролов М.П.* Пассивный затвор на основе монокристалла $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ для модуляции добротности лазеров трехмикронного диапазона // *Квант. электрон.* 2006. Т. 36. № 1. С. 1–2.
7. *Konz F., Frenz M., Romano V., Forrer M., Weber H.P.* Active and passive Q-switching of 2,79 μm Er:Cr:YSGG laser // *Opt. Commun.* 1993. V. 103. P. 398–404.
8. *Водопьянов К.Л., Кулевский Л.А., Пашинин П.П., Прохоров А.М.* Вода и этанол как просветляющиеся поглотители излучения в лазере на иттрий–эрбий–алюминиевом гранате ($\lambda = 2,94 \mu\text{m}$) // *ЖЭТФ.* 1982. Т. 82. №. 6. С. 1820–1824.
9. *Воронов А.А., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Ландман А.И., Подмарьков Ю.П., Полушкин В.Г., Рагимов Т.И., Скасьерский Я.К., Филипчук М.Ю., Фролов М.П.* Пассивная модуляция добротности резонатора Er:YAG-лазера с диодной накачкой с помощью затвора на основе кристалла $\text{Fe}^{2+}:\text{ZnSe}$ // *Краткие сообщения по физике ФИАН.* 2010. № 6. С. 9–15.
10. *Akimov V.A., Frolov M.P., Korostelin Yu.V., Kozlovsky V.I., Landman A.I., Podmar'kov Yu.P., Voronov A.A.* Vapour growth of II-VI single crystals doped by transition metals for mid-infrared lasers // *Phys. status solidi (c).* 2006. V. 3. № 4. P. 1213–1216.
11. *Kaminskii A.A., Butaeva T.I., Fedorov V.A., Bagdasarov Kh.S., Petrosjan A.G.* Absorbtion, Luminescence, and stimulated emission investigation in $\text{Lu}_3\text{O}_{12}\text{Er}^{3+}$ crystals // *Phys. Status Solidi (a).* 1977. V. 39. P. 541–548.
12. *Петров М.В., Ткачук А.М.* Оптические спектры и многочастотная генерация вынужденного излучения иона кристаллов $\text{LiYF}_4:\text{Er}$ // *Опт. и спектр.* 1978. Т. 45. В. 1. С. 147–155.
13. *Ткачук А.М., Разумова И.К., Мирзаева А.А., Малышев А.В., Гапонцев В.П.* Ур-конверсия и заселение возбужденных уровней иона эрбия в кристаллах $\text{LiY}_{1-x}\text{Er}_x\text{F}_4$ ($x = 0,003-1$) при непрерывной накачке излучением InGaAs-лазерных диодов // *Опт. и спектр.* 2002. Т. 92. № 1. С. 73–88.
14. *Иночкин М.В., Назаров В.В., Сачков Д.Ю., Хлопонин Л.В., Храмов В.Ю.* Динамика спектра генерации трехмикронного Er:YLF-лазера при полупроводниковой накачке // *Оптический журнал.* 2009. Т. 76. № 11. С. 62–67.
15. *Kernal J., Fedorov V.V., Gallian A., Mirov S.B., Badikov V.V.* 3,9–4,8 μm gain-switched lasing of Fe:ZnSe at room temperature // *Opt. Express.* 2005. V. 13. № 26. P. 10608–10615.
16. *Labb'e C., Doualan J.-L., Girard S., Moncorg'e R., Thuau M.* Absolute excited state absorption cross section measurements in $\text{Er}^{3+}:\text{LiYF}_4$ for laser applications around 2,8 μm and 551 nm // *J. Phys.: Condens. Matter.* 2000. V. 12. P. 6943–6957.