

# Двухмикронная лазерная генерация на керамике $Y_2O_3:Tm$ при диодной накачке

П.А.Рябочкина, А.Н.Чабушкин, Ю.Л.Копылов, В.В.Балашов, К.В.Лопухин

*Представлены результаты исследования спектрально-люминесцентных и генерационных свойств керамики  $Y_2O_3:Tm$ . Получена лазерная генерация на активных элементах из керамики  $Y_2O_3:Tm$  на длинах волн 1.95 и 2.05 мкм. Максимальная выходная мощность лазерного излучения на этих длинах волн составила 2.4 и 0.3 Вт соответственно.*

**Ключевые слова:** лазерная керамика,  $Y_2O_3:Tm$ , диодная накачка, двухмикронное лазерное излучение.

## 1. Введение

Двухмикронное лазерное излучение представляет интерес для биомедицинских применений, мониторинга ряда газов ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$ ), а также для научных исследований. Лазерное излучение в спектральной области 1.9–2.0 мкм при полупроводниковой диодной накачке получено на различных активных средах ( $Y_3Al_5O_{12}$ ,  $YLiF_4$ ,  $YAlO_3$ ,  $YVO_4$ ), легированных ионами  $Tm^{3+}$  [1, 2]. На тех же средах, легированных ионами  $Ho^{3+}$ , получена лазерная генерация в районе 2.1 мкм. Для накачки гольмиевых лазеров используются лазерные источники с длиной волны излучения около 1.9 мкм, а эффективная накачка сред с ионами туллия возможна широко распространенными диодными линейками, генерирующими в области 0.8 мкм.

Последнее обстоятельство обусловило интерес к исследованию генерационных свойств кристаллов и лазерной керамики полупроводниковых оксидов  $Y_2O_3:Tm$ ,  $Lu_2O_3$ ,  $Sc_2O_3$ , легированных ионами  $Tm^{3+}$  [3], поскольку спектр люминесценции данных материалов для перехода  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  сдвинут по сравнению с другими лазерными средами в более длинноволновую область спектра и лазеры на основе полупроводниковых оксидов с примесью ионов  $Tm^{3+}$  способны генерировать излучение в районе 2.1 мкм при накачке диодными лазерами с длиной волны излучения  $\sim 0.8$  мкм. Например, на кристаллах  $Sc_2O_3:Tm$  реализован твердотельный лазер с диодной накачкой на длине волны генерации  $\lambda = 2116$  нм и мощностью выходного излучения 26 Вт. Кроме того, показана возможность перестройки длины волны излучения данного лазера от 1975 до 2168 нм [4].

Еще одним важным достоинством полупроводниковых оксидов  $Y_2O_3$ ,  $Lu_2O_3$ ,  $Sc_2O_3$  являются их термомеханические характеристики, превышающие таковые для кристалла  $Y_3Al_5O_{12}$  (YAG) [5]. Однако сложность выращивания

кристаллов полупроводниковых оксидов удовлетворительного оптического качества с необходимыми размерами ограничивает создание коммерчески доступных лазеров на их основе. Поэтому в настоящее время активно исследуется лазерная керамика на основе полупроводниковых оксидов, активированных редкоземельными ионами. Так, в работе [6] исследованы спектрально-люминесцентные и генерационные свойства лазерной керамики  $Lu_2O_3:Tm$  и получена генерация на длине волны 2066 нм с выходной мощностью 26 Вт в непрерывном режиме.

Следует заметить, что генерационные свойства кристаллов и керамики на основе  $Y_2O_3:Tm$  к настоящему времени изучены недостаточно. Авторами [7] реализован квазинепрерывный режим лазера на кристалле  $Y_2O_3:Tm$  с максимальной выходной мощностью 290 мВт при накачке лазером на кристалле  $Ti:Al_2O_3$ . В работе [8] было показано, что на кристаллах  $Y_2O_3:Tm$  возможно получение лазерной генерации в диапазоне 1930–2090 нм. Максимальная мощность лазерного излучения на длине волны 1.95 мкм составила 87 мВт при дифференциальной эффективности 16%. Генерационные свойства планарного волновода на основе  $Y_2O_3:Tm$  описаны в [9]. Длина волны лазерного излучения составила около 1.95 мкм, мощность лазерной генерации не превышала 35 мВт. В работе [10] показано, что на кристаллах  $Y_2O_3:Tm$  хорошего оптического качества возможно преобразование излучения  $Ti:Al_2O_3$ -лазера в двухмикронную лазерную генерацию с мощностью до 100 мВт и эффективностью 49%.

Что касается керамики  $Y_2O_3:Tm$ , известна работа, посвященная только исследованию ее спектроскопических характеристик [11]. Публикации относительно генерационных характеристик керамики  $Y_2O_3:Tm$  нам не известны. В настоящей работе представлены результаты исследований спектрально-люминесцентных и генерационных свойств керамики  $Y_2O_3:Tm$  (1.7 ат.%  $Tm^{3+}$ ) с диодной накачкой.

## 2. Образцы для исследования и экспериментальные методики

Образцы керамики  $Y_2O_3:Tm$  (1.7 ат.%  $Tm^{3+}$ ) были получены методом твердофазного реактивного спекания в вакууме в ФИРЭ им. В.А.Котельникова РАН и представляли собой таблетки с размерами  $\varnothing 8 \times 1.7$  мм (рис. 1).

П.А.Рябочкина, А.Н.Чабушкин. Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева, Россия, 430005 Саранск, ул. Большевикская, 68; e-mail: ryabochkina@freemail.mrsu.ru

Ю.Л.Копылов, В.В.Балашов, К.В.Лопухин. Филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1; e-mail: ylk215@ire216.msk.su

Поступила в редакцию 23 марта 2016 г.

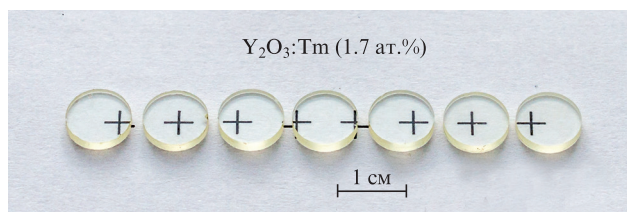


Рис.1. Фотография образцов керамики  $Y_2O_3:Tm$  ( $C_{Tm} = 1.7$  ат.%).

Регистрация спектров поглощения осуществлялась спектрофотометром Lambda 950 (Perkin Elmer), работающим по двулучевой схеме. Источником излучения служила галогеновая лампа, а приемником излучения для ближнего ИК диапазона – полупроводниковый фотодетектор на основе PbS. Для регистрации люминесценции использовался спектрофотометр Horiba FHR 1000. Люминесценция возбуждалась излучением лазерного диода с длиной волны 808 нм и мощностью около 2 Вт. Время жизни на верхнем лазерном уровне  $^3F_4$  ионов  $Tm^{3+}$  оценивалось по кривым затухания люминесценции. Возбуждение осуществлялось  $Ti:Al_2O_3$ -лазером с длительностью импульса 20 нс и длиной волны излучения 795 нм.

Для проведения генерационного эксперимента из керамики  $Y_2O_3:Tm$  вырезались активные элементы в форме прямоугольных параллелепипедов с размерами  $1.5 \times 1.5 \times 5$  мм, на торцы которых наносилось просветляющее покрытие на длину волны  $\sim 2.0$  мкм. Активные элементы заворачивались в индиевую фольгу и помещались в медную оправку.

Для термостабилизации активных элементов использовался элемент Пельтье, охлаждаемый водой; температура поддерживалась постоянной на уровне  $18^\circ C$ . Накачка активных элементов производилась диодной линейкой (ДЛ) Compact System (Dilas) с длиной волны излучения около 809 нм и максимальной выходной мощностью более 60 Вт. Двухмикронное лазерное излучение детектировалось с помощью фоторезистора PDA20H Thorlabs на основе PbSe и осциллографа Tektronix TDS 2022C. Для отсечки длины волны накачки применялось диэлектрическое зеркало с соответствующей спектральной зависимостью коэффициента пропускания. Мощность лазерного излучения регистрировалась термоэлектрическим измерителем мощности 11PMK-30H-H5 (Standa), а спектры генерации – спектрофотометром Horiba FHR1000.

### 3. Спектрально-люминесцентные характеристики керамики $Y_2O_3:Tm$

Спектр пропускания образцов керамики  $Y_2O_3:Tm$  в спектральном диапазоне 300–2500 нм показан на рис.2. Наличие плавного спада кривой пропускания в области 400–800 нм говорит о присутствии в образцах остаточных пор субмикронного размера. Тем не менее, как видно из рис.2, пропускание керамики в ближнем ИК диапазоне составляет более 70%, и, по крайней мере в этом спектральном диапазоне, оптическое качество можно назвать удовлетворительным, поскольку длина волны значительно превышает размер пор и рассеяние на них не дает существенного вклада в величину потерь.

На рис.3 представлена спектральная зависимость коэффициента поглощения керамики  $Y_2O_3:Tm$  на возбуж-

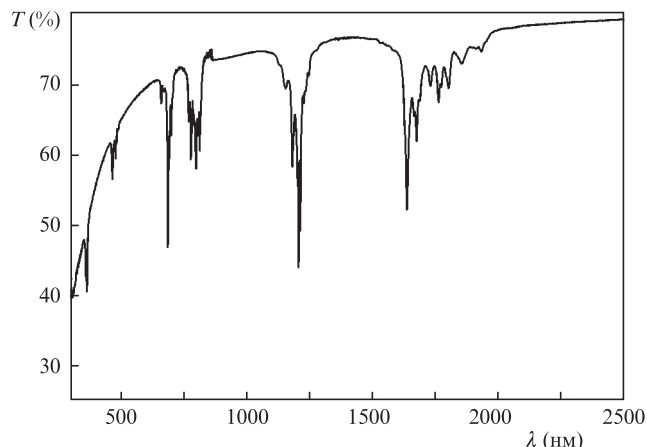


Рис.2. Обзорный спектр пропускания керамики  $Y_2O_3:Tm$  ( $C_{Tm} = 1.7$  ат.%).

даемом переходе  $^3H_6 \rightarrow ^3F_4$ ; длина волны накачки (809 нм), обозначена стрелкой.

Используя спектр люминесценции для перехода  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  в керамике  $Y_2O_3:Tm$  с помощью формулы Фухтбурга–Ладенбурга

$$\sigma_{em}(\lambda) = \frac{\lambda^5 I(\lambda)}{8\pi c \tau_r n^2 \int I(\lambda) \lambda d\lambda} \quad (1)$$

( $\tau_r$  – радиационное время жизни возбужденного уровня;  $n$  – показатель преломления среды;  $\lambda$  – длина волны перехода;  $I$  – интенсивность люминесценции в относительных единицах) была построена спектральная зависимость сечения люминесценции вынужденного перехода  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$ .

Определенное из кривой затухания люминесценции с уровня  $^3F_4$  ионов  $Tm^{3+}$  в керамике  $Y_2O_3:Tm$  радиационное время жизни  $\tau_r = 4.5$  мс. На наш взгляд, это значение времени жизни может быть завышено из-за эффекта реабсорбции, поэтому при определении зависимости  $\sigma_{em}(\lambda)$  по формуле (1) нами взято значение  $\tau_r = 3.5$  мс (согласно оценке по формуле Кравца, см. [12]).

Спектральные зависимости сечения поглощения перехода  $^3H_6 \rightarrow ^3F_4$  и люминесценции вынужденного перехода  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  представлены на рис.4. Знание зависимостей  $\sigma_{em}(\lambda)$  и  $\sigma_{abs}(\lambda)$  позволяет найти спектральную

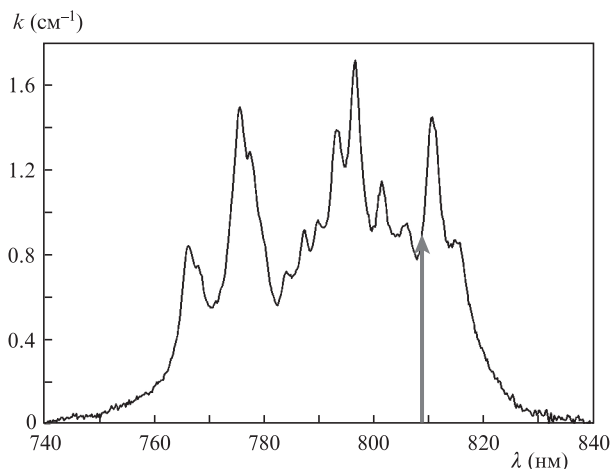


Рис.3. Спектральная зависимость коэффициента поглощения керамики  $Y_2O_3:Tm$  ( $C_{Tm} = 1.7$  ат.%) на переходе  $^3H_6 \rightarrow ^3F_4$  ионов  $Tm^{3+}$ .

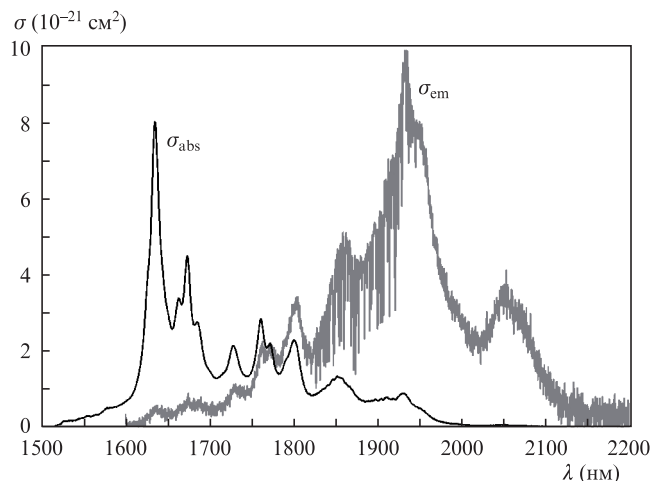


Рис.4. Спектральные зависимости сечений поглощения и люминесценции вынужденного перехода  $^3F_4 \leftrightarrow ^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в керамике  $Y_2O_3$ .

зависимость сечения усиления активной среды на этом лазерном переходе и определить, что на керамике  $Y_2O_3:Tm$  возможно получение лазерной генерации в спектральной области 1900–2100 нм.

#### 4. Генерационный эксперимент

В эксперименте излучение накачки фокусировалось в активный элемент в пятно диаметром около 400 мкм с помощью четырехлинзового объектива. За один проход в активном элементе поглощалось 53% мощности излуче-

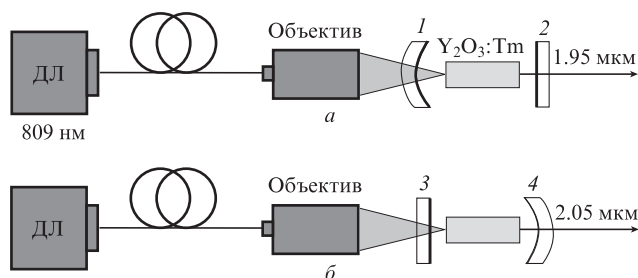


Рис.5. Оптическая схема лазера на керамике  $Y_2O_3:Tm$ , генерирующего на длине волны 1.95 мкм (а) или на длине волны 2.05 мкм (б).

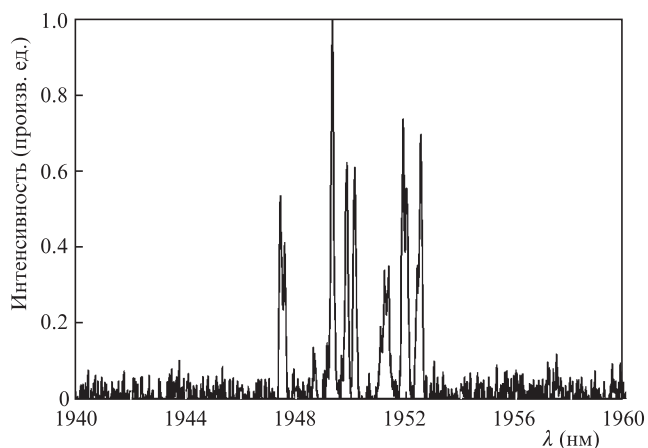


Рис.6. Спектр лазера на керамике  $Y_2O_3:Tm$ , работающего на длине волны 1.95 мкм.

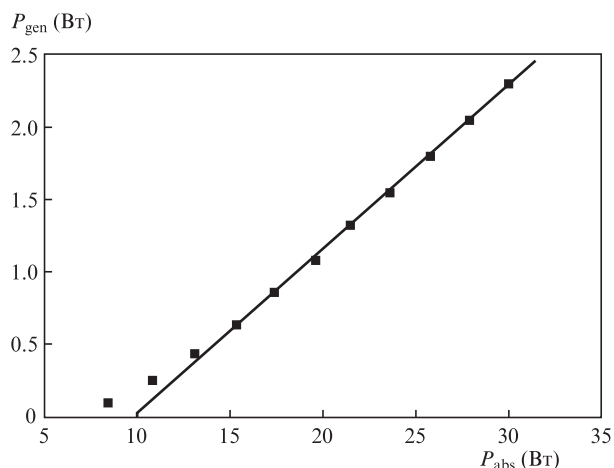


Рис.7. Зависимость мощности лазерной генерации керамики  $Y_2O_3:Tm$  на длине волны 1.95 мкм от поглощенной мощности накачки.

ния накачки. Для получения генерации на длине волны  $\lambda = 1.95$  мкм (рис.5,а) резонатор лазера был образован сферическим зеркалом 1 с радиусом кривизны 300 мм и плоским зеркалом 2 с коэффициентом пропускания на длине волны генерации  $T = 7\%$ .

Спектр излучения лазерной генерации на переходе  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  в керамике  $Y_2O_3:Tm$  представлен на рис.6. Максимальная выходная мощность лазерного излучения на длине волны 1.95 мкм составила 2.4 Вт.

Зависимость выходной мощности лазерного излучения на длине волны 1.95 мкм от мощности излучения накачки, поглощенной в активном элементе, показана на рис.7. Порог генерации составил 5 Вт по поглощенной мощности накачки при дифференциальной эффективности  $\eta = 11\%$ .

Для получения лазерного излучения в более длинноволновом диапазоне использовался резонатор с селективной спектральной добротностью (см. рис.5,б). Плоское зеркало резонатора лазера 3 имело высокий ( $R > 99\%$ ) коэффициент отражения в спектральном диапазоне 1.9–2.1 мкм ( $T < 0.5\%$ ), а сферическое зеркало 4 с радиусом кривизны 150 мм имело коэффициент пропускания  $T$  на длине  $\lambda = 1.95$  мкм более 30% и около 3% в области длин волн  $\lambda = 2.0$ –2.1 мкм. Таким образом, спектр лазерного излучения, представленный на рис.8, определялся спектральными зависимостями усиления вынужденного излу-

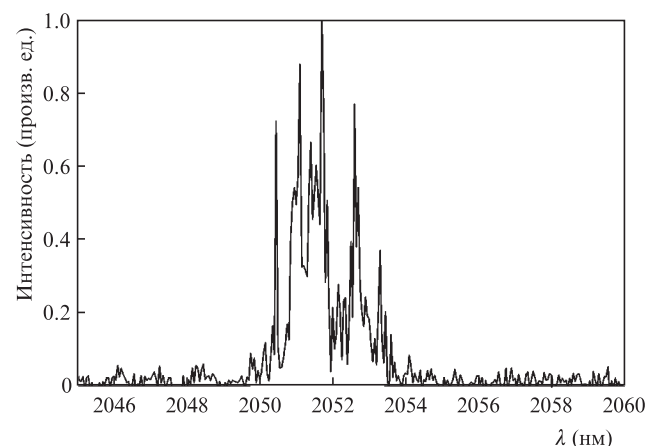


Рис.8. Спектр генерации лазера на керамике  $Y_2O_3:Tm$  на длине волны излучения 2.05 мкм.

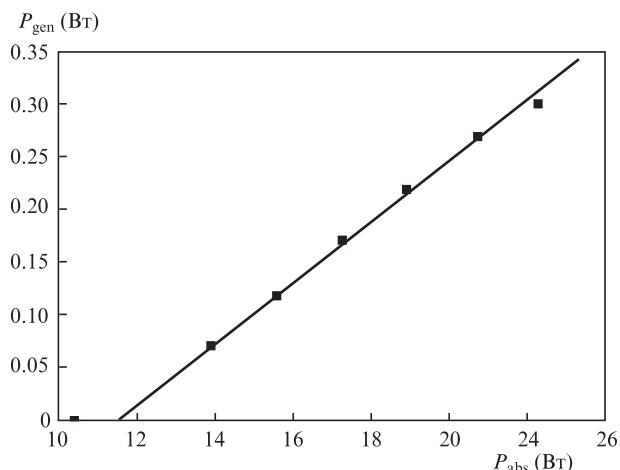


Рис.9. Зависимость мощности лазерной генерации керамики  $Y_2O_3:Tm$  на длине волны излучения 2.05 мкм от поглощенной мощности накачки.

чения в активном элементе и пропусканием выходного зеркала резонатора.

Максимальная мощность генерации достигалась при минимальной длине резонатора 15 мм и составляла 300 мВт. На рис.9 представлена зависимость выходной мощности лазерного излучения на длине волны  $\lambda = 2.05$  мкм от поглощенной мощности накачки.

## 5. Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований на керамике  $Y_2O_3:Tm$  (1.7 ат.%) на переходе  $^3F_4 \rightarrow ^3H_6$  ионов  $Tm^{3+}$  получена двухмикронная лазерная генерация при полупроводниковой лазерной накачке с максималь-

ной выходной мощностью 2.4 Вт на длине волны 1.95 мкм и 300 мВт на длине волны 2.05 мкм. Улучшение оптического качества керамики  $Y_2O_3:Tm$ , используемой в качестве активной среды лазера, и оптимизация концентрации легирующей примеси позволят, на наш взгляд, обеспечить более высокие значения генерируемой мощности и дифференциальной эффективности лазерной генерации.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИР в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 3.384.2014/К и государственного задания № 0708 0210059 611 («Организация проведения научных исследований»).

1. Walsh B.M. *Laser Phys.*, **19**, 855, (2009).
2. Ohta K., Obara M. *J. Appl. Phys.*, **73**, 3149 (1995).
3. Scholle K., Lamrini S., Koopmann Ph., et al. *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics* (Croatia: Intech, 2010, p. 471).
4. Koopmann P., Lamrini S., Scholle K., et al. *Advanced Solid-State Photonics. OSA Technical Digest Series* (Washington, 2011, paper ATuA5).
5. Jasbinder S., Kim W., Villalobos G., et al. *Ceram. Laser Mater.*, **5**, 258 (2012).
6. Antipov O.L., Novikov A.A., Zakharov N.G., Zinoviev A.P. *Opt. Mater. Express*, **2**, 183 (2012).
7. Dening A., B.-M. Dicks, Neumann E., et al. *Advanced Solid-State Lasers*, **10**, 194 (1997).
8. Fornasiero L., Berner N., Dicks B.-M., et al. *Advanced Solid-State Lasers*, **26**, 450 (1999).
9. Szela J.W., Sloyan K.A., Parsonage T.L., et al. *Opt. Express*, **21**, 12460 (2013).
10. Ermeneux F.S., Sun Y., Cone R.L. *Advanced Solid-State Lasers*, **26**, 497 (1999).
11. Qing Yi, Taiju Tsuboi, Shengming Zhou. *Chin. Opt. Lett.*, **10**, 091602-1, (2012).
12. Ельяшевич М.А. *Атомная и молекулярная спектроскопия* (М.: Гос. изд. физ.-мат. лит., 1962, с. 892).