

# Генерационные свойства кристаллов натрий-гадолиниевого вольфрамата $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$ , активированных ионами $\text{Tm}^{3+}$

Е.В.Жариков, Д.А.Лис, А.В.Попов, К.А.Субботин, С.Н.Ушаков, А.В.Шестаков, И.Раздобрев

*В кристаллах натрий-гадолиниевого вольфрамата  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$  (NGW), активированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ , при продольной накачке линейкой лазерных диодов в импульсном режиме получена лазерная генерация. Дифференциальный КПД генерации составил 16%, генерация происходила на длинах волн 1957, 1944, 1936 и 1901 нм при коэффициентах пропускания выходного зеркала  $T_{\text{out}} = 0.3\%$ ,  $1.4\%$ ,  $3.3\%$  и  $8.5\%$  соответственно.*

**Ключевые слова:** твердотельные лазеры, полупроводниковая накачка, вольфраматы.

Интерес к  $\text{Tm}^{3+}$  как лазерному иону обусловлен рядом благоприятных факторов. Длины волн группы линий поглощения этого иона в состоянии  $^3\text{H}_4$  (спектральный диапазон 790–810 нм) хорошо согласуются с длинами волн излучения промышленно выпускаемых лазерных диодов на основе AlGaAs. Структура электронных уровней ионов  $\text{Tm}^{3+}$  подходит для реализации трехуровневого режима работы двухмикронного лазера, а благодаря наличию межзонного процесса кросс-релаксации ( $^3\text{H}_4 - ^3\text{F}_4$ ,  $^3\text{H}_6 - ^3\text{F}_4$ ) значительно повышается эффективность заселения верхнего лазерного уровня  $^3\text{F}_4$ . Большое число штатковских компонент основного ( $^3\text{H}_6$ ) и возбужденных ( $^3\text{F}_4$  и  $^3\text{H}_4$ ) состояний ионов  $\text{Tm}^{3+}$  позволяет при комнатной температуре получать перестраиваемую по частоте лазерную генерацию. Кроме того, широкие полосы поглощения делают активной среду некристаллической к небольшим флуктуациям длины волны излучения диода накачки.

К настоящему времени изучены спектроскопические свойства большого числа кристаллов, активированных ионами  $\text{Tm}^{3+}$ , на многих из них получена генерация в области 1.9–2.0 мкм при полупроводниковой диодной накачке [1–4]. Несмотря на это, поиск эффективных кристаллических сред для лазеров на ионах  $\text{Tm}^{3+}$ , имеющих возможность перестройки длины волны излучения, продолжает оставаться актуальной задачей.

Кристаллы с разупорядоченной структурой и неоднородно уширенными линиями оптических спектров активаторных редкоземельных ионов имеют перед структурно-упорядоченными кристаллами ряд преимуществ,

подробно описанных в [5]. В настоящей работе исследовались генерационные свойства ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах натрий-гадолиниевого двойного вольфрамата  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$  (NGW). Данный кристалл имеет структуру шеелита и характеризуется структурной разупорядоченностью, проявляющейся в статистическом распределении ионов кристаллической матрицы ( $\text{Na}^+$  и  $\text{Gd}^{3+}$ ) по катионным позициям [6]. Это приводит к существенному неоднородному уширению оптических спектров редкоземельных ионов-активаторов. Особенности синтеза и спектроскопические свойства иона  $\text{Tm}^{3+}$  в кристалле  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$  рассмотрены в работе [7].

Для проведения генерационных экспериментов в условиях продольной лазерной диодной накачки из кристаллов  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$  с атомной концентрацией ионов  $\text{Tm}^{3+}$  5.5% были изготовлены активные элементы размером  $3 \times 3 \times 3$  мм, ориентированные относительно кристаллографических осей кристалла. В качестве источника накачки использовалась линейка лазерных диодов HLU30F40 (LIMO GmbH) со световодным выводом излучения (диаметр волокна 400 мкм). Мощность ее излучения на выходе волокна составила 32 Вт на длине волны 800–805 нм. В этой спектральной области, как видно из рис.1, сечение поглощения перехода  $^3\text{H}_6 - ^3\text{H}_4$  ионов  $\text{Tm}^{3+}$  в кристаллах  $\text{NaGd}(\text{WO}_4)_2$  для поляризаций изме-

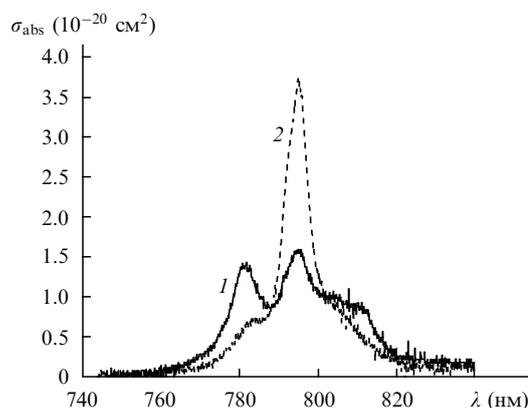


Рис.1. Спектры поглощения перехода  $^3\text{H}_6 - ^3\text{H}_4$  кристалла NGW:  $\text{Tm}^{3+}$  с поляризацией  $E \parallel c$  (1) и  $E \perp c$  (2) при комнатной температуре.

**Е.В.Жариков.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 111991 Москва, ул. Вавилова, 38; Российский химико-технологический университет им. Д.И.Менделеева, Россия, 125047 Москва, Миусская пл., 9; e-mail: zharikov@lsk.gpi.ru

**Д.А.Лис, А.В.Попов, К.А.Субботин, С.Н.Ушаков.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 111991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: soubbot@lsk.gpi.ru

**А.В.Шестаков.** ООО НПЦ «ЭЛС-94», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

**I.Razdobreev.** Centre d'Études et de Recherches Lasers et Application, FR CNRS 2416, Université des Sciences et Technologies de Lille, France

Поступила в редакцию 11 апреля 2006 г.

няется незначительно (не более чем на 20 %). Излучение линейки диодов фокусировалось в активный элемент с помощью четырехлинзового объектива с коэффициентом увеличения 1.66. При этом диаметр перетяжки пучка излучения накачки в активном элементе равнялся 660 мкм. Излучение линейки диодов на выходе волокна было неполяризованным. Блок питания линейки диодов обеспечивал импульсный режим работы со следующими параметрами: длительность импульса накачки 12 мс, частота повторения импульсов 3 Гц. Длина волны лазерной генерации регистрировалась с помощью монохроматора МДР-23. Спектральное разрешение при этом было не хуже 1 нм.

Активный элемент закреплялся в медную оправку и охлаждался элементом Пельтье до температуры 15 °С. На один из торцов активного элемента наносилось диэлектрическое покрытие с высоким коэффициентом пропускания на длине волны накачки (800–810 нм) и высоким коэффициентом отражения в диапазоне длин волн генерации (1850–2000 нм), на другой – просветляющее покрытие для того же диапазона. В качестве выходных зеркал использовался набор зеркал с коэффициентами пропускания  $T_{\text{out}} = 0.3\%$ ,  $1.4\%$ ,  $3.3\%$  и  $8.5\%$  в диапазоне длин волн генерации.

В условиях продольной накачки на кристалле NGW: Tm<sup>3+</sup> в области 1900–1960 нм получена генерация в импульсном режиме. Исследования спектра генерации показали, что при увеличении коэффициента пропускания выходного зеркала  $T_{\text{out}}$  от 0.3 % до 8.5 % длина волны лазерного излучения смещается в коротковолновую сторону (рис.2). Так, при максимальной мощности излучения накачки генерация происходила на следующих длинах волн: 1957 нм ( $T_{\text{out}} = 3\%$ ), 1944 нм (1.4%), 1936 нм (3.3 %) и 1901 нм (8.5%). Это связано с тем, что при увеличении излучательных потерь для сохранения усло-

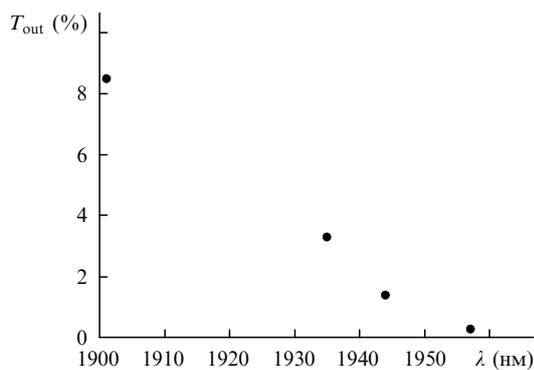


Рис.2. Длина волны генерации в кристалле NGW: Tm<sup>3+</sup> как функция коэффициента пропускания выходного зеркала резонатора при накачке линейкой лазерных диодов.

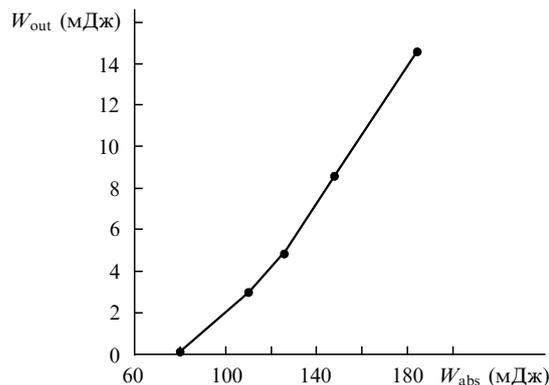


Рис.3. Зависимость выходной энергии в импульсном режиме генерации  $W_{\text{out}}$  от поглощенной в активном элементе NGW: Tm<sup>3+</sup> энергии накачки  $W_{\text{abs}}$  на длине волны накачки  $\lambda_p = 803$  нм при коэффициенте пропускания выходного зеркала 3.3 %.

вия лазерной генерации необходимо увеличивать коэффициент усиления и, следовательно, создавать большую населенность верхнего лазерного уровня <sup>3</sup>F<sub>4</sub>. Данные результаты хорошо согласуются со спектральными зависимостями сечения усиления перехода <sup>3</sup>F<sub>4</sub> – <sup>3</sup>H<sub>6</sub> от коэффициента относительной инверсной населенности ионов Tm<sup>3+</sup> в кристаллах NGW [7], а также наглядно демонстрируют возможность получения непрерывно перестраиваемого по частоте лазерного излучения в спектральном диапазоне шириной не менее 50 нм. Самая высокая эффективность генерации в настоящем генерационном эксперименте получена с использованием выходного зеркала с коэффициентом пропускания  $T_{\text{out}} = 3.3\%$ . По оценке дифференциальный КПД, рассчитанный по поглощенной в активном элементе энергии излучения накачки, составил 16 % (рис.3).

Проведенные исследования показывают перспективность дальнейшей работы с данной активной средой.

Работа была проведена при поддержке РФФИ (гранты № 04-02-16479, 05-02-08199офи-а, 06-02-16747).

1. Payne S.A., Chase L.L., Smith L.K., Kway W.L., Krupke W.F. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (11), 2619 (1992).
2. Elder I.F., Payne M.J.P. *Opt. Commun.*, **148**, 265 (1998).
3. Бородин Н.И., Крюков П.В., Попов А.В., Ушаков С.Н., Шестаков А.В. *Квантовая электроника*, **35** (6), 511 (2005).
4. Batay L.E., Demidovich A.A., Kuzmin A.N., Titov A.N., Mond M., Kuck S. *Appl. Phys. B*, **75**, 457 (2002).
5. Воронько Ю.К., Соболев А.А., Ушаков С.Н., Шукшин В.Е. *Неорганические материалы*, **38** (4), 478 (2002).
6. Трунов В.К., Ефремов В.А., Великодный Ю.А. *Кристаллохимия и свойства двойных молибдатов и вольфраматов* (Л.: Наука, 1986).
7. Воронько Ю.К., Субботин К.А., Лис Д.А., Попов А.В., Соболев А.А., Ушаков С.Н., Жариков Е.В. *Оптика и спектроскопия*, **100** (4), 656 (2006).