

# Эффективная двухмикронная генерация лазеров с активными элементами в виде дисков $5\%Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2$ и композитных структур $5\%Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2/KLu(WO_4)_2$

С.М.Ватник, И.А.Ведин, П.Ф.Курбатов, А.А.Павлюк

*Представлены результаты сравнительных исследований спектрально-генерационных характеристик дисковых активных элементов из двойных калий-лутециевых вольфраматов  $5\%Tm:KLuW$  и композитных структур  $5\%Tm:KLuW/KLuW$ . На образце композита с толщиной активного слоя 250 мкм получена мощность генерации около 5 Вт в непрерывном режиме на длине волны 1.85 мкм. В условиях квазинепрерывной накачки дифференциальная эффективность всех исследованных образцов превышала 50%. Экспериментально показано, что внутренние напряжения в композитных структурах сильно влияют на спектральные характеристики генерации.*

**Ключевые слова:** двойные калий-редкоземельные вольфраматы, композитные кристаллы, тонкие диски, диодная накачка, тулиевые лазеры, двухмикронный спектральный диапазон.

## 1. Введение

Кристаллы двойных калий-редкоземельных вольфраматов, легированные ионами трехвалентного тулия, являются перспективными лазерными материалами для компактных высокоэффективных источников когерентного излучения двухмикронного диапазона (1.8–2.0 мкм) [1–5]. Результаты исследований спектроскопических и генерационных характеристик кристаллов  $Tm^{3+}:KY(WO_4)_2$  и  $Tm^{3+}:KLu(WO_4)_2$  (далее  $Tm:KYW$  и  $Tm:KLuW$ ) были представлены в работах [6–8]. Большие сечения вынужденных переходов ( $\sigma > 10^{-20} \text{ см}^2$ ) в спектральных областях накачки (~0.8 мкм) и генерации (~1.94 мкм), а также большая дифференциальная эффективность (~50%) относятся к числу их основных преимуществ. Вместе с тем теплопроводность ( $k \sim 3 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$ ) и механическая твердость ( $VH \sim 400$ ) [9] кристаллов двойных вольфраматов сравнительно невелики, поэтому для увеличения выходной мощности генерации необходимо применять специальные конфигурации активных элементов, позволяющие уменьшить термомеханические напряжения в области накачки. Так, например, использование эпитаксиальных структур (5%–15%)  $Tm:KLuW/KLuW$ , где на нелегированную («чистую») подложку наращивался «активный» кристаллический слой, содержащий ионы трехвалентного тулия, привело к увеличению удельной мощности до 1.2 кВт/см<sup>2</sup> [10] за счет как отвода части выделяемого тепла через кристаллическую подложку, так и общего увеличения механической прочности, поскольку толщина подложки примерно на порядок превышала толщину активного слоя.

С.М.Ватник, И.А.Ведин, П.Ф.Курбатов. Институт лазерной физики СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 13/3; e-mail: vatnik@laser.nsc.ru, vedin@laser.nsc.ru  
А.А.Павлюк. Институт неорганической химии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 3

Поступила в редакцию 9 апреля 2014 г.

Аналогичный подход может быть реализован и для композитных структур, которые представляют собой жесткое неразъемное соединение двух однотипных кристаллов различных составов. Как правило, такое соединение осуществляется при оптическом контакте за счет взаимной диффузии (срачивания) приповерхностных слоев контактируемых материалов в условиях повышенных температур и давления [11, 12]. К числу преимуществ композитных структур следует отнести возможность их изготовления по любому направлению, в то время как эпитаксиальные структуры могут быть выращены только по ограниченному числу направлений, определяемых ростовыми плоскостями. В настоящей работе представлены результаты сравнительных исследований параметров и спектров генерации дисковых активных элементов  $5\%Tm:KLuW$  и композитных структур  $5\%Tm:KLuW/KLuW$  с толщиной активного слоя 250 и 450 мкм.

## 2. Эксперимент

Монокристаллы двойных калий-лутециевых вольфраматов  $5\%Tm:KLuW$  и  $KLuW$  были выращены низкоградиентным методом Чохральского в Институте неорганической химии СО РАН [13]. Для изготовления композитных элементов из обоих монокристаллов были вырезаны и отполированы одинаковые плоскопараллельные пластины размером  $7.0 \times 8.0 \times 3.0$  мм, грани которых ориентированы с точностью 0.5° по осям оптической индикатрисы  $N_m$ ,  $N_g$  и  $N_p$  соответственно. Пластины были посажены на оптический контакт и отожжены в вакууме при температуре ~850 °С в течение 48 ч. В результате было получено механически неразъемное соединение двух кристаллов –  $5\%Tm:KLuW$  и  $KLuW$ , по своей прочности не уступающее самому кристаллическому материалу. Так, например, разрушение (деструкция) композитов под действием механических или тепловых нагрузок ни разу не происходило в области соединения кристаллов.

Готовые композитные структуры были сошлифованы и отполированы на плоскость с двух сторон таким образом, чтобы толщина кристаллического слоя  $5\%Tm:KLuW$

(*b*-срез) была равна в одном случае 250 мкм, в другом – 450 мкм. Полная толщина композитных элементов, с учетом фиксированной толщины подложки 2.50 мм, составляла 2.75 и 2.95 мм соответственно. На этой же стадии были изготовлены две плоскопараллельные полированные пластинки 5%Tm:KLuW толщиной 250 и 450 мкм, нормали к поверхностям которых также совпадали с кристаллографической осью *b* ( $N_p$ ).

Далее на полированные поверхности дисков и композитных структур (со стороны активного слоя 5%Tm:KLuW) наносилось дихроичное отражающее покрытие для двух диапазонов: 800–810 нм (накачка) и 1850–1950 нм (генерация) с остаточным пропусканием в среднем по диапазону не более 0.2%. Дополнительно, поверх диэлектрического зеркала, наносился слой меди для пайки с подслоем хрома, суммарная толщина металлических слоев составляла ~3 мкм, при этом коэффициент отражения зеркала возрастал до 99.9%. С противоположной стороны, на фронтальную поверхность образцов, обращенную в сторону выходного зеркала, наносилось просветляющее дихроичное покрытие для тех же спектральных диапазонов накачки и генерации с остаточным отражением ~0.1%. На финальной стадии диски и композиты напаялись на теплоотводящие медные основания размером 9 × 9 × 12 мм с помощью низкотемпературного индиевого припоя. Общий вид активных элементов показан на вставке к рис.1,*a*.

Накачка активных элементов осуществлялась коллимированным излучением двух диодных линеек с суммарной оптической мощностью до 50 Вт на длине волны 806 нм. Система коллимации позволяла фокусировать излучение линеек в пятно приблизительно круглой формы диаметром 0.95 мм. Источник питания обеспечивал как импульсно-периодический (длительность импульсов накачки 7 мс, частота их повторения 20 Гц, скважность 14%), так и непрерывный режим работы диодных линеек. Все генерационные эксперименты были проведены с использованием короткого линейного резонатора с физической длиной  $L = 20$  мм, который был образован выходным сферическим зеркалом и плотным плоским зеркалом на активном элементе (со стороны теплоотводящего основания). Коэффициент пропускания вогнутого выходного зеркала с радиусом кривизны 40 мм составлял 7% в спектральном интервале 1850–1950 нм. Элементы оптической схемы устанавливались на общем основании, температура которого стабилизировалась термомодулями Пельтье ( $T = 25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ ). Конструкция экспериментального модуля была практически идентична описанной в работе [8] (см. там рис.2), при этом возвратное зеркало не использовалось, т.е. схема накачки была двухпроходной. Во всех случаях поглощенная мощность накачки определялась как разность мощностей прошедшего и падающего излучений, оптические мощности световых потоков (накачка, генерация) регистрировались измерителем мощности Орфир L30A. Спектры генерации регистрировались с помощью монохроматора МДР-204, фотосопротивления ФР-185 и селективного нановольтметра Unipan 233 в качестве преусилителя, спектральное разрешение составило ~0.5 нм (FWHM).

### 3. Результаты и их обсуждение

Генерационные характеристики дисков 5%Tm:KLuW и композитов 5%Tm:KLuW/KLuW для квазинепрерыв-

ного режима накачки (скважность 14%) представлены на рис.1 и в табл.1. Согласно результатам измерений дифференциальная эффективность генерации для композитов несколько больше, чем для аналогичных дисковых элементов, что, по всей видимости, связано с уменьшением перегрева структуры в области накачки за счет дополнительного теплоотвода через подложку. Вместе с тем дифференциальная эффективность генерации для всех исследованных образцов превышает 50%, что находится в

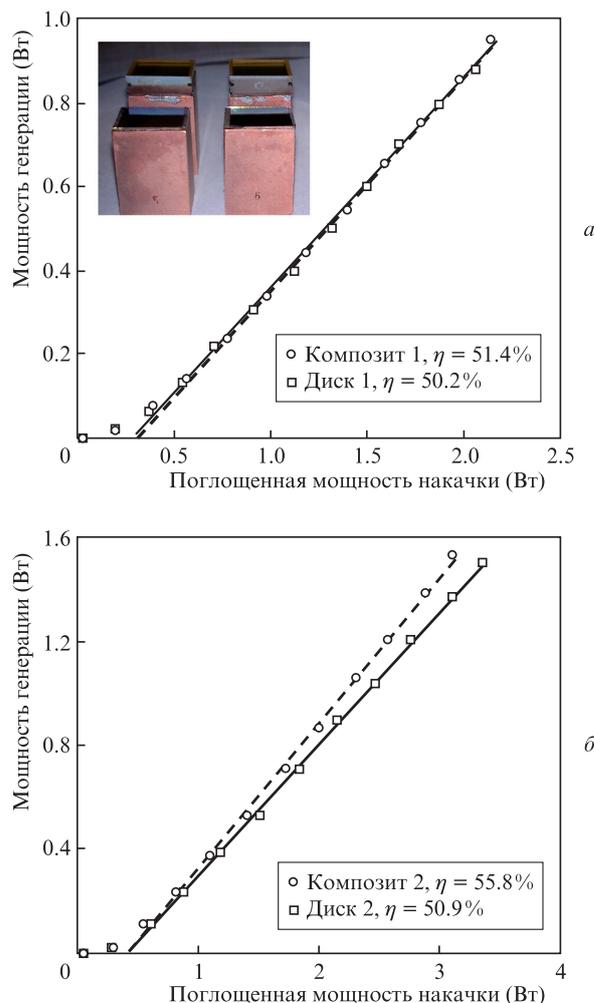


Рис.1. Зависимости мощности генерации лазеров с активными элементами в виде дисков 5%Tm:KLuW и композитов 5%Tm:KLuW/KLuW от поглощенной мощности накачки при толщине активного слоя 5%Tm:KLuW, равной 250 (*a*) и 450 мкм (*б*). На вставке изображены активные элементы – диски (передний план) и композиты (задний план);  $\eta$  – дифференциальная эффективность.

Табл.1. Параметры генерации для дисковых и композитных элементов с активным слоем 5%Tm:KLuW в условиях квазинепрерывной накачки (длительность импульсов 7 мс, период их следования 50 мс, скважность 14%).

Образец	Толщина активного слоя (мкм)	Дифференциальная эффективность (%)	Оптическая эффективность (%)	Пороговая мощность генерации (Вт)
Композит 1	250	51.4	44.6	0.31
Диск 1	250	50.2	43.1	0.29
Композит 2	450	55.8	49.1	0.39
Диск 2	450	50.9	44.9	0.41

хорошем соответствии с аналогичной величиной для монокристаллов [1, 2, 9] и эпитаксиальных структур [8, 10].

Спектры генерации лазеров с активными элементами в виде дисков 5%Tm:KLuW и композитных структур в условиях квазинепрерывной накачки при максимальной выходной мощности приведены на рис.2. Спектр генерации лазеров с дисковыми элементами толщиной 250 мкм был практически идентичен аналогичным спектрам для эпитаксиальных структур [8, 10] и представлял собой совокупность нескольких отдельных неэквидистантных пиков со спектральной шириной каждого из них  $\sim 1$  нм. В свою очередь, спектр генерации лазера с композитным активным элементом, имеющим толщину активного слоя 250 мкм, был фактически сплошным (рис.2,а), ширина полосы составила более 200 нм (1750–2000 нм). Для выяснения причин такого различия спектров композит был снят с теплоотводящего основания (распаян) и распилен на примерно равные фрагменты, которые были снова установлены (напаяны) на теплоотводящие основания. После этой процедуры порог генерации остался прежним, дифференциальная эффективность незначительно снизилась, но по-прежнему превышала 50%. Вместе с тем спектр лазерного излучения существенно изменился и практически стал идентичным спектрам генерации лазеров с активными элементами в виде дисков и эпитаксиальных структур (см. вставку на рис.2,а).

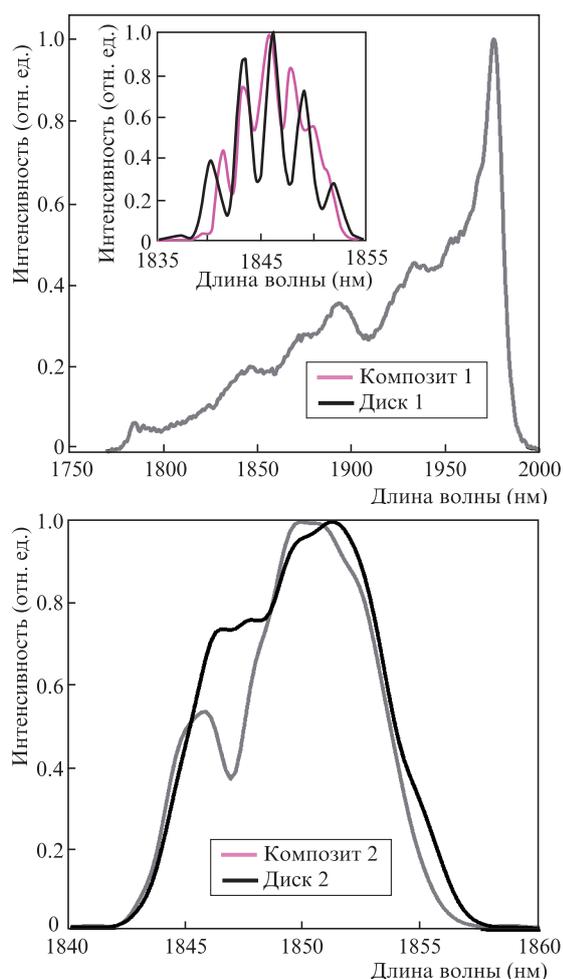


Рис.2. Спектры генерации лазеров с активными элементами в виде дисков 5%Tm:KLuW и композитов 5%Tm:KLuW/KLuW с толщиной активного слоя 250 (а) и 450 мкм (б). На вставке – спектры генерации для диска и композита после его распиловки.

По нашему мнению, такая ситуация связана с тем, что после диффузионной сварки, в процессе охлаждения, в композитной структуре возникают внутренние напряжения, обусловленные некоторым различием коэффициентов линейного расширения допированного и недопированного кристаллических слоев, что и является причиной изменения спектров генерации. При разрезе (распиловке) композитной структуры эти напряжения частично или полностью снимаются, поэтому спектры генерации в случае композитов и дисков становятся практически идентичными. Это предположение подтверждается тем, что спектры генерации в случае другого композита, с толщиной активного слоя 450 мкм, не имеют сплошной структуры. По всей вероятности, все напряжения в переходном слое сосредоточены в сравнительно тонкой области и при увеличении толщины активного слоя мало сказываются на спектрах генерации. Отсюда следует, что форма спектров в режиме свободной генерации определяется как параметрами композитной структуры, так и технологическими особенностями ее изготовления; это может представлять интерес для разработки сверхширокополосных лазерных систем, в том числе фемтосекундных излучателей двухмикронного диапазона.

Параметр оптического качества пучка  $M^2$  был определен методом «острого края» по стандартной процедуре [14]. Результаты измерений при максимальной мощности генерации в режиме квазинепрерывной накачки представлены на рис.3 (оси  $x$  и  $y$  соответствуют осям оптической индикатрисы  $N_m$  и  $N_g$ ). В результате аппроксимации экспериментальных данных параболическими зависимостями [14] для используемых геометрии накачки и параметров резонатора получены величины  $M_x^2 = 10.0$  и  $M_y^2 = 12.7$ . По нашему мнению, сравнительно большая величина  $M^2$  объясняется тем, что размер пятна излучения накачки (0.95 мм) значительно превышает диаметр гауссова пучка ( $\sim 0.15$  мм), вследствие чего генерация происходит преимущественно в многомодовом режиме.

На рис.4 приведены результаты генерационных экспериментов в условиях непрерывной накачки. Как и следовало ожидать, порог разрушения (по поглощенной мощности накачки) композитной структуры более чем в два раза превышает аналогичную величину для тонкого диска. Вместе с тем дифференциальная эффективность генерации для композита (40.1%) оказалась несколько мень-

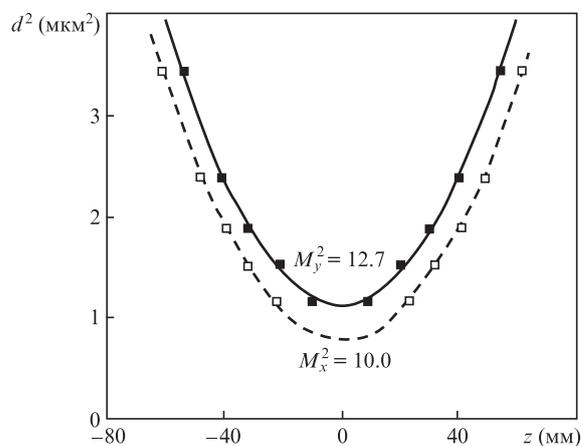


Рис.3. Зависимости квадрата диаметра пучка излучения в дальней зоне лазера с дисковым активным элементом от расстояния до фокуса линзы ( $f = 150$  мм) (точки) и их аппроксимация параболическими зависимостями [14] (кривые).

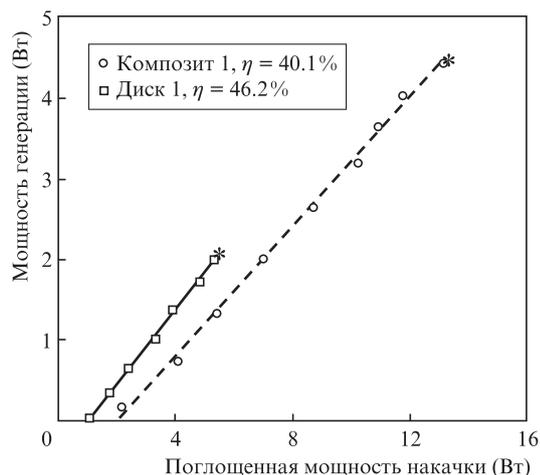


Рис. 4. Зависимости мощности генерации от поглощенной мощности накачки в непрерывном режиме для диска и композита с толщиной активного слоя 250 мкм. Звездочки соответствуют порогам разрушения;  $\eta$  – дифференциальная эффективность.

ше таковой для диска (46.2%), что может быть обусловлено наличием остаточных механических напряжений в композитной структуре в области соединения кристаллов, как это обсуждалось выше, однако данный вопрос в настоящее время до конца не ясен и требует дальнейшего изучения. Здесь можно отметить, что предельная плотность энергосъема с исследованной композитной структуры 5%Tm:KLuW/KLuW (630 Вт/см<sup>2</sup>) примерно в два раза меньше аналогичной величины для эпитаксиальной структуры того же состава (1200 Вт/см<sup>2</sup>) при одинаковой толщине активного слоя (250 мкм). Это также может свидетельствовать о наличии нескомпенсированных механических напряжений в области соединения кристаллов.

#### 4. Заключение

В рамках проведенных исследований спектрально-генерационных характеристик лазеров с активными элементами в виде тонких дисков 5%Tm:KLuW и композитных элементов 5%Tm:KLuW/KLuW была продемонстрирована их высокая эффективность при выходной мощности 2–5 Вт. Исходя из геометрических размеров композит-

ных структур, можно ожидать дальнейшего повышения мощности генерации на длинах волн 1.85–1.95 мкм до ~50 Вт за счет увеличения диаметра пятна излучения накачки до 3–5 мм, что будет экспериментально исследовано в одной из наших последующих работ. Можно также отметить, что длина волны генерации 1.85 мкм находится вблизи максимума поглощения кристаллов Cr<sup>2+</sup>:ZnSe, и это может быть использовано для их накачки с целью создания компактных высокоэффективных перестраиваемых источников среднего ИК диапазона (~2.7–3.2 мкм).

Работа выполнена в рамках программы фундаментальных исследований Президиума РАН «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности».

1. Багавев С.Н., Ватник С.М., Майоров А.П. и др. *Квантовая электроника*, **30**, 310 (2000).
2. Batay L.E., Kuzmin A.N., Grabtchikov A.S., Lisinetskii V.A., Orlovich V.A., Demidovich A.A., Titov A.N., Badikov V.V., Sheina S.G., Panyutin V.L., Mond M., Kück S. *Appl. Phys. Lett.*, **81**, 2926 (2002).
3. Petrov V., Güell F., Massons J., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **40**, 1244 (2004).
4. Silvestre O., Pujol M.C., Aguiló M., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **43**, 257 (2007).
5. Cano-Torres J.M., Han X., Garcia-Cortes A., et al. *Mat. Sci. Eng.*, **146**, 22 (2008).
6. Vatik S.M., Vedin I.A., Pavlyuk A.A. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6731**, 673110 (2007).
7. Rivier S., Mateos X., Silvestre O., Petrov V., Griebner U., Pujol M.C., Aguiló M., Díaz F., Vernay S., Rytz D. *Opt. Lett.*, **33**, 735 (2008).
8. Vatik S.M., Vedin I.A., Pujol M.C., Mateos X., Carvajal J.J., Aguiló M., Díaz F., Griebner U., Petrov V. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 435 (2010).
9. Petrov V., Pujol M.C., Mateos X., et al. *Laser & Photon*, **2**, 179 (2007).
10. Vatik S.M., Vedin I.A., Segura M., Xavier M., Cinta P.M., Carvajal J.J., Aguiló M., Díaz F., Petrov V., Griebner U. *Opt. Lett.*, **37**, 356 (2012).
11. Chen D.Y., Li X.D., Zhang Y., Yu X., Chen F., Yan R.P., Ma Y.F., Wang C. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 46 (2011).
12. Mukhin I., Perevezentsev E., Palashov O. *Opt. Mater. Express*, **4**, 266 (2014).
13. Pavlyuk A.A., Vasiliev Ya.V., Kharchenko L.Yu., et al. *Proc. Asia Pacific Society for Adv. Mat. (APSAM-92)* (Tokyo, 1993, p. 164).
14. Sheldakova J.V., Kudryashov A.V., Zavalova V.Yu., Cherezova T.Yu. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6452**, 645207 (2007).