

Исследование $Tm:Sc_2SiO_5$ -лазера с накачкой на переходе ${}^3H_6 - {}^3F_4$ ионов Tm^{3+}

Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, Ю.Л.Калачев, С.А.Кутовой, В.А.Михайлов, И.А.Щербаков

Кристаллы $Tm^{3+}:Sc_2SiO_5$ оптического качества выращены методом Чохральского. В активном элементе, изготовленном из выращенного кристалла, получена лазерная генерация на длине волны ~ 1.98 мкм при накачке излучением волоконного эрбиевого рамановского лазера с длиной волны 1.678 мкм. Дифференциальная эффективность лазера достигала 42% при мощности выходного излучения до 320 мВт.

Ключевые слова: $Tm:SSO$, Sc_2SiO_5 , лазерная накачка, люминесценция, генерация.

1. Введение

Диодно-накачиваемые твердотельные лазеры двухмикронного диапазона на основе различных кристаллических матриц, активированных ионами тулия Tm^{3+} , используются при решении широкого круга научных и прикладных задач в таких областях, как медицина, лазерная локация и др. [1–3]. Эти лазеры имеют высокие КПД ($\sim 50\%$) и среднюю мощность выходного излучения (более 100 Вт) [4]. Однако, несмотря на достигнутые успехи, продолжают поиски путей дальнейшего улучшения характеристик диодно-накачиваемых тулиевых лазеров. Прежде всего, продолжается поиск новых кристаллических матриц активных элементов с новыми свойствами, позволяющими расширить диапазон применения данных лазеров. Одним из этих новых материалов для активных элементов является кристалл $Tm^{3+}:Sc_2SiO_5$ ($Tm:SSO$). Такой кристалл лазерного качества впервые выращен и исследован в [5, 6] для выяснения возможности получения лазерной генерации при диодной накачке на длине волны $\lambda = 0.792$ мкм, соответствующей поглощению на переходе ${}^3H_6 - {}^3H_4$ (рис.1).

В работе [7] была получена генерация в $Tm:SSO$ -кристалле при накачке излучением Ti :сапфирового лазера на $\lambda = 0.785$ мкм. В охлажденном до $12^\circ C$ активном элементе в непрерывном режиме авторам удалось получить выходную мощность ~ 500 мВт при эффективности 29% по отношению к поглощенной мощности накачки.

Одна из новых возможностей улучшения характеристик тулиевых лазеров связана с применением для накачки $Tm:SSO$ -лазера квазирезонансной накачки с длиной волны ~ 1.7 мкм, соответствующей поглощению на атомном переходе ${}^3H_6 - {}^3F_4$ (рис.1). Такая накачка, как было показано на примере кристалла $Tm:YLF$ в [8], имеет ряд преимуществ. В частности, при ее использовании в широ-

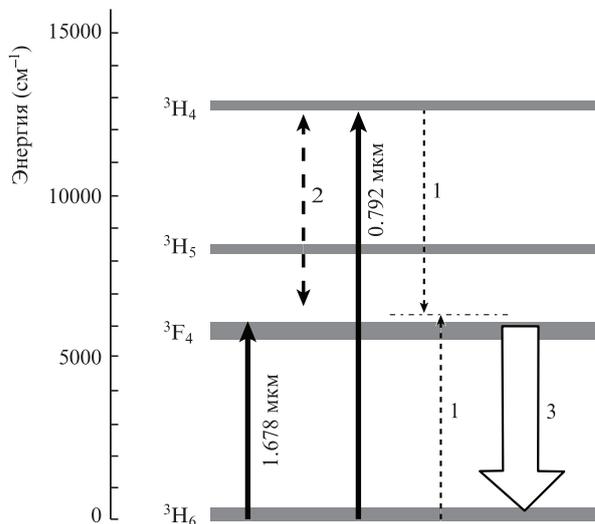


Рис.1. Схема энергетических переходов в ионах Tm^{3+} . Указаны длины волн переходов, на которых осуществляется накачка излучениями волоконного эрбиевого рамановского лазера (1.678 мкм) и лазерного диода (0.792 мкм). Цифры у стрелок обозначают кросс-релаксационный (1) и ап-конверсионный (2) процессы, а также лазерную генерацию (3).

ком диапазоне концентраций ионов Tm^{3+} лазер сохраняет свою высокую эффективность, чего не происходит при использовании диодной накачки на $\lambda \sim 0.8$ мкм.

В настоящей работе впервые, насколько нам известно, получена и исследована генерация $Tm:SSO$ -лазера в новых условиях накачки лазерного перехода ${}^3H_6 - {}^3F_4$. В этих условиях исследовались также спектрально-люминесцентные свойства активных элементов.

2. Лазерные кристаллы

Кристаллы $Tm:SSO$ выращивались методом Чохральского из иридиевого тигля [6]. Концентрация ионов Tm^{3+} в активном элементе составляла $\sim 4\%$. В экспериментах использовались активные элементы кубической формы (рис.2) с длиной ребра 3.5 мм. Противоположные плоские грани кристалла полировались методом глубокой

Ю.Д.Заварцев, А.И.Загуменный, Ю.Л.Калачев, С.А.Кутовой, В.А.Михайлов, И.А.Щербаков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kalachev@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 19 февраля 2013 г., после доработки – 23 апреля 2013 г.

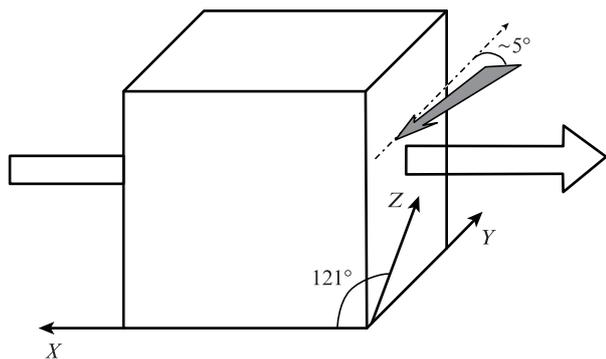


Рис.2. Схема взаимной ориентации кристаллографических осей X , Y , Z и направлений распространения излучений накачки и лазерной генерации. Заштрихованной стрелкой показано направление распространения излучения накачки (почти скользящего по выходной грани кристалла) при регистрации люминесценции.

шлифовки и полировки с параллельностью $\sim 15''$. Ребра кристаллов активных элементов ориентировались с помощью рентгеновской установки вдоль кристаллографических осей X и Y (рис.2). Ось Z расположена в плоскости, перпендикулярной оси Y , и под углом $\sim 121^\circ$ к оси X . Активный элемент крепился плоскими гранями с хорошим тепловым контактом на медных теплоотводящих пластинах. На поверхности граней кристаллов не наносилось никаких покрытий.

3. Спектрально-люминесцентные характеристики

Спектры поглощения в кристалле $Tm:SSO$ исследовались с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-3600 в диапазоне 0.3 – 2.3 мкм и приведены на рис.3. Линейно-поляризованное излучение волоконного лазера накачки на длине волны 1.678 мкм, которая не соответствует максимуму поглощения, достаточно сильно ($\sim 50\%$) поглощается в активном элементе для обоих направлений поляризации излучения.

Спектры люминесценции активного элемента $Tm:SSO$ измерялись с помощью монохроматора МДР-204 с фотодиодом Hamamatsu G5852. Излучение накачки с $\lambda = 1.678$ мкм в виде параллельного пучка диаметром ~ 0.5 мм направлялось сбоку под небольшим углом (менее 5°) к оси Y на грань кристалла, перпендикулярную оси X . Таким образом обеспечивались почти скользящее падение излучения накачки на грань кристалла с небольшой глубиной его проникновения в кристалл и, тем самым, слабое искажение спектров люминесценции, вызванное поглощением в кристалле. Регистрировалась люминесценция, распространяющаяся вдоль оси X . Во всех экспериментах поляризация излучения накачки была вертикальной.

Люминесценция кристалла наблюдалась в диапазоне 1.6 – 2.1 мкм (рис.4). Компонента люминесценции с поляризацией, перпендикулярной плоскости поляризации накачки, имела наибольшую интенсивность. Спектры обеих компонент близки по форме. Спектр излучения накачки состоит из двух линий с $\lambda = 1.55$ и 1.678 мкм (рис.4). Основная доля мощности накачки (более 90%) приходится на линию с $\lambda = 1.678$ мкм, при этом и коэффициент поглощения на данной длине волны значительно выше, следовательно можно утверждать, что вклад в накачку излучения с $\lambda = 1.55$ мкм пренебрежимо мал.

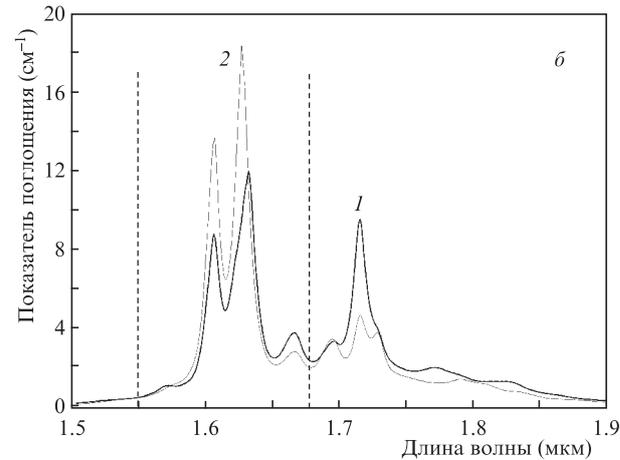
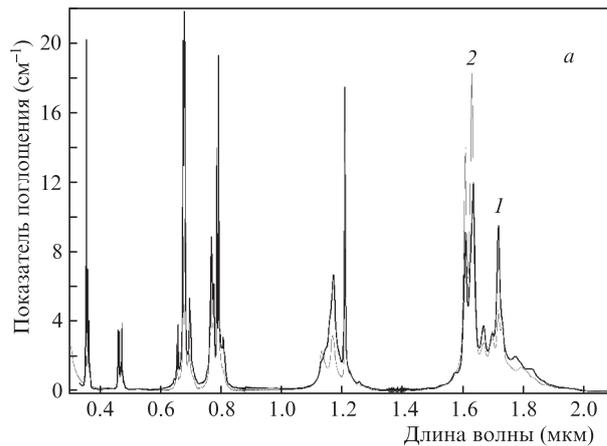


Рис.3. Спектры поглощения в кристалле $Tm:SSO$ излучения с параллельной (1) и перпендикулярной (2) оси Y поляризациями, распространяющегося вдоль оси X . Штриховыми линиями отмечены длины волн излучения эрбиевого волоконного лазера накачки без рамановского преобразования длины волны (1.55 мкм) и после него (1.678 мкм).

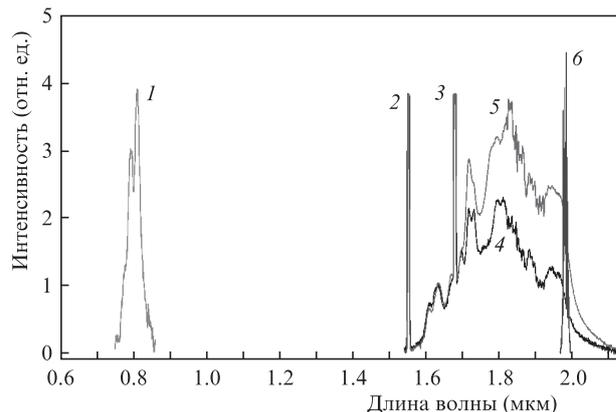


Рис.4. Спектры люминесценции кристалла $Tm:SSO$ с параллельной (5) и перпендикулярной (4) оси Y поляризациями, распространяющейся вдоль оси X , линии излучения накачки (2 – небольшая примесь непреобразованного излучения эрбиевого волоконного лазера накачки, 3 – основная часть излучения накачки после рамановского преобразования), а также спектры генерации (6). Спектральная линия 1 обусловлена ап-конверсионными процессами в кристалле SSO .

Наблюдалась также полоса люминесценции в области 0.8 мкм, соответствующая переходу ${}^3H_6 - {}^3H_4$. Уровень 3H_4 заселяется в результате как кросс-релаксационного

процесса ${}^3\text{F}_4 + {}^3\text{F}_4 \rightarrow {}^3\text{H}_6 + {}^3\text{H}_4$, так и поглощения квантов излучения накачки возбужденными ионами в состоянии ${}^3\text{F}_4$. Поглощение из возбужденного состояния возможно при дополнительном участии фононов кристаллической решетки. Следовательно, некоторая доля мощности накачки бесполезно расходуется на этот процесс, снижая эффективность двухмикронной генерации лазера. Такая особенность характерна и для других тулиевых лазеров. Обращает на себя внимание заметный уровень люминесценции на $\lambda \approx 1.65$ мкм, которая также обязана своим происхождением ап-конверсионным процессам.

4. Лазерные эксперименты

Схема экспериментальной установки приведена на рис.5. Близкий к полуконцентрическому резонатор лазера был образован входным для излучения накачки плоским дихроичным зеркалом с коэффициентом отражения $R = 100\%$ на рабочей длине волны 1.98 мкм и выходным вогнутым сферическим зеркалом с радиусом кривизны 52 мм и $R = 95\%$ на $\lambda \approx 1.98$ мкм. В большинстве экспериментов активный элемент ориентировался так, что ось X была направлена вдоль оси резонатора, а ось Y – горизонтально.

Накачка осуществлялась волоконным эрбиевым лазером с рамановским преобразованием частоты, генерирующим на $\lambda = 1.678$ мкм (таким же, как и в работе [8]). Качество пучка одномодового линейно-поляризованного выходного излучения лазера накачки было близко к гауссову ($M^2 \sim 1$). Плоскость поляризации излучения накачки ориентировалась вертикально. Диаметр пятна накачки в активном элементе мог варьироваться в пределах $\sim 15 - 100$ мкм путем перемещения линзы с фокусным расстоянием 80 мм. Тем самым обеспечивалось хорошее согласование диаметра пятна накачки с поперечным размером основной моды лазерного резонатора и, следовательно, реализовывались оптимальные условия для достижения наибольшего КПД лазера. Оптимальный диаметр пятна накачки составлял ~ 80 мкм.

Импульсный режим накачки осуществлялся с помощью механического вращающегося прерывателя 3 (рис.5), располагавшегося между фокусирующей излучение накачки линзой и полностью отражающим зеркалом. Отношение времени открытия к периоду повторения было равно 1:20. Частота вращения прерывателя составляла ~ 10 Гц. При импульсной накачке практически устранялось влияние нагрева накачиваемой области в активном элементе на лазерные характеристики. Для определения поглощенной мощности накачки измерялась суммарная мощность излучений накачки и лазерной генерации сразу за выходным зеркалом, из которой потом вычиталась мощность генерации, измеренная после оптического фильтра (пла-

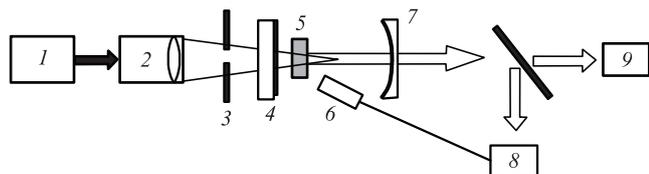


Рис.5. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер накачки; 2 – фокусирующая линза; 3 – механический прерыватель; 4 – дихроичное зеркало; 5 – активный элемент; 6 – волоконный наконечник; 7 – выходное зеркало; 8 – монохроматор; 9 – измеритель мощности.

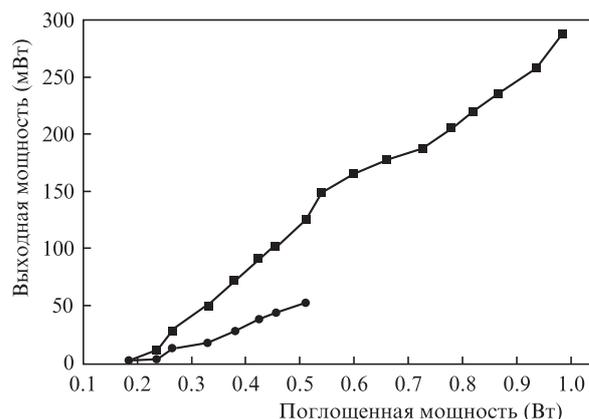


Рис.6. Зависимости мощности генерации $\text{Tm}:\text{SSO}$ -лазера от поглощенной мощности накачки в непрерывном (●) и импульсном (■) режимах. Ось X кристалла $\text{Tm}:\text{SSO}$ ориентирована вдоль оптической оси резонатора лазера.

стина Ge), отсекающего излучение накачки. В экспериментах использовался измеритель мощности лазерного излучения (Ophir Nova2). Погрешность измерения мощности не превышала 5%.

Генерация в $\text{Tm}:\text{SSO}$ -кристалле при импульсной накачке на $\lambda = 1.678$ мкм была получена при превышении пороговой мощности ~ 180 мВт (рис.6). Излучение было линейно поляризовано параллельно оси Y . С увеличением мощности накачки до ~ 600 мВт мощность выходного излучения лазера практически линейно возрастала. При этом дифференциальный КПД лазера достигал 42%. При дальнейшем увеличении мощности накачки он несколько уменьшался. Наибольшая достигнутая мощность выходного излучения составила 320 мВт при мощности накачки 980 мВт. Таким образом, оптический КПД лазера достигал 33%. Следует отметить, что экспериментально достигнутые значения эффективности генерации $\text{Tm}:\text{SSO}$ -лазера при накачке излучением с $\lambda = 1.678$ мкм немного меньше соответствующих наилучших значений для других тулиевых лазеров с диодной накачкой. Этот факт указывает, что качество кристалла $\text{Tm}:\text{SSO}$ активного элемента достаточно хорошее, но еще уступает качеству широко используемых тулиевых кристаллов $\text{Tm}:\text{YAG}$, $\text{Tm}:\text{YLF}$ и др. С другой стороны, данный результат подтверждает наши ожидания высокой эффективности использования излучения накачки с $\lambda = 1.678$ мкм.

Была получена также генерация $\text{Tm}:\text{SSO}$ -лазера при непрерывной накачке. Порог возбуждения лазерной генерации был примерно таким же, как и при импульсной накачке (220 мВт). Однако эффективность лазерной генерации была существенно меньше. При мощности накачки 500 мВт мощность лазерного излучения составляла 60 мВт (оптический КПД $\sim 13\%$), что примерно в два раза меньше, чем при импульсной накачке. Дифференциальный КПД равнялся 19%.

Лазерная генерация была получена и при ориентации оси Y кристалла активного элемента вдоль оси резонатора. Ось X при этом была направлена горизонтально. Выходные характеристики лазера приведены на рис.7. В этом случае порог лазерной генерации существенно возрастает и равен ~ 450 мВт. Соответственно наблюдается и уменьшение лазерной эффективности. Наибольшая полученная мощность выходного излучения при импульсной накачке составляла 160 мВт при оптическом КПД $\sim 16\%$, что примерно в два раза меньше, чем при ориентации оси

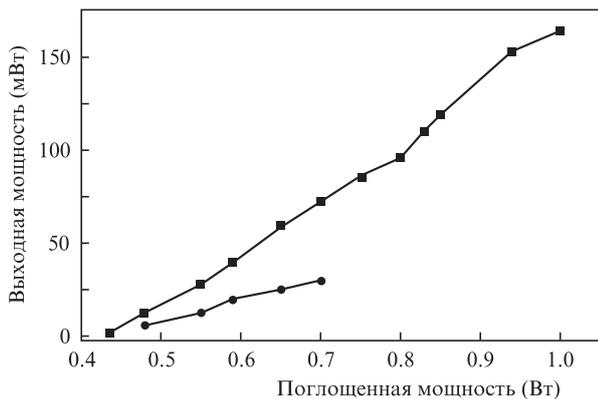


Рис. 7. Зависимости мощности генерации Tm:SSO-лазера от поглощенной мощности накачки в непрерывном (●) и импульсном (■) режимах. Ось Y кристалла Tm:SSO ориентирована вдоль оптической оси резонатора лазера.

X кристалла вдоль оси резонатора. Дифференциальный КПД равен ~29%.

Получена также лазерная генерация с выходной мощностью до 30 мВт при непрерывной накачке. Эффективность генерации в таком режиме была невысока и составляла ~4% при дифференциальном КПД ~13%.

Эксперименты показывают, что при ориентации оси Y кристалла активного элемента вдоль оси резонатора эффективность лазера существенно снижается. Это может быть связано с существенно неодинаковыми значениями коэффициента усиления при распространении излучения вдоль осей X и Y. Кроме того, вполне вероятно, что в направлении оси X кристалл имеет более совершенную структуру.

Исследовался спектр генерации Tm:SSO-лазера при ориентации оси X активного элемента вдоль оси резонатора и при различных мощностях накачки (рис. 8). При больших мощностях накачки спектр представляет собой широкую полосу от ~1.973 до ~1.991 мкм. С уменьшением мощности накачки ширина спектра излучения уменьшается до ~15 нм, а форма спектра практически не меняется. Изрезанная структура спектра обусловлена наличием в резонаторе лазера селективных элементов – интерферометров Фабри–Перо, образованных непросветленными гранями кристалла активного элемента, а также этими гранями и плоским глухим зеркалом. Нужно отметить,

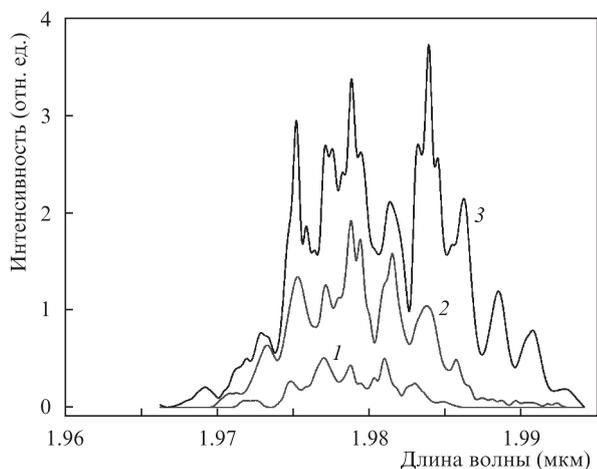


Рис. 8. Спектры излучения Tm:SSO-лазера при мощности поглощенного излучения накачки 0.25 (1), 0.5 (2) и 1 Вт (3).

что спектр генерации Tm:SSO-лазера имеет одну из наибольших ширин среди тулиевых лазеров. Кроме того, время жизни возбужденного состояния ионов Tm³⁺ в данном кристалле относительно невелико – 1.14 мс [9] (по сравнению с другими тулиевыми кристаллами). Обе эти особенности кристалла Tm:SSO благоприятны для реализации устойчивой генерации лазерных УКИ в режиме синхронизации мод.

Эксперименты показали, что интенсивность люминесценции из накачиваемой области кристалла зависит от наличия в ней лазерного излучения. В связи с этим были выполнены эксперименты по измерению интенсивности люминесценции в области длин волн ~0.8 мкм (люминесценция в результате ап-конверсии) и в области лазерной генерации $\lambda \sim 1.98$ мкм. Торец кварцевого волокна диаметром 600 мкм подводился на минимальное расстояние к поверхности активного элемента под небольшим углом к оси резонатора и находился в непосредственной близости к области накачки, но не перекрывая ее (см. элемент б на рис. 5). Излучение поступало по волокну на щель монохроматора. При регистрации люминесценции лазерная генерация прерывалась внесением в резонатор непрозрачного экрана вблизи выходного зеркала резонатора. Тракт накачки при этом оставался неизменным.

Интенсивность люминесценции в области $\lambda = 1.98$ мкм возрастала при наличии генерации. Обратная закономерность наблюдалась в области $\lambda = 0.8$ мкм – интенсивность люминесценции была больше в отсутствие лазерной генерации.

Изменения интенсивности люминесценции при наличии лазерной генерации и в ее отсутствие достигали 15% – 30%. Наибольшие изменения (до 30%) наблюдались в длинноволновой области спектра (1.7 – 2.1 мкм). Структура спектра люминесценции практически не зависела от условий экспериментов.

5. Заключение

Основным результатом проведенной работы являются успешная реализация лазерной генерации в кристалле Tm:SSO при накачке на $\lambda = 1.678$ мкм и достижение при этом относительно высокой для тулиевых лазеров эффективности 42%.

Исследуемый кристалл продемонстрировал анизотропию генерационных и люминесцентных свойств при ориентации кристаллографических осей X и Y вдоль оси резонатора. Интенсивности люминесценции и эффективности генерации для этих двух направлений различались примерно в полтора–два раза, а коэффициенты поглощения излучения накачки – менее чем на 15%.

При переходе к непрерывной генерации наблюдалось значительное снижение лазерной эффективности. Такой результат можно объяснить существенным нагревом активного элемента в области накачки и связанными с этим дополнительными потерями излучения на поглощение в условиях реализации квазитрехуровневой схемы генерации. Большие потери излучения в кристалле также могут быть обусловлены несовершенством технологии роста этого кристалла и, в частности, возникновением короткоживущих центров окраски.

Таким образом, несмотря на достигнутые со времени наших первых экспериментов с использованием диодной накачки [6] успехи на пути улучшения лазерных характеристик Tm:SSO-кристалла, представляется необходи-

мым дальнейшее улучшение оптического качества этого кристалла. Основным критерием высокого совершенства лазерных кристаллов Tm:SSO будет являться увеличение эффективности лазера в режиме непрерывной генерации.

1. Jelinkova H., Koranda P., Sulc J., Nemes M., Cerny P., Pasta J. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6871**, 68712N (2008).
2. Henderson S.W., Suni P.J.M., Hale C.P., Hannon S.M., Magee J.R., Burns D.L., Yuck E.H. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **31** (1), 4 (1993).
3. Zadeh M.E., Sorokina I.T. (Eds) *Mid-Infrared Coherent Sources and Application* (Berlin: Springer, 2008, pp 575–588); <http://www.springer.com/engineering/book/978-1-4020-6439-5>.
4. Lai K.S., Phna P.B., Wu R.F., Lan E., Toh S.W., Toh B.T., Chug A. *Opt. Lett.*, **25** (21), 1591 (2000).
5. Kalachev Yu.L., Zavartsev Yu.D., Zagumennyi A.I., Kutovoi S.A., Mikhailov V.A., Podreshetnikov V.V., Shcherbakov I.A. *Abstr. of 19th Int. Conf. on Advanced Laser Technologies (ALT'11)* (Golden Sands, Bulgaria, 2011, p.87).
6. Заварцев Ю.Д., Загуменный А.И., Калачев Ю.Л., Кутовой С.А., Михайлов В.А., Подрешетников В.В., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **41** (5), 420 (2011).
7. Xu J., Zheng L.H., Yang K.J., Dekorsy T., Wang Q.G., Xu X.D., Su L.B. *Tech. Dig. Conf. on Advances in Optical Materials* (San Diego, Cal., USA, 2012, pp 1–3); <http://dx.doi.org/10.1364/AIOM.2012.IW3D.1>.
8. Kalachev Yu.L., Mikhailov V.A., Podreshetnikov V.V., Shcherbakov I.A. *Opt. Commun.*, **284**, 3357 (2011).
9. Zheng L., Xu J., Su L., Li H., Ryba-Romanowski W., Lisieck R., Solarz P. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 121908 (2010).