

Tm : Sc₂SiO₅-лазер ($\lambda = 1.98$ мкм) с диодной накачкой

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

Впервые получена лазерная генерация активного элемента, изготовленного из выращенного методом Чохральского кристалла Tm³⁺:Sc₂SiO₅ на длине волны 1.98 мкм при диодной накачке ($\lambda = 792$ мкм). Дифференциальная эффективность лазера достигала 18.7% при мощности выходного излучения до 520 мВт.

Ключевые слова: кристалл Tm³⁺:Sc₂SiO₅, лазерная генерация, диодная накачка.

1. Введение

Лазеры с диодной накачкой на основе Tm-содержащих кристаллических активных элементов характеризуются высокой средней мощностью выходного излучения в области длин волн ~ 2 мкм при высокой (40% – 50%) эффективности генерации [1]. Кристаллические матрицы лазерных элементов должны иметь в первую очередь высокое сечение индуцированного перехода ионов Tm и хорошую теплопроводность. Поскольку схема лазерной генерации является квазитрехуровневой, необходимо иметь по возможности большое расщепление лазерного уровня основного состояния. Наиболее часто в таких лазерах используются кристаллы YAG, YAP, YLF. Поиски новых эффективных кристаллических матриц для Tm-лазеров продолжаются и в настоящее время.

Торопов и Васильева еще в 1961 г. впервые изучили фазовую диаграмму системы Sc₂O₃ – SiO₂ и предложили двуосный кристалл Sc₂SiO₅ (SSO) в качестве кандидата в матрицы активных элементов [2]. В системе ими обнаружены две кристаллические фазы Sc₂SiO₅ и Sc₂Si₂O₇, имеющие температуру плавления 1950 и 1850 °С соответственно. В работе [2] представлены также физические характеристики кристалла Sc₂SiO₅ – плотность 3.49 г/см³ и показатели преломления $n_g = 1.850$ и $n_p = 1.835$.

Результаты выращивания методом Чохральского ортосиликатов редкоземельных элементов были опубликованы спустя два десятилетия [3]. В этой работе измерены температура плавления кристалла Sc₂SiO₅ (1930 °С) и его показатели преломления ($n_g = 1.870$, $n_m = 1.838$, $n_p = 1.835$). Основные трудности выращивания методом Чохральского силикатных кристаллов типа Ln₂SiO диаметром 20 мм и длиной 60 – 80 мм из иридиевого цилиндрического тигля $\varnothing 5 \times 5$ см были определены в [4].

Выращенный в [5] кристалл Tm:Sc₂SiO₅ (далее Tm:SSO) с концентрацией Tm³⁺ $\sim 4\%$ принадлежит к группе

оксидных соединений с моноклинной структурой, поэтому в статье приведены особенности кристаллографической структуры этого кристалла и его спектральных характеристик, а также исследовано расщепление основного состояния, достигающее ~ 691 см⁻¹. На основании этих исследований и с учетом относительно высокой теплопроводности кристалла (7.5 Вт·м⁻¹·К⁻¹) делается прогноз, что кристалл Tm:SSO является перспективной матрицей для реализации эффективной генерации в области 2 мкм при диодной накачке на $\lambda = 791$ нм.

2. Эксперимент

В настоящей работе лазерные кристаллы Tm:SSO длиной 60 мм и сечением 10 × 14 мм были выращены методом Чохральского из иридиевого тигля $\varnothing 4 \times 4$ см. В качестве затравки использовалась иридиевая проволока диаметром 1 мм. Скорость вытягивания составляла 2 мм/ч, скорость вращения – 20 об./мин, процесс проходил в азотной атмосфере с содержанием кислорода 0.5 объемных процентов. Для минимизации кислородных вакансий в кристаллической решетке буля отжигалась в воздухе при температуре 1200 °С в течение 10 ч. Концентрация ионов Tm³⁺ составляла ~ 5 ат. % в расплаве и около 3.6 ат. % в верхней части кристаллической були.

В экспериментах использовались лазерные элементы с непросветленными плоскопараллельными торцами в форме куба с ребром 3 мм. Оптическая ось лазера совпадала с кристаллографической ориентацией $\langle -714 \rangle$ активного элемента.

Ранее лазерная генерация при использовании ламповой накачки и кристалла Nd³⁺:SSO была получена в [6]. Спектральные особенности таких кристаллов при данной накачке исследовались в [7].

В настоящей работе впервые получена и исследована лазерная генерация кристалла Tm:SSO при диодной накачке на длине волны 792 нм. Спектр поглощения кристалла приведен на рис.1. Измерения выполнялись с помощью спектрофотометра Shimadzu UV-3600. Следует отметить, что полученный нами спектр существенно отличается от спектра, опубликованного в [5], где при укорочении длины волны в диапазоне 1000 – 300 нм наблюдается существенный рост коэффициента поглощения. Такое дополнительное поглощение, предположительно

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

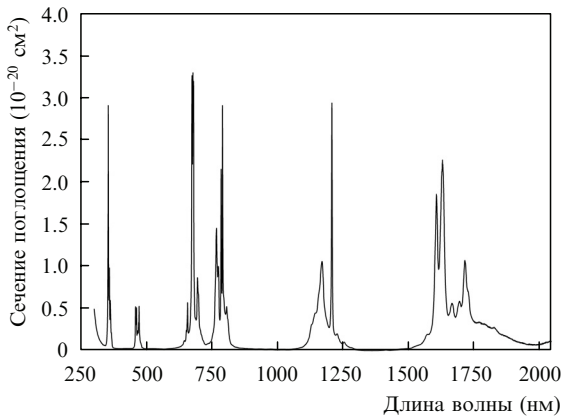


Рис.1. Спектр поглощения кристалла Tm:Sc₂SiO₅ (концентрация Tm 4 ат. %, $T = 300$ K).

связанное с наличием центров окраски кристаллов, в нашем случае отсутствует, что свидетельствует о лучшем оптическом качестве изучаемых кристаллов.

Накачка активного элемента осуществлялась на длине волны, соответствующей линии поглощения лазерного перехода $^3H_4 - ^3H_6$. Источником накачки служил полупроводниковый лазер с волоконным выводом неполяризованного излучения и длиной волны генерации 792 нм. Диаметр сердцевинки волокна составлял 116 мкм, диаметр пятна накачки в активном элементе варьировался с помощью сменных объективов в пределах 70–140 мкм.

На рис.2 показан спектр люминесценции кристалла и приведены зависимости от длины волны коэффициентов поглощения кристалла и пропускания выходного зеркала. В зоне, обозначенной прямоугольником, имеет место генерация лазерного излучения. Расположение этой зоны определяется совместным влиянием всех трех кривых, при этом в нашем случае влияние выходного зеркала является доминирующим.

Активный элемент боковыми поверхностями монтировался в медном теплоотводе, температура которого поддерживалась при 10 или 20 °C, и размещался в резонаторе, состоящем из входного плоского дихроичного 100%-ного зеркала, через которое осуществлялась накачка, и выходного частично прозрачного вогнутого сферического зеркала с радиусом кривизны 50 мм. В экспериментах длина резонатора (~50 мм) варьировалась вблизи границы его устойчивости, тем самым обеспе-

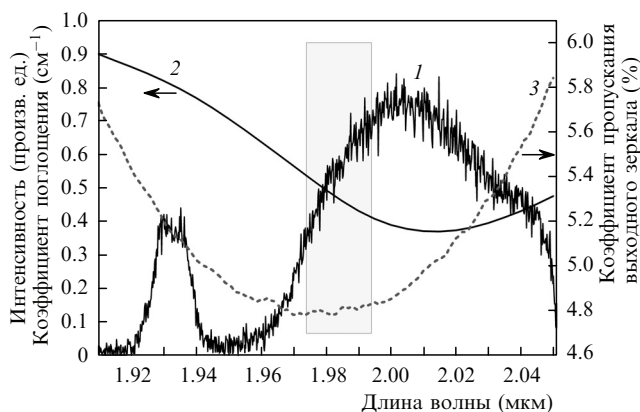


Рис.2. Спектр люминесценции (1) в области около 2 мкм, коэффициент поглощения кристалла (2) и коэффициент пропускания выходного зеркала (3). Диапазон длин волн, в котором происходит лазерная генерация, показан прямоугольником.

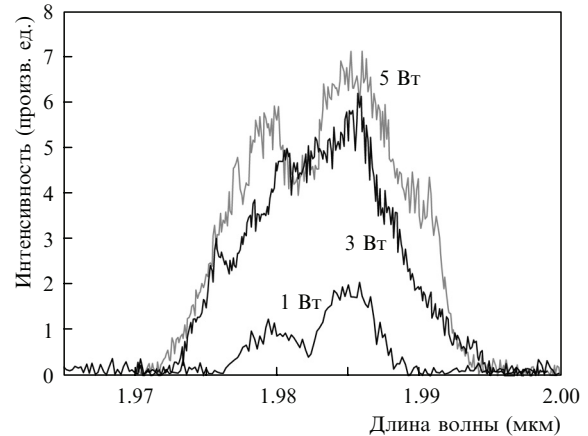


Рис.3. Спектры генерации при различных мощностях накачки.

чивалось согласование диаметров пятна накачки и поперечного сечения основной моды резонатора.

Лазерная генерация получена на длине волны вблизи 1.98 мкм. Спектры излучения лазера при различных уровнях накачки приведены на рис.3. Измерения осуществлялись с помощью монохроматора МДР 204. С увеличением мощности накачки ширина спектра генерации, состоящего из одной-двух полос, увеличивалась с 20 до 30 нм. Заметим, что спектр излучения имеет относительно большую ширину при достаточно пологой вершине, чем он и отличается от спектров генерации других тулиевых лазеров, например Tm:YAP-лазера [8]. Эта особенность генерации кристалла Tm:SSO указывает на возможность получения в режиме синхронизации мод более коротких лазерных импульсов по сравнению с другими тулиевыми лазерами двухмикронного диапазона.

Результаты исследований мощности лазерной генерации при различных условиях возбуждения представлены на рис.4.

Наибольшая эффективность лазерной генерации (15.3 %) при дифференциальном КПД $\eta = 18.7$ % и средней мощности выходного излучения 140 мВт (~500 мВт импульсной мощности) были получены при следующих условиях. Накачка активного элемента осуществлялась в квазинепрерывном режиме со скважностью 1 : 4 при длительности импульсов до 20 мс; температура активного элемента поддерживалась при 10 °C. Для уменьшения термооптических искажений к одной из рабочих поверхностей активного элемента прижималась (вплоть до оптического контакта) плоскопараллельная пластина, изготовленная из нелегированного кристалла YAG с размерами $\varnothing 5 \times 1$ мм.

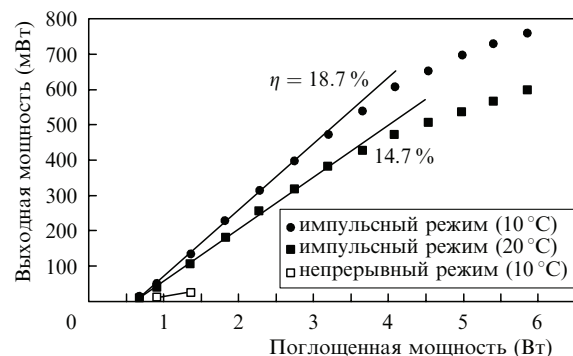


Рис.4. Зависимость выходной мощности лазерного излучения от поглощенной мощности накачки для разных режимов накачки.

Следует отметить, что в наших экспериментах эффективность $Tm : SSO$ -лазера с диодной накачкой (рис.4) существенно уступает характерным значениям эффективности лазеров на основе других тулийсодержащих активных элементов [1, 8]. Существенные различия в эффективности непрерывного и импульсного режимов можно объяснить появлением короткоживущих центров окраски. Кроме того, в объеме активного элемента имеются невидимые невооруженным глазом многочисленные рассеивающие неоднородности в пределах объема моды генерации, которые вносят дополнительные внутррезонаторные потери. По нашим оценкам на основании спектров поглощения (рис.1) и прямых измерений пропускания генерируемого излучения величина этих потерь достигает 1 % – 2 % на один проход излучения. Также имеют место потери из-за нагрева кристалла в канале накачки активного элемента. Таким образом, для увеличения эффективности $Tm : SSO$ -лазера необходимо изучить влияние условий выращивания кристаллов на существование стабильных и короткоживущих центров окраски, а также на достижения лучшего оптического качества кристаллов.

Лазерная генерация на кристалле $Tm : SSO$ была получена и при непрерывной накачке (рис.4), но эффективность лазера при этом значительно меньше. С ростом накачки мощность излучения сначала увеличивалась (до ~27 мВт), а затем после насыщения падала вплоть до срыва генерации при мощности накачки 1.7 Вт. Исследования временного падения мощности генерации лазера показали, что с момента включения накачки мощность излучения в течение нескольких секунд уменьшается, после чего выходит на стационарный уровень. Это позволяет предположить, что основной причиной уменьшения эффективности лазера является увеличение внутррезонаторных потерь излучения на поглощение в активном элементе с ростом его температуры.

На рис.5 приведены временные зависимости выходной мощности лазерного излучения. При достаточно интенсивной накачке выходная мощность лазера начинает уменьшаться уже через несколько десятков миллисекунд после включения накачки (рис.5,а). Это объясняет трудность реализации непрерывного режима лазерной генерации $Tm : SSO$ -лазера, о чем упоминалось выше. При регистрации лазерного излучения с более высоким временным разрешением хорошо видна характерная для тулиевых лазеров пиковая структура излучения (рис.5,б).

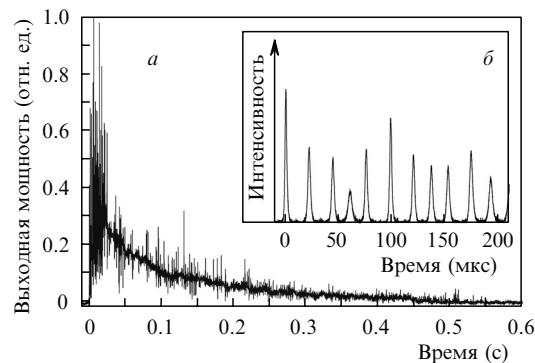


Рис.5. Зависимость выходной мощности лазерного излучения от времени при мощной импульсной накачке (а) и пиковая структура генерации (б).

3. Заключение

Методом Чохральского выращен кристалл $Tm^{3+} : Sc_2SiO_5$, на котором при диодной накачке впервые получена генерация в импульсном (скважность 1 : 4) и непрерывном режимах на длине волны 1.98 мкм. Оптическая и дифференциальная эффективности лазера при импульсной накачке составили 15.3 % и 18.7 % соответственно при средней и импульсной выходных мощностях 140 и 520 мВт. Максимальная импульсная мощность составила 780 мВт при температуре активного элемента 10 °С. Дальнейшее увеличение эффективности лазера связано с развитием технологии выращивания кристаллов $Tm : SSO$ с целью улучшения их оптического качества.

1. Захаров Н.Г., Антипов О.Л., Савикин А.П., Шарков В.В., Еремейкин О.Н., Фролов Ю.Н., Мищенко Г.М., Великанов С.Д. *Квантовая электроника*, **39**, 410 (2009).
2. Торопов Н.А., Васильева В.А. *Кристаллография*, **6**, (16), 968 (1961).
3. Карапетян В.Е., Коровкин А.М., Морозова Л.Г., Петров М.В., Феофилов П.П. *Оптика и спектроскопия*, **49** (1), 220 (1980).
4. Brandle C., Valentino A., Berkstresser G. *J. Crystal Growth*, **79**, 308 (1986).
5. Zheng L., Xu J., Su L., Li H., Ryba-Romanowski W., Lisieck R., Solarz P. *Appl. Phys. Lett.*, **96**, 121908 (2010).
6. Ткачук А.М., Пржеvusский А.К., Морозова Л.Г., Полетимова А.В., Петров М.В., Коровкин А.М. *Оптика и спектроскопия*, **60** (2), 288 (1986).
7. Zheng L., Xu J., Su L., Li H., Wang Q., Ryba-Romanowski W., Lisieck R., Wu F. *Opt. Lett.*, **34**, 3481 (2009).
8. Kalachev Yu.L., Mikhaylov V.A., Shcherbakov I.A. *Laser Phys.*, **19**, 1079 (2009).