

Лазерная генерация на кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$ в режиме модуляции добротности

С.А.Артемов, Е.А.Артемов, Е.Е.Ломонова, П.А.Рябочкина, А.Н.Чабушкин

Исследованы энергетические и временные характеристики импульсной двухмикронной лазерной генерации на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов No^{3+} кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$ в режиме модулированной добротности при резонансной накачке на уровень 5I_7 излучением непрерывного лазера на кристалле $LiYF_4:Tm$. Предложены механизмы возникновения «прогаров» на торцах активных элементов из кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$, образующихся при повышении плотности мощности лазерной генерации.

Ключевые слова: кристаллы $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$, лазерная генерация в двухмикронном спектральном диапазоне, режим модуляции добротности.

1. Введение

В настоящее время разработаны твердотельные лазеры, генерирующие излучение в двухмикронной области спектра, в качестве активных сред которых используются кристаллы, стекла и оптическая керамика, легированные ионами Tm^{3+} или No^{3+} . Тем не менее по-прежнему продолжается поиск новых активных сред для этой спектральной области. В первую очередь это обусловлено практическим применением двухмикронных лазеров в медицине, для мониторинга различных газов, в лидарных устройствах, а также для накачки лазеров, генерирующих излучение в спектральном диапазоне 4–5 мкм. Результаты исследований по разработке двухмикронных лазеров на основе различных кристаллов и керамики, легированных ионами Tm^{3+} , No^{3+} , изложены в работах [1–21].

Ранее мы сообщали о получении двухмикронного лазерного излучения на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов No^{3+} в кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$ при резонансной накачке этих ионов на уровень 5I_7 как непрерывными твердотельным $LiYF_4:Tm$ -лазером [18, 19] и тулиевым волоконным лазером [20], так и импульсным $LiYF_4:Tm$ -лазером [21].

Особенностью кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3$, легированных редкоземельными (РЗ) ионами, является то, что в них величина расщепления кристаллическим полем мультиплетов РЗ ионов на штарковские подуровни (как и в полупроводниковых оксидах и керамике (Y_2O_3 , Lu_2O_3 , Sc_2O_3) с РЗ ионами) выше аналогичного расщепления в других оксидных материалах (например, в $Y_3Al_5O_{12}$) [18]. Так, область спектра люминесценции, обусловленного переходом $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$

ионов No^{3+} , в кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$ лежит в интервале 1800–2300 нм. Это позволило получить на этих кристаллах самую длинноволновую лазерную генерацию среди кристаллических сред, легированных ионами No^{3+} , реализовав при этом область перестройки длины волны генерации в диапазоне 2056–2168 нм [19].

В работе [20] нами сообщалось о получении двухмикронной импульсной генерации на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов No^{3+} в кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$ в режиме модулированной добротности при накачке непрерывным тулиевым волоконным лазером на уровень 5I_7 ионов No^{3+} . Длительность импульсов лазерной генерации составила 140 и 310 нс при частотах следования 1 и 10 кГц соответственно. Однако детальные исследования временных и энергетических характеристик лазерной генерации в режиме модуляции добротности на кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$ в работе [20] не были проведены из-за возникновения характерных «прогаров» на торцах активных элементов (АЭ).

Настоящая работа продолжает цикл исследований по изучению характеристик лазерной генерации на кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-No_2O_3$. Цель работы – проведение детальных исследований временных и энергетических характеристик импульсной генерации в режиме модуляции добротности при накачке непрерывным $LiYF_4:Tm$ -лазером, а также установление возможных причин возникновения «прогаров» на торцах АЭ при уменьшении длительности импульса лазерной генерации.

2. Характеристика объектов исследования и описание методик экспериментов

Для проведения исследований были выращены кристаллы состава $ZrO_2 - 13.4 \text{ мол. \% } Y_2O_3 - 0.6 \text{ мол. \% } No_2O_3$ методом прямого высокочастотного нагрева в холодном тигле диаметром 130 мм на установке «Кристалл 407» при скорости опускания тигля 10 или 4 мм/ч. Уменьшение скорости выращивания приводило к снижению в кристаллах на основе диоксида циркония количества оптических дефектов, получивших название полосы роста [22], которые являются источниками потерь в активных эле-

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

Е.А.Артемов, Е.Е.Ломонова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

А.Н.Чабушкин. Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий, Россия, 143026 Московская обл., Одинцовский гор. округ, д. Сколково, Новая ул., 100

Поступила в редакцию 26 мая 2021 г.

ментах [23]. Для проведения генерационных экспериментов из этих кристаллов вырезались АЭ в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами $3 \times 3 \times 20$ мм.

Для выявления причин возникновения «прогаров» на торцах АЭ при повышении плотности мощности лазерной генерации [20] были использованы различные способы обработки, включая химико-механическую полировку (ХМП). С целью исключения влияния просветляющего покрытия на возникновение «прогаров» в настоящей работе (в отличие от [20]) генерационные эксперименты на кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-NO_2O_3$ проводились с использованием элементов без просветляющего покрытия на торцах.

Были проведены две серии экспериментов с АЭ из кристаллов состава $ZrO_2-13.4\text{ мол. \% } Y_2O_3-0.6\text{ мол. \% } NO_2O_3$; информация о скорости выращивания кристаллов и методах обработки торцов АЭ приведена в табл.1.

На рис.1 показаны спектральные зависимости сечений поглощения перехода $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$ и вынужденного излучения перехода $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} для кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3-NO_2O_3$, представленные нами ранее в работах [18–21], которые были получены из экспериментально зарегистрированных спектров поглощения и люминесценции переходов $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$ и $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} соответственно. Из вида сечения поглощения следует, что длина волны 1910 нм является оптимальной для излучения накачки на уровень 5I_7 при получении лазерной генерации на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} .

Оптическая схема двухмикронного лазера на кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-NO_2O_3$, генерирующего излучение в режиме модуляции добротности с помощью акустооптического затвора, реализованная в первой серии генерационных экспериментов, показана на рис.2. Накачка на уровень 5I_7 ионов Ho^{3+} в кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-NO_2O_3$ осуществлялась непрерывным $LiYF_4:Tm$ -лазером с длиной волны излучения 1910 нм и максимальной выходной мощностью 7.5 Вт. Излучение накачки фокусировалось в активный элемент 1 с помощью двухлинзового объектива, диаметр пятна в перетяжке пучка составил 320 мкм.

Резонатор лазера длиной 80 мм был образован плоским входным зеркалом с коэффициентами пропускания $\mathcal{T} = 93\%$ на длине волны накачки 1910 нм и 0.1% на длине волны генерации 2130 нм и сферическим выходным зеркалом с радиусом кривизны 150 мм и коэффициентом пропускания $\mathcal{T} = 6\%$ на длине волны генерации. Для обеспечения работы лазера в режиме модулированной добротности перед выходным сферическим зеркалом по-

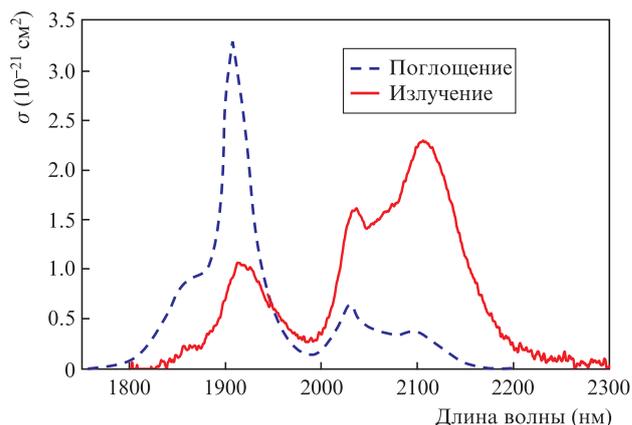


Рис.1. Спектральные зависимости сечений поглощения перехода $^5I_8 \rightarrow ^5I_7$ и вынужденного излучения перехода $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} для кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3-NO_2O_3$, $T = 300$ К [18–21].

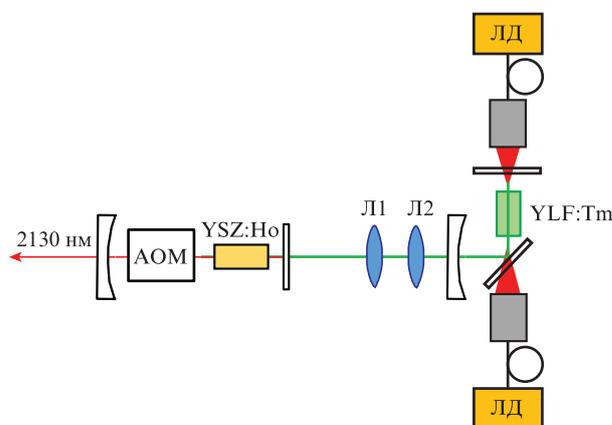


Рис.2. Оптическая схема 1 двухмикронного лазера на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} в кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-NO_2O_3$ (YSZ:Ho), генерирующего излучение в режиме модулированной добротности: ЛД – лазерный диод; Л1 и Л2 – линзы; АОМ – акустооптический модулятор.

мещался акустооптический модулятор, выполненный из кристаллического кварца.

При проведении генерационных экспериментов исследуемые активные элементы заворачивались в индиевую фольгу и помещались в медную оправку.

Сигнал лазерной генерации регистрировался фотодетектором PDA10D2 (Thorlabs). Длительность импульсов

Табл.1. Параметры исследуемых активных элементов, вырезанных из кристаллов $ZrO_2-13.4\text{ мол. \% } Y_2O_3-0.6\text{ мол. \% } NO_2O_3$.

Номер серии	Номер АЭ	Скорость роста кристалла V (мм/ч)	Вид обработки до ХМП	Условия термообработки (отжиг)*	Время ХМП (мин)
1	1	4	АМ**	2100 °С в вакууме	10
	2	4	АМ	($10^{-3}-10^{-4}$ мм рт. ст.)	10
	3	4	АМ	с выдержкой в течение	10
2	4	4	АМ	1–2 ч и снижением	10
	5	10	АМ	температуры	20
	6	10	АМ → отжиг → АМ	со скоростью 80 °С/ч	30

*Длительность отжига зависела от размера кристалла. В случае отжига заготовок небольшого размера время выдержки при 2100 °С снижалось до 1 ч.

**АМ – механическая обработка алмазным инструментом с размером зерна абразива 1 мкм.

лазера и частота их следования измерялись с помощью цифрового осциллографа TDS 2022C (Tektronix). Для измерения выходной мощности лазера использовался измеритель мощности Thorlabs S405C. Спектры лазерной генерации регистрировались оптическим спектроанализатором AQ6375B (Yokogawa).

Спектр апконверсионной люминесценции при возбуждении кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3-NO_2O_3$ излучением тулиевого волоконного лазера с длиной волны 1940 нм регистрировался с помощью спектрометра на основе монохроматора FHR 1000 (Horiba). Регистрация люминесценции осуществлялась ФЭУ R928 (Hamamatsu).

Спектр возбуждения кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3-NO_2O_3$ в диапазоне 220–540 нм регистрировался спектрофлуориметром RF-5301 PC (Shimadzu), источником возбуждающего излучения служила ксеноновая лампа.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

При накачке АЭ 1 излучением мощностью 3 Вт на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} была получена генерация в режиме модулированной добротности с длительностью импульсов 300 нс при частоте следования 1 кГц. Спектр генерации в режиме модулированной добротности для данного АЭ показан на рис.3,а; для сравнения на рис.3,б представлен спектр непрерывной лазерной генерации. Из рисунков следует, что спектр импульсной генерации сдвинут относительно спектра непрерывной генерации в более коротковолновую область, что обусловлено увеличением инверсной населенности при реализации режима модуляции добротности, и коррелирует со спектральной зависимостью сечения усиления для кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3-NO_2O_3$, приведенной в работах [17, 20].

На рис.4 представлены зависимости выходной мощности непрерывной лазерной генерации от мощности падающего излучения накачки для АЭ 1–3. Из рисунка следует, что для этих АЭ значения дифференциальной эффективности η лазерной генерации отличаются незначительно и лежат в интервале 28%–33%.

Для АЭ 1–3 на рис.5,а и б приведены зависимости средней и пиковой выходной мощности импульсной лазерной генерации, а на рис.5,в – зависимость длительности импульса лазерной генерации от мощности излучения

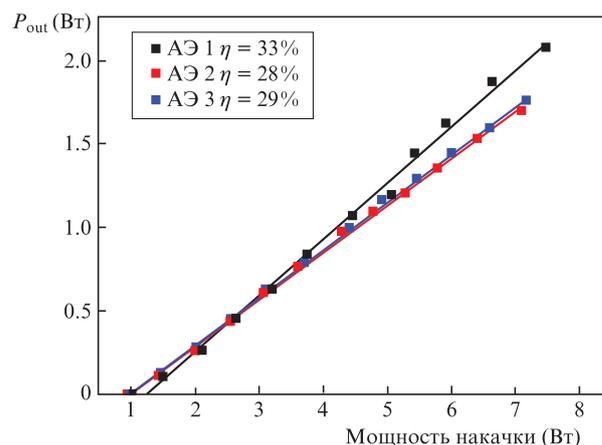


Рис.4. Зависимости выходной мощности лазерной генерации на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} от мощности падающего излучения накачки для АЭ 1–3.

накачки при частоте следования импульсов 1 кГц. Видно, что параметры импульсной лазерной генерации (длительность импульса, выходная мощность) в режиме модулированной добротности (как и в случае непрерывной генерации) для АЭ 1–3 отличаются незначительно.

Осциллограмма импульса наименьшей длительности и типичный цуг импульсов при частоте следования 1 кГц, полученные в эксперименте с АЭ 1, показаны на рис.6. Видно, что амплитуды импульсов в цуге несколько отличаются друг от друга. Мы полагаем, что это может быть связано с многомодовым режимом генерации при условии, что размер пятна накачки больше размера моды резонатора внутри активного элемента. Поскольку моды лазера имеют различное поперечное распределение интенсивности, то при модуляции добротности вклады разных мод в генерируемую мощность будут отличаться, в том числе и за счет разной инверсии населенности мод от импульса к импульсу.

В генерационных экспериментах с АЭ первой серии при фокусировке излучения накачки в различные участки торца активного элемента были выявлены области, для которых наблюдалась стабильная работа лазера при частоте следования импульсов 1 кГц вплоть до максимального уровня мощности излучения накачки. В то же время на торцах АЭ имелись области, на которых при повы-

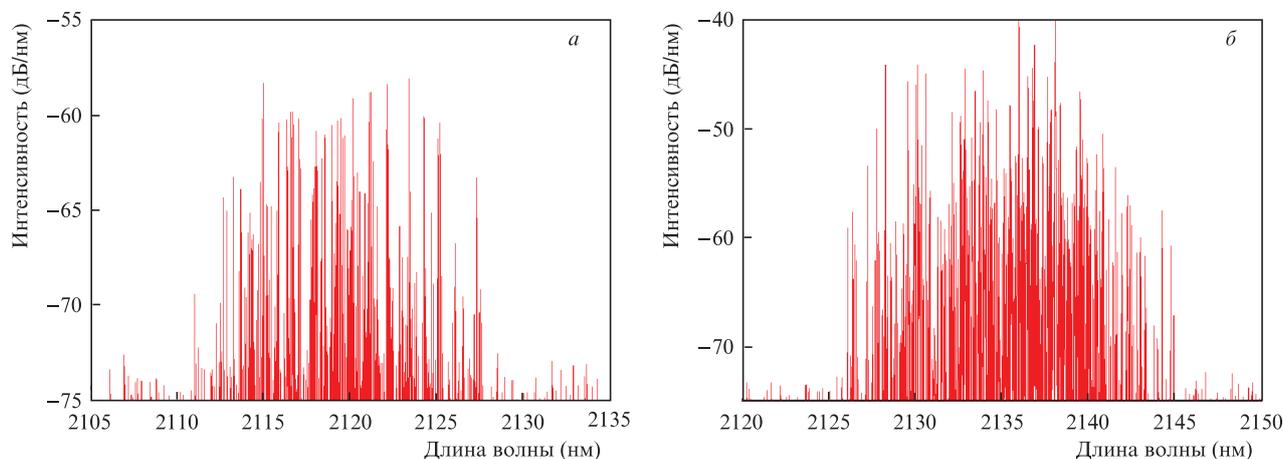


Рис.3. Спектры лазерной генерации на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} для АЭ 1 в режиме модулированной добротности (а) и в непрерывном режиме (б).

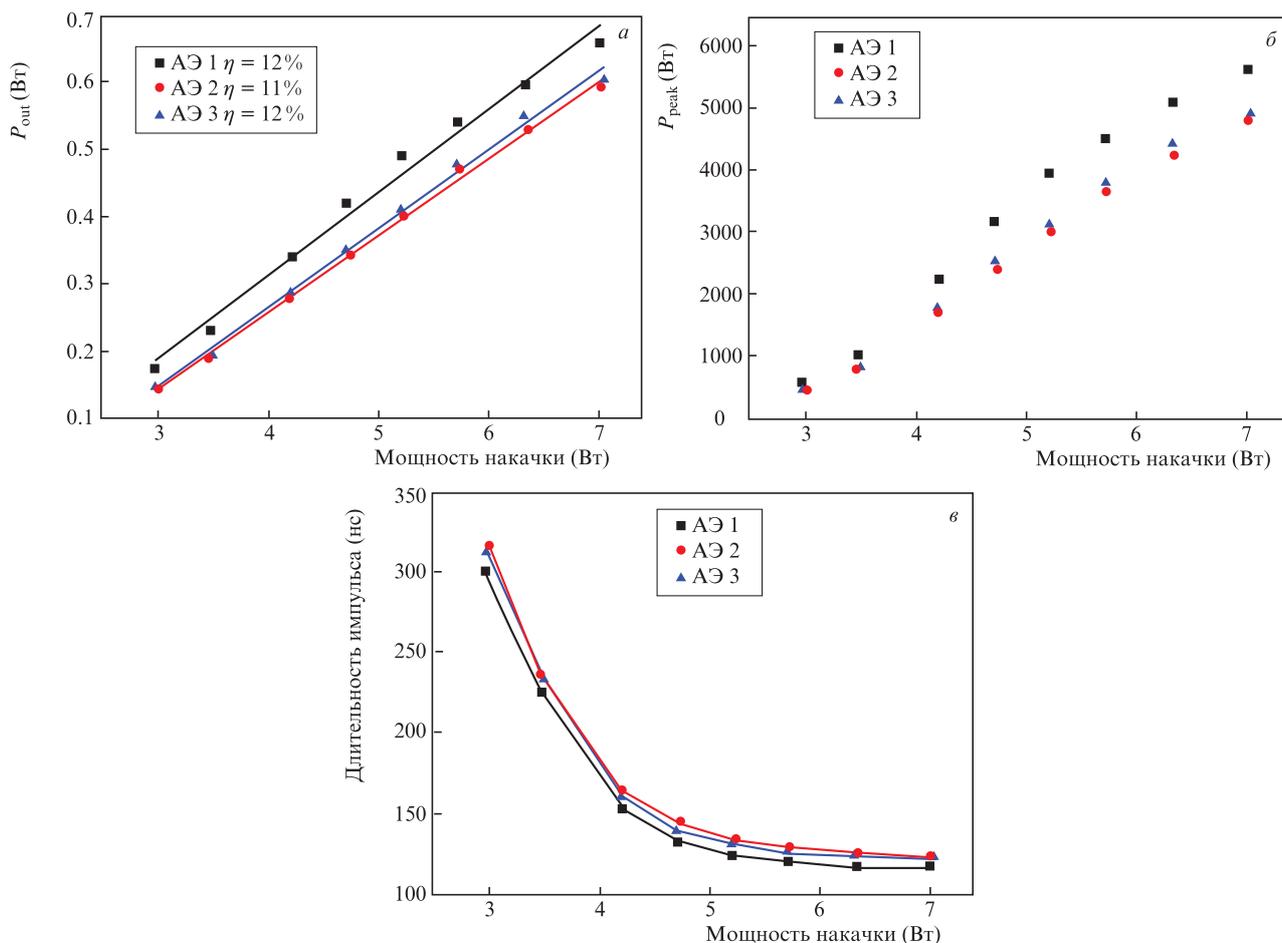


Рис.5. Зависимости средней (а) и пиковой (б) выходной мощности импульсной лазерной генерации на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} в режиме модулированной добротности от мощности падающего излучения накачки для АЭ 1–3, а также зависимость длительности лазерного импульса от мощности излучения накачки (в) при частоте следования импульсов 1 кГц.

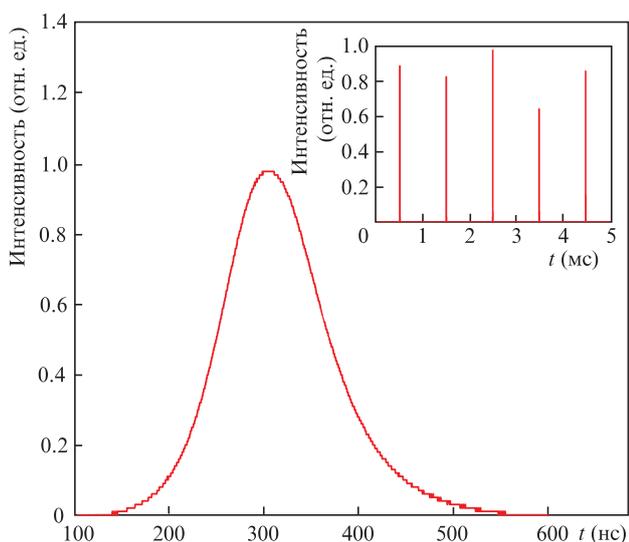


Рис.6. Осциллограмма импульса наименьшей длительности и типичный цуг импульсов при частоте следования 1 кГц для АЭ 1.

шении мощности накачки и, соответственно, плотности мощности лазерной генерации возникали «прогары». Изображения характерных «прогаров», полученные с использованием оптического микроскопа высокого разрешения Axio Imager Z2 Vario (Carl Zeiss), показаны на рис.7. Следует заметить, что данные «прогары» воз-

никали только на поверхности торцов, в объеме активных элементов повреждения не были обнаружены.

С целью выявления влияния условий выращивания кристаллов и качества обработки торцов АЭ на возникновение «прогаров» была проведена вторая серия экспериментов с использованием активных элементов 4, 5 и 6 (табл.1). При этом АЭ 4 был вырезан из кристалла, выращенного со скоростью 4 мм/ч, который после роста перед ХМП подвергался отжигу в вакууме в течение 1 ч при $T = 1400^\circ C$. Активные элементы 5 и 6 были вырезаны из кристалла, выращенного со скоростью 10 мм/ч, причем кристалл для АЭ 5 также подвергался отжигу в вакууме в течение 1 ч при $T = 1400^\circ C$, а кристалл для АЭ 6 после термообработки в вакууме подвергался АМ и снова отжигу, а затем перед ХМП – еще раз АМ. Продолжительность ХМП для активных элементов 4, 5 и 6 составила 10, 20 и 30 мин соответственно.

Эксперименты с АЭ 4–6 проводились с использованием оптической схемы 1 (см. рис.1). Параметры резонатора, размер пятна перетяжки пучка накачки были аналогичны реализованным в первой серии генерационных экспериментов. Максимальная мощность лазера накачки составила 5.1 Вт.

Зависимости средней и пиковой выходной мощности импульсной лазерной генерации от мощности излучения накачки для АЭ 4–6, а также зависимость длительности лазерного импульса от мощности накачки при частоте следования импульсов 1 кГц приведены на рис.8.

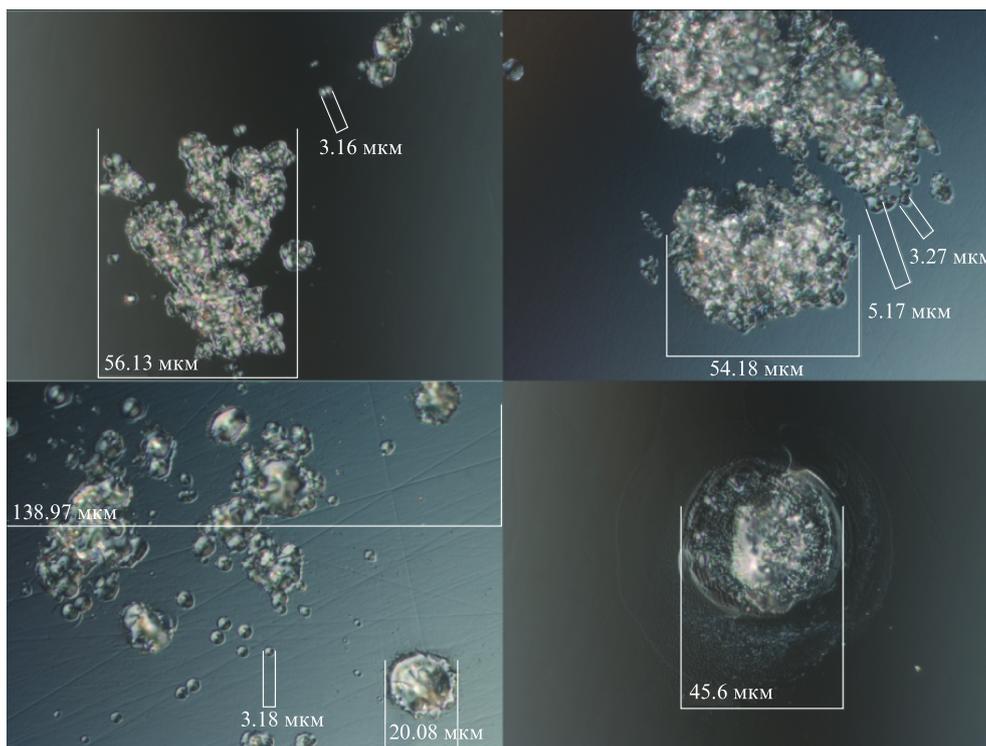


Рис.7. Изображения «прогаров» на торце активного элемента после генерационного эксперимента, полученные с помощью микроскопа Axio Imager Z2 Vario.

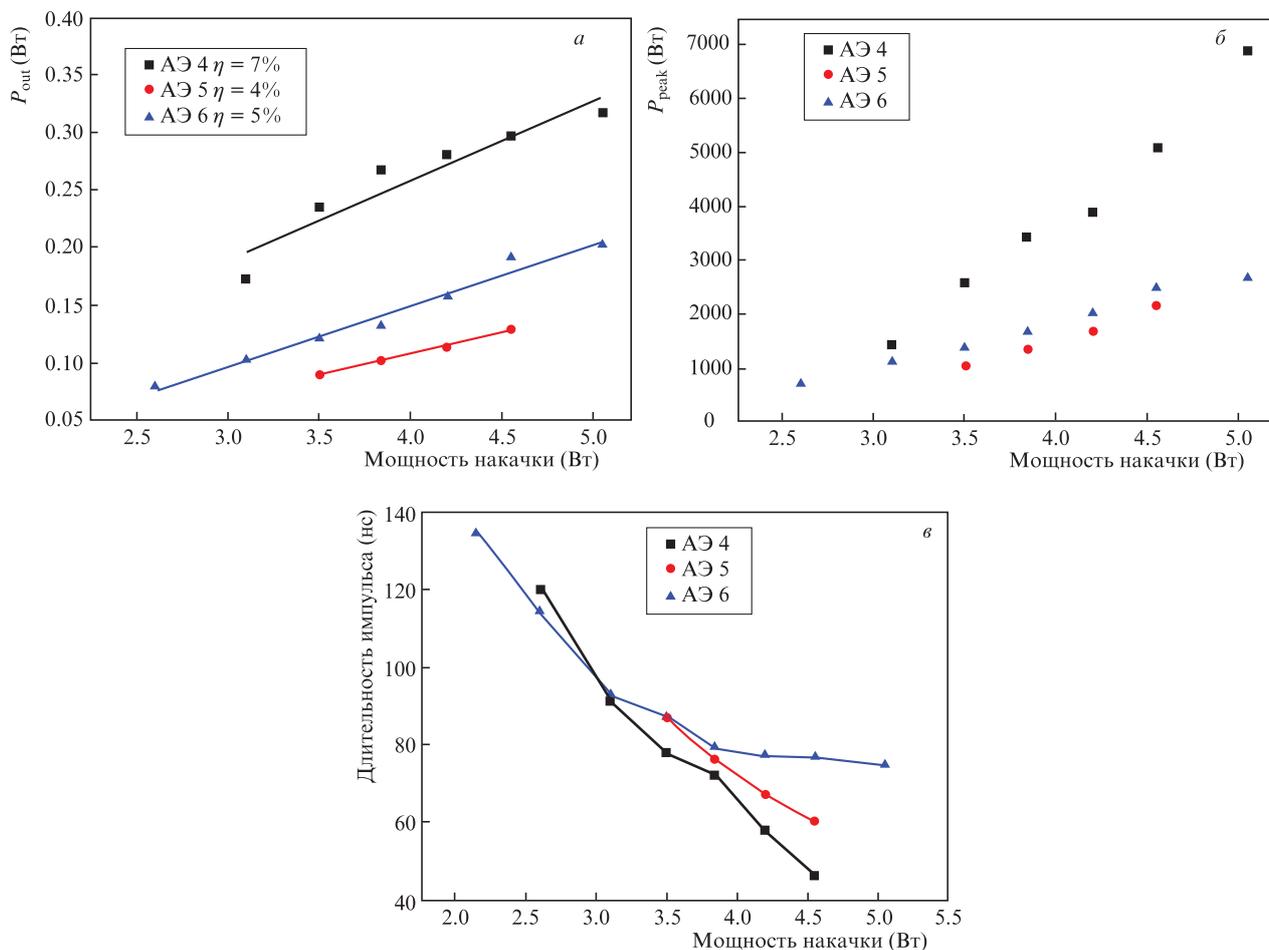


Рис.8. Зависимости средней (а) и пиковой (б) выходной мощности импульсной генерации на переходе $^5I_7 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} , а также длительности лазерного импульса (в) от мощности падающего излучения накачки для АЭ 4–6. Частота следования импульсов 1 кГц.

Из рис.8 следует, что лучшие энергетические характеристики и наименьшая длительность импульса продемонстрированы АЭ 4, вырезанным из кристалла $ZrO_2-13.4$ мол. % $Y_2O_3-0.6$ мол. % Ho_2O_3 , который был выращен со скоростью 4 мм/ч и торцы которого подвергались ХМП в течение 10 мин. Осциллограмма импульса наименьшей длительности и типичный цуг импульсов при частоте следования 1 кГц для АЭ 4 показаны на рис.9.

Отметим, что, как и в случае первой серии экспериментов с АЭ 1–3, на торцах АЭ 4–6 имелись области, в которых при увеличении мощности излучения накачки и плотности мощности лазерной генерации возникали «прогары».

С использованием АЭ 4, характеризующимся лучшими энергетическими характеристиками и меньшей длительностью импульса, был проведен дополнительный эксперимент, оптическая схема которого приведена на рис.10. Схема 2 содержала дополнительное плоское 45-градусное дихроичное зеркало, обеспечивающее 98%-ное пропускание на длине волны накачки и 100%-ное отражение на длине волны генерации, которое было установлено с целью минимизации излучения накачки, падающего на задний торец АЭ. Длина резонатора в данном случае составила 92 мм.

Использование оптической схемы 2 не позволило исключить «прогары» на торце АЭ, а привело лишь к увеличению длительности импульса генерации до 85 нс при частоте следования импульсов 1 кГц и мощности излучения накачки 4.5 Вт (против 46 нс, полученных в схеме 1).

Таким образом, обе серии экспериментов по получению импульсной лазерной генерации в режиме модулированной добротности на АЭ из кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3-Ho_2O_3$ показали, что при повышении плотности мощности лазерной генерации и сокращении длительности импульса генерации на торцах активных элементов возникают характерные «прогары».

Одна из причин возникновения «прогаров» может быть связана со структурой этих кристаллов, для которой характерно наличие кислородных вакансий, вызванных необходимостью зарядовой компенсации при гетеровалентном замещении катионов Zr^{4+} катионами Y^{3+} и РЗ ионами. Анионные вакансии, захватившие электроны, могут характеризоваться энергетическими уровнями вблизи дна зоны проводимости [24–26]. Концентрация дефектов

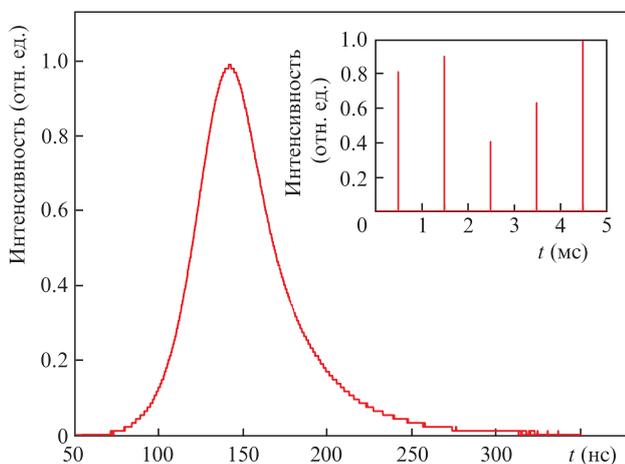


Рис.9. Осциллограмма импульса наименьшей длительности и типичный цуг импульсов при частоте следования 1 кГц для АЭ 4.

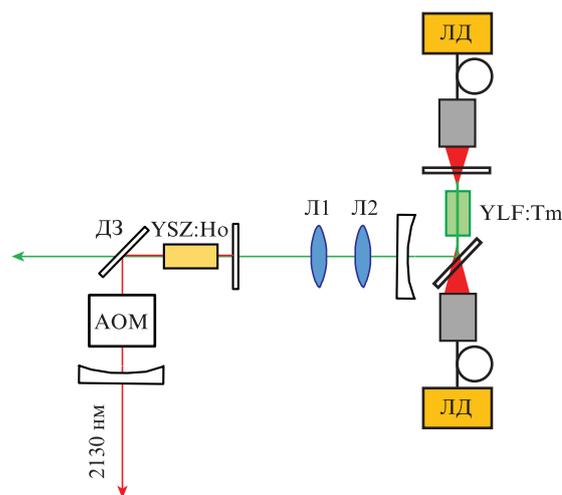


Рис.10. Оптическая схема 2 двухмикронного лазера на кристаллах $ZrO_2-Y_2O_3-Ho_2O_3$: ДЗ – дихроичное зеркало (остальные обозначения те же, что на рис.2).

структуры на границе раздела (торцах АЭ) может быть выше [27]. Взаимодействие дефектов структуры с возбужденными до высоких энергетических уровней (вследствие апконверсионных процессов, имеющих место при высоких плотностях мощности накачки) ионами Ho^{3+} может приводить к появлению электронов на энергетических уровнях дефектов и их последующему термоиндуцируемому переходу в зону проводимости.

О наличии дефектов в кристаллах $ZrO_2-13.4$ мол. % $Y_2O_3-0.6$ мол. % Ho_2O_3 свидетельствует наличие полосы в области 254 нм в спектре возбуждения при регистрации люминесценции ионов Ho^{3+} на длине волны 541 нм (рис.11).

О взаимодействии ионов Ho^{3+} в кристаллах $ZrO_2-13.4$ мол. % $Y_2O_3-0.6$ мол. % Ho_2O_3 при возбуждении их лазерным излучением с длиной волны 1940 нм на уровень 5I_7 свидетельствуют спектры апконверсионной люминесценции, обусловленной переходом $^5I_6 \rightarrow ^5I_8$ ионов Ho^{3+} (рис.12).

Второй причиной появления «прогаров» может быть возникновение самофокусировки излучения из-за характерной для кристаллов $ZrO_2-Y_2O_3$ высокой нелинейности третьего порядка, экспериментально и теоретически исследованной в работе [28].

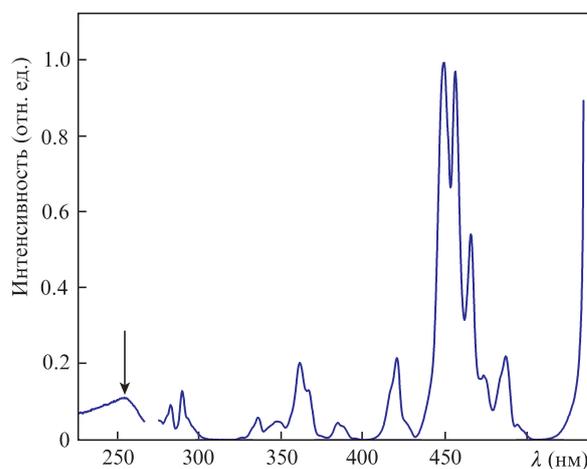


Рис.11. Спектр возбуждения кристаллов $ZrO_2-13.4$ мол. % $Y_2O_3-0.6$ мол. % Ho_2O_3 ; $\lambda_{reg} = 541$ нм, $T = 300$ К.

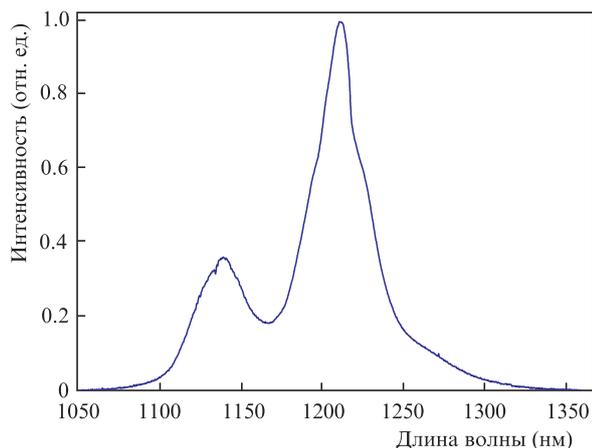


Рис.12. Спектр люминесценции перехода ${}^5I_6 \rightarrow {}^5I_8$ ионов Ho^{3+} при возбуждении уровня 5I_7 в кристаллах ZrO_2 –13.4 мол.% Y_2O_3 –0.6 мол.% Ho_2O_3 ; $T = 300$ К.

4. Заключение

В настоящей работе исследованы параметры импульсной генерации в режиме модулированной добротности на активных элементах из кристаллов ZrO_2 –13.4 мол.% Y_2O_3 –0.6 мол.% Ho_2O_3 , выращенных со скоростью 4 или 10 мм/ч, торцы которых подвергались химико-механической полировке.

В ходе экспериментов установлено, что при определенных значениях плотности мощности лазерной генерации и сокращении длительности импульса генерации на торцах всех активных элементов возникают «прогары». Причины появления «прогаров» могут быть обусловлены как дефектами структуры, так и возникновением самофокусировки из-за высоких значений нелинейных оптических восприимчивостей третьего порядка в данных кристаллах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-20039).

Авторы выражают благодарность М.В.Герасимову за помощь при получении изображений на оптическом микроскопе высокого разрешения Carl Zeiss Axio Imager Z2 Vario.

- Honea E.C., Beach R.J., Sutton S.B., Speth J.A., Mitchell S.C., Skidmore J.A., Emanuel M.A., Payne S.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 9 (1997).
- Walsh B.M. *Laser Phys.*, **19**, 855 (2009).
- Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P., in *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics* (Croatia: INTECH, 2010, p. 471).
- Koopmann P., Peters R., Petermann K., Huber G. *Appl. Phys. B*, **102**, 1 (2011).
- Koopmann P. *Long Wavelength Laser Operation of Tm: Sc₂O₃ at 2116 nm and Beyond* (OSA, 2011, paper ATuA5).
- Antipov O.L., Novikov A.A., Zakharov N.G., Zinoviev A.P. *Opt. Mater. Express*, **2**, 183 (2012).
- Lagatsky A.A., Fusari F., Kurilchik S.V., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Kuleshov N.V., Pavlyuk A.A., Brown C.T.A., Sibbett W. *Appl. Phys. B*, **97** (2), 321 (2009).
- Guo W., Chen Y., Lin Y., Gong X., Luo Z., Huang Y. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **41**, 115409 (2008).
- Большиков Ф.А., Жариков Е.В., Захаров Н.Г., Лис Д.А., Рябочкина П.А., Субботин К.А., Антипов О.Л. *Квантовая электроника*, **40**, 101 (2010) [*Quantum Electron.*, **40**, 101 (2010)].
- Большиков Ф.А., Жариков Е.В., Захаров Н.Г., Лис Д.А., Рябочкина П.А., Субботин К.А., Антипов О.Л. *Квантовая электроника*, **40**, 847 (2010) [*Quantum Electron.*, **40**, 847 (2010)].
- Lyapin A.A., Fedorov P.P., Garibin E.A., Malov A.V., Osiko V.V., Ryabochkina P.A., Ushakov S.N. *Opt. Mater.*, **35**, 1859 (2013).
- Рябочкина П.А., Чабушкин А.Н., Копылов Ю.Л., Балашов В.В., Лопухин К.В. *Квантовая электроника*, **46**, 597 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 597 (2016)].
- Antipov O.L., Novikov A.A., Larin S., Obronov I. *Opt. Lett.*, **41**, 2298 (2016).
- Wei Z., Haitao H., Xiang C., Jingru W., Rui X., Naotian W., Yongguang Z., Dingyuan T., Yishan W., Deyuan S. *Laser Phys.*, **29**, 4 (2019).
- Fei W., Jinwen T., Enhao L., Chongfeng S., Jun W., Dingyuan T., Deyuan S. *Opt. Lett.*, **44**, 24 (2019).
- Haolin Y., Yue C., Fuqiang J., Pengfei W. *Laser & Optoelectron. Progress*, **57**, 7 (2020).
- Борик М.А., Ломонова Е.Е., Малов А.В., Кулебякин А.В., Рябочкина П.А., Ушаков С.Н., Усламина М.А., Чабушкин А.Н. *Квантовая электроника*, **42**, 580 (2012) [*Quantum Electron.*, **42**, 580 (2012)].
- Борик М.А., Ломонова Е.Е., Ляпин А.А., Кулебякин А.В., Рябочкина П.А., Ушаков С.Н., Чабушкин А.Н. *Квантовая электроника*, **43**, 838 (2013) [*Quantum Electron.*, **43**, 838 (2013)].
- Ryabochkina P.A., Chabushkin A.N., Lyapin A.A., Lomonova E.E., Zakharov N.G., Vorontsov K.V. *Laser Phys. Lett.*, **14**, 055807 (2017).
- Chabushkin A.N., Lyapin A.A., Ryabochkina P.A., Antipov S.A., Lomonova E.E. *Laser Phys.*, **28**, 3 (2018).
- Рябочкина П.А., Артемов С.А., Захаров Н.Г., Салтыков Е.В., Воронцов К.В., Чабушкин А.Н., Ломонова Е.Е. *Квантовая электроника*, **50**, 8 (2020) [*Quantum Electron.*, **50**, 8 (2020)].
- Osiko V.V., Borik M.A., Lomonova E.E., Dhanaraj G., Byrappa K., Prasad V., Dudley M., in *Springer Handbook of Crystal Growth* (Berlin, 2010, pp. 433–477).
- Artemov S.A., Borik M.A., Volkova T.V., Gerasimov M.V., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Ryabochkina P.A., Tabachkova N.Yu. *Opt. Mater.*, **99**, 109611 (2020).
- Merino R.I., Orera V.M., Povilla O., Assmus W., Lomonova E.E. *J. Phys. Chem. Solids*, **58**, 10 (1997).
- Merino R.I., Orera V.M., Lomonova E.E., Batygov S.K. *Phys. Rev. B*, **52**, 9 (1995).
- Александров В.И., Батыгов С.Х., Вишнякова М.А., Воронько Ю.К., Калабухова В.Ф., Лаврищев С.В., Ломонова Е.Е., Мызина В.А., Осико В.В. *ФТТ*, **26**, 5 (1984).
- Yuanyuan L., Yasuo I., Browning N.D., Mazanec T. *J. Am. Ceram. Soc.*, **85**, 9 (2002).
- Marcaud G., Serna S., Karamanis P., Alonso-Ramos C., Le Roux X., Berciano M., Maroutian T., Agnus G., Aubert P., Jollivet A., Ruiz-Cardad A., Largeau L., Isac N., Cassan E., Matzen S., Dubreuil N., Rérat M., Philippe Lecoeur P., Vivien L. *Photon. Res.*, **8**, 110 (2020).