

Эффективная генерация на длине волны 2.1 мкм в лазере на кристалле Ho : YAG с накачкой излучением Tm : YLF-лазера

Н.Г.Захаров, О.Л.Антипов, В.В.Шарков, А.П.Савикин

Исследован лазер на кристалле Ho : YAG, генерирующий на длине волны ~2.1 мкм, с накачкой излучением Tm : YLF-лазера на длине волны 1.908 мкм. Реализована непрерывная и импульсно-периодическая генерация излучения с высоким качеством пучка (параметр качества $M^2 \leq 1.2$). Мощность непрерывной генерации достигала 15 Вт при полной оптической эффективности преобразования накачки ~55%. В режиме активной модуляции добротности (реализованной с использованием акустооптического затвора) получена генерация высокостабильной периодической последовательности импульсов с частотой повторения 2.5–10 кГц, длительностью 25–55 нс и средней мощностью до 14.7 Вт. С помощью внутррезонаторной частотной селекции получена генерация на одной выделенной спектральной линии в трёх диапазонах длин волн: вблизи 2.09, 2.097 и 2.123 мкм.

Ключевые слова: лазерная генерация в области 2 мкм, кристалл Ho : YAG, модуляция добротности, спектрально-частотная селекция.

Лазеры на кристаллах, активированных ионами Ho³⁺, позволяют получить генерацию на длине волны $\lambda \sim 2.1$ мкм, что обеспечивает множество применений в современных промышленных технологиях, медицине, дистанционном зондировании атмосферы и других областях [1–3]. При ламповой накачке такая генерация реализуется в лазерах на кристаллах, которые наряду с ионами Ho³⁺ легированы ионами Tm³⁺ и Cr³⁺ [4]. Использование узкополосного лазерного излучения для накачки кристаллов, активированных Ho³⁺, способствует существенному увеличению мощности и эффективности генерации, а также улучшению качества пучка излучения.

В настоящей работе представлены результаты исследования лазера на кристалле Ho : YAG с накачкой излучением Tm : YLF-лазера. Исследована непрерывная и импульсно-периодическая генерация в Ho : YAG-лазере без селективных элементов и с использованием интерференционно-поляризационного фильтра (ИПФ).

Лазерные элементы Ho : YAG (фирма ЭЛС-94, Москва) были выращены методом Чохральского (с атомной концентрацией ионов Ho³⁺, равной ~1%), вырезаны в виде цилиндра (длиной 30 мм и диаметром 4 мм) и имели торцы, просветленные на длины волн накачки и генерации (1.9 и 2.1 мкм соответственно). В некоторых экспериментах использовался составной элемент Ho : YAG: к торцу, через который осуществлялась накачка, методом диффузионной сварки была приварена часть нелегиро-

ванного стержня из YAG (длиной 5 мм и диаметром 4 мм), что обеспечивало уменьшение температурного градиента. Стержни Ho : YAG закреплялись с помощью индиевой фольги внутри медного радиатора с постоянной температурой (~12 °С), поддерживаемой элементом Пельтье и системой температурного контроля.

Для накачки кристаллов Ho : YAG использовалось непрерывное излучение Tm : YLF-лазера (с диодной накачкой) с выходной мощностью до 30 Вт на $\lambda = 1.908$ мкм (рис.1), описанного в работе [5]. Излучение лазера на кристалле Tm : YLF с $\lambda = 1.908$ мкм, хорошо согласованное с линией поглощения кристалла Ho : YAG [5, 6], наилучшим образом подходит для его накачки.

Резонатор Ho : YAG-лазера был сформирован тремя зеркалами: плоским зеркалом M1 с высоким коэффициентом отражения на длинах волн генерации (2.1 мкм) и накачки (1.9 мкм), дихроичным зеркалом M2 с высоким отражением на длине волны генерации (свыше 99.5%) и высоким пропусканием на длине волны накачки (~96%), выходным сферическим зеркалом M3, полупрозрачным на длине волны генерации (рис.1). Для обеспечения большего коэффициента усиления пучок излучения Tm : YLF-лазера фокусировался системой линз Л внутрь кристалла

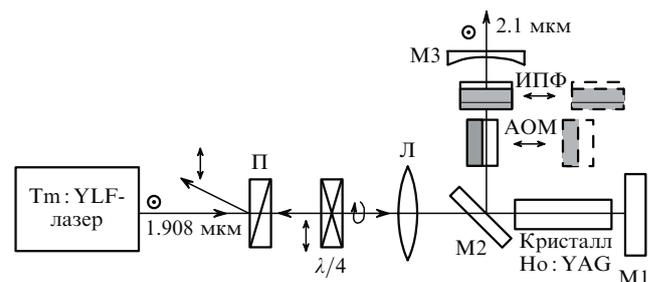


Рис.1. Схема экспериментальной установки:

П – поляризатор; Л – линзовый телескоп; M1 – глухое зеркало; M2 – дихроичное зеркало; M3 – выходное зеркало; АОМ – акустооптический модулятор; ИПФ – интерференционно-поляризационный фильтр.

Н.Г.Захаров. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23

О.Л.Антипов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: antipov@appl.sci-ppov.ru

В.В.Шарков, А.П.Савикин. Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского, Россия, 603950 Н.Новгород, просп. Гагарина, 23

Поступила в редакцию 1 декабря 2009 г.

Ho : YAG через дихроичное зеркало M2. Зеркало M1 имело высокий коэффициент отражения на $\lambda = 1.908$ мкм для увеличения поглощения излучения накачки в кристалле Ho : YAG. Пучок излучения накачки дважды проходил через активный элемент и практически полностью им поглощался ($\sim 95\%$).

В случае попадания излучения, отраженного от зеркала M1 и не полностью поглощенного в кристалле Ho : YAG, обратно в резонатор Tm : YLF-лазера возникла «завязка» двух генераторов. Вследствие этого изменялась динамика генерации Tm : YLF-лазера: резко увеличивалась амплитуда пиков (в десятки раз) на фоне уменьшения их общего числа. Это приводило, в свою очередь, к пробоям на торцах кристалла Tm : YLF уже при невысокой мощности генерации ($\sim 5 - 6$ Вт). Для обеспечения оптической развязки Tm : YLF- и Ho : YAG-лазеров перед фокусирующей линзой помещались поляризационный клин П и четвертьволновая пластинка (рис.1). После двойного прохождения через четвертьволновую пластинку излучение Tm : YLF-лазера имело поляризацию, ортогональную исходной, и отклонялось поляризационным клином от оси резонатора. Таким способом удалось полностью исключить пробой лазерного элемента (вплоть до режима, обеспечивающего максимальную мощность генерации).

Выходная мощность излучения Ho : YAG-лазера оптимизировалась путём достижения наилучшего согласования объёма моды резонатора с объёмом области накачки (с учётом линзы, наводимой излучением накачки в кристалле Ho : YAG). Диаметр пучка накачки в кристалле Ho : YAG варьировался от 0.5 до 0.9 мм, длина резонатора изменялась от 5 до 23 см, радиус R кривизны выходного зеркала варьировался от 150 до 300 мм, а его коэффициент отражения T – от 50 % до 70 %. Максимальная мощность генерации (~ 15.3 Вт) была достигнута в схеме с активным элементом с нелегированной областью на торце и выходным зеркалом с $R \approx 150$ мм и $T \approx 64\%$ (кривая 1 на рис.2), эффективность генерации по оптической накачке достигала при этом $\sim 55\%$. В аналогичном лазере, но на кристалле Ho : YAG без нелегированной области на торце эффективность генерации была на 2 % ниже (кривая 2 на рис.2).

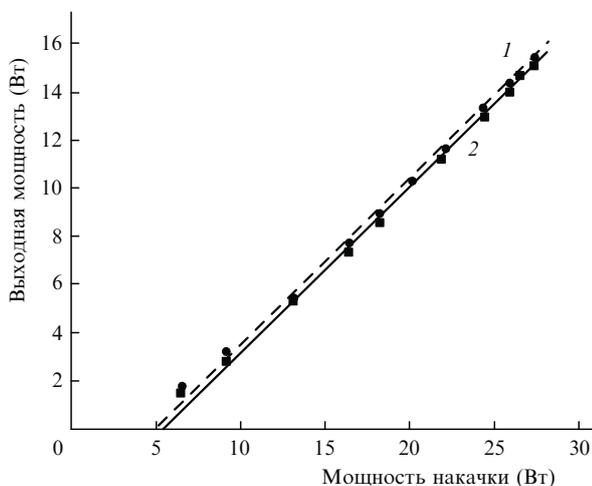


Рис.2. Зависимости мощности генерации Ho : YAG-лазера на длине волны 2.1 мкм от мощности накачки (погрешность измерения мощности $\sim 0.5\%$) для кристалла Ho : YAG с нелегированной областью на торце (1) и без нее (2).

Поперечная пространственная структура пучка генерации Ho : YAG-лазера регистрировалась с помощью ИК камеры Ругосам III. Согласно методике Международной организации по стандартизации определялся параметр качества M^2 , характеризующий близость профиля пучка к гауссову [7]. Исследования показали, что даже при максимальной мощности генерации качество пучка оставалось близким к дифракционному пределу ($M^2 \leq 1.2$).

Наряду с непрерывной генерацией в Ho : YAG-лазере был реализован режим модуляции добротности. Для этого в выходное плечо резонатора между дихроичным (M2) и выходным (M3) зеркалами помещался акустооптический затвор (рис.1). Была получена импульсно-периодическая последовательность коротких импульсов (25–55 нс) с частотой повторения 2.5–10 кГц (рис.3). В данном диапазоне частот повторения наблюдалась высокая временная и амплитудная стабильность импульсов (амплитудная нестабильность составляла менее 3 %, нестабильность длительности импульсов – менее 2 нс). Уменьшение частоты повторения (в пределах указанного диапазона) при постоянной мощности накачки, как и увеличение мощности накачки при фиксированной частоте повторения, приводило к уменьшению длительности импульсов и увеличению их амплитуды. Средняя мощность импульсно-периодической генерации и эффективность использования накачки в указанном диапазоне частот были постоянными (и составили 98 % от аналогичных параметров в непрерывном режиме). Качество пучка генерации в импульсно-периодическом режиме оставалось близким к дифракционному. При частоте акустооптической модуляции менее 2.5 кГц происходило уменьшение средней мощности генерации (при частоте 2 кГц падение мощности составляло $\sim 6\%$). При более высоких частотах модуляции (10–20 кГц) наблюдалось сильное увеличение амплитудной нестабильности импульсов.

Измерение спектрального состава выходного излучения Ho : YAG-лазера проводилось с помощью монохроматора МДР-41 с разрешающей способностью 0.1 нм. Анализ спектра показал, что в непрерывном (кривая 1 на рис.4) и импульсно-периодическом (кривая 2 на рис.4) режимах генерация происходила одновременно в двух диапазонах длин волн с центрами на $\lambda = 2.09$ и 2.097 мкм.

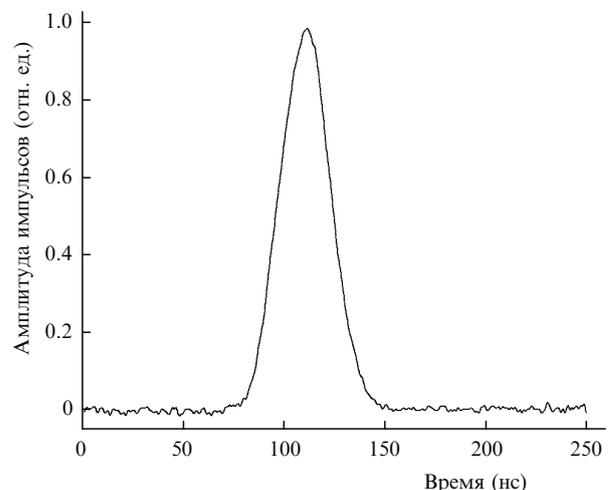


Рис.3. Осциллограмма импульса генерации Ho : YAG-лазера в режиме модуляции добротности при частоте модуляции 3 кГц и выходной мощности 14 Вт.

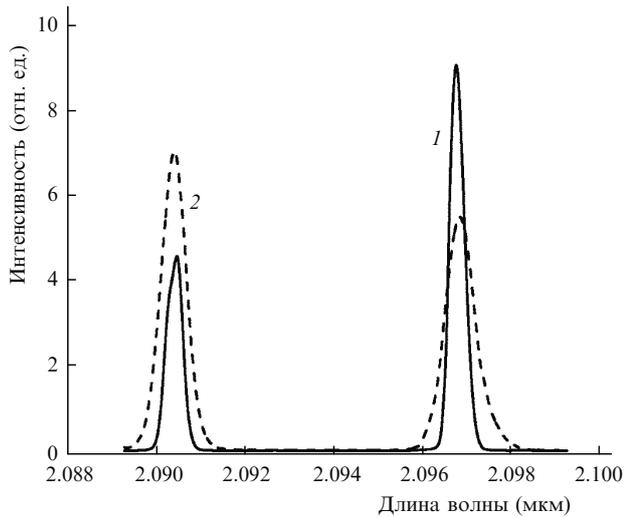


Рис.4. Спектры генерации Nd:YAG-лазера в отсутствие селективных элементов в непрерывном режиме (1) и в режиме модуляции добротности (2) при выходной мощности ~ 14 Вт.

Соотношение интенсивностей спектральных линий зависело от режима работы лазера, температуры кристалла и добротности резонатора. Для спектральной селекции выходного излучения в плечо между зеркалами М2 и М3 помещался ИПФ – сапфировая плоскопараллельная пластинка, ориентированная под углом Брюстера к оси резонатора (рис.1). Использование ИПФ позволило получить лазерную генерацию как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме на одной выделенной

спектральной линии в каждом из трёх диапазонов длин волн: вблизи 2.09, 2.097 или 2.123 мкм (с шириной линии менее 0.5 нм). Падение средней мощности было минимальным (не превышало 1 %) при выделении линии генерации на $\lambda = 2.097$ мкм. Применение селектора для получения генерации на $\lambda = 2.09$ или 2.123 мкм приводило к падению выходной мощности на большую величину (~ 10 % и ~ 15 % соответственно при максимальной мощности).

Таким образом, продемонстрирована генерация мощного непрерывного и импульсно-периодического излучения в двухмикронном диапазоне длин волн, обладающего высоким качеством пучка и высокостабильными характеристиками (мощностью, длительностью и частотой повторения импульсов, длиной волны генерации и шириной спектральной линии).

1. Kavaya M.J., Spiers G.D., Lobl E.S., Rothermel J., Keller V.W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **2214**, 237 (1994).
2. Targ R., Kavaya M.J., Huffaker R.M., Bowles R.L. *Appl. Opt.*, **30** (15), 2013 (1991).
3. Budni P.A., Ibach C.R., Setzler S.D., Gustafson E.J., Castro R.T., Chiklis E.R. *Opt. Lett.*, **28** (12), 1016 (2003).
4. Kalisky Y.Y. *The Physics and Engineering of Solid State Lasers* (Bellingham: SPIE Press Book, 2006, Vol. TT71, pp 105–130).
5. 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** (5), 410 (2009).
6. Budni P.A., Lemos M.L., Mosto J.R., Chiklis E.P. *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 629 (2000).
7. *Optics and Optical Instruments – Test Methods for Laser Beam Parameters: Beam Width, Divergence Angle and Beam Propagation Factor* (ISO/DIS 11 146: 1999, 1999).