

Эффективная генерация на длине волны 1908 нм в лазере на кристалле Tm : YLF с диодной накачкой

Н.Г.Захаров, О.Л.Антипов, А.П.Савикин, В.В.Шарков,
О.Н.Еремейкин, Ю.Н.Фролов, Г.М.Мищенко, С.Д.Великанов

Исследованы характеристики генерации на длине волны 1908 нм в лазере на кристалле Tm : YLF с продольной диодной накачкой. Проведена оптимизация параметров лазера с целью получения максимальной мощности непрерывного излучения в пучке хорошего качества. Достигнута выходная мощность ~ 27 Вт при дифференциальной эффективности ~ 50 % и полной эффективности преобразования оптической накачки ~ 41 %.

Ключевые слова: лазерные кристаллы Tm : YLF, диодная накачка, процесс кросс-релаксации, резонатор лазера, лазерное излучение двухмикронного диапазона, эффективность генерации.

1. Введение

Высокоэффективные и мощные твердотельные лазеры, генерирующие пучки излучения в длинноволновой части ближнего ИК диапазона (на длине волны $\lambda > 1.4$ мкм), широко применяются в современных промышленных технологиях, в дистанционном зондировании атмосферы, в медицине, военном деле и в других областях [1–3]. Лазеры на кристаллах, допированных ионами Tm³⁺, способны эффективно генерировать излучение на $\lambda = 1.9 - 2$ мкм. Достоинства этих лазеров определяются свойствами ионов Tm³⁺, имеющих сильную и широкую полосу поглощения (вблизи 800 нм), идеальную для накачки мощными лазерными диодами, а также обладающих кросс-релаксационными переходами, которые обеспечивают появление двух ионов на верхнем лазерном уровне на каждый квант поглощённой накачки [4, 5].

Лазеры на основе кристаллов, содержащих Tm, исследуются в последние годы многими научными группами [6–15]. Одним из наиболее перспективных является кристалл Tm : YLF благодаря сильному естественному двулучепреломлению (обеспечивает линейную поляризацию генерации), отрицательному коэффициенту температурного изменения показателя преломления (способствует уменьшению суммарной тепловой линзы активного элемента, компенсируемой положительной линзой на торцах и электронным эффектом), широкой полосе люминесценции, которая хорошо перекрывается, в частности, с полосой поглощения кристалла Ho : YAG [10, 11]. Лазеры на кристаллах Tm : YLF демонстрируют возможность генерации мощного излучения в пучках хорошего

качества при высокой эффективности использования торцевой или боковой диодной накачки [10–13].

Настоящая работа посвящена исследованию генерационных характеристик Tm:YLF-лазера с торцевой диодной накачкой и оптимизации параметров этого лазера с целью увеличения непрерывной выходной мощности при высокой эффективности использования излучения накачки.

2. Оптические свойства кристалла Tm : YLF

Активные элементы из Tm : YLF, использованные в наших экспериментах, были выращены методом Бриджмена–Стокбаргера (атомная концентрация C_{Tm} ионов Tm³⁺ составляла 3 % и 3.5 %), вырезаны в виде цилиндра перпендикулярно направлению оси кристалла и имели торцы, просветленные на длины волн накачки и генерации ($\lambda_p = 793$ нм и $\lambda_g = 1908$ нм соответственно). Измерение спектра поглощения кристалла Tm : YLF показало наличие сильного поглощения как для поляризованного,

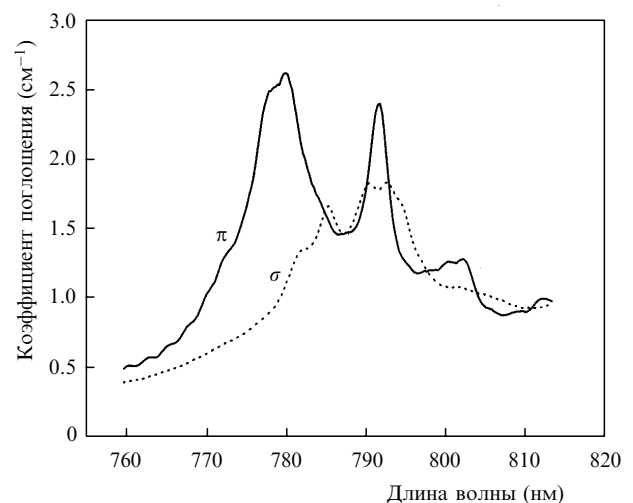


Рис.1. Спектр поглощения для π - и σ -поляризаций кристалла Tm : YLF с атомной концентрацией ионов Tm³⁺ $C_{Tm} = 3\%$, измеренный монохроматором МДР-2 с разрешением 0.5 нм.

Н.Г.Захаров, О.Л.Антипов, А.П.Савикин, В.В.Шарков, О.Н.Еремейкин. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 4; e-mail: antipov@appl.sci-nnov.ru

Ю.Н.Фролов, Г.М.Мищенко, С.Д.Великанов. Институт лазерно-физических исследований РФЯЦ–ВНИИЭФ, Россия, Нижегородская обл., 607190 Саров, просп. Мира, 37

Поступила в редакцию 15 сентября 2008 г., после доработки – 21 октября 2008 г.

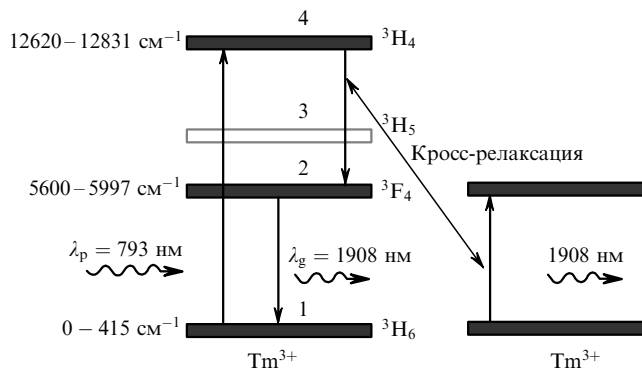


Рис.2. Схема лазерных уровней кристалла Tm : YLF.

так и для неполяризованного излучения на длине волны диодных линеек ~ 800 нм (рис.1).

Кристалл Tm : YLF имеет довольно малое ($\sigma \approx 3 \times 10^{-21}$ см²) сечение усиления на длине волны 1908 нм [10] и высокий порог генерации, обусловленный квазитрехуровневой схемой генерации. Поэтому для эффективной работы лазера требуются большие интенсивности накачки. На практике допустимая интенсивность накачки ограничивается порогом разрушения лазерного кристалла из-за термомеханических напряжений в нем (пороговая мощность накачки, переходящая в тепло, на единицу длины стержня из Tm : YLF составляет ~ 13 Вт/см) [11].

Высокая эффективность преобразования излучения накачки в излучение генерации на $\lambda = 1.9$ мкм (большой квантовый выход) достигается в кристалле Tm : YLF в основном благодаря кросс-релаксационным переходам, обусловленным взаимодействием ионов Tm³⁺ между собой. В общем случае заселение верхнего уровня ³F₄ рабочего лазерного перехода кристаллов, содержащих Tm³⁺, может осуществляться за счёт как межзонного диполь-дипольного взаимодействия (обеспечивающего кросс-релаксационные переходы ³H₄ → ³F₄ и ³H₆ → ³F₄), так и внутризонного распада (рис.2).

Однако вероятность кросс-релаксационного процесса значительно превосходит вероятности излучательного перехода и безызлучательной релаксации [14–17]. Это выражается в том, что квантовый выход η лазерного перехода ³F₄ → ³H₆ (при накачке с уровня ³H₆ на уровень ³H₄) близок к двум и составляет ~ 1.84 для $C_{Tm} = 3\%$ [11]. С другой стороны, то, что $\eta < 2$, объясняется дефектом энергии кросс-релаксационного перехода и ветвлением люминесценции с уровня ³F₄ [6, 11, 14]. Потери энергии возбуждения происходят также из-за поглощения из возбуждённого состояния на более высокие уровни (например, при переходе ³H₅ → ¹G₄) или вследствие апконверсии (при взаимодействии двух возбуждённых ионов Tm³⁺) [11]. Наблюдаемая в наших экспериментах люминесценция кристалла Tm : YLF в видимом диапазоне спектра, соответствующая, например, переходу ¹G₄ → ³H₆, также свидетельствует о заселении высоколежащих уровней.

3. Экспериментальные исследования

В экспериментах активный элемент из кристалла Tm : YLF был ориентирован таким образом, чтобы дихроичные зеркала резонатора вносили наименьшие потери для σ -поляризации на $\lambda_g = 1908$ нм. Резонатор П-образной формы с поворотом формировался четырьмя зер-

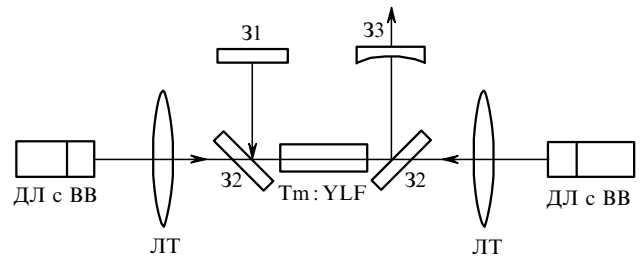


Рис.3. Схема экспериментальных исследований: ДЛ с ВВ – диодная линейка с волоконным выходом; ЛТ – двухлинзовые телескопы с идентичными параметрами; 31 – глухое зеркало; 32 – дихроичные зеркала; 33 – выходное зеркало.

калами: плоским зеркалом 31 с высоким коэффициентом отражения ($R = 99.9\%$) на $\lambda_g = 1908$ нм, дихроичными зеркалами 32 с $R > 99\%$ для вертикальной поляризации, $R \sim 96\%$ для горизонтальной поляризации на $\lambda_g = 1908$ нм и с высоким пропусканием излучения накачки на $\lambda_p = 793$ нм, а также выходным сферическим зеркалом 33 (рис.3).

Для накачки кристалла Tm : YLF использовались две непрерывные диодные линейки с волоконным выходом (диаметр сердцевинки 800 мкм, числовая апертура ~ 0.13), генерирующие неполяризованное излучение на $\lambda_p = 793$ нм мощностью до 40 Вт. Вариация и стабилизация длины волны генерации диодных лазеров обеспечивались путём использования систем охлаждения на элементах Пельтье с электронным контролем температуры. Выходной пучок излучения диодных линеек фокусировался с помощью линзового телескопа, состоящего из двух сферических линз, внутрь кристалла Tm : YLF через дихроичное зеркало. Эксперименты проводились с активными элементами длиной $L = 10, 14.5$ и 16.5 мм, диаметром 3 мм и концентрацией $C_m = 3\%$ и 3.5% .

Элемент из Tm : YLF с $L = 10$ мм и $C_{Tm} = 3\%$. Цилиндрический элемент из кристалла Tm : YLF длиной 10 мм и диаметром 3 мм был закреплён в радиаторе, температура которого поддерживалась постоянной (около 15°C). Выходное зеркало с радиусом кривизны $R_c = 200$ мм имело коэффициент отражения $K = 83\%$. Длина резонатора L_{cav} варьировалась от 8 до 15 см. Расчёты основной TEM₀₀-моды резонатора показали, что при используемых значениях L_{cav} и R_c диаметр основной моды резонатора в кристалле не превышает 600 мкм (с учётом слабой отрицательной тепловой линзы с фокусным расстоянием свыше 12 см, наводимой интенсивной накачкой в кристалле).

Для фокусировки излучения двух диодных линеек использовались два двухлинзовых телескопа Кеплера, формирующих в лазерном кристалле области накачки диаметрами от 700 до 900 мкм (рис.4). Фокусные расстояния линз, образующих телескопы, варьировались. Диаметр пучка накачки в области фокальной перегрузки в активном элементе предварительно измерялся в воздухе (с помощью USB-видеокамеры, программных пакетов LabVIEW и Vision) двумя способами: по уровню уменьшения интенсивности в e^2 раз и путем нахождения области, в которую попадает 90% общей мощности.

Эксперименты проводились последовательно с каждым из телескопов накачки. Наибольшую мощность лазерной генерации (~ 17 Вт при дифференциальной эффективности $\sim 30\%$) удалось получить при использовании телескопа 2 (рис.5, кривая 1). Применение телескопа 3 снижало порог генерации, но при этом уменьшалась эф-

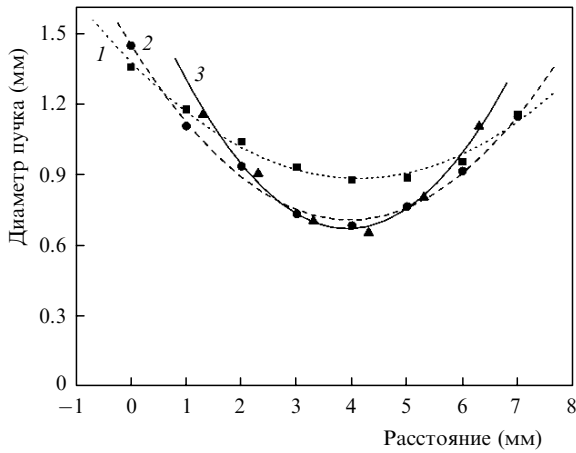


Рис.4. Зависимости диаметра пучка накачки от расстояния до фокуса для телескопа 1, состоящего из одинаковых линз с фокусными расстояниями $f = 5$ см (1), для телескопа 2, состоящего из линз с $f = 5$ и 3.5 см (2), и для телескопа 3, состоящего из линз с $f = 5$ и 3 см (3).

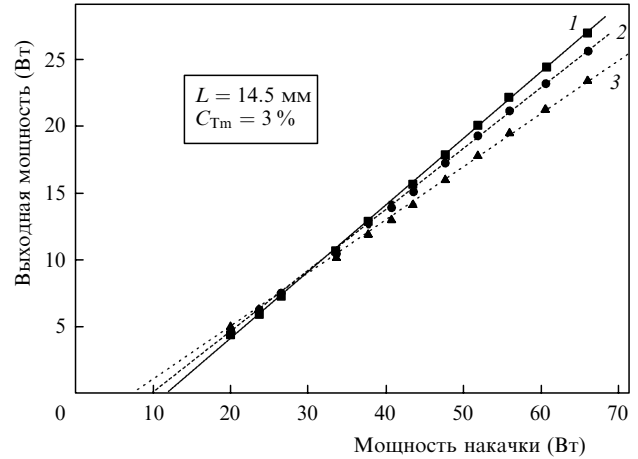


Рис.6. Зависимости выходной мощности лазера от мощности накачки при использовании схемы с телескопом 1 и зеркалом с $R \sim 83\%$ (1), схемы с телескопом 2 и зеркалом с $R \sim 83\%$ (2) и схемы с телескопом 1 и зеркалом с $R \sim 89\%$ (3).

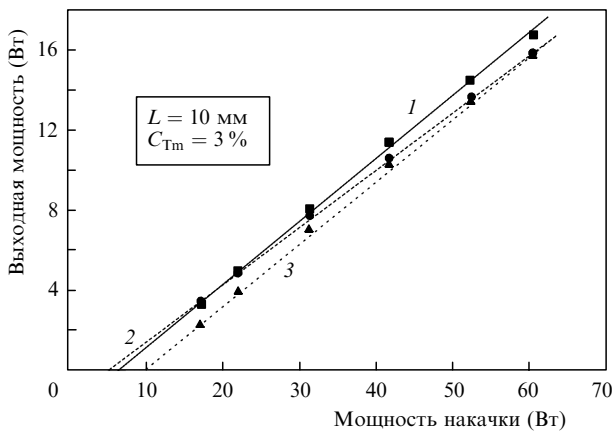


Рис.5. Зависимости выходной мощности лазера от мощности накачки при использовании схемы с телескопом 2 (1), схемы с телескопом 3 (2), и схемы с телескопом 1 (3).

эффективность преобразования накачки в излучение генерации (кривая 2). Использование телескопа 1 приводило к увеличению порога при неизменной дифференциальной эффективности генерации (кривая 3).

Элемент из Tm : YLF с $L = 14.5$ мм и $C_{Tm} = 3\%$. Формирование области усиления внутри элемента происходило с помощью линзовых телескопов 1 и 2, преобразующих пучок излучения диодных линеек. При использовании выходного зеркала с $R_c = 200$ мм и $R \sim 83\%$ в резонаторе длиной ~ 11 см наибольшая выходная мощность была получена при формировании области накачки с помощью телескопа 1 (рис.6, кривая 1). В этом случае за счёт более протяжённой каустики пучка накачки достигалась большая дифференциальная эффективность генерации ($\sim 49\%$). При использовании телескопа 2 наибольшая дифференциальная эффективность составляла 45%.

Для получения максимальной мощности и увеличения эффективности лазерной системы оптимизировался коэффициент отражения выходного зеркала R . Сравнение зависимостей мощности генерации от мощности накачки для зеркал с $R \sim 83\%$ и $\sim 89\%$ (рис.6, кривые 1 и 3) показывает, что использование менее добротного зеркала (с $R \sim 83\%$) приводило не только к увеличению порога генерации, но и к росту дифференциальной эффективности.

Элементы из Tm : YLF с различными L и C_{Tm} . Были проведены эксперименты с элементами из Tm : YLF с $C_{Tm} = 3\%$ и длиной 14.5 мм (элемент 1) и 16.5 мм (элемент 2), а также с $C_{Tm} = 3.5\%$ и длиной 14.5 мм (элемент 3). Как и в предыдущих опытах, активный элемент закреплялся в радиаторе, температура которого поддерживалась постоянной (около 15°C). Формирование пучка накачки производилось через телескоп 1. Коэффициент отражения выходного зеркала составлял 83%.

Лучшие результаты (по выходной мощности) были получены при использовании активного элемента 1 (рис.7, кривая 1). Максимальная дифференциальная эффективность 52% (погрешность измерений не более 0.5%) достигнута в схеме с элементом 3 (кривая 3), что на 2% больше, чем с элементами 1 или 2. Такое увеличение дифференциальной эффективности генерации можно объяснить ростом квантовой эффективности кросс-релаксационного заселения рабочего уровня $^3\text{H}_4$ иона Tm^{3+} с увеличением концентрации ионов активатора [11]. Однако порог генерации лазера с активными элементами 2 и 3 был выше, чем с элементом 1, и составлял ~ 14 Вт, по-

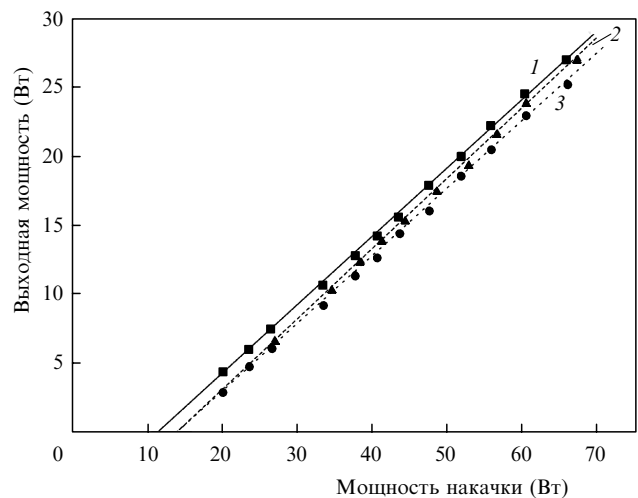


Рис.7. Зависимости выходной мощности лазера от мощности накачки в схеме с элементом 1 ($C_{Tm} = 3\%$, $L = 14.5$ мм) (1), элементом 2 ($C_{Tm} = 3\%$, $L = 16.5$ мм) (2) и элементом 3 ($C_{Tm} = 3.5\%$, $L = 14.5$ мм) (3).

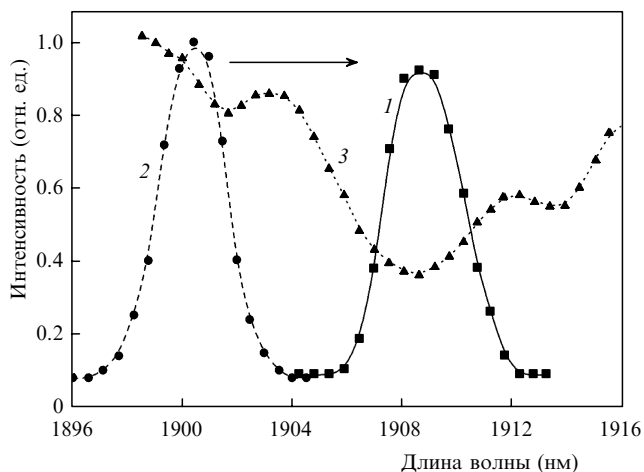


Рис.8. Спектр генерации Tm : YLF-лазера при выходной мощности 25 Вт.

этому общая эффективность преобразования мощности пучка накачки, падающего на кристалл, в мощность пучка генерации была наибольшей в схеме с активным элементом 1 и составляла ~41 %.

Спектр и пространственная структура лазерного пучка. Спектр генерации лазера исследовался с помощью монохроматора МДР2 и фоторезистора на основе структуры КРТ с постоянной времени $\sim 10^{-8}$ с. Спектральное разрешение монохроматора составляло ~ 0.5 нм. Выбранная ориентация кристалла Tm : YLF и поляризационная селективность зеркал резонатора обеспечили в стационарном режиме генерацию в σ -поляризации на длине волны ~ 1908 нм (рис.8). Аппроксимация измеренного спектра генерации непрерывной кривой имеет максимум на $\lambda = 1908.5 - 1908.8$ нм. Видно, что линия генерации хорошо согласуется с одним из максимумов поглощения в кристалле Ho : YAG (рис.8, кривая 3).

Следует отметить, что спектр генерации в момент её возникновения находился на длине волны ~ 1900 нм (кривая 2 на рис.8), а затем перестраивался на $\lambda_g \sim 1908$ нм (кривая 1). Это можно объяснить расщеплением нижнего уровня рабочего лазерного перехода активного элемента на девять штарковских подуровней. Первоначально генерация возникает на коротковолновом переходе, имеющем наибольшее сечение усиления. В процессе генерации с ростом температуры активной области происходит перераспределение населённости на нижних подуровнях, что приводит к уменьшению как инверсии населённости, так и коэффициента усиления коротковолнового перехода по сравнению с длинноволновым. Скорость перехода спектра излучения с 1900 на 1908 нм зависит от температуры и диаметра кристалла, а также от мощности накачки. При температуре кристалла 14 °С, диаметре 5 мм и мощности накачки 50 Вт характерное время установления стационарного спектра (на 1908 нм) составляло ~ 0.3 с.

Поворот активного элемента вокруг своей оси при сохранении параметров резонатора приводил к появлению генерации на длине волны ~ 1880 нм, что соответствует максимуму π -поляризации линии люминесценции Tm : YLF.

С помощью ИК камеры исследовалась пространственная структура пучка генерации Tm : YLF-лазера, приведенного на рис. 9. Параметр качества M^2 , характеризующий отношение расходимости лазерного пучка к дифракционной расходимости гауссова пучка, определялся

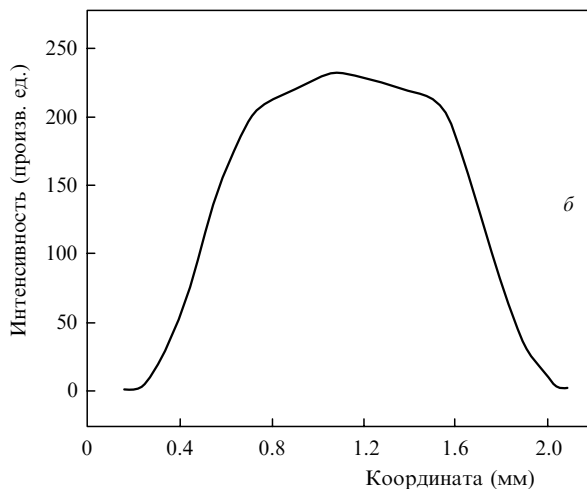
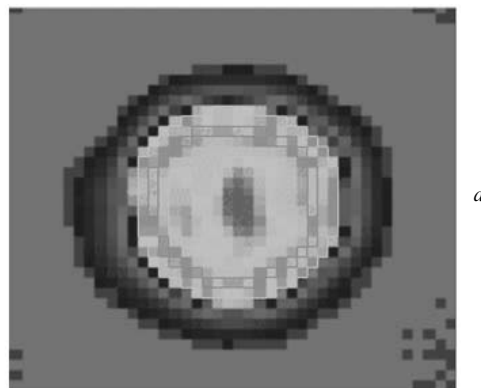


Рис.9. Снимок пучка генерации Tm : YLF-лазера, сделанный с помощью камеры «Ругосам» (а), и поперечное распределение его интенсивности (б).

согласно стандартной методике Международной организации по стандартизации [18]. Установлено, что при мощности генерации ~ 25 Вт (зеркало с $R = 83\%$) $M^2 \approx 2.5$; это показывает, что даже при максимальной мощности пучок генерации близок к одномодовому.

Динамика генерации Tm : YLF-лазера. Измерения временных характеристик генерации проводились фоторезистором на основе структуры КРТ, обнаружительная способность которого при комнатной температуре составляла $(3 - 10) \times 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Сигнал подавался на осциллограф LeCroy 62Xi с полосой пропускания 600 МГц. Во всех измерениях был зарегистрирован пиковый режим генерации с характерной длительностью импульсов 2 – 5 мкс и периодом 3 – 10 мкс, уменьшающимся при росте мощности генерации (рис. 10). Наличие незатухающих пульсаций в Tm : YLF-лазере объяснялось ранее насыщением поглощения паров воды на длине волны генерации [13]. Однако в нашем эксперименте уменьшение влажности воздуха от 30 % до $\sim 5\%$ (за счёт заполнения аргоном специально сконструированной лазерной кюветы) не привело к видимому изменению пиковой структуры. Скорее всего, пиковый режим связан с особенностями релаксационных колебаний в твердотельном лазере на кристалле с квазитрёхуровневой схемой генерации и большим временем жизни метастабильного уровня при наличии процессов кросс-релаксации и апконверсии [19, 20].

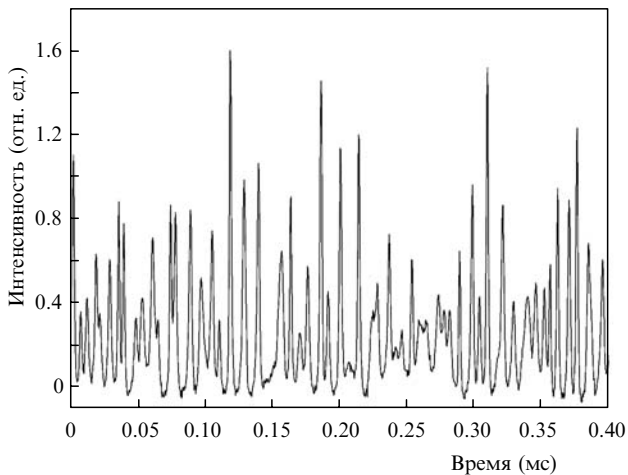


Рис.10. Динамика выходной мощности $Tm:YLF$ -лазера в схеме с элементом с $L = 14.5$ мм и $C_{Tm} = 3\%$ при выходной мощности 25 Вт.

4. Заключение

В работе исследованы лазеры на основе кристалла $Tm:YLF$ с диодной накачкой. Проведена оптимизация схемы накачки, длины кристалла и конфигурации лазерного резонатора. Достигнута мощность непрерывной генерации ~ 27 Вт при дифференциальной эффективности 50 % и параметре качества пучка $M^2 \sim 2.5$. Спектр генерации лазера в стационарном режиме, без какой-либо дополнительной селекции, находился в области 1908 нм и имел ширину ~ 4 нм. Высокая эффективность генерации лазера и компактность его оптической схемы позволяют считать, что он может быть использован в медицине, для обработки материалов, дистанционного мониторинга атмосферы и других научно-технических приложений.

1. Tag R., Steakley B.C., Hawley J.G., et al. *Appl. Opt.*, **35**, 7117 (1996).
2. Sudrsh V., Piper J.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 879 (2000).
3. Theisen D., Ott V., Bernd H.W., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt.*, **5142**, 96 (2003).
4. Ногинов М.А., Прохоров А.М., Саркисян Г.К., Смирнов В.А., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **18** (9), 1042 (1991).
5. Stoneman R.C., Esterovitz L. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **18**, 78 (1995).
6. Бородин Н.И., Крюков П.В., Попов А.В., Ушаков С.Н., Шестаков А.В. *Квантовая электроника*, **35** (6), 511 (2005).
7. Багаев С.Н., Ватник С.М., Майоров А.П., Павлюк А.А., Плакушев Д.В. *Квантовая электроника*, **30**, 310 (2000).
8. Mateos X., Petrov V., Liu J., Pujol M.C., et al. *IEEE J. Quantum Electron.*, **42** (10), 1008 (2006).
9. *Novel Materials and Laser Sources*, in *Techn. Dig. 2nd EPS-QEOD Europhoton Conf. on Solid-State and Fiber Coherent Light Sources* (Pisa, Italy, 2006).
10. Budni P.A., Lemos M.L., Mosto J.R., Chicklis E.P. *J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 629 (2000).
11. So S., Mackenzie J.I., Shepherd D.P., Clarkson W.A., Betterton J.G., Gorton E.K. *Appl. Phys. B*, **84**, 389 (2006).
12. Dergachev A., Wall K., Moulton P.F. *OSA TOPS, Adv. Sol.-State Lasers*, **68**, 343 (2002).
13. Schellhorn M., in *Techn. Dig. Top. Meet. '2007 Advanced Solid-State Photonics'* (Washington DC: OSA, 2008, paper WE33).
14. Walsh B.M., Barnes N.P., Di Bartolo B. *J. Appl. Phys.*, **83** (5), 2772 (1998).
15. Ryba-Romanowski W., Golab S., Sokolska I., Dominiak-Dzik G., Zawadzka J., Berkowski M., Fink-Finowicki J., Baba M. *Appl. Phys. B*, **68**, 199 (1999).
16. Свешникова Е.Б., Строганов А.А., Тимофеев Н.Т. *Оптика и спектроскопия*, **175**, 4 (1986).
17. Miyakawa T., Dexter D.L. *Phys. Rev. B*, **1** (7), 2961 (1970).
18. *Optics and Optical Instruments – Test Methods for Laser Beam Parameters: Beam Width, Divergence Angle and Beam Propagation Factor* (ISO/DIS 11 146:1999, 1999).
19. Cerny P., Valentine G.J., Burns D. *Electron. Lett.*, **40** (17), 1061 (2004).
20. Louchev O.A., Urata Y., Wada S. *Opt. Express*, **15** (7), 3940 (2007).