

Эффективный лазер на пластине из Nd:YVO₄ с боковой диодной накачкой в различных режимах генерации

А.П.Зиновьев, О.Л.Антипов, А.А.Новиков

Экспериментально исследован лазер на кристалле Nd:YVO₄ с боковой диодной накачкой и скользящим падением лазерного пучка на грань кристалла, через которую осуществляется накачка. При непрерывной накачке реализована лазерная генерация в различных режимах: непрерывном, пассивной и активной модуляции добротности, пассивной синхронизации мод. Оптимизированы параметры резонатора для достижения максимальной мощности (~17 Вт в непрерывном режиме) в пучке высокого качества ($M^2 \approx 1.3$).

Ключевые слова: лазерный кристалл Nd:YVO₄, диодная накачка, твердотельный лазер, непрерывная генерация, модуляция добротности, синхронизация мод.

1. Введение

Твердотельные лазеры на основе кристалла ортованадата иттрия, легированного ионами Nd³⁺ (Nd:YVO₄), с диодной накачкой в настоящее время интенсивно исследуются во всём мире в связи с широкими возможностями их применения [1–6]. Одним из основных достоинств этих лазеров является их высокая эффективность, которая достигается благодаря большим сечениям поглощения излучения накачки и большим сечениям вынужденного излучения в кристаллах Nd:YVO₄. В большинстве работ используется продольная накачка таких активных элементов, для которой требуются дорогостоящие диодно-лазерные линейки с волоконным выходом и/или сложные оптические системы формирования пространственной структуры пучка накачки в лазерном стержне.

Боковая накачка пластин из Nd:YVO₄ излучением диодных линеек дает возможность существенно упростить оптическую схему накачки и пространственно «развязать» каналы накачки и генерации. Лазеры на кристаллах Nd:YVO₄ с боковой диодной накачкой в последние годы активно исследуются несколькими научными группами из Канады, Англии и Германии [7–9]. Основной проблемой при создании таких лазеров остаётся необходимость пространственного сопряжения пучка лазерного излучения с областью усиления внутри активной среды.

Целью данной работы являлось исследование возможностей оптимизации параметров лазерного генератора на основе кристалла Nd:YVO₄ с диодной накачкой через боковую грань кристалла и скользящим падением лазерного пучка на эту грань с целью повышения эффективности генерации при высоком качестве пучка. Наряду с непрерывной генерацией исследованы режимы пассив-

ной и активной модуляции добротности, а также пассивной синхронизации мод.

2. Активный элемент и схема накачки

Активный элемент из кристалла Nd:YVO₄ (с атомной концентрацией ионов Nd³⁺, равной 1 %) имел форму параллелепипеда размером 20 × 5 × 2 мм, вырезанного в направлении кристаллографической оси *a* (оптическая ось *c* была направлена перпендикулярно грани параллелепипеда размером 20 × 5 мм). Для предотвращения паразитной генерации торцы пластины (грани размером 5 × 2 мм) были скошены под углом 5°.

Накачка кристалла Nd:YVO₄ проводилась излучением диодно-лазерной линейки (Coherent) с непрерывной мощностью до 50 Вт на длине волны ~807.5 нм, которая стабилизировалась и перестраивалась за счет управления температурой этой линейки. Пучок излучения лазерного диода фокусировался по вертикальной координате цилиндрической линзой с фокусным расстоянием ~12 мм внутрь пластины из Nd:YVO₄ вблизи грани размером 2 × 20 мм.

В кристалле Nd:YVO₄ (1 % Nd³⁺) рабочий лазерный переход между уровнями ⁴F_{3/2} и ⁴I_{1/2}, обеспечивающий генерацию на длине волны 1064 нм, обладает большим сечением вынужденного излучения (15.6 × 10⁻¹⁹ см²), а переход между уровнями ⁴F_{5/2} и ⁴I_{9/2} имеет большое сечение поглощения на длине волны накачки 807.5 нм (27 × 10⁻²⁰ см²) [10], что позволяет создавать на основе этого кристалла лазерные системы с дифференциальной эффективностью до 68 % [11]. Большой коэффициент поглощения накачки (~30 см⁻¹) приводит к формированию узкой области усиления внутри кристалла вблизи грани, через которую осуществляется накачка, что делает целесообразным применение схемы боковой накачки, в которой используется полное внутреннее отражение лазерного пучка от этой грани.

Резонатор лазера был образован двумя плоскими диэлектрическими зеркалами. Одно из них имело коэффициент отражения ~99.9 %, а коэффициент отражения другого, полупрозрачного, варьировался от 4 % до 40 %

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

Поступила в редакцию 3 июня 2008 г., после доработки – 2 октября 2008 г.

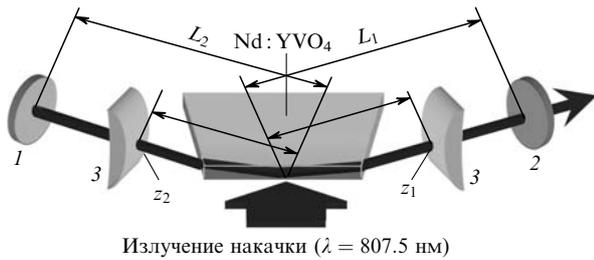


Рис.1. Схема непрерывного лазера на кристалле Nd:YVO₄ с боковой диодной накачкой:

1 – зеркало с коэффициентом отражения $\sim 99.9\%$; 2 – полупрозрачное выходное зеркало; 3 – цилиндрические линзы с фокусным расстоянием 50 мм.

(рис.1). Лазерный пучок фокусировался цилиндрическими линзами с фокусным расстоянием ~ 50 мм внутрь активной области вблизи грани, через которую осуществлялась накачка. Такая схема резонатора использовалась при реализации всех режимов: непрерывной генерации, модуляции добротности и синхронизации мод.

3. Непрерывная генерация

Для достижения максимальной мощности непрерывной генерации оптимизировались различные параметры лазера: положение лазерного диода и линзы, фокусирующей его излучение, температуры лазерного диода и лазерного кристалла, угол падения лазерного пучка на кристалл, положение цилиндрических линз внутри резонатора, коэффициент отражения выходного зеркала.

Было установлено, что угол падения лазерного пучка на активный элемент играет существенную роль. От него зависит величина оптического усиления в активной среде (рис.2). Оптимальный угол падения определяется параметрами кристалла (его линейными размерами, углом скоса торцов, температурой), а также мощностью и положением пучка накачки внутри активного элемента. Экспериментальное исследование зависимости выходной мощности лазера от угла падения лазерного пучка на пластину из Nd:YVO₄ показало, что оптимальный угол (относительно грани, через которую осуществляется накачка) составил $\sim 22.7^\circ$ (при длине области накачки $L \approx 1.5$ см, температуре кристалла $\sim 13^\circ\text{C}$ и мощности накачки ~ 31 Вт).

Заметное влияние на параметры генерации оказывало положение цилиндрических линз, фокусирующих лазерный пучок в кристалл (рис.3). Эти линзы формируют

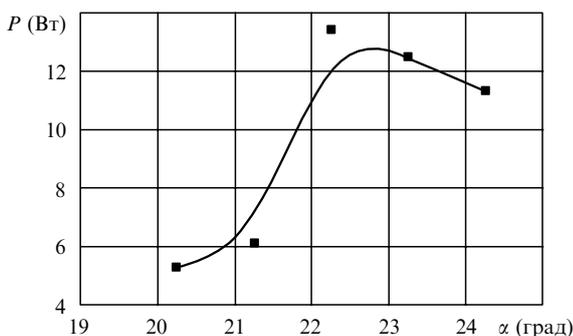


Рис.2. Зависимость выходной мощности лазера P от угла α выхода лазерного пучка относительно грани, через которую осуществляется накачка, при длине области накачки 1.5 см.

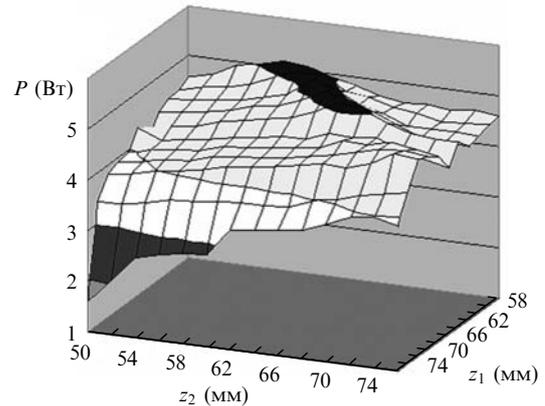


Рис.3. Зависимость выходной мощности лазера P от положения цилиндрических линз относительно активного элемента (координаты z_1 и z_2 отсчитываются от середины грани активного элемента).

перетяжку усиливаемого пучка в активном элементе, и их оптимальное расположение позволяет достичь максимального съёма запасённой инверсии населённости рабочего лазерного перехода.

Одним из основных параметров резонатора, влияющим на выходную мощность, является коэффициент отражения выходного зеркала. В работе использовался набор диэлектрических зеркал с коэффициентами отражения $R = 4\%, 9\%, 19\%, 24\%, 31\%, 36\%$ и 40% (выходная поверхность зеркала была просветлена на длину волны 1064 ± 20 нм). Наибольшая выходная мощность получена при использовании зеркал с $R = 9\%$. Порог генерации в этом случае больше, чем для зеркал с большим коэффициентом отражения, но дифференциальная эффективность также возросла, что позволило увеличить выходную мощность до ~ 17 Вт при эффективности преобразования оптической энергии накачки в энергию выходного излучения до $\sim 43.5\%$ (рис.4).

Следует отметить, что генерация наблюдалась и в отсутствие выходного зеркала ($R = 0$). В этом случае из-за большого коэффициента усиления активной среды необходимо устранить паразитной обратной связи, возникающей за счёт рассеяния излучения на элементах лазера. Этого можно достичь, если обеспечить отсутствие оптических элементов на трассе пучка и/или использовать изолятор Фарадея. Однако эксперименты показали, что такие меры не способны предотвратить генерацию, а возникновение генерации с хорошим качеством пучка и

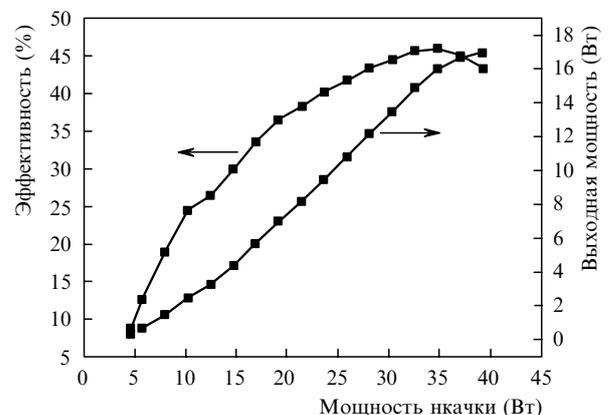


Рис.4. Зависимости выходной мощности и эффективности преобразования излучения накачки в лазерное излучение от мощности накачки при коэффициенте отражения выходного зеркала $\sim 9\%$.

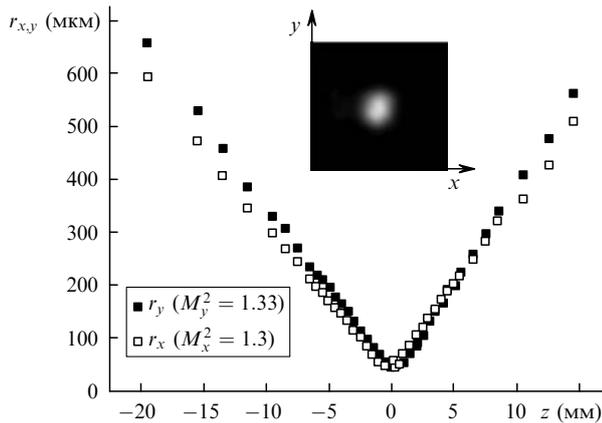


Рис.5. Экспериментально измеренные радиусы каустики пучка (в области фокальной перетяжки линзы с фокусным расстоянием 15 см) в плоскости падения лазерного пучка на грань кристалла (r_x) и в ортогональной плоскости (r_y) при мощности выходного излучения 6 Вт, используемые для вычисления параметра M^2 . Ось z совпадает с осью пучка. Радиус каустики минимален при $z = 0$. На вставке – фотография измеряемого фокального пятна лазерного пучка.

высокой эффективностью можно объяснить образованием динамической решётки в активной среде, индуцируемой интерференционным полем встречных световых волн и обеспечивающей положительную обратную связь в системе. Возможность такого рода «самостартующей» генерации ранее обсуждалась в работах, посвящённых исследованию лазерных систем с резонатором петлевого типа [12–14].

Исследование генерации при различных параметрах резонатора показало высокую стабильность выходной мощности с уровнем флуктуаций менее 3%. Спектр генерации содержал набор продольных мод, число которых зависело от превышения мощностью накачки порога. При всех мощностях накачки в резонаторе с несимметричными плечами ($L_1 \neq L_2$) пространственная структура пучка соответствовала структуре основной поперечной моды (параметр качества пучка M^2 , измеренный методом щели в соответствии с международным стандартом ISO 11146 [15], составил 1.3) (рис.5).

4. Генерация в режиме модуляции добротности

4.1. Активная модуляция добротности

Для осуществления режима активной модуляции добротности применялся акустооптический модулятор на основе кварцевого элемента, который помещался в левое (рис.1) плечо резонатора (плечо с глухим зеркалом). Для повышения пиковой мощности и уменьшения длительности импульса в качестве выходного зеркала использовалось зеркало с коэффициентом отражения 40%. В этом случае средняя мощность импульсно-периодического излучения составила 16.9 Вт при мощности диодной накачки ~ 42 Вт. Импульсы генерации имели длительность ~ 10 нс при частоте следования ~ 10 кГц. С ростом частоты следования (до 100 кГц) длительность импульсов увеличивалась (до 15 нс). Нестабильность амплитуды импульсов генерации не превышала 10% (рис.6).

4.2. Пассивная модуляция добротности

Для реализации режима пассивной модуляции добротности использовался насыщающийся поглотитель в

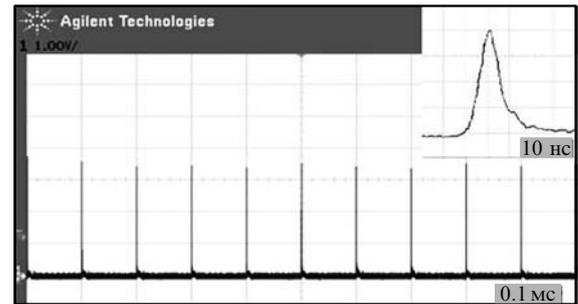


Рис.6. Осциллограммы импульсов генерации в режиме активной модуляции добротности.

виде элемента из кристалла LiF:F₂⁻ диаметром 1 см и длиной 4 см со следующими характеристиками: сечение поглощения 1.7×10^{-17} см² на длине волны 1064 нм, время релаксации 90 нс [16].

Параметры резонатора, собранного по схеме рис.1, были таковы: $L_1 = 10.5$ см, $L_2 = 15$ см, $R = 90\%$. В плечо с глухим зеркалом на расстоянии 11 см от активного элемента помещался насыщающийся поглотитель (начальный коэффициент пропускания $\sim 33\%$). При использовании этого резонатора были получены импульсы с длительностью ~ 20 нс и пиковой мощностью ~ 400 Вт при частоте следования ~ 120 кГц (рис.7).

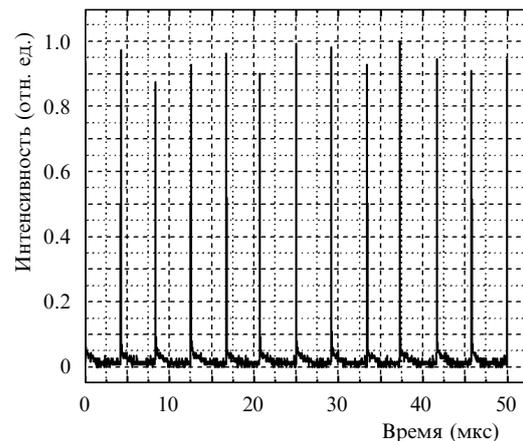


Рис.7. Осциллограмма последовательности импульсов генерации в режиме модуляции добротности при использовании высокодобротного резонатора.

5. Режим синхронизации мод

В известных нам работах для реализации пассивной синхронизации мод в лазерах на кристалле Nd:YVO₄ применялись полупроводниковые насыщающиеся зеркала SESAM [17–19]. В настоящей работе использовался органический насыщающийся поглотитель (полиметиновый краситель № 4965-и в полиуретановой матрице [20]), помещённый между двумя стеклянными пластинками, со следующими характеристиками: сечение поглощения 8.6×10^{-16} см² на длине волны 1064 нм, время релаксации 20 ± 2 пс [20]. Параметры резонатора лазера, собранного по схеме рис.1, были таковы: $L_1 = 55$ см, $L_2 = 49$ см. Удлинение резонатора позволило увеличить период следования выходных импульсов, что упростило их регистрацию. Коэффициент отражения выходного зеркала был увеличен до 90%. Это позволило стабили-

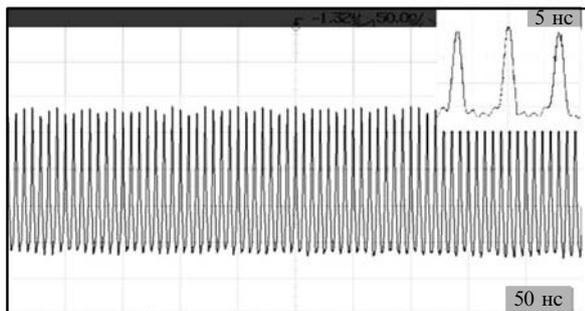


Рис.8. Оциллограммы импульсов генерации в режиме пассивной синхронизации мод при коэффициенте отражения выходного зеркала 90 %.

зировать амплитуду импульсов, изменение которой не превышало 5 % (рис.8). Измеренный период следования импульсов соответствовал теоретической оценке $T_{\text{theor}} = 2L/c \approx 6.9$ нс.

Длительность импульсов генерации, измеренная корреляционными методом (с использованием генерации второй гармоники в пластине из LiIO_3 [21]), составила $\sim 10 - 20$ пс. Средняя мощность генерации достигала 0.5 Вт (рис.9).

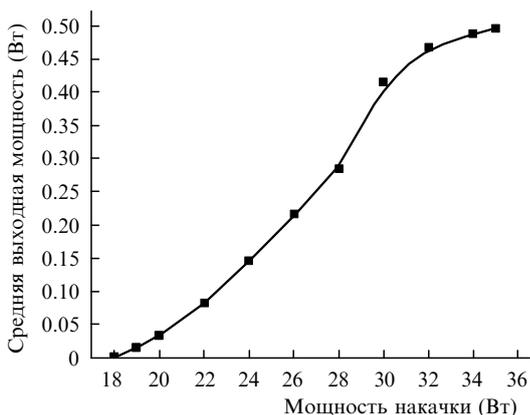


Рис.9. Зависимость средней выходной мощности лазера с пассивной синхронизацией мод от мощности накачки при коэффициенте отражения выходного зеркала 90 %.

6. Заключение

В настоящей работе исследованы различные режимы генерации твердотельного лазера на пластине из кристалла $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ с боковой диодной накачкой: непрерывный режим, режимы активной и пассивной модуляции добротности, а также пассивной синхронизации мод. Исследована зависимость характеристик генерации от параметров резонатора. В результате оптимизации параметров лазера достигнут высокий коэффициент преобразования оптической энергии накачки в энергию лазерного излучения – в режиме непрерывной генерации он был близок к 50 %.

В режиме активной модуляции добротности были получены импульсы длительностью 10–15 нс с частотами

следования 10–100 кГц, а в режиме пассивной модуляции – импульсы длительностью ~ 20 нс при частоте следования ~ 120 кГц. Впервые для $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ -лазеров с диодной накачкой реализована пассивная синхронизация мод за счёт использования красителя в полимерной матрице.

Таким образом, была продемонстрирована возможность создания компактных твердотельных лазерных систем за счёт использования боковой диодной накачки в схеме со скользящим падением лазерного пучка, способных работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме при высокой эффективности использования накачки. Такие лазерные системы могут найти широкое применение.

Работа частично поддержана РФФИ (гранты № 08-02-99050-р_офи и 07-02-92184-НЦНИ_а), программой ОФН РАН «Нелинейная оптика уникальных лазерных систем» и грантом Президента РФ государственной поддержки ведущих научных школ РФ № НШ-808.2008.2 и НШ-1244.2008.2.

1. Shen D., Liu A., Song Y., Ueda K. *Appl. Opt.*, **37**, 5727 (1998).
2. Li Cheng, Song Jie, Shen Deyuan, Xu Jianqiu, Ueda Ken-ichi. *Opt. Commun.*, **186**, 245 (2000).
3. Сычугов В.А., Михайлов В.А., Кондратьев В.А., Линдин Н.М., Фрам Ю., Загуменный А.И., Заварцев Ю.Д., Студеникин П.А. *Квантовая электроника*, **30** (1), 13 (2000).
4. McDonagh L., Wallenstein R., Knappe R. *Opt. Lett.*, **31** (22), 3303 (2006).
5. Рябцев Г.И., Богданович М.В., Енжиевский А.И., Буров Л.И., Рябцев А.Г., Щемелев М.А., Пожидаев А.В., Матросов В.Н., Машко В.В., Тепляшин Л.Л., Чумаков А.Н. *Квантовая электроника*, **36** (10), 925 (2006).
6. Гарнов С.В., Михайлов В.А., Серов Р.В., Смирнов В.А., Цветков В.Б., Щербаков И.А. *Квантовая электроника*, **37** (10), 910 (2007).
7. Bernard J.E., Alcock A.J. *Opt. Lett.*, **18** (12), 968 (1993).
8. Damzen M.J., Trew M., Rosas E., Crofts G.J. *Opt. Commun.*, **196**, 237 (2001).
9. Zimer H., Albers K., Wittrok U. *Opt. Lett.*, **29** (23), 2761 (2004).
10. Koechner W. *Solid-State Laser Engineering* (Berlin – Heidelberg – New York: Springer-Verlag, 1999).
11. Minassian A., Thompson B., Damzen M.J. *Appl. Phys. B*, **76**, 341 (2003).
12. Eremykin O.N., Antipov O.L., Minassian A., Damzen M.J. *Opt. Lett.*, **29** (20), 2390 (2004).
13. Zinoviev A.P., Antipov O.L., Vorobiev V.A., Kuzhelev A.S. *Opt. Commun.*, **152** (4), 313 (1998).
14. Zinoviev A.P., Antipov O.L., Vorobiev V.A., Kuzhelev A.S., Chaousov D.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **37** (5), 716 (2001).
15. *Optics and Optical Instruments – Test Methods for Laser Beam Parameters: Beam Width, Divergence Angle and Beam Propagation Factor* (ISO/DIS 11146:1999, 1999).
16. Басиев Т.Т., Зверев П.Г., Папашвили А.Г., Фёдоров В.В. *Квантовая электроника*, **24** (7), 591 (1997).
17. Blandin P., Druon F., Balembois F., Georges P., Leveque-Fort S., Fontaine-Aupart M.P. *Opt. Lett.*, **31** (2), 214 (2006).
18. Farrell D.J., Damzen M.J. *Opt. Express*, **15** (8), 4781 (2007).
19. Grignon R. et al. *Ultrafast Processes in Spectroscopy* (New York: Plenum Press, 1996).
20. Безродный В.И., Ищенко А.А., Карабанова Л.В., Сломинский Ю.Л. *Квантовая электроника*, **22** (8), 849 (1995).
21. Котюк А.Ф. *Измерение энергетических параметров и характеристик лазерного излучения* (М.: Радио и связь, 1981).