

# Структура пучка генерации лазера на пластине Nd:YVO<sub>4</sub> с боковой диодной накачкой\*

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

*Исследована пространственная структура пучка излучения лазера на основе пластины Nd:YVO<sub>4</sub> с боковой диодной накачкой и полным внутренним отражением волны генерации от границы накачиваемой области. Обнаружена закономерность изменения модовой структуры при изменении параметров резонатора в непрерывном режиме генерации и в режиме активной модуляции добротности. Найдены значения параметров, позволяющие улучшить качество пучка генерации при сохранении высокой выходной мощности лазера.*

**Ключевые слова:** лазерный кристалл Nd:YVO<sub>4</sub>, диодная накачка, твердотельный лазер, пространственная структура пучка генерации.

## 1. Введение

Кристалл Nd:YVO<sub>4</sub> выделяется среди твердотельных активных сред высокими сечениями поглощения накачки и усиления на лазерном переходе. Такие свойства позволяют создавать на основе данного кристалла высокоэффективные лазерные системы (с высоким КПД использования накачки). Для лазеров на Nd:YVO<sub>4</sub> применяют две принципиально разные схемы: продольную накачку стержней и поперечную накачку пластин, которые используются, как правило, для элементов с низким и высоким легированием ионами Nd<sup>3+</sup> соответственно. При продольной накачке лазерных стержней требуется создание системы развязки излучения накачки и генерации. Применение же поперечной накачки способствует получению более простой и компактной схемы за счет меньшего количества используемых оптических элементов.

Лазеры на пластине Nd:YVO<sub>4</sub> с боковой диодной накачкой позволяют получить генерацию в различных режимах: непрерывном, модуляции добротности и синхронизации мод [1], однако возникающая во всех этих случаях проблема модовой структуры генерации до настоящего времени всерьез не рассматривалась.

Специфическая геометрия резонатора в лазере на основе пластины Nd:YVO<sub>4</sub> с поперечной диодной накачкой создаёт условия формирования необычных пространственных мод генерации (отличных от мод осесимметричного резонатора). Целью настоящей работы является исследование модовой структуры лазера на основе пластины Nd:YVO<sub>4</sub> с поперечной диодной накачкой (при полном внутреннем отражении пучка генерации

от накачиваемой грани) и определение условий генерации пучка излучения высокого качества.

## 2. Схема экспериментальной установки

Активный элемент из кристалла Nd:YVO<sub>4</sub> (с атомной концентрацией ионов Nd<sup>3+</sup>, равной 1%) имел форму параллелепипеда с размерами 20 × 5 × 2 мм, вырезанного в направлении кристаллографической оси *a* (оптическая ось *c* была направлена перпендикулярно плоскости 20 × 5 мм). Для предотвращения паразитной генерации торцы пластины (поверхности 5 × 2 мм) были скошены под углом 5°.

Накачка кристалла Nd:YVO<sub>4</sub> проводилась излучением линейки лазерных диодов (Coherent) на длине волны 807.5 нм (стабилизируемой и перестраиваемой путём изменения температуры) с непрерывной мощностью до 50 Вт. Пучок излучения линейки фокусировался по вертикальной координате цилиндрической линзой с фокусным расстоянием ~ 12 мм внутрь пластины Nd:YVO<sub>4</sub> вблизи грани 2 × 20 мм.

Рабочий лазерный переход между уровнями <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub> и <sup>4</sup>I<sub>1/2</sub>, обеспечивающий генерацию на длине волны 1064 нм (при указанной концентрации Nd<sup>3+</sup>), в Nd:YVO<sub>4</sub> имеет сечение усиления 15.6 × 10<sup>-19</sup> см<sup>2</sup>, а переход между уровнями <sup>4</sup>F<sub>5/2</sub> и <sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> имеет сечение поглощения 27 × 10<sup>-20</sup> см<sup>2</sup> [2]. Высокий коэффициент поглощения накачки (~ 30 см<sup>-1</sup>) приводит к формированию узкой области усиления внутри кристалла вдоль накачиваемой поверхности.

Резонатор лазера формировался двумя плоскими диэлектрическими зеркалами: первое – глухое с коэффициентом отражения  $R \approx 99.9\%$ , второе – полупрозрачное с коэффициентом отражения  $R \approx 24\%$  (рис. 1). Пучок генерации фокусировался цилиндрическими линзами с фокусным расстоянием ~ 50 мм внутрь активной области вблизи поверхности, через которую осуществлялась накачка.

Исследовалась зависимость поперечной структуры пучка генерации от мощности накачки и параметров резонатора: длин плеч, положения коллимирующих линз и угла падения пучка генерации на накачиваемую грань

\*Доложена на конференции «Оптика лазеров 2008», С.-Петербург, Россия.

А.А.Новиков, А.П.Зиновьев, О.Л.Антипов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: A.A.Novikov@gmail.com

Поступила в редакцию 2 февраля 2009 г., после доработки – 6 мая 2009 г.

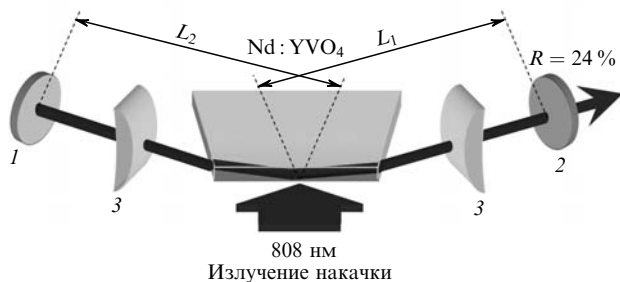


Рис.1. Схема непрерывного лазера на кристалле Nd:YVO<sub>4</sub> с боковой диодной накачкой:

1 – зеркало с коэффициентом отражения  $R > 99.9\%$ ; 2 – полупрозрачное выходное зеркало; 3 – цилиндрические линзы ( $F = 50$  мм).

активного элемента. В результате проведенной оптимизации была найдена область параметров, позволяющая получить в данной схеме пучок высокого качества при высокой эффективности преобразования оптической энергии накачки в излучение генерации.

### 3. Обсуждение результатов

При создании лазерных систем с поперечной накачкой активных элементов с высоким содержанием Nd<sup>3+</sup> необходимо учитывать, что благодаря большому сечению поглощения накачиваемая область является достаточно узкой, «прижатой» к поверхности, через которую распространяется накачка. Поэтому при таком методе накачки представляются перспективными схемы со скольльзящим падением пучка генерации при его полном внутреннем отражении от накачиваемой грани, что обеспечивает максимально эффективный съём инверсии населенности [3–5]. Так, в [6] была продемонстрирована возможность создания лазера на Nd:YVO<sub>4</sub> с предельно высокой эффективностью преобразования мощности накачки в генерацию (до 68%). Однако такая высокая эффективность достигается при относительно низком качестве пучка генерации. Проблема качества пучка генерации обусловлена достаточно широкой усиливающей областью в пластине Nd:YVO<sub>4</sub>, что способствует генерации поперечных мод высокого порядка.

Ранее [1] было обнаружено существенное влияние угла падения пучка генерации на активный элемент на качество пучка генерации и эффективность преобразования излучения накачки в излучение генерации. Угол падения определяет длину усиления и поперечный размер усиливаемой моды и, следовательно, величину оптического усиления в активной среде и дифракционных потерь пучка генерации. Результаты экспериментальных исследований зависимости выходной мощности лазера от угла падения пучка генерации на пластину Nd:YVO<sub>4</sub> [1] позволили установить, что оптимальный с точки зрения высокого качества пучка при высокой эффективности преобразования угол падения составляет  $\sim 22.7^\circ$  (при длине области накачки  $L \approx 1.5$  см, температуре кристалла  $\sim 13^\circ\text{C}$  и мощности накачки  $\sim 19$  Вт). Дальнейшие исследования проводились при данном значении угла падения.

При работе с резонатором с параметрами  $L_1 = 13$  см и  $L_2 = 20$  см наблюдалась зависимость поперечной структуры пучка от мощности накачки. При низких мощностях накачки пучок генерации представлял собой моду TEM<sub>00</sub>, с ростом мощности накачки генерация возникала

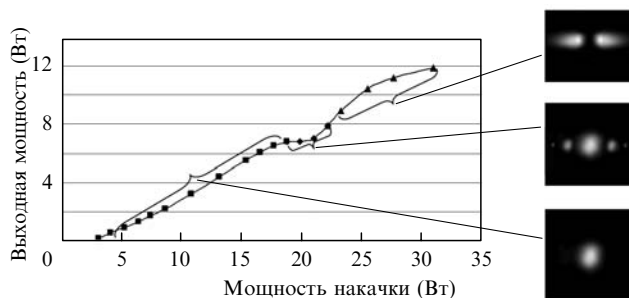


Рис.2. Зависимость выходной мощности и структуры пучка от мощности накачки для резонатора с длинами плеч  $L_1 = 13$  см и  $L_2 = 20$  см.

на более высоких поперечных модах, а при мощности накачки свыше 30 Вт мощность многомодовой генерации снижалась за счет локального увеличения температуры активной среды (рис.2). Оптимальным для получения пучка высокого качества (в условиях ограничения по отводимой от кристалла мощности выделяемого тепла) являлся диапазон мощности накачки 15–19 Вт.

Изменение вертикальной моды пучка достигалось варьированием положения коллимирующих линз относительно кристалла. Лазерная схема располагалась в горизонтальной плоскости. Область накачки также имела большие длину и ширину, чем высоту. Вертикальный размер пучка генерации в кристалле возрастал при увеличении расстояния между цилиндрическими линзами и кристаллом, что уменьшало область перекрытия пучка с областью инверсии, при этом, однако, уменьшались и дифракционные потери для мод с большим вертикальным индексом. При варьировании положения коллимирующих линз была получена генерация мод TE<sub>11</sub> и TE<sub>22</sub> при мощностях накачки 24–26 Вт (рис.3,а) и 20–23 Вт (рис.3,б) соответственно.

Для реализации режима активной модуляции добротности акустооптический модулятор (АОМ) вводился в плечо резонатора со 100%-ным зеркалом. Уменьшение средней мощности при введении АОМ составляло не более 2%. Длительность получаемых импульсов при частоте 100 кГц и накачке 15–20 Вт составила 10 нс.

Был исследован также лазер с удлиненным выходным плечом резонатора, что упростило введение АОМ в схему [6]. В результате оптимизации мощности генерации в основной моде были выбраны длины плеч  $L_1 = 41$  см,  $L_2 = 22$  см, а также коэффициент отражения выходного зеркала  $R = 19\%$ . Для такой схемы резонатора зависимость поперечной структуры пучка генерации от мощности накачки отличалась от описанной выше: в диапазонах мощности накачки 17.7–24.5 и 35.4–40 Вт не менее

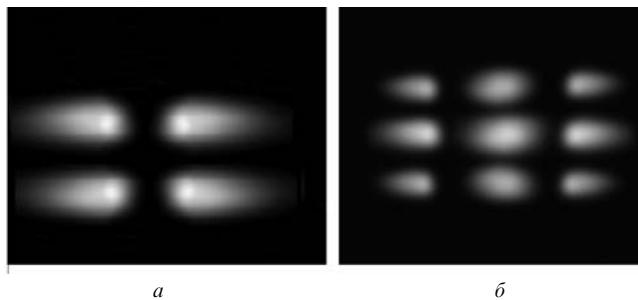


Рис.3. Структуры пучков генерации с ненулевыми вертикальными индексами, полученных при варьировании положения коллимирующих линз.

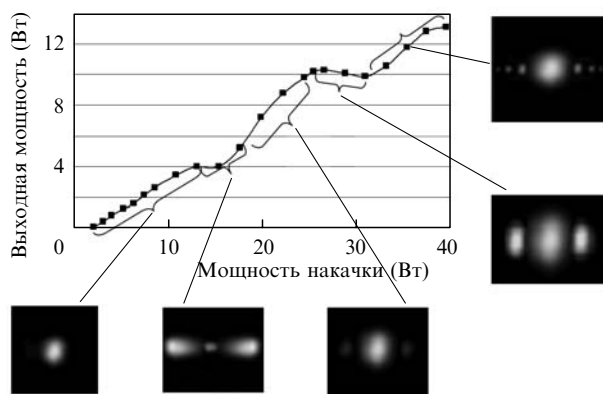


Рис.4. Зависимость выходной мощности и структуры пучка от мощности накачки для резонатора с длинами плеч  $L_1 = 41$  см и  $L_2 = 22$  см.

94 % мощности генерации содержалось в  $TEM_{00}$ -моде (рис.4). Максимальная мощность пучка высокого качества (13.1 Вт) получена при мощности накачки 39.5 Вт (эффективность использования накачки 33 %). Максимальная эффективность преобразования мощности накачки в излучение генерации при высоком качестве пучка достигалась при накачке  $\sim 25.5$  Вт и составила 40 % при выходной мощности  $\sim 10.2$  Вт.

В зависимости выходной мощности генерации от мощности накачки имеются провалы: один для первого описанного резонатора (при мощности накачки 19–24 Вт) и два для второго резонатора (при мощностях накачки 13–17 и 26.6–33 Вт) (см. рис.2 и 4). Этим провалам на мощностной характеристике соответствовало ухудшение качества пучка генерации. Такую сильно нелинейную зависимость мощности и изменение качества пучка можно объяснить сменой устойчивости резонатора при перестройке наводимой тепловой линзы [4]. Следует отметить, что высокое качество пучка удаётся получить при мощности накачки (и выходной мощности генерации), большей, чем мощность накачки при генерации пучка плохого качества в области провала.

Режим активной модуляции добротности исследовался и при введении АОМ в выходное плечо. В режиме модуляции добротности при частоте повторения импульсов 100 кГц снижение средней мощности генерации составило не более 2 % от мощности в непрерывном режиме, длительность импульсов равнялась 10 нс. При оптимальной настройке АОМ качество пучка генерации не изменялось по сравнению с непрерывным режимом.

#### 4. Заключение

Таким образом, исследована зависимость пространственной структуры пучка генерации лазера на кристалле Nd:YVO<sub>4</sub> с боковой диодной накачкой от параметров системы: длин плеч резонатора, положения коллимирующих линз, угла падения пучка генерации на активный элемент, мощности накачки. Найдены области параметров, позволяющие увеличить выходную мощность лазера при сохранении высокого качества пучка как в режиме непрерывной генерации, так и в режиме активной модуляции добротности. В пучке высокого качества максимальная мощность достигала 13 Вт (при эффективности преобразования накачки в генерацию 33 %), а максимальная эффективность ( $\sim 40$  %) была получена при мощности генерации 10.2 Вт.

Работа частично поддержана РФФИ (гранты № 07-02-92184-НЦНИ\_а и 08-02-99050-р\_офи) и программой ОФН РАН «Нелинейно-оптические методы и материалы для создания лазерных систем нового поколения».

1. Зиновьев А.П., Антипов О.Л., Новиков А.А. *Квантовая электроника*, **39** (4), 309 (2009).
2. Koechner W. *Solid-State Laser Engineering* (Berlin-Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1999).
3. Bernard J.E., Alcock A.J. *Opt. Lett.*, **18** (12), 968 (1993).
4. Damzen M.J., Trew M., Rosas E. *Crofts Opt. Commun.*, **196**, 237 (2001).
5. Zimer H., Albers K., Wittrok U. *Opt. Lett.*, **29** (23), 2761 (2004).
6. Minassian A., Thompson B., Damzen M.J. *Appl. Phys. B*, **76**, 341 (2003).