

# Параметры выходного пучка $YVO_4/Nd:YVO_4$ -лазера с продольной диодной накачкой

Г.И.Рябцев, М.В.Богданович, А.И.Енжиевский, Л.И.Буров, А.Г.Рябцев, М.А.Щемелев, А.В.Пожидаев, В.Н.Матросов, В.В.Машко, Л.Л.Тепляшин, А.Н.Чумаков

*Исследованы мощностные и пространственные характеристики излучения лазера на основе композитного кристалла  $YVO_4/Nd:YVO_4$  с продольной диодной накачкой. Показано, что применение композитного кристалла позволяет увеличить дифференциальный внешний квантовый выход генерируемого излучения с 36 % до 41 % и уменьшить параметр качества  $M^2$  выходного пучка с 2 до 1.5 по сравнению со случаем использования активного элемента  $Nd:YVO_4$ .*

**Ключевые слова:** параметр качества пучка, наведенная линза, композитный кристалл  $YVO_4/Nd:YVO_4$ , продольная диодная накачка.

## 1. Введение

Мощные твердотельные лазеры с продольной диодной накачкой (ЛПДН) характеризуются высокой эффективностью, компактностью и простотой конструкции [1, 2]. В литературе проблеме улучшения выходных энергетических характеристик ЛПДН уделяется большое внимание [3]. Однако для многих прикладных задач важны и пространственные свойства генерируемого излучения, такие, например, как параметр качества выходного пучка  $M^2$  [4]. При высоких уровнях мощности генерации  $P_{out}$  распределение показателя преломления по объему активного элемента (АЭ) становится неоднородным, торцы АЭ деформируются и возникает наведенное двулучепреломление [5]. Для уменьшения воздействия данных факторов на характеристики ЛПДН предлагается использовать композитные активные элементы (КАЭ), состоящие из активированной и неактивированной областей [6, 7]. Авторы [7] выдвинули предположение о том, что неактивированная часть КАЭ позволяет существенно уменьшить оптическую силу  $D$  линзы, наведенной в активном элементе, и при прочих равных условиях получить в 1.5 раза большие значения  $P_{out}$ .

Настоящая работа посвящена исследованию параметра  $M^2$  выходного пучка ЛПДН на основе композитного активного элемента  $YVO_4/Nd:YVO_4$  в зависимости от мощности накачки и изучению механизма влияния неактивированной (пассивной) области КАЭ на характеристики генерации ЛПДН.

Г.И.Рябцев, М.В.Богданович, А.И.Енжиевский. Институт физики им. Б.И.Степанова НАНБ, Белоруссия, 220072 Минск, просп. Независимости, 68; e-mail: ryabtsev@dragon.bas-net.by

Л.И.Буров, А.Г.Рябцев, М.А.Щемелев, А.В.Пожидаев. Белорусский государственный университет, Белоруссия, 220030 Минск, просп. Независимости, 4

В.Н.Матросов. НП ООО «Соликс», Белоруссия, 220107 Минск, Партизанский просп., 77

В.В.Машко, Л.Л.Тепляшин, А.Н.Чумаков. Институт молекулярной и атомной физики НАНБ, Белоруссия, 220072 Минск, просп. Независимости, 70

Поступила в редакцию 27 июня 2006 г.

## 2. Методика эксперимента

Схема лазера с мощной продольной диодной накачкой изображена на рис.1. В качестве АЭ использовались кристаллы ортованадата иттрия, активированные  $Nd^{3+}$  (НП ООО «Соликс»). Экспериментально изучались АЭ двух типов: с равномерным ( $Nd:YVO_4$ ) и неравномерным (композитный кристалл  $YVO_4/Nd:YVO_4$ ) распределением активаторных ионов. Атомная концентрация неодима в  $Nd:YVO_4$  составляла 0.4 %. Активный элемент  $Nd:YVO_4$  представлял собой параллелепипед длиной 8 мм. Длина кристалла  $YVO_4/Nd:YVO_4$  составляла 10 мм, из них 2 мм приходилось на пассивную часть ( $YVO_4$ ) и 8 мм – на активированную область  $Nd:YVO_4$  с атомной концентрацией ионов неодима 0.5 %. Оба кристалла вырезались вдоль оси  $a$  и имели поперечное сечение в виде квадрата со стороной 3–4 мм. На торцы кристаллов наносились просветляющие покрытия для длин волн излучения накачки (808 нм) и генерации (1064 нм).

Кристалл  $YVO_4/Nd:YVO_4$  выращивался в виде цельного активного элемента. Такой АЭ, в отличие от традиционных композитных кристаллов, изготавливаемых методами термодиффузии или склейки, не содержит границ сварки, которые приносят в резонатор дополнительные оптические потери и являются источниками зарождения трещин при больших световых нагрузках. Кри-

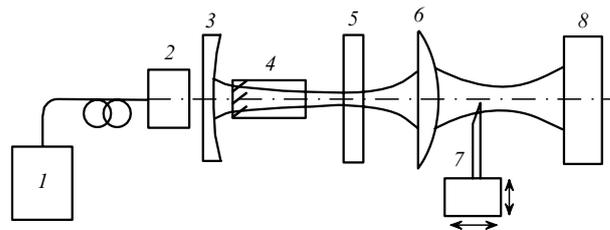


Рис.1. Оптическая схема лазера с продольной диодной накачкой: 1 – диодная сборка с волоконным выводом излучения (30 Вт, 808 нм); 2 – фокусирующая система блока накачки; 3 – глухое зеркало; 4 – активный элемент на основе кристалла  $Nd:YVO_4$  или  $YVO_4/Nd:YVO_4$ ; 5 – выходное зеркало; 6 – линза; 7 – острый край ножа; 8 – измеритель мощности излучения.

сталл  $YVO_4/Nd:YVO_4$  был ориентирован в резонаторе ЛПДН пассивной областью в сторону глухого зеркала.

Исследуемый АЭ закреплялся в медном блоке с водяным охлаждением. Для обеспечения хорошего теплового контакта с блоком охлаждения кристалл был обернут в индиевую фольгу. В системе накачки использовалась лазерная диодная сборка LIMO HLU32F400 с выводом излучения через световод с диаметром сердцевины 400 мкм. Максимальная выходная мощность излучения диодной сборки составляла 30 Вт. На выходе световода устанавливалась оптическая система с фокусным расстоянием 15 мм, фокусирующая пучок накачки в пятно диаметром  $\sim 500$  мкм.

Резонатор лазера формировался глухим и выходным зеркалами. В качестве глухого зеркала использовалось сферическое зеркало с радиусом кривизны 500 мм, высоким коэффициентом отражения для длины волны излучения 1.06 мкм и высоким коэффициентом пропускания ( $\sim 99\%$ ) для длины волны излучения накачки 808 нм. Выходным зеркалом служило плоское зеркало с коэффициентом отражения 90% на длине волны генерации. Длина резонатора варьировалась в пределах 0.2–0.5 м.

Значения  $M^2$  в нашей работе определялись методом, основывающимся на гиперболической аппроксимации зависимости диаметров поперечных сечений лазерного пучка от расстояния вдоль оси резонатора в окрестности перетяжки, формируемой фокусирующей линзой [8]. Линза с фокусным расстоянием 130 мм устанавливалась за выходным зеркалом резонатора (рис.1). Диаметры поперечных сечений выходного пучка измерялись методом «движущегося острого края ножа» [9]. Точность перемещения острого края ножа составляла 1 мм вдоль оси распространения лазерного пучка и 10 мкм в перпендикулярном направлении. Интенсивность излучения, прошедшего через острый край ножа, регистрировалась измерителем мощности FieldMaster LM-3 (Coherent).

Оптическая сила  $D$  линзы, наводимой в АЭ при фиксированной мощности накачки  $P_p$ , определялась по методике, представленной в [10]. Согласно данному подходу, исходный резонатор лазера (глухое и выходное зеркала, а также АЭ с наведенной линзой) заменяется эквивалентным резонатором, в котором линза отсутствует. Если активный элемент располагается вблизи глухого зеркала, а расстояние  $L$  между обоими зеркалами значительно больше длины АЭ, эффективный радиус кривизны  $R_{\text{eff}}$  глухого зеркала эквивалентного резонатора задается соотношением [11]

$$\frac{1}{R_{\text{eff}}} = \frac{1}{R} + D(P_p), \quad (1)$$

где  $R$  – радиус кривизны глухого зеркала исходного резонатора. Основная мода эквивалентного резонатора устойчива при выполнении условия [10]

$$0 < 1 - \frac{L}{R_{\text{eff}}} < 1. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует, что при  $P_p = \text{const}$  и критической длине резонатора  $L_{\text{cr}} = R_{\text{eff}}$  выполняется равенство

$$D(P_p) = \frac{R - L_{\text{cr}}}{RL_{\text{cr}}}, \quad (3)$$

резонатор лазера становится неустойчивым и генерация на основной моде срывается.

Следовательно, регистрируя мощность накачки  $P_p$ , при которой происходит срыв генерации при фиксированной длине резонатора, и варьируя величину  $L$ , можно с помощью выражения (3) определить зависимость оптической силы  $D$  от уровня возбуждения ЛПДН.

### 3. Результаты эксперимента и их обсуждение

Мощность генерации, оптическая сила наведенной в АЭ линзы и параметр качества выходного пучка ЛПДН при различных уровнях накачки представлены на рис.2 и 3 для активных элементов на основе кристаллов  $Nd:YVO_4$  и  $YVO_4/Nd:YVO_4$ . Точность определения мощности генерации при измерении зависимости  $P_{\text{out}}$  от  $P_p$  составляла 1–2 мВт. При определении оптической силы линзы, наводимой в АЭ, относительная погрешность определения мощности накачки, соответствующей срыву генерации, была максимальна для резонатора с базой  $\sim 0.5$  м и составляла  $\sim 2\%$ .

Как следует из сопоставления кривых 1 и 2 на рис.2, композитный активный кристалл  $YVO_4/Nd:YVO_4$  по сравнению с равномерно активированным АЭ позволя-

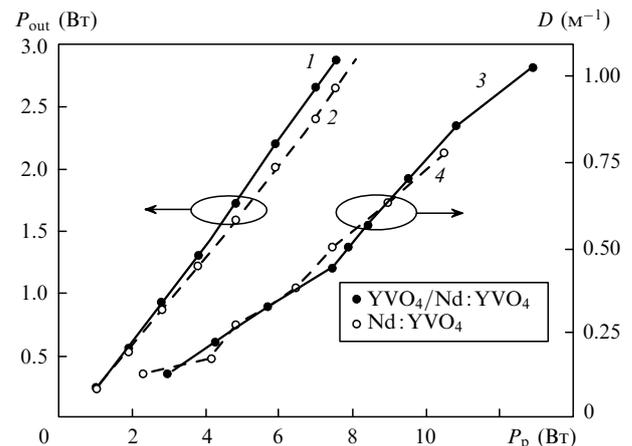


Рис.2. Зависимости выходной мощности лазера  $P_{\text{out}}$  (1, 2) и оптической силы  $D$  (3, 4) линзы, формируемой в активном элементе, от мощности накачки  $P_p$  при использовании активных кристаллов  $YVO_4/Nd:YVO_4$  и  $Nd:YVO_4$  соответственно.

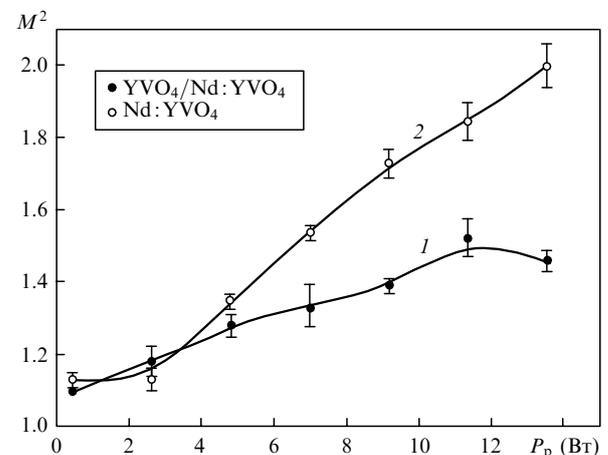


Рис.3. Зависимости параметра качества лазерного пучка  $M^2$  от мощности накачки  $P_p$  для активных кристаллов  $YVO_4/Nd:YVO_4$  (1) и  $Nd:YVO_4$  (2).

ет при прочих равных условиях увеличить дифференциальный внешний квантовый выход генерации с 36 % до 41 %. Однако при замене кристалла  $Nd:YVO_4$  композитным активным элементом  $YVO_4/Nd:YVO_4$  заметно уменьшения  $D$  (см. кривые 3, 4 на рис.2) не наблюдается вплоть до мощностей накачки  $\sim 14$  Вт.

При небольших уровнях возбуждения ЛПДН ( $P_p \sim 0.5 - 3.5$  Вт) параметры качества пучка приблизительно одинаковы для обоих типов АЭ и составляют 1.1–1.2 (рис.3, кривые 1, 2). При  $P_p > 3.5$  Вт параметр  $M^2$  для ЛПДН на основе кристалла  $Nd:YVO_4$  практически линейно увеличивается до значения, равного двум при  $P_p = 14$  Вт, в то время как при использовании кристалла  $YVO_4/Nd:YVO_4$  значение параметра  $M^2$  при таких же уровнях накачки не превышает 1.5.

Полученные результаты дают основание сделать вывод, что применение в ЛПДН композитного АЭ позволяет при прочих равных условиях повысить выходную мощность лазерного пучка без существенного ухудшения качества его пространственных характеристик.

Согласно данным рис.2 (кривые 3, 4), оптические силы линз, наводимых в АЭ, для кристаллов  $Nd:YVO_4$  и  $YVO_4/Nd:YVO_4$  практически одинаковы. Поэтому лучшее качество выходного пучка ЛПДН при высоких уровнях накачки, наблюдаемое в случае использования композитного активного элемента, является, вероятнее всего, следствием уменьшения термоупругих деформаций в области грани АЭ, обращенной к глухому зеркалу. Неактивированная часть композитного кристалла не поглощает излучение накачки. Она является областью дополнительного рассеяния тепла для лазерного активного элемента и способствует снижению тепловой нагрузки, приходящейся на активированную часть КАЭ. Грани композитного кристалла с увеличением мощности выходного пучка заметно не деформируются, что проявляется в эксперименте в виде слабой зависимости параметра  $M^2$  от величины  $P_p$ .

#### 4. Заключение

В настоящей работе показано, что применение композитного активного элемента  $YVO_4/Nd:YVO_4$  приводит при прочих равных условиях к увеличению внешнего дифференциального квантового выхода генерации с 36% до 41% по сравнению со случаем использования в качестве активного элемента кристалла  $Nd:YVO_4$ .

Композитный активный элемент  $YVO_4/Nd:YVO_4$  позволяет увеличить мощность генерации при сохранении относительно высокого качества выходного пучка. Так, при использовании кристалла  $Nd:YVO_4$  параметр  $M^2$  быстро возрастает с увеличением мощности накачки, достигая 2.0 при  $P_p = 14$  Вт, а в случае активного элемента  $YVO_4/Nd:YVO_4$  скорость возрастания  $M^2(P_p)$  уменьшается более чем в 2.5 раза. При максимально достижимых в наших экспериментах уровнях накачки ( $P_p \leq 14$  Вт) для лазера с композитным активным элементом  $M^2$  не превысило 1.5.

Оптическая сила линзы, формируемой в активном элементе, практически не зависит от типа используемого активного кристалла. Улучшение параметра качества выходного лазерного пучка в случае использования композитного активного элемента связано, вероятнее всего, с уменьшением деформаций, возникающих на его переднем торце. Однако для более полного понимания причин, обуславливающих улучшение параметра  $M^2$  при использовании композитного активного элемента, необходимы дальнейшие исследования.

Авторы выражают благодарность Г.П.Яблонскому, В.Н.Павловскому (Институт физики НАНБ) и В.С.Калинову (Институт молекулярной и атомной физики НАНБ) за полезные дискуссии.

1. Богданович М.В., Енжиевский А.И., Рябцев Г.И., Бузов Л.И., Рябцев А.Г., Шемелев М.А., Машко В.В., Тепляшин Л.Л., Красковский А.С. *ЖПС*, **73** (1), 5 (2006).
2. Li Cheng, Song Jie, Shen Deyuan, Xu Jianqiu, Ueda Ken-ichi. *Opt. Commun.*, **186**, 245 (2000).
3. Du C., Ruan S., Zhang H., Yu Y., Zeng F., Wang J., Jiang M. *Appl. Phys. B*, **80**, 45 (2005).
4. Рябцев Г.И., Богданович М.В., Енжиевский А.И., Парашук В.В., Бузов Л.И., Шемелев М.А., Рябцев А.Г., Машко В.В., Тепляшин Л.Л., Красковский А.С. *Оптич. журн.*, **5**, 10 (2006).
5. Xiong Z., Li Z.G., Moore N., Huang W.L., Lim G.C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **39** (8), 979 (2003).
6. Weber R., Neuenschwander B., Mac Donald M., Roos M.B., Weber H.P. *IEEE J. Quantum Electron.*, **34** (6), 979 (1998).
7. Tsunekane M., Taguchi N., Kasamatsu T., Inaba H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **3** (1), 979 (1997).
8. Diso D., Perrone M.R., Protopapa M.L. *Optics Laser Technol.*, **31**, 411 (1999).
9. Wright D. *Opt. Quantum Electron.*, **24**, S1129 (1992).
10. Конвисар П.Г., Михайлов В.Ю., Рустамов С.Р. *Квантовая электроника*, **2** (12), 174 (1975).
11. Kogelnik H., Li T. *Appl. Opt.*, **5** (10), 1550 (1966).