

## СИНХРОНИЗАЦИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ МОД СТОКСОВОЙ КОМПОНЕНТЫ ИЗЛУЧЕНИЯ $\text{Nd:YVO}_4$ ЛАЗЕРА С ПРОДОЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ В РЕЖИМЕ МОДУЛИРОВАННОЙ ДОБРОТНОСТИ С ПАССИВНЫМ ЗАТВОРОМ $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$

В. В. Безотосный<sup>1,2</sup>, М. В. Горбунков<sup>1</sup>, В. И. Дашкевич<sup>3</sup>,  
А. Л. Коромыслов<sup>1,2</sup>, В. А. Орлович<sup>3</sup>, Ю. М. Попов<sup>1,2</sup>, В. Г. Тункин<sup>4</sup>,  
Е. А. Чешев<sup>1,2</sup>, Р. В. Чулков<sup>3</sup>

*Впервые в условиях вырождения мод резонатора по частоте осуществлена синхронизация поперечных мод стоксовой компоненты, генерируемой в режиме ВКР-самопреобразования импульсным  $\text{Nd:YVO}_4/\text{Cr:YAG}$  лазером с продольной диодной накачкой.*

**Ключевые слова:** твердотельные лазеры, продольная диодная накачка, синхронизация мод, вынужденное комбинационное рассеяние.

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) является общепризнанным способом расширения диапазона длин волн лазеров, в том числе для твердотельных лазеров с диодной накачкой (ТЛДН). В ТЛДН генерация на стоксовой частоте может быть реализована в режиме внутррезонаторного ВКР-преобразования с использованием дополнительных ВКР-активных кристаллов [1, 2] или в режиме ВКР-самопреобразования [2]. В последнем случае для генерации лазерного и стоксова излучений используется один и тот же ВКР-активный кристалл, допускающий легирование редкоземельным ионом. В ТЛДН с ВКР-преобразованием частоты параметры стоксовой генерации во многом определяются параметрами основного лазерного излучения. При этом отдельно следует выделить случай твердотельного лазера с продольной диодной накачкой (ТЛПДН).

<sup>1</sup> ФИАН, 119991 Россия, Москва, Ленинский пр-т, 53; e-mail: victorbe@sci.lebedev.ru.

<sup>2</sup> НИЯУ МИФИ, 115409 Россия, Москва, Каширское ш., 31.

<sup>3</sup> Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, 220072 Беларусь, Минск, пр. Независимости, 68.

<sup>4</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Международный лазерный центр, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, 1.

Ранее было продемонстрировано, что при использовании достаточно узкой продольной накачки и при выборе вырожденной конфигурации резонатора можно осуществить самосинхронизацию поперечных мод [3–6]. В этом случае существенно снижается порог генерации [3, 5], формируется специфическая негауссова структура поля [4, 6] и осуществляется концентрация излучения на оси активного элемента (АЭ) [4]. Реализация эффекта синхронизации поперечных мод представляет практический интерес и для ТЛПДН с внутррезонаторным ВКР-преобразованием, поскольку открываются новые возможности для снижения порога ВКР-генерации и увеличения её эффективности.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию импульсного ТЛПДН на кристалле  $\text{Nd:YVO}_4$  с ВКР-самопреобразованием частоты при различных конфигурациях резонатора. Модуляция добротности резонатора осуществляется пассивным затвором  $\text{Cr:YAG}$ .

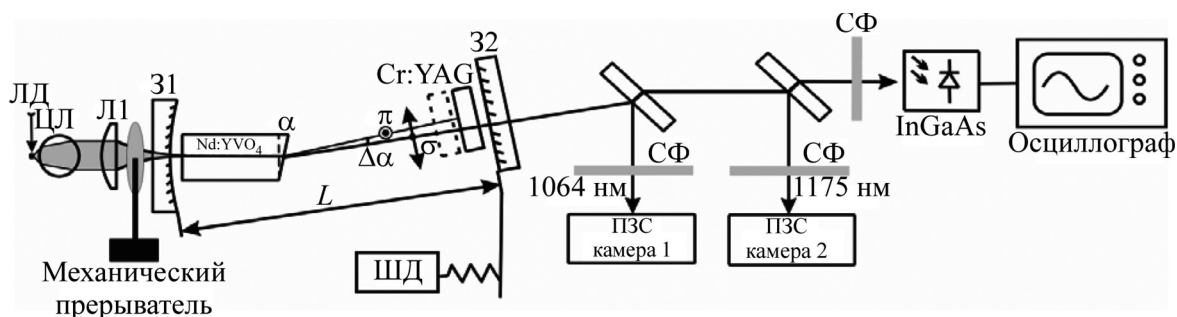


Рис. 1: Схема эксперимента: ЛД – лазерный диод; ЦЛ – цилиндрическая линза; Л1 – сферическая линза; 31, 32 – зеркала резонатора; СФ – светофильтры; ШД – шаговый двигатель;  $\text{InGaAs}$  – фотодиод.

Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве активного элемента лазера (АЭ) использовался кристалл  $\text{Nd:YVO}_4$   $a$ -среза, имеющий длину 8 мм и обеспечивающий с участием фоновой моды на частоте  $890\text{ см}^{-1}$  ВКР-самопреобразование основного лазерного излучения на  $\lambda_F = 1064\text{ нм}$  в стоксову компоненту с длиной волны  $\lambda_S = 1175\text{ нм}$ . Путем соответствующей юстировки зеркала 32 осуществлялась генерация пучка, имеющего  $\sigma$  поляризацию, что обеспечивало в случае пассивной модуляции потерь максимально высокую пиковую мощность импульса [7]. Для накачки АЭ использовался лазерный диод (ЛД) с длиной волны  $\lambda_P \sim 808\text{ нм}$  и выходной мощностью до 8 Вт. Излучение накачки фокусировалось на входной торец АЭ. Для ослабления тепловых эффектов в АЭ излучение ЛД модулировалось с помощью механического прерывателя.

Резонатор ТЛПДН был образован сферическим зеркалом З1 с радиусом кривизны 150 мм и плоским выходным зеркалом З2. Зеркало З1 являлось глухим на длинах волн  $\lambda_F$ ,  $\lambda_S$  ( $R > 99.9\%$ ) и прозрачным на  $\lambda_P$  ( $T \sim 96\%$ ). Для реализации режима ВКР-самопреобразования применялось зеркало З2, имеющее на  $\lambda_F$  и  $\lambda_S$  коэффициенты отражения 99.9 и 96%, соответственно. Для генерации только основного лазерного излучения использовалось другое зеркало З2 с коэффициентом отражения на  $\lambda_F$  96%. Модуляция потерь резонатора осуществлялась кристаллом  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  с начальным пропусканием  $T_0 = 80\%$ . Конфигурация резонатора варьировалась путем изменения длины резонатора  $L$  посредством перемещения зеркала З2. Модулятор располагался вблизи выходного зеркала.

Временные характеристики излучения регистрировались с помощью InGaAs фотодиода с временем отклика 150 пс и осциллографа Tektronix MDO4104-3 с полосой 3 ГГц. Пространственные распределения излучения на  $\lambda_F$  и  $\lambda_S$  регистрировались ПЗС-камерами, расположенными на расстояниях 30 и 40 см от зеркала З2, соответственно.

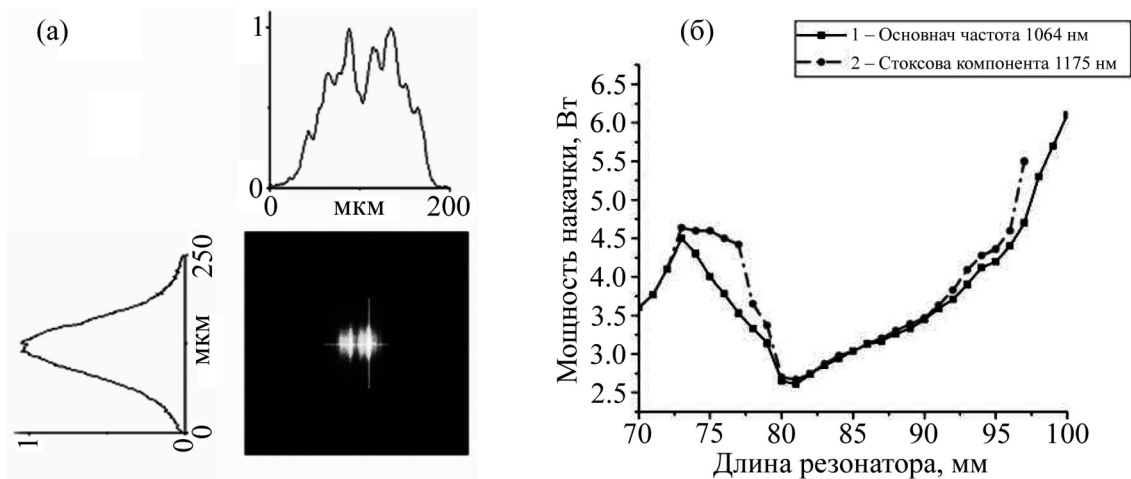


Рис. 2: Распределение плотности мощности излучения накачки на входном торце активного элемента (а) и зависимость порога генерации лазера на кристалле  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  от длины резонатора для основной и стоксовой компоненты (б).

Распределение плотности мощности излучения накачки на входном торце активного элемента  $\text{Nd}:\text{YVO}_4$  представлено на рис. 2(а). Пучок накачки в перетяжке является слегка астигматическим и характеризуется неоднородным распределением интенсивности в горизонтальной плоскости. Вертикальный и горизонтальный размеры пучка накачки ( $d_{\text{pump}}$ ) на уровне 0.5 максимальной интенсивности составляют  $\sim 110$  мкм и

$\sim 90$  мкм, соответственно. Расчеты показали, что диаметр основной моды пустого резонатора  $D_0$  на зеркале З1 при изменении  $L$  от 70 до 100 мм находился в пределах 420–560 мкм. Таким образом, накачка АЭ была существенно неоднородна ( $D_0/d_{\text{pump}} > 1$ ), что является необходимым условием синхронизации поперечных мод.

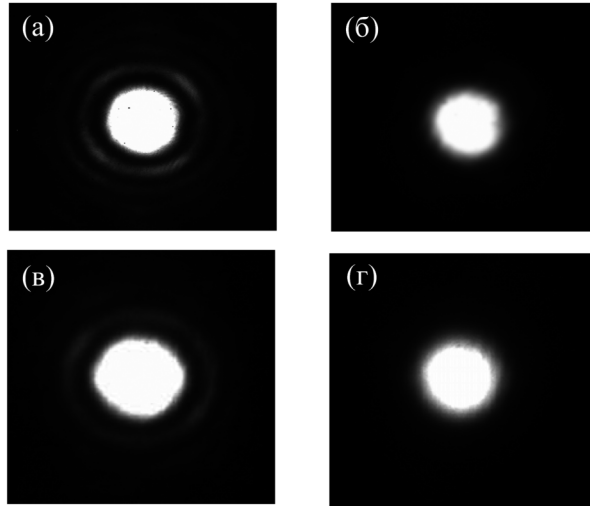


Рис. 3: Пространственная структура излучения генерации на длинах волн 1064 нм ((а), (б)) и 1175 нм ((в), (г)) при  $L = 80$  мм ((а), (в)) и  $L = 84$  мм ((б), (г)).

Зависимости порогов генерации на  $\lambda_F$  и  $\lambda_S$  от длины резонатора  $L$  приведены на рис. 2(б). Генерация стоксовой компоненты вблизи порога носила вероятностный характер. В связи с этим в качестве пороговой мощности накачки для  $\lambda_S$  бралась мощность ЛД, при которой ВКР-генерация наблюдалась не менее чем в 20% импульсов. Видно, что при длинах резонатора, близких к 80 мм, пороги генерации как на основной, так и стоксовой длинах волн существенно снижаются. Кроме того, при  $L = 80$  мм пространственная структура излучения имеет кольцевую структуру как для  $\lambda_F$ , так и для  $\lambda_S$  (рис. 3(а) и 3(в)). При других длинах резонатора распределение интенсивности в пучках является гауссовым (рис. 3(б), (г)). Указанные обстоятельства – снижение порога генерации и негауссов профиль пучка с кольцевой симметрией – указывают на проявление эффекта синхронизации поперечных мод резонатора, в том числе в случае ВКР-генерации.

Синхронизация поперечных мод наблюдается в вырожденных конфигурациях лазерного резонатора, определяемых следующим соотношением [3, 4]:

$$\sqrt{\arccos(g_1 g_2)} = \pi \frac{r}{s}, \quad (1)$$

где  $r/s$  – правильная дробь, характеризующая вырождение,  $g_{1,2} = 1 - L/R_{1,2}$ ,  $R_{1,2}$  – радиусы кривизны зеркал резонатора. Из (1) следует, что при  $L = 80$  мм параметр  $r/s$  равен  $1/4$ , т.е. в эксперименте реализовывалась полуконфокальная конфигурация, характеризующаяся частотным вырождением мод, для которых разница радиальных индексов кратна двум.

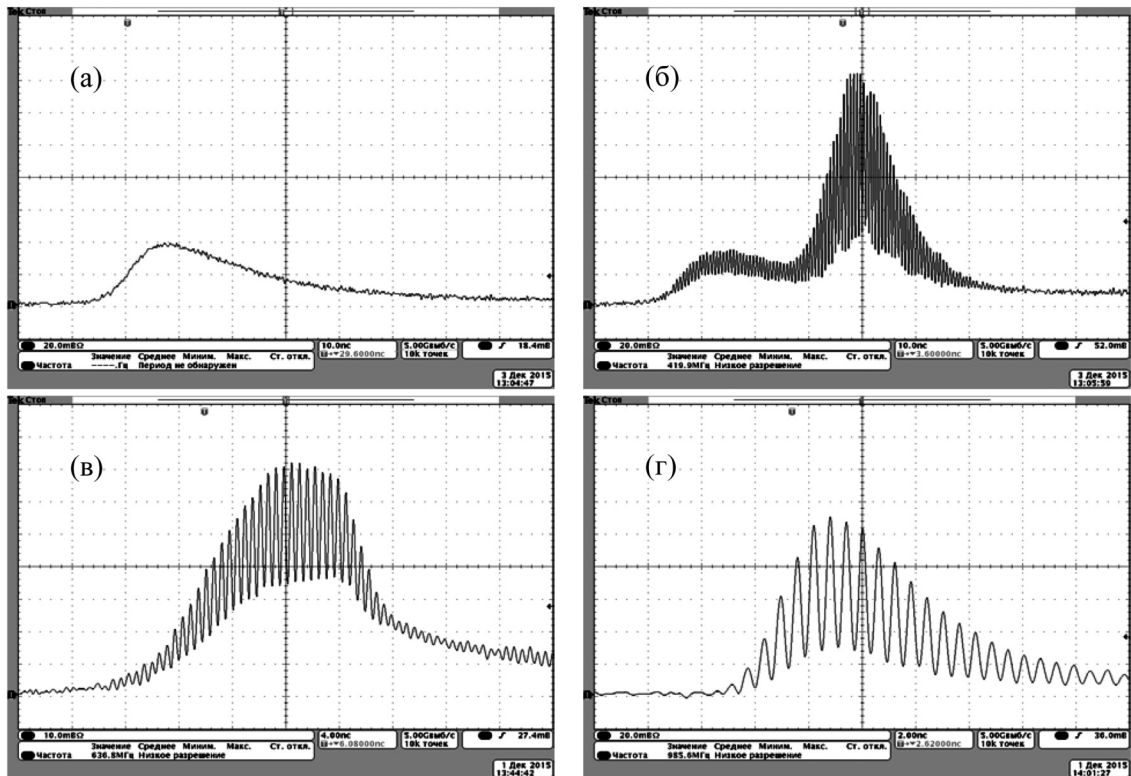


Рис. 4: Типичные осциллограммы импульсов, генерируемых на длине волны 1064 нм ((а), (в)), совместно на длинах волн 1064 и 1175 нм (б) и на длине волны 1175 нм (г) в условиях синхронизации продольных мод ((б)–(г)) и её отсутствия (а). Масштаб шкал 10 нс/дел ((а), (б)), 4 нс/дел (в), 2 нс/дел (г).

Было установлено, что возникновение ВКР-генерации обусловлено эффектом пассивной синхронизации продольных мод резонатора, которая носила нестабильный характер. Осциллограммы, полученные без использования отрезающих спектральных фильтров, показали, что часть импульсов на  $\lambda_F$  имеет гладкую огибающую (рис. 4(а)). В этом случае ВКР-генерация отсутствовала. Одновременная генерация на  $\lambda_F$  и  $\lambda_S$  наблюдалась лишь при наличии синхронизации продольных мод и характеризовалась модуляцией интенсивности импульса (рис. 4(б)). При синхронизации продольных мод

пиковая интенсивность лазерного излучения на  $\lambda_F$  внутри резонатора многократно возросла, что обеспечивало превышение порога ВКР-генерации. Наилучшие результаты по осуществлению ВКР-генерации получены при установке затвора Cr:YAG вблизи выходного зеркала З2. Типичные осциллограммы импульсов основного лазерного излучения и стоксовой компоненты приведены на рис. 4(в) и 4(г).

Крутой задний фронт импульса на  $\lambda_F$  (рис. 4(в)) объясняется эффективным истощением лазерного излучения процессом ВКР-генерации. В обоих импульсах  $\lambda_F$  и  $\lambda_S$  период модуляции интенсивности составляет 0.6 нс, что соответствует времени обхода резонатора (рис. 4(в) и 4(г)).

Другим благоприятным положением модулятора Cr:YAG являлась середина резонатора. В этом случае пассивная синхронизация мод развивалась по механизму сталкивающихся импульсов, интервал между короткими импульсами внутри огибающей составлял 0.3 нс, что соответствует времени прохода резонатора. В промежуточных положениях затвора Cr:YAG вероятность возникновения пассивной синхронизации продольных мод заметно уменьшалась, что, в свою очередь, приводило к снижению вероятности возникновения ВКР-генерации.

Таким образом, проведено исследование пороговых, пространственных и временных характеристик импульсного диодно-накачиваемого Nd:YVO<sub>4</sub>/Cr:YAG лазера с ВКР-самопреобразованием частоты при различных конфигурациях резонатора. Возникновение стоксовой компоненты однозначно связано с реализацией режима синхронизации продольных мод. По нашему мнению, впервые в твердотельном лазере с ВКР-самопреобразованием частоты в условиях продольной диодной накачки и частотного вырождения мод резонатора осуществлена синхронизация поперечных мод генерируемой стоксовой компоненты.

Авторы выражают благодарность А. А. Сироткину за предоставленные кристаллы. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 14.575.21.0047. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов”, грантов РФФИ бел\_а 16-52-00138, мол\_а 16-32-00834, Учебно-научного комплекса ФИАН.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] T. T. Basiev, A. A. Sobol, P. G. Zverev, et al., *Optical Materials* **11**, 307 (1999).
- [2] V. I. Dashkevich, P. V. Shpak, S. V. Voitkov, et al., *Opt. Commun.* **351**, 1 (2015).
- [3] H. H. Wu, C. C. Sheu, T. W. Chen, et al., *Opt. Commun.* **165**, 225 (1999).
- [4] М. В. Горбунков, П. В. Кострюков, Л. С. Телегин и др., *Квантовая электроника* **37**(2), 173 (2007).
- [5] V. V. Bezotosnyi, E. A. Cheshev, M. V. Gorbunkov, et al., *Laser Phys. Lett.* **12**, 2 (2015).
- [6] V. V. Bezotosnyi, E. A. Cheshev, M. V. Gorbunkov, et al., *Appl. Opt.* **47**, 3651 (2008).
- [7] А. А. Сироткин, В. И. Власов, А. И. Загуменный и др., *Квантовая электроника* **41**, 584 (2011).

Поступила в редакцию 30 января 2014 г.