

ЛАЗЕРЫ

Синхронизация поперечных мод стоксовой компоненты излучения Nd:KGW-лазера с продольной диодной накачкой, работающего в режиме модуляции добротности

А.Л.Коромыслов, И.М.Тупицын, Е.А.Чешев, Р.В.Чулков

В твердотельном лазере Nd:KGW/Cr⁴⁺:YAG с неоднородной продольной диодной накачкой в условиях частотного вырождения мод резонатора получена генерация на длинах волн 1067 и 1181 нм (стоксов сдвиг 901 см⁻¹). При этом пространственная структура излучения приобретала характерную кольцевую структуру, что свидетельствовало о синхронизации поперечных мод основной и стоксовой компонент. Продемонстрирована возможность управления эффективностью ВКР-преобразования при изменении положения дополнительно внесенного в резонатор легированного кристалла KGW. Показано, что синхронизация поперечных мод сопровождается полной синхронизацией продольных мод лазера на $\lambda = 1067$ и 1181 нм.

Ключевые слова: твердотельные лазеры, продольная диодная накачка, синхронизация поперечных мод, вынужденное комбинационное рассеяние, ВКР-самопреобразование.

1. Введение

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) является общепризнанным эффективным методом генерации новых длин волн лазеров, в том числе твердотельных лазеров с диодной накачкой (ТЛДН). Наиболее популярными активными ВКР-средами для реализации самопреобразования излучения в ТЛДН являются кристаллы KGd(WO₄), BaWO₄, Ba(NO₃)₂, легированные ионом неодима Nd³⁺ и др. [1]. В ТЛДН генерация на частоте стоксовой компоненты излучения может быть реализована в режиме внутррезонаторного ВКР-преобразования с использованием дополнительных ВКР-кристаллов [2, 3] или в режиме ВКР-самопреобразования [2]. В ТЛДН с ВКР-преобразованием частоты параметры генерации стоксовой компоненты во многом определяются параметрами основного лазерного излучения. Было продемонстрировано [4–7], что при использовании неоднородной продольной накачки и выборе вырожденной конфигурации резонатора может быть реализован режим синхронизации поперечных мод. Для осуществления режима синхронизации поперечных мод накачка должна быть неоднородной. Она характеризуется параметром $s = w_0/w_p$ – отношением радиуса нулевой моды «пустого» резонатора w_0 к радиусу пучка накачки w_p . При $s > 1$ возможна синхронизация поперечных мод, и пространственная структура излучения будет существенно отличаться от гауссовой, если выполняется соотношение

$$\frac{\arccos \sqrt{g_1 g_2}}{\pi} = \frac{r}{s},$$

А.Л.Коромыслов, И.М.Тупицын, Е.А.Чешев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: imtupitsyn@yandex.ru

Р.В.Чулков. Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси, Республика Беларусь, 220072 Минск, просп. Независимости, 68-2

Поступила в редакцию 22 марта 2021 г.

где r/s – правильная несократимая дробь, характеризующая вырождение; $g_{1,2} = 1 - L/R_{1,2}$ – параметры устойчивости резонатора; $R_{1,2}$ – радиусы кривизны зеркал; L – длина резонатора. В этом случае существенно снижается порог генерации [4, 6], формируется специфическая негауссова структура поля [5, 7] и осуществляется концентрация излучения в области неоднородной накачки в активном элементе (АЭ) [5]. В то же время в промежутках между значениями L , соответствующими частотному вырождению мод резонатора, лазерное излучение близко по структуре к гауссовой моде. Такое поведение было продемонстрировано для лазеров, работающих как в непрерывном режиме, так и в режиме модуляции добротности.

Интерес к режиму синхронизации поперечных мод в твердотельных лазерах с продольной диодной накачкой (ТЛПДН) связан с возможностями управления параметрами генерации [8–13]. Режим синхронизации поперечных мод представляет практический интерес и для ТЛПДН с внутррезонаторным ВКР-преобразованием, поскольку он открывает возможности для снижения порога ВКР-генерации и увеличения ее эффективности. Заметное снижение порога и концентрация излучения в области накачки АЭ [5, 13–15], характерные для режима синхронизации поперечных мод, привлекательны для реализации самопреобразования излучения в комбинационно-активных кристаллах.

Настоящая работа посвящена экспериментальному изучению внутррезонаторного ВКР в комбинационно-активном кристалле Nd:KGW в условиях синхронизации поперечных мод резонатора. Исследовано поведение пространственной и временной структур излучения на основной и стоксовой компонентах при модуляции добротности резонатора насыщенным поглотителем Cr⁴⁺:YAG в условиях неоднородной продольной накачки в зависимости от конфигураций резонатора. Рассмотрена возможность управления эффективностью внутррезонаторного ВКР при различных положениях в резонаторе кристалла KGW в условиях синхронизации поперечных мод.

2. Экспериментальная установка

Схема лазерного стенда приведена на рис.1. Резонатор лазера был образован двумя зеркалами 31 и 32. Сферическое зеркало 31 с радиусом 150 мм было глухим ($R = 99.96\%$) для излучения с длинами волн 1067 и 1181 нм и просветленным ($R < 1\%$) на длине волны накачки $\lambda_p = 811$ нм. Плоское зеркало 32 имело коэффициенты отражения 99.96% и 96% для длин волн 1067 и 1181 нм соответственно. В качестве активной среды использовался кристалл Nd:KGW (2 ат.%) длиной 12 мм, вырезанный вдоль оси N_p , соответствующей кристаллографической оси [010]. Кристалл, обернутый в индиевую фольгу, был помещен в медный теплоотвод вблизи зеркала 31. Торцы АЭ были просветлены в области длин волн генерации 1.0–1.2 мкм и длины волны накачки λ_p . Пассивная модуляция добротности лазера осуществлялась насыщающимся поглотителем $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ с начальным пропусканием $T = 80\%$, установленным у выходного зеркала 32. На плоскопараллельные грани поглотителя были также нанесены просветляющие покрытия на область длин волн 1.0–1.2 мкм.

Конфигурация резонатора изменялась за счет изменения его длины в пределах области устойчивости. Для этого выходное зеркало резонатора 32 и насыщающийся поглотитель $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ были смонтированы на моторизированной платформе, что позволило регулировать длину резонатора L в пределах 50–150 мм с точностью 2.5 мкм. Накачка осуществлялась лазерным диодом ($\lambda_p = 811$ нм) в квазинепрерывном режиме генерации с коэффициентом заполнения 20% для уменьшения тепловой нагрузки АЭ. Излучение накачки фокусировалось в АЭ в пятно диаметром около 220 мкм, это обеспечивало параметр неоднородности накачки $s \approx 1.9\text{--}2.0$. Поляризация излучения на длине волны 1067 нм совпадала с оптической осью кристалла Nd:KGW ($E \parallel N_m$) для эффективного преобразования лазерного излучения с $\lambda_g = 1067$ нм в 1-ю стоксову компоненту с длиной волны $\lambda_{s1} = 1181$ нм (смещение фундаментальной компоненты излучения составляет 901.5 см^{-1}) [16].

В первом эксперименте были измерены пороги генерации и распределения интенсивности излучения с длинами волн 1067 и 1181 нм при изменении длины резонатора (кристалл KGW в этом эксперименте не использовался). Распределение интенсивности и порог генерации излуче-

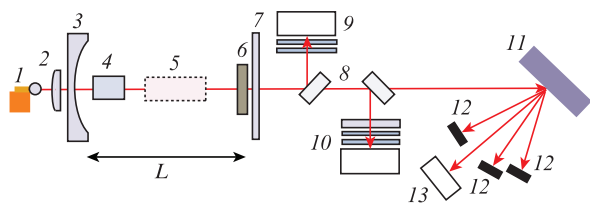


Рис.1. Схема эксперимента:

1 – лазерный диод; 2 – элементы системы накачки АЭ; 3 – сферическое зеркало 31; 4 – кристалл Nd:KGW; 5 – кристалл KGW; 6 – насыщающийся поглотитель $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$; 7 – плоское зеркало 32; 8 – светоделительные пластины; 9 – CCD-камера для длины волны 1067 нм с набором светофильтров; 10 – CCD-камера для длины волны 1181 нм с набором светофильтров и дихроичным зеркалом, отсекающим излучение на 1067 нм; 11 – дифракционная решетка; 12 – защитные экраны, блокирующие излучения на длинах волн 811, 1067 и 1320 нм (2-я стоксова компонента); 13 – InGaAs-фотоприемник с полосой 5 ГГц. (Кристалл KGW, дифракционная решетка, защитные экраны и фотоприемник используются только во втором эксперименте.)

ния на 1067 нм регистрировались с помощью CCD-камеры THORLABS BC106-VIS, которая располагалась на расстоянии примерно 30 см от выходного зеркала. Для регистрации распределения интенсивности и порога генерации излучения на 1181 нм использовалась CCD-камера BeamOn VIS-NIR, располагавшаяся на расстоянии ~ 40 см от выходного зеркала. Перед этой CCD-камерой было установлено дихроичное зеркало, глухое для длины волны 1067 нм и прозрачное для $\lambda_{s1} = 1181$ нм.

Во втором эксперименте для исследования возможности управления эффективностью ВКР-преобразования внутрь резонатора был помещен кристалл KGW длиной 24 мм (см. рис.1), вырезанный вдоль оптической оси N_p , соответствующей кристаллографической оси [010]. На торцы кристалла, ориентированного так, чтобы направление поляризации основной компоненты лазерного излучения было параллельно оптической оси N_m , наносились просветляющие покрытия на область длин волн 1.0–1.2 мкм. Кристалл KGW, обернутый в индиевую фольгу, был помещен в медный теплоотвод, установленный на трансляционном столике, который обеспечивал смещение кристалла вдоль оптической оси резонатора. Начальное положение кристалла KGW соответствовало середине резонатора. Длина резонатора в этом эксперименте настраивалась так, чтобы выполнялось соотношение $r/s = 1/3$.

Дифракционная решетка 11 (600 штрих./мм) обеспечивала пространственное разделение излучения по длинам волн. Для регистрации импульсов с $\lambda_{s1} = 1181$ нм пучки с длинами волн 811, 1067 и 1320 нм (2-я стоксова компонента) после дифракционной решетки перекрывались экранами 12. Временные характеристики излучения регистрировались с помощью InGaAs-фотодиода с полосой 5 ГГц и осциллографа Lecroy WR6051A с полосой пропускания при объединении каналов 1 ГГц. Регистрация излучения на $\lambda_{s2} = 1320$ нм осуществлялась с помощью прибора ночного видения на экране.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис.2 представлены измеренные пороги генерации лазера для длин волн 1067 и 1181 нм в зависимости от длины резонатора.

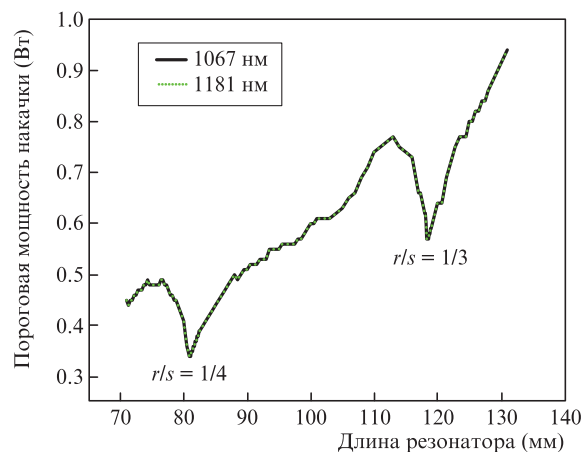


Рис.2. Зависимость пороговой поглощенной мощности накачки кристалла $\text{Nd}^{3+}:\text{KGW}$ от длины резонатора при выходном зеркале с коэффициентами отражения $R = 99.9\%$ на 1067 нм и $R = 96\%$ на 1181 нм. Порог генерации одинаков для обеих длин волн.

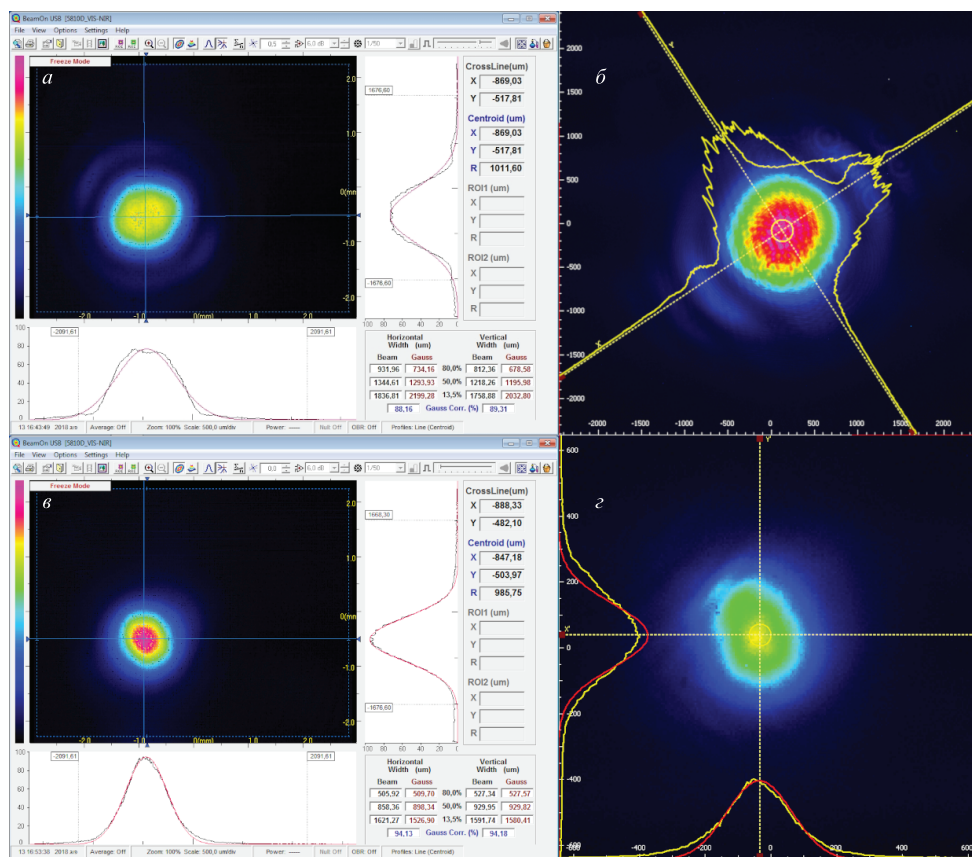


Рис.3. Пространственные структуры излучения для длин волны 1181 (а, б) и 1067 нм (в, з) в условиях синхронизации поперечных мод ($r/s = 1/4$) (а, б), а также при отстройке на 6 мм от области синхронизации поперечных мод (в, з). Цветной вариант рис.3 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

Зависимости порогов генерации лазера от длины резонатора в режиме модуляции добротности резонатора насыщающимся поглотителем совпадают для длин волн 1067 и 1181 нм. Это объясняется тем, что при интенсивности излучения на длине волны 1067 нм, необходимой для просветления насыщающегося поглотителя, уже происходит его ВКР-преобразование в 1-ю стоксову компоненту. При конфигурациях резонатора, соответствующих отношению $r/s = 1/3$ и $1/4$ в условиях синхронизации поперечных мод, размеры пучков с длинами волн 1067 и 1181 нм сужаются до размера пучка накачки в области АЭ, расположенного у зеркала З1. Это приводит к падению порога генерации лазера на обеих длинах волн. При этом регистрируемое пространственное распределение излучения лазера на этих длинах волн приобретает характерную кольцевую структуру, что свидетельствует о реализации синхронизации поперечных мод для обеих компонент излучения.

На рис.3 приведены распределения излучения на длинах волн 1067 и 1181 нм при конфигурации резонатора $r/s = 1/4$ и при отстройке от нее. Видно, что при $r/s = 1/4$ наблюдается кольцевая структура излучения, характерная для синхронизации поперечных мод (рис.3,а, б), а при отстройке от этой конфигурации на 6 мм профиль пятна излучения становится гауссовым (рис.3,в, з).

Во втором эксперименте исследовалась возможность управления эффективностью ВКР-преобразования в условиях синхронизации поперечных мод в Nd:KGW/KGW-лазере с пассивной модуляцией добротности. В работе [5] показано, что в условиях синхронизации поперечных мод

амплитуда поля внутри резонатора зависит от продольной координаты. В случае настройки длины резонатора на конфигурацию с нечетным соотношением параметров, $r/s = 1/3$, плотность мощности на его оси будет увеличиваться при смещении от середины резонатора к плоскому или сферическому зеркалу. Поэтому начальное положение кристалла KGW в резонаторе соответствовало середине резонатора – области широкого поперечного распределения поля. Затем кристалл с помощью трансляционного столика смещался с шагом 2 мм в сторону выходного зеркала, что увеличивало интенсивность поля с длиной волны 1067 нм в кристалле KGW. При этом наблюдалось значительное увеличение амплитуды 1-й стоксовой компоненты и, соответственно, эффективности процесса ВКР-преобразования (рис.4,а).

Наблюдаемое на рис.4,а насыщение амплитуды импульсов 1-й стоксовой компоненты поля при смещении кристалла в сторону выходного зеркала резонатора (в области увеличения интенсивности основной компоненты излучения) начиная со смещения, равного 6 мм от центра резонатора, обусловлено развитием каскадной генерации 2-й стоксовой компоненты.

Типичная осциллограмма цуга импульсов стоксова излучения с длиной волны 1181 нм представлена на рис.4,б. Отметим, что временной интервал между импульсами (1.1 нс) соответствует времени обхода резонатора, что свидетельствует о реализации режима самосинхронизации продольных мод в лазере, а большая глубина модуляции говорит об их полной синхронизации.

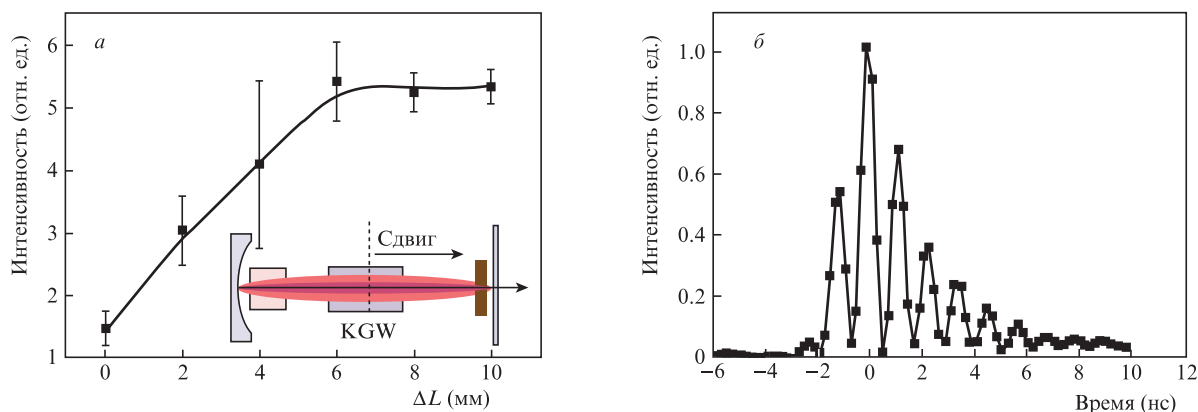


Рис.4. Зависимость амплитуды регистрируемых импульсов 1-й стоксовой компоненты от смещения кристалла KGW ΔL в сторону выходного зеркала (а) и типичная осциллограмма импульсов 1-й стоксовой компоненты излучения (б) ($\Delta L = 0$ соответствует положению центра кристалла на половине длины резонатора).

4. Заключение

Исследован процесс внутррезонаторного ВКР-самопреобразования в лазере на кристалле Nd:KGW/Cr⁴⁺:YAG с продольной диодной накачкой в условиях синхронизации поперечных мод. Установлено, что при выполнении условий синхронизации поперечных мод основного излучения лазера на длине волны 1067 нм наблюдается также синхронизация поперечных мод излучения 1-й стоксовой компоненты на 1181 нм. Показано, что в режиме синхронизации поперечных мод можно в значительных пределах управлять эффективностью ВКР-преобразования основного излучения в 1-ю стоксову компоненту, изменяя положение дополнительного кристалла KGW внутри резонатора с отношением параметров $r/s = 1/3$. При этом синхронизация поперечных мод сопровождается полной синхронизацией продольных мод лазера на длинах волн 1067 и 1181 нм.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и БРФФИ в рамках научного проекта № 20-52-00036.

1. Баснев Т.Т. и др. *Квантовая электроника*, **36** (8), 720 (2006) [*Quantum Electron.*, **36** (8), 720 (2006)].
2. Dashkevich V.I. et al. *Opt. Commun.*, **351**, 1 (2015). DOI: 10.1016/j.optcom.2015.04.033.
3. Basiev T.T., Sobol A.A., Zverev P.G., Ivleva L.I., Osiko V.V., Powell R.C. *Opt. Mater.*, **11** (4), 307 (1999). DOI: 10.1016/S0925-3467(98)00030-5.

4. Wu H.H., Sheu C.C., Chen T.W., Wei M.D., Hsieh W.F. *Opt. Commun.*, **165** (4), 225 (1999). DOI: 10.1016/S0030-4018(99)00216-3.
5. Горбунков М.В., Кострюков П.В., Телегин Л.С., Тункин В.Г., Яковлев Д.В. *Квантовая электроника*, **37** (2), 173 (2007) [*Quantum Electron.*, **37** (2), 173 (2007)].
6. Bezotosnyi V.V. et al. *Laser Phys. Lett.*, **12** (2), 025001 (2015). DOI:10.1088/1612-2011/12/2/025001.
7. Bezotosnyi V.V., Cheshev E.A., Gorbunkov M.V., Kostryukov P.V., Tunkin V.G. *Appl. Opt.*, **47** (20), 3651 (2008). DOI: 10.1364/AO.47.003651.
8. Zhang Q., Ozygus B., Weber H. *EPJ Appl. Phys.*, **6** (3), 293 (1999). DOI: 10.1051/epjap:1999186.
9. Chen Y.F., Tung J.C., Chiang P.Y., Liang H.C., Huang K.F. *Phys. Rev. A: At. Mol. Opt. Phys.*, **88** (1), 1 (2013). DOI: 10.1103/PhysRevA.88.013827.
10. Barré N., Romanelli M., Brunel M. *Opt. Lett.*, **39** (4), 1022 (2014). DOI: 10.1364/OL.39.001022.
11. Безотосный В.В. и др. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **38** (10), 43 (2011) [*Bull. Lebedev Phys. Inst.*, **38** (10), 311 (2011)]. DOI: 10.3103/S106833561110006X.
12. Bezotosnyi V.V. et al. *Phys. Procedia*, **72**, 405 (2015). DOI: 10.1016/j.phpro.2015.09.075.
13. Hall D.G., Smith R.J., Rice R.R. *Appl. Opt.*, **19** (18), 3041 (1980). DOI: 10.1364/AO.19.003041.
14. Bezotosnyi V.V. et al. *Laser Phys. Lett.*, **12** (2), 025001 (2015). DOI:10.1088/1612-2011/12/2/025001.
15. Hall D.G. *Appl. Opt.*, **20** (9), 1579 (1981). DOI:10.1364/ao.20.001579.
16. Dashkevich V.I., Rusak A.A., Orlovich V.A., Shkadarevich A.P. *J. Appl. Spectrosc.*, **84** (6), 971 (2018). DOI: 10.1007/s10812-018-0573-0.