

## ДВУХВОЛНОВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ПРИ СИНХРОНИЗАЦИИ ПОПЕРЕЧНЫХ МОД В Nd:YLF ЛАЗЕРЕ С ПРОДОЛЬНОЙ ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ В РЕЖИМЕ МОДУЛЯЦИИ ДОБРОТНОСТИ ПАССИВНЫМ ЗАТВОРОМ Cr<sup>4+</sup>:YAG

В. В. Безотосный<sup>1,2</sup>, М. В. Горбунков<sup>1</sup>, А. Л. Коромыслов<sup>1,2</sup>,  
В. Ф. Певцов<sup>1</sup>, Ю. М. Попов<sup>1,2</sup>, В. Г. Тункин<sup>3</sup>, Е. А. Чешев<sup>1,2</sup>

*В Nd:YLF лазере с продольной диодной накачкой осуществлена двухволновая генерация на длинах волн 1047 и 1053 нм в режиме модуляции добротности резонатора Cr:YAG затвором. Двухволновая генерация реализована путем подстройки длины резонатора вблизи областей вырождения поперечных мод.*

**Ключевые слова:** твердотельные лазеры, продольная диодная накачка, синхронизация поперечных мод, двухволновая генерация.

В настоящее время прослеживается устойчивый интерес к двухволновым лазерам, которые используются в системах анализа газового состава, в лидарных схемах, наконец, в схемах генерации разностной частоты, лежащей в дальнем ИК или ТГц диапазонах спектра [1, 2].

В работе [3] предложен способ реализации двухволновой генерации в лазере с линзоподобным активным элементом на Nd:YLF (100) в условиях неоднородной продольной диодной накачки. Благодаря бифокальности линзоподобного двулучепреломляющего кристалла YLF, выравнивание усилений для разных длин волн за обход резонатора достигалось подбором длины резонатора так, чтобы длина волны, имеющая меньшее сечение усиления, попадала бы в область синхронизации поперечных мод. Другой способ двухволновой генерации в лазере Nd:YLF (100) основан на существенно различном поведении термооптических коэффициентов для ортогонально поляризованных длин

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

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

<sup>3</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Международный лазерный центр, 119991 Россия, Москва, Ленинские горы, 1.

волн генерации 1047 и 1053 нм [4]. В последнем случае двухволновая генерация реализована путем выбора длины резонатора вблизи области синхронизации поперечных мод в условиях значительных термооптических искажений активной среды [2].

Перенесение данного опыта на лазеры с пассивной модуляцией добротности резонатора представляется интересным, так как может существенно упростить схему лазера и сделать его компактным. В работе [5], например, ставилась задача реализовать двухволновую генерацию в схеме с модуляцией добротности пассивным затвором в составном резонаторе с одним общим выходным зеркалом. Авторы столкнулись с трудностью совмещения импульсов, так как разное усиление на двух длинах волн приводит к разному времени развития генерации. Очевидно, что указанный выше способ выравнивания усиления на двух длинах волн при изменении длины резонатора вблизи областей синхронизации поперечных волн свободен от этого недостатка.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию твердотельного лазера на кристалле Nd:YLF с продольной диодной накачкой с модуляцией добротности резонатора пассивным  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  затвором в условиях синхронизации поперечных мод. Принципиальная схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве активного элемента лазера (АЭ) использовался кристалл Nd:YLF  $a$ -среза, имеющий длину 10 мм. Для накачки АЭ использовался лазерный диод (ЛД) с длиной волны  $\lambda_p \sim 808$  нм и выходной мощностью до 8 Вт. АЭ был просветлен на длину волны накачки 808 нм и длины волн генерации 1047 и 1053 нм. Излучение накачки фокусировалось на входной торец АЭ. Радиус пятна накачки на торце АЭ составил 60 мкм.

Резонатор лазера был образован сферическим зеркалом З1 с радиусом кривизны 150 мм и плоским выходным З2, что позволило избежать проявлений внутррезонаторного астигматизма [6]. Зеркало З1 имело просветление на длине волны накачки ЛД и 100% отражение на длине волны генерации. Модуляция потерь резонатора осуществлялась с помощью затворов  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  с различным начальным пропусканием:  $T_0 = 87, 89, 94, 97\%$ . Конфигурация резонатора варьировалась путем изменения длины резонатора  $L$  посредством перемещения зеркала З2. Затворы были просветлены на длине волны генерации.

Экспериментально измеренные зависимости пороговой мощности накачки от длины резонатора (изменялась в пределах от 50 до 140 мм) для лазеров с пассивными затворами с различным начальным пропусканием приведены на рис. 2.

Видно, что вблизи областей частотного вырождения мод резонатора, где  $r/s$  равно  $1/5, 1/4, 1/6, 3/10, 1/3$  и  $3/8$ , наблюдается падение пороговой мощности накачки,

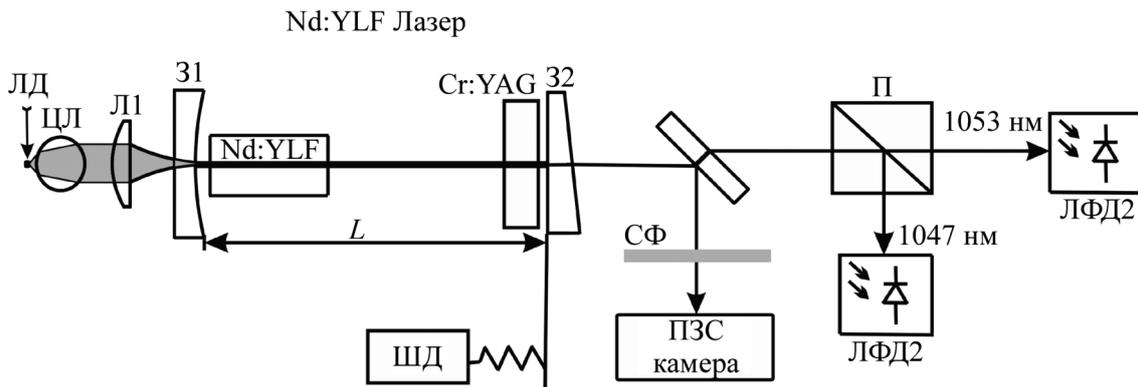


Рис. 1: Схема лазера с пассивной модуляцией добротности, где слева направо: лазерный диод (ЛД), цилиндрическая линза (ЦЛ), сферическая линза (Л1), входное зеркало накачки (31), активный элемент (Nd:YLF), пассивный затвор (Cr:YAG), выходное зеркало резонатора (32), светофильтр (СФ), шаговый двигатель (ШД), поляризатор (призма Глана), лавинный фотодиод (ЛФД2). Длина резонатора  $L$ .

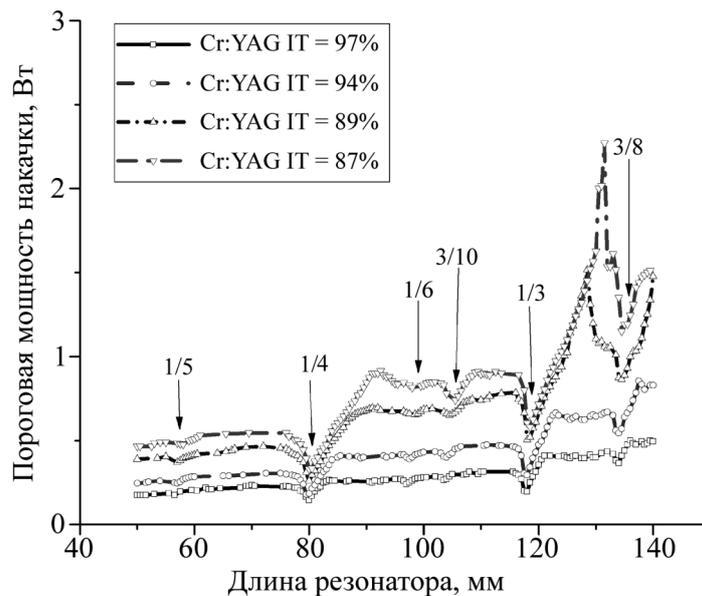


Рис. 2: Зависимости пороговых мощностей накачки от длины резонатора Nd:YLF лазера с разными пассивными затворами  $Cr^{4+}:YAG$ .

что очевидно связано с синхронизацией поперечных мод резонатора. Вблизи областей частотного вырождения мод, где  $r/s$  равно  $1/4$ ,  $3/10$ ,  $1/3$  и  $3/8$ , по мере уменьшения начального пропускания пассивного затвора наблюдается рост пороговой мощности накачки, который приводит к увеличению тепловой нагрузки. Кроме того, становится за-

метен асимметричный рост пороговой мощности вблизи областей вырождения поперечных мод, который связан с проявлением значительных фазовых искажений активной среды, вызванных термооптикой [7].

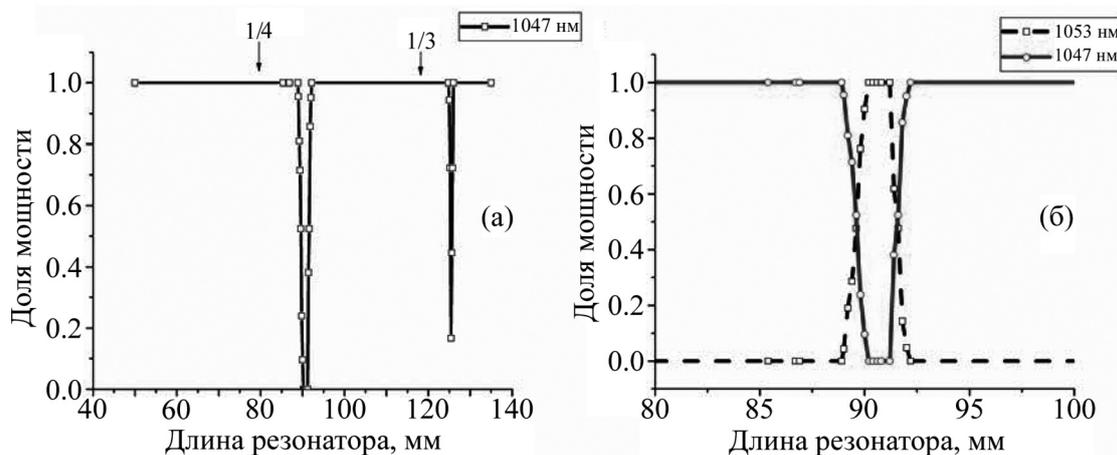


Рис. 3: (а) доля мощности, содержащейся в излучении лазера на длине волны 1047 нм, в зависимости от длины резонатора; (б) доля мощности, содержащейся в излучении лазера на длинах волн 1047 и 1053 нм, в зависимости от длины резонатора в увеличенном масштабе. (Мощность накачки  $P = 2$  Вт.  $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$  с начальными пропусканиями  $T_0 = 97\%$ .)

При повышенной тепловой нагрузке наблюдается пересечение порогов генерации для разных длин волн. Это подтверждается экспериментальной зависимостью доли мощности генерации, приходящейся на компоненту излучения с длиной волны 1047 нм от длины резонатора, представленной на рис. 3(а) и 3(б). Вблизи конфигураций с  $r/s$  равным 1/4 и 1/3 наблюдается переключение длины волны генерации с 1047 на 1053 нм.

Лазер работал в импульсном режиме генерации с частотой повторений 1.2 кГц, со средней мощностью до 0.5 Вт и с длительностью импульса 100 нс. Временные зависимости импульсов генерации на длинах волн 1047 и 1053 нм при длине резонатора 90 мм измерены с помощью двух фотоприемников ЛФД-2 и двухканального осциллографа Tektronix TDS 4032. Разделение пучков генерации по поляризации осуществлялось с помощью призмы Глана. Временной ход излучения для каждой из длин волн представлены на рис. 4(а).

Для подтверждения совпадений во времени импульсов генерации на разных длинах волн, использовалась схема удвоения частоты лазера на кристалле КТР с синхронизмом 2-го типа. Излучение лазера фокусировалось с помощью линзы с фокусным рас-

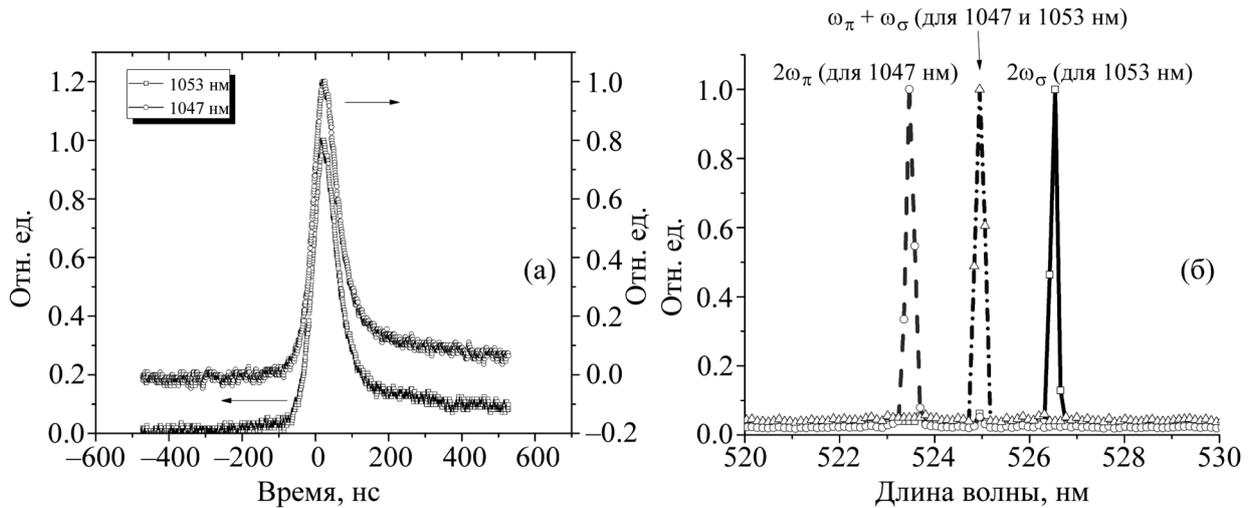


Рис. 4: (а) форма импульсов генерации для длин волн 1047 и 1053 нм, (б) спектр излучения для разных суммарных частот.

стоянием 200 мм на нелинейный кристалл. Путем подбора угла фазового синхронизма были получены не только удвоенные частоты излучения 1047 нм (523.5 нм) и 1053 нм (526.5 нм), но и суммарная частота длин волн 1047 и 1053 нм (525 нм). Результаты измерения спектрального состава преобразованного излучения представлены на рис. 4(б).

В итоге получена двухволновая генерация в Nd:YLF лазере с продольной диодной накачкой в режиме модуляции добротности твердотельным  $\text{Cr}^{+4}$ :YAG затвором. Это открывает перспективы использования полностью твердотельных компактных надежных двухволновых лазеров, востребованных в системах лазерной локации, ТГц-видения и пр.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, соглашение № 14.575.21.0047. Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57514X0047, гранта РФФИ мол\_а 16-32-00834, Бел\_а 16-52-00138, Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов”.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Л. Козлов, *Известия вузов. Приборостроение* **9**, 68 (2009).
- [2] А. А. Angeluts, V. V. Bezotosnyi, E. A. Cheshev, et al., *Las. Phys. Lett.* **11**(1), 015004 (2014).

- [3] В. В. Безотосный, М. В. Горбунков, П. В. Кострюков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **38**(10), 43 (2011).
- [4] A. Penzkofer, Progress in Quantum Electronics **12**(4), 291 (1988).
- [5] P. Zhao, S. Ragam, Y. J. Ding, and I. B. Zotova, Opt. Lett. **36**(24), 4818 (2011).
- [6] V. V. Bezotosnyi, E. A. Cheshev, M. V. Gorbunkov, et al., Applied Optics **47**(20), 3651 (2008).
- [7] В. В. Безотосный, М. В. Горбунков, П. В. Кострюков и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **40**(3), 3 (2013).

Поступила в редакцию 30 ноября 2016 г.