

# YAG:Nd<sup>3+</sup>-ЛАЗЕР С ОБРАЩЕНИЕМ ВОЛНОВОГО ФРОНТА НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ НЕОСНОВНОГО ПЕРЕХОДА ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$

*М. Н. Ершков, С. А. Коровин, А. Н. Пегасина*

ФГБОУ ВПО «Ковровская государственная технологическая академия им. В. А. Дегтярева»,  
г. Ковров Владимирской обл.

## Введение

Твердотельные Nd<sup>3+</sup>-лазеры с высокими энергетическими и пространственными параметрами излучения на длине волны неосновного перехода  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  в области 1,3 мкм являются перспективными источниками когерентной оптической накачки для нелинейно-оптических преобразователей, позволяющих получить генерацию в ближней ИК-области на длине волны 1,5–2,0 мкм. Для получения излучения с высокой энергией или мощностью на длине волны 1,3 мкм требуется применять мощные ламповые или диодные источники накачки, что приводит к возрастанию термооптических искажений в активной среде и ухудшению качества генерируемого излучения. Метод обращения волнового фронта (ОВФ) на голографических решетках, записываемых непосредственно в активной лазерной среде и выполняющих роль зеркала положительной обратной связи (ОВФ-зеркало), позволяет эффективно компенсировать динамические искажения излучения и реализовать генерацию излучения с высокой энергией и качеством, близким к дифракционному, без применения дополнительных управляющих элементов [1–3]. Дифракционная эффективность ОВФ-зеркал, а значит и добротность ОВФ-резонатора, зависят от коэффициента усиления активной среды, поэтому исследуются, в основном, твердотельные лазеры, в которых для ОВФ-генерации используется наиболее «сильный» переход ионов Nd<sup>3+</sup>  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  на длине около 1 мкм [4–7]. В [8] впервые было показано, что применение двухпетлевой схемы записи голографических решеток в активной ИАГ: Nd<sup>3+</sup>-среде позволяет более чем в 2 раза снизить пороговую энергию накачки и почти в 3 раза увеличить энергию ОВФ-излучения при сохранении высокого качества лазерного пучка. Применение данного подхода в [9, 10] позволило реализовать ОВФ-генерацию на длине волны 1,06 мкм в слабо усиливающих ИАГ: Nd<sup>3+</sup>-элементах за счет увеличения числа записываемых голографических решеток при организации многоволнового взаимодействия в активной среде. Ранее в [11] нами была впервые исследована одномодовая генерация ИАГ: Nd<sup>3+</sup>-лазера на длине волны 1,34 мкм с закрытым петлевым ОВФ-резонатором на голографических решетках усиления при мощной ламповой накачке активных элементов и спектральной селекции излучения на  $\lambda = 1,06$  мкм с помощью дихроичных зеркал. Генерация была получена при использовании плоского выходного зеркала с коэффициентом отражения 6 % на  $\lambda = 1,34$  мкм, которое служило для предварительной записи ОВФ-зеркал в активных элементах на начальном этапе развития генерации. Без использования выходного зеркала генерация отсутствовала, что может быть связано с сильным влиянием усиленного спонтанного излучения (УСИ) на  $\lambda = 1,06$  мкм. Поскольку сечение усиления кристалла ИАГ: Nd<sup>3+</sup> на  $\lambda = 1,06$  мкм в 4,7 раза больше, чем на  $\lambda = 1,34$  мкм [12], то спонтанное излучение, усиленное за проход при мощной накачке, способно существенно уменьшить накопленную инверсию населенностей и привести к срыву генерации на слабом неосновном переходе. Целью настоящей работы является исследование генерации ИАГ: Nd<sup>3+</sup>-лазера на  $\lambda = 1,34$  мкм с открытым многопетлевым ОВФ-резонатором на голографических решетках усиления при эффективном подавлении усиленного спонтанного излучения на  $\lambda = 1,06$  мкм.

## Эксперимент

С целью подавления усиленного спонтанного излучения на  $\lambda = 1,06$  мкм было предложено использовать трехпетлевую схему резонатора, ход лучей в которой организуется с помощью спектрально-селективных дихроичных зеркал, полностью отражающих излучение на  $\lambda = 1,34$  мкм и пропускающих на  $\lambda = 1,06$  мкм. Оптическая схема экспериментальной лазерной установки представлена на рис. 1.

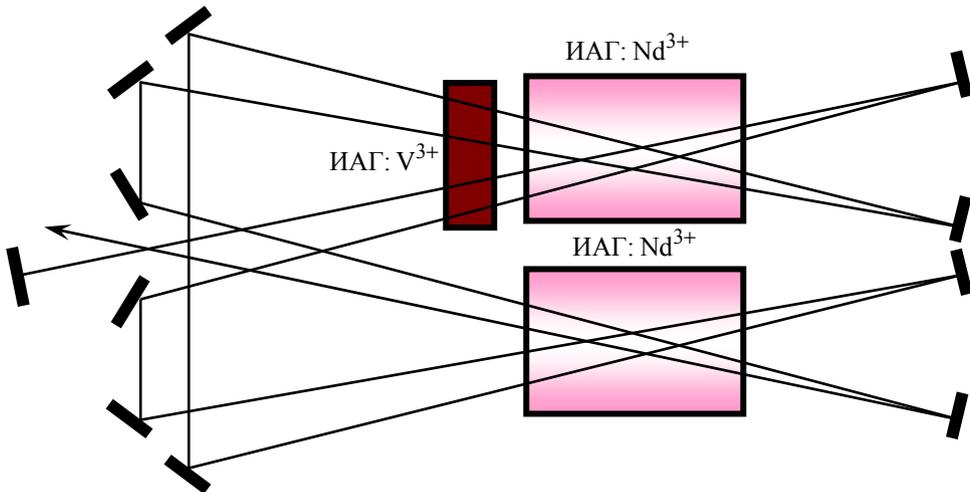
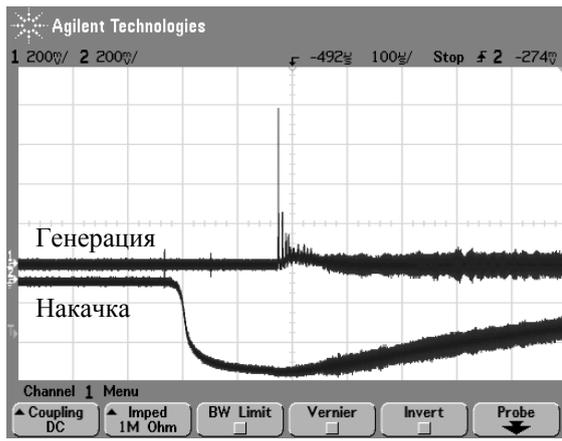


Рис. 1. Оптическая схема экспериментального стенда

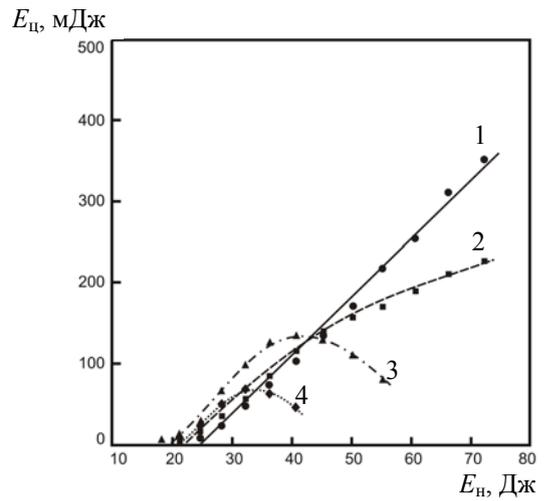
В лазерной системе использованы два ИАГ:  $\text{Nd}^{3+}$ -активных элемента с размерами  $\varnothing 6,3 \times 130$  мм<sup>2</sup> при накачке криптоновыми лампами КДНП-6/120А. Источником питания являлся промышленный четырехканальный блок питания ГНД-13 технологического лазера ЛТИ-130, позволяющий изменять частоту повторения импульсов накачки от 1 до 30 Гц при длительности импульса 400 мкс на полувывоте (емкость накопительных конденсаторов 100 мкФ) и энергии импульса до 72 Дж на одну лампу. Для управления кинетикой генерации и получения режима генерации цугов мощных наносекундных лазерных импульсов в схеме лазера использованы ПЛЗ на кристаллах ИАГ:  $\text{V}^{3+}$  с начальными пропусками  $T_0 = 47, 59$  и  $74$  %. Все зеркала имели отражающее покрытие на длину волны 1,34 мкм с коэффициентом отражения более 99 %. Отражение зеркал на длине волны 1,06 мкм составляло около 4 %.

Сначала были проведены исследования работы лазера в режиме свободной генерации. При тщательной настройке резонатора ОВФ-генерацию удалось получить без использования дополнительного выходного зеркала. Порог генерации составил менее 20 Дж. На рис. 2 показана осциллограмма свободной генерации (верхний канал) на длине волны 1,34 мкм при импульсе накачки (нижний канал) с энергией 40,5 Дж на лампу, а также зависимость выходной энергии лазерного излучения на длине волны 1,34 мкм от энергии импульса накачки при различных значениях частоты повторения импульсов накачки. Осциллограмма получена с помощью лавинного фотодиода ЛФД-2А (для лазерного излучения) и фотодиода ФД256 (для излучения накачки), подключенных к двухканальному осциллографу Agilent 546441А (350 МГц).

Из рис. 2,а видно, что ОВФ-генерация развивается с существенной временной задержкой ( $> 150$  мкс) относительно импульса накачки. Данный факт связан с зависимостью добротности ОВФ-резонатора от коэффициента усиления и является характерным для самостартующей ОВФ-генерации. Из рис. 2,б видно, что при малых частотах повторения импульсов накачки выходная энергия растет линейно и достигает 0,36 Дж при наибольшей энергии импульсов накачки 72 Дж и наименьшей частоте их повторения 2 Гц.



а



б

Рис. 2. Осциллограмма (а) и зависимость энергии излучения (б) в режиме свободной генерации при частоте импульсов накачки 2 Гц (1), 5 Гц (2), 7 Гц (3) и 10 Гц (4)

Нужно отметить, что при повышении частоты повторения импульсов накачки до 7 Гц крутизна начального роста энергетической зависимости увеличивается, что может быть вызвано оптимальными термооптическими условиями для процесса четырехволнового взаимодействия в активной среде лазера, когда интенсивность маломощных внутрирезонаторных пучков повышается благодаря уменьшению их поперечного размера (подфокусировка термлинзой). Однако дальнейшее увеличение энергии импульсов накачки при больших частотах их повторения 7–10 Гц приводит к чрезмерной термлинзе, приводящей к срыву генерации.

Далее были проведены исследования генерации лазера с ПЛЗ, установленными согласно схеме на рис. 1. Было установлено, что при использовании оптически плотных ПЛЗ с начальными пропусканиями 47 и 59 % реализуется режим генерации, идентичный режиму свободной генерации. Режим пассивной модуляции добротности с генерацией цугов наносекундных импульсов был получен при использовании ПЛЗ с начальным пропусканием  $T_0 = 74 \%$ . Осциллограммы, полученные при использовании данных ПЛЗ, представлены на рис. 3.

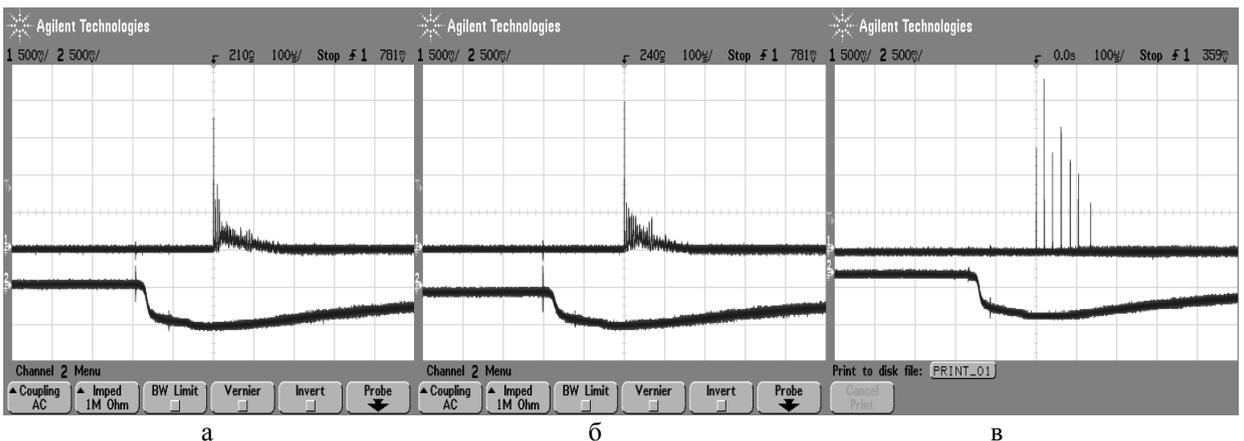


Рис. 3. Осциллограммы генерации при использовании ПЛЗ: а –  $T_0 = 47 \%$ , б –  $T_0 = 59 \%$ , в –  $T_0 = 74 \%$  (энергия импульса накачки 72 Дж, частота импульсов накачки 5 Гц)

Данный факт может быть связан с сильным влиянием усиленного спонтанного излучения на длине волны 1,064 мкм. Применение ПЛЗ создает дополнительные потери в резонаторе, что пре-

пятствует развитию генерации и приводит к накоплению инверсии населенностей и увеличению коэффициента усиления. Под действием накачки интенсивность спонтанного излучения увеличивается не только на длине волны 1,34 мкм, но и на длине волны 1,064 мкм, причем с большей скоростью. Это препятствует росту инверсии населенностей и к моменту просветления ПЛЗ коэффициент усиления не намного превышает порог генерации и модулирующие свойства ПЛЗ не проявляются.

Для лазера с ПЛЗ с  $T_0 = 74\%$  были исследованы энергетические, временные и пространственные параметры ОВФ-генерации. Зависимости энергетических параметров представлены на рис. 4.

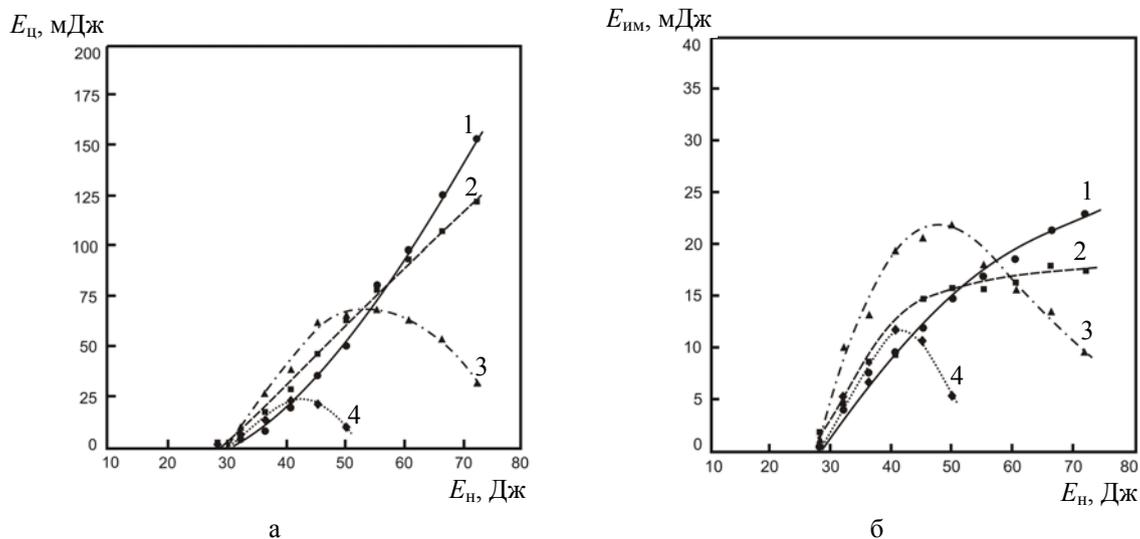


Рис. 4. Зависимости энергии цугов импульсов (а) и отдельного импульса (б) от энергии импульса накачки в режиме пассивной модуляции добротности при частоте импульсов накачки  $f = 2$  Гц (1), 5 Гц (2), 7 Гц (3) и 10 Гц (4)

Порог генерации составил около 30 Дж. Как и в случае свободной генерации, наибольшая энергия излучения достигается при частоте импульсов накачки 2 Гц и энергии накачки 72 Дж. В этом случае генерировался цуг из 7 импульсов с общей энергией 155 мДж. При частоте 5 Гц число импульсов в цуге не изменялось, однако энергия излучения составила 125 мДж при энергии отдельного импульса 18 мДж. При частоте 7–10 Гц число импульсов в цуге и общая энергия излучения уменьшались, что было связано с термолинзой, приводящей к срыву генерации. Из рис. 4 видно, что крутизна роста энергии цуга и отдельного импульса является наибольшей для режима с частотой следования импульсов накачки 7 Гц. В данном случае при энергии накачки 50 Дж достигается максимальная энергия отдельного импульса 22 мДж, также как и при частоте импульсов 2 Гц и энергии накачки 72 Дж.

Результаты измерения временных и пространственных параметров излучения в режиме пассивной модуляции представлены на рис. 5. Измерение длительности импульсов производилось при частоте импульсов накачки 2 Гц и 5 Гц. Как видно из рис. 5,а длительность импульсов уменьшается при увеличении энергии накачки. При частоте 2 Гц наименьшая длительность импульса составила 150 нс, при частоте 5 Гц – 155 нс. Измерение расходимости и параметра качества излучения производилось методом ножа Фуко при фокусировке излучения собирающей линзой с фокусным расстоянием 0,5 м (частота следования импульсов накачки 5 Гц, энергия накачки 60,5 Дж). Было установлено, что в поперечном направлении вдоль осей  $x$  и  $y$  расходимость излучения составила не более 0,7 мрад, параметр качества составил:  $M_x^2 = 1,2$ ;  $M_y^2 = 1,1$ .

Таким образом, в результате выполненной работы была разработана схема трехпетлевого резонатора на голографических решетках, записываемых в ИАГ:  $\text{Nd}^{3+}$ -кристалле, и выполнены измерения энергетических, временных и пространственных параметров ОВФ-генерации на длине волны

1,34 мкм. В режиме свободной генерации максимальная энергия излучения составила 0,36 Дж. В режиме пассивной модуляции максимальная энергия излучения составила 0,155 Дж в цуге из семи импульсов при энергии отдельного импульса 22 мДж и длительности импульса 150 нс. Расходимость излучения составила 0,7 мрад при параметре качества не более 1,2.

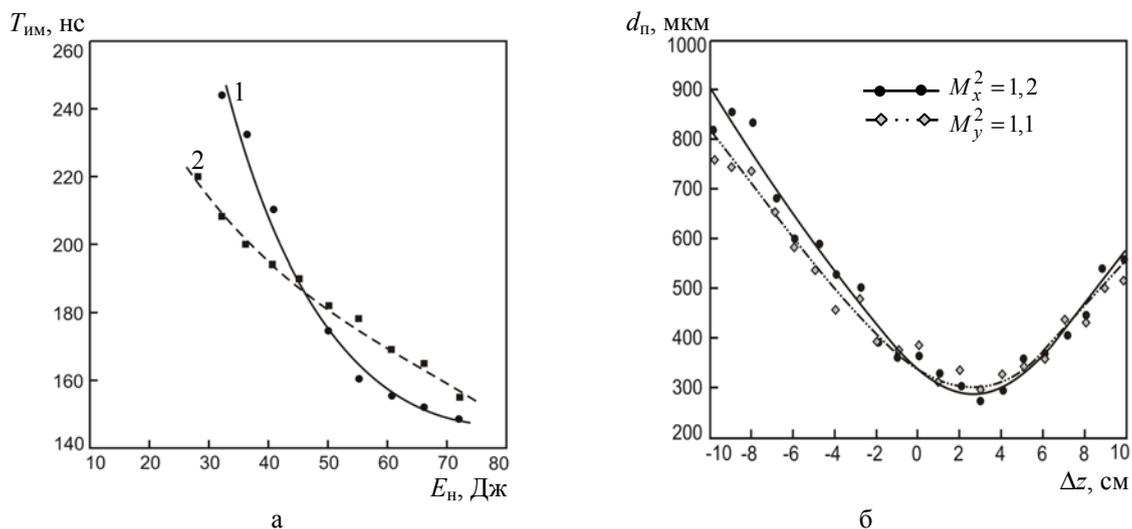


Рис. 5. Зависимость длительности импульса (а) при частоте импульсов накачки 2 Гц (1), 5 Гц (2) и распределение каустики пучка (б) относительно фокуса линзы

### Список литературы

1. Бельдюгин И. М., Золотарев М. В., Киреев С. Е., Одинцов А. И. Лазер на парах меди с самонакачивающимся ОВФ-зеркалом. Квантовая электроника, **13**, 825–827 (1986).
2. Бельдюгин И. М., Беренберг В. А., Васильев А. Е., Мочалов И. В., Петникова В. М., Петровский Г. Т., Харченко М. А., Шувалов В. В. Твердотельные лазеры с самонакачивающимися ОВФ-зеркалами в активной среде. Квантовая электроника, **16**, 1142–1145 (1989).
3. Minassian A., Grofts G. J., Damzen M. J. Self-starting Ti:sapphire holographic laser oscillator. Opt. Lett., **22**, 697–700 (1997).
4. Antipov O. L., Chausov D. V., Kuzhelev A. S., Vorob'ev V. A., Zinoviev A. P. 250-W Average-Power Nd:YAG Laser with Self-Adaptive Cavity Completed by Dynamic Refractive-Index Gratings. IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, **37**, 716–724 (2001).
5. Eremeykin O. N., Antipov O. L., Minassian A., Damzen M. J. Efficient continuous-wave generation in a self-organizing diode-pumped Nd:YVO4 laser with a reciprocal dynamic holographic cavity. Opt. Lett., **29**, 2390–2392 (2004).
6. Soulard A., Brignon S., Raby E., Durand R., Moncorge R. Diode-pumped Nd:YAG self-adaptive resonator with a high-gain amplifier operating at 100 Hz. Appl. Phys. B, **106**, 295–300 (2012).
7. Kaskow M., Zendzian W., Jabczynski J. K., Gorajek L., Kwiatkowski J., Piasecki M. Passively Q-switched Nd:YAG laser with diffractive output resonator. Laser Phys. Lett., **11**, 115813–115818 (2014).
8. Antipov O. L., Eremeykin O. N., Ievlev A. V., Savikin A. P. Diode-pumped Nd:YAG laser with reciprocal dynamic holographic cavity. Optics Express, **12**, 4313–4318 (2004).
9. Pogoda A. P., Lebedev V. F., Makarchuk P. S., Smetanin S. N., Boreysho A. S. All-solid-state Nd:YAG lasers with self-pumped multiwave-mixing phase conjugate cavities. Optical Memory & Neural Networks (Information Optics), **22**, 267–271 (2013).

10. Погода А. П., Сметанин С. Н., Ершков М. Н., Хахалин И. С., Лебедев В. Ф., Борейшо А. С. Голографическая самомодуляция добротности ИАГ:Nd<sup>3+</sup>-лазеров с диодной накачкой и пассивным затвором на кристалле ИАГ:Cr<sup>4+</sup>. Химическая физика, **34**, 15–20 (2015).

11. Басиев Т. Т., Гаврилов А. В., Ершков М. Н., Сметанин С. Н., Федин А. В., Бельков К. А., Борейшо А. С., Лебедев В. Ф. Петлевые лазерные резонаторы на самонакачивающихся ОВФ-зеркала в слабо усиливающих активных средах для сфазированных многоканальных лазерных систем. Квантовая электроника, **41**, 207–211 (2011).

12. Зверев Г. М., Голяев Ю. Д. Лазеры на кристаллах и их применение (М.: Рикел, Радио и связь, 1994).