

## 6. Голографические отражательные решётки брэгга коэффициента усиления и их роль в работе мощных импульсных лазеров

А. П. Погода<sup>1</sup>, А. А. Сергеев<sup>1</sup>, И. С. Хахалин<sup>1</sup>, Е. Э. Попов<sup>1,2</sup>, Н. Л. Истомина<sup>3</sup>, А. С. Борейшо<sup>1</sup>, В. М. Петров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия

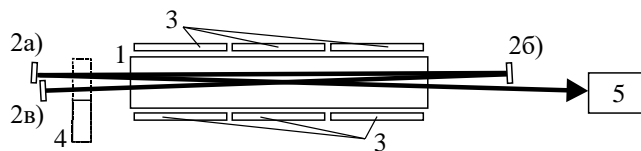
Отражательные решетки Брэгга коэффициента усиления возникают за счёт интерференции распространяющихся в резонаторе волн. Пространственная периодическая модуляция коэффициента усиления активной среды связана с соответствующей периодической модуляцией показателя преломления. В статье приводятся результаты экспериментальных исследований влияния решёток Брэгга на спектры генерации на примере импульсного Nd:YAG лазера. Показано, что при определённом выборе режима формирования отражательных решёток коэффициента усиления, ширина полосы генерации может быть уменьшена в 3 – 5 раз при соответствующем увеличении энергии в импульсе и заметном улучшении пространственного качества пучка.

*Ключевые слова:* Решётки Брэгга, Мощные импульсные лазеры.

*Цитирование:* Погода, А. П. Голографические отражательные решётки брэгга коэффициента усиления и их роль в работе мощных импульсных лазеров / А. П. Погода, А. А. Сергеев, И. С. Хахалин, Е. Э. Попов, Н. Л. Истомина, А. С. Борейшо, В. М. Петров // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 40–47.

### Введение

В современной литературе хорошо известны голографические решётки, возникающие или за счёт периодической модуляции показателя преломления вещества, или за счёт периодической модуляции его коэффициента поглощения. В первом случае принято говорить о решётках показателя преломления, или фазовых решётках  $\Delta n$ , во втором — о решётках коэффициента поглощения вещества, или амплитудных решётках  $\Delta\alpha$  [1]. Строго говоря, изменения показателя преломления связаны с изменением показателя поглощения вещества через соотношение Крамерса — Кронига [2]. Подробное описание механизмов формирования этих типов решёток под действием записывающего света можно найти в [3, 4]. Рассматриваемые в настоящей работе голографические решётки Брэгга возникают за счёт модуляции коэффициента усиления активной среды  $g$ . В результате возникающей интерференционной картины с пространственным периодом  $\Lambda$  происходит соответствующая периодическая модуляция показателя преломления и коэффициента усиления среды. Поскольку длина интерференцион-



1 — активный элемент YAG:Nd<sup>3+</sup>, 2a–2b — зеркала, 3 — светодиодные матрицы накачки СЛИМ-02, 4 — пассивный затвор YAG:Cr<sup>4+</sup>, 5 — система регистрации, включающая в себя эталон Фабри — Перо, камеру OPHIR Spiricon, лавинный фотодиод и широкополосный осциллограф

**Рис. 1.** Схема импульсного ОВФ-лазера

ной картины  $T$  может составлять десятки миллиметров, то относительная спектральная селективность создаваемой ей отражательной решётки может быть оценена как  $\Delta\lambda/\lambda \approx \Lambda/T \approx 10^{-5}-10^{-6}$  [1, 5]. Столь высокая спектральная селективность возникающей решетки влияет на спектральные характеристики генерации.

Пожалуй, впервые, на влияние возникающих в резонаторе отражательных решёток Брэгга было обращено внимание при исследовании самостартующей генерации в лазере с петлевым резонатором без выходного зеркала [6]. Позднее была продемонстрирована возможность увеличения обратной связи за счёт увеличения количества петель прохождения пучка света в резонаторе [7]. Такие резонаторы значительно сужают спектр генерации по сравнению с резонатором Фабри — Перо [8]. Это связано с повышением эффективности конкуренции продольных мод в резонаторе за счет самомодуляции добротности, и с явлением спектральной и угловой селективности записанной в активной среде решетки коэффициента усиления [6]. Селекция одной моды проявляется как в случае свободной генерации [9, 10], так и в режиме пассивной модуляции добротности [11–13].

Вследствие случайности процессов формирования мод в петлевом резонаторе, длина волны излучения лазера может меняться от импульса к импульсу. Стабилизация и контролируемое изменение длины волны важно для ряда прикладных задач спектроскопии и генерации гармоник излучения.

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния как возникающих в активном веществе в процессе генерации, так и устанавливаемых в петлевой резонаторе отражательных решёток Брэгга, на характеристики генерации импульсного лазера использующего в качестве активного элемента YAG:Nd<sup>3+</sup>.

### 1. Стабилизация длины волны излучения

Принципиальная схема импульсного ОВФ-лазера и система измерения спектра излучения представлена на рисунке 1. Поперечная накачка активного элемента 1 YAG:Nd<sup>3+</sup> ( $\varnothing 6,3 \times 110$  мм, Nd<sup>3+</sup> 0,6 ат. %) производилась шестью светодиодными матрицами СЛИМ-02 с суммарной пиковой мощностью излучения 13,9 кВт.

Развиваясь из спонтанной люминесценции, излучение последовательно отражается от зеркал резонатора 2a–2b. Обратная связь в резонаторе обеспечивается самонакачивающи-

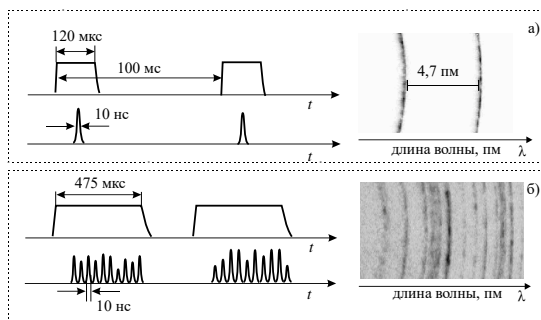


Рис. 2. Спектры генерируемых цугов импульсов (справа) для случаев, когда длительность накачки обеспечивает  $N = 1$  и  $N = 10$  импульсов

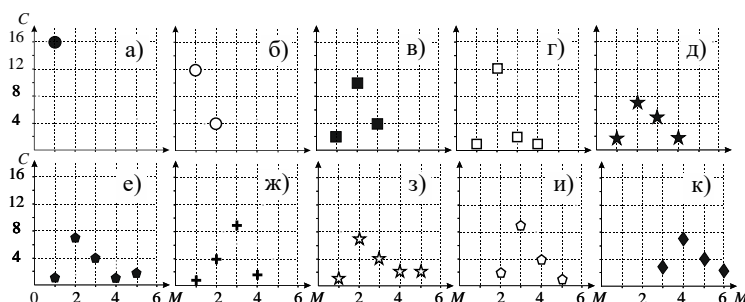
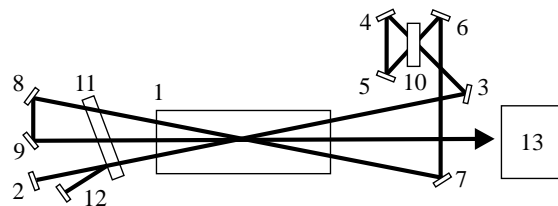


Рис. 3. Количество продольных мод в зависимости от количества импульсов в цуге от  $N = 1$  (а) до  $N = 10$  (к). Вдоль оси X показано число продольных мод в одном импульсе. Вдоль оси Y показано число цугов, в которых зарегистрировано данное число продольных мод.

мися ОВФ-зеркалами в активной среде. Углы схождения пучков не превышают  $1^\circ$ , что обеспечивает пересечение лучей вдоль всей длины активного элемента. Использовался режим пассивной модуляции добротности, для чего в дополнение к самомодуляции добротности за счет перезаписи решеток коэффициента усиления в активной среде, использован пассивный затвор YAG:  $\text{Cr}^{4+}$  4 с начальным пропусканием 10%. Особое внимание было уделено системе регистрации 5 позволяющей с высокой точностью, в линейном режиме одновременно регистрировать спектральные и временные характеристики генерируемых импульсов. На рисунке 3 приведены зависимости, демонстрирующие последовательность импульсов накачки  $E_H$  и импульсов генерации лазера  $E_T$  исследуемых режимов работы. Во всех экспериментах частота следования импульсов накачки составляла 10 Гц, а его длительность менялась в диапазоне 100–475 мкс. Режим модуляции добротности, обеспечивал генерацию цугов из нескольких «гигантских» импульсов. При изменении длительности накачки от 100 до 475 мкс количество импульсов в одном цуге изменялось от 1 (рисунок 2а) до 10 (рисунок 2б).

Одиночный импульс является одномодовым. Спектральная ширина составляет 0,2–0,3 нм независимо от количества импульсов в цуге. Наличие одной продольной моды наблюдается только в случае открытого резонатора с динамической обратной связью предоставляемой решетками коэффициента усиления. При наличии выходного зеркала или дифракционного вывода излучения из закрытого резонатора наблюдается генерация нескольких продольных мод. В режиме генерации последовательности цугов импульсов частота излучения различных импульсов в цуге отличается [14].



1 — активный элемент, 2 и 12 — зеркала, 3–9 и 13–14 — поворотные зеркала,  
10 — пассивный затвор  $\text{LiF:F}_2^-$ , 11 — внешняя решётка Брэгга,  
13 — система регистрации на второй гармонике излучения

**Рис. 4.** Схема самокачивающегося ОВФ-лазера

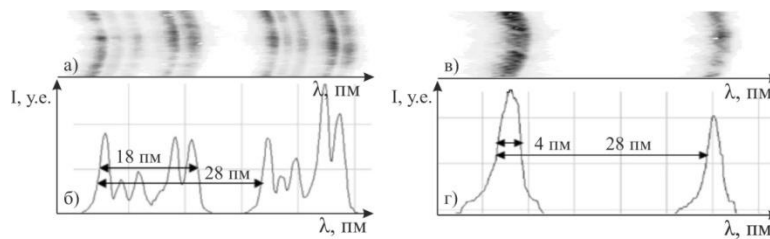
Статистическое исследование зависимости количества продольных мод в спектре генерации одного цуга из  $N$  импульсов позволяет проверить принципиальную возможность получения импульсов с близкой частотой генерации в рамках одного цуга. Для этого одновременно регистрировались осциллограммы и интерферограммы для цугов с различным количеством импульсов. Длительность интервала между генерацией цугов составляет величину порядка 0,1 с, что много больше длительности цуга импульсов (не более  $0,5 \times 10^{-3}$  с). Поэтому предполагается, что термодинамическое состояние активного элемента одинаково для случаев генерации различного количества гигантских импульсов в цуге. Это позволяет оценить спектры излучения для различного количества импульсов в цуге, считая термодинамическое состояние активного элемента идентичным в этих режимах. Для каждого количества импульсов в цуге оценка проводилась по 16 экспериментам. На рисунке 3 изображено распределение количества продольных мод в зависимости от количества импульсов в цуге.

## 2. Сужение спектра генерации ОВФ-лазера

Стабилизация частоты излучения производится в адаптивной лазерной системе с самокачивающимся ОВФ с пассивным лазерным затвором (рисунок 4) при многократном четырехволновом взаимодействии. В процессе развития генерации происходит включение динамического петлевого резонатора. В качестве спектрального селектора использована решетка Брэгга 11. Резонатор образован глухим зеркалом 2 и шестью поворотными зеркалами 3–9. Максимальная энергия накачки составила  $E_p = 10,3$  Дж.

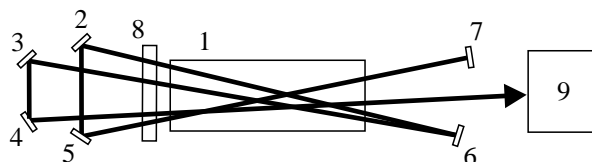
Интервал свободной дисперсии эталона Фабри — Перо составил 28 пм. Для стабилизации частоты была использована пропускающая решётка Брэгга, записанная в фототерморефрактивном стекле [9]. Решетка была записана с помощью УФ излучения He–Cd лазера ( $\lambda = 325$  нм) с учётом длины волны генерации 1064 нм в образце стекла толщиной 1 мм. Угол дифракции на рабочей длине волны составил  $27,1^\circ$ , а дифракционная эффективность — примерно 90%. Её спектральную селективность можно оценить в 0,5 нм (или 150 ГГц), что сопоставимо с шириной полосы усиления неодимового стекла 120 ГГц, а её угловую селективность — в  $0,05^\circ$ .

Нами исследовалось излучение лазера как в случае спектральной селекции с помощью решётки Брэгга 11, так и без нее. Решетка устанавливалась в резонатор перед зеркалом 2 таким образом, чтобы излучение, падающее на зеркало 2, удовлетворяло условию Брэгга. Бла-



*a* и *v* — интерферограммы, *б* и *г* — сечение интерферограммы без/при наличии стационарной брэгговской решетки

**Рис. 5.** Спектры в режиме генерации цуга импульсов



*1* — активный элемент, *2–7* — зеркала, *3–9* и *8* — пассивный затвор, *9* — система регистрации на второй гармонике излучения

**Рис. 6.** Схема ОВФ-лазера

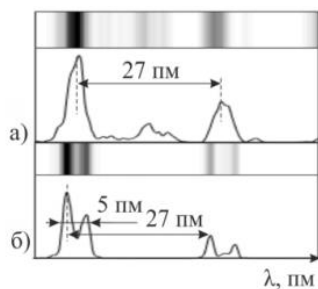
годаря высокой угловой селективности используемой решетки, остальные внутрирезонаторные пучки с решеткой не взаимодействовали, однако, за счет френелевского отражения испытывали потери. Так как дифракционная эффективность решетки превышала 90%, при наличии ее в схеме, зеркало *2* в формировании генерации не участвовало. Вместо этого в первом порядке дифракции было установлено зеркало *12* для обеспечения обратной связи.

На рисунке 5 представлены интерферограммы, полученные в режиме генерации цуга из *11* импульсов, в случае отсутствия и наличия селекции решёткой Брэгга *11*. В первом случае интерферограмма содержит 2–6 продольных мод в рамках одного порядка интерференции. При отсутствии решетки суммарная спектральная ширина составила 18 пм, а при наличии — не превышала 4 пм. Центральная частота излучения оставалась постоянной. Важно, что генерация лазера обладает высокой энергией в импульсе и пиковой мощностью излучения, является одномодовой и одночастотной, что делает лазер полезным для широкого круга практических задач в областях голографии, спектроскопии, генерации гармоник, прецизионной обработке материалов и других.

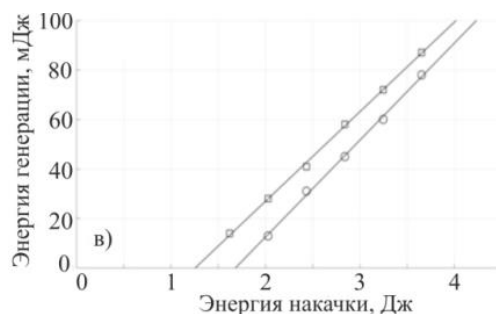
### 3. Сужение спектра генерации

#### с помощью отражательной решетки Брэгга

В данной схеме в качестве селектирующего элемента использовалась отражательная решетка Брэгга (рисунок 6). Сравнение параметров излучения лазера с многопетлевым самонакачиваемым ОВФ-резонатором и аналогичного лазера с внутрирезонаторной решеткой Брэгга выявило, что использование отражательной решетки Брэгга позволяет исключить потери, неизбежные при использовании пропускающей решетки, обеспечивая при этом стабилизацию частоты излучения.



**Рис. 8а.** Интерферограммы полученные на ОВФ (а) ОВФ (б) резонаторе с отражательной решёткой Брэгга



**Рис. 8б.** Зависимость энергии генерации от энергии накачки для многопетлевого резонатора с решеткой Брэгга и без нее.

Максимальная энергия накачки составляла 4 Дж. В сравнительном эксперименте поворотное зеркало 6 заменялось отражательной решеткой Брэгга. Период решетки составил 0,5 мкм, толщина — 17,5 мм, что соответствует спектральной селективности 0,05 нм. Дифракционная эффективность составила более 90 %. Исследование спектра проводилось с помощью эталона Фабри — Перо с интервалом свободной дисперсии 27 пм. На рисунке 7 представлены интерферограммы излучения лазера с резонатором без (рисунок 7а) и с (рисунок 7б) использованием отражательной решетки Брэгга. Ширина спектра генерации уменьшилась примерно с 27,0 пм до 5,3 пм. В результате дифракции на внутрирезонаторной решетке Брэгга когерентность излучения повышается с каждым проходом по резонатору. Это приводит к тому, что коэффициент обратной связи становится спектрально зависимым. Соответственно степень когерентности излучения и коэффициент обратной связи для каждой длины волны отличается. Он определяется степенью соответствия углу Брэгга внутрирезонаторной решетки. В результате введение малых дополнительных спектрально зависимых потерь приводит к существенному изменению спектра генерации. Потери, вносимые на начальных обходах резонатора, позволяют модам с частотой, соответствующей углу Брэгга отражательной решетки снимать инверсию населенностей эффективнее, чем в случае отсутствия решетки, благодаря дополнительным потерям для побочных мод.

Использование отражательной внутрирезонаторной решетки Брэгга позволяет снизить оптические потери по сравнению с использованием пропускающей решетки. На рисунке 8 представлена зависимость энергии генерации от энергии накачки для многопетлевого резонатора с решеткой Брэгга и без нее. Показано, что эффективность лазера составляет 2,5 %, а использование решетки приводит к падению эффективности до 2,2 %. При максимальной накачке в режиме пассивной модуляции добротности энергия излучения в цуге из 6 импульсов составляет примерно 86 мДж и снижается до 78 мДж при использовании внутрирезонаторной решетки. Энергия в одном импульсе составляет 14 мДж и 13 мДж соответственно.

### Заключение

Нами экспериментально продемонстрировано влияние решёток Брэгга, возникающих в активном веществе за счёт пространственной периодической модуляции коэффициента усиления, на спектральные характеристики генерируемого излучения. Продемонстрированы стабилизация длины волны и сужение спектра генерации для различных схем ОВФ-лазера. Проведенное исследование модового состава цугов импульсов в режиме модуляции позволяет сделать заключение о том, что перезапись решетки последующим импульсом цуга не препятствует излучению на той же частоте. Использование пропускающей или отражательной решетки Брэгга в резонаторе позволяет произвести существенное сужение спектра импульса генерации с 18 пм до 4 пм, при энергии в импульсе до 200 мДж, и в цуге 2,5 Дж.

### Список источников

- [1] **Collier, R. J.** Optical Holography / R. J. Collier, C. V. Burckhardt, L. H. Lin. — New York : Acad. Press, 1971.
- [2] **Альперович, Л. И.** Соотношения Крамерса — Кронига для молекулярных спектров жидкостей и растворов / Л. И. Альперович, Н. Г. Бахшиев, Ю. Е. Забиякин, В. С. Либов // Оптика и спектроскопия. — 1968. — Том 24. — С. 60–63.
- [3] **Antipov, O. L.** Resonant two-wave mixing of optical beams by refractive-index and gain gratings in inverted Nd:YAG / O. L. Antipov, S. I. Belyaev, A. S. Kuzhelev, D. V. Chausov // Journal of the Optical Society of America A. — 1998. — Vol. 15. — № 8. — С. 2276–2282.
- [4] **Петров, В. М.** Интерференция и дифракция для информационной фотоники / В. М. Петров, А. В. Шамрай. — С.-Петербург: Лань, 2019.
- [5] **Petrov, V. M.** Optical on-line controllable filters based on photorefractive crystals / V. M. Petrov, S. Lichtenberg // Journal of Optics A: Pure and Applied Optics. — 2003. — Vol. 5. — № 6. — P. S471.
- [6] **Damzen, M. J.** Self-adaptive solid-state laser oscillator formed by dynamic gain-grating holograms / M. J. Damzen, R. P. M. Green, K. S. Syed // Optics Letters. — 1995. — Vol. 20. — № 16. — P. 1704–1706.
- [7] **Pogoda, A. P.** All-solid-state Nd:YAG lasers with self-pumped multiwave-mixing phase conjugate cavities / A. P. Pogoda, V. F. Lebedev, P. S. Makarchuk, S. N. Smetanin, A. S. Boreysho // Optical Memory and Neural Networks. — 2013. — Vol. 22. — № 4. — P. 267–271.
- [8] **Minassian, A.** Spectral filtering of gain gratings and spectral evolution of holographic laser oscillators / A. Minassian, G. J. Crofts, M. J. Damzen // IEEE journal of quantum electronics. — 2000. — Vol. 36. — № 7. — С. 802–809.
- [9] **Бурковский, Г. В.** Малогабаритный Nd:YAG-лазер с поперечной полупроводниковой накачкой и самонакачивающимся фазово-сопряженным многопетлевым резонатором / Г. В. Бурковский, А. В. Федин, А. П. Погода, А. С. Борейшо // Квантовая электроника. — 2016. — Том 46. — № 11. — С. 976–978.
- [10] **Eremeykin, O. N.** Efficient continuous-wave generation in a self-organizing diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> laser with a reciprocal dynamic holographic cavity / O.N. Eremeykin, O. L. Antipov, A. Minassian, M. J. Damzen // Optics letters. — 2004. — Vol. 29. — № 20. — P. 2390–2392.
- [11] **Udaiyan, D.** Self-consistent spatial mode analysis of self-adaptive laser oscillators / D. Udaiyan, G. J. Crofts, T. Omatsu, M. J. Damzen // Journal of the Optical Society of America B. — 1998. — Vol. 15. — № 4. — P. 1346–1352.
- [12] **Antipov, O. L.** Diode-pumped Nd:YAG laser with reciprocal dynamic holographic cavity / O. L. Antipov, O. N. Eremeykin, A. V. Ievlev, A. P. Savikin // Optics Express. — 2004. — Vol. 12. — № 18. — P. 4313–4319.

- [13] **Antipov O. L.** Spatio-temporal mode analysis in self-organizing diode-pumped solid state lasers on dynamic gratings / O. L. Antipov, O. N. Eremykin, A. P. Zinoviev, A. P. Savikin // Solid State Lasers and Amplifiers. — International Society for Optics and Photonics. — 2004. — Vol. 5460. — P. 212–219.
- [14] **Погода А. П.** Голографическая само модуляция добротности ИАГ:Nd<sup>3+</sup>-лазеров с диодной накачкой и пассивным затвором на кристалле ИАГ:Cr<sup>4+</sup> / А. П. Погода, С. Н. Сметанин, М. Н. Ершков, И. С. Хахалин, В. Ф. Лебедев, А. С. Борейшо // Химическая физика. — 2015. — Том 34. — № 8. — С. 15–15.