

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

Исследуется влияние отражательных решёток Брэгга, возникающих в активной среде за счёт пространственной периодической модуляции коэффициента усиления, на спектральные свойства генерируемого излучения 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.

1. Введение

В современной литературе хорошо известны голографические решётки, возникающие либо за счёт периодической модуляции показателя преломления вещества, либо за счёт периодической модуляции его коэффициента поглощения. В первом случае принято говорить о решётках показателя преломления, или фазовых решётках Δn , во втором – о решётках коэффициента поглощения вещества, или амплитудных решётках $\Delta\alpha$ [1]. Строго говоря, изменения показателя преломления связаны с изменением показателя поглощения вещества соотношением Крамера – Кронига [2]. Подробное описание механизмов формирования этих типов решёток под действием запирающего излучения приведено в работах [3, 4].

В настоящей работе рассматриваются голографические решётки Брэгга, возникающие за счёт модуляции коэффициента усиления активной среды g . Как показывает наш опыт исследований, а также разработки мощных импульсных лазеров, такая ситуация характерна для резонаторов, в которых генерируемый пучок света может несколько раз пересекаться сам с собой в активной среде лазера (рис.1). В результате возникновения интерференционной картины с пространственным периодом Λ происходит соответствующая периодическая модуляция показателя преломления и коэффициента усиления среды. Поскольку длина области интерференционной картины T может составлять десятки миллиметров, то относи-

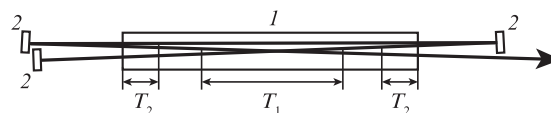


Рис.1. Пример возникновения областей интерференционной картины длиной T_1 и T_2 в активном веществе многопроходного лазера: 1 – активное вещество; 2 – зеркала.

тельная спектральная селективность создаваемой отражательной решётки может быть оценена как $\Delta\lambda/\lambda \approx \Lambda/T = 10^{-5} - 10^{-6}$ [1, 5]. Столь высокая спектральная селективность отражательной решётки влияет на спектральные характеристики генерации.

При исследовании самостартующей генерации в лазере с петлевым резонатором без выходного зеркала, видимо, впервые было обращено внимание на влияние возникающих в резонаторе отражательных решёток Брэгга [6]. Позднее была продемонстрирована возможность увеличения обратной связи за счёт увеличения числа петель прохождения пучка света в резонаторе [7].

Такие резонаторы значительно сужают спектр генерации по сравнению с резонатором Фабри–Перо [8]. Это связано, во-первых, с повышением эффективности конкуренции продольных мод в резонаторе за счёт самомодуляции добротности, а во-вторых, с явлением спектральной и угловой селективности записанной в активной среде решётки 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 контролируемые изменения длины волны важны для ряда прикладных задач спектроскопии и генерации гармоник излучения.

Цель настоящей работы – исследование влияния отражательных решёток Брэгга, как возникающих в активном веществе в процессе генерации, так и устанавливаемых в петлевой резонатор импульсных лазеров, в качестве активного элемента которых используется YAG: Nd³⁺ ($\lambda = 1064$ нм), на спектральные свойства генерируемого излучения.

А.П.Погода, А.А.Сергеев, И.С.Хахалин, А.С.Борейшо. Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, Россия, 190095 С.-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1
Е.Э.Попов. Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова, Россия, 190095 С.-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1; Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49
Н.Л.Истомина. Московский государственный университет геодезии и картографии, Россия, 121467 Москва, ул. Молодогвардейская, 13
В.М.Петров. Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия, 197101 С.-Петербург, Кронверкский просп., 49;
e-mail: vikpetroff@mail.ru

Поступила в редакцию 18 февраля 2020 г., после доработки – 6 апреля 2020 г.

2. Стабилизация длины волны излучения

Принципиальная схема импульсного ОВФ-лазера с обращением волнового фронта (ОВФ-лазера) и система измерения спектра излучения представлены на рис.2.

Поперечная накачка активного элемента 1 – кристалла YAG:Nd^{3+} диаметром 6.3 мм и длиной 110 мм с концентрацией ионов Nd^{3+} 0.6 ат.% – осуществлялась шестью светодиодными матрицами СЛМ-02 3 с суммарной пиковой мощностью излучения 13.9 кВт. Развиваясь из спонтанной люминесценции, излучение последовательно отражается от зеркал резонатора 2. Обратная связь в резонаторе обеспечивается самонакачивающимися ОВФ-зеркалами в активной среде. Углы схождения пучков не превышают 1° , что обеспечивает их пересечение вдоль всей длины активного элемента. Использовался режим пассивной модуляции добротности, для чего в дополнение к самомодуляции добротности за счёт перезаписи решёток коэффициента усиления в активной среде применялся пассивный затвор 4 в виде кристалла YAG:Cr^{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 рис.3 приведены зависимости, демонстрирующие последовательность импульсов накачки и импульсов генерации лазера для исследуемых режимов работы. Во всех экспериментах частота следования импульсов накачки составляла 10 Гц, а их длительность изменялась в диапазоне 100–475 мкс. Режим модуляции добротности обеспечивал генерацию цугов из нескольких «гигантских» импульсов. При изменении длительности импульса накачки от 100 до 475 мкс число импульсов в одном цуге изменялось от 1 до 10 (рис.3).

Излучение одиночного импульса является одномодовым. Его спектральная ширина составляет 0.2–0.3 пм независимо от числа импульсов в цуге. Наличие одной продольной моды наблюдается только в случае открытого

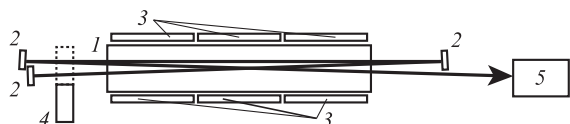


Рис.2. Схема импульсного ОВФ-лазера: 1 – активный элемент YAG:Nd^{3+} ; 2 – зеркала; 3 – светодиодные матрицы накачки СЛМ-02; 4 – пассивный затвор YAG:Cr^{4+} ; 5 – система регистрации, включающая в себя эталон Фабри–Перо, камеру OPHIR Spiricon, лавинный фотодиод и широкополосный осциллограф.

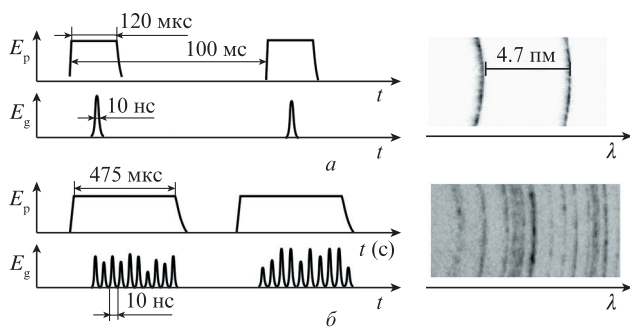


Рис.3. Импульсы накачки E_p , а также цуги генерируемых импульсов E_g и их спектры в случае генерации одного (а) и десяти (б) импульсов.

резонатора с динамической обратной связью, предоставляемой решётками коэффициента усиления. При наличии выходного зеркала или дифракционного вывода излучения из закрытого резонатора возникает генерация нескольких продольных мод. Это связано с тем, что в случае генерации без выходного зеркала обратная связь определяется дифракционной эффективностью решётки, контраст которой зависит от интенсивности излучения на данной длине волны. Эффективность обратной связи тем выше, чем больше интенсивность моды. В то же время выходное зеркало равномерно обеспечивает обратную связь для всех продольных мод резонатора.

В режиме генерации последовательности цугов импульсов частоты излучения импульсов в цуге различаются [14]. Статистическое исследование числа продольных мод в спектре генерации одного цуга из N импульсов позволяет проверить принципиальную возможность получения импульсов с близкой частотой генерации в рамках одного цуга. Поскольку спектр линии усиления в лазере с ОВФ-резонатором без выходного зеркала непрерывен, вероятность генерации не связанных друг с другом импульсов на одной и той же частоте стремится к нулю. При выполнении эксперимента нами проводилась одновременная регистрация осциллограмм и интерферограмм для цугов с различным числом импульсов. Длительность интервала между генерацией цугов составила ~ 0.1 с, что много больше длительности цуга импульсов (не выше 0.5×10^{-3} с). Поэтому предполагается, что термодинамическое состояние активного элемента идентично при генерации различного числа гигантских импульсов в цуге; это позволяет оценить спектры излучения в зависимости от числа импульсов в цуге N . Для каждого числа N оценка проводилась по 16 экспериментам. На рис.4 показано распределение числа продольных мод в зависимости от N .

Нами была зарегистрирована одномодовая генерация для цугов из 6–8 импульсов. Следовательно, перезапись решётки коэффициента усиления не обязательно приводит к смене частоты излучения. Ширина полосы генерации в режиме цугов из нескольких импульсов составляет 2.5 пм, это меньше ширины полосы генерации лазера с резонатором Фабри–Перо. В пределах погрешности она соответствует спектральной селективности решётки коэффициента усиления при данной длине активного элемента, что позволяет объяснить сужение общей ширины полосы в режиме генерации цугов импульсов работой динамической решётки коэффициента усиления как спектрального фильтра.

3. Сужение спектра генерации ОВФ-лазера

Стабилизация частоты излучения осуществляется в адаптивной оптической системе с самонакачивающимся ОВФ-лазером с пассивным затвором (рис.5) при многократном четырёхволновом взаимодействии. В процессе развития генерации происходит включение динамического петлевого резонатора. В качестве спектрального селектора использована решётка Брэгга 11. Резонатор образован глухим зеркалом 2 и семью поворотными зеркалами 3–9. Максимальная энергия накачки равна 10.3 Дж. Интервал свободной дисперсии эталона Фабри–Перо составил 28 пм.

Для стабилизации частоты использовалась пропускающая решётка Брэгга, записанная в фототерморефрактивном стекле [9] с помощью УФ излучения He–Cd-ла-

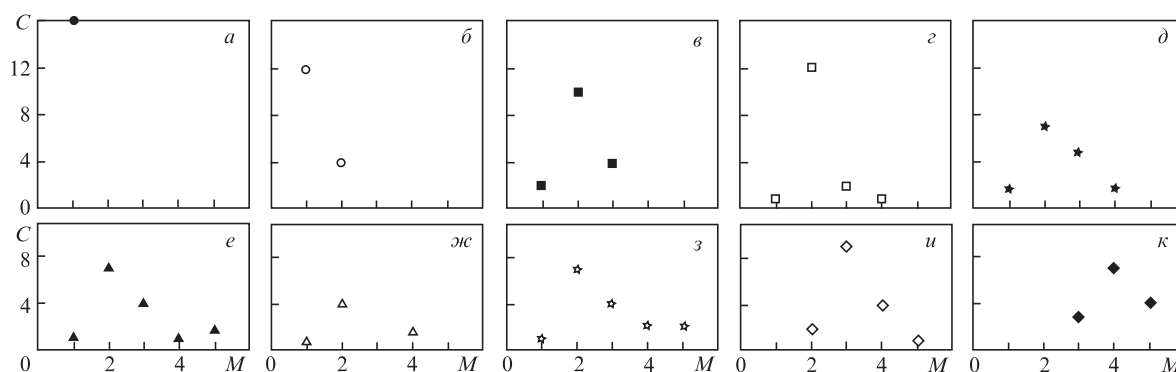


Рис.4. Число продольных мод M в зависимости от числа импульсов в цуге от одного (a) до десяти ($к$) (C – число цугов).

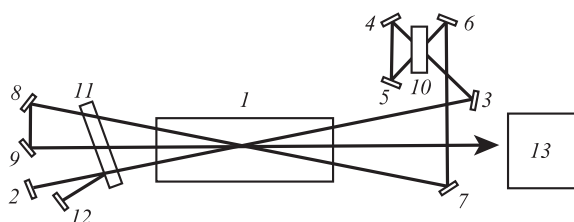


Рис.5. Схема самонакачивающегося ОВФ-лазера: 1 – активный элемент; 2, 12 – зеркала; 3–9, 13 и 14 – поворотные зеркала; 10 – пассивный затвор LiF:F₂; 11 – внешняя решётка Брэгга; 13 – система регистрации второй гармоники излучения.

зера ($\lambda = 325$ нм) с учётом длины волны генерации 1064 нм в образце стекла толщиной 1 мм. Угол дифракции для рабочей длины волны составил 27.1° , а дифракционная эффективность – примерно 90%. Спектральную селективность решётки можно оценить как 0.5 нм (или 150 ГГц), что сопоставимо с шириной полосы усиления неодимового стекла (120 ГГц), а её угловую селективность – как 0.05° .

Исследовалось излучение лазера как в случае спектральной селекции с помощью решётки Брэгга, так и без неё. Решётка устанавливалась в резонатор перед зеркалом 2 таким образом, чтобы падающее на него излучение удовлетворяло условию Брэгга. Благодаря высокой угловой селективности используемой решётки остальные внутрирезонаторные пучки с решёткой не взаимодействовали. Поскольку дифракционная эффективность решётки превышала 90%, при её наличии в схеме зеркало 2 в формировании генерации не участвовало. Излучение попадало в первый порядок дифракции и отражалось от зеркала 12.

Лазерная генерация начинается с шумового излучения в активном элементе. По мере развития генерации пересекающимися пучками в активном элементе записываются пропускающие решётки коэффициента усиления, образующие адаптивный резонатор. На образовавшихся динамических решётках происходит перераспределение поля излучения и обращение его волнового фронта. Решётка Брэгга выделяет центральные компоненты контура усиления, что приводит к стабилизации частоты генерации лазера. Записанные в активной среде динамические решётки в сочетании со стационарной решёткой Брэгга осуществляют селекцию пространственных, спектральных и поляризационных характеристик. Пассивный затвор 10 реализует режим пассивной модуляции добротности и позволяет получить излучение в виде цуга импульсов наносекундной длительности. Энергия цуга составляла до 2.5 Дж, энергия импульса в цуге – до 200 мДж.

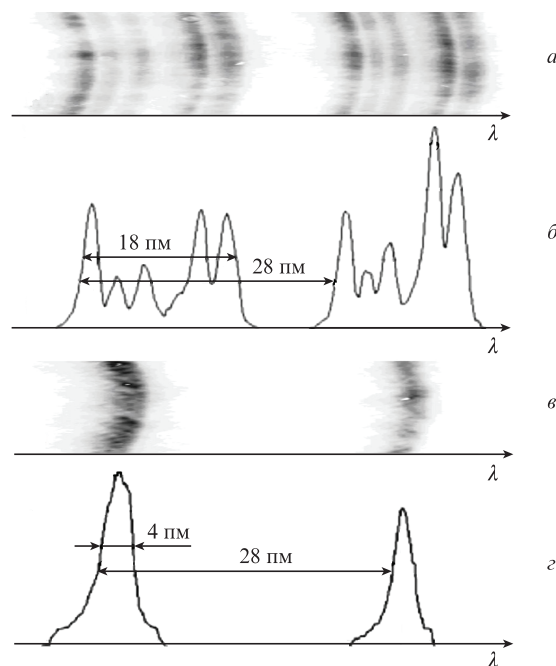


Рис.6. Спектры излучения в режиме генерации цуга импульсов: интерферограммы (a , $в$) и сечения интерферограмм в отсутствие ($б$) и при наличии ($г$) стационарной брэгговской решётки.

На рис.6 представлены интерферограммы, полученные в режиме генерации цуга из 11 импульсов, в случае отсутствия и при наличии селекции с помощью решётки Брэгга. В первом случае интерферограмма содержит 2–6 продольных мод в рамках одного порядка интерференции. Суммарная спектральная ширина в отсутствие решётки составила 18 пм, а при её наличии не превышала 4 пм. Центральная частота излучения оставалась постоянной. Важно отметить, что лазер генерирует импульсы с большими энергией и пиковой мощностью излучения, которое является одномодовым и одночастотным, что делает лазер полезным для широкого круга практических задач голографии, спектроскопии, генерации гармоник, прецизионной обработки материалов и др.

4. Сужение спектра генерации с помощью отражательной решётки Брэгга

Схема ОВФ-лазера с отражательной решёткой Брэгга в качестве селектирующего элемента приведена на рис.7. Сравнение параметров излучения лазера с многопетлевым самонакачивающимся ОВФ-резонатором и анало-

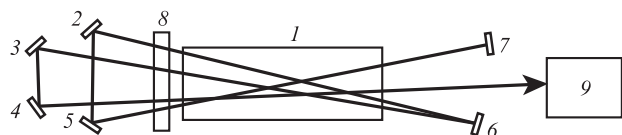


Рис.7. Схема ОВФ-лазера:
1 – активный элемент; 2–7 – зеркала; 8 – пассивный затвор; 9 – система регистрации второй гармоники излучения.

гичного лазера с внутррезонаторной решёткой Брэгга показало, что использование отражательной решётки Брэгга позволяет исключить потери, неизбежные при использовании пропускающей решётки, и обеспечивает при этом стабилизацию частоты излучения. Максимальная энергия импульса накачки составляла 4 Дж.

В данном эксперименте поворотное зеркало 6 заменялось отражательной решёткой Брэгга; её период равен 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 рис.8 представлены интерферограммы излучения лазера с резонатором без отражательной решётки Брэгга и при её наличии. Ширина спектра генерации уменьшилась примерно с 27.0 до 5.3 пм. В результате дифракции на внутррезонаторной решётке 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 различаются. Величина коэффициента определяется степенью соответствия внутррезонаторной ре-

шётки углу Брэгга. В результате введение малых дополнительных спектрально зависимых потерь приводит к существенному изменению спектра генерации.

Использование отражательной внутррезонаторной решётки Брэгга позволяет снизить оптические потери по сравнению со случаем использования пропускающей решётки. Зависимости энергии генерации от энергии накачки для многопетлевого резонатора с решёткой Брэгга и без неё приведены на рис.8. Видно, что эффективность лазера в отсутствие решётки составляет 2.5%, а использование решётки приводит к падению эффективности до 2.2%. При максимальной накачке в режиме пассивной модуляции добротности энергия излучения в цуге из шести импульсов равна примерно 86 мДж и снижается до 78 мДж в случае внутррезонаторной решётки. Энергия в одном импульсе составляет 14 и 13 мДж соответственно.

5. Заключение

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.

Излучение лазеров с многопетлевыми самонакачивающимися ОВФ-резонаторами, несмотря на высокую селекцию частоты за счёт наличия динамических решёток коэффициента усиления, не является в полной мере одночастотным из-за изменения частоты излучения в диапазоне линии усиления. Проведённое исследование модового состава цугов импульсов в режиме модуляции позволяет сделать заключение о том, что перезапись решётки последующим импульсом цуга не препятствует излучению на той же частоте. Показано, что наблюдается также сужение спектра генерации даже импульса в цуге, несмотря на то, что спектральная ширина решётки существенно превышает спектральную ширину импульса генерации и линии усиления. Использование пропускающей или отражательной решётки Брэгга в резонаторе позволяет получить существенное сужение спектра генерируемого импульса с 18 до 4 пм при энергии в импульсе до 200 мДж и в цуге до 2.5 Дж.

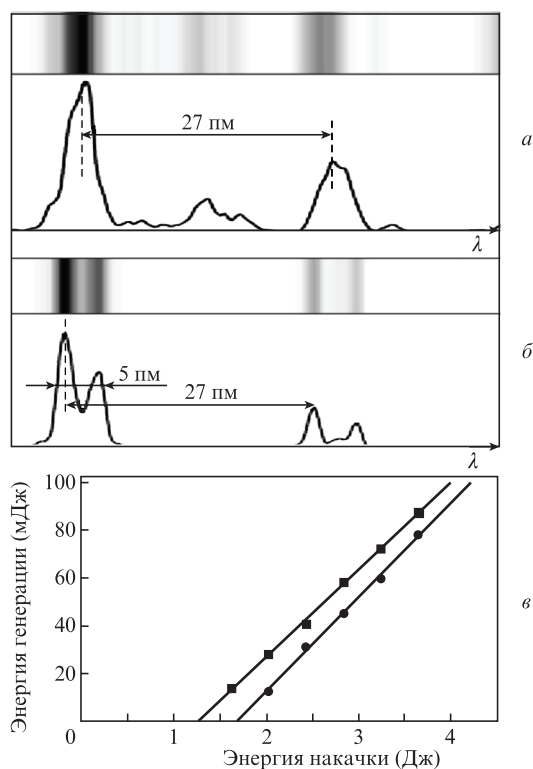


Рис.8. Интерферограммы излучения, полученные для ОВФ-резонатора без решётки (а) и с отражательной решёткой Брэгга (б), а также зависимости энергии генерации от энергии накачки для многопетлевого резонатора с решёткой Брэгга (●) и без неё (■) (в).

1. Collier R.J., Burckhardt C.B., Lin L.H. *Optical Holography* (New York: Academic Press, 1971).
2. Альперович Л.И., Бахшиев Н.Г., Забиякин Ю.Е., Либов В.С. *Оптика и спектроскопия*, **24**, 60 (1968).
3. Antipov O.L., Belyaev S.I., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **15**, 8 (1998).
4. Петров В.М., Шамрай А.В. *Интерференция и дифракция для информационной фотоники* (С.-Пб.: Лань, 2019).
5. Petrov V.M., Lichtenberg S., Petter J., Tschudi T., Chamrai A.V., Bryksin V.V., Petrov M.P. *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.*, **5**, 471 (2003).
6. Damzen M.J. *Opt. Lett.*, **20**, 1704 (1995).
7. Pogoda A.P., Lebedev V.F., Makarchuk P.S., Smetanin S.N., Boreysho A.S. *Opt. Memory and Neural Networks*, **22**, 267 (2013).
8. Minassian A. et al. *IEEE J. Quantum. Electron.*, **36**, 802 (2000).
9. Бурковский Г.В., Федин А.В. и др. *Квантовая электроника*, **46**, 976 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 976 (2016)].
10. Eremeykin O.N., Antipov O.L., Minassian A., Damzen M.J. *Opt. Lett.*, **29**, 2390 (2004).
11. Udaiyan D., Crofts G.J., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **15**, 1346 (1998).
12. Antipov O.L., Eremeykin O.N., et al. *Opt. Express*, **12**, 4313 (2004).
13. Antipov O.L., Eremeykin O.N., Zinoviev A.P., Savikin A.P. *Proc. SPIE*, **5460**, 212 (2004).
14. Погода А.П., Сметанин С.Н. и др. *Хим. физика*, **8**, 15 (2015).