

О применении chirпированной брэгговской решетки в качестве зеркала резонатора пикосекундного Nd:YAG-лазера

А.Е.Зубко, Е.В.Шашков, А.В.Смирнов, Н.С.Воробьев, В.И.Смирнов

Впервые экспериментально показано, что использование объемной chirпированной брэгговской решетки (ОЧБР) в качестве одного из зеркал резонатора пикосекундного Nd:YAG-лазера, работающего в режиме модуляции добротности с самосинхронизацией мод, приводит к значительному изменению временных параметров его излучения. Измерения проводились для двух положений ОЧБР: решетка устанавливалась таким образом, что излучение коротковолновой области спектра, отражаясь от передней части решетки, опережало излучение длинноволновой области, либо решетка поворачивалась на 180° и сначала отражалось излучение длинноволновой части спектра. В первом случае, при сохранении формы и длительности цуга, присущих обычному лазеру с зеркальным резонатором, длительность отдельного импульса в цуге увеличивалась от ~35 до ~300 пс. Во втором случае длительность цуга на полувысоте возрастала от ~70 пс (Nd:YAG-лазер с зеркальным резонатором) до ~1 нс, а длительность отдельного импульса – от 35 пс до ~1.2 нс соответственно, что более характерно для режима свободной генерации.

Ключевые слова: объемные chirпированные брэгговские решетки, пикосекундный лазерный импульс, электронно-оптическая камера.

1. Введение

Объемные брэгговские решетки (ОБР), записанные в фототерморефрактивном стекле [1], нашли широкое применение в лазерной технике благодаря высокой лучевой стойкости, температурной и оптической стабильности, высокой дифракционной эффективности в широком спектральном диапазоне (от видимого до ближнего ИК излучения) и долговечности. Использование ОБР в качестве внутри- или внerezонаторного дифракционного оптического элемента позволяет изменить спектральные, временные и пространственные характеристики лазерного излучения с целью достижения необходимых выходных параметров [2–9].

Новый класс ОБР – это объемные chirпированные брэгговские решетки (ОЧБР), период которых меняется вдоль направления распространения света по определенному закону. Дифракционная эффективность таких решеток остается высокой в широком диапазоне длин волн. Излучение с разными длинами волн отражается от ОЧБР на разной глубине, и таким образом происходит увеличение длительности и появление фазовой модуляции (chirпирование) импульса. Наиболее распространены решетки с линейным chirпом, период которых изменяется по линейному закону. Одно из применений таких ОЧБР описано в работе [10], где предложен и экспериментально осуществлен новый метод временного профилирования сверхкоротких лазерных импульсов, основанный на ин-

терференции chirпированных пучков при отражении от решетки. В последнее время становится весьма перспективным использование ОЧБР в качестве стретчера и/или компрессора в мощных лазерных установках, работающих по методу усиления chirпированных импульсов (CPA – chirped pulse amplification) (см., напр., [11–13] и приведенные в них ссылки).

В настоящей работе исследовалась возможность применения ОЧБР в качестве одного из зеркал резонатора пикосекундного лазера с целью получения выходного chirпированного импульса. Такой лазер может быть использован непосредственно в лазерных системах CPA, что позволяет упростить их оптическую схему.

2. Экспериментальная установка и полученные на ней результаты

Источником оптического излучения служил пикосекундный Nd:YAG-лазер с ламповой накачкой, резонатор которого состоял из сферического зеркала 31 (радиус $R = 1.7$ м) с коэффициентом отражения 95%, находящегося в оптическом контакте с насыщающимся поглотителем К (краситель 3274), и выходного плоского диэлектрического зеркала 32 с коэффициентом отражения 40% или ОЧБР (рис.1). Для выделения основной поперечной моды TEM₀₀ в резонатор лазера помещалась диафрагма Д диаметром 1.7 мм. Лазер работал в режиме модуляции добротности

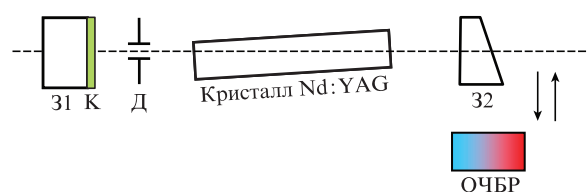


Рис.1. Оптическая схема пикосекундного Nd:YAG-лазера.

А.Е.Зубко, Е.В.Шашков, А.В.Смирнов, Н.С.Воробьев. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: vor@kapella.gpi.ru
V.I.Smirnov. OptiGrate Corp., 562 South Econ Circle, Oviedo, Florida 32765-4311, USA

Поступила в редакцию 4 ноября 2015 г., после доработки – 18 декабря 2015 г.

с самосинхронизацией продольных мод. Пороговое значение энергии накачки было равно ~ 12.5 Дж. Выделение одиночного импульса из цуга осуществлялось с помощью ячейки Поккельса. В таком резонаторе длительность колоколообразного цуга на полувысоте составляла 70 ± 10 нс при длительности одиночного, выделенного из середины цуга, импульса $\tau \approx 35 \pm 5$ пс. Энергия полного цуга была равна 1.3 ± 0.2 мДж, спектральная ширина излучения – 0.3 ± 0.03 нм на центральной длине волны 1064 нм, частота следования цугов – 5 Гц, интервал следования импульсов составлял около 8 нс.

Объемная чирпированная брэгговская решетка, применяемая в эксперименте, была изготовлена в компании OptiGrate Corp. (Orlando, FL, USA) и имела следующие основные характеристики: резонансную длину волны $\lambda_0 = 1064.2$ нм, спектральную ширину 0.84 нм, дифракционную эффективность 93%, коэффициент растяжения 580 пс/нм, апертуру 7.2×6 мм и длину 49 мм. В геометрии, когда ОЧБР, используемая в качестве зеркала лазерного резонатора (рис.1), дает отрицательную дисперсию групповых скоростей (ДГС), отраженное излучение с длинами волн $\lambda \leq \lambda_0$ опережает излучение с длинами волн $\lambda \geq \lambda_0$. При повороте решетки на 180° (положительная ДГС) ситуация меняется на противоположную.

Измерения длительности импульса лазера были проведены с помощью электронно-оптической камеры (ЭОК) типа PS-1/S1 [14], разработанной в Отделе фотоэлектроники ИОФ РАН. Предельное временное разрешение ЭОК, работающей в режиме линейной развертки, составляло ~ 1 пс. Изображение с выходного экрана камеры считывалось ПЗС-матрицей Hamamatsu C8484 и передавалось в компьютер для последующей обработки.

Сначала была измерена длительность лазерного импульса, отраженного от ОЧБР, установленной вне резонатора в режиме стретчера с отрицательной ДГС как рекомендовано в спецификации на решетку. В результате было получено, что отраженный импульс, как правило, имеет колоколообразную форму и его длительность t , измеренная по полувысоте, увеличилась и изменялась от ~ 90 до ~ 140 пс от выстрела к выстрелу. Максимальный коэффициент растяжения t/τ оказался равным ~ 4 . Отметим, что коэффициент растяжения, рассчитанный из паспортных данных на решетку, составил $(0.3 \text{ нм} \cdot 580 \text{ пс/нм})/35 \text{ пс} \approx 5$. Такой разброс длительностей импульсов, отраженных от ОЧБР, может быть связан с изменением длительности и спектральной ширины исходного лазерного импульса. Кроме того, высокая интенсивность излучения внутри активного элемента может привести к появлению фазовой самомодуляции в нем, что, в свою очередь, приведет к возникновению частотной модуляции (чирпа) ис-

ходного лазерного импульса. Более того, при положительной частотной модуляции лазерного импульса [15, 16] («красные» частотные компоненты опережают «синие») может произойти уменьшение суммарного чирпа импульса, отраженного от ОЧБР.

При помещении в лазерный резонатор вместо выходного зеркала ОЧБР в режиме с отрицательной ДГС в лазере сохранился режим модуляции добротности с самосинхронизацией мод, а цуг импульсов имел практически те же форму и длительность, что и цуг, генерируемый Nd:YAG-лазером с зеркалами 31 и 32. При этом пороговая энергия накачки уменьшилась до ~ 10 Дж. Длительность одиночного импульса t , выделенного из центральной части цуга, возросла до ~ 300 пс (рис.2), а коэффициент растяжения t/τ увеличился до ~ 8.5 . По-видимому, в начальный момент развития генерации, когда спектральная ширина линии излучения близка к ширине пика люминесценции кристалла YAG:Nd (0.7–1 нм [17]) и фактически совпадает со спектральной шириной ОЧБР (0.84 нм), эффективность решетки возрастает, что приводит к увеличению t . С другой стороны, уменьшение интенсивности излучения в активном элементе из-за большей длительности импульса может вызвать уменьшение амплитуды положительного чирпа, и его влияние на суммарную величину чирпа оказывается менее ощутимым, чем в описанном выше случае.

При повороте решетки на 180° генерация прекращалась и не возникала даже при максимально возможной энергии накачки, равной 50 Дж. Для запуска лазера при приемлемых энергиях накачки пришлось увеличить коэффициент пропускания насыщающегося поглотителя почти в два раза, что, по всей вероятности, привело к срыву режима модуляции добротности. В этих условиях при пороговой энергии накачки ~ 16 Дж характер генерации стал больше соответствовать режиму свободной генерации с самосинхронизацией мод. Длительность колоколообразного цуга импульсов по полувысоте увеличивалась от 70 нс до ~ 1 мкс. На рис.3,а показана осциллограмма средней части цуга, из которой видно, что при сохранении интервала следования импульсов в цуге (~ 8 нс) длительность отдельных импульсов t значительно увеличилась и составила ~ 1.2 нс. Фотография трех импульсов в цуге, полученная с экрана ЭОК, и микрофотограмма центрального импульса показаны на рис.3,б и в соответственно. В этой оптической схеме лазера синхронизация мод возникает, на наш взгляд, благодаря как насыщающемуся поглотителю, так и наличию ОЧБР, вносящей распределенную обратную связь в резонатор лазера. В отличие от стандартного лазера с распределенной обратной связью, резонатор которого состоит из активной среды, включа-

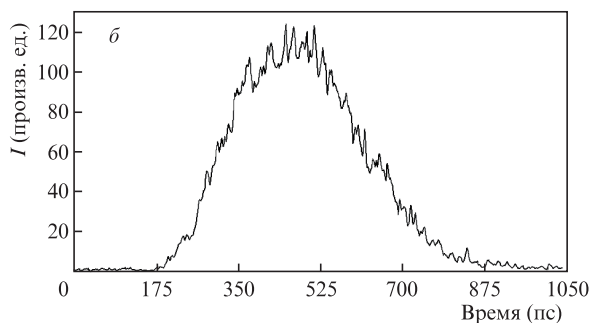
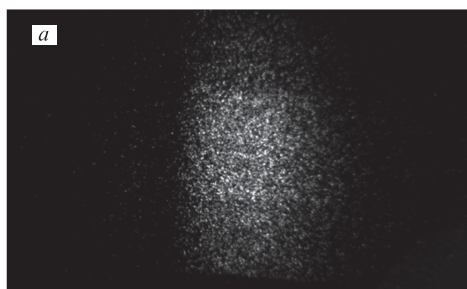


Рис.2. Фотография импульса из центральной части цуга, записанного с экрана ЭОК (а), и его микрофотограмма (б) в геометрии резонатора с отрицательной ДГС.

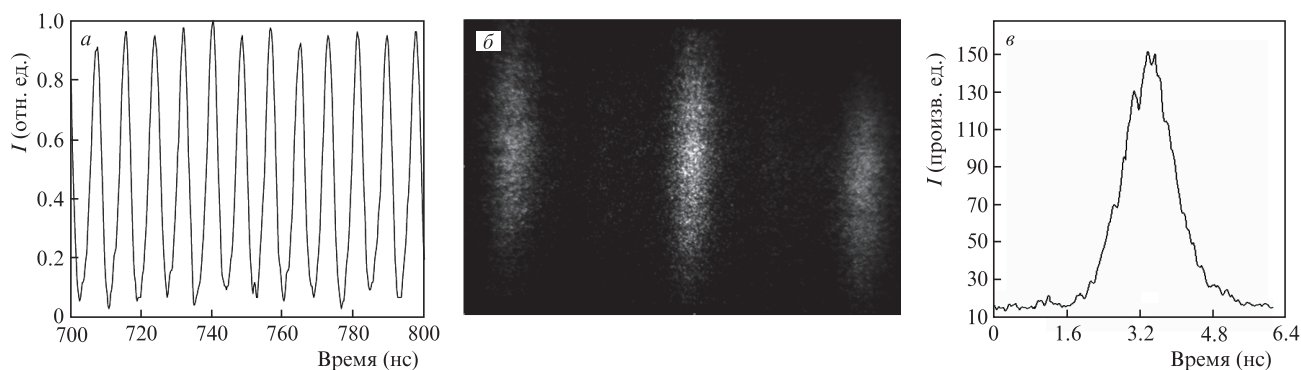


Рис.3. Осциллограмма средней части цуга импульсов (полоса пропускания осциллографа 250 МГц) (а), фотография трех импульсов в цуге, записанных с экрана ЭОК (временной интервал между импульсами 8 нс) (б) и микрофотограмма центрального импульса (в) в геометрии резонатора с положительной ДГС.

ющей в себя периодическую структуру и таким образом осуществляющей спектральную селекцию, ОЧБР является неперидической структурой, сохраняющей полный модовый состав излучения, что может при определенных условиях привести к режиму самосинхронизации продольных мод резонатора лазера.

Отметим также, что во всех трех случаях (зеркальный и решеточные резонаторы) спектральная ширина выходных лазерных импульсов практически не изменялась и оставалась равной 0.3 ± 0.03 нм.

3. Обсуждение результатов

Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что при использовании ОЧБР в качестве выходного зеркала в резонаторе пикосекундного Nd:YAG-лазера происходит значительное изменение временных параметров его излучения. Так, при установке решетки в резонатор в режиме с отрицательной ДГС сохраняется режим модуляции добротности с самосинхронизацией мод, но длительность отдельного импульса увеличивается от ~ 35 до ~ 300 пс (коэффициент растяжения $t/\tau \approx 8.5$). В геометрии с положительной дисперсией характер генерации больше соответствует режиму свободной генерации с самосинхронизацией мод, а длительность отдельного импульса увеличивается до 1.2 нс ($t/\tau \approx 34$). По-видимому, в процессе развития генерации, когда спектральная ширина излучения близка к спектральной ширине ОЧБР, импульс сначала приобретает заметное растяжение. Кроме того, по мере развития генерации, через много проходов импульса внутри резонатора, даже при незначительном положительном chirпе в активном элементе происходит кумулятивный эффект, приводящий к увеличению суммарной амплитуды chirпа.

Заметное различие в характере генерации для двух исследованных положений ОЧБР, используемой в качестве выходного зеркала резонатора Nd:YAG-лазера, вероятно, объясняется нарушением линейности пространственной зависимости периода решетки, которое существенно по-разному проявляет себя при повороте решетки на 180° . Также необходимо отметить, что даже небольшие отклонения закона дисперсии ОЧБР от линейного могут приводить к усилению или ослаблению кумулятивного эффекта.

4. Заключение

В настоящей работе проведены предварительные экспериментальные исследования пикосекундного Nd:YAG-лазера, в резонатор которого вместо выходного зеркала была установлена ОЧБР с целью генерации chirпированного импульса. Генерация таких импульсов получена для двух исследованных положений решетки, но при существенно различных режимах работы лазера. Выяснение причин такого влияния решетки требует проведения дальнейших экспериментов, например по измерению знака и амплитуды chirпа выходного импульса, влиянию параметров ОЧБР на режим работы лазера и т. д., а также теоретических исследований для определения динамики и механизмов работы Nd:YAG-лазера с ОЧБР-зеркалом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-02-00353).

1. Efimov O.M., Glebov L.B., Glebova L.N., Richardson K.C., Smirnov V.I. *Appl. Opt.*, **38**, 619 (1999).
2. Jacobsson J., Pasiskevicius V., Laurell F. *Opt. Lett.*, **31**, 1663 (2006).
3. Vorobiev N., Glebov L., Smirnov V. *Opt. Express*, **16**, 9199 (2008).
4. Rysnyanskiy A., Vorobiev N., Smirnov V., Lumeau J., Glebova L., Mokhun O., et al. *Proc. Int. Soc. Opt. Eng.*, **8385**, 838503 (2012).
5. Chung T., Rapaport A., Smirnov V., Glebov L., Richardson M., Bass M. *Opt. Lett.*, **31**, 229 (2006).
6. Volodin B., Dolgy S., Melnik S., et al. *Opt. Lett.*, **29**, 1891 (2004).
7. McElhenny J.E., White J.O., Rogers S.D., Sanamyan T., Glebov L.B., Mokhun O., Smirnov V.I. *Opt. Express*, **19**, 1685 (2011).
8. Воробьев Н.С., Глебов Л.Б., Смирнов В.И., Чапурин И.В. *Квантовая электроника*, **39**, 43 (2009).
9. Andrusyak O., Smirnov V., Venus G., Glebov L. *Opt. Commun.*, **282**, 2560 (2009).
10. Воробьев Н.С., Маненков А.А., Муравьев А.А., Смирнов А.В., Шашков Е.В. *Квантовая электроника*, **41**, 501 (2011).
11. Kaim S., Mokhov S., Zeldovich B.Ya., Glebov L.B. *Opt. Eng.*, **53**, 051509 (2014).
12. Glebov L., Smirnov V., Rotari E., Cohanoschi I., Glebova L., Smolki O., Lumeau J., et al. *Opt. Eng.*, **53**, 051514 (2014).
13. Hemmer M., Sánchez D., Jelínek M., et al. *Opt. Lett.*, **40**, 451 (2015).
14. Ageeva N.N., Bronevoi I.L., Zabegaev D.N., Krivonosov A.N., Vorob'ev N.S., et al. *Proc. ICHSIP-29* (Mourioka, Japan, 2010).
15. Гурздян Г., Гюзальян Р.Н., Захаркин И.С. *Квантовая электроника*, **14**, 1660 (1987).
16. Басиев Т.Т., Воронько Ю.К., Еськов Н.А., Карасик А.А., Осико В.В., Соболев А.А., Ушаков С.Н., Цымбал Л.И. Патент РФ № 2054772. Приоритет от 20.02.1996.
17. Беловолов М.И., Державин С.И., Машковский Д.А., Сальников К.С., Сысоев Н.Н. и др. *Квантовая электроника*, **37**, 753 (2007).