

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕМНОЙ БРЭГГОВСКОЙ РЕШЕТКИ

Крюков Ярослав Алексеевич (oefimova@otd13.vniief.ru), Червяков Иван Николаевич, Цыкин Виктор Сергеевич, Бантуров Сергей Николаевич, Порубов Роман Викторович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Проведены экспериментальные исследования оптических характеристик образца отражательной объемной брэгговской решетки (ОБР) в условиях воздействия лазерного излучения высокой интенсивности. Определен коэффициент поглощения данного образца ОБР. Проведены экспериментальные исследования спектрального сложения излучения на объемной брэгговской решетке. Эффективность спектрального сложения на данной ОБР составила 95,7 %.

Ключевые слова: волоконный лазер, спектральное сложение, многоканальные лазерные системы, объемная брэгговская решетка, коэффициент поглощения решетки, эффективность сложения.

INVESTIGATION OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF A VOLUME BRAGG GRATING

Kryukov Yaroslav Alekseevich (oefimova@otd13.vniief.ru), Chervyakov Ivan Nikolaevich, Tsykin Viktor Sergeevich, Banturov Sergey Nikolaevich, Porubov Roman Viktorovich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The experimental studies of the optical characteristics of a sample of a reflective volumetric Bragg grating (VBG) under conditions of exposure to high-intensity laser radiation have been carried out. The absorption coefficient of this VBG sample has been determined. The spectral beam combining has been studied experimentally. The efficiency of spectral combining for this VBG is 95,7 %.

Key words: fiber laser, spectral beam combining, multichannel laser systems, volume bragg grating, absorption coefficient, combining efficiency.

Введение

Применение многоканальных лазерных систем на основе высокоэффективных волоконных лазеров представляет большой интерес в целях создания лазерных систем высокой интенсивности излучения. Одним из приоритетных способов сложения лазерных каналов выступает метод спектрального сложения на объемных брэгговских решетках, который позволяет получать высокоинтенсивные лазерные пучки с предельными характеристиками по качеству излучения, близкому к дифракционному пределу [1–3].

Для реализации метода спектрального сложения излучения необходимо создать высокоэффективные оптические системы, на которых реализуются узкополосные лазерные каналы, а также создать эффек-

тивные системы их спектрального совмещения [4]. В представленной работе отражены результаты экспериментальных исследований характеристик образца отражательной объемной брэгговской решетки (ОБР) – ключевого оптического элемента системы спектрального сложения излучения.

При проведении экспериментальных и расчетных работ были поставлены следующие основные цели и задачи:

Провести экспериментальные исследования оптических характеристик образца отражательной ОБР в условиях воздействия лазерного излучения высокой интенсивности.

Определить коэффициент поглощения данного образца ОБР.

Провести экспериментальные исследования спектрального сложения излучения на объемной брэгговской решетке. Определить эффективность спектрального сложения на данной ОБР.

Экспериментальные исследования оптических характеристик объемной брэгговской решетки

Для реализации метода спектрального сложения узкополосных и высокоинтенсивных лазерных каналов на ОБР необходимо иметь образцы решеток, обладающих высокими оптическими характеристиками и позволяющих осуществлять прохождение и отражение мощного лазерного излучения без ухудшения качества лазерного пучка.

В данной работе были проведены исследования на отражательной ОБР: размер решетки составлял 20×20 мм, толщина 2,6 мм.

Были проведены исследования влияния нагрева данного образца ОБР на параметр качества пучка M^2 волоконного лазера RFL-C1500S (диаметр волокна составлял 25 мкм) и волоконного лазера фирмы модель LK-1000-OM (диаметр волокна составлял 15 мкм). Схема измерений показана на рис. 1.

Исследуемая ОБР 4, рис. 1, одновременно облучалась двумя лазерами. Излучение волоконного лазера LK-1000-OM 11 с диаметром волокна 15 мкм и длиной волны 1080 нм после прохождения через ОБР регистрировалось матричной камерой высокого разрешения Ophir-BGS SP928 10. Приемная матрица камеры размещалась в фокусе сферического зеркала 8. Регистрируемое излучение предварительно ослаблялось системой клиньев 5 и 7. Мощность излучения лазера LK-1000-OM составляла 200 Вт. Диаметр пучка излучения на ОБР примерно 8 мм (по уровню 86%). Нагрев решетки регистрировался тепловизором 3.

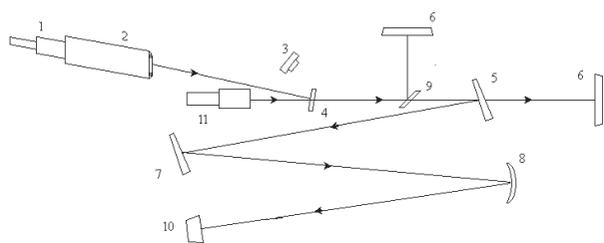


Рис. 1. Оптическая схема измерений влияния нагрева ОБР на качество пучка: 1 – QВН-разъем волоконного лазера RFL-C1500S; 2 – коллиматор P30-001738; 3 – тепловизор FLUKE Ti32; 4 – образец ОБР; 5 и 7 – оптический клин, материал CaF_2 ; 6 – поглощающий экран; 8 – зеркало сферическое, фокусное расстояние 3000 мм; 9 – оптический фильтр ($\rho \geq 99\%$ на 1080 нм); 10 – камера Ophir-BGS SP928; 11 – лазер LK-1000-OM

Излучение волоконного лазера RFL-C1500S 1 с диаметром волокна 25 мкм и длиной волны 1080 нм использовалось в качестве «разогревающего». Мощность излучения порядка 1500 Вт.

Общая мощность пучка, прошедшего через ОБР, составляла примерно 1700 Вт. Диаметр пучка лазера RFL-C1500S на ОБР составлял примерно 7 мм (по уровню 86 %).

Измерения проводились при различном времени воздействия лазеров на ОБР. Было проведено пять измерений с шагом по времени воздействия в 15 с. В каждом измерении камерой регистрировалось распределение излучения лазера в дальней зоне. Затем рассчитывался диаметр пучка излучения согласно ГОСТ Р ИСО 11146-2008 [5].

Проведены измерения диаметра пучка излучения в соответствии с [5] от времени воздействия, одновременно с этим регистрировался нагрев центральной области ОБР. Результаты измерений представлены в табл. 1 и на рис. 2, 3, 4.

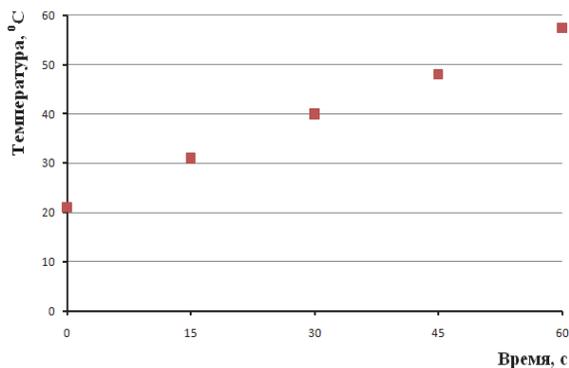


Рис. 2. Зависимость изменения максимальной температуры на образце ОБР от времени воздействия

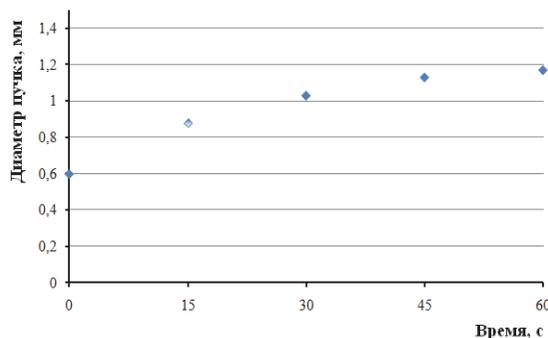


Рис. 3. Зависимость изменения диаметра пучка от времени воздействия

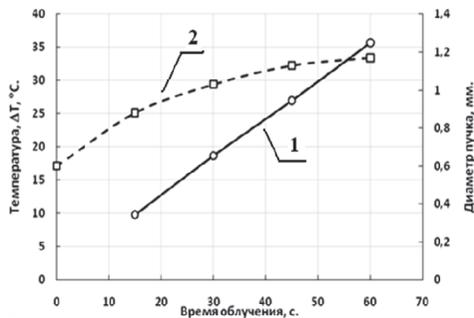


Рис. 4. Зависимость от времени воздействия: 1 – изменения максимальной температуры на образце ОБР, 2 – диаметра пучка

Также регистрировалось распределение температуры на ОБР сразу после прекращения облучения (рис. 5) и распределение температуры на ОБР после установления равномерного профиля температуры на решетке в результате теплопроводности (рис. 6). Результаты измерений представлены на рис. 5 и рис. 6.

Зависимость изменения температуры ОБР от времени воздействия излучения показана на рис. 2. Зависимость изменения диаметра пучка излучения в перетяжке от времени воздействия также показана на рис. 3. Распределения интенсивности излучения в дальней зоне в различные моменты времени представлены в табл.

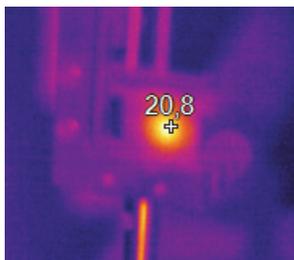


Рис. 5. Типичное распределение температуры на ОБР

Как видно из рис. 5, распределение температуры имеет ярко выраженный пик.

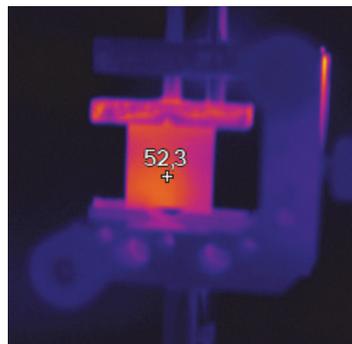


Рис. 6. Типичное распределение температуры на пластинке в момент измерения

Зависимость изменения диаметра пучка излучения в перетяжке от времени воздействия носит экспоненциальный характер, после установления стационарного режима рост диаметра пучка прекращается. Диаметр пятна за 60 с работы увеличивается примерно в 1,9 раза с соответствующим увеличением параметра качества пучка M^2 . За время работы 60 с температура решетки увеличивается не более чем в 2,5 раза (увеличивается на 35 °С).

Влияние нагрева ОБР на параметры пучка волоконного лазера

Время воздействия, сек	Диаметр пучка в перетяжке, мм	Изменение температуры за время воздействия, °С	Распределение интенсивности излучения в фокусе
0	0,6	–	
15	0,88	10	
30	1,03	19	
45	1,13	27	
60	1,17	35,5	

Полученные экспериментальные данные по температурам нагрева ОБР позволяют определить коэффициент поглощения лазерного излучения с длиной волны 1080 нм в материале ОБР. Расчетное значение коэффициента поглощения составило $\approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$.

На рис. 7 показана экспериментальная зависимость температуры ОБР от времени воздействия, а также расчетная зависимость для коэффициента поглощения, который составил $8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$.

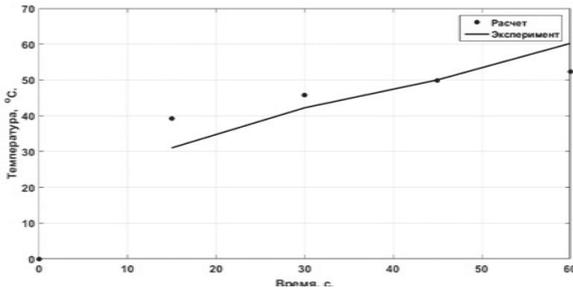


Рис. 7. Расчетная и экспериментальная зависимости температуры от времени воздействия при $\alpha \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$

Таким образом, образец ОБР имеет достаточно низкое значение коэффициента поглощения. Поглощение излучения в ОБР приводит к незначительным искажениям пучков при мощности порядка 1–2 кВт. Образец ОБР применим для сложения излучения мощных волоконных лазеров.

Экспериментальные исследования спектрального сложения излучения на объемных брэгговских решетках

Проведено спектральное сложение двух пучков с помощью отражательной ОБР по схеме, представленной на рис. 8.

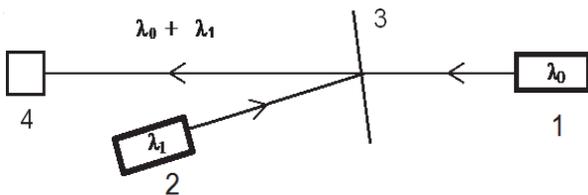


Рис. 8. Оптическая схема спектрального сложения: 1 – узкополосный лазерный источник; 2 – узкополосный лазерный источник; 3 – объемная брэгговская решетка; 4 – измеритель мощности Ophir (матричная камера Ophir-BGS)

В качестве узкополосного лазерного источника 1, рис. 8, использовался лазерный диод мощностью 390 мВт на длине волны 1076,3 нм. В качестве узкополосного лазерного источника 2 использовался лазерный диод мощностью 420 мВт на длине волны 1079,7 нм.

В качестве ОБР использовалась ОБР: размер решетки составлял $20 \times 20 \text{ мм}$, толщина 2,6 мм. ОБР размещена на поворотном столике.

На данной ОБР проведено спектральное сложение двух источников.

Излучение лазерного диода 1, рис. 8, с длиной волны 1076,3 нм (λ_0) проходит через ОБР с минимальными потерями. Излучение лазерного диода 2 с длиной волны 1079,7 нм (λ_1) попадает на ОБР под углом 8° и отражается. Точный угол падения обеспечивается за счет поворотного столика фирмы Standa. Для точного совмещения двух пучков использовались две диафрагмы и визуализатор VRC2 фирмы Thorlabs. Суммарное излучение попадало на измеритель мощности 4. Для анализа профиля пучков использовалась матричная камера высокого разрешения с кремниевой ПЗС-матрицей Ophir-BGS модель SP928.

На рис. 9 и 10 представлены исходные профили пучков лазерных диодов 1 и 2, рис. 8 соответственно. На рис. 11 представлен профиль объединенного пучка.

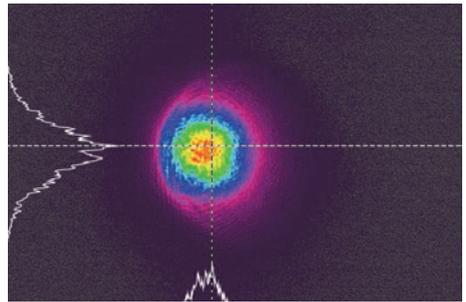


Рис. 9. Профиль пучка лазерного диода 1

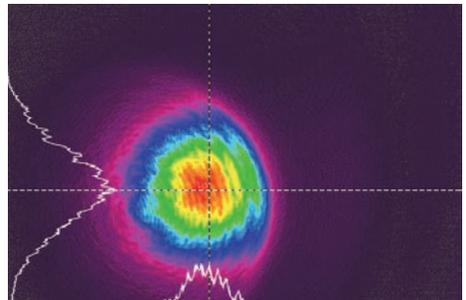


Рис. 10. Профиль пучка лазерного диода 2

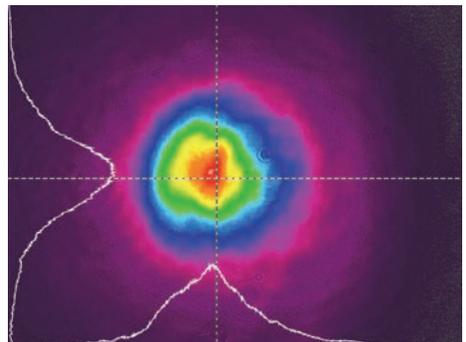


Рис. 11. Профиль суммарного пучка

Разогрева решетки не обнаружено. Мощность излучения суммарного пучка составила 775 мВт.

Таким образом, эффективность спектрального сложения в данном эксперименте составила 95,7 %. Исследуемый уровень мощности излучения не приводит к снижению эффективности дифракции решетки.

Заключение

В результате работ проведены экспериментальные и расчетные исследования элементов системы спектрального сложения излучения.

Проведены экспериментальные исследования оптических характеристик образца отражательной ОБР в условиях воздействия лазерного излучения высокой интенсивности. Определен коэффициент поглощения данного образца ОБР, который составил величину $\approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$.

Проведены экспериментальные исследования спектрального сложения излучения на объемной брэгговской решетке. Определена эффективность спектрального сложения на данной ОБР, равная 95,7 %.

Список литературы

1. Klingebiel S., Röser F., Ortaç B., Limpert J., Tünnermann A. Spectral beam combining of Yb-doped fiber lasers with high efficiency // Opt.Soc. Am. B. 2007. N 24, P. 1716–1720.
2. Loftus T. H., Liu A., Hoffman, P. R. Thomas A. M., Norsen M., Royse R., and Honea E. 522 W average power, spectrally beam-combined fiber laser with near-diffractionlimited beam quality // Opt. Lett. 2007. N 32. P. 349–351.
3. Drachenberg D. R., Andrusyak O., Venus G., Smirnov V., Glebov L. B. Thermal tuning of volume Bragg gratings for spectral beam combining of high-power fiber lasers // Applied Optics. 2014. N 53. P. 1242–1246.
4. Zheng Y., Yang Y., Wang J., Hu M., Liu G., Zhao X., Chen X., Liu K., Zhao C., He B., Zhou J. 10.8 kW spectral beam combination of eight all-fiber super-fluorescent sources and their dispersion compensation // Optics Express. 2016. N 24. P. 12063–12071.
5. ГОСТ Р ИСО 11146-2008 Методы измерений ширины, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков.