

УДК 535.421

ОСОБЕННОСТИ ЗАПИСИ НАЛОЖЕННЫХ ГОЛОГРАММ В ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОМ СТЕКЛЕ

С.А. Иванов^а, Доан Ван Бак^а, А.И. Игнатьев^а, Н.В. Никоноров^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Адрес для переписки: ykkapoh@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 26.01.16, принята к печати 25.04.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-428-435

Язык статьи – русский

Ссылка для цитирования: Иванов С.А., Доан Ван Бак, Игнатьев А.И., Никоноров Н.В. Особенности записи наложенных голограмм в фото-термо-рефрактивном стекле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 3. С. 428–435. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-428-435

Аннотация

Проведен расчет условий записи наложенных голограмм в фото-термо-рефрактивном стекле. Расчет устанавливает связь параметров записи – углом сведения пучков, углом поворота образца относительно биссектрисы угла между записывающими лучами, – и параметрами считывания – углом падения считывающего излучения на элемент и углом первого порядка дифракции на выходе из элемента. Для исследования особенностей записи наложенных голограмм была произведена запись решеток в одном объеме стекла с различными экспозициями. Все образцы проходили термообработку при равных температурах в районе температуры стеклования. Продемонстрировано, что при записи нескольких решеток с суммарной экспозицией, превышающей оптимальное значение для данного материала, суммарное значение амплитуды модуляции первой гармоники показателя преломления соответствует максимально достижимой величине при записи одиночной голограммы. Установлено, что при записи наложенных голограмм с существенными различиями в экспозициях, динамический диапазон изменения показателя преломления распределяется между решетками в согласии с соотношением между временами экспозиций. В ходе работы записан мультиплексор на шесть каналов с рабочей длиной волны 632,8 нм (He-Ne-лазер). Углы дифракции для каждого канала соответствуют расчетным данным. Амплитуда модуляции первой гармоники показателя преломления в каждой голограмме составила значение, равное максимально достижимому значению величины амплитуды модуляции первой гармоники показателя преломления, деленной на общее число наложенных голограмм.

Ключевые слова

фото-термо-рефрактивное стекло, показатель преломления, комбайнер оптического излучения, голограммы, мультиплексор

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации (идентификатор ПНИЭР: RFMEFI58114X0006).

FEATURES OF MULTIPLEXED HOLOGRAMS RECORDING IN PHOTO- THERMO-REFRACTIVE GLASS

S.A. Ivanov^а, Doan Van Bac^а, A.I. Ignatiev^а, N.V. Nikonorov^а

^а ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

Corresponding author: ykkapoh@gmail.com

Article info

Received 26.01.16, accepted 25.04.16

doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-428-435

Article in Russian

For citation: Ivanov S.A., Doan Van Bac, Ignatiev A.I., Nikonorov N.V. Features of multiplexed holograms recording in photo-thermo-refractive glass. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2016, vol. 16, no. 3, pp. 428–435. doi: 10.17586/2226-1494-2016-16-3-428-435

Abstract

We have carried out calculations of recording conditions for multiplexed holograms in photo-thermo-refractive (PTR) glass. The proposed calculation sets the link between such parameters as: the angle between recording beams and the angle of sample rotation, operating wavelength, the angle of incidence on the element, output angle. To study recording features of multiplexed holograms on PTR glass several elements was made. Six holograms in each element were recorded with various exposures. All samples were heat-treated at one temperature around glass transition temperature. It has been demonstrated that at the recording of several gratings with a total exposure exceeding an optimal value for a given material, the total value

of the refractive index modulation amplitude (n_1) reaches the maximum attainable magnitude that is equivalent to a value of a single hologram with optimal exposure. It has been found that refractive index dynamic range of the material distributes between the gratings in accordance with the ratio between exposure times if holograms exposures have significant differences. In the present paper six-channel multiplexer was recorded for a wavelength equal to 632.8 nm (He-Ne laser). The diffraction angles correspond to calculations mentioned above. The n_1 value in each grating is equal to the value of the highest attainable value of the value of n_1 divided by the total number of multiplexed holograms.

Keywords

PTR glass, refractive index, optical radiation combiner, holograms, multiplexer

Acknowledgements

This work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Project No.RFMEFI58114X0006)

Введение

Фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло – это материал на основе стеклообразователя SiO_2 , в состав которого входят модификаторы Na_2O , ZnO , Al_2O_3 , NaF , NaBr , светочувствительные добавки CeO_2 , Ag_2O , являющиеся донорами и акцепторами электронов, и Sb_2O_3 , катионы которого удерживают электроны до высоких температур [1]. В результате фото-термо-индуцированной кристаллизации стекла происходит локальное изменение показателя преломления (Δn), обусловленное ростом микрокристаллов NaF . Данный механизм позволяет реализовать запись голограмм, брэгговских дифракционных решеток, а также различных оптических элементов и устройств на их основе (фильтров, спектральных мультиплексов, комбайнеров лазерных пучков и т.д.), которые сегодня крайне востребованы в телекоммуникационных и лазерных системах.

Ранее уже неоднократно рассматривались мультиплексы на данном материале, как на отдельно стоящих решетках под каждый лазер [2–9], так и на системах наложенных голограмм [10–14], однако все ранее рассмотренные методы использовали отражательные решетки для сложения пучков. В настоящей работе мы рассмотрим мультиплексор на основе пропускающих брэгговских решеток, а также особенности записи наложенных голограмм в ФТР-стекле.

Эксперимент

В работе использовалось стекло, синтезированное в платиновом тигле при температуре 1500 °С, из реактивов ОСЧ на технической базе Университета ИТМО. Для записи голограмм были подготовлены пластинки $10 \times 10 \text{ мм}^2$ и толщиной 1 мм. Характеристики решеток в мультиплексоре проверялись с помощью He-Ne-лазера. Угловое расстояние между каналами составляло 4° при полуширине канала в 0,2 нм. Элементы были записаны с помощью He-Cd-лазера Kimpon IK3501R-G (длина волны – 325 нм, мощность – 50 мВт, TEM_{00}). Все образцы подвергались термической обработке в течение 10 ч при температуре вблизи температуры стеклования.

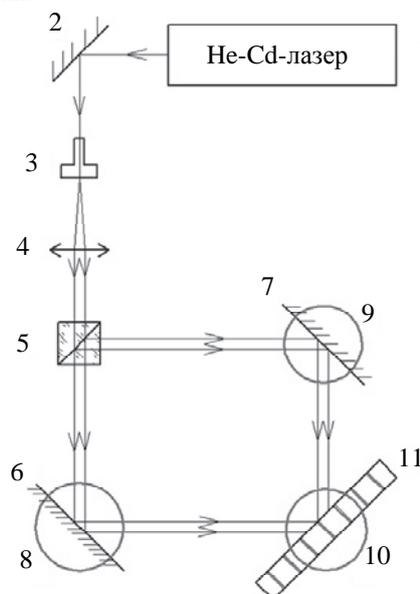


Рис. 1. Схема записи наложенных голограмм в ФТР-стекле: 1 – He-Cd-лазер; 2, 6, 7 – зеркала; 3, 4 – линзы; 5 – неполяризующий светоделительный кубик; 8, 9, 10 – поворотные столики; 11 – образец

Схема записи выглядела следующим образом (рис. 1). Лазерное излучение расширялось и коллимировалось для создания равномерного распределения интенсивности в центральной части пучка (отклонения значения интенсивности от центра к краю пучка лежат в пределах 1%). Затем луч направлялся

на неполяризующий светоделительный кубик 5 (1:1), образующий 2 канала (предметный и опорный), оба пучка сводились на образце при помощи зеркал 6 и 7, установленных на поворотных столиках SR-7012 SmarAct 8 и 9, которые обеспечивают точный контроль угла между пучками. Образец ФТР-стекла 11 также был установлен на поворотном столике 10 для управления углом поворота образца с необходимой точностью. Мощность излучения в месте установки образца составляла $2,2 \text{ мВт/см}^2$, диаметр пучка составляет 15 мм. Так как процесс записи голограмм очень чувствителен к колебаниям схемы и турбулентностям воздуха, экспериментальная установка располагается в отдельной комнате, в которой выключена вентиляция и поддерживается стабильный температурный режим. Дополнительно схема накрывалась защитными коробами для снижения влияния турбулентностей воздуха на процесс записи голограммы. В таком состоянии схема выдерживалась 1 ч.

Угловая селективность голограмм (зависимость интенсивности света в нулевом и первом порядке от угла падения лазерного пучка) измерялась на длине волны He-Ne-лазера ($\lambda = 632,8 \text{ нм}$) по методике, описанной в работе [15]. Дифракционная эффективность (ДЭ) рассчитывалась по формуле $\eta = (I_0 - I_1)/I_0$, где I_0 – интенсивность в нулевом порядке вне условий Брэгга; I_1 – интенсивность в нулевом порядке при условии Брэгга.

Определение амплитуды модуляции первой гармоники показателя преломления (n_1) проводилось с помощью формул Когельника, путем сопоставления расчетного и экспериментально измеренного контура угловой селективности [15]. Расчет значения n_1 проводился согласно следующей формуле

$$\varphi_1 = \frac{\pi n_1 T}{\lambda \cos \theta'}$$

где θ – угол Брэгга; T – эффективная толщина голограммы.

Зависимость дифракционной эффективности η пропускающих фазовых объемных голограмм от величины фазовой модуляции φ_1 носит осциллирующий характер:

$$\eta = \sin^2 \varphi_1,$$

где $\varphi_1 = k\pi \pm \arcsin \sqrt{\eta}$, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Поэтому по измеренным значениям ДЭ однозначное определение φ_1 для высокоэффективных голограмм можно произвести только с учетом формы контура селективности.

Расчет условий записи

Так как в фото-термо-рефрактивном стекле запись проводится на длине волны He-Cd-лазера, а считывание возможно в диапазоне 300–2500 нм, расчет дифракционных элементов значительно усложняется. Создание комбайнера подразумевает, что несколько дифракционных решеток в одном объеме будут выводить излучение по одному направлению. Это приводит к тому, что внутри среды плоскости решеток будут ориентированы не по нормали к поверхности образца. Таким образом, дополнительным аспектом, влияющим на сложность расчета, является поворот образца относительно биссектрисы угла между записываемыми пучками. В нормальной ситуации биссектриса угла между пучками направлена по нормали к поверхности элемента и, таким образом, в результате записи мы получаем решетку, плоскости которой перпендикулярны поверхности образца. Однако когда мы начинаем поворачивать образец относительно биссектрисы угла между записываемыми пучками, плоскости решетки также начинают поворачиваться внутри образца, однако их поворот не соответствует углу поворота образца. Более того, из-за различия в углах падения на образец предметного и опорного лучей период записываемой решетки уже не соответствует периоду интерференционной картины в воздухе. Исходя из этого, для упрощения дальнейших расчетов сложных мультиплексных систем были составлены следующие формулы:

$$\theta_z = \frac{\arcsin \left\{ n \cdot \sin \left[\theta_{\text{Бз}} + \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) - \theta_{\text{Бс}} \right] \right\} + \arcsin \left\{ n \cdot \sin \left[\theta_{\text{Бз}} - \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) + \theta_{\text{Бс}} \right] \right\}}{2},$$

$$\tau = \frac{\arcsin \left\{ n \cdot \sin \left[\theta_{\text{Бз}} + \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) - \theta_{\text{Бс}} \right] \right\} - \arcsin \left\{ n \cdot \sin \left[\theta_{\text{Бз}} - \arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) + \theta_{\text{Бс}} \right] \right\}}{2},$$

$$\text{где } \theta_{\text{Бз}} = \arcsin \left(\frac{\lambda z}{2nd} \right) - \text{угол записи в среде; } \theta_{\text{Бс}} = \begin{cases} \frac{\arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) + \arcsin \left(\frac{\sin \beta}{n} \right)}{2} & \text{если } \beta \geq 0 \\ \frac{\arcsin \left(\frac{\sin \alpha}{n} \right) - \left| \arcsin \left(\frac{\sin \beta}{n} \right) \right|}{2} & \text{если } \beta < 0 \end{cases} - \text{угол считыва-}$$

ния в среде; $d = \frac{\lambda}{2n \sin \theta_{\text{Бс}}}$ – период решетки; n – показатель преломления регистрирующей среды;

λ – длина волны считывания; λ_z – длина волны записи; θ_z – угол между пучками в воздухе; τ – угол поворота образца относительно биссектрисы угла между записывающими пучками.

Приведенный выше расчет позволяет записывать ориентированные в среде решетки исходя из таких параметров, как угол падения считывающего излучения на элемент – α и угол первого порядка дифракции на выходе из элемента – β (рис. 2), при известной рабочей длине волны элемента. Ключевыми параметрами для записи в данном расчете являются углы θ_z и τ .

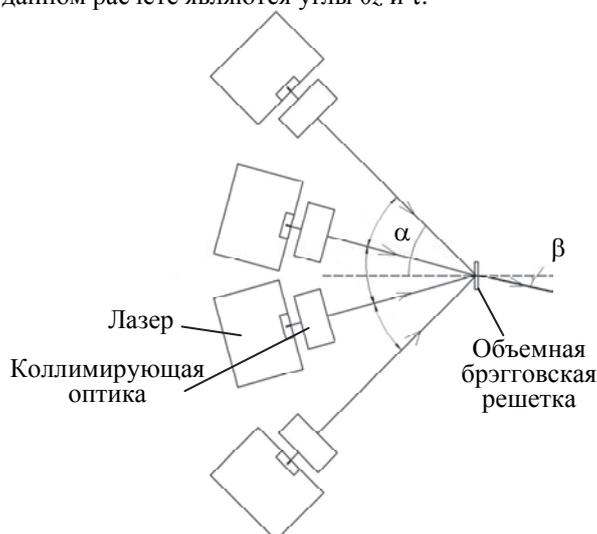


Рис. 2. Комбайнер оптического излучения: α – угол падения на элемент, β – угол, под которым излучение выходит из элемента

Исследование наложенных голограмм

Рассмотрим дозовую зависимость амплитуды модуляции первой гармоники показателя преломления (n_1) для случая записи одиночных голограмм рис. 3 [16].

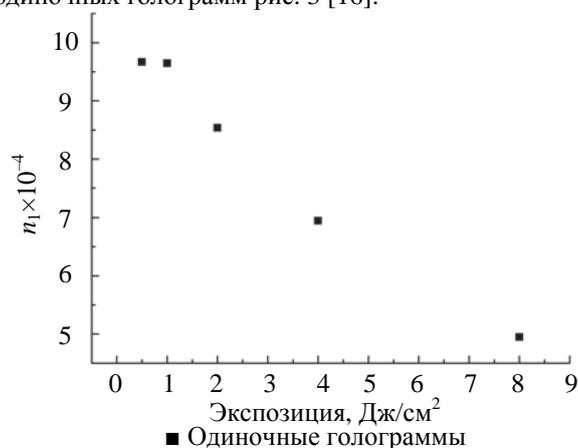


Рис. 3. Зависимость величины n_1 от экспозиции

Из графика (рис. 3) видно, что оптимальная экспозиция, при которой достигается максимальное значение величины n_1 , лежит в районе $0,5 \text{ Дж/см}^2$, что соответствует времени экспозиции в 250 с в используемой схеме записи. Максимальное значение амплитуды модуляции показателя преломления в данном образце составляет $(9-10) \times 10^{-4}$. Таким образом экспозиция для записи шести наложенных голограмм в первом элементе была выбрана равной $0,55 \text{ Дж/см}^2$ (250 с), т.е. все решетки записывались с одинаковой экспозицией.

Параметр	Номер решетки					
	1	2	3	4	5	6
θ_z	7,132	8,127	9,111	10,080	10,031	11,959
τ	13,816	15,719	17,589	19,420	21,202	22,926
α	28	32	36	40	44	48
β	0	0	0	0	0	0

Таблица 1. Параметры записи и чтения наложенных голограмм, градусы

Голограммы были рассчитаны для работы на длине волны He-Ne-лазера 632,8 нм, угловое расстояние между ними составляло 4° , угол α для первой решетки составил 28° , для последней – 48° . Углы сведения пучков θ_z , угол τ , α и β приведены в табл. 1.

Суммарная доза облучения для первого элемента составила $3,3 \text{ Дж/см}^2$, что превышает оптимальное значение для данного материала. Величина n_1 для одиночной голограммы с такой экспозицией составляет примерно 7×10^{-4} . Однако измерение показало, что все решетки имеют одинаковую амплитуду модуляции первой гармоники показателя преломления с учетом незначительных флуктуаций, а суммарное значение величины n_1 оказалось равным $9,5 \times 10^{-4}$, что соответствует значению, полученному для одиночной голограммы с оптимальной экспозицией. Дифракционная эффективность решеток была практически идентичной (рис. 4) в соответствии с разницей в оптических путях внутри элемента.

Во втором эксперименте была проведена запись решеток с незначительными различиями в экспозициях (5–10%).

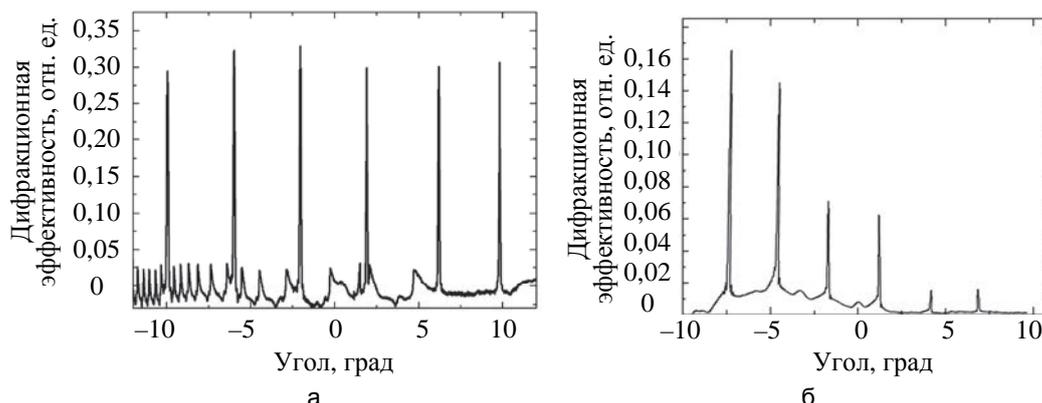


Рис. 4. Шесть каналов первого (а) и третьего элемента (б) записанного элемента

Измерение показало, что в этом случае динамический диапазон изменения показателя преломления также равномерно распределяется между решетками, т.е. амплитуда модуляции первой гармоники показателя преломления во всех решетках одинакова (табл. 2).

Характеристика	Номер решетки					
	1	2	3	4	5	6
ДЭ, %	29	32	30	29	30	30
$n_1 \times 10^{-4}$	1,5	1,6	1,6	1,5	1,6	1,5

Таблица 2. Характеристики наложенных голограмм во втором образце

Третий элемент был записан на образце ФТР-стекла со сниженным содержанием фтора, что приводит к снижению максимально достижимого значения n_1 . Дозовая зависимость для материала в данном случае сохраняется. Запись одиночных голограмм показала, что максимальное изменение амплитуды модуляции показателя преломления в данном образце составляет $3,6 \times 10^{-4}$. Решетки на этом элементе записывались с попарно равными временами экспозиций (рис. 4), минимальное время облучения составило 130 с ($0,29 \text{ Дж/см}^2$), максимальное – 390 с ($0,86 \text{ Дж/см}^2$), а промежуточное – 260 с ($0,57 \text{ Дж/см}^2$). Таким образом, суммарная экспозиция для третьего образца составила $3,44 \text{ Дж/см}^2$. При данной экспозиции, в случае записи одиночной голограммы, величина $n_1 \approx 2,3 \times 10^{-4}$. В табл. 3 приведены параметры голограмм в третьем элементе. Видно, что значение n_1 в решетках хорошо согласуется с соотношением между временами экспозиций (табл. 3), а суммарное значение данной величины составляет $3,5 \times 10^{-4}$.

Характеристика	Номер решетки					
	1	2	3	4	5	6
ДЭ, %	17	15	7	6,5	1,7	1,7
$n_1 \times 10^{-4}$	0,9	0,8	0,6	0,6	0,30	0,30
Экспозиция, с	390	390	260	260	130	130
Доза, Дж/см^2	0,858	0,858	0,572	0,572	0,286	0,286

Таблица 3. Характеристики наложенных голограмм в третьем образце

Таким образом, можно сделать вывод, что в случае записи решеток с экспозициями, различающимися в 1–4 раза, мы получаем распределение динамического диапазона изменения показателя преломления между решетками в соответствии с соотношением между дозами облучения.

Запись мультиплексора

В заключение был записан мультиплексор на шесть каналов с рабочей длиной волны 632,8 нм (He-Ne-лазер). Угловое расстояние между соседними каналами было выбрано равным 4° , чтобы контуры угловых селективностей отдельных решеток не перекрывались и не вносили искажений в измерения. Угол падения (α) составил 28° для 1-ой решетки и 42° – для последней решетки соответственно. Расчет производился таким образом, чтобы дифрагированный пучок от каждой решетки распространялся в направлении, перпендикулярном к грани образца ($\beta = 0^\circ$).

Так как мы используем источник с одной длиной волны, продемонстрировать сложение не представляется возможным, поэтому данный элемент тестировался в обратной геометрии, т.е. выполняя функцию делителя излучения. На практике для некогерентного сложения нескольких источников падающий свет должен отличаться по длине волны [17].

На рис. 5 приведена фотография, на которой видна дифракция излучения от источника на записанном элементе по шести угловым направлениям.

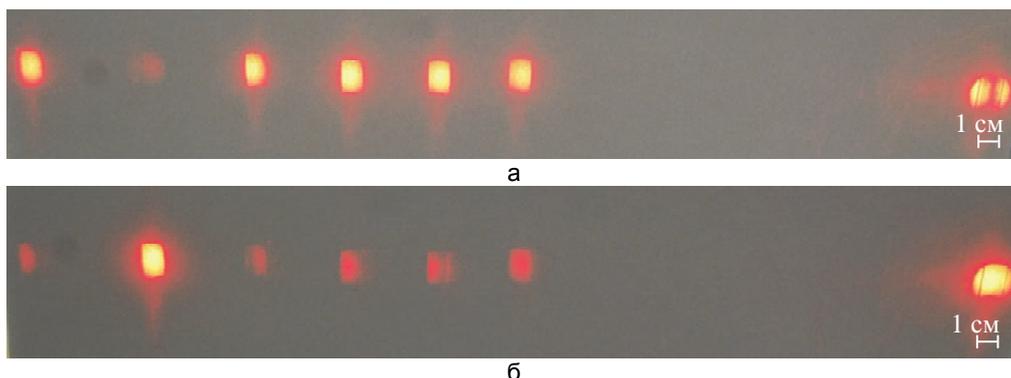


Рис. 5. Дифракция излучения от источника на записанном элементе по шести угловым направлениям: наблюдаемая дифракция на 5-ти согласованных решетках (а); наблюдаемая дифракция на не согласованной решетке (б)

При считывании элемент был установлен таким образом, чтобы излучение He-Ne-лазера падало по нормали к поверхности стекла, таким образом, обеспечивалась возможность наблюдения дифракции на шести голограммах одновременно. Как видно из фотографий (рис. 5, а), в процессе записи удалось хорошо согласовать лишь пять решеток из шести. Несогласованность пятой решетки лежит в пределах контура угловой селективности голограммы, так как мы наблюдаем слабый побочный максимум. Контур селективности голограмм, образующих данный элемент, обладает полушириной в $0,2^\circ$, таким образом, можно оценить ошибку в положении образца при записи. Также на фотографии видно, что не все дифракционные отклики лежат на одной линии. Это обусловлено тем, что в процессе записи для каждой решетки был свой угол сведения записывающих лучей, из-за чего образец ФТР-стекла приходилось перемещать вдоль биссектрисы угла между пучками, что приводило к небольшому повороту образца вокруг нормали к поверхности стекла.

Заключение

В работе была проведена запись наложенных голограмм на фото-термо-рефрактивном стекле. Было продемонстрировано, что при записи нескольких решеток с суммарной экспозицией, превышающей оптимальное значение для данного материала, суммарное значение амплитуды модуляции первой гармоники показателя преломления соответствует максимально достижимой при записи одиночной голограммы величине.

Установлено, что при записи наложенных голограмм с существенными различиями в экспозициях динамический диапазон изменения показателя преломления распределяется между решетками согласно соотношению между временами экспозиций.

Также был проведен расчет условий записи решеток, которые ориентированы внутри среды, т.е. плоскости решетки не перпендикулярны плоскости элемента. Данный расчет устанавливает связь параметров записи, таких как угол сведения пучков и угол поворота образца относительно биссектрисы угла между записывающими лучами и параметрами считывания, а именно, угла падения считывающего излучения на элемент и угла первого порядка дифракции на выходе из элемента.

Для проверки полученных зависимостей был записан мультиплексор на шесть каналов с рабочей длиной волны 632,8 нм (He-Ne-лазер). Углы дифракции для каждого канала соответствуют заданным в нашем расчете. Амплитуда модуляции первой гармоники показателя преломления в каждой голограмме оказалась равной максимально достижимому значению величины n_1 , деленной на общее число наложенных голограмм.

Литература

1. Glebova L., Chamma K., Lumeau J., Glebov L. Photo-thermo-refractive glass - properties and applications // Proc. Conf. on Advances in Optical Materials. Istanbul, Turkey, 2011. Art. AIThC2. doi: 10.1364/AIOM.2011.AIThC2
2. Andrusyak O., Smirnov V., Venus G., Vorobiev N., Glebov L. Applications of volume Bragg gratings for spectral control and beam combining of high power fiber lasers // Proceedings of SPIE. 2009. V. 7195. Art. 71951Q. doi: 10.1117/12.813402
3. Andrusyak O., Ciapurin I., Smirnov V., Venus G., Glebov L. Spectral beam combining of fiber lasers with increased channel density // Proceedings of SPIE. 2007. V. 6453. Art. 64531L. doi: 10.1117/12.712602
4. 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. V. 53. N 6. P. 1242–1246. doi: 10.1364/AO.53.001242
5. Drachenberg D.R., Andrusyak O., Venus G., Smirnov V., Lumeau J., Glebov L.B. Ultimate efficiency of spectral beam combining by volume Bragg gratings // Applied Optics. 2013. V. 52. N 30. P. 7233–7242. doi: 10.1364/AO.52.007233
6. Andrusyak O., Drachenberg D.R., Smirnov V., Venus G., Glebov L. Fiber laser system with kW-level spectrally-combined output // Proc. 21st Annual Solid State and Diode Laser Technology Review, SSDLTR-2008 Technical Digest. Albuquerque, 2008.
7. Ott D., Segall M., Divliansky I., Venus G., Glebov L. High-contrast filtering by multipass diffraction between paired volume Bragg gratings // Applied Optics. 2015. V. 54. N 31. P. 9065–9070. doi: 10.1364/AO.54.009065
8. Laskin A., Drachenberg D., Mokhov S., Venus G., Glebov L., Laskin V. Applying refractive beam shapers for spectral beam combining with volume Bragg gratings // Proceedings of SPIE. 2012. V. 8433, Laser Sources and Applications. Art. 84330L. doi: 10.1117/12.922893
9. Divliansky I., Ott D., Anderson B., Drachenberg D., Rotar V., Venus G., Glebov L. Multiplexed volume Bragg gratings for spectral beam combining of high power fiber lasers // Proceedings of SPIE. 2012. V. 8237, Fiber Lasers IX: Technology, Systems, and Applications. Art. 823705. doi: 10.1117/12.909519
10. Lu C.A., Newell T.C., Glebov L., Balakrishnan G. Wavelength beam combining of VECSELs using multiplexed volume Bragg gratings in a compound cavity // Electronics Letters. 2015. V. 51. N 6. P. 508–510. doi: 10.1049/el.2014.4111
11. Lu C.A., Roach W.P., Balakrishnan G., Albrecht A.R., Moloney J.V., Glebov L.B. Beam combination of multiple vertical external cavity surface emitting lasers via volume Bragg gratings // Proceedings of SPIE. 2014. V. 8966, Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELs) IV. Art. 89660Y. doi: 10.1117/12.2039666
12. Ingersoll G.B., Leger J.R. Channel density and efficiency optimization of spectral beam combining systems based on volume Bragg gratings in sequential and multiplexed arrangements // Applied Optics. 2015. V. 54. N 20. P. 6244–6253. doi: 10.1364/AO.54.006244
13. Glebov A.L., Mokhun O., Rapaport A., Vergnole S., Smirnov V., Glebov L.B. Volume Bragg gratings as ultra-narrow and multiband optical filters // Proceedings of SPIE. 2012. V. 8428. Art. 84280C. doi: 10.1117/12.923575
14. Ott D., Divliansky I., Anderson B., Venus G., Glebov L. Scaling the spectral beam combining channels in a multiplexed volume Bragg grating // Optics Express. 2013. V. 21. N 24. P. 29620–29627. doi: 10.1364/OE.21.029620
15. Кучинский С.А., Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Савин В.В., Туниманова И.В. Свойства объемных фазовых голограмм на мультихромных стеклах // Оптика и спектроскопия. 1991. Т. 70. № 6. С. 1296–1300.
16. Иванов С.А., Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Асеев В. Голографические характеристики модифицированного фототерморефрактивного стекла // Оптический журнал. 2014. Т. 81. N 6. С. 72–77.
17. Fohrmann L.S., Petrov A.Yu., Lang S., Jalas D., Krauss T.F., Eich M. Single mode thermal emission // Optics Express. 2015. V. 23. N 21. P. 27672–27682. doi: 10.1364/OE.23.027672
18. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973.

<i>Иванов Сергей Александрович</i>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, ukkaroh@gmail.com
<i>Доан Ван Бак</i>	– аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, vanbacdoan@yahoo.com.vn
<i>Игнатьев Александр Иванович</i>	– заведующий лабораторией, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, alexandre_ignatiev@yahoo.com
<i>Никоноров Николай Валентинович</i>	– доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Nikonorov@oi.ifmo.ru

- Sergey A. Ivanov* – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ykkapoh@gmail.com
- Doan Van Bac* – postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, vanbacdoan@yahoo.com.vn
- Alexander I. Ignatiev* – Head of laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, alexandre_ignatiev@yahoo.com
- Nikolay V. Nikonorov* – D.Sc., Professor, Head of Chair, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Nikonorov@oi.ifmo.ru