

Свойства многослойных неоднородных голографических структур

Е.Ф.Пен, М.Ю.Родионов

Представлены результаты экспериментов и анализа свойств многослойных неоднородных голографических структур, сформированных в фотополимерных материалах. Подтверждены теоретические предположения о том, что характеристики угловой селективности рассмотренных структур имеют ряд локальных максимумов, количество и ширина которых определяются толщиной промежуточных слоев и объемных голограмм, а огибающая этих максимумов совпадает с контуром селективности одной голографической решетки. Вместе с тем экспериментально показано, что неоднородности голограмм существенно искажают вид характеристик селективности: они становятся несимметричными, локальные максимумы имеют различную величину, глубина локальных минимумов уменьшается. Путем подбора параметров неоднородностей достигнуто сходство экспериментальных данных и результатов моделирования.

Ключевые слова: голография, многослойные структуры, неоднородности, фотополимерный материал

1. Введение

Свойства объемных пропускающих и отражательных голографических решеток детально изучены Г.Когельником [1] и другими авторами, показавшими, что такие решетки наряду с большой дифракционной эффективностью имеют высокую угловую и спектральную селективность. Структуры, состоящие из разделенных оптически однородными промежуточными слоями нескольких объемных решеток, характеризуются особыми свойствами, обусловленными интерференцией волн, восстановленных из каждой решетки, и предоставляют возможность управления видом селективного отклика. Подобные структуры могут быть использованы при создании элементов оптических межсоединений, мультиплексоров/демультиплексоров в оптических линиях связи, спектральных фильтров, сенсоров и поэтому являются объектом специальных исследований [2–6].

В [2] рассмотрены структуры, состоящие из разделенных промежуточными слоями тонких решеток, представлена аналитическая модель для расчета их дифракционной эффективности и обсуждается возможность применения этих решеток в качестве спектральных фильтров. В [3, 4] подобные структуры называют SVHOE (Stratified Volume Holographic Optical Elements). В [4] для получения голограмм используют фотополимерный материал (ФПМ) фирмы DuPont (США). Сравниваются экспериментальные и расчетные данные для многослойных структур, состоящих из тонких голограмм, и предполагается, что причины их расхождения обусловлены влиянием неоднородностей в голограммах, однако собственно изучение этих неоднородностей не проведено. В [5] показано, что характеристи-

ки угловой селективности исследуемых структур имеют ряд локальных максимумов, ширина которых определяется суммарной толщиной всей системы (включая промежуточные слои), а огибающая этих максимумов совпадает с контуром селективности одной решетки. В [6] аналогичные структуры называют MVHG (Multilayer Volume Holographic Grating) и рассматривают их дифракционные свойства применительно к прохождению ультракоротких (~ 50 фс) световых импульсов. Показано, что спектральное распределение дифрагированного света существенно зависит от параметров MVHG.

К сожалению, в перечисленных работах недостаточное внимание уделено влиянию неоднородных параметров используемых объемных голограмм [7, 8], что часто имеет место на практике, например в случае фотополимерных материалов, обладающих усадкой толщины регистрирующего слоя и изменяющимся во время экспозиции поглощением света по глубине голограммы.

Цель данной работы – изучение свойств структуры типа MVHG с неоднородными объемными пропускающими голограммами.

2. Методы моделирования MVHG

При анализе свойств структур MVHG, состоящих из неоднородных объемных пропускающих голограмм, воспользуемся результатами работы [9], где неоднородные объемные голограммы представлены в виде набора слоев из однородных голограмм со своей передаточной характеристикой, а амплитуда результирующей выходной волны определяется путем перемножения матриц перехода каждого из слоев.

Схематично структура MVHG до и после записи изображена на рис. 1, где T_1 толщина 1-го регистрирующего слоя (голограммы); t_m – толщина m -го промежуточного слоя; R и S – опорный и сигнальный пучки; R' – восстанавливающий пучок; \bar{n} – среднее значение показателя преломления регистрирующего материала и промежуточного слоя.

Е.Ф.Пен, М.Ю.Родионов. Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 1; e-mail: pen@iae.nsk.su, miheiro@mail.ru

Поступила в редакцию 12 мая 2010 г., после доработки – 28 июня 2010 г.

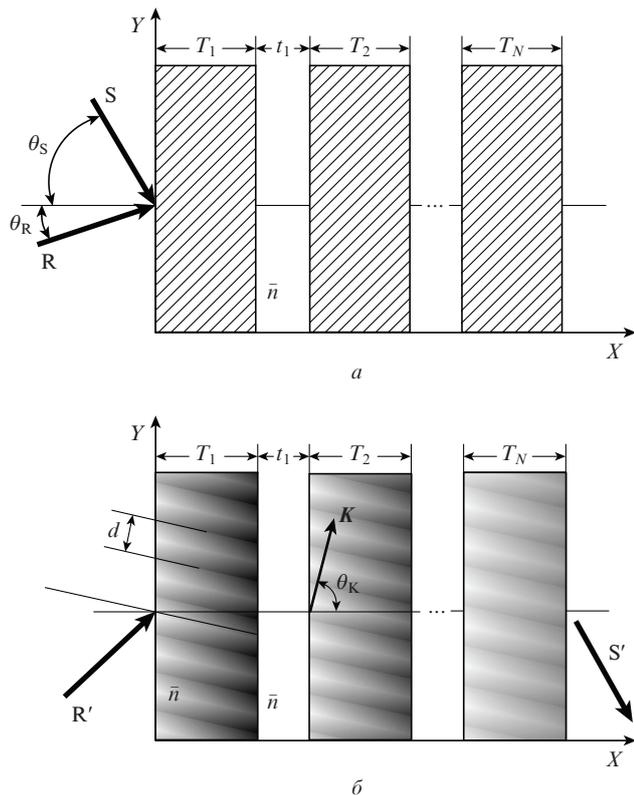


Рис.1. Схемы записи (а) и восстановления (б) MVHG.

Как известно, амплитуда прошедшего (восстанавливающего) и предметного (восстановленного) пучков одномерной объемной пропускающей голограммы выражаются следующим образом [1]:

$$R = e^{-i\xi} \left[\cos(\xi^2 + v^2)^{1/2} + \frac{i\xi}{(\xi^2 + v^2)^{1/2}} \sin(\xi^2 + v^2)^{1/2} \right], \quad (1)$$

$$S = -i \left(\frac{c_R}{c_S} \right)^{1/2} v \frac{\sin(\xi^2 + v^2)^{1/2}}{(\xi^2 + v^2)^{1/2}} e^{-i\xi}, \quad (2)$$

где

$$v = \frac{\pi \Delta n T}{\lambda_0 (c_R c_S)^{1/2}}; \quad \xi = \frac{T \vartheta}{2 c_S};$$

$$\vartheta = \Delta \theta K \sin(\theta_K - \theta_0) - \Delta \lambda \frac{K^2}{4 \pi \bar{n}}; \quad \theta = \theta_0 + \Delta \theta;$$

$$\lambda = \lambda_0 + \Delta \lambda; \quad \theta_0 = \frac{|\theta_R - \theta_S|}{2}; \quad \theta_K = \frac{\pi}{2} - (\theta_0 - \theta_R);$$

$$\beta = \frac{2 \pi \bar{n}}{\lambda_0}; \quad n = \bar{n} + \Delta n \cos(\mathbf{K} \mathbf{y}); \quad 2 d \sin \theta_0 = \frac{\lambda_0}{n};$$

$$|\mathbf{K}| = \frac{2 \pi}{d}; \quad c_R = \cos \theta_R; \quad \eta = \left| \frac{c_S}{c_R} \right| S S^*;$$

$$c_S = \cos \theta_R - \frac{K}{\beta} \cos \theta_K;$$

\bar{n} и Δn – среднее значение и амплитуда пространственной модуляции показателя преломления среды; λ_0 – длина волны в воздухе; T – толщина голограммы; d – период решетки; \mathbf{K} – вектор решетки; θ_K – угол вектора решетки

(углы измеряются в среде); θ_R и θ_S – углы падения опорной и предметной волн; θ_0 – угол Брэгга; $\Delta \theta$ – расстройка угла Брэгга; η – дифракционная эффективность.

Матрица перехода голограммы записывается в виде

$$M = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

С учетом результатов [8, 9] можно получить

$$M = \begin{pmatrix} \left(\cos \phi + i \frac{\xi \sin \phi}{\phi} \right) e^{-i\xi} & -i \left(\frac{c_S}{c_R} \right)^{1/2} \frac{v \sin \phi}{\phi} e^{-i\xi} \\ -i \left(\frac{c_R}{c_S} \right)^{1/2} \frac{v \sin \phi}{\phi} e^{-i\xi} & \left(\cos \phi - i \frac{\xi \sin \phi}{\phi} \right) e^{-i\xi} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Здесь $\phi = (\xi^2 + v^2)^{1/2}$.

Перемножив матрицы перехода слоев для каждой объемной голограммы, получим матрицу перехода, соответствующую неоднородной голограмме без поглощения. Промежуточный слой толщиной t дает фазовый набег, и если считать, что показатель преломления промежуточного слоя равен показателю преломления голограммы, то матрица перехода для такого слоя будет выглядеть следующим образом:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left(-i \frac{\Delta \theta K \sin(\theta_K - \theta_0) t}{c_S}\right) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Для нахождения матрицы перехода структуры в целом необходимо перемножить матрицы перехода всех слоев:

$$\prod_{j=1}^N M_j \times D_j = M_N \times D_N \times \dots \times D_j \times M_j \times \dots \times D_1 \times M_1, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} R_{out} \\ S_{out} \end{bmatrix} = \prod_{j=1}^N M_j \times D_j \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Виды неоднородностей объемных голограмм зависят от свойств регистрирующего материала (в частности от ФПМ), времени и условий экспозиции [8]. Изменение модуляции показателя преломления по глубине голограммы при записи в ФПМ, вызванное ослаблением интенсивности света по закону Бугера – Ламберта – Бера, выражается в виде

$$\Delta n(x) = \Delta n_0 \exp(-cx/T), \quad (8)$$

где c – константа; Δn_0 – начальная величина модуляции показателя преломления.

Зачастую, кроме учета неоднородного изменения модуляции показателя преломления, необходимо вводить параметры, описывающие искажение пространственной структуры голограмм (изменение периода и K_x -компоненты вектора решетки \mathbf{K}), обусловленные продольной и поперечной усадкой регистрирующего слоя:

$$K_x(x, p, q) = K_y \left[-\frac{K_0}{K_y} + p \left(\frac{0.5T - x}{T} \right) + q \left(\frac{0.5T - x}{T} \right)^2 \right], \quad (9)$$

$$y(x, p, q) = \int_T^x \frac{K_x(x, p, q)}{K_y} dx,$$

где K_0 – начальное значение вектора решетки в материале; K_y – постоянное значение y -компоненты вектора решетки; $y(x, p, q)$ – уравнение интерференционных полос.

Для моделирования селективных свойств неоднородных MVHG может быть использован широко известный мощный вычислительный метод FDTD (Finite-Difference Time-Domain), часто применяемый для расчетов запрещенных зон в фотонных кристаллах [10]. Однако в нашем случае данный метод потребует неоправданно много времени для подготовительной работы и вычисления коэффициента отражения или дифракционной эффективности голографических решеток. В связи с этим мы использовали ранее разработанное специализированное программное обеспечение Hologram Properties Modeling (version 4.00), содержащее модели многослойных неоднородных объемных пропускающих и отражательных голограмм [11]. Визуализация полученных результатов осуществлялась с помощью стандартных графических пакетов.

При анализе структуры, состоящей из неоднородных голограмм, рассмотрим типичные случаи:

- изменение модуляции показателя преломления по глубине голограммы имеет экспоненциальную зависимость вида (8);

- продольная и поперечная усадки регистрирующего слоя учитываются в соответствии с (9).

Эти случаи будут рассмотрены при вариациях числа слоев и различных толщинах промежуточных слоев. Каждый неоднородный слой разобьем на 5 субслоев, каждый из которых будем считать однородным. Предположим, что толщина одной голограммы составляет 55 мкм, длина волны записи – 635 нм, углы падения (в воздухе) записывающих пучков $\theta_R = -\theta_S = 18^\circ$, показатели преломления промежуточного слоя и внешней защитной пленки равны 1.48, а регистрирующего слоя – 1.5.

Вначале в качестве примера моделирования MVHG рассмотрим структуру, образованную двумя однородными голограммами с модуляцией показателя преломления $\Delta n_0 = 0.0013$ в каждой из них и разными толщинами промежуточного слоя. Из рис.2 видно, что при небольшой толщине промежуточного слоя ($t = 10$ мкм) вид контура селективности всей структуры близок к виду характеристики одиночной голограммы (кривая 1), однако при дальнейшем увеличении этого параметра ($t = 175$ мкм) в соответствии с выводами [4, 5] вследствие интерференционных эффектов образуются дополнительные локальные максимумы и минимумы интенсивности света при

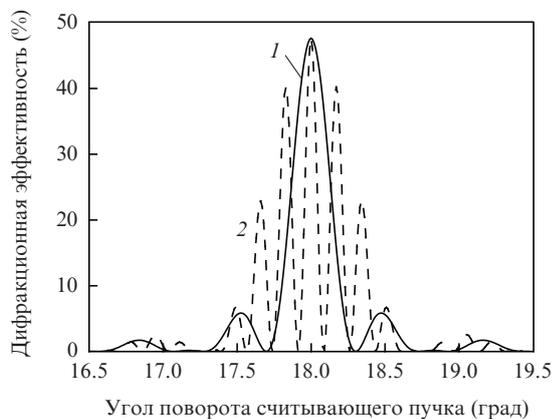


Рис.2. Угловая селективность однородной MVHG структуры при толщинах промежуточного слоя $t = 10$ мкм (1) и 175 мкм (2).

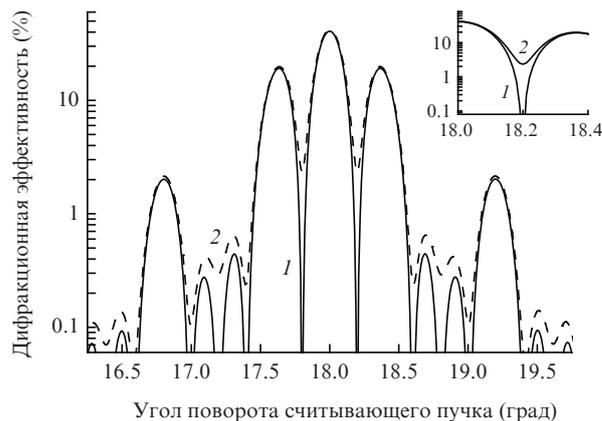


Рис.3. Угловая селективность неоднородной MVHG структуры, образованной двумя однородными (1) и двумя неоднородными (2) голограммами.

сохранении общей величины дифракционной эффективности (кривая 2). При этом локальные минимумы спадают до нуля.

Селективный отклик структур MVHG, образованных однородными и неоднородными голограммами, представлен на рис.3 (дифракционная эффективность показана в логарифмической шкале), где кривая 1 соответствует структуре с двумя однородными голограммами с $\Delta n_0 = 0.0013$, а кривая 2 – структуре с двумя неоднородными голограммами с $\Delta n_0 = 0.0022$ и $c = 1$. Видно, что при учете неоднородного изменения модуляции показателя преломления (8) глубина локальных минимумов уменьшается и не достигает нуля (см. вставку на рис.3).

3. Результаты экспериментов

Для проведения экспериментальных исследований селективных свойств структуры MVHG использован стенд [12] для записи объемных пропускающих голограмм, схема которого представлена на рис.4. Стенд содержит полупроводниковый лазер (длина волны излучения 635 нм) и стандартные оптические элементы для формирования опорного и предметного пучков, углы падения которых относительно нормали к плоскости записи симметричны и составляют 18° (в некоторых экспериментах углы падения были несимметричными). В качестве регистрирующей среды использовался фотополимерный материал, разработанный в НИОХ СО РАН, а также голографический фотополимерный материал Bayfol HX TP, представленный фирмой Bayer MaterialScience AG (Герма-

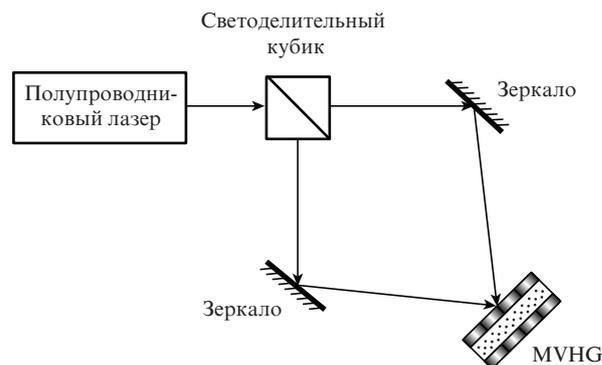


Рис.4. Стенд для записи MVHG структуры.

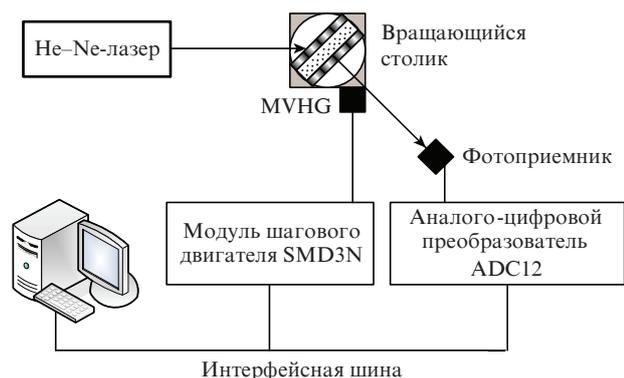


Рис.5. Стенд для измерения угловой селективности MVHG структуры.

ния). Для сравнения характеристик селективности были изготовлены и исследованы двухслойные структуры (подобные показанным на рис.1,*a*), а также обычные (однослойные) объемные пропускающие голограммы. Измерение характеристик угловой селективности указанных структур проводилось на стенде [12], схема которого приведена на рис.5.

На рис.6 представлены экспериментальные данные, полученные для однослойной голограммы (рис.6,*a*) и структур MVHG, записанных с разными временами экспозиции (рис.6,*б, в*) и при различных конфигурациях опорного и предметного пучков (рис.6,*г*). Видно, что в соответствии с теоретическими предсказаниями характеристики угло-

вой селективности рассмотренных структур имеют ряд локальных максимумов, количество и ширина которых определяются толщиной промежуточных слоев и объемных голограмм, а огибающая совпадает с контуром селективности одной голографической решетки. Вместе с тем экспериментальные характеристики селективности существенно отличаются от теоретических: локальные максимумы могут быть несимметричными, иметь различную величину, интенсивность локальных минимумов может не достигать нуля и пр.

4. Анализ экспериментальных и модельных данных

Для идентификации типов неоднородностей и степени их влияния на характеристики селективности исследуемых структур проведено сравнение экспериментальных и модельных характеристик, полученных путем подгонки параметров.

На рис.7,*a* представлены соответствующие экспериментально полученная и расчетная характеристики селективности однослойной объемной пропускающей голограммы толщиной 55 мкм в предположении однородности ее структуры. Наилучшее совпадение этих характеристик достигается при модуляции показателя преломления $\Delta n_0 = 0.00156$, незначительные искажения контура селективности связаны с началом проявления неоднородностей.

На рис.7,*б* показаны экспериментально полученная и расчетная угловые селективности структуры MVHG, со-

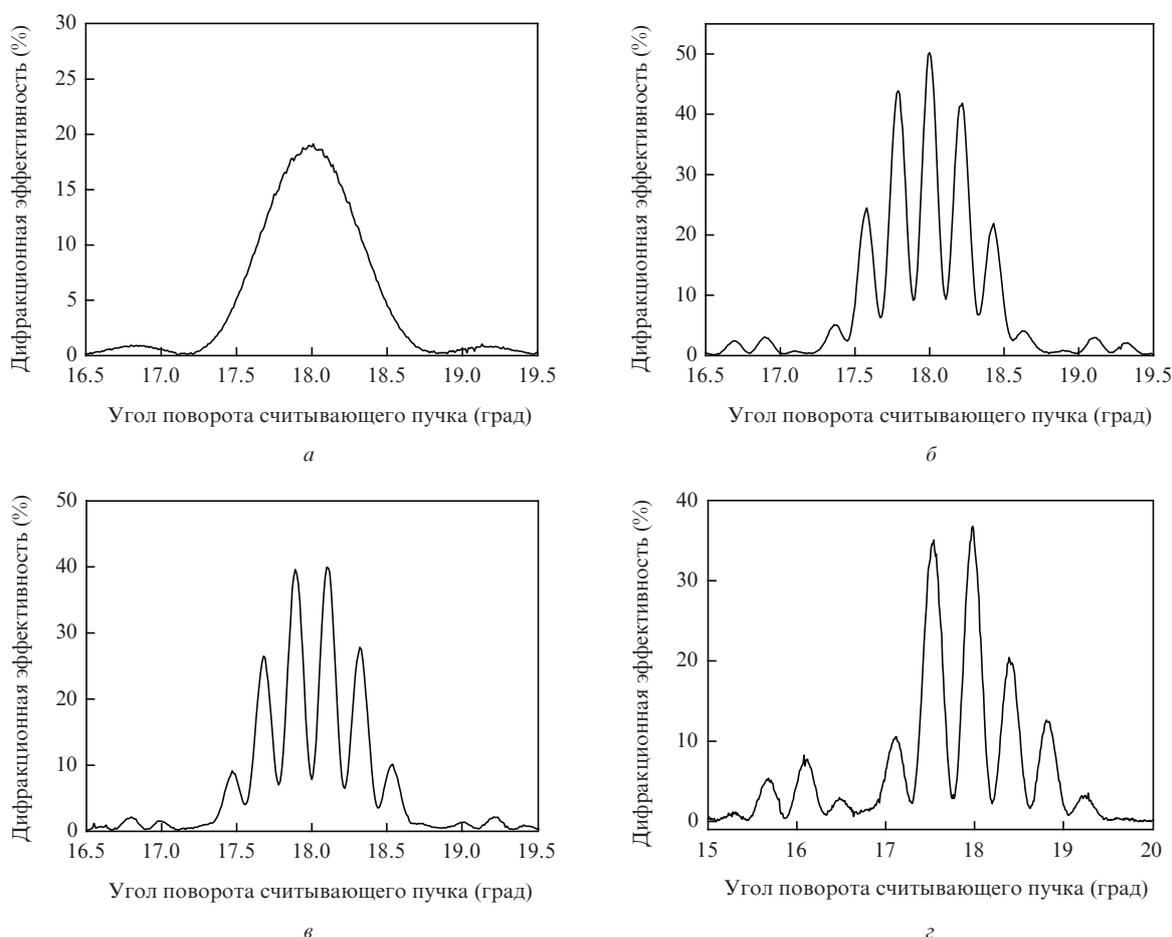
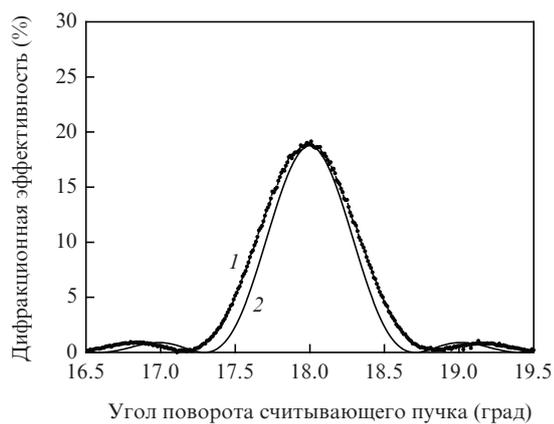
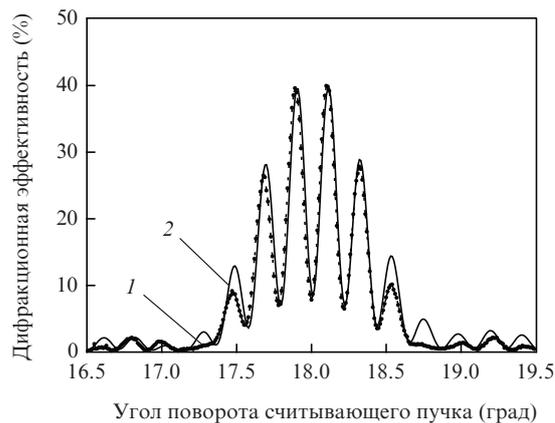


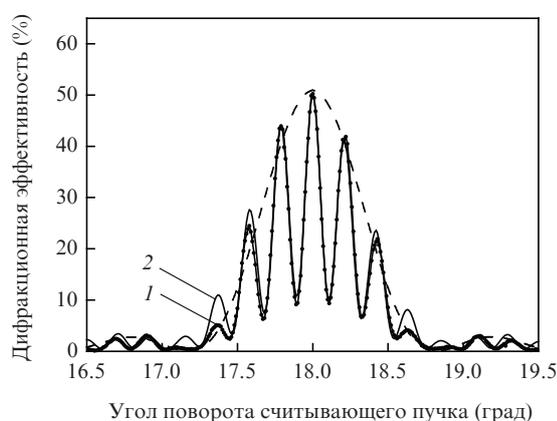
Рис.6. Экспериментально полученные угловые селективности одиночной голограммы (*a*), неоднородной MVHG структуры с симметричной геометрией пучков при записи (*б, в*) и неоднородной MVHG структуры с несимметричной геометрией пучков при записи (*г*).



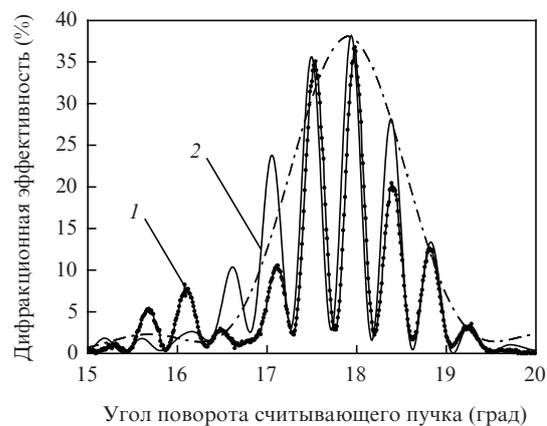
а



а



б



б

Рис.7. Сравнение экспериментальных (1) и расчетных (2) данных для одиночной голограммы (а) и MVHG структуры (б) при симметричной геометрии пучков при записи.

Рис.8. Сравнение экспериментальных (1) и расчетных (2) угловых селективностей MVHG структуры с симметричной (а) и несимметричной (б) геометрией пучков при записи. Контур селективности одиночной голограммы – штрих-пунктирная кривая.

стоящей из двух неоднородных голографических решеток толщиной 55 мкм (разделены промежуточным слоем 175 мкм). В результате моделирования установлено, что в данных решетках модуляция показателя преломления изменяется по формуле (8), а происходящий вследствие продольной усадки изгиб дифракционной решетки описывается формулой (9). Параметры слоев, использованные в расчете, были следующими: для 1-го слоя $\Delta n_0 = 0.0035$, для 2-го слоя $\Delta n_0 = 0.0014$; $c = 2.5$ и $p = -0.001$ для обоих слоев.

Как видно из рис.7,б, в случае неоднородных голограмм интенсивности локальных минимумов не достигали нуля, а изменение вектора решетки привело к некоторой асимметрии боковых лепестков. Огибающая экспериментальной кривой совпадает с контуром селективности одиночной голограммы.

При дальнейшем росте времени экспозиции воздействие усадки увеличивается и соответственно изменяется вид кривой селективности, происходит смещение максимумов и минимумов (рис.8,а), что приводит к появлению в точке выполнения условий Брэгга (при угле 18°) локального минимума. Рассчитанные параметры слоев были следующими: для 1-го слоя $\Delta n_0 = 0.0031$, для 2-го слоя $\Delta n_0 = 0.0012$; $c = 2.5$ и $p = 0.005$ для обоих слоев.

На рис.8,б представлены характеристики угловой селективности многослойной структуры, состоящей из наклон-

ных голограмм (углы записи $\theta_R = 18^\circ$ и $\theta_S = 0$) при наличии усадки. Параметры слоев: для 1-го слоя $\Delta n_0 = 0.0025$, $c = 1.5$, $p = -0.015$ и $q = 0.05$; для 2-го слоя $\Delta n_0 = 0.0013$, $c = 2.5$. Несмотря на значительное смещение положения максимумов и минимумов, они по-прежнему остаются внутри контура селективности одиночной голограммы.

5. Заключение

Изучены селективные свойства структур, состоящих из двух разделенных промежуточными слоями объемных неоднородных пропускающих голограмм. В качестве регистрирующей среды использованы толстослойные фотополимерные материалы, свойства которых определяют различные виды неоднородностей структуры голограмм: экспоненциальное затухание модуляции показателя преломления по глубине голограмм, а также изменение направления вектора и периода голографических решеток вследствие продольной и поперечной усадки регистрирующей среды.

Подтверждены теоретические предположения о том, что характеристики угловой селективности рассмотренных структур имеют ряд локальных максимумов, количество и ширина которых определяются толщиной промежуточных слоев и объемных голограмм, а огибающая совпадает с контуром селективности одной голографиче-

ской решетки. Вместе с тем экспериментально показано, что неоднородности голограмм существенно искажают вид характеристик селективности: они становятся несимметричными, локальные максимумы имеют различную величину, глубина локальных минимумов уменьшается. Путем подбора параметров неоднородностей достигнуто сходство экспериментальных данных и результатов моделирования.

Работа выполнена при поддержке междисциплинарного интеграционного проекта Президиума СО РАН №71 (2009–2011 гг.).

1. Kogelnik H. *Bell Syst. Techn. J.*, **48**, 2909 (1969).
2. Nordin P. *J. Opt. Soc. Am.*, **9** (12), 2206 (1992).
3. Hesselink L. *J. Opt. Soc. Am.*, **11** (9), 1800 (1994).
4. Nordin P. *Opt. Lett.*, **17** (23), 1709 (1992).
5. Якимович А.П. *Оптика и спектроскопия*, **49** (1), 158 (1980).
6. Aimin Yan, Liren Liu. *J. Opt. Soc. Am.*, **26** (1), 135 (2009).
7. Пен Е.Ф., Родионов М.Ю. *Автометрия*, **41** (2), 98 (2005).
8. Родионов М.Ю., Пен Е.Ф., Шелковников В.В. *Оптич. журн.*, **73** (7), 60, (2006).
9. Au L.B., Newell J.C.W., Solyman L. *J. Modern Optics*, **34** (9), 1211 (1987).
10. Lavrinenko A., Borel P.I., Frandsen L.H., Thorhauge M., Harpøth A., Kristensen M., Niemi T., Chong H.M.H. *Opt. Express*, **12** (2), 234 (2004).
11. Rodionov M.Yu., Pen E.F. *Proc. of the Second IASTED International Multi-Conf., Signal And Image Proc. (ACIT-SIP)* (Russia, Novosibirsk, 2005, p. 15).
12. Бабин С.А., Васильев Е.В., Ковалевский В.И., Пен Е.Ф., Плеханов А.И., Шелковников В.В. *Автометрия*, **39** (2), 57 (2003).