

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 535.417; 681.787.6

СПЕКТРАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА КАСКАДА
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ РЕШЁТОК,
РАЗДЕЛЁННЫХ ОДНОРОДНЫМ СЛОЕМ*Е. Ф. Пен^{1,2}, М. Ю. Родионов¹, П. А. Чубаков¹¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1²Новосибирский государственный технический университет,
630073, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20

E-mail: pen@iae.nsk.su

Представлены результаты экспериментальных исследований спектральных свойств слоистых структур, состоящих из двух объёмных голографических отражательных решёток, разделённых оптически однородным слоем. При освещении таких структур полихроматичным светом интерференционное взаимодействие волн, сформированных указанными решётками, приводит к образованию множества узких спектральных полос пропускания, период расположения которых определяется оптической толщиной промежуточного слоя, а их огибающая совпадает с контуром спектральной селективности одной решётки. Экспериментально подтверждено наличие такого вида спектров с периодичностью локальных полос пропускания 2–8 Å (в разных экспериментах). При измерениях использованы высокоразрешающий спектрометр "Ramanor U1000", а также установка с оптической схемой интерферометра Фабри — Перо. Выявлено, что неоднородности внутренней структуры голографических решёток из-за несовершенства регистрирующей среды существенно искажают вид спектральных характеристик исследуемых структур в сравнении с их простыми теоретическими моделями: вид спектра несимметричен, пропускание локальных полос значительно меньше расчётной величины. Путём подбора параметров упомянутых неоднородностей достигнуто сходство экспериментальных данных и результатов моделирования.

Ключевые слова: спектральные интерференционные приборы, многослойные голографические структуры.

DOI: 10.15372/AUT20170109

Введение. Свойства объёмных пропускающих и отражательных голографических решёток детально рассмотрены в работе [1], где показано, что такие решётки наряду с большой дифракционной эффективностью демонстрируют высокую угловую и спектральную селективности. Менее изучены слоистые структуры, состоящие из нескольких объёмных решёток, разделённых оптически однородными промежуточными слоями, и обладающие особыми свойствами, обусловленными интерференцией волн, восстановленных каждой из решёток, что предоставляет возможность управления видом угловой или спектральной селективности [2–4].

Подобные структуры могут применяться при создании элементов оптических межсоединений, мультиплексоров/демультиплексоров (DWDM) в оптических линиях связи [5–7].

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-02-00732).

Как известно [8], частотный план систем DWDM определяется стандартом ITU G.694.1, предусматривающим использование частотных каналов с шагом 8 \AA (100 ГГц), а систем HDWDM (High Dense Wavelength Division Multiplexing) — с шагом 4 \AA (50 ГГц). В работе [7] исследованы спектральные свойства дифракционной структуры, представляющей собой каскад из двух объёмных голографических пропускающих решёток с отличающимися векторами решёток, а следовательно, и с различными центральными частотами спектральных полос пропускания, что позволяет расширить рабочий диапазон до 130 каналов с шагом 4 \AA .

Недостатками демультимплексоров на основе голографических пропускающих решёток являются габариты устройств, спектральное разрешение которых тем выше, чем больше апертура решёток, а также наличие кросспомех из-за паразитных дифракционных порядков контура спектральной селективности [6].

Представляет интерес дальнейшее совершенствование голографических DWDM: сужение частотных каналов, снижение кросспомех, уменьшение размеров устройств.

Цель данной работы — исследование спектральных свойств слоистых структур, состоящих из двух объёмных голографических отражательных решёток, разделённых оптически однородным слоем; экспериментальное подтверждение образования множества узких спектральных полос пропускания, обусловленных интерференционным взаимодействием волн, сформированных указанными решётками; выяснение зависимости параметров этих полос пропускания от свойств голографических решёток, изготовленных с использованием фотополимерных материалов (ФПМ).

Слоистые голографические отражательные структуры и методы расчёта их спектральных характеристик. Схема структуры изображена на рис. 1, где VHG1 и VHG2 — объёмные голографические отражательные решётки, L — стеклянная подложка. Длина волны лазерного излучения, а также значения углов падения пучков R и S относительно поверхности регистрирующей среды определяют период образующейся голографической решётки, а следовательно, и резонансную длину волны спектрального отклика при её облучении белым светом.

По существу эти структуры являются аналогами классического интерферометра Фабри — Перо. Особенности состоят лишь в свойствах зеркал резонатора, в качестве которых выступают отражательные голографические брэгговские решётки. В свою очередь, спектральные свойства этих решёток в значительной степени зависят от характеристик регистрирующей среды, используемой при их изготовлении, что в конечном итоге определяет возможности практического применения исследуемых структур.

В идеальной, неискажённой, отражательной голографической решётке пространствен-

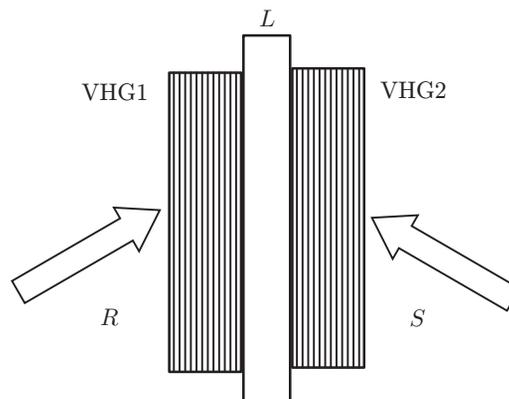


Рис. 1. Схема слоистой голографической отражательной структуры

ное распределение показателя преломления $n(x)$ имеет гармонический вид:

$$n(x) = n_0 + 2\Delta n \cos\left(\frac{2\pi}{d}x\right), \quad (1)$$

где n_0 — среднее значение показателя преломления регистрирующей среды после её облучения и постобработки; Δn — амплитуда модуляции фотоиндуцированного изменения показателя преломления среды (например, вследствие фотополимеризации); $(n_0 + \Delta n)$ и $(n_0 - \Delta n)$ — максимальное и минимальное значения показателя преломления; d — период решётки.

При расчёте спектров пропускания объёмных отражательных решёток часто пользуются моделью многослойной структуры тонких диэлектрических плёнок [9]. В этой модели непрерывное распределение (1) можно заменить набором из периодически повторяющихся P пар диэлектрических слоёв a и b с толщиной $d/2$ и показателями преломления $n_a = (n_0 + \Delta n)$ и $n_b = (n_0 - \Delta n)$. Известно [9], что для S -поляризованной волны в случае её нормального падения на одиночный диэлектрический слой с толщиной d и показателем преломления n матрица переноса M , описывающая связь компонент этой волны на входе и выходе слоя, имеет вид

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi & (-i \sin \varphi)/n \\ -in \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь $\varphi = (2\pi/\lambda)nd$ — набег фазы световой волны с длиной λ от одной границы слоя до другой.

При периодическом чередовании P пар слоёв a и b матрица переноса всей решётки [9] $M = (M_{ab})^P$, где M_{ab} — матрица переноса пары слоёв a и b .

В общем случае при искажениях структуры решётки из-за неоднородного поглощения света и усадки толщины регистрирующего слоя ФПМ в процессе записи и постобработки голограмм [10] распределение $n(x)$ может иметь сложный, в том числе неперiodический вид. В такой ситуации матрица переноса M структуры из N последовательно расположенных диэлектрических слоёв есть произведение матриц переноса отдельных слоёв, соответствующих структуре решётки. В рассматриваемом случае $M = M_1 M_L M_2$, где M_1 и M_2 — матрицы переноса решёток VHG1 и VHG2; M_L — матрица переноса промежуточного слоя L .

Амплитудный коэффициент отражения света всей структурой связан с элементами матрицы переноса M выражением [9]

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12}n_1)n_1 - (m_{21} + m_{22}n_1)}{(m_{11} + m_{12}n_1)n_1 + (m_{21} + m_{22}n_1)}, \quad (3)$$

где n_1 — показатель преломления среды, ограничивающей решётку (на рис. 1 среда не показана). Обычно это защитный пластиковый слой с показателем преломления, близким к показателю преломления регистрирующей среды.

В свою очередь, энергетический коэффициент отражения света всей структурой $R = |r|^2$, при этом предполагается, что потери света на поглощение и паразитные переотражения отсутствуют.

С использованием формул (1)–(3) были получены расчётные спектры пропускания как одиночной объёмной отражательной голографической решётки (рис. 2, a), так и слоистых структур, состоящих из двух объёмных голографических отражательных решёток, разделённых оптически однородным слоем (рис. 2, b – d). Для последующего сравнения с экспериментальными данными примем, что $d = 211,5$ нм, $n_a = 1,5125$, $n_b = 1,5$, тол-

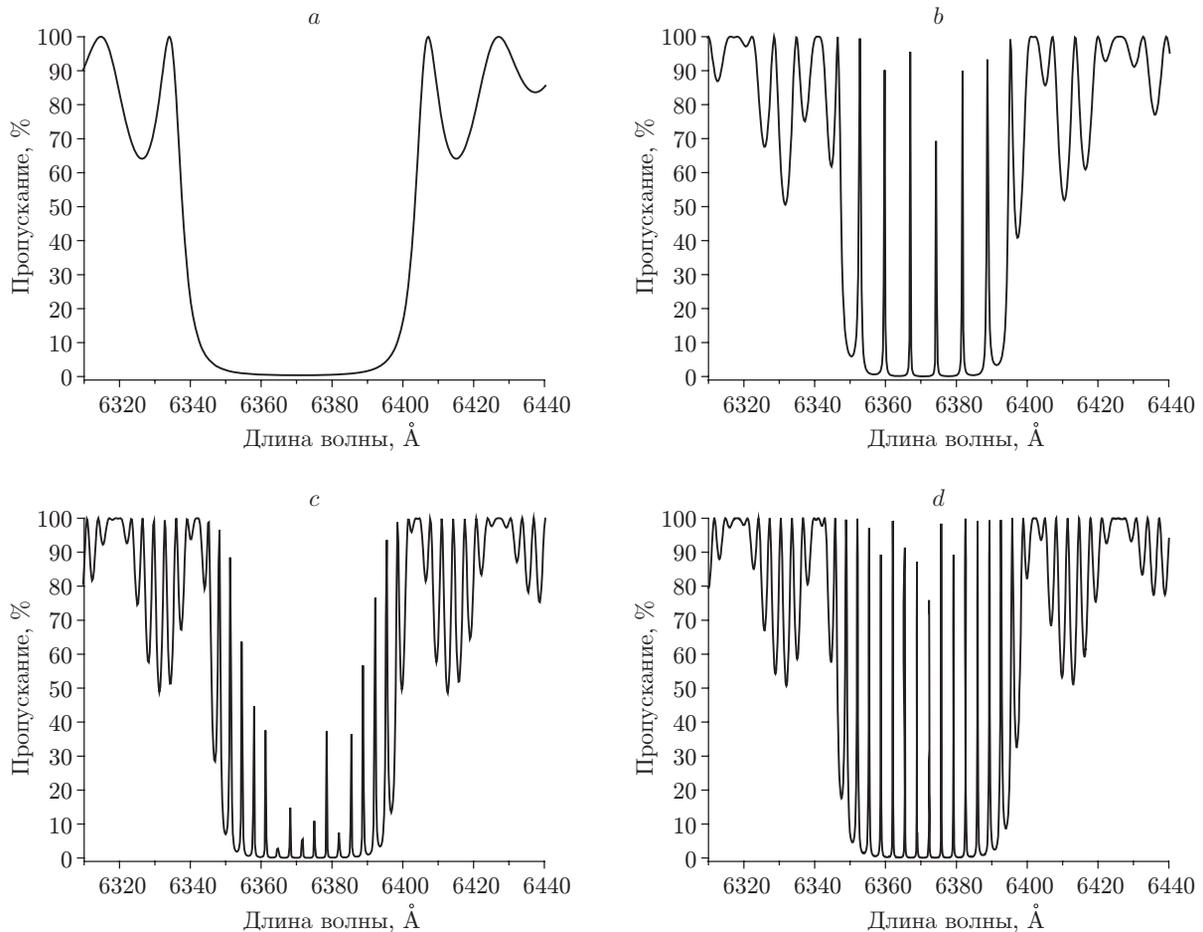


Рис. 2. Вид спектров пропускания голографических решёток: *a* — одиночной решётки; *b* — пары решёток, разделённых оптически однородным слоем толщиной $L = 175$ мкм при разрешении $0,25$ Å; *c* и *d* — пары решёток, разделённых слоем толщиной $L = 450$ мкм при разрешении $0,25$ и $0,05$ Å соответственно

шина каждой решётки равна 55 мкм (при $P = 260$), а толщины промежуточных слоёв $L = 175$ мкм (см. рис. 2, *b*) и $L = 450$ мкм (см. рис. 2, *c*). На рис. 2, *a* хорошо виден центральный глубокий провал в спектре пропускания с шириной примерно 66 Å, а также боковые лепестки с меньшей глубиной провалов. Рис. 2, *b* показывает, что в результате интерференционного взаимодействия волн, сформированных указанными решётками, центральный лепесток изрезан периодически расположенными локальными полосами с пропусканием не менее 70% , с шагом примерно 8 Å и шириной $0,3$ Å, которые можно рассматривать как спектральные каналы демультиплексоров в оптических линиях связи. Следует отметить, что шаг вычислений, влияющий на степень детализации исследуемых спектров, в таком случае выбран равным $0,25$ Å для сопоставления с экспериментальными данными. Для вышеуказанных параметров голографических решёток расчётная ширина полосы пропускания сужается примерно до $0,125$ Å при шаге вычислений $0,05$ Å и при его дальнейшем уменьшении практически не меняется. При снижении разницы показателей преломления n_a и n_b коэффициент отражения решёток и пропускание локальных полос уменьшаются.

Графики аналогичных расчётов спектров для структур с промежуточным слоем $L = 450$ мкм при шаге вычислений $0,25$ и $0,05$ Å показаны соответственно на рис. 2, *c* и *d*, также демонстрирующих вид локальных полос пропускания, существенно зависящих от

шага вычислений (на рис. 2, d полосы имеют пропускание не менее 80 %, ширину 0,125 Å и расположены с шагом 3,25 Å). На основании этого разрешающая способность приборов экспериментальных измерений спектров пропускания структур должна быть лучше 0,1 Å.

Экспериментальные исследования. Для проведения экспериментов применялись различные методы и устройства, в том числе установки для формирования исследуемых структур и измерения их спектров пропускания на спектрометре высокого разрешения, а также прямое наблюдение на экране картины пропускания структур, являющихся, как отмечено выше, аналогами интерферометра Фабри — Перо.

Формирование слоистых голографических отражательных структур осуществлялось на установке, схема которой представлена на рис. 3. Для изготовления структур с различными спектральными параметрами в экспериментах использовались He—Ne- и DPSS-лазеры с длинами волн излучения соответственно 6328 и 5320 Å (элемент 1 на рис. 3), а также стандартные оптические элементы (светоделитель 2, зеркала 3) для формирования пучков R и S равной интенсивности 5 мВт/см², которые направлялись навстречу друг другу с углом схождения 168° симметрично относительно поверхности регистрирующей среды 4 для достижения резонансной длины волны голографических решёток, близкой к длине волны зондирующего излучения. В качестве регистрирующей среды применялись экспериментальные образцы фотополимерного материала Bayfol HX TP [11], предоставленные фирмой "Bayer MaterialScience AG" (Германия), с толщиной фотополимерного слоя 55 мкм, что и определяло толщину решёток VHG1 и VHG2, а толщина слоя подложки L , на которой располагался фотополимер, составляла в различных экспериментах 175 мкм (пластик с показателем преломления $n = 1,54$) и 450 мкм (стекло К8, $n = 1,517$). Для достижения максимальной дифракционной эффективности голографической решётки ~80 % требовалась энергия экспозиции фотополимера ~100 мДж/см². Поперечные размеры голографических решёток равны 1 см². Были изготовлены несколько образцов структур с различными резонансными длинами волн.

Установка для измерений спектров пропускания. Измерения спектров пропускания структур проводились на установке с использованием спектрометра высокого разрешения Раманог U1000 с двойным монохроматором [12]. Схема установки показана на рис. 4, а, где 1 — источник белого света, 2 — образец исследуемой структуры, 3 — спектрометр Раманог U1000, 4 — фотоэлектронный умножитель, 5 — интерфейсный блок, 6 — компьютер для управления установкой и обработки данных измерений. Аппаратная функция спектрального разрешения при выбранных размерах щелей спектрометра (первая и четвёртая — 0,1 мм, вторая и третья — 1 мм) составляла 0,28 Å (рис. 4, б) и определялась путём тестового измерения ширины линии излучения He—Ne-лазера.

Попытка повышения разрешающей способности за счёт уменьшения ширины первой и четвёртой щелей оказалась неудачной из-за существенного падения уровня полезного сигнала (режим работы фотоэлектронного умножителя «счёт фотонов» при этом не использовался).

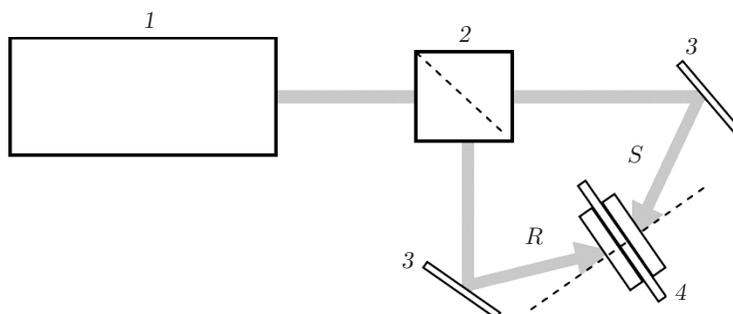


Рис. 3. Схема установки для записи структуры VHG

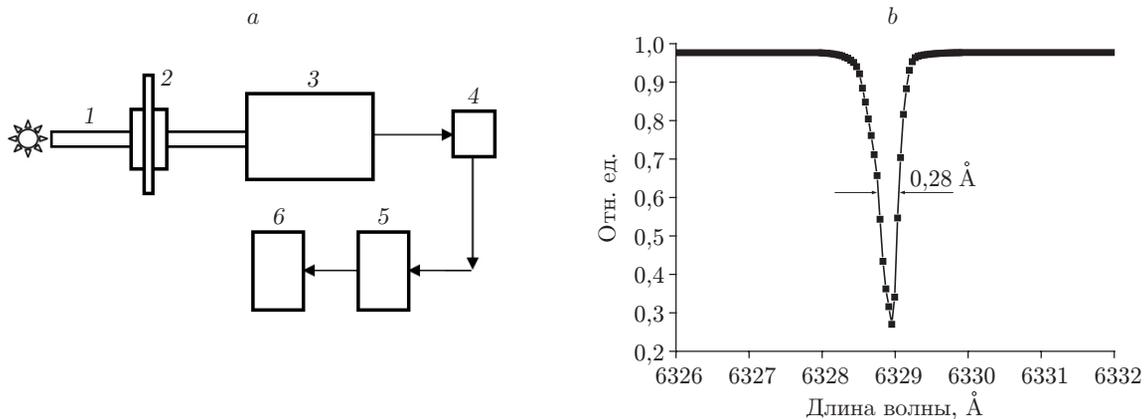


Рис. 4. Функциональная схема и параметры установки для измерения спектральных характеристик исследуемых структур: *a* — схема установки, *b* — график аппаратной функции спектрометра

Интерферометрическая установка. Наряду с измерениями спектров пропускания на приборе Раманог U1000 проводилось исследование спектральных характеристик структур путём прямого наблюдения картины интерференции когерентного света, проходящего через слоистую структуру аналогично интерферометру Фабри — Перо. Оптическая схема такой установки изображена на рис. 5, где 1 — зондирующий одночастотный полупроводниковый лазер с длиной волны излучения $\lambda = 6355 \text{ \AA}$; 2 — коллимированный пучок света этого лазера; 3 — микробиоъектив 20x/0.4; 4 — исследуемая слоистая структура; 5 — конусы световых пучков с угловой расходимостью 2φ , испытывающие дифракцию на двух брэгговских отражательных решётках и последующую интерференцию, картина которой наблюдалась на экране 6 в виде колец.

Поскольку рассматриваемые нами объёмные отражательные голографические решётки являются брэгговскими зеркалами, то, как и в случае с классическим интерферометром Фабри — Перо, в данной установке реализуется многолучевая интерференция световых пучков, однако её результаты можно видеть только в области рабочих длин волн таких зеркал. При этом область дисперсии (спектральное расстояние между упомянутыми соседними кольцами) при малых значениях $\varphi \sim 10^\circ$, соответствующих указанному микробиоъективу, составляет $\Delta\lambda \sim \lambda^2/2Ln$ [9].

При $\lambda = 6355 \text{ \AA}$, $L = 175 \text{ мкм}$ и $n = 1,54$ величина $\Delta\lambda \sim 7,5 \text{ \AA}$, а при $L = 450 \text{ мкм}$ и $n = 1,517$ величина $\Delta\lambda \sim 3 \text{ \AA}$, что сравнимо с данными, полученными на спектрометре Раманог U1000 (рис. 6, *a, b*). Результат интерференции зависит также от свойств брэгговских решёток (коэффициента отражения в рабочей полосе длин волн, степени одно-

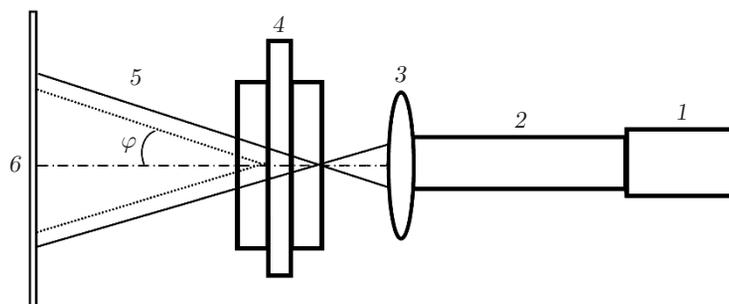


Рис. 5. Оптическая схема установки с исследуемой слоистой структурой в режиме интерферометра Фабри — Перо

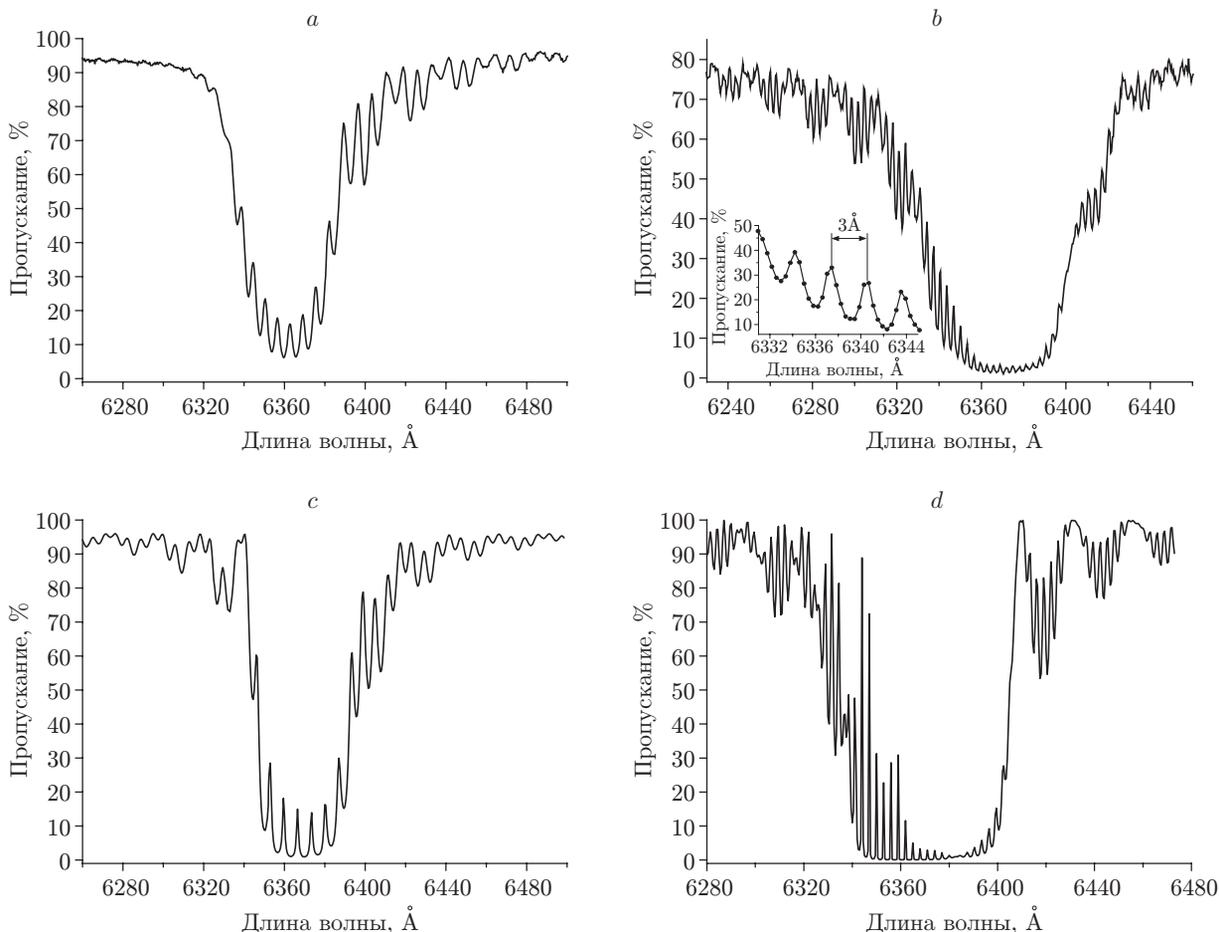


Рис. 6. Графики спектральных характеристик слоистых структур: *a, b* — экспериментальные данные для структур с толщинами промежуточных слоёв $L = 175$ и $L = 450$ мкм соответственно; *c, d* — расчётные данные для этих же структур в предположении неоднородности внутренней структуры голографических решёток, шаг вычислений $0,25 \text{ \AA}$

родности внутренней структуры решёток), так как проходящие через решётки световые пучки интегрируют все фазовые неоднородности.

Отметим, что представленные экспериментальные результаты в основном носят качественный характер, демонстрирующий как сходство, так и различие с теоретическими ожиданиями.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. На рис. 6, *a, b* приведены экспериментальные данные спектров пропускания слоистых структур с толщинами промежуточных слоёв 175 и 450 мкм, сформированных с помощью вышеописанной установки и с использованием He—Ne-лазера. На рисунках хорошо видны глубокие провалы пропускания центральных лепестков контуров спектрального отклика в интервалах длин волн 6348–6388 и 6332–6406 \AA , удовлетворяющих длине волны зондирующего излучения, а также тонкие периодические структуры в области как центральных, так и боковых лепестков, состоящие из множества локальных спектральных полос пропускания. Для образца с $L = 175$ мкм период тонкой структуры оказался $\sim 6,5 \text{ \AA}$, а для образца с $L = 450$ мкм составил $\sim 3 \text{ \AA}$ (см. фрагмент на рис. 6, *b*), при этом ширина локальных полос пропускания была $\sim 2 \text{ \AA}$ на полувысоте значения этого пропускания. В области центрального лепестка наблюдалось изменение пропускания от 6 до 18 %, а в области правого бокового лепестка — от 60 до 80 %, что значительно отличается от теоретических показателей,

представленных на рис. 2, *b*. С учётом потерь света на поглощение в слое фотополимера коэффициент отражения голографических решёток составлял $\sim 80\%$.

Аналогичные структуры и соответствующие им спектры были получены с использованием DPSS-лазера с длиной волны 5320 \AA . В этом случае период локальных спектральных полос пропускания оказался примерно 2 \AA . К сожалению, из-за недостаточного спектрального разрешения установки в данном эксперименте не удалось добиться детальной картины резкости полос.

В целом эксперименты однозначно подтверждают ожидаемый эффект интерференционного взаимодействия волн, формируемых двумя брэгговскими решётками. Вместе с тем следует отметить существенные отличия экспериментальных и расчётных данных, приведённых на рис. 2, *b, d*. Хорошо видно, что спектры несимметричны, боковые лепестки сглажены либо отсутствуют, пропускание локальных полос в области центрального лепестка мало. Вероятно, эти отличия связаны с несовершенствами исследуемых структур:

1) специфическими искажениями внутренней пространственной структуры голографических решёток, такими, как изменение амплитуды модуляции показателя преломления Δn из-за различной энергии засветки по глубине решётки и нарушение периодичности решётки из-за усадки толщины ФПМ в процессе записи и постобработки голограмм [10];

2) паразитными переотражениями, поглощением света в регистрирующей среде и другими шумами в оптической системе, влияние которых в данной работе не исследуется.

Для проверки этих предположений проведены расчёты спектров пропускания модельных слоистых структур при условии изменения показателя преломления n_a от 1,515 до 1,508 по линейному закону и постоянном значении $n_b = 1,5$, а также с учётом изменения d от 211,6 до 211,1 нм.

Результаты расчётов применительно к $L = 175$ и $L = 450$ мкм и при шаге вычислений $0,25 \text{ \AA}$ (выбранном для адекватности экспериментальной аппаратной функции спектрометра) приведены на рис. 6, *c* и *d* соответственно, демонстрирующих влияние указанных искажений на вид спектральных характеристик исследуемых структур. Более точного сходства с экспериментальными данными можно достичь при учёте изменений не только периода, но и направления вектора решёток из-за усадки ФПМ одновременно в поперечном и продольном направлениях (относительно плоскости решётки), а также изменений амплитуды модуляции показателя преломления по нелинейному закону [4, 10].

На рис. 7 даны изображения интерференционных картин, полученных на установке, схема которой приведена на рис. 5. Картина, представленная на рис. 7, *a*, по существу является пространственным аналогом спектра пропускания слоистой структуры с $L = 175$ мкм (см. рис. 6, *a*). Тёмная область, занимающая примерно половину светового конуса, отмеченного на рис. 5, соответствует полосе длин волн $6349\text{--}6388 \text{ \AA}$, эффективно отражаемых данной парой голографических брэгговских зеркал. Внешняя граница светлой области (на рис. 7, *a* не показана) определяется величиной числовой апертуры микрообъектива Z на рис. 5. Внутри тёмной области хорошо видна структура светлых и тёмных колец, характерная для интерферометра Фабри — Перо. Количество наблюдаемых светлых колец, соответствующих локальным полосам пропускания, невелико (6 шт.), их интенсивность падает по мере удаления от центра картины, что обусловлено сравнительно малой величиной коэффициента отражения голографических решёток.

На рис. 7, *b* показано радиальное распределение интенсивности (в относительных единицах) описываемой картины, усреднённое в азимутальном направлении. Установлено, что в полном соответствии с теорией расстояние между соседними кольцами уменьшается с ростом номера кольца, а разница квадратов радиусов соседних колец является постоянной величиной (с погрешностью менее 10%). Резкость колец (по критерию отношения расстояния между кольцами к их полуширине [9]) не превышала $5:1$. Паразитное рассеяние света в лазерном пучке, микрообъективе и микродефектах ФПМ снизило контраст

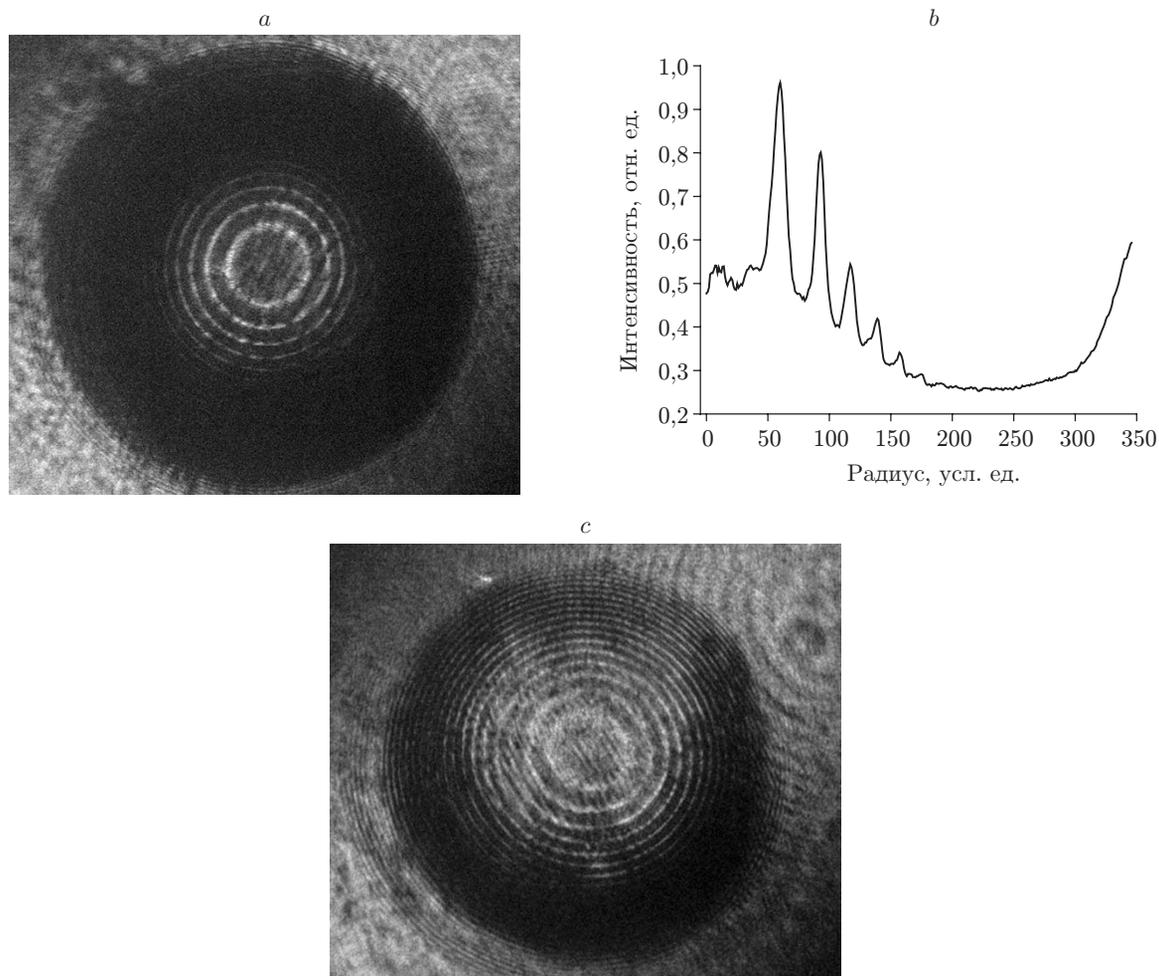


Рис. 7. Диаграммы интерференционных картин, соответствующих исследуемым структурам: толщины промежуточных слоёв 175 мкм (*a, b*) и 450 мкм (*c*)

интерференционной картины, который в среднем не превышал 2:1. Влияние этих факторов на спектральные характеристики исследуемых структур, безусловно, важно и будет изучено в дальнейшем.

На рис. 7, *c* приведено изображение интерференционной картины, относящейся к слоистой структуре с $L = 450$ мкм. Видна существенная пространственная неоднородность, свидетельствующая о неравномерности фазовых искажений в решётках на различных их участках, которая не позволяет провести обработку изображения и получить график, аналогичный рис. 7, *b*, однако можно выделить 18 чередующихся светлых колец, соответствующих локальным полосам пропускания на рис. 6, *b*.

Заключение. Экспериментально подтверждено, что спектр пропускания слоистых голографических структур, состоящих из двух объёмных голографических отражательных решёток, разделённых оптически однородным слоем, содержит множество узких спектральных полос пропускания, период расположения которых определяется оптической толщиной промежуточного слоя, а их огибающая совпадает с контуром спектральной селективности одной решётки.

Анализ полученных спектральных характеристик выявил их зависимость не только от параметров решёток и разделительного слоя, но и от степени неоднородности внутренней структуры решёток, приводящей к несимметричности контура спектрального откли-

ка, уменьшению амплитуды локальных полос пропускания, ухудшению их разрешения. Путём сравнения экспериментальных и расчётных данных установлено, что в наибольшей степени на искажение спектров влияют изменение амплитуды модуляции показателя преломления Δn из-за различной энергии засветки по глубине решётки и нарушение периодичности решётки из-за усадки толщины регистрирующего слоя в процессе записи и постобработки голограмм.

Эксперименты также показали необходимость использования спектральных измерительных приборов и проведения расчётов при моделировании исследуемых структур с разрешением не хуже $0,05 \text{ \AA}$. При условии уменьшения степени неоднородности внутренней структуры решёток (путём улучшения характеристик голографических регистрирующих сред), а также снижения оптических шумов иной природы результаты данной работы могут применяться при проектировании новых элементов спектральных демультиплексоров в каналах оптической связи, интерферометров Фабри — Перо, спектральных фильтров.

Авторы выражают благодарность канд. физ.-мат. наук С. Н. Атутову, д-ру физ.-мат. наук А. И. Плеханову за плодотворные дискуссии, фирме "Bayer MaterialScience AG" (Германия) за предоставленные образцы голографического фотополимерного материала Bayfol HX TP.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kogelnik H.** Coupled wave theory for thick hologram gratings // Bell Syst. Techn. Journ. 1969. **48**, Is. 9. P. 2909–2947.
2. **Якимович А. П.** Многослойные объёмные голографические решетки // Оптика и спектроскопия. 1980. **49**, вып. 1. С. 158–164.
3. **Nordin G. P., Johnson R. V., Tanguay A. R.** Diffraction properties of stratified volume holographic optical elements // JOSA A. 1992. **9**, Is. 12. P. 2206–2217.
4. **Пен Е. Ф., Родионов М. Ю.** Свойства многослойных неоднородных голографических структур // Квантовая электроника. 2010. **40**, № 10. С. 914–924.
5. **Yang D., Wang H., Guo X. et al.** Wavelength demultiplexing with layered multiple Bragg gratings in LiNbO₃:Fe crystal // Appl. Opt. 2007. **46**, Is. 23. P. 5604–5607.
6. **Do D.-D., Kim N., An J.-W., Lee K.-Y.** Effects of apodization on a holographic demultiplexer based on a photopolymer grating // Appl. Opt. 2004. **43**, Is. 23. P. 4520–4526.
7. **An J. W.** Cascade grating structure for increasing the channel number on holographic demultiplexer // Chin. Phys. Lett. 2006. **23**, N 6. P. 1459–1461.
8. **Фриман Р.** Волоконно-оптические системы связи: Пер. с англ. М.: Техносфера, 2003. 590 с.
9. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики: Пер. с англ. М.: Наука, 1973. 713 с.
10. **Пен Е. Ф., Родионов М. Ю.** Неоднородные и нестационарные брэгговские голограммы: модели и методы исследований // Автометрия. 2005. **41**, № 2. С. 98–114.
11. **Паспорт** спектрометра комбинационного рассеяния RAMANOR U1000. URL: <http://www.spectro-sys.com/files/pashport%20roman.pdf> (дата обращения: 28.11.2016).

Поступила в редакцию 21 марта 2016 г.