

ДВУМЕРНЫЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ РЕШЕТКИ НА ГАЛОГЕНИДОСЕРЕБРЯНЫХ ФОТОЭМУЛЬСИЯХ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

© 2009 г. Н. М. Ганжерли*, канд. физ.-мат. наук; С. Н. Гуляев**, канд. физ.-мат. наук; А. С. Гурин*; Д. Д. Крамущенко*; И. А. Маурер*; Д. Ф. Черных*

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

** Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Санкт-Петербург

E-mail: nina.holo@mail.ioffe.ru

Рассматривается двумерная скрещенная голографическая решетка как оптический элемент, способный создавать растровые изображения, после регистрации которых в светочувствительной среде с рельефно-фазовым откликом можно получать другие оптические элементы, например, растры микролинз. В работе проведено исследование влияния фотохимической обработки фотоматериала на оптические свойства двумерных голографических решеток.

Ключевые слова: интерференция, двумерная скрещенная голографическая решетка, растровые изображения, дифракционная расходимость, "линзовая расходимость".

Коды OCIS: 090.2890

Поступила в редакцию 11.01.2009

Введение

Двумерная скрещенная голографическая решетка может рассматриваться как оптический элемент, способный создавать растровые изображения. При регистрации двумерной голографической решетки (ДГР) на светочувствительной среде с рельефно-фазовым откликом можно получать другие оптические элементы, например, растры микролинз, оптическими характеристиками которых можно управлять.

Амплитудную ДГР в первом приближении можно рассматривать как набор из камер-обскур с отверстиями диаметром d , способных сформировать периодически повторяющееся изображение на светочувствительной среде, находящейся на некотором расстоянии z от ДГР. Необходимый профиль распределения полной энергии экспозиции светочувствительной среды (в зависимости от координат на ее поверхности) может быть получен при освещении ее через ДГР параллельным пучком под разными углами к нормали к поверхности решетки, используя непрерывную засветку или серию дискретных засветок. Например, для создания раstra микролинз можно применить светочувствительную среду, имеющую рельефно-фазовый отклик, при этом профиль распределения полной энергии экспозиции, сформированный двумерной решеткой, должен быть линзообразным.

Свойства ДГР как изображающей дифракционно-ограниченной системы, на первый взгляд, определяются расходимостью освещающего пучка, прошедшего ДГР, и зависят от диаметра круглой апертуры d и расстояния z до светочувствительной среды. Однако, как будет показано далее, существенное влияние на изображающие свойства ДГР также оказывает фотохимическая обработка галогеносеребряной фотоэмульсии.

Методика получения двумерной голографической решетки

Двумерную решетку легко получить, зарегистрировав дважды на галогеносеребряном фотоматериале картину интерференции двух плоских волн, распространяющихся под некоторым углом друг к другу. При этом фотопластинка между двумя экспозициями должна быть повернута на угол 90° в своей плоскости. Рассмотрим процесс формирования ДГР более подробно. На первом этапе фотопластинка засвечивается двумя плоскими волнами одинаковой интенсивности, падающими под углами θ и $-\theta$ к нормали к поверхности фотопластинки, причем полосы интерференционной картины направлены вдоль координатной оси y , лежащей в плоскости фотоэмульсионного слоя. Полная энергия света, падающая на фотопластинку за время первой экспозиции t_1 , равна

$$W_1 = I_1 t_1, \quad (1)$$

где I_1 – интенсивность суммарного поля двух плоских волн, которую можно выразить как

$$I_1 = |A_1 + A_2|^2 = |A_0 e^{ikx} + A_0 e^{-ikx}|^2 = 2A_0^2 [1 + \cos(2\pi\xi x)] = I_0 [1 + \cos(2\pi\xi x)], \quad (2)$$

где $k = (2\pi \sin\theta)/\lambda$ – проекция волнового вектора на плоскость голограммы, $\xi = k/\pi$ – пространственная частота интерференционной картины, x – вторая декартова координата, лежащая в плоскости фотоэмульсии.

Пусть a – расстояние от центра координат до некоторого минимума интерференционной картины вдоль оси x . Вблизи точки $x = a$ выражение для интенсивности суммарного поля двух волн можно записать как

$$I_1 = I_0 \{1 - \cos[2\pi\xi(x - a)]\}. \quad (3)$$

Переместим начало координат в точку $x = a$. Тогда в новой системе координат $x' = x - a$ выражение для интенсивности интерференционной картины вблизи минимума можно представить в виде разложения в ряд, используя известную формулу $\cos x = 1 - x^2/2 + x^4/24 \dots$ и, ограничившись двумя первыми членами, записать

$$I_1 = I_0 [1 - \cos(2\pi\xi x')] \cong \cong I_0 \left[1 - 1 + \frac{(2\pi\xi x')^2}{2} \right] = 2I_0 \pi^2 \xi^2 x'^2. \quad (4)$$

Отсюда $W_1 \cong 2I_0 \pi^2 \xi^2 x'^2 t_1$.

После поворота фотопластинки на 90° производится вторая экспозиция. В этом случае полосы интерференционной картины направлены вдоль координатной оси x . Мы можем повторить все вышеприведенные рассуждения для некоторого минимума интерференционной картины, лежащего на расстоянии b от центра координат вдоль оси y . Таким образом, вблизи точки $y = b$ выражение для полной энергии второй экспозиции можно записать как $W_2 \cong 2I_0 \pi^2 \xi^2 y'^2 t_2$. Тогда суммарная энергия двух экспозиций в минимуме с координатами (a, b) равна

$$W_\Sigma = W_1 + W_2 \cong \cong 2I_0 \pi^2 \xi^2 (x'^2 + y'^2) t = 2I_0 \pi^2 \xi^2 r^2 t, \quad (5)$$

где r – модуль радиуса вектора, проведенного из начала координат в точку минимума, $t_1 = t_2 = t$.

Таким образом, вблизи любого минимума распределение полной энергии экспозиции будет представлять собой функцию с симметрией вращения относительно координатной точки этого минимума. Если фотоматериал имеет абсолютный контраст, т. е. обладает z -характеристикой для коэффициента пропускания $\tau(W)$, то после проявления и фиксирования ДГР будут представлять собой повторяющиеся ряды круглых прозрачных апертур на темном фоне. В реальном эксперименте из-за неидеальности z -характеристики границы круглых пропускающих апертур размываются.

В эксперименте регистрация ДГР осуществлялась на голографических фотопластинках ПФГ-01 излучением He-Ne-лазера с длиной волны $\lambda = 0,63$ мкм. Пространственная частота полученных ДГР была равна $6,6 \text{ мм}^{-1}$. Процесс обработки фотопластинок включал в себя проявление в контрастном метол-гидрохиноновом проявителе типа УП-2М (10 мин) и фиксирование в обычном кислом фиксаже. Эксперимент показал, что в результате подобной обработки получают ДГР в виде периодически повторяющихся круглых прозрачных апертур с диаметром, лежащим в пределах $20\text{--}30$ мкм в зависимости от оптической плотности фотопластинки. Период структуры был порядка 150 мкм. На рис. 1 (квадратные символы) приведен измеренный на микроинтерферометре МИИ-4 про-

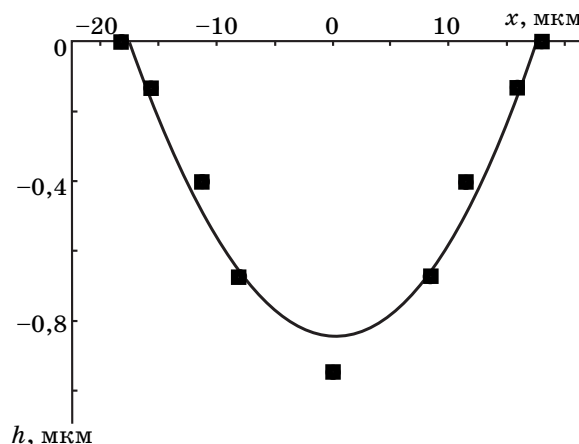


Рис. 1. Профиль рельефа ДГР в области круглой пропускающей апертуры. Экспериментальные точки изображены квадратами. Сплошная кривая – аппроксимация экспериментальных данных полиномом $h = 0,85 - 0,000793x + 0,00272x^2$.

филь рельефа ДГР h в месте с наименьшей плотностью серебряного изображения (СИ), соответствующего круглой апертуре. Ось абсцисс графика лежит на поверхности фотоэмульсии, а ось ординат направлена вглубь фотоматериала. Наличие линзообразных впадин, совпадающих с круглыми апертурами, объясняется тем, что толщина фотоэмульсионного слоя в основном определяется объемом, занимаемым СИ. В меньшей степени на формирование рельефа влияет процесс избирательного дублирования при проявлении, поскольку метол и гидрохинон при довольно большой концентрации сульфита натрия в проявителе УП-2М, оказывают слабое дубящее действие [1].

Оптические характеристики ДГР

При освещении ДГР, представляющей собой матрицу круглых апертур диаметром d , на расстоянии z за ней получаем систему пятен диаметром D . Размер пятна в общем случае определяется дифракционной и “линзовой” расходимостями. Можно привести достаточно простую оценку дифракционной расходимости освещающего пучка, исходя из того, что угол дифракции на круглой апертуре приблизительно равен λ/d . При этом диаметр пучка D на расстоянии z от ДГР будет равен

$$D = d + 2z\lambda/d. \quad (6)$$

В случае “линзовой” расходимости освещающего пучка, вызванной присутствием отрицательных линз в пропускающих местах ДГР, из простых геометрических соображений средний диаметр D пятна равен

$$D = d(f + z)/f. \quad (7)$$

Фокусное расстояние рассеивающей линзы f можно оценить, аппроксимировав функцию, отражающую профиль рельефа, полиномом второй степени (рис. 1, сплошная кривая)

$$h = \alpha + \beta x + \gamma x^2. \quad (8)$$

Фокусирующие свойства линзообразного элемента ДГР в параксиальном приближении для тонкой линзы определяются коэффициентом γ при квадратичном члене полинома. Тогда фокусное расстояние f вычисляется из следующего выражения:

$$f = 1/2\gamma(n - 1), \quad (9)$$

где $n \approx 1,55$ – средний показатель преломления фотоэмульсионного слоя. Для профиля рельефа

ДГР, приведенного на рис. 1, $\gamma = 0,00272 \text{ мкм}^{-1}$, откуда фокусное расстояние $f = 335 \text{ мкм}$.

Как видно из рис. 2, иллюстрирующего зависимости (6) и (7), “линзовая” расходимость ДГР с фокусным расстоянием $f = 335 \text{ мкм}$ (кривая 2) намного превышает дифракционную.

Чтобы улучшить изображающие свойства ДГР, необходимо существенно уменьшить кривизну отрицательных линз, совмещенных с круглыми апертурами ДГР или даже преобразовать их в собирающие с изменением знака фокусного расстояния f в формуле (7). Обычные методы формирования сильного поверхностного рельефа на галогенидосеребряных фотоматериалах связаны с избирательным дублированием фотоэмульсии при отбеливании в растворах бихроматов [2] либо с избирательной фотодеструкцией желатины при воздействии коротковолнового УФ излучения (метод ВКУФ) [3]. Однако применить эти методы для требуемого преобразования поверхностной структуры ДГР не представляется возможным, поскольку в местах наименьшей плотности СИ, т. е. как раз в области круглых апертур ДГР, оба метода формируют впадины рельефа. С другой стороны существует метод светового дублирования желатины в присутствии бихроматов, введенный в галогенидосеребряную голографию Пеннингтоном и др. [4]. Согласно этому методу, наибольшая степень задублиненно-

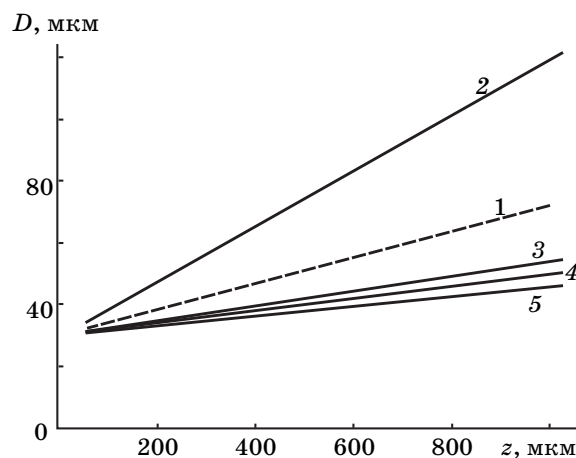


Рис. 2. Зависимости диаметра пучка, прошедшего через круглую апертуру с диаметром 30 мкм, от расстояния между ДГР и светочувствительной средой для случая дифракционной расходимости (1) и “линзовой” расходимости для фокусных расстояний: 2 – 335 мкм, 3 – 1252 мкм, 4 – 1497 мкм, 5 – 1895 мкм.

Параметры линзообразных элементов

Образец ДГР	Концентрация раствора бихромата аммония, %	Время засветки актиничным излучением, мин	Диаметр линзообразного элемента, мкм	Фокусное расстояние, мкм
1 (необработанный)	—	—	34	335
2	5	10	86	1252
3	6	60	85	1497
4	12	60	93	1895

сти желатины будет создаваться на оси круглых апертур ДГР, т. е. в области максимума интенсивности актиничного излучения, дубящего желатину в местах наименьшей оптической плотности СИ. Основным механизмом образования рельефа при избирательном дублении является перетягивание объемов желатины к наиболее задубленным местам в процессе сушки [5]. Поэтому при применении метода светового дубления к ДГР следует ожидать, по крайней мере, частичной компенсации действия объемного механизма формирования рельефа.

Метод светового дубления на практике осуществлялся авторами работы по следующей схеме:

- сенсбилизация проявленных и отфиксированных ДГР в растворе бихромата аммония с концентрацией 5–12% (5 мин) с последующей сушкой во влажной камере,

- засветка направленным светом галогенной лампы мощностью 150 Вт (10–60 мин),

- купание в воде (10 мин) с последующей сушкой на воздухе.

На основании измерений глубины рельефа ДГР, изготовленных по выше описанной схеме, были рассчитаны фокусные расстояния линзообразных элементов и их диаметры. Эти данные приведены в таблице. Эксперимент показал, что глубина линзообразных впадин, подвергнутых световому дублению образцов ДГР, меняется в среднем всего на 20%, в то время как диаметр линз возрастает более чем в 2 раза по сравнению с необработанными образцами. Это приводит к сильному уменьшению кривизны поверхности линзообразных элементов и увеличению фокусного расстояния f и, как следствие, к значительному уменьшению расходимости пучка, прошедшего через ДГР. Как видно из рис. 2, кривые 3, 4, 5, отражающие “линзовую” расходимость обработанных образцов, лежат значительно ниже кривой 1, отражающей дифракционную расходимость. Таким образом, метод светового дубления, использованный в данной работе,

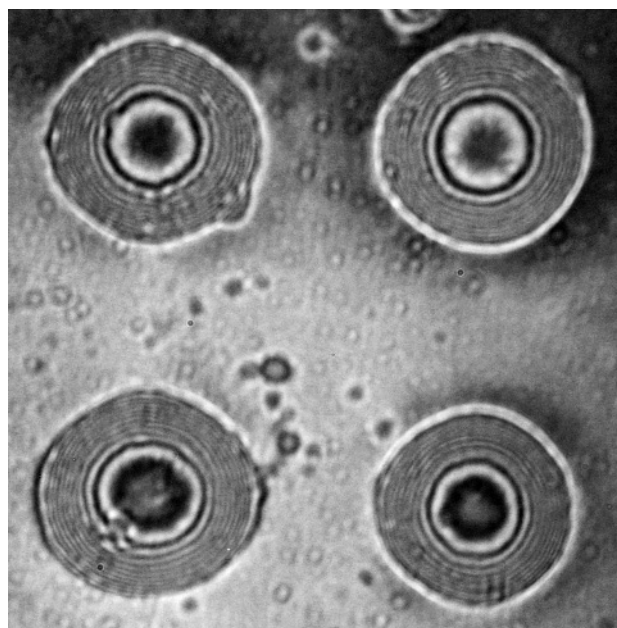


Рис. 3. Фотография фрагмента микролинзового растра, полученная с помощью микроинтерферометра МИИ-4. Фокусное расстояние собирающих микролинз 250 мкм при диаметре 75 мкм.

доказал свою пригодность для улучшения изображающих характеристик ДГР.

Заключение

Описанные выше методы исследования и улучшения оптических характеристик двумерных голографических решеток позволили авторам работы получить образцы, пригодные для создания микролинзовых растров. На рис. 3 приведена фотография растра положительных микролинз, изготовленных на фотопластинке ПФГ-01, освещенной через ДГР параллельным пучком света и обработанной по методу ВКУФ [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гальперн А.Д., Калинина И.В., Селявко Л.В., Смаев В.П.* О получении рельефно-фазовых голограмм на фотопластинках ПЭ-2 и их копировании // *Опт. и спектр.* 1986. Т. 60. № 5. С. 1040–1042.
 2. *Бруй Е.Б., Корешев С.Н.* Особенности использования тонких слоев фотоэмульсии ПЭ-2 для получения низкочастотных рельефных голограммных структур // *Опт. и спектр.* 1989. Т. 6. № 3. С. 685–688.
 3. *Гуляев С.Н., Ратушный В.П.* Свойства рельефно-фазовых голограмм, полученных при обработке фотопластинок коротковолновым ультрафиолетовым излучением и двухступенчатом отбеливании // *Оптический журнал.* 2003. Т. 70. № 2. С. 45–49.
 4. *Pennington K.S., Harper J.S., Laming F.P.* New phototechnology suitable for recording phase holograms and similar information in hardened gelatin // *Appl. Phys. Lett.* 1971. V. 18. № 3. P. 80–84.
 5. *Smith H.M.* Photographic Relief Images // *JOSA.* 1968. V. 58. № 4. P. 533–539.
-