

# УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ

УДК 535.4+778.3

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПСЕВДОЦВЕТНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ МОНОХРОМНОЙ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ ДЕНИСЮКА

© 2009 г. Ю. Н. Захаров, канд. физ.-мат. наук

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

E-mail: zhrv@rf.unn.ru

Составные объемные голограммы, полученные с помощью одноволнового лазера, могут создавать изображения с многоцветным (псевдоцветным) волновым фронтом, если отдельные части объекта записываются при таких условиях, что для заданного восстанавливающего пучка белого света они воспроизводят общую картину, но имеют разный цвет.

*Ключевые слова:* дифракция, интерференция, вектор решетки.

Коды OCIS: 0900.0090

*Поступила в редакцию 18.03.2009*

### Введение

Спектральная селективность объемных голограмм позволяет восстанавливать их источником белого света. Когда восстанавливающая волна по форме и направлению распространения совпадает с опорной, восстановленное изображение в точности воспроизводит объектную волну, если не изменились параметры носителя записи. В данном случае спектральная селективность проявляется в том, что воспроизводится и длина волны излучения. Это позволяет записывать в объемных средах цветные голограммы, применяя для записи три [1] или большее [2] количество лазеров. Такие технологии воспроизводят реальную цветовую гамму объекта, но они достаточно сложны и дорогостоящи.

Известно, что изменение толщины регистрирующей среды (например, так называемая усадка эмульсии при фотохимической обработке галогенидосеребряных фотоматериалов) приводит к смещению спектра восстановленного излучения. Изменение угла падения восстанавливающей волны также приводит к изменению цвета восстановленного изображения [3]. При этом, если одна голограмма содержит несколько изображений, при восстановлении они могут оказаться разного цвета, даже если были записаны с помощью одного и того же лазера [4]. Цвет каждого из изображений опре-

деляется угловым положением регистрирующей среды и объекта при записи и углом наблюдения голограммы. Он может меняться в пределах почти всего видимого спектра. Принимая во внимание эти особенности, можно управлять цветом восстановленного изображения и создавать многоцветные объемные картины при монохромной записи голограмм. Подчеркивая, что реальное распределение цветов на объекте при этом не воспроизводится, будем называть их псевдоцветными.

### Анализ процессов записи и восстановления объемных составных голограмм

**Образование голограммы.** Интерференция сигнальной ( $S$ ) и опорной ( $R$ ) волн приводит к образованию в светочувствительной среде большой толщины объемного периодического распределения показателя преломления (фазовая голограмма) или частично-отражающих поверхностей (амплитудная голограмма).

Если  $S$  и  $R$  почти плоские волны, это распределение представляет собой объемную дифракционную решетку с вектором решетки  $\mathbf{K}$ , определяемым волновыми векторами сигнальной ( $\mathbf{k}_S$ ) и опорной ( $\mathbf{k}_R$ ) волн внутри фотоэмульсии

$$\mathbf{K} = \mathbf{k}_S - \mathbf{k}_R, \quad (1)$$

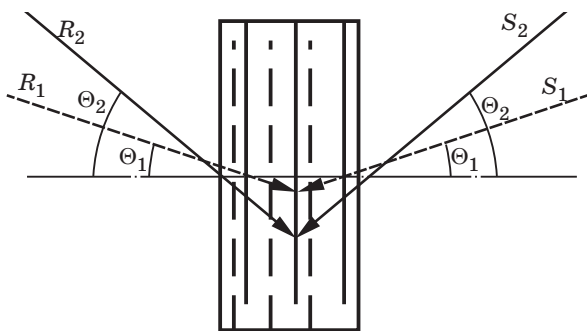


Рис. 1. Запись составной объемной голограммы.

Таким образом, период этой решетки  $d$  удовлетворяет условию

$$2d\sin\gamma = \lambda, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – половинный угол между векторами  $\mathbf{k}_S$  и  $\mathbf{k}_R$ ,  $\lambda = \lambda_0/n$  – длина волны света внутри фотоэмульсии,  $\lambda_0$  – длина волны в воздухе,  $n$  – показатель преломления эмульсии. Регистрация во встречных пучках (схема Денисюка) дает отражательную голограмму. Если во время другой экспозиции голограммы углы падения интерферирующих волн отличаются от первых, получается решетка с другим значением модуля и/или направлением вектора решетки. Разные углы схождения сигнальной и опорной волн в регистрирующей среде  $2\gamma = \pi - (\Theta_S + \Theta_R)$  приводят к образованию объемных решеток голограммной структуры разных периодов  $d$  согласно условию (2). Ряд таких голограмм, записанных в одной и той же среде, образует составную голограмму. На рис. 1 изображен случай симметричного падения опорной и сигнальной волн на фотопластинку: во время первой экспозиции  $\Theta_S = \Theta_R = \Theta_1$ , во время второй –  $\Theta_S = \Theta_R = \Theta_2$ . Тогда поверхности голограммной структуры параллельны поверхности фотопластинки.

**Восстановление изображения.** Голографическое изображение получается в результате дифракции восстанавливающей волны на голограммной структуре, представляющей в случае голограммы Денисюка объемную отражательную дифракционную решетку. Дифракция света на объемных структурах подчиняется закону Брэгга [5], совпадающему по форме записи с выражением (2), где  $\gamma$  – угол, который освещающий и дифрагированный пучки составляют с поверхностями решетки в светочувствительной среде. Объемные голограммы, свойства которых описываются законом Брэгга, являются селек-

тивными по отношению к падающему на них излучению и могут восстанавливаться белым светом. Спектрально-угловая селективность объемных голограмм приводит к восстановлению их волной той длины из спектра белого света, которая отражается согласно закону Брэгга, теперь  $\gamma$  – угол скольжения восстанавливающей волны к поверхностям голограммной структуры. При этом отражательные голограммы обладают высокой спектральной и низкой угловой селективностью [5]. Поэтому изменение угла падения восстанавливающей волны по сравнению с опорной при записи приводит к незначительному падению дифракционной эффективности, но длина восстановленной волны будет отличаться от записываемой (т. е. цвет восстановленного изображения тоже изменится). Если период голограммной структуры  $d_i$ , угол падения восстанавливающей волны белого света равен  $\Theta_C$ , а средний показатель преломления фотоэмульсии –  $n$ , тогда в соответствии с условием (2) длина дифрагированной волны равна

$$\lambda_i = 2d_i \sqrt{n^2 - \sin^2 \Theta_C}. \quad (3)$$

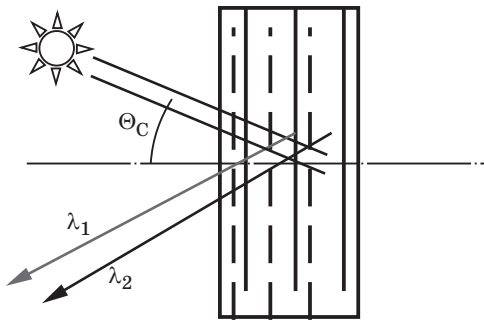
В случае составной голограммы углы наблюдения восстановленных изображений отдельных элементарных голограмм могут совпадать или быть разными в зависимости от того, сонаправлены ли векторы решеток этих элементарных голограмм или нет. Цвет изображения определяется как периодом соответствующей голограммной структуры, так и углом наблюдения.

**Формирование восстановленного составного изображения.** В особом случае восстановленные изображения нескольких элементарных голограмм могут быть частями общей картины. Для этого, чтобы они наблюдались под одним и тем же углом зрения, векторы решеток всех элементарных голограмм должны быть сонаправлены.

Для того, чтобы все объемные голограммные структуры были параллельны выбранной плоскости, опорный и сигнальный пучки должны падать симметрично относительно этой плоскости, например, плоскости поверхности фотопластинки, как это изображено на рис. 1.

Если периоды структуры элементарных голограмм  $d_i$  различны, каждая из них восстановится на своей длине волны, образуя псевдоцветной волновой фронт, формирующий общую картину (рис. 2).

Соответствующий период, а значит, сдвиг длины волны зависит от положения объекта и угла падения опорной волны относительно



**Рис. 2.** Восстановление составной объемной голограммы.

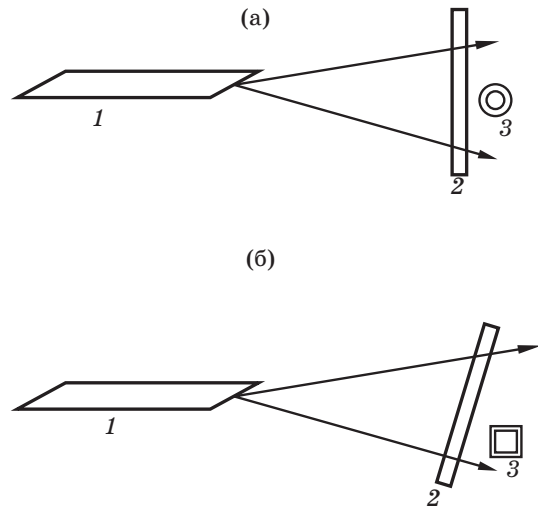
фотопластинки при записи. Если выбран угол наблюдения восстановленного изображения  $\Theta_C$ , чтобы получить желаемый цвет, т. е. длину волны  $\lambda_i$ , используя для записи лазер с длиной волны  $\lambda_0$ , углы падения опорной и сигнальной волн ( $\Theta_i$  для  $S_i$  и  $R_i$  на рис. 1) должны удовлетворять условию

$$\sin^2 \Theta_i = n^2 - \frac{\lambda_0^2}{\lambda_i^2} (n^2 - \sin^2 \Theta_C). \quad (4)$$

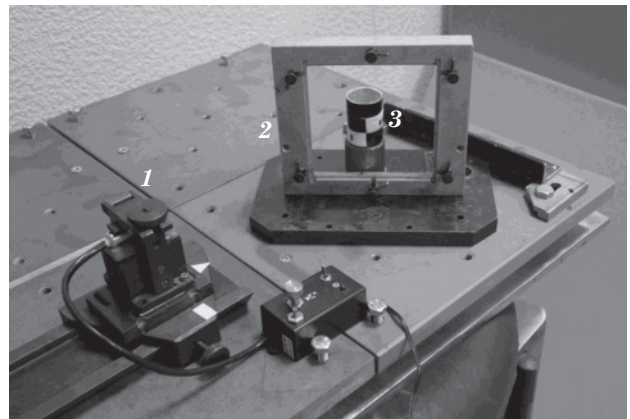
### Голографическая схема и восстановление псевдоцветного изображения

Симметрия и равенство углов падения сигнальной и опорной волн могут быть обеспечены в схеме голографии Денисюка (рис. 3). Для этого, в случае не нормального падения опорного пучка на фотопластинку, объект сдвигается относительно оси опорного пучка, чтобы сигнальный пучок, отраженный от объекта, падал на фотопластинку с другой стороны, но под тем же, что и опорный, углом (рис. 3б). Для изменения углов падения  $\Theta_i$  (для каждого  $S_i$  и  $R_i$ ) при переходе к записи следующего элемента голограммы удобнее поворачивать фотопластинку и соответствующим образом смещать объект.

Фотография экспериментальной установки, использовавшейся для демонстрации возможности восстановления псевдоцветных изображений при монохромной записи, приведена на рис. 4: запись голограммы осуществляется полупроводниковым лазером 1 ( $\lambda_0 = 635$  нм), держатель фотопластинки 2 поворачивается относительно вертикальной оси, проходящей через центр пластинки, объект 3 закреплен на магнитном рейтере. Верхняя, центральная и нижняя часть объекта регистрировались отдельно при



**Рис. 3.** Схема записи элементарных голограмм. 1 – лазер, 2 – фотопластинка, 3 – объект.



**Рис. 4.** Фотография экспериментальной установки. 1 – лазер, 2 – держатель фотопластинки, 3 – объект.

разным угловым положением держателя 2 и соответствующей позиции рейтера, обеспечивающей для записи данной элементарной голограммы освещение нужной части объекта и симметричность падения опорной и сигнальной волн на фотопластинку.

Таким образом, составная голограмма включает в себя несколько элементарных, и при освещении белым светом восстанавливается псевдоцветная картина, составленная из элементов, имеющих заданный условиями записи цвет. Фотография восстановленного изображения одной из таких голограмм приведена на рис. 5.



Рис. 5. Фотография восстановленного изображения.

### Заключение

В работе показано, что если имеется несколько элементов, голограммы которых записываются при разных условиях на один носитель одним и тем же лазером с постоянной длиной волны, их восстановленные изображения, тем не менее, могут быть окрашены по-разному при освещении этой составной голограммы направленным пучком белого света и наблюдаться одновременно, создавая общее изображение. Следовательно, если разделить объект на несколько частей и обеспечить положение каждой из них при записи таким образом, что для определенного восстанавливающего пучка различные части объединяются в общую картину и каждая из них имеет соб-

ственный цвет, можно получить псевдоцветное изображение целого объекта. Приведены расчеты условий записи и восстановления и результаты экспериментальной реализации этой идеи. По сравнению с другими работами, использующими изменение направления опорной волны при записи (многоакурсные голограммы, киноголограммы, наложенные голограммы в системах записи и хранения информации) в данной работе при монохромной записи достигнуто управление цветом восстановленных изображений.

Работа проведена при поддержке гранта РФФИ № 08-04-97-109 и гранта Минобрнауки России № 2.1.1/6223.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Жентье И., Швецов М.К. Мобильная голографическая камера для записи цветных голограмм на высокочувствительном материале "ULTIMATE" // Сборник трудов и официальных материалов научно-практической конференции "Голография в России и за рубежом". М., 2008. С. 47–48.
2. *Vjelkhagen H.I.* Color reflection holography: state of the art and future // Proceedings and official materials of the conference "Holography in Russia and abroad. Theory and practice". М., 2007. P. 46.
3. *Захаров Ю.Н.* Цветовая гамма восстановленных изображений при монохромной записи голограмм Денисюка // "Голография: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии" (Материалы XXVI Школы по голографии). Иркутск: изд-во "Папирус", 2008. С. 331–335.
4. *Бессонова Е.В., Захаров Ю.Н.* Особенности формирования цвета восстановленного изображения многоакурсных объемных голограмм // Сборник трудов и официальных материалов научно-практической конференции "Голография в России и за рубежом". М., 2007. С. 54–58.
5. *Кольер Р., Беркхарт К., Линн Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 688 с.