

## РАДУЖНЫЕ ГОЛОГРАММЫ

В.П.Рябухо

Саратовский государственный университет,

Институт проблем точной механики и управления РАН

410026, Саратов, Московская 155

E-mail: rvp@sgu.ru

В современном курсе волновой оптики физические принципы голографии рассматриваются, как правило, на основе схем записи голограмм в попутных (схема Лейта и Упатниекса) и во встречных (схема Денисюка) объектном и опорном пучках света. В настоящей работе обсуждаются методические вопросы записи и восстановления изображений с использованием метода и схем радужной голографии, имеющей в настоящее время наиболее широкое практическое распространение, благодаря возможности восстановления изображений в белом свете обычных источников и технологически простому способу тиражирования таких голограмм.

### ВВЕДЕНИЕ

В оптической голографии [1-4] убедительным образом проявляются волновые свойства света. Этот метод базируется на двух фундаментальных явлениях физической оптики – интерференции и дифракции световых волн. Поэтому в современном курсе оптики голографии уделяется особое внимание, которое еще обусловлено и методологической значимостью этого метода, его широким практическим использованием как принципиально нового изобразительного средства, способа хранения, обработки и представления информации. В учебных и методических пособиях по оптике и голографии основное внимание уделяется голограммам в сходящихся (попутных) пучках (голограммам Лейта и Упатниекса) и объемным голограммам во встречных пучках (голограммам Денисюка). В тоже время в учебной литературе отсутствует описание методик получения голограмм Бентона, или как их по другому называют, радужных голограмм, с которыми в настоящее время приходится наиболее часто встречаться в повседневной жизни. Описание принципов радужной голографии в работах [5-8] носит в основном академический характер.

Оптическая голография имеет разнообразные научные и технические приложения, наиболее яркое из которых связано с ее изобразительными возможностями записи и восстановления объемных изображений трехмерных объектов. Широкое использование оптической голографии в изобразительных целях определяется, с одной стороны, возможностью записи голограмм и восстановления с них изображений в свете обычных тепловых источников белого света с протяженным телом светимости, с другой стороны –

возможностью технически достаточно простого и относительно дешевого тиражирования голограмм. Запись художественных изобразительных голограмм в некогерентном свете до сих пор нерешенная проблема, хотя отдельные достижения в этом направлении имеются. А вот с возможностью восстановления объемных изображений с голограмм в белом свете дело обстоит гораздо лучше.

Голограммы, записываемые в лазерном свете по оптической схеме Ю.Н.Денисюка с использованием встречных объектного и опорного пучков, можно рассматривать в белом свете источников с относительно малым телом светимости. Такие голограммы "помнят" не только амплитудно-фазовые распределения в объектном поле, но и обладают так называемыми спектральными селективными свойствами, присущими объемным дифракционным решеткам. Благодаря этим свойствам из всей совокупности различных спектральных составляющих белого света, направленного на голограмму, формируется дифрагированная квазимонохроматическая волна. Голограммы Денисюка обладают непревзойденными художественными качествами, их успешно используют для демонстрации изображений уникальных объектов и музейных ценностей. Однако тиражирование толстослойных голограмм Денисюка по своей технологической сложности и материальным затратам мало отличается от записи основной голограммы. Поэтому их использование в полиграфии, где требуется большое число копий, десятки тысяч и более, имеет ограниченный характер.

Тонкослойные голограммы, получаемые по так называемой схеме в попутных (сходящихся) пучках, предложенной американскими физиками Е.Лейтом и Ю.Упатниксом, допускают технологически простое и относительно дешевое копирование [2,6]. Однако голограммы Лейта и Упатникса, записанные в тонких фоточувствительных слоях, не обладают спектральной селективностью. Поэтому в белом свете с таких голограмм восстанавливается множество объемных изображений во всех спектральных составляющих. Эти изображения пространственно смещены друг относительно друга, в результате чего вместо четкого изображения наблюдается расплывчатое световое пятно со спектральной окраской по краям. Исключить этот недостаток удалось американскому ученому С.Бентону [9,10], который, работая над проблемой создания голографического дисплея, предложил оригинальный способ уменьшения информационной емкости голограмм, фактически, без потерь объемности воспринимаемого изображения. В схеме Бентона реализуется пространственная селекция различных спектральных составляющих восстановленных с голограммы световых волн и обеспечивается возможность наблюдения восстановленных голографических изображений во всех цветах радуги. Поэтому такие голограммы стали называть радужными.

## МЕТОД ЗАПИСИ РАДУЖНЫХ ГОЛОГРАММ

Оптическая голограмма представляет собой фотографическую запись интерференционной структуры, образующейся при наложении на объектную световую волну некоторой когерентной ей опорной волны (рис.1,а). По своей физической сути оптическая голограмма – это сложная, нерегулярная дифракционная решетка, которая может быть объемной (трехмерной) или поверхностной (двумерной). При записи интерференционной структуры в толстой регистрирующей среде, когда пространственный период интерференционных полос  $\Lambda$  существенно меньше толщины регистрирующего слоя,  $\Lambda \ll d$ , записывается объемная голограмма. Такая голограмма обладает спектрально селективными свойствами и позволяет восстанавливать одноцветное изображение в белом свете. Длина волны и направление распространения дифрагировавшего на объемной голограмме света определяется известным уравнением Брэггов-Вульфа,  $2\Lambda \sin \alpha_0 = \lambda$ , где  $\alpha_0$  - угол между опорной и предметной волнами при записи голограммы. Наилучший вариант объемных голограмм – это голограммы Денисюка. Однако, их тиражирование, как уже отмечалось, достаточно трудоемкий процесс.

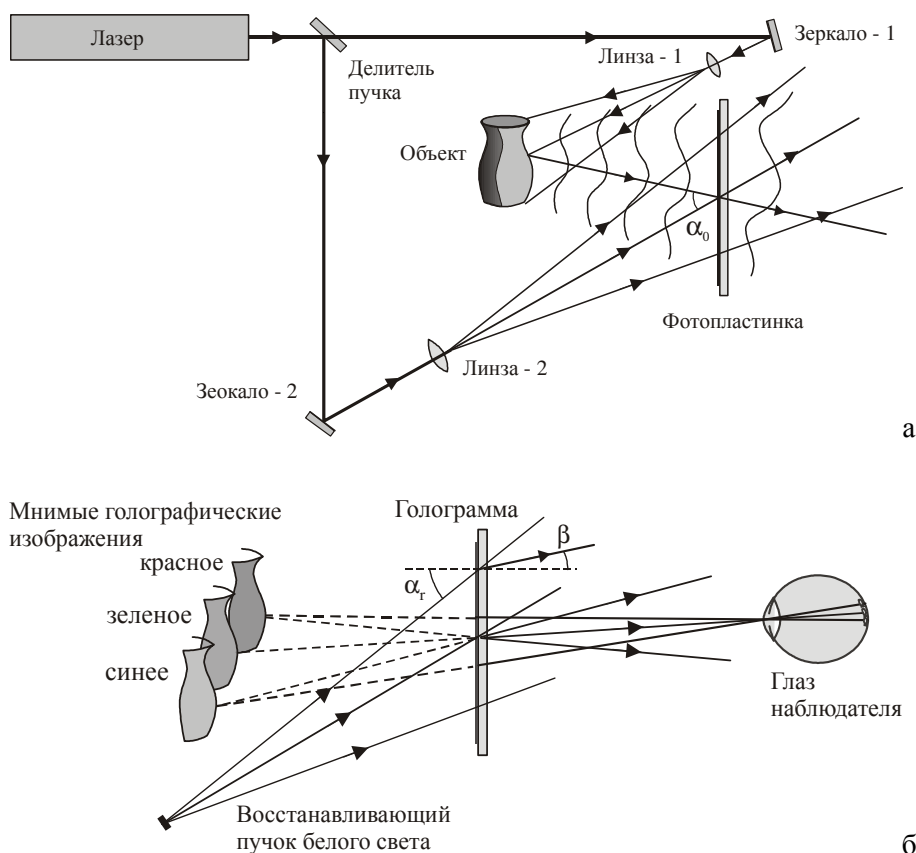


Рис.1. Оптические схемы записи голограммы в попутных пучках - схема Лейта и Упатниекса (а), и восстановления изображений с голограммы в белом свете (б)

Период интерференционных полос  $\Lambda$  зависит от угла  $\alpha_0$  между лучами света объектной и опорной волн,  $\Lambda \approx \lambda/2 \sin(\alpha_0/2)$ . Для схемы Денисюка  $\alpha_0 \approx 180^\circ$  (встречные пучки)  $\Lambda \approx \lambda/2$  ( $\lambda = 0,63$  мкм,  $\Lambda \approx 0,3$  мкм). Поэтому в относительно тонком фоточувствительном слое толщиной  $d \approx 8 - 10$  мкм записывается объемная дифракционная решетка–голограмма.

При записи голограммы по схеме Лейта и Упатниекса (рис.1,а), при  $\alpha_0 \approx 15^\circ - 60^\circ$ , в тонком светочувствительном слое, когда  $\Lambda > d$ , получают фактически поверхностную двумерную дифракционную решетку, которая уже не обладает спектрально селективными свойствами. При освещении такой голограммы пучком белого света формируется множество дифрагированных волн с различными длинами  $\lambda$ , распространяющихся под различными углами  $\beta$  и формирующих множество взаимосмещенных голографических изображений (рис.1,б). Это легко понять, анализируя уравнение для главных максимумов дифракции света на дифракционной решетке с периодом  $\Lambda$ :  $\Lambda(\sin \alpha_r + \sin \beta) = \lambda$ , где  $\alpha_r$  – угол падения освещающего пучка на голограмму,  $\beta$  – угол дифракции. В итоге наблюдатель в области локализации мнимого голографического изображения видит расплывчатое пятно.

При уменьшении расстояния между объектом и голограммой сдвиг восстановленных голографических изображений в разных цветах становится меньше. Поэтому на голограмме сфокусированного изображения можно наблюдать в белом свете достаточно четкое изображение объекта с небольшой глубиной рельефа. Не трудно видеть, что если наблюдатель удаляется от голограммы, то в зрачок его глаза попадает все меньше дифрагировавших спектральных составляющих, число воспринимаемых смещенных изображений уменьшается и при достаточном удалении наблюдается относительно четкое изображение в том или ином цвете в зависимости от угла наблюдения. Эта идея пространственной селекции спектральных составляющих дифрагировавших на голограмме световых волн, но в более удобной для практики форме, заложена в методе Бентона записи радужных голограмм.

Метод Бентона включает два последовательных этапа записи 2-х голограмм по схеме Лейта и Упатниекса. Сначала записывается обычная голограмма, например по схеме, приведенной на рис.1,а. При этом объект располагают от голограммы на расстоянии наилучшего зрения 25 – 30 см. Затем с этой первичной голограммы восстанавливают действительное псевдоскопическое объемное голографическое изображение. Для этого используют восстанавливающий пучок лазерного света, сопряженный опорному пучку (рис.2,а). При этом голограмму прикрывают вертикальной узкой и длинной щелью так, что восстановление действительного изображения происходит только с узкой вертикальной полоски на голограмме. В область действительного изображения помещают

фоточувствительный слой и для записи второй голограммы направляют опорный пучок, когерентный световому пучку, восстанавливающему действительное изображение с первой голограммы. Таким образом записывается основная радужная голограмма.

Если теперь полученную голограмму осветить пучком белого света, сопряженным опорному, то одновременно с ортоскопическим изображением объекта будет восстанавливаться и изображение полоски – щели, прикрывавшей первичную голограмму. Изображения щели в разных цветах в силу зависимости угла дифракции от длины волны  $\lambda$  будут занимать разное пространственное положение и поэтому в этой области наблюдается цветная полоса с чередованием всех цветов радуги (рис.2,б).

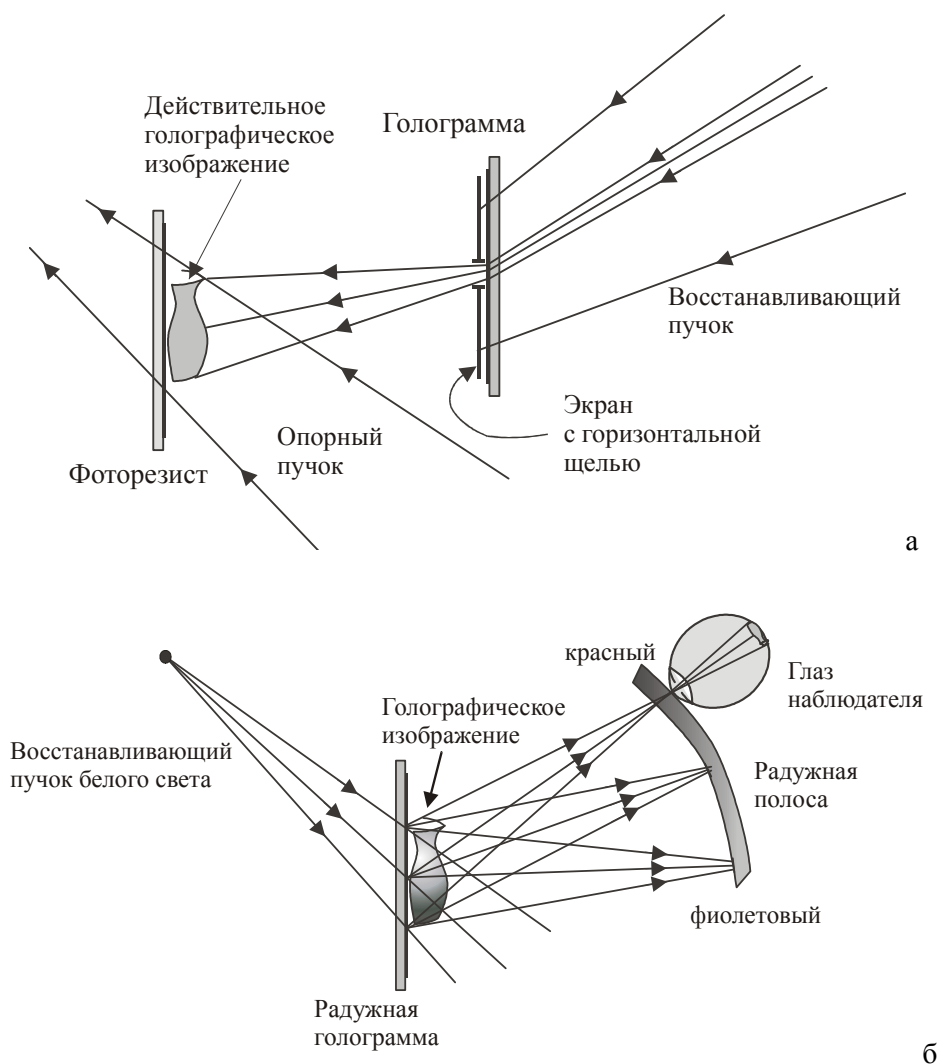


Рис.2. Оптические схемы записи радужной голограммы (а) и восстановления с нее в белом свете разноцветных изображений (б)

Зрачок глаза наблюдателя, помещенный в эту область, выделит из всего спектра одну цветовую составляющую, в свете которой и будет наблюдатель воспринимать восстановленное голографическое изображение. Каждое изображение щели выполняет роль

окна наблюдения восстановленного голографического изображения в соответствующем цвете. Перемещение глаз наблюдателя по радужной полосе, или наклон голограммы будет сопровождаться изменением цвета воспринимаемого изображения. При смещении головы наблюдателя в пределах одной цветовой полосы, как и для обычной голограммы, наблюдается параллакс восстановленного объемного голографического изображения. В направлении, перпендикулярном щели, параллакс изображения отсутствует, но это практически не влияет на объемность воспринимаемого изображения, поскольку глаза наблюдателя располагаются горизонтально. Для широкого горизонтального угла наблюдения изображения объекта длина каждой полосы (ширина радуги) должна быть достаточно большой, что обеспечивается соответственно большой шириной первичной голограммы.

Глубина сцены восстанавливаемого с радужной голограммы изображения определяется в основном угловыми размерами восстанавливающего источника света. От каждой точки протяженного источника восстанавливается свое изображение, смещенное в поперечном направлении относительно изображений, восстановленных другими точками источника. Это смещение тем больше, чем дальше от голограммы изображение объекта и чем больше угловое расстояние между точками источника. Можно привести следующие оценки [7]: для рассеянного света облачного неба или больших люминесцентных ламп глубина восстановленной сцены составляет несколько миллиметров, для обычных ламп накаливания – несколько сантиметров, для галогеновых ламп и солнечного освещения – она порядка 10 см.

Отвлекаясь от изобразительных свойств, радужные голограммы можно рассматривать в качестве дифракционного спектрографа. В самом деле, в классической схеме спектрографа на выходе наблюдают (регистрируют) спектральные линии – изображения входной щели прибора в разных длинах волн анализируемого излучения. Радужная голограмма интегрирует в себе и свойства диспергирующей дифракционной решетки, и свойства фокусирующей оптики. Схему на рис.2,б, включая оптическую систему глаза, можно рассматривать как схему классического монохроматора. Поэтому радужные голограммы с записью на них простых плоских изображений используют в цветовых измерениях.

### **ОДНОСТУПЕНЧАТАЯ ЗАПИСЬ РАДУЖНЫХ ГОЛОГРАММ**

Для наблюдения достаточно четкого изображения, восстановленного с радужной голограммы, необходимо объект – первичное голографическое изображение, расположить как можно ближе к голограмме. Наиболее технически просто это можно сделать, формируя действительное изображение объекта рядом с регистрирующим слоем. В методе Бентона

это делается с помощью первичной голограммы. Однако, если использовать схему записи голограммы сфокусированных изображений (рис.3), то можно ограничиться одним этапом и сразу же записать радужную голограмму. При этом для получения радужного эффекта при восстановлении изображения необходимо на этапе записи использовать щелевую апертуру у изображающей линзы. В этом, фактически, заключается одноступенчатая схема записи радужных голограмм по методу Н.Г.Власова [7,11].

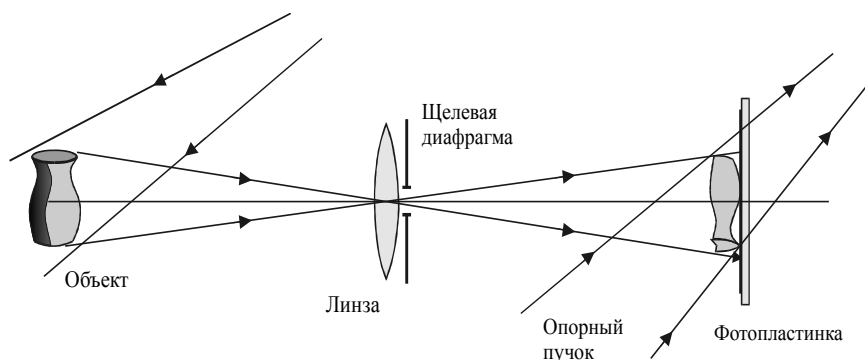


Рис.3. Одноступенчатая схема записи радужной голограммы

При освещении таким образом записанной голограммы пучком белого света, сопряженным опорному, как и в методе С.Бентона, восстанавливается изображение щелевой апертуры линзы в разных цветах под разными углами. При размещении глаз наблюдателя в области локализации изображений щели наблюдаются разноцветные изображения.

Если объект прозрачный, например, диапозитив, то для одноступенчатой записи радужной голограммы его необходимо просветить диффузно рассеянным лазерным излучением, формируемым путем создания на матовом стекле узкой длинной горизонтальной полоски [7].

### ЦВЕТНЫЕ РАДУЖНЫЕ ГОЛОГРАММЫ

На радужной голограмме можно получить и цветное изображение [12,13], если на этапе записи использовать лазеры с красным, синим и зеленым светом. При восстановлении с таких голограмм изображений в белом свете первоначальное распределение цвета по изображению наблюдается только при одном направлении взгляда на голограмму. В других вертикальных положениях головы наблюдателя непрерывно изменяются все цвета восстановленного изображения. При этом возникают весьма необычные цветовые соотношения и цветовая гамма восстановленного изображения оказывается более разнообразной, чем объекта – оригинала.

Радужные голограммы обеспечивают и более простой метод получения цветных голографических изображений [12,13]. Действительно, поскольку радужная голограмма, записанная в монохроматическом свете, восстанавливает изображение во всех цветах радуги, то простое наложение двух или трех изображений в основных цветах обеспечит получение многоцветного изображения.

Синтез цветного изображения, восстанавливаемого радужной голограммой, полученной с помощью одноцветного лазера и монохромной регистрирующей среды, чувствительной в узком спектральном диапазоне, основан на следующих свойствах голограмм. Если изменить угол падения на голограмму восстанавливающего светового пучка, то радужная полоса в области локализации изображения щели сместится в соответствии с дифракционной формулой  $\Lambda(\sin \alpha_T - \sin \beta_i) = \lambda_i$ , где  $\alpha_T$  - угол падения, а  $\beta_i$  - угол дифракции света с длиной волны  $\lambda_i$  на дифракционной решетке с периодом  $\Lambda = \lambda_0 / \sin(\alpha_0/2)$ . Следовательно, записывая цветоразделенные изображения (с использованием цветных фильтров) или различные фрагменты объекта на радужную голограмму при соответствующим образом рассчитанных углах падения опорного пучка  $\alpha_{0j}$ , при восстановлении голографического изображения получим набор пространственно смещенных радужных полосок для соответствующих изображений. Глаз наблюдателя, помещенный в той или иной части наложенных радуг увидит восстановленное многоцветное изображение, цветовая гамма которого будет меняться при вертикальном смещении головы наблюдателя или наклоне голограммы. Этот метод синтеза цветного изображения применим в основном для двумерных объектов, поскольку накладываемые изображения в разных цветах отличаются поперечным и продольным масштабами.

### **ТИРАЖИРОВАНИЕ РАДУЖНЫХ ГОЛОГРАММ**

Уточним сначала, каким образом записывается на голограмме и затем восстанавливается информация о световой волне и, следовательно, об объемном изображении, переносимым этой волной. На голограмме регистрируется интерференционная картина, создаваемая объектной и опорной волнами. Эта картина представляет собой достаточно сложную систему светлых и темных интерференционных полос, формирующихся в пределах отдельных пятен (спеклов) объектного поля [2,14]. Увеличенный фрагмент такой картины, получаемый при записи обычной, не радужной, голограммы диффузно отражающего объекта, представлен на рис.4,а. В этом случае угловые размеры голографируемого объекта  $\theta_s$ , как правило, сравнимы с углом падения  $\alpha_0$  опорного пучка на голограмму. Поэтому



период интерференционных полос  $\Lambda \approx \lambda / \sin \alpha_0$  оказывается всего в несколько раз меньше поперечных размеров спеклов на голограмме  $\epsilon_{\perp} \approx \lambda / \theta_s$ , что хорошо видно на рис.4,а.

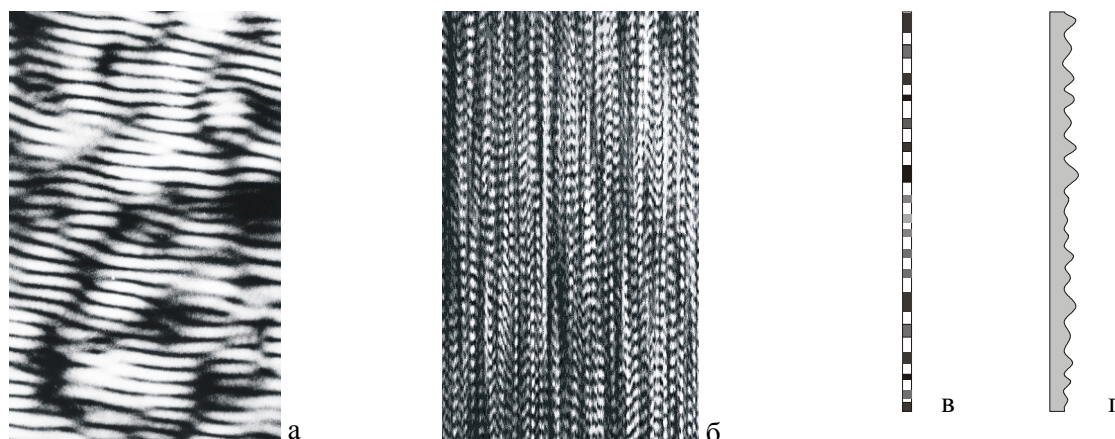


Рис.4. Увеличенные фрагменты голограммных интерференционных структур, получаемых при записи обычных голограмм Лейта и Упатниекса (а) и радужной голограммы Бетона (б).  
Вертикальные сечения амплитудной (в) и рельефно-фазовой (г) голограмм.

При записи радужной голограммы угловой размер щели в плоскости падения опорного пучка значительно меньше его угла падения. Поэтому спеклы объектного поля имеют сильно вытянутую в вертикальном направлении форму и пересечены множеством горизонтальных интерференционных полос (рис.4,б). Можно сделать следующие оценки. Ширина щели, используемой при записи радужной голограммы (рис.2,а), должна быть приблизительно равной диаметру зрачка глаза  $d \approx 4\text{мм}$  и располагаться на расстоянии наилучшего зрения  $L \approx 300\text{мм}$  от голограммы (рис.2,а). Тогда угловой размер щели составляет  $\theta_s \approx d/L \approx 1.3 \cdot 10^{-2}$  и при угле падения  $\alpha_0 \approx 45^\circ$  в пределах отдельных спеклов объектного поля оказывается  $\sim \epsilon_{\perp} / \Lambda \approx 5 \cdot 10^2$  интерференционных полос. При получении картины, представленной на рис.4,б, для разрешения структуры полос на фотоснимке угол  $\alpha_0$  был значительно меньше, чем в вышеприведенных оценках.

Контраст (четкость) интерференционных полос голограммной структуры определяется отношением амплитуд объектной и опорной волн на данном участке голограммы. Именно в значении контраста полос фиксируется информация об амплитуде объектной волны. Пространственные фазовые распределения в этой волне влияют на положение полос в каждом участке голограммы. Поперечный сдвиг полос на полпериода соответствует отличию фазы объектной волны на  $\pi$  радиан.

Таким образом, фотографическая запись системы интерференционных полос, в какой бы форме она не происходила, будет нести информацию о световой волне. Там, где четкость полос выше, голограмма обладает более высокой дифракционной эффективностью и восстановленная волна имеет большую амплитуду. Фазовые пространственные распределения в восстановленной волне определяются относительным положением структуры полос на голограмме. При записи на галогеносеребряный материал образуется голограмма – дифракционная решетка, в виде системы полос различной прозрачности. Такую голограмму называют амплитудной (рис.4,в), поскольку она модулирует амплитуду восстанавливающей световой волны. Если амплитудную голограмму отбелить, преобразовав ее темные участки в прозрачные, но с измененным показателем преломления, то получим фазовую голограмму, которая модулирует фазу восстанавливающего пучка света за счет пространственных вариаций показателя преломления голограммы. Фазовая голограмма получается и в том случае, когда записываемая на нее интерференционная структура преобразуется в соответствующий поверхностный микрорельеф (рис.4,г). Такие рельефно-фазовые голограммы работают как на просвет, так и на отражение. Именно рельефно-фазовые голограммы технологически просто тиражировать в больших количествах [6].

Рельефно-фазовые радужные голограммы записывают на различных фоточувствительных слоях [6]. Наиболее эффективным для этих целей служит фоторезист, на котором после экспонирования голограммы и соответствующей процедуры химического травления образуется поверхностный микрорельеф, отражающий структуру интерференционной картины, образованной объектной и опорной волнами. Далее с этой голограммы гальваническим способом получают металлическую реплику, чаще всего никелевую, копирующую поверхностный микрорельеф голограммы. Эта металлическая реплика в дальнейшем процессе служит штампом для тиснения копий голограмм на полимерных пленках. Полимерные голограммы–копии покрывают тонким слоем алюминия для повышения их отражающих способностей и наносят защитный полимерный слой. Таким образом получают до сотни тысяч копий рельефных радужных голограмм.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В настоящее время радужная голография составляет новое научное и техническое направление в современной когерентной оптике и ее приложениях. Радужные голограммы используют в голографической интерферометрии, в исследованиях быстротекущих процессов, в технике цветовых измерений и синтезе образцов цвета с заданными характеристиками. Технологически простое тиражирование радужных голограмм и

возможность восстановления с них изображений в белом свете определили их широкое использование в полиграфии, в рекламе в качестве фирменных значков различной продукции. Выпускаются специальные полимерные пленки (фольга) с переливающимся радужным рисунком, изготовленные по технологии радужных голограмм. Они используются в полиграфии для цветового оформления различной печатной продукции. Особой областью применения радужных голограмм является защита различных изделий, ответственных документов и ценных бумаг от подделок. Радужная голограмма может содержать ряд специальных световых меток, подвижных элементов изображения, индивидуальных знаков–сигналов, считываемых специальными устройствами. Эти качества голограммы в сочетании с наукоемкой и тонкой технологией изготовления голограммы–оригинала и ее полимерных копий делают подделку голографических знаков трудноразрешимой проблемой.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 00-15-96667, Программа “Ведущие научные школы РФ”, и гранта № REC-006 of the U.S. Civilian Research & Development Foundation for the Independent States of the Former Soviet Union (CRDF).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. Пер. с англ. /Под ред. Ю.И.Островского - М.: Мир, 1973. - 688 с.
2. Оптическая голография. Под ред. Г. Колфилда. / Пер. с англ. - М.: Мир, 1982 - Т.1. - 380 с.; - Т.2. - 736 с.
3. Островский Ю.И. Голография и ее применения. Л.: Наука, 1973. - 180 с.
4. Комар В.Г., Серов О.Б. Изобразительная голография и голографический кинематограф. - М.: Искусство, 1987. - 286 с.
5. Leith E. White-light holograms. // Scientific American. 1976. V.235. N.4. P.80-88,92-95.
6. Гальперн А.Д., Смаев В.П. Методы регистрации и тиражирования изобразительных рельефно-фазовых голограмм. // Оптико-механическая промышленность. 1988. №11. С.49-57.
7. Власов Н.Г. Радужная голография. // Природа. 1993. №8. С.74-80.
8. Власов Н.Г., Заборов А.Н., Яновский А.В. Современное состояние и перспективы развития радужной голографии: Обзорная информация. // Сер. “Образцовые и высокоточные средства измерений” Вып.3. – М.: Госстандарт СССР. ВНИИКИ. 1990. - 42 с.
9. Benton S.A. Hologram reconstruction with extended incoherent sources. // JOSA, 1969. V.59. P.1545-1547.

10. Benton S.A. Holographic displays: 1975-1980/ // Optical Engineering. 1980. V.19. N.5. P.686-689.
11. Власов Н.Г., Рябова Р.В., Семенов С.П. Одноступенчатая запись радужных голограмм. // ЖНиПФиК, 1977. Т.22, В.5. С.384-385.
12. Власов Н.Г., Заборов А.Н. Запись радужных голограмм, восстанавливающих многоцветные изображения. // ЖНиПФиК, 1987. Т.32. В.4. С.258-261.
13. Гальперн А.Д., Рожков Б.К., Смаев В.Г. О записи цветных радужных голограмм. // Опт. и спектр. 1987. Т.63. В.2. С.389-392.
14. Франсон М. Оптика спеклов. Пер. с англ.- М.: Мир, 1980. 171 с.