

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ  
ИНСТИТУТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ И  
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ИМ. АКАДЕМИКА Ж. ЖЕЕНБАЕВА  
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. Б. ЕЛЬЦИНА

Диссертационный совет Д.01.16.537.

На правах рукописи  
УДК 535.41: 778.38

**Кулмурзаев Нурбек Мамарасулович**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СВОЙСТВ  
ГОЛОГРАММ, ЗАПИСАННЫХ ПО МЕТОДУ  
БЕСЩЕЛЕВОЙ РАДУЖНОЙ ГОЛОГРАФИИ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Бишкек 2017

Работа выполнена в Кыргызском государственном университете  
строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук,  
доцент Исманов Ю. Х.

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук,  
доцент Джаманкызов Н. К.  
(Институт физико-технических  
проблем и материаловедения  
им. академика Ж. Жеенбаева НАН КР,  
г. Бишкек).

кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры теоретической физики  
Байтереков А. Т. (факультет физики  
и электроники КНУ им. Ж. Баласагына,  
г. Бишкек).

**Ведущая организация:** Национальный университет Узбекистана  
им. Мирзо Улугбека, 100174,  
Узбекистан, г. Ташкент,  
ул. Университетская, 4.

Защита состоится 21 апреля 2017 г. в 14-00 часов на заседании  
Диссертационного Совета Д.01.16.537 при Институте физико-технических  
проблем и материаловедения НАН КР им. Ж. Жеенбаева и Кыргызско-  
Российского Славянского университета им. Б. Ельцина по адресу: 720071,  
г. Бишкек, пр. Чуй 265а

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке  
НАН Кыргызской Республики.

Автореферат разослан «\_\_\_» марта 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д. ф.-м. н.



Фоломеев В. Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Голография была предложена Габором более 60 лет назад, как метод восстановления волнового фронта. К настоящему моменту самое широкое развитие получили как теоретические основы, так и практические аспекты применения голографии в различных областях науки и техники. Преодолены многие технические трудности, разработаны и используются новые, основанные на принципах голографии, методы анализа и контроля явлений и объектов.

Второй этап развития современной голографии связан с появлением лазеров и разработкой Э. Лейтом (начало 60-х годов) и Ю. Упатниексом внеосевой схемы записи голограмм.

Третий этап развития голографии связан с открытием Ю.Н. Денисюком трехмерной голографии. Благодаря этому открытию были получены голограммы, с которых восстанавливаются изображения предмета в белом свете.

Результаты исследований в области голографии огромны и многообразны. К наиболее важным можно отнести создание голографических корреляционных систем, использующих пространственные голографические фильтры, предложенные Вандер Люгтом, и метод голографической интерферометрии, с помощью которого можно сравнивать явления, зарегистрированные в различные моменты времени, что было немыслимо до открытия голографической интерферометрии.

Четвертый этап в развитии голографии начался в начале 70-х годов, и он связан с изобретением Бентоном радужной голограммы – плоской голограммы, изображения с которой наблюдаются в белом свете. Радужная голограмма использует весь спектр белого света и поэтому может быть очень яркой. Простота и низкая стоимость изготовления радужных голограмм, возможность их тиражирования тиснением, а также возможность восстановления изображения естественными источниками света, являются причиной большого интереса к этим голограммам.

Разработанный Бентоном метод представляет собой двухступенчатый процесс записи голограмм и является громоздким и трудоемким. Поэтому в дальнейшем были предложены более простые, одноступенчатые способы получения радужной голограммы. Существенным недостатком как двухступенчатых, так и одноступенчатых схем записи радужных голограмм является наличие в них узкой длинной щели, ограничивающей апертуру предметного луча. Вследствие чего для записи радужной голограммы требуется длительная экспозиция. Существуют схемы записи радужной голограммы без использования реальной щели,

путем формирования щелевидной функции (синтезированной щели). При этом используется полная апертура предметной волны. Однако эти схемы включают в себя сложные кинематические устройства, формирующие синтезированную щель в процессе записи радужных голограмм, что резко снижает практическую ценность указанного метода.

Отсюда следует, что исследования, связанные с разработкой новых и совершенствованием существующих методов записи радужных голограмм, являются *актуальными*.

### **Цель и задачи исследования.**

**Цель исследования:** экспериментальная проверка и теоретическое обоснование основных свойств голограмм, записанных по бесщелевому методу.

Для достижения указанной цели необходимо было **решить следующие задачи:**

1. Экспериментальная проверка основных свойств радужных голограмм, записанных без использования щели.
2. Теоретический анализ свойств указанных голограмм.
3. Исследование возможности использования бесщелевого метода записи радужных голограмм в голографической интерферометрии.

### **Научная новизна диссертационной работы:**

1. Впервые показано, что радужные голограммы, записанные по бесщелевому методу, обладают, одновременно, свойствами голограмм Габора, Лейта-Упатниекса и Денисюка.

2. Впервые экспериментально обосновано, что при освещении монохроматическим светом отбеленной голограммы периодической решетки, записанной по бесщелевой схеме, кроме традиционных мнимого и действительного изображений решетки, восстанавливаются также последовательности саморепродукций решетки не только в лучах  $\pm 1$  порядков, но и в нулевом порядке дифракции.

3. Впервые показано, что методы бесщелевой записи радужных голограмм позволяют преодолеть основные недостатки, возникающие при использовании обычных радужных голограмм в целях голографической интерферометрии.

### **Практическая значимость полученных результатов.**

1. Предложена обобщенная схема записи голограмм по методу бесщелевой радужной голографии (БРГ), в которой отсутствуют реальные или синтезированной щели. Данный факт позволяет уменьшить время экспозиции при записи радужной голограммы на 2–3 порядка, что особенно важно при промышленном тиражировании радужных голограмм.

2. Показано, что такая голограмма способна восстанавливать мнимые и действительные изображения объекта, одновременно, в трех порядках дифракции, не считая изображения, сфокусированного на самой голограмме, т. е. восстановленные изображения объекта могут наблюдать одновременно до 5 наблюдателей. Данное свойство голограммы может быть использовано при разработке голографического кино, в изобразительной голографии и т. д.

3. Так как методы бесщелевой записи радужных голограмм позволяют преодолеть основные недостатки, возникающие при использовании обычных радужных голограмм в целях голографической интерферометрии, то возможно широкое использование этих методов в голографической интерферометрии.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

1. Радужные голограммы пропускающих и отражающих объектов, записанные по методу бесщелевой радужной голографии, обладающие свойствами голограмм Габора, внеосевой Лейта-Упатниекса, сфокусированной и голограммы Денисюка.

2. Особенность голограмм регулярных объектов (одномерных решеток), заключающаяся в том, что при восстановлении таких голограмм формируются не только изображения решетки во всех трех дифракционных порядках, но и последовательности их саморепродукций.

3. Использование метода бесщелевой радужной голографии в интерферометрии, позволяющего преодолеть такие недостатки использования обычной (щелевой) радужной голографии, как ограниченность апертуры предметной волны, наличие сложных оптических систем в схемах записи, неравномерность контраста восстановленного изображения по всему полю и невозможность использования метода реального времени.

### **Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались и обсуждались:

1. Международная конференция «Развитие информационно – коммуникационных технологий в информационном обществе: состояние и перспективы ее развития», Бишкек, 2004;

2. Республиканская научная конференция, посвященная Всемирному году физики и 80-летию профессора Л. В. Тузова, Бишкек, 2005;

3. Международная научно-техническая конференция «Инновации в образовании, науке и технике», Бишкек, 2006;

4. 48-ая научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов «Наука молодых – путь к прогрессу!», Бишкек, 2006;

5. Межвузовская научно-практическая конференция «Инновации в образовании: проблемы и пути решения», Бишкек, 2006;

6. Международная научно-практическая конференция «Информационные технологии в образовании: состояние, проблемы и перспективы», Бишкек, 2011;

7. Пятая международная научно-техническая конференция «Запись и воспроизведение объемных изображений в кинематографе и других областях», Москва, 2013;

8. International conference on IT Promotion in Asia (ITPA 2014), Bishkek, Kyrgyzstan, 2014.

**Личный вклад автора.** Основные научные результаты получены автором лично.

**Публикации.** Основные результаты исследований опубликованы в 23 научных публикациях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы, содержащего 100 наименований. Общий объем диссертации 170 страниц, включая 45 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** раскрывается и обосновывается актуальность темы диссертации, излагаются цель, научная новизна и практическая ценность работы, достоверность полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** дан обзор классических методов записи голограмм. Проведен анализ преимуществ и недостатков осевой схемы записи, предложенной Габором, внеосевой схемы Лейта и Упатниекса. Рассмотрена также схема записи голограммы Денисюка. Особое внимание в обзоре уделено

рассмотрению известных методов записи радужных голограмм - плоских голограмм, изображения с которых наблюдаются в белом свете. Радужная голограмма использует весь спектр белого света и поэтому может быть очень яркой. Простота и низкая стоимость изготовления радужных голограмм, возможность их тиражирования тиснением, а также возможность восстановления изображения естественными источниками света, являются причиной большого интереса к этим голограммам.

Метод записи радужных голограмм был предложен Бентоном. Предложенная им схема состояла из двух ступеней, что сильно усложняло процесс записи. Предложенная в дальнейшем одноступенчатая схема была значительно проще, однако, как и двухступенчатая схема, она имела важный недостаток – наличие узкой щели в схеме записи. Для преодоления этого недостатка была предложена схема, в которой реальная щель была заменена синтезированной. Однако эта схема записи оказалась очень сложной, так как для формирования щелевидной функции необходимо было использовать сложное кинематическое устройство. По этой причине схема с синтезированной щелью не получила широкого распространения на практике.

**Во второй главе** рассматривается бесщелевой метод записи радужных голограмм. Отдельно рассмотрены процессы записи голограмм пропускающих и отражающих объектов. Общим для всех типов объектов является введение в схему записи дополнительного опорного пучка, соосного предметной волне. Однако методы ввода этого пучка при записи разных объектов различаются.

При рассмотрении пропускающих объектов коэффициент пропускания такого транспаранта представляют в виде

$$t(x_0, y_0) = t_0 + \Delta t(x_0, y_0), \quad (1)$$

где  $t_0$  – постоянная составляющая функции пропускания (с нулевой пространственной частотой),  $\Delta t$  – составляющая с ненулевой пространственной частотой. Тогда, согласно Габору, предметную волну, прошедшую через объект, можно представить, как

$$\tilde{a}(x, y) = a_0 \exp(-i\phi_0) + a_1 \exp(-i\phi_1(x, y)), \quad (2)$$

где  $a_0$ ,  $\phi_0$  – амплитуда и фаза когерентного фона, соответствующие члену  $t_0$  в (1);  $a_1$ ,  $\phi_1$  – амплитуда и фаза рассеянной волны, соответствующие  $\Delta t(x_0, y_0)$ .

Интенсивность света, падающего на фотопластинку, будет равна

$$I(x_1, y_1) = |A \exp(-iky_1 \sin \theta) + a_0 \exp(-i\phi_0) + a_1(x_1, y_1) \exp(-i\phi_1(x_1, y_1))|^2 = A^2 + T^2 + a_1^2 + 2Aa_1 \cos(2\pi\alpha y_1 - \phi_1) + 2Ta_1 \cos(\phi_0 - \phi_1) + 2AT \cos(2\pi\alpha y_1 - \phi_0), \quad (3)$$

где  $\theta$  – угол падения опорной волны,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  – волновое число,  $\lambda$  – длина записывающей волны,  $\alpha = \frac{\sin \theta}{\lambda}$  – пространственная частота,  $A^2$  – фоновая засветка,  $T^2$  – неискаженное негативное изображение объекта за счет когерентного фона  $a_0$ ,  $a_1^2$  – негативное размытое изображение объекта, формирующееся за счет рассеянной компоненты поля  $a_1$ .

В этом выражении имеются три интерференционных члена:

- $2Aa_1 \cos(2\pi\alpha y_1 - \phi_1)$  – описывает голограмму Френеля;
- $2Ta_1 \cos(\phi_0 - \phi_1)$  – соответствует голограмме Габора;
- $2AT \cos(2\pi\alpha y_1 - \phi_0)$  – описывает сфокусированное изображение.

Рассмотрим восстановление изображений объекта при различных условиях освещения:

1. *Голограмма освещается когерентной плоской волной  $\vec{A}$ , падающей нормально к голограмме* (рис.1). При этом восстанавливаются действительное  $F_r$  и мнимое  $F_l$  изображения объекта, расположенные симметрично относительно голограммы на расстояниях  $\pm z_0$  от голограммы, и сфокусированное изображение объекта  $F_F$  на самой голограмме. С целью упрощения рисунка, восстановленные изображения Габора не показаны (в нулевом порядке дифракции). Кроме этих изображений, возникают два проекционных изображения объектов  $R_1$  и  $R_2$  в направлениях, составляющих углы  $\pm \theta$  с осью голограммы, которые можно наблюдать на экране Э.

С приближением экрана к голограмме эти изображения перекрываются волной нулевого порядка и в плоскости голограммы совпадают с изображением  $F_F$ .

С удалением экрана Э от голограммы изображение  $R_1$  сначала уменьшается и на расстоянии  $z'_0$  ( $z'_0$  – расстояние от точечного источника предметной волны до голограммы) оно превращается в его Фурье-спектр.

При дальнейшем удалении экрана Э, изображение  $R_1$  разворачивается на  $180^\circ$  и увеличивается. В то же время пространственная ориентация и четкость изображения с удалением экрана не меняются, только увеличиваются его размеры.

Проекционные изображения объекта (прозрачные буквы на темном фоне) приведены на рис.3а. Это фотография получена на фотопленке (без фотоаппарата), расположенной на пути изображения  $R_1$  вместо экрана Э.

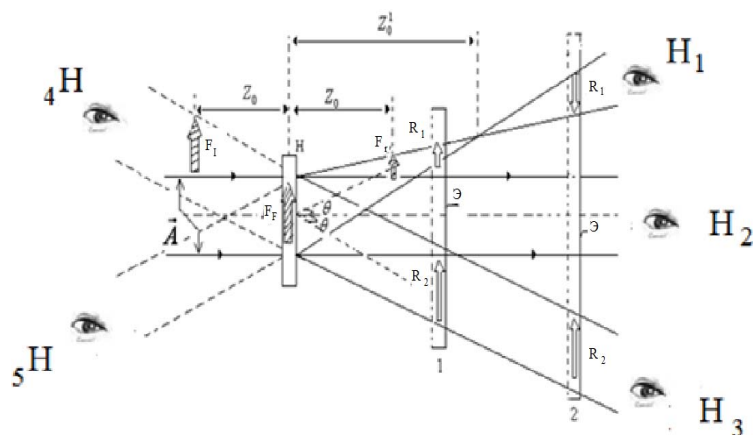


Рис. 1. Схема восстановления голограммы плоской волной  $\tilde{A}$ : H-голограмма;  $F_r$ ,  $F_l$  и  $F_F$  – соответственно действительное, мнимое и сфокусированное изображения объекта;  $R_1$  и  $R_2$  – проекционные изображения объекта; Э – экран; 1, 2 – пространственные положения экрана Э.

2. Голограмма H освещается нормально падающим излучением от когерентного точечного источника  $r_0$  (рис.2). При таком освещении голограммы восстанавливаются действительное  $F_r$ , мнимое  $F_l$ , сфокусированное  $F_F$  и проекционные изображения  $R_1$  и  $R_2$ . Координаты и размеры изображений зависят от относительного положения восстанавливающего точечного источника и объекта, и расположены эти изображения несимметрично относительно голограммы.

Размеры изображений  $R_1$  и  $R_2$  с удалением экрана Э от голограммы увеличиваются при неизменной их пространственной ориентации. Кроме этих изображений, наблюдается второе мнимое изображение  $F_2$ , как у Фурье-голограммы, но его размеры зависят от относительного положения восстанавливающего источника и голограммы.

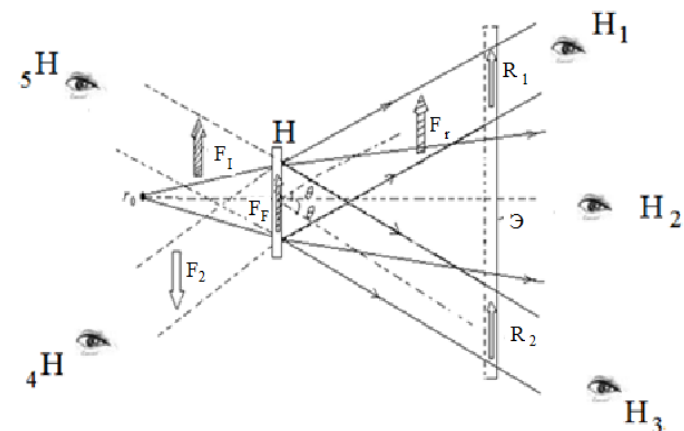


Рис. 2. Схема восстановления голограммы от точечного когерентного источника: H – голограмма;  $F_2$  – второе мнимое изображение;  $F_r$ ,  $F_l$  и  $F_F$  – соответственно действительное, мнимое и сфокусированное изображения;  $R_1$  и  $R_2$  – проекционные изображения; Э – экран; 1, 2 – пространственные положения экрана.

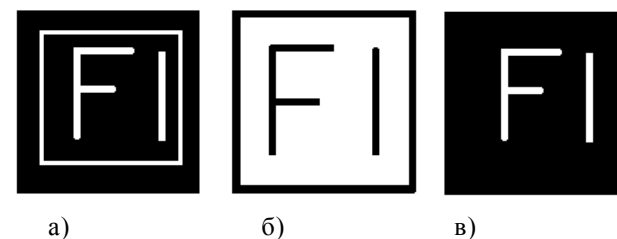


Рис. 3. Фотография восстановленных изображений объекта. а – проекционное, б – радужное, в – восстановленное диффузно-рассеянным светом.

3. Голограмма освещается белым светом. При этом она ведет себя как радужная. Яркое контрастное изображение объекта, локализованное на самой голограмме, можно наблюдать как в отраженном, так и в проходящем свете под углом  $\theta_k$  к оси, в пределах некоторого телесного угла  $\alpha_{max}$ , определяемого пространственной частотой объекта (индекс  $k$  показывает, что под углом  $\theta_k$  наблюдается изображение, восстановленное светом длиной волны  $\lambda$ ). При этом наблюдается не полное изображение объекта, а некоторая его полоса. Изменяя угол наблюдения в пределах телесного угла, можно просмотреть все поле

изображения, установив при этом, что окраска изображения изменяется. Черно-белая фотография восстановленного радужного изображения того же объекта в отраженном свете показана на рис. 3б.

Метод записи бесщелевой радужной голограммы можно применить и для записи радужной голограммы отражающих объектов. Для этой цели используем внеосевую схему записи голограммы Лейта в сочетании со схемой Габора, в которой когерентный фон, прошедший через предмет, заменяется зеркальной компонентной отраженной от объекта волны. Свойства полученной в этом случае голограммы совпадают со свойствами голограммы пропускающего объекта.

**В третьей главе** проведен анализ регистрирующих сред для голографической записи, на основе которого выработаны требования для регистрирующих сред, которые можно использовать для записи радужных голограмм на основе бесщелевого метода.

При освещении известных типов голограмм опорной волной восстанавливается только одно изображение – мнимое или действительное. Однако, при освещении голограммы, записанной по бесщелевому методу, когерентным излучением, наблюдаются, одновременно, несколько изображений, как в действительной, так и в мнимой областях. При освещении этой голограммы белым светом эти же изображения наблюдаются в цветах радуги. Для реализации указанных эффектов необходимо использовать голографические материалы с фазовой модуляцией, у которых от экспозиции зависит либо показатель преломления  $n_0$  либо толщина записывающего слоя фотопластинки  $d$ . Обычно они почти идеально прозрачны, так что можно принять коэффициент поглощения  $\alpha = 0$ . Для этого фотоэмульсионный слой проявленной голограммы отбеливается, т.е. растворяется металлическое серебро, которое выделяется при проявлении. При этом голограмма становится прозрачной, но на ней остается рельеф. Разность фаз света, прошедшего через слой диэлектрика толщиной  $d$  и с показателем преломления  $n_0$  и через слой воздуха той же толщины, описывается выражением:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi(n_0-1)d}{\lambda_0} \quad (4)$$

Для тонкослойных голограмм на практике изменение  $n_0$  намного меньше, чем изменение толщины слоя  $\Delta d$ . Поэтому изменение разности фаз световой волны пропорционально толщине рельефа отбеленной голограммы. Сдвиг фазы волны света, прошедшей сквозь такую голограмму, в данном случае можно считать приблизительно пропорциональным ее интенсивности  $I(x, y)$

$$\Delta\Phi \approx I(x, y) \quad (5)$$

При этом коэффициент пропускания такой голограммы определяется выражением:

$$t(x, y) \approx \exp(il(x, y)) \quad (6)$$

Полученная голограмма является чисто фазовой, что сильно повышает ее дифракционную эффективность и улучшает качество восстановленного радужного изображения.

В данной главе также рассмотрена возможность объединения голограмм Габора, Лейт, Денисюка и Бентона в одну голограмму, записанную на основе метода бесщелевой радужной голографии.

Схему записи голограммы во встречных пучках дополним осевой схемой записи голограммы Габора (рис.4).

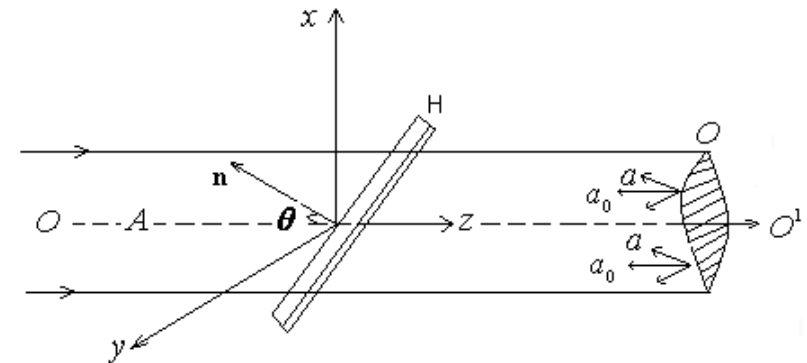


Рис.4. Схема записи объединенной голограммы.

Опорный пучок света  $A$  проходит через толстослойную среду  $H$  и падает на объект. Для объекта создадим такие условия, чтобы при отражении от него образовались зеркальная и диффузная компоненты. Тогда, применяя представление для волны, предложенное Габором, отраженную объектом  $O$  волну можно представить как сумму

$$a(x, y) = a_0 + a_1(x, y) = a_0 \exp(-i\phi_0) + a_1(x, y) \exp(-i\phi_1(x, y)) \quad (7)$$

Здесь  $a_0$  и  $a_1$  соответствуют зеркальной и диффузной компонентам отраженной от объекта  $O$  волны. Падающую слева на фотопластинку  $H$  опорную волну обозначим  $A = A \exp(i\psi)$ , а волну, падающую на эту пластинку справа, обозначим как  $a(x, y)$ . Здесь  $a_0 \exp(-i\phi_0)$  служит второй опорной волной, а  $a_1(x, y) \exp(-i\phi_1)$ , представляет собой диф-

фузную компоненту. Для удобства наблюдения восстановленных с голограмм изображений фотопластинку  $H$  повернем на некоторый угол  $\theta$  относительно оптической оси  $OO'$  ( $\theta$  - угол между оптической осью и нормалью  $n$  к поверхности  $xy$  пластинки  $H$ ). Тогда интенсивность света в плоскости фотопластинки будет

$$I(x, y) = |A \exp(i(\psi + \gamma)) + a_0 \exp(-i(\phi_0 + \gamma)) + a_1 \exp(-i(\phi_1 + \gamma))|^2 = A^2 + a_0^2 + a_1^2 + 2a_0a_1 \cos(\phi_1 - \phi_0) + 2Aa_1 \cos(2\gamma + \psi + \phi_1) + 2Aa_0 \cos(2\gamma + \psi + \phi_0) \quad (8)$$

где  $\gamma = 2\pi ax$ ,  $\alpha = \sin\theta/\lambda$  – пространственная частота,  $\lambda$  – длина записывающей волны,  $A^2$  и  $a_0^2$  – интенсивность волн,  $a_1^2 a_1^2$  – негативная фотогография объекта.

В этой голограмме имеются три интерференционных члена, которые описывают:

1.  $2Aa_1 \cos(2\gamma + \psi + \phi_1)$  – голограмму Денисюка, записанную в толщине фотослоя (объемная).

2.  $2a_0a_1 \cos(\phi_1 - \phi_0)$  – осевую голограмму Габора, записанную на поверхности фотослоя (на стороне предмета) и по глубине фотослоя по направлению соосной опорной волны  $a_0$ .

3.  $2Aa_0 \cos(2\gamma + \psi + \phi_0)$  – регулярную голографическую решетку по объему (объемная регулярная голографическая решетка – ОРГР). Это объемная регулярная голографическая решетка (ОРГР) обладает как отражательной, так и пропускающей способностью.

В четвертой главе приведены результаты оптических экспериментов, исследующих свойства голографического эффекта Тальбота.

Эксперименты по записи голограммы были проведены с одномерной амплитудной решеткой, изготовленной фотографическим способом. Параметры решетки: размеры  $10 \times 10$  см, период решетки  $d = 500 \pm 7$  мкм.

Голограмма амплитудной решетки записывалась с помощью плоских предметной и опорной волн, по внеосевой схеме, на установке УИГ-2М. Угол между этими волнами равнялся  $30^\circ$ . Согласно формуле  $\Delta z = z_{p+1} - z_p = 2 \frac{d^2}{\lambda}$  – период саморепродукции для данной решетки  $\Delta z = 79,2$  см. При записи голограммы расстояние  $z_1$  между решеткой и плоскостью голограммы было произвольным. В данном эксперименте были взяты следующие значения расстояний:

$$z_1 = \Delta z; \quad \Delta z + \Delta z/4; \quad \Delta z + \left(\frac{3}{8}\right)\Delta z; \quad \Delta z + \left(\frac{\Delta z}{2}\right).$$

Полученные голограммы освещались когерентной плоской волной и белым светом.

1. **Голограмма освещалась плоской когерентной волной**, падающей нормально к голограмме (рис. 5). При этом, кроме традиционных действительного и мнимого изображений решетки (на рисунках не показаны), на определенных расстояниях, соответствующих +1 и -1 порядкам дифракции, одновременно восстанавливались саморепродукции решетки, наблюдаемые на экранах, помещенных на пути этих волн.

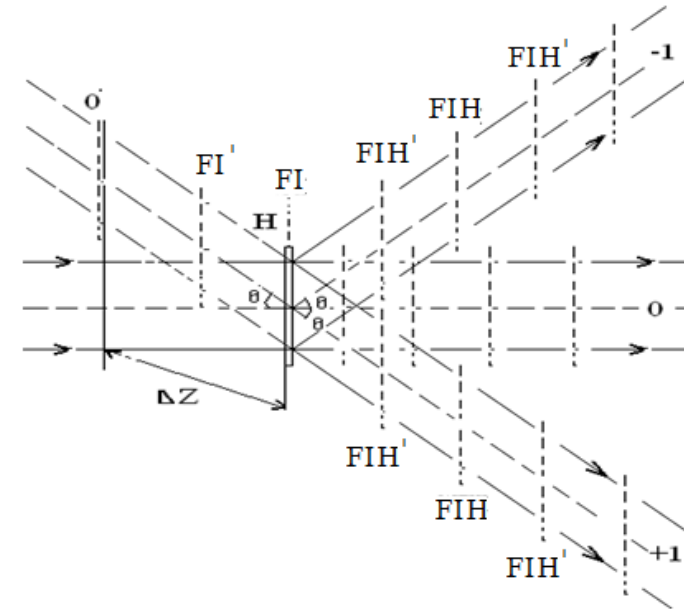


Рис. 5. Схема восстановления изображений саморепродукций с голограммы при  $z_1 = \Delta z$ ;  $H$ -голограмма,  $O'$ -положение объекта при записи голограммы;  $\theta$ -угол между предметной и опорной волнами,  $FI'$  и  $FI$ -положение плоскостей негативного и позитивного изображений саморепродукций решетки;  $FII'$  и  $FII$ -положения плоскостей негативного и позитивного изображений саморепродукций, восстановленных с голограммы;  $\Delta z$  и  $\Delta z'$ -период и полупериод саморепродукций; +1,0,-1-порядки дифракции.

Эффект саморепродукции наблюдался также в прямом направлении на сильном фоне волны нулевого порядка. На рисунке положения плоскостей саморепродукций, позитивных и негативных изображений, обозначены через  $FIH$  и  $FIH'$ . Рассмотрим положения восстановленных саморепродукций в зависимости от условия записи голограммы объекта.

1. При записи голограммы расстояние между объектом и голограммой равно  $z_1 = \Delta z$  ( $\Phi_1 = 2\pi$ ) (рис.5).

Положения плоскостей саморепродукций в действительной области пространства, восстановленных с голограммы в направлениях соответственно +1, -1 и 0 порядков, определялись расстояниями

$$\begin{aligned} z_p^+ &= \frac{1}{2}\Delta z; \Delta z; \Delta z; \frac{3}{2}\Delta z; 2\Delta z; \dots\dots\dots \\ z_p^- &= \frac{1}{2}\Delta z; \Delta z; \Delta z; \frac{3}{2}\Delta z; 2\Delta z; \dots\dots\dots \\ z_p^0 &= z_p - \cos\theta = 0.86z_p^-. \end{aligned}$$

Поскольку значение  $z_1$  удовлетворяет условию  $[z_1 - E(a)\Delta z] = 0$ , первое изображение в обоих направлениях ( $\pm 1$  порядки) негативные. Эти расстояния определялись положениями матового экрана, установленного на пути волн  $-1, 0, +1$  порядков дифракции, когда изображения решетки становились четкими. Эти экспериментальные данные уточнялись с помощью измерительного микроскопа МИР-2.

Как видно, положения плоскостей саморепродукции, а также позитивных и негативных изображений в обоих направлениях одинаковы.

2.  $z_1 = \Delta z + \left(\frac{3}{8}\right)\Delta z$  ( $\Phi_1 = \frac{11}{4}\pi$ ). (рис.6).

Положения плоскостей саморепродукций задается соотношениями

$$\begin{aligned} z_p^+ &= \frac{1}{8}\Delta z; \frac{5}{8}\Delta z; \frac{9}{8}\Delta z; \dots\dots\dots \\ z_p^- &= \frac{3}{8}\Delta z; \frac{7}{8}\Delta z; \frac{11}{8}\Delta z; \dots\dots\dots \end{aligned}$$

Отсюда следует, что положения плоскостей саморепродукций в разных направлениях неодинаковы, но, как и в предыдущем случае, первое восстановленное изображение в направлении  $-1$  позитивное, а в направлении  $+1$  оно негативное.

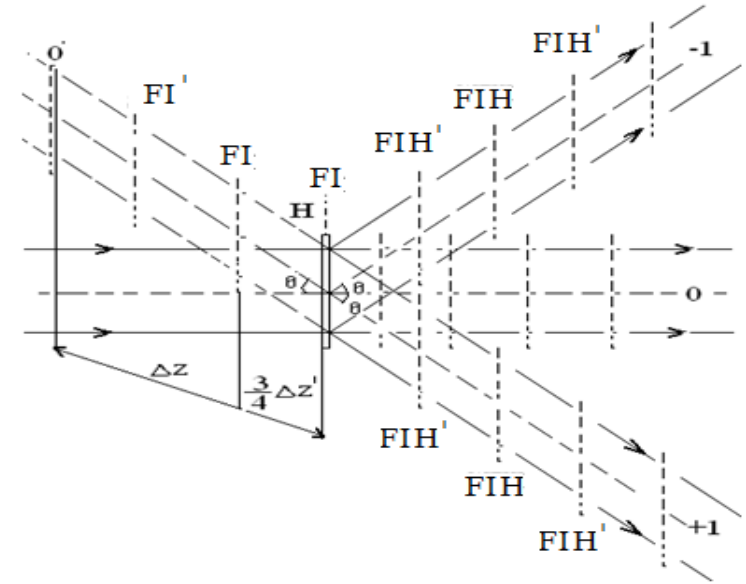


Рис.6. Схема восстановления изображений саморепродукций при  $z_1 = \Delta z + \frac{3}{4}\Delta z'$ .

## 2. Голограмма освещалась источником белого света.

В данном случае, как в проходящем, так и в отраженном свете на самой голограмме восстанавливается яркое, контрастное изображение решетки, окрашенное в радужные цвета. Изменяя угол наблюдения, можно просмотреть последовательно все поле изображения. При этом четкость восстановленного изображения решетки зависит от условия записи голограммы: изображение четкое, когда плоскость голограммы при ее записи совпадает с одной из плоскостей саморепродукции негативного или позитивного изображения.

Экспериментально было показано, что при восстановлении голограммы линейной решетки помимо восстановления, действительного и мнимого изображений решетки также восстанавливаются последовательности их саморепродукций. При записи голограммы по бесщелевому методу изображения решетки и последовательность саморепродукций восстанавливаются также в нулевом порядке дифракции.

В данной главе также показано, что радужные голограммы, записанные по бесщелевому методу, можно использовать в целях интерферометрии, так как в них отсутствуют недостатки, присущие голограммам, записанным с использованием щели:

1. используется незначительная часть апертуры предметной волны;
2. используются сложные оптические системы, включающие набор линз и щелей;
3. относительно высокий уровень спекл – шума;
4. неравномерность контраста восстановленного изображения по всему полю;
5. невозможность использования метода реального времени.

## ВЫВОДЫ

1. Экспериментально и теоретически обоснованы условия записи одноступенчатых радужных голограмм отражающих и пропускающих объектов с использованием обычной внеосевой схемы Лейта-Упатниекса. В схеме записи отсутствуют реальные или синтезированные щели, что устраняет один из главных недостатков в схеме записи радужных голограмм;

2. Восстановления изображений этих объектов в цветах радуги является следствием наличия второй опорной волны в виде зеркальной составляющей отраженной от объекта волны  $a_0$ , или наличия нулевого порядка дифракции в лучах, прошедших сквозь объект.

3. Если объект диффузный ( $a_0 \ll a_1$ ), то при освещении голограммы диффузного объекта белым светом его изображение не восстанавливается, что приводит к необходимости использования апертурной щели при записи радужных голограмм чисто диффузных объектов.

4. Отбеленные голограммы пропускающих объектов, записанные по внеосевой схеме, обладают:

- свойствами голограммы Габора, Френеля, Фурье и сфокусированного изображения;
  - помимо действительного и мнимого изображений восстанавливаются еще два проекционных изображения объекта;
  - при освещении такой голограммы белым светом она ведет себя как радужная.
  - яркое, контрастное изображение объекта, локализованное на самой голограмме, наблюдается как в отраженном, так и в проходящем свете.
5. Голограммы отражающих объектов, в которых присутствуют зеркальные компоненты ( $t_0 \approx \Delta t$ ), имеют следующие свойства:
- при освещении их исходным опорным пучком, восстанавливаются действительное и мнимое изображения объекта, как при записи по обычной, внеосевой схеме Лейта и Упатниекса.

- при освещении таких голограмм белым светом действительное и мнимое изображения восстанавливаются в ярких светах радуги.

6. В случае чисто диффузных объектов, зеркальную компоненту  $t_0$  можно ввести искусственно, сохраняя условия когерентности лучей, участвующих в записи голограммы. Свойства голограммы в этом случае подобны свойствам голограммы отражающих объектов.

7. Предложена обобщенная схема записи радужных голограмм, которая представляет собой, по сути, комбинацию схем записи голограмм Габора, Лейта, Денисюка и Бентона. Радужная голограмма, записанная по этой схеме, представляет собой не просто сумму четырех голограмм, а является многофункциональной:

- восстановленные белым светом с голограммы изображения можно наблюдать в отраженном свете (как в схеме Денисюка), в проходящем свете, в  $\pm 1$  порядках дифракции (как в внеосевой схеме Лейта-Упатниекса), и в 0-ом порядке дифракции (как в схеме Габора);

- в зависимости от направления освещающего голограмму пучка в каждом направлении наблюдения восстанавливаются, одновременно, три изображения объекта, расположенные на одной оси: действительное, сфокусированное и мнимое или, наоборот, мнимое, сфокусированное и действительное;

- если, при заданном направлении освещающего пучка, повернуть голограмму на некоторый угол, то восстановленные изображения меняются местами – действительное превращается в мнимое, и наоборот. Все указанные изображения, при этом, окрашены в цвета радуги.

8. При освещении монохроматическим светом отбеленной голограммы периодической решетки, записанной по внеосевой схеме, кроме традиционных мнимого и действительного изображений решетки, в области действительного изображения одновременно восстанавливаются саморепродукция решетки не только в лучах  $\pm 1$  порядков, но и в нулевом порядке дифракции. Условия совпадения плоскости голограммы с одной из плоскостей саморепродукции решетки при записи голограммы решетки не являются обязательными, то есть при записи голограммы расстояние от объекта до плоскости голограммы могут быть произвольными. Отбеливание голограммы значительно увеличивает интенсивность восстановленных изображений саморепродукции, что позволяет наблюдать их без применения специальных оптических и оптоэлектронных устройств. При освещении такой голограммы источником белого света, как в проходящем, так и в отраженном свете на плоскости самой голограммы восстанавливается полоса яркого контрастного изображения решетки, окрашенного в радужные

цвета. Освещение такой голограммы диффузно рассеянным белым светом восстанавливает изображение решетки, локализованное на самой голограмме. Это изображение монотонно и контрастно по всему полю и наблюдается как в отраженном, так и в проходящем свете.

9. Методы бесщелевой записи радужных голограмм позволяют преодолеть основные недостатки, возникающие при использовании обычных радужных голограмм в целях голографической интерферометрии, таких как: а) использование незначительной части апертуры предметной волны; б) наличие сложных оптических систем в схемах записи; в) относительно высокий уровень спекл – шума; г) неравномерность контраста восстановленного изображения по всему полю; д) невозможность использования метода реального времени.

### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. **Марипов А. М.** Объединенная голограмма Габора, Лейта, Денисюка и Бентона [Текст] / А. М. Марипов, Н. М. Кулмурзаев // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – 2004. – № 6. – С. 55–59.

2. **Кулмурзаев Н. М.** Особенности и проблемы записи радужной голограммы [Текст] / Н. М. Кулмурзаев // Труды Международной конференции «Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе: состояние и перспективы». Бишкек, 2004. – С. 110–116.

3. **Кулмурзаев Н. М.** Новые свойства голограмм по методу Марипова [Текст] / Н. М. Кулмурзаев // Труды Международной конференции «Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе: состояние и перспективы». Бишкек, 2004. – С. 107–110.

4. **Исманов Ю. Х.** Влияние фазовых сред на эффект Тальбота [Текст] / Ю. Х. Исманов, Н. М. Кулмурзаев // Труды Международной конференции «Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе: состояние и перспективы». Бишкек, 2004. – С. 98–103.

5. **Кулмурзаев Н. М.** Многофункциональная голограмма Марипова [Текст] / Н. М. Кулмурзаев // Материалы Республиканской научной конференции, посвященной Всемирному году физики и 80-летию профессора Л. В. Тузова. Вестник КНУ им. Ж. Баласагына. – 2005. – № 3. – С. 199–202.

6. **Кулмурзаев Н. М.** Голографические среды для записи голограмм по методу бесщелевая радужная голография [Текст] / Н. М. Кулмурзаев, К. С. Омурзаков // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – 2006. – № 9. – С. 205–208.

7. **Марипов А. М.** Классическая и современная голографии. Состояние и перспективы ее развития [Текст] / А. М. Марипов, Н. М. Кулмурзаев,

К. С. Омурзаков // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – 2006. – № 9. – С. 151–153.

8. **Марипов А. М.** Измеритель дифракционной эффективности радужных голограмм [Текст] / А. М. Марипов, Н. М. Кулмурзаев, Б. А. Джумабаев и др. // Материалы 48-й научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Наука молодых-путь к прогрессу». Бишкек: КГТУ, 2006. – С. 242–245.

9. **Кулмурзаев Н. М.** Объединение голограммы Денисюка с радужной голограммой [Текст] / Н. М. Кулмурзаев, Б. А. Джумабаев // Материалы межвузовской научно-практической конференции «Инновации в образовании: проблемы и пути решения». Бишкек: МАУПФИБ, 2006. – С. 77–78.

10. **Кулмурзаев Н. М.** Особенности регистрирующей среды для записи бесщелевой радужной голограммы (БРГ) [Текст] / Н. М. Кулмурзаев // Известия КГТУ. – 2011. – № 22. – С. 210–212

11. **Исманов Ю. Х.** Эффект Тальбота для плоскопараллельной пластины [Текст] / Ю. Х. Исманов, Н. М. Кулмурзаев, Н. А. Тургунбаев // Вестник КГУСТА. – 2011. – Т. 1. – № 2 (32). – С. 74–76.

12. **Марипов А. М.** Малое голографическое кино [Текст] / А. М. Марипов, Н. М. Кулмурзаев // Труды V международной научно-технической конференции: «Запись и воспроизведение объемных изображений в кинематографе и других областях». Москва, 2013. – С. 223–234.

13. **Кулмурзаев Н. М.** Регистрирующие среды для голографии и радужной голографии [Текст] / Н. М. Кулмурзаев, Ю. Х. Исманов, Н. А. Тургунбаев // Вестник КГУСТА. – 2014. – № 1(43). – С. 83–87.

14. **Ismanov Yus.** Wide-range Holographic Interferometer [text] / Yus. Ismanov, A. Abdulaev, N. Kulmurzaev // Proceedings of International Conference on IT Promotion in Asia (ITPA, 2014) / Bishkek, 2014. – P. 96–100.

15. **Абдулаев А.** Широкодиапазонный голографический интерферометр [Текст] / А. Абдулаев, Ю. Х. Исманов, Н. М. Кулмурзаев // Вестник КГУСТА. – 2014. – № 3. – С. 199–204.

16. **Кулмурзаев Н. М.** Радужная голография в интерферометрии [Текст] / Н. М. Кулмурзаев // Известия НАН КР. – 2015. – № 2. – С. 19–22.

17. **Кулмурзаев Н. М.** Голография Денисюка и радужные голограммы [Текст] / Н. М. Кулмурзаев // Известия НАН КР. – 2015. – № 3. – С. 24–27.

18. **Исманов Ю. Х.** Искажения последовательности саморепродукций в среде типа линза [Текст] / Ю. Х. Исманов, Н. М. Кулмурзаев // Научная перспектива. г. Уфа. – 2016. – № 3(73). – С. 59–61.

19. **Исманов Ю. Х.** Радужная голография в интерферометрии [Текст] / Ю. Х. Исманов, Н. М. Кулмурзаев // Научная перспектива. г. Уфа. – 2016. – № 3(73). – С. 57–58.

20. **Кулмурзаев Н. М.** Запись радужных голограмм в голографии Денисюка [Текст] / Н. М. Кулмурзаев // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. – 2015. – Т. II. – №3 (45). – С. 203–207.

21. **Исманов Ю. Х.** Обратные задачи в оптике фазовых сред [Текст] / Ю.Х. Исманов, Н. М. Кулмурзаев // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. – 2015. – Т. II. – №3(45). – С. 199–203.

22. **Исманов Ю. Х.** Обобщенный анализ интерферограмм, полученных голографическим методом [Текст] / Ю. Х. Исманов, А. А. Абдулаев, Н. М. Кулмурзаев // Наука, техника и образование. – 2016. – № 3(21). – С. 6–9.

23. **Исманов Ю. Х.** Предварительная обработка интерферограмм на выходе голографического интерферометра [Текст] / Ю. Х. Исманов, А. А. Абдулаев, Н. М. Кулмурзаев // Наука, техника и образование. – 2016. – № 3(21). – С. 9–12.

**Кулмурзаев Нурбек Мамарасуловичтин «Голограммалардын касиеттерин жылчыксыз ыкма менен жазылган кубулба голографиясын тажрыйбада тастыктоо» деген темадагы 01.04.05 - Оптика адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидатына талап кылынган диссертациясына**

## **РЕЗЮМЕ**

**Негизги сөздөр:** кубулжу голография, жылчыксыз ыкма, тунук нерсе, чагылтуучу нерсе, Габордун ыкмасы, экинчилик негизги нур, Тальботтун голографиялык эффекти, коп каналдуу голографиялык интерферометр.

**Изилдоонун объектиси:** болуп жылчыксыз ыкма менен жазылган кубулжу голограмманы изилдоо эсептелинет.

**Иштин максаты:** Жылчыксыз ыкма менен жазылган кубулжу голограмманын негизги касиеттерин теориялык жана эксперименталдык ыкма менен тастыктоо.

**Изилдоонун ыкмалары:** кубулжу голограмманын жазылышы жана кайрадан калыптанышы боюнча оптикалык эксперименттер; алынган жыйынтыка теориялык жактан анализ.

**Алынган натыйжалар:** жылчыксыз ыкма менен жазылган кубулжу голограмманын жалпыланган схемасы сунуш кылынган (ЖКГ), анда реалдуу же синтезделген жылчыктын жоктугун тастыкталган; жылчыксыз ыкма менен жазылган кубулжу голограмманын негизги касиеттери изилденген.

**Колдонуу боюнча сунуштар:** кадимки кубулжу голограммасындай эле, жылчыксыз ыкма менен жазылган кубулжу голограммасын ар кандай аймактарда пайдаланууга болот, мисалы; голографиялык кино, голографиялык коргозмо, ж.б.у.; голографиялык интерферометрия.

## РЕЗЮМЕ

диссертации Кулмурзаева Нурбека Мамарасуловича на тему: «Экспериментальное обоснование свойств голограмм, записанных по методу бесщелевой радужной голографии» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика

**Ключевые слова:** радужная голография, бесщелевой метод, пропускающие объекты, отражающие объекты, регулярные объекты, метод Габора, второй опорный пучок, голографический эффект Тальбота, многоканальный голографический интерферометр.

**Объектами исследования** являются радужные голограммы, записанные по бесщелевому методу.

**Целью работы** является: экспериментальная проверка и теоретический анализ основных свойств радужных голограмм, записанных по бесщелевому методу.

**Методы исследования:** оптические эксперименты по записи и восстановлению радужных голограмм; теоретический анализ полученных результатов.

**Полученные результаты:** предложена обобщенная схема записи голограмм по методу бесщелевой радужной голографии (БРГ), в которой отсутствуют реальные или синтезированные щели; исследованы основные свойства радужных голограмм, записанных по методу бесщелевой радужной голографии.

**Рекомендации по использованию:** радужные голограммы, записанные по бесщелевому методу, могут быть использованы во всех областях, где используются обычные радужные голограммы, кроме того, в голографическом кино, изобразительной голографии и голографической интерферометрии.

## SUMMARY

Kulmurzaev Nurbek Mamarasulovich's dissertation on "Experimental justification of the features of holograms recorded by the method of slitless rainbow holography" for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, specialty 01.04.05 – optics

**Keywords:** rainbow holography, slitless method, transmitting objects, reflecting objects, regular objects, Gabor method, the second reference beam, the holographic Talbot effect, multichannel holographic interferometer.

**The objects of study** are rainbow holograms recorded by the slitless method.

**The aim is:** experimental verification and theoretical analysis of the basic properties of rainbow holograms recorded on slitless method.

**Research methods:** experiments on optical recording and reconstruction of rainbow holograms; theoretical analysis of the results.

**Results:** a generalized scheme of hologram recording by the method of slitless rainbow holography (SRH), in which there are no real or synthesized slit is developed; the basic properties of rainbow holograms recorded by the method of slitless rainbow holography are investigated.

**Recommendations for use:** rainbow holograms recorded by the slitless method can be used in all areas where conventional rainbow holograms are used, and, in addition, in holographic movie, graphic holography and holographic interferometry.



Подписано в печать 10.03.17.  
Формат 60×84<sup>1/16</sup>  
Офсетная печать. Объем 1,5 п.л.  
Тираж 100 экз. Заказ 163.

Отпечатано в типографии КРСУ  
720048, г. Бишкек, ул. Горького, 2