

*На правах рукописи*

Гуляев Сергей Николаевич

**РЕЛЬЕФНО-ФАЗОВЫЕ ГОЛОГРАММЫ НА  
ФОТОЭМУЛЬСИОННЫХ СЛОЯХ,  
ОБЛУЧЕННЫХ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ  
ИЗЛУЧЕНИЕМ**

Специальность 01.04.04 – физическая электроника  
01.04.05 - оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук

Санкт-Петербург

2006 г.

Работа выполнена на кафедре физической электроники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
Фотиади Александр Эпаминондович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор  
Кожевников Николай Михайлович

кандидат физико-математических наук, доцент  
Чернов Борис Константинович

Ведущая организация: Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе  
РАН

Защита состоится 16 февраля в 16 часов на заседании диссертационного совета Д212.229.01 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, II уч. корпус, ауд. 470.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Автореферат разослан «\_\_» января 2006 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.229.01  
доктор технических наук, профессор

Коротков А. С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Несмотря на появление большого количества разнообразных типов записывающих голографических сред, и по сей день галоидосеребряные фотоматериалы вызывают большой интерес исследователей, работающих в области голографии. Это обусловлено тем, что галоидосеребряные фотоэмульсионные слои обладают уникальным набором свойств, таких как: высокая энергетическая чувствительность (одна из самых высоких среди записывающих сред), сенсбилизация к любым участкам видимого спектра и возможность получения тонких и объемных (брэгговских) голографических структур, работающих как на пропускание, так и на отражение. Кроме того, технология производства фотоматериалов обеспечивает получение однородных слоев с заданными свойствами на подложках практически неограниченных размеров. Универсальность свойств фотоматериалов предопределило их широкое использование для создания элементов дифракционной оптики – области, бурно развивающейся в последние десятилетия.

Наиболее распространенным способом получения голограммных оптических элементов (ГОЭ) на фотоматериалах, обладающих дифракционной эффективностью, приближающейся к теоретическому пределу, является замена серебряного изображения (СИ) на чисто фазовую структуру в желатине фотоэмульсионного слоя. Как правило, это достигается избирательным дублированием желатины и позволяет успешно развивать методы создания эффективных тонких рельефно-фазовых [1, 2, 3] и объемных [4, 5] голографических структур. Однако указанные методы не позволяют получить равномерную пространственно-частотную характеристику (ПЧХ) рельефно-фазовых ГОЭ для коммерчески выпускаемых фотоэмульсионных слоев, глубина поверхностного рельефа недостаточна для ряда применений и т. д. Эти проблемы можно разрешить в рамках исследований свойств голографических фотоматериалов, что также делает данную диссертационную работу актуальной.

Существуют исследовательские работы, где избирательное воздействие на желатину фотографического слоя предлагается проводить за счет светового дублирования фотонами видимого и ближнего УФ диапазона световых волн [6, 7]. В некоторых патентных работах [8, 9] для этой цели предлагается использовать коротковолновое УФ-излучение ( $\lambda < 270$  нм) без сенсбилизации желатины соединениями хрома, однако результатов исследований в этой области практически не было опубликовано. Тем не менее, можно ожидать, что увеличение энергии световых фотонов может привести к новому физическому качеству процесса взаимодействия света с веществом фотографической эмульсии, поскольку высокоэнергетичные фотоны интенсивно поглощаются в тонком поверхностном слое

фотоэмульсии [10]. Это неизбежно должно сказаться на основных свойствах голографических структур, получаемых в результате воздействия коротковолнового УФ-излучения на фотоэмульсию. Таким образом, исследования в этой области представляют самостоятельный физический интерес.

**Цель работы.** Изучение голографических структур, полученных на фотоэмульсионных слоях, подвергнутых облучению коротковолновым ультрафиолетовым излучением, которое включает решение следующих задач:

1. Выяснение механизмов образования голографической структуры.
2. Определение механизма дифракции света на полученных фазовых голографических структурах, включая измерение дифракционных эффективностей (ДЭ) и ПЧХ.
3. Изучение факторов, вызывающих искажения регулярности полученных голографических структур, включая измерение аберраций голографического изображения и интенсивностей рассеянного света.
4. Построение физических моделей, описывающих процессы образования голографических структур.
5. Исследование возможности практического применения изучаемых голографических структур на фотоэмульсионных слоях.

**Научная новизна** работы состоит в том, что впервые:

1. Проведены подробные исследования голографических структур, полученных на фотоэмульсионных слоях, подвергнутых действию коротковолнового УФ-излучения без дополнительной сенсibilизации. Показано, что подобные структуры являются тонкими рельефно-фазовыми голограммами.
2. Показано, что в основе механизма образования изучаемых голографических структур лежит фотостимулированная деструкция желатины под действием коротковолнового УФ-излучения.
3. Предложены методы многоциклового и непрерывной обработки (фотостимулированного травления) фотоэмульсионного слоя, позволяющие получать глубокие рельефные структуры, в том числе, с образованием окон и получения доступа к подложке, независимо от толщины используемого фотоматериала (по крайней мере, до 20 мкм).
4. Обнаружено явление удвоения периода голографической структуры, сопутствующее методу многоциклового обработки. Показано, что в основе этого явления лежит неустойчивость получаемой голографической структуры, обусловленная наличием двух взаимоположенных структурных превращений в желатине фотоэмульсионного слоя (структурирования-дублирования и деструкции).

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

1. Обработка фотоэмульсионных слоев коротковолновым излучением ртутно-кварцевой лампы высокого давления ( $\lambda < 270$  нм) позволяет получить высокоэффективные, тонкие рельефно-фазовые голографические структуры независимо от типа применяемого фотоматериала, его толщины и состава применяемых для обработки растворов.
2. Серебряное изображение и изображение на основе отбеленного серебра являются эффективными модуляторами коротковолнового излучения в поверхностном слое фотоэмульсии, что позволяет осуществить избирательную фотодеструкцию желатины, лежащую в основе получения рельефной структуры голограммы.
3. ПЧХ рельефно-фазовых структур, полученных при воздействии УФ-излучения на фотоэмульсию, имеет равномерный вид в диапазоне пространственных частот от нуля до  $200-300 \text{ мм}^{-1}$  в отличие от структур, получаемых методами избирательного дублирования. В области более высоких пространственных частот спад ПЧХ определяется теми же причинами, что для других методов получения рельефных структур на желатиновых слоях, причем основной вклад в формирование ПЧХ вносят силы поверхностного натяжения.
4. Обработка фотоэмульсионного слоя коротковолновым УФ-излучением ( $\lambda < 270$  нм) не вносит заметного нарушения регулярности первично записанной голографической структуры. Для рельефно-фазовых структур абберации голографического изображения, как правило, меньше, а шумы рассеяния - того же уровня, что и для первичной амплитудной голограммы.
5. Явление удвоения периода голографической структуры при многоцикловой обработке наблюдается при достижении пороговой величины пространственной частоты и глубины поверхностного рельефа  $\sim 3 \text{ мкм}$ , независимо от спектра примененных для облучения источников УФ-излучения. Необходимым условием проявления эффекта удвоения периода является многократная сушка фотоэмульсионного слоя. Явление удвоения периода можно связать с наличием двух взаимоположенных структурных превращений в желатине фотографической эмульсии – структурирования (дублирования) и деструкции.

**Достоверность результатов,** полученных в работе, основывается на согласии данных эксперимента и теоретических моделей и согласии с результатами других работ, посвященных сходной тематике.

**Практическая значимость результатов работы** состоит в следующем:

1. Разработан метод создания высокоэффективных, малошумящих, тонких рельефно-фазовых голограмм на коммерчески выпускаемых фотоэмульсионных слоях, обладающих равномерной ПЧХ в области низких пространственных частот  $\nu = 0 - 200 \text{ мм}^{-1}$  и модуляцией

поверхностного рельефа, достаточной для создания тонких отражательных фазовых голограмм на более высоких частотах. К достоинству метода относится высокая устойчивость результатов к смене типа применяемого фотоматериала, изменению состава обрабатываемых растворов и условий окружающей среды.

2. Разработанный метод получения “сверхглубоких” рельефных структур может иметь практическое применение при создании ГОЭ, работающих в инфракрасном диапазоне или при переносе голографической структуры с фотоэмульсионного слоя на стеклянную подложку.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: «Оптическая голография и ее применения в промышленности» (Ленинград, 1976), «Физические основы голографии. X Всесоюзная школа по голографии» (Минск, 1978), «XXI Всесоюзная школа по физическим основам голографии» (Тольятти, 1990), «Фотохимические и фотофизические процессы регистрации голограмм. V Всесоюзный семинар» (Ужгород, 1990), «Четвертая Международная Конференция (NDTCS-2000). Неразрушающие методы и компьютерное моделирование в науке и технике» (Санкт-Петербург, 2000), «Седьмая Международная Конференция (NDTCS-2003). Неразрушающие методы и компьютерное моделирование в науке и технике» (Санкт-Петербург, 2003).

**Публикации.** Автор имеет 27 печатных работ, в том числе 10 работ по теме диссертации.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 157 наименований, содержит 196 страниц текста, включая 96 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвященный фазовым голографическим структурам, получающимся за счет пространственно-периодической модуляции физико-химических свойств желатины в соответствии с интерференционной картиной, образованной объектным и опорным пучками при записи голограммы. Особое внимание уделено механизмам образования таких структур при воздействии различных факторов. Анализ и сравнение рассмотренных в обзоре работ проводится в рамках модели, допускающей два основных структурных преобразования в желатине - структурирования (дублирования) и деструкции.

**Во второй главе** подробно рассматриваются дифракционные свойства голографических структур, полученных в результате воздействия коротковолнового излучения ( $\lambda < 270$  нм) на

фотоэмульсию (будем именовать их сокращенно ВУФ-структуры). В разделе 2.1 подробно описана экспериментальная методика получения голограмм и измерения их параметров. Основная процедура обработки голографических фотопластинок состояла из следующих этапов (указана без промежуточных промывок):

1. Экспонирование фотопластинки когерентным излучением He-Ne лазера. Регистрация интерференционной картины.
2. Проявление в обычном контрастном проявителе (получение первичного СИ интерференционных полос голограммы).
3. Фиксирование (удаление неэкспонированного галоида серебра).
4. Промывка и сушка.
5. Засветка фотопластинки УФ-излучением ртутно-кварцевой лампы (без предварительной сенсбилизации соединениями хрома в отличие от многих работ в голографии, в которых соединения хрома используются для очувствления желатины к УФ и видимому излучению).
6. Отбеливание (в медном отбеливателе  $\text{CuCl}_2$ )
7. Фиксирование (удаление соединений серебра из фотоэмульсионного слоя).
8. Промывка и сушка (получение рельефно-фазовой голограммы).

Измерения высоты поверхностного рельефа  $h$  ВУФ-структур для разных фотоматериалов для низких пространственных частот  $\nu < 100 \text{ мм}^{-1}$  (BP-Л, Kodak HR, Agfa-Gevaert Millimask) показали следующее:

1. Максимальные величины  $h$  достигают значения порядка 1,4 мкм.
2. Зависимости  $h$  насыщаются с ростом энергии экспозиции фотопластинок когерентным излучением  $W$  или времени облучения УФ-излучением  $t_{УФ}$ .
3. Величина рельефа слабо зависит от химического состава проявителя и определяется, в основном, плотностью серебряного изображения  $D$ .

Раздел 2.2 посвящен исследованию механизмов дифракции света на ВУФ-структурах. Были проведены эксперименты, которые доказали, что получаемые голографические структуры являются тонкими рельефно-фазовыми голограммами. Это подтверждается следующим:

1. Ход зависимостей ДЭ  $\eta(W)$  ( $\nu = 150 \text{ мм}^{-1}$ ), рассчитанный на основе экспериментально определенных значений высоты рельефа  $h$  и приближения Рамана-Ната для тонких голограмм (согласно которому  $\eta = J_1^2 \left[ \frac{\pi(n_0 - 1)h}{\lambda} \right]$ ), хорошо совпадает с ходом экспериментально полученных зависимостей.
2. Смачивание поверхности голограммы иммерсионной жидкостью снижает ДЭ в 20 раз.

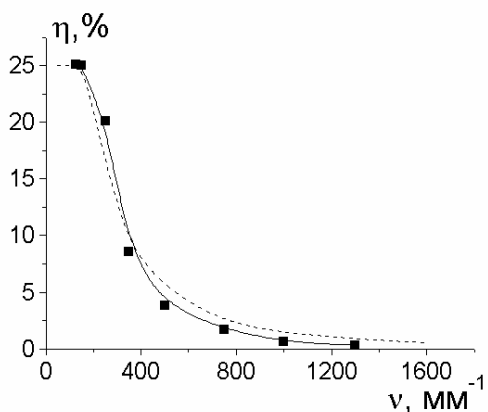


Рис. 1

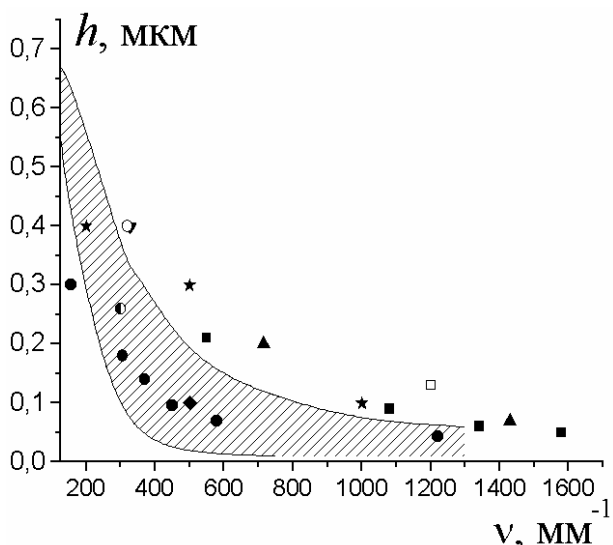


Рис. 2

3. Голографические ВУФ-структуры, полученные на фотоэмульсионных слоях с толщиной 7 мкм, практически не обнаруживают зависимости ДЭ от угла падения освещающего пучка даже на пространственных частотах порядка  $1000 \text{ мм}^{-1}$ , в то время как для амплитудных голограмм уже при  $\nu > 600 \text{ мм}^{-1}$  эти зависимости носят явно брэгговский характер.

Изучение ПЧХ ВУФ-структур показало, что наблюдаемый в экспериментах спад ПЧХ в области высоких частот ( $\nu = 200 - 1500 \text{ мм}^{-1}$ ) хорошо описывается моделью, связанной с действием сил поверхностного натяжения. Ключевой идеей модели служит введение пороговой пространственной частоты  $\nu_{\text{пор}}$ , выше которой увеличение площади поверхности фотоэмульсионного слоя невозможно. Для фотоэмульсии Kodak HR, для которой  $\nu_{\text{пор}}$  уверенно определяется, на рис. 1

приведены экспериментальная (■ - точки) и расчетная (пунктир) ПЧХ. Значения глубины поверхностного рельефа в указанном диапазоне частот хорошо согласуются с данными, полученными другими авторами на фотоэмульсионных слоях и слоях бихромированной желатины (БХЖ) (см. рис. 2, где заштрихованная область отражает диапазон значений  $h$  для ВУФ-структур на разных типах фотоматериалов, а экспериментальные данные других авторов изображены разными символами).

В разд. 2.3 на основе подхода Юу [11] произведен анализ aberrаций изображения точечного источника, восстановленного голографическими линзами, записанными в виде амплитудных, отбеленных и ВУФ-голограмм. Установлено, что основным видом искажений изображения, реконструированного с экспериментальных голограмм, являлся астигматизм, вызванный неплоскостью стеклянных подложек. На основе введенного критерия качества изображения – модифицированного фактора четкости по Штрелю:  $Sh^m = I_{\Phi A3}^{\max} / I_{AM}^{\max}$ , равного отношению максимальной интенсивности света в изображении точечного



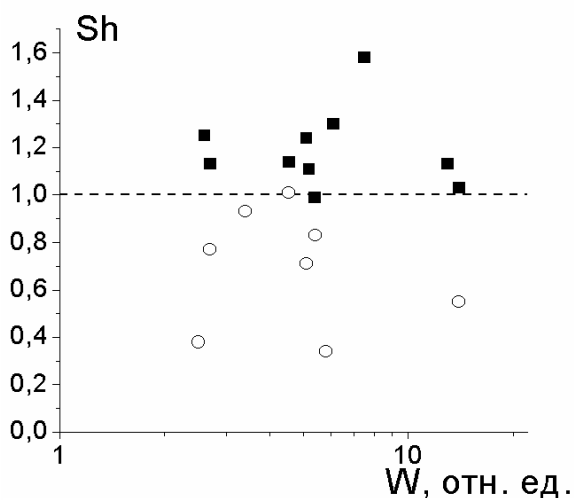


Рис. 3

источника, восстановленного фазовой голограммой, к максимальной интенсивности света в изображении точечного источника, восстановленного первичной амплитудной голограммой (при одинаковой ДЭ), удалось выделить искажения изображения, вносимые собственно фотоэмульсионным слоем при обработке голограммы. Показано, что введение дополнительной обработки – засветки УФ-излучением с целью получения фазовой структуры голограммы, не только не приводит к

ухудшению качества голографического изображения, а даже, как правило, улучшает его, по сравнению с качеством изображения, даваемым первичной амплитудной голограммой ( $Sh^m \geq 1$ , см. рис. 3, ■ - точки), в отличие от метода дубящего отбеливания ( $Sh^m \leq 1$ , см. рис. 3, ○ - точки). Показано, что это обстоятельство связано с компенсацией фазовых искажений при усадке слоя при удалении СИ из фотоэмульсии.

Измерение характеристик рассеяния света на ВУФ-структурах показало малый уровень светорассеяния и высокое отношение сигнал/шум в голографическом изображении, что связано с отсутствием мелкодисперсной структуры в желатиновом слое ВУФ-голограмм. Так, например, можно привести величины интенсивности рассеянного света -  $\Phi(\%)$ , измеренного в широком телесном угле по отношению к падающему пучку: для амплитудных структур  $\Phi_{AM} = 0,1\%$ , отбеленных структур  $\Phi_{OT} = 0,38\%$  и ВУФ-структур  $\Phi_{ВУФ} = 0,1-0,15\%$ . Величины отношения сигнал/шум в восстановленном изображении бинарного транспаранта выглядят как:  $S/N_{AM} = 43$ ,  $S/N_{OT} = 8$ ,  $S/N_{ВУФ} = 56\%$ . Все эти величины приведены для тех значений оптической плотности первичного СИ, при которых наблюдалась наибольшая ДЭ для каждого вида голограмм.

**Третья глава** посвящена изучению механизма формирования рельефной структуры на поверхности ВУФ-голограмм. В разд. 3.1 показано, что взаимодействие коротковолнового УФ-излучения с фотоэмульсией может быть рассмотрено в контексте фотохимических реакций разрыва химических связей основных цепей желатиновых макромолекул фотонами, энергия которых (480 кдж/моль для  $\lambda = 250$  нм) значительно превышает среднюю энергию связей C-N, C-C органических соединений (260 – 350 кдж/моль). Таким образом, основной причиной, вызывающей образование рельефных ВУФ-структур, является фотостимулированная деструкция желатины и растворение облученных участков в воде. В

пользу этого механизма говорит существование значительного рельефа при  $\nu \rightarrow 0$ , полное стравливание облученных участков специально приготовленных слоев желатины (с толщиной до трех мкм) до подложки при достаточно больших временах засветки УФ-излучением, и эксперименты по травлению облученных фотоэмульсионных слоев различными реагентами.

В разд. 3.2 предложены элементарные математические модели процесса формирования рельефной структуры, основанные на сокращении элементов объема облученной желатины  $dV = dx \times \Delta y \times \Delta z$ , на величину  $dh$  в направлении  $x$ , перпендикулярном подложке и поглощении УФ-излучения в фотоэмульсионном слое по закону Бугера ( $I = I_0 \cdot \exp\{-\alpha x\}$ ). В предположении не слишком больших времен засветки УФ-излучением  $t_{y\phi}$ , при которых  $dh < dx$ , выведена формула, отражающая зависимость высоты поверхностного рельефа от начальной толщины слоя  $T_{нач}$  при  $\nu \rightarrow 0$ :

$$\Delta h = K I_0 t_{y\phi} \left( 1 - e^{-\alpha T_{нач}} \right) \quad (1)$$

Зависимость (1) нашла свое подтверждение в экспериментах со специально приготовленными слоями желатины разной толщины и разной степени начальной задубленности, которые подвергались облучению УФ-излучением ртутной лампы и купанию в воде. Из формулы (1) следует, что можно ввести понятие эффективной толщины фотоэмульсионного слоя  $T_{эфф} = -\ln 0,1/\alpha$ , сокращение которой дает 90% величины максимально возможной высоты поверхностного рельефа. Определенное из эксперимента значение  $T_{эфф}$  для фотоэмульсии Agfa-Gevaert Millimask (непроявленной и отфиксированной) составляет всего 3,3 мкм, что значительно меньше толщины фотоэмульсионного слоя, равной  $\sim 5$  мкм. На деле  $T_{эфф}$  еще меньше, вследствие сильного поглощения коротковолнового УФ-излучения СИ, и, можно считать, что она составляет величину порядка самой высоты поверхностного рельефа, что открывает возможность использования для получения ВУФ-структур сверхтонких фотоэмульсионных слоев с  $T < 2$  мкм.

Для изучения зависимостей  $\Delta h(t_{y\phi})$  необходимо модифицировать модель образования рельефа, поскольку  $dh$  не может неограниченно возрастать при увеличении времени засветки  $t_{y\phi}$  и имеет своим пределом величину  $dx$ . При достаточно больших  $t_{y\phi}$  вкладом в величину  $\Delta h$  не полностью сократившихся элементов объема желатины можно пренебречь, и, тогда, формула для  $\Delta h(t_{y\phi})$  будет выглядеть как:

$$\Delta h = \frac{1}{\alpha} \ln \left\{ \frac{I_0 \cdot t_{y\phi}}{K_1} \right\} \quad (2)$$

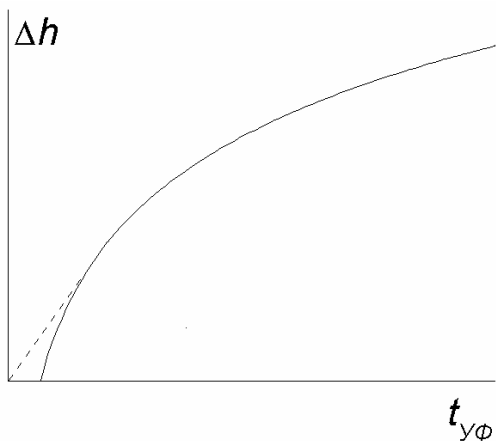


Рис. 4

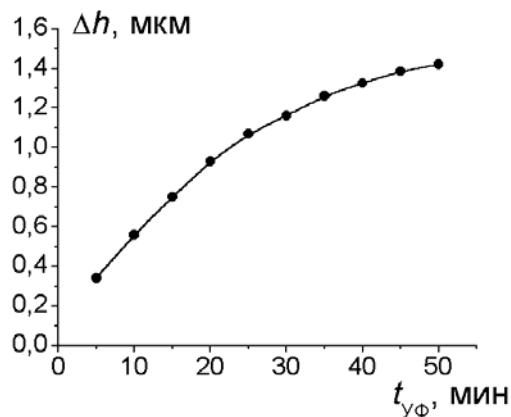


Рис. 5

Как видно из рис. 4, графически представляющего формулу (2), зависимость  $\Delta h(t_{УФ})$ , также как и зависимость  $\Delta h(T_{НАЧ})$ , имеет тенденцию к насыщению, хотя и неполному, что подтверждается экспериментально (рис. 5, фотоэмульсия ВР-Л). Дополнительным экспериментальным результатом, подтверждающим исходную концепцию образования рельефа, вследствие удаления облученных участков желатины, является уменьшение поверхностного рельефа на исходно более сильно задубленных слоях, что не трудно объяснить тем, что большое количество поперечных связей препятствует фрагментации макромолекул в облученных участках желатины и растворению ее в воде.

В разд. 3.3 рассмотрено влияние времени проявления на свойства ВУФ-структур. Экспериментально показано, что уменьшение времени проявления фотопластинок ВР-Л в обычном метол-гидрохиноновом проявителе (УП-2М) с 5 минут до 5 секунд не только не приводит к падению ДЭ ВУФ-структур, а даже несколько увеличивает максимальную ДЭ (с 16 до 20%). Это объясняется, во-первых, тем, что плотности и контраста СИ, образовавшегося в первые моменты начала процесса проявления в верхних слоях фотоэмульсии, хватает для эффективной модуляции УФ-излучения, а, следовательно, и для получения достаточной высоты рельефа. Во-вторых, короткие времена проявления уменьшают потери света на поглощение, вызванное остаточной вуалью фотоматериала.

Разд. 3.4 посвящен исследованию эффективности изображения интерференционных полос (ИИП) в различной химической форме как модулятора УФ-излучения внутри поверхностного слоя голограммы. Предпосылкой проведения исследований явилось то обстоятельство, что абсорбционные способности металлического серебра и его соединений в области коротковолнового УФ-излучения ( $\lambda \leq 270$  нм), вызывающего деструкцию желатины, практически выравниваются. Замена СИ на ИИП в виде солей серебра осуществлялось путем дополнительного отбеливания, вводимого перед засветкой фотопластинок УФ-излучением (операция 5, см. выше). Эксперименты показали, что ИИП в форме ферроцианида серебра

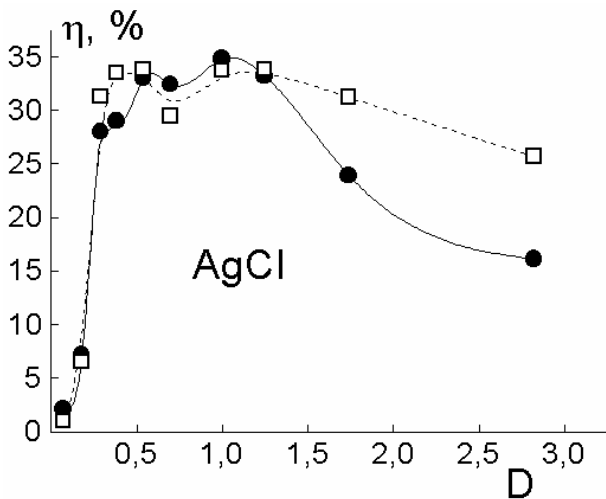


Рис. 6

$\text{Ag}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  позволяет получать высоту рельефа ВУФ-структур почти в 2 раза большую, чем ИИП в форме металлического серебра (Ag) или хлорида серебра (AgCl). В данных экспериментах были получены ВУФ-структуры с максимальной ДЭ, равной теоретическому пределу  $\sim 34\%$  для тонких голограмм. На рис. 6 представлена зависимость ДЭ ВУФ-структуры  $\eta(D)$  для ИИП в виде AgCl (● - экспериментальные точки, □ - расчет через значения высоты рельефа по теории тонких голограмм).

рельефа по теории тонких голограмм).

**В четвертой главе** рассмотрены специальные методы создания ВУФ-структур, связанные с получением больших значений глубины поверхностного рельефа на фотоэмульсионных слоях. Основной принцип этих методов – удаление облученных участков желатины в ходе засветки, открывающее доступ УФ-излучения к более глубоким слоям фотоэмульсии. В разделах 4.1, 4.2, 4.3 обсуждаются предпосылки, методика и результаты экспериментов по методу многоциклового обработки фотопластинок, суть которого состоит в многократном повторении цикла: *облучение проявленной фотопластинки УФ-излучением – купание фотопластинки в воде - сушка - ...* Введение данного метода позволило увеличить высоту

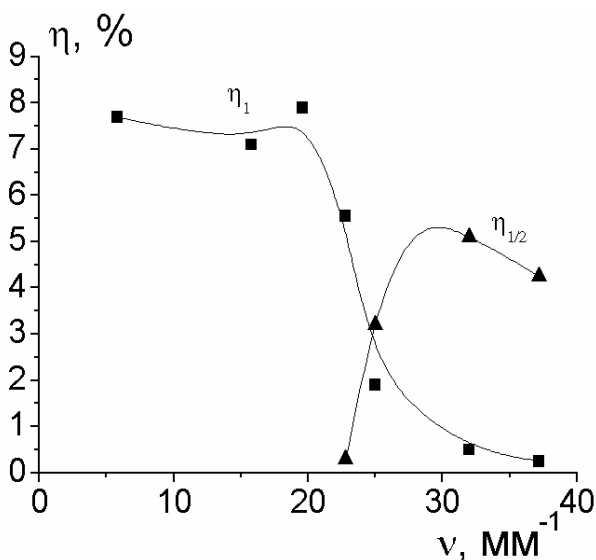


Рис. 7

рельефа на низких частотах на фотопластинках ВР-Л до 7-8 мкм и довести глубину стравленного желатинового слоя в неэкспонированных местах до поверхности подложки. Раздел 4.4 посвящен обнаруженному в экспериментах интересному физическому феномену – удвоению периода ВУФ-структуры (далее, феномен УДПС) - скачком при увеличении пространственной частоты. Феномен УДПС проявляет себя в виде появления дробного порядка дифракции ( $\eta_{1/2}$ ) при сканировании голографической зонной

пластинки Френеля от центра к периферии узким лазерным пучком. Одновременно наблюдается падение интенсивности первого порядка дифракции ( $\eta_1$ ) (см. рис. 7, где

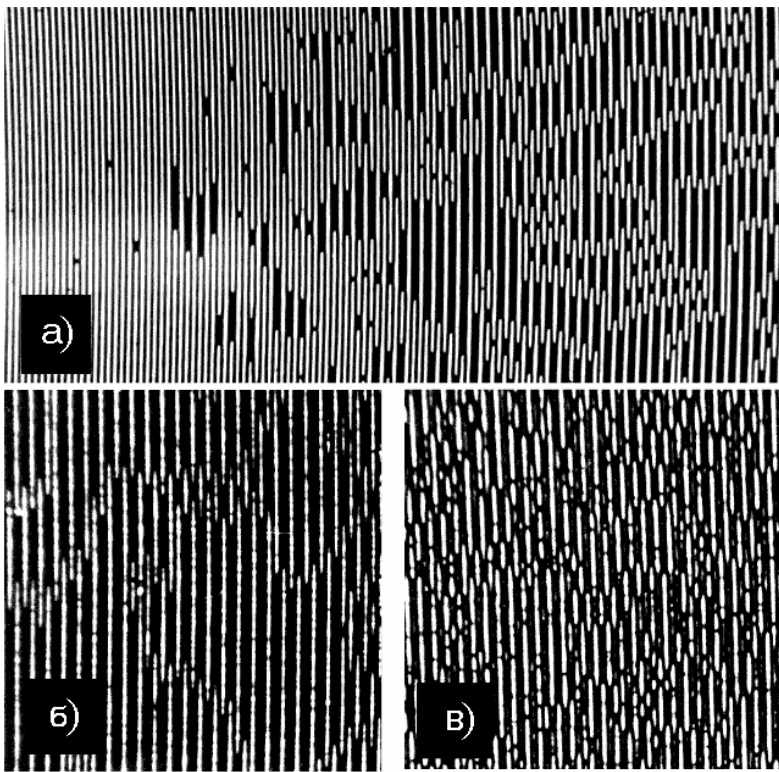


Рис. 8

приведены зависимости  $\eta(\nu)$ . Иными словами, структура с основным периодом на более высоких частотах превращается в пространственную субгармонику (рис. 8а), которая состоит из “доменов”, где решетки сдвинуты относительно друг друга на половину периода. Для объяснения явления УДПС в разд. 4.5 предложена простая механическая аналогия, рассматривающая решетку из притягивающихся друг к другу шаров, находящихся на поверхности, состоящей из

гребней и впадин (лунок) с периодом  $d$  (рис. 9). Показано, что структура данного типа неустойчива по отношению к изменению периода. В развитых в разд. 4.5 и 4.6 концепциях, объясняющих феномен УДПС, предполагается, что роль сил притяжения между отдельными элементами структуры могут играть силы натяжения, возникающие при сушке влажного фотоэмульсионного слоя. В разд. 4.6 явление УДПС исследовано, используя при обработке фотопластинок источники УФ-излучения разного состава. На рис. 8 приведены микрофотографии ВУФ-структур в области субгармоники для: а) - ртутно-кварцевой лампы

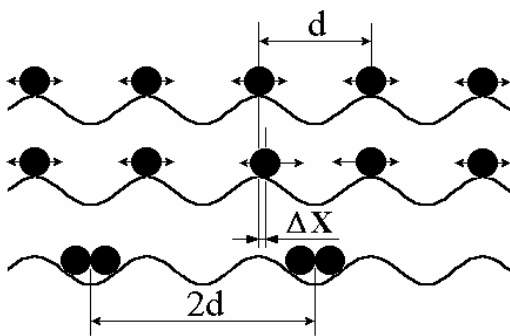


Рис. 9

ДРТ-220, б) - эксимерной лампы, работающей на смеси Хе+Cl<sub>2</sub>; в) - эксимерной лампы, работающей на смеси Кг+Cl<sub>2</sub>. Проведенные исследования позволили заключить, что явление УДПС проявляется при пространственных частотах, больших некоторого предела  $\nu > 23-60 \text{ мм}^{-1}$  и достижения высоты рельефа  $h \approx 3 \text{ мкм}$ , независимо от примененного в экспериментах типа источника

УФ-излучения. Установлена связь между спектральным составом источника и степенью перестройки голографической структуры по глубине фотоэмульсионного слоя. В разд. 4.5 и 4.6 обсуждается модель феномена УДПС, основанная на гипотезе существования двух

взаимопротивоположных фотоиндуцированных превращений в желатине - деструкции и структурирования (дубления). Показано, что причиной явления удвоения периода является неустойчивость, связанная с тем, что рельефные изображения, порождаемые фотохимическими превращениями желатины, взаимнообратны друг другу. Согласно этой модели силы натяжения, возникающие при сушке фотоэмульсионного слоя, вследствие избирательного светового дубления желатины в менее экспонированных местах, инициируют нарушение пространственной симметрии структуры и попарное объединение гребней поверхностного рельефа. Важную роль в формировании субгармоники играют также силы поверхностного натяжения, поскольку подобная перестройка структуры является термодинамически выгодной. Существование “доменной структуры” в данной модели объясняется изначальными флуктуациями светового дубления по поверхности фотоэмульсионного слоя. Разд. 4.7 посвящен методике “непрерывного травления”, в которой, в отличие от метода многоциклового обработки, верхние слои фотоэмульсии удаляются непосредственно во время облучения УФ-излучением в установке специальной конструкции. Это позволяет, во-первых, получить глубокие рельефные структуры и осуществить травление фотоэмульсионного слоя до поверхности подложки в наименее экспонированных местах за очень короткое время облучения фотоматериала порядка 15-20 мин, во-вторых, избежать появления феномена удвоения периода структуры и продвинуть

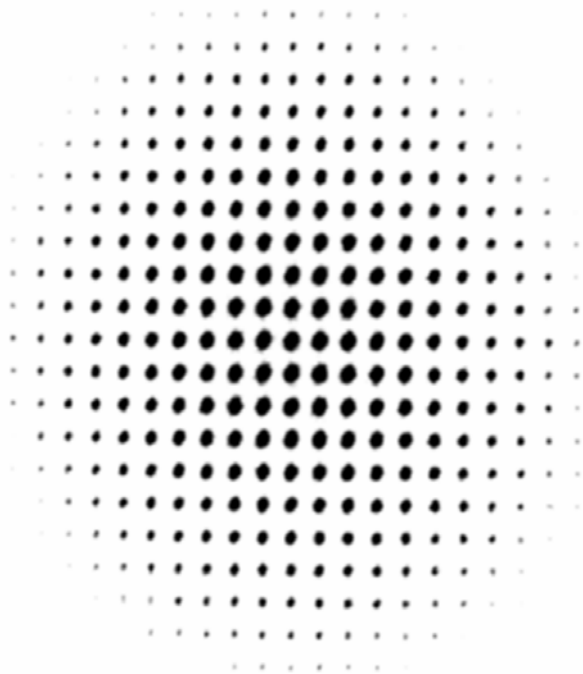


Рис. 10

ПЧХ в область более высоких частот, а также снизить искажения поверхности ВУФ-структур. В разд. 4.7 рассмотрена связь явления УДПС со схожими физическими феноменами, в частности, с эффектом генерации субгармоник при двухволновом взаимодействии в фоторефрактивных кристаллах и полупроводниках.

**Пятая глава** посвящена некоторым аспектам практического использования ВУФ-структур. В разд. 5.1 рассмотрены методы переноса голографической структуры на подложку с целью получения более долговечных и устойчивых к внешним воздействиям ГОЭ.

Успешные результаты по переносу периодических структур с желатины фотографического слоя или БХЖ на более твердые и устойчивые материалы обычно реализуются для очень

тонких слоев порядка одного и менее микрона. Рассмотренные в главе IV методы получения глубоких рельефных ВУФ-структур на значительно более толстых коммерческих фотоматериалах ( $T = 5 - 15$  мкм) позволяют сформировать на фотографическом слое пропускающие участки – окна, через которые можно получить доступ к стеклянной подложке. С помощью вакуумного напыления хрома и последующего удаления желатины удалось создать высококонтрастные структуры в виде металлизированных полосок на поверхности стекла. Использование химического травления с помощью концентрированной HF позволило получить рельефные структуры в стекле с максимальной глубиной 0,35 мкм. Разд. 5.2 посвящен созданию рельефно-фазовых ВУФ-структур со сложным профилем в периоде, существенно отличающимся от синусоидального или прямоугольного типа. Голографические ВУФ-структуры – расщепители лазерного пучка (РЛП), синтезировались с помощью многократной перезаписи голограмм, используя многопучковую интерференцию и нелинейность отклика записывающей среды. Эксперименты показали высокую энергетическую эффективность подобных структур, рассеивающих лазерное излучение в определенном телесном угле. На рис. 10 показан дифракционный спектр экспериментального РЛП, реализованного на рельефной ВУФ-структуре. Доля энергии пучка нулевого порядка составляла менее 0,6% от всей энергии света, рассеянного РЛП.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы:

1. Применение методики обработки голограмм, связанной с облучением фотопластинок УФ-излучением, позволяет получить рельефно-фазовые структуры. Это подтверждается хорошим соответствием поведения дифракционной эффективности ВУФ-структур модели тонких голограмм в предположении наличия синусоидальной формы рельефа, потерей дифракционной эффективности ВУФ-структурами при погружении в иммерсионную жидкость и слабой угловой селективностью ВУФ-структур на высоких частотах.

2. Высота рельефа  $h$  ВУФ-структур на низких пространственных частотах составляет величину порядка 1 – 1,5 мкм и слабо зависит от типа применяемой фотоэмульсии и типа проявителя, что позволяет заключить, что  $h$  в основном определяется оптической плотностью СИ первичной голографической структуры. СИ и изображение на основе отбеленного серебра являются эффективными модуляторами коротковолнового УФ-излучения в верхних слоях фотоэмульсии, что позволяет на низких частотах легко получать глубину поверхностного рельефа  $h \geq 0,6$  мкм и добиться дифракционных эффективностей рельефно-фазовых структур, равных теоретическому пределу - 34% для тонких голограмм.

3. В области высоких частот ( $\nu = 200 - 1500 \text{ мм}^{-1}$ ) спад ПЧХ ВУФ-структур хорошо описывается моделью, связанной с действием сил поверхностного натяжения. Величины глубины поверхностного рельефа в указанном диапазоне частот хорошо согласуются с данными, полученными другими авторами на фотоэмульсионных слоях и слоях БХЖ.

4. Исследование aberrаций голографических линз на основе введенного критерия качества изображения – модифицированного фактора четкости по Штрелю позволяет выделить искажения, вносимые в изображение собственно фотоэмульсионным слоем. Показано, что введение дополнительной обработки – засветки УФ-излучением с целью получения фазовой структуры голограммы, как правило, улучшает качество голографического изображения по сравнению с качеством изображения, даваемым первичной амплитудной голограммой, что связано с компенсацией фазовых искажений при усадке слоя при удалении СИ из фотоэмульсии.

5. Показано, что малый уровень светорассеяния и высокое отношение сигнал/шум в голографическом изображении связаны с отсутствием мелкодисперсной структуры в желатиновом слое ВУФ-голограмм.

6. Показано, что основным механизмом образования рельефно-фазовой структуры ВУФ-голограмм является фотостимулированная деструкция желатины под воздействием УФ-излучения в узком приповерхностном слое голограммы и растворение облученных участков фотоэмульсии в воде. Предложенные математические модели образования рельефа хорошо описывают основные закономерности, наблюдаемые в эксперименте – насыщение зависимостей высоты рельефа от толщины желатинового слоя и времени засветки УФ-излучением. Показано, что для получения эффективных ВУФ-структур могут быть использованы сверхтонкие фотоэмульсионные слои с  $T < 2 \text{ мкм}$ .

7. Многоцикловая обработка, связанная с многократным повторением операций: *облучение фотопластинок УФ-излучением ртутной лампы – купание в воде – сушка*, позволяет получить на сравнительно толстой фотоэмульсии ВР-Л высоту рельефа порядка 7-8 мкм и осуществить травление фотоэмульсионного слоя до поверхности подложки в наименее экспонированных местах. Установлена возможность переноса голографических ВУФ-структур с фотоэмульсионного слоя на подложку и создания структур с повышенной устойчивостью к внешним воздействиям.

8. Обнаружено явление удвоения периода ВУФ-структур, подвергнутых многоцикловой обработке, которое проявляется при пространственных частотах, больших некоторого предела  $\nu > 23-60 \text{ мм}^{-1}$  и достижения высоты рельефа  $h \approx 3 \text{ мкм}$ , независимо от примененного в экспериментах типа источника УФ-излучения. Показано, что в области



действия феномена структура состоит из “доменов”, где решетки субгармоники сдвинуты относительно друг друга на половину периода. Предложена модель явления удвоения периода ВУФ-структур, основанная на гипотезе существования двух взаимоположенных фотоиндуцированных превращений в желатине - деструкции и структурирования (дублирования). Показано, что причиной явления удвоения периода является неустойчивость, связанная с тем, что рельефные изображения, порождаемые фотохимическими превращениями желатины, взаимнообратны друг другу.

9. Разработана методика “непрерывного травления” фотоэмульсионного слоя при облучении фотопластинок УФ-излучением как альтернатива методу многоциклового обработки. Она позволила существенно сократить время облучения фотоматериала с часов (при многоциклового обработке) до 15-20 мин и избежать появления феномена удвоения периода структуры, а также снизить искажения поверхности голографической структуры.

10. Методы создания ВУФ-структур позволяют реализовать ГОЭ со сложным профилем рельефа в периоде структуры, что продемонстрировано на примере создания осевых РЛП.

#### Цитируемая литература

1. Н. М. Smith, “Photographic relief images”, *J. Opt. Soc. Am.*, 1968, v. 58, No. 4, P. 533-539.
2. Е. Б. Бруй, С. Н. Корешев, “Особенности тонких слоев фотоэмульсии ПЭ-2 для получения низкочастотных рельефных голограммных структур”, *Оптика и спектроскопия*, 1989, т. 67, вып. 3, С. 685-688.
3. А. Д. Гальперн, И. В. Калинина, Л. В. Селякко, В. П. Смаев, “О получении рельефно-фазовых голограмм на фотопластинках ПЭ-2 и их копировании”, *Оптика и спектроскопия*, 1986, т. 60, вып. 5, С. 1040-42.
4. Ю. Е. Усанов, М. К. Шевцов, Н. Л. Кособокова, Е. А. Кириенко, “Механизм образования микропустотной структуры и методы получения галогенидосеребряных желатиновых голограмм”, *Оптика и спектроскопия*, 1991, т. 71, вып. 4, С. 651-658.
5. J. M. Kim, B. S. Choi, S. I. Kim, J. M. Kim, H. I. Bjelkhagen, and N. J. Phillips, “Holographic optical elements recorded in silver halide sensitized gelatin emulsions. Part I. Transmission holographic optical elements”, *Appl. Opt.* 2001, Vol. 40, No. 5, P. 622-632.
6. K. S. Pennington, J. S. Harper, F. P. Laming, “New phototechnology suitable for recording phase holograms and similar information in hardened gelatin”, *Appl. Phys. Lett.*, 1971, Vol. 18, No. 3, P. 80-84.

7. G. Liebmann, F. Schmidt, A. Storch, "Ein Umkehrverfahren zur Herstellung stabiler Phasenhologramme", *J. Signal AM*, 1975, **3**, No. 6, P. 471-475.
8. Заявка 1330729 Великобритании, International Classification G03C 5/50, "A method for recording in hardened gelatin", J. S. Harper, F. P. Laming, K. S. Pennington, Complete Specification published 19 Sept. 1973.
9. Пат. 3695879 США, Int. Cl. G03c 5/24, "Hologram life extension", F. P. Laming, S. L. Levine, G. T. Sincerbox, Patented Oct. 3, 1972.
10. О. Н. Козаков, С. А. Кулипанов, "Поглощение излучения бромосеребряными эмульсионными слоями в ультрафиолетовой области спектра", *Журн. науч. и прикл. фотографии*, 1994, т. 39, №1, С. 17-22.
11. Ф. Т. Юу, "Введение в теорию дифракции, обработку информации и голографию", М: Советское радио, 1979, С. 247-254.

Основные результаты исследований опубликованы в работах:

1. М. М. Бутусов, С. Н. Гуляев, В. В. Судариков, "Голографическая эффективность и механизмы дифракции света на голограмме", *Квантовая электроника*, 1975, т.2, №1, С.13-17.
2. М. М. Бутусов, С. Н. Гуляев, "Фазовые голограммы на задублинном ультрафиолетовым излучением желатине", В сб. «*Оптическая голография и её применение в промышленности*», Л.: ЛДНТП, 1976, С. 36-40.
3. С. Н. Гуляев, К. К. Алимов, М. М. Бутусов, "Изготовление высокоэффективных малощумящих голограмм методом обработки фотоэмульсий УФ-излучением", Материалы X Всесоюзной Школы по голографии, Л.: ЛИЯФ, 1978, С. 85-95.
4. К. К. Алимов, М. М. Бутусов, С. Н. Гуляев, "Получение фазовых голограмм на фотоэмульсиях, обработанных ультрафиолетовым излучением", В сб. «Голографические измерительные системы», вып. 2, Новосибирск: НЭТИ, 1978, С. 89-99.
5. С. Н. Гуляев, Д. Э. Нефедьев, "Изменение периода голографических решеток при воздействии коротковолнового УФ-излучения на фотоэмульсию", Материалы XXI Всесоюзной Школы-симпозиума по голографии, Л.: ФТИ, 1990, С. 40-57.
6. S. N.Gulyaev, I.V. Isaev, "Phenomenon of period-doubling in holographic periodic structures exposed to UV radiation", in International Workshop on New Approaches to High Tech: Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering, Alexander I. Melker, Editor, *Proceedings of SPAS*, 2000, Vol. 4, P. A33-35.

7. S.N. Gulyaev, I.V. Isaev, “Phenomenon of period-doubling in holographic periodic structures exposed to UV radiation”, *Proceedings of SPIE*, 2001, Vol. 4348, P. 59-67.
8. С. Н. Гуляев, В. П. Ратушный, “Свойства рельефно-фазовых голограмм, полученных при обработке фотопластинок коротковолновым ультрафиолетовым излучением и двухступенчатом отбеливании”, *Оптический журнал*, 2003, том 70, №2, С. 45-49.
9. E. A. Pshenay-Severin, S. N. Gulyaev, “Holographic fan-out elements synthesized by the repeated recording process”, in International Workshop on Nondestructive Testing and Computer Simulation in Science and Engineering, *Proceedings of SPAS*, 2003, Vol. 7, P. D2 – D6.
10. E. A. Pshenay-Severin, S. N. Gulyaev, “Holographic fan-out elements synthesized by the repeated recording process”, *Proceedings of SPIE*, 2004, Vol. 5400, P. 170-178.