ГОЛОГРАФИЯ

УДК 535.317.1; 535.843.312

ПОВЫШЕНИЕ ДИФРАКЦИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОПУСКАЮЩИХ ГОЛОГРАММ НА ФОТОПЛАСТИНКАХ ПФГ-01

© 2004 г. С. В. Лим; Д. В. Чой; С. Х. Сон

Отдел физики, Кюнгпоокский национальный университет, г. Тоегу, Корея

Рассмотрен вопрос о более высокой дифракционной эффективности фазовых голограмм, обработанных методом реверсивного отбеливания, по сравнению с другими методами, использующими обычное отбеливание. Показано, что для получения высокой дифракционной эффективности необходимо не только оптимизировать состав, но и концентрацию компонентов проявителя. Эксперименты проведены на фотопластинках ОАО "Компания Славич" ПФГ- 01, на которых записывались голограммы в сходящихся пучках, причем для реверсивного отбеливания использовалось четыре типа проявителей. Проявители содержали аскорбиновую кислоту, метол, фенидон и углекислый натрий в различных соотношениях. Достигнута дифракционная эффективность 89%.

Коды OCIS: 050.1950, 090.1970.

Поступила в редакцию 19.03.2003.

Введение

Галогенидосеребряные эмульсии обычно используются для записи голограмм в изобразительной голографии, для многочисленных научных приложений, а также для изготовления голографических оптических элементов [1–3]. Для повышения дифракционной эффективности голограммы, записанные на галогенидосеребряных эмульсиях, обычно подвергаются отбеливанию. Отбеливание является наиболее распространенным методом получения фазовых голограмм на галогенидосеребряных эмульсиях с высокой дифракционной эффективностью. Этот процесс может осуществляться тремя методами: обычное отбеливание, регалогенизированное отбеливание без фиксирования и реверсивное отбеливание. Обычное отбеливание имеет ряд недостатков, одним из которых является возникновение высокого уровня рассеяния из-за увеличения размера регалогенизированных зерен и усадки эмульсии после отбеливания вследствие удаления частиц из эмульсии. По этой причине голограммы отбеливаются непосредственно после проявления без стадии фиксирования, подвергаются регалогенизированному отбеливанию без фиксирования или реверсивному отбеливанию. Обычное и регалогенизированное отбеливание без фиксирования изучаются давно. Эти методы впервые были применены для голограмм, записанных лазером, в [4], где использовалось медное отбеливание, в то время как в [5] был применен улучшенный вариант популярного отбеливателя Kodak R-9. В [6] исследовалось влияние процесса проявления галогенидосеребряных сенсибилизированных желатиновых пропускающих голограмм, записанных на фотопластинках ПФГ-01 и отбеленных по обычному методу. Авторы [7] изучали метод регалогенизированного отбеливания без фиксирования и показали, что диффузия частиц во время отбеливания является важным механизмом в этом процессе. Эффект перемодуляции в голограммах, записанных на фотопластинках ВВ-640, возникающий при регалогенизированном отбеливании без фиксирования, был исследован в [8, 9].

Процесс реверсивного отбеливания заключается в преобразовании проявленного серебряного изображения в растворимый серебряный комплекс, который удаляется из эмульсии во время отбеливания, в эмульсии остаются первоначальные, неэкспонированные, зерна галогенида серебра. Наличие галогенида серебра в неэкспонированных зонах при использовании реверсивного отбеливания позволяет минимизировать рассеяние, при этом нет почти никакой зависимости от состава отбеливающего раствора. Однако процесс реверсивного отбеливания, которое применялось главным образом для обработки фотопластинок Kodak и Agfa, изучен недостаточно хорошо. Авторы [10] обнаружили, что использование реверсивного отбеливания с проявителем на основе метола и аскорбиновой кислоты влияет на пространственную частоту. В [11] было показано, что реверсивный отбеливающий состав R-9, используемый с проявителем на основе аскорбиновой кисло-

ты, позволяет получить на фотопластинках ВВ-640 дифракционную эффективность 82%.

Проявление – это метод обработки, с помощью которого скрытое изображение, записанное во время экспозиции на фотоматериале, преобразуется в серебряное изображение. Проявитель состоит из проявляющего или восстанавливающего реагента, активатора, предохраняющего и связывающего компонентов. Проявляющее вещество восстанавливает серебряные ионы в экспонированном галогениде серебра до металлического серебра, преобразуя скрытое изображение в видимое. Наиболее распространенными веществами, используемыми в проявителях, являются метол, гидрохинон, аскорбиновая кислота и фенидон. Проявляющие вещества имеют тенденцию восстанавливать наряду с экспонированными микрокристаллами галогенида серебра и некоторые неэкспонированные. Это явление вызывает появление шума в эмульсии [12]. Влияние проявителей на дифракционную эффективность галогенидосеребряных голограмм было изучено в [13]. Несмотря на то что хорошо известна связь между составом проявителя и структурой серебряных зерен, образующихся после проявления, существует возможность получить данные и о влиянии состава проявителя на дифракционную эффективность голограмм. Кроме того, при заданных условиях проявления можно получить дополнительные данные о том, как изменяется дифракционная эффективность, когда вместо обычного отбеливания используется реверсивное.

В данной статье представлены экспериментальные результаты по обработке голограмм в сходящихся пучках, записанных на фотопластинках ПФГ-01, которые дают представление о зависимости дифракционной эффективности голограмм от состава проявителя, использованного в сочетании с реверсивным отбеливанием. Эти результаты позволяют описать влияние состава проявителя на процесс получения высокой дифракционной эффективности реверсивно отбеленных голограмм и лучше понять суть происходящих при этом процессов.

Эксперименты

Эксперименты были выполнены на фотопластинках ПФГ-01, сенсибилизированных к красному свету. Голограммные пропускающие решетки записывались с использованием двух коллимированных пучков He–Ne-лазера на длине волны $\lambda = 632{,}8$ нм при соотношении пучков 1:1 и угле падения на поверхность 45°. Пространственная частота по расчету составляла 1200 лин/мм.

Экспонированные фотопластинки обрабатывались в соответствии с регламентом, приведенным в табл. 1. Использование предварительной обработки в горячей воде, как это описано в работе [14], было неприемлемым, так как приводило к насыщенным пятнам. Споласкивание желатины в воде и последующее прогревание при высокой температуре способствовало превращению желатины в непрозрачные пятна. Поскольку желатина, используемая для производства фотопластинок ПФГ-01, мягче, чем используемая для других эмульсий, высокая температура отбеливающей ванны приводила к удалению части желатины из слоя и, как следствие, к уменьшению дифракционной эффективности. Все описанные ниже эксперименты выполнялись при температуре всех растворов 20 °C.

Таблица 1. Процедура реверсивного отбеливания

Этап	Время
Проявление	4 мин
Споласкивание дистиллированной водой	5 мин
Отбеливание после осветления	1 мин
Споласкивание дистиллированной водой	5 мин
Дегидратация в 50%-ном растворе изопропанола	4 мин
Дегидратация в 50%-ном растворе изопропанола	5 мин
Сушка при комнатной температуре	24 ч

Составы всех проявителей, использованных в экспериментах, приведены в табл. 2. Эксперименты выполнялись с четырьмя проявителями двух типов. К первому типу можно отнести проявитель MQ, или Kodak D19, ко второму – проявители на основе аскорбиновой кислоты: MAA, AAC, PAAC. Аскорбиновая кислота является сильным восстановителем. Она ускоряет окисление проявляющих веществ с более высоким окислительно-восстановительным потенциалом, таких как метол, поэтому проявители, содержащие аскорбиновую кислоту, не требуют сульфита натрия в качестве антиокислителя [13]. Были изучены три проявителя, основанные на аскорбиновой кислоте, в комбинации с метолом и фенидоном. Для этого в проявителях менялось количество метола, аскорбиновой кислоты, фенидона и соды. В табл. 3 показан состав реверсивного отбеливателя. Дифракционная эффективность определялась как

Таблица 2. Состав проявителя (в ед. грамм на литр)

Компонент	D19	MAA	AAC	PAAC
Метол	2	2*		
Аскорбиновая кислота		20	20*	20
Гидрохинон	80			
Углекислый натрий	60	60	60*	60*
Сульфит натрия	100			
Бромистый калий	5			
Фенидон				2*

* Варьируемое количество.

Таблица 3. Состав реверсивного отбеливателя

Компонент	Количество
Бихромат калия	0,8 г
Серная кислота	1 мл
Дистиллированная вода	1 л

отношение интенсивности пучка, дифрагированного в первый порядок дифракции, к интенсивности падающего пучка под углом Брэгга. Измерение интенсивности пучка в нулевом порядке под углом Брэгга позволяло учесть потери на поглощение и рассеяние при записи каждой решетки. Для того чтобы принять во внимание френелевские потери на отражение и потери на поглощение в стеклянной подложке, выражение для дифракционной эффективности было откорректировано умножением на соответствующий коэффициент.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены кривые зависимости дифракционной эффективности от энергии экспонирующего излучения для реверсивно отбеленных фотопластинок ПФГ-01, обработанных в проявителе МАА,

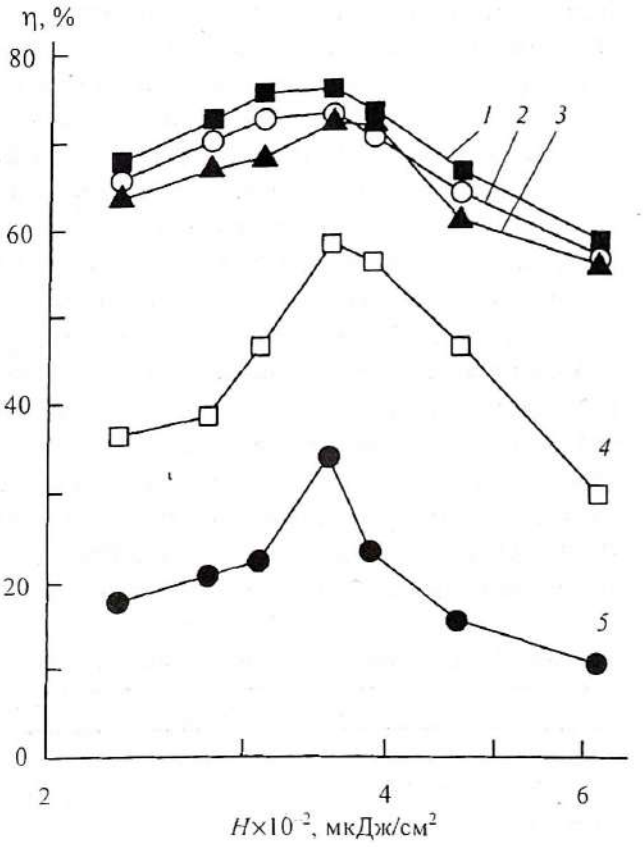

Рис. 1. Зависимости дифракционной эффективности от экспозиции для реверсивно отбеленных голограмм на фотопластинках ПФГ-01 при обработке в проявителе МАА, содержащем различное количество метола (аскорбиновая кислота 20 г, сода 60 г). *1* – 1, *2* – 2, *3* – 4, *4* – 6, *5* – 10 г.

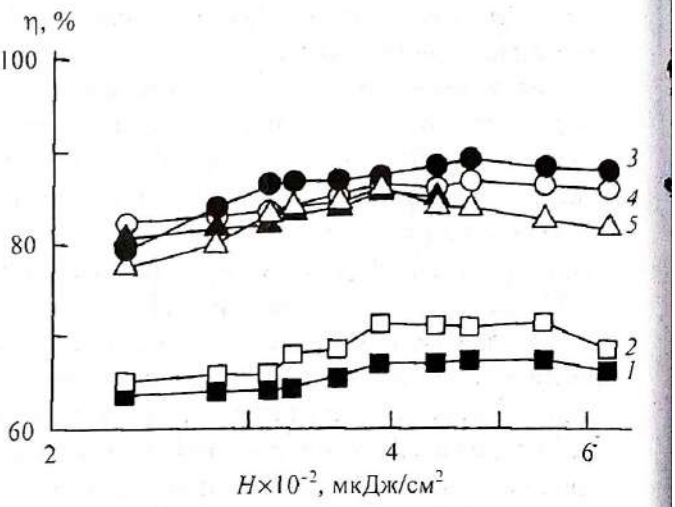

Рис. 2. Зависимости дифракционной эффективности от экспозиции для реверсивно отбеленных голограмм на фотопластинках ПФГ-01 при обработке в проявителе ААС, содержащем различное количество аскорбиновой кислоты (сода 60 г). *1* – 4, *2* – 10, *3* – 20, *4* – 40, *5* – 100 г.

содержащем различное количество метола. Увеличение концентрации метола приводит к уменьшению дифракционной эффективности. По всей видимости, это уменьшение дифракционной эффективности происходит из-за низкого контраста решетки, который падает с увеличением концентрации метола. Метол является сильным проявляющим веществом, которое работает быстро и работает даже с теми зернами галоидного серебра, которые получили минимальную засветку. Оказывается, что он восстанавливает некоторое количество неэкспонированных микрокристаллов галоидного серебра так же, как и экспонированных. Количество микрокристаллов галогенида серебра в неэкспонированных участках уменьшается, поскольку некоторые как из неэкспонированных зерен, так и экспонированных преобразуются в металлическое серебро. В результате это приводит к уменьшению модуляции коэффициента преломления и дифракционной эффективности.

Как видно из рис. 1, добавление метола в проявитель МАА приводит к снижению дифракционной эффективности. В отличие от МАА проявитель ААС не содержит метола. На рис. 2 показаны кривые зависимости дифракционной эффективности от экспозиции для реверсивно отбеленных голограмм, обработанных в проявителе ААС, содержащем различное количество аскорбиновой кислоты. Максимальное значение дифракционной эффективности 89% получено при обработке в проявителе ААС, содержащем 20 г l-аскорбиновой кислоты. Мы также пытались увеличить содержание аскорбиновой кислоты до 100 г, но максимум дифракционной эффективности в этом случае оказался ниже. Этот результат говорит о том, что действие проявителя ААС может достичь предела относительно количества ас-

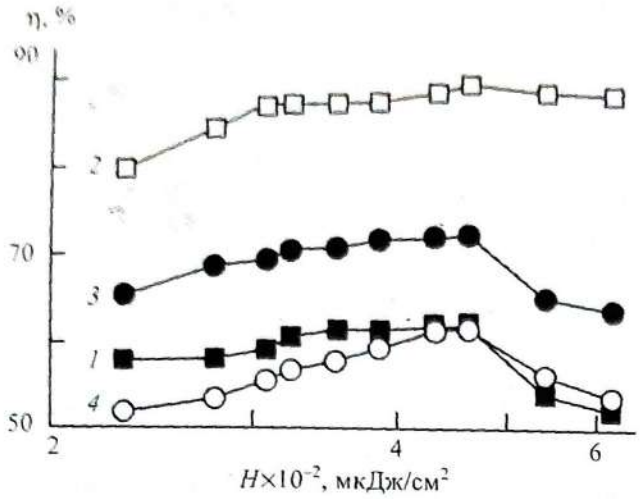

Рис. 3. Зависимости дифракционной эффективности от экспозиции для реверсивно отбеленных голограмм на фотопластинках ПФГ-01 при обработке в проявителе ААС, содержащем различное количество соды (аскорбиновая кислота 20 г). *1* – 30, *2* – 60, *3* – 100, *4* – 150 г.

корбиновой кислоты. Увеличение количества аскорбиновой кислоты приводит к сверхвосстановлению и, как следствие, увеличению диффузионных эффектов. Процесс проявления подразделяется на два вида – физическое проявление, которое сопровождается эффектом диффузионного переноса, и химическое проявление без этого эффекта. Эффект диффузионного переноса заключается в том, что зерна галогенида серебра как из экспонированной зоны, так и неэкспонированной переносятся в экспонированную зону и во время проявления преобразуются в металлическое серебро. Такой процесс объясняет хороший результат применения обычного отбеливания. С другой стороны, реверсивное отбеливание приводит к уменьшению дифракционной эффективности из-за восстановления микрокристаллов галогенида серебра, остающихся в неэкспонированной зоне.

На рис. 3 показаны кривые зависимости дифракционной эффективности от энергии экспозиции для реверсивного отбеливания с применением проявителя ААС, содержащего различное количество соды вместо аскорбиновой кислоты. Максимальная дифракционная эффективность достигнута для фотопластинок ПФГ-01, обработанных в проявителе ААС, содержащем 60 г/л соды. Поскольку проявляющее вещество действует медленно, проявитель должен еще содержать активатор, который делает проявитель щелочным и ускоряет процесс проявления. Восстановители работают лучше всего, когда они находятся в щелочной среде. Это означает, что мы должны добавить щелочь в проявляющий раствор, чтобы активировать процесс восстановления. Такими щелочными компонентами, которые действует в проявителе как ускорители, могут быть углекислый натрий, гидроокись натрия и тетраборат натрия.

Щелочь, содействующая ионизации восстанавливающего вещества, еще и размягчает желатину эмульсии. Чем активнее щелочное вещество, тем сильнее размягчающий эффект. Если этот процесс идет слишком активно, в результате проявления эмульсионный слой может быть поврежден. Кроме того, сильная щелочь может привести к возникновению шума, когда восстанавливающее вещество начинает действовать на неэкспонированные зерна галогенида серебра. Было также исследовано, как влияет замена углекислого натрия на гидроокись натрия с целью ускорения процесса проявления, однако выяснилось, что при этом дифракционная эффективность имеет более низкое значение, чем в случае использования соды. Активность проявителя зависит как от типа используемого щелочного вещества, так и от его количества, причем в широких пределах. Однако концентрация и тип ускорителя проявления должны быть оптимизированы, чтобы получить высокое значение дифракционной эффективности.

Также были выполнены исследования влияния добавки фенидона на работу проявителя ААС. Рис. 4 демонстрирует вариации кривых зависимости дифракционной эффективности от экспозиции для реверсивно отбеленных голограмм при использовании проявителя РААС, в составе которого изменялось количество фенидона. Добавление фенидона в проявитель РААС в количестве 0,2 г/л привело к достижению максимальной дифракционной эффективности, равной 66,3%, причем дальнейшее увеличение концентрации фенидона привело к снижению дифракционной эффективности. Фенидон – проявляющее вещество, подобное метолу, и увеличение дифракционной эффективности, достигнутое при уменьшении концентрации фенидона в проявителе РААС, соответствует действию метола в проявителе МАА.

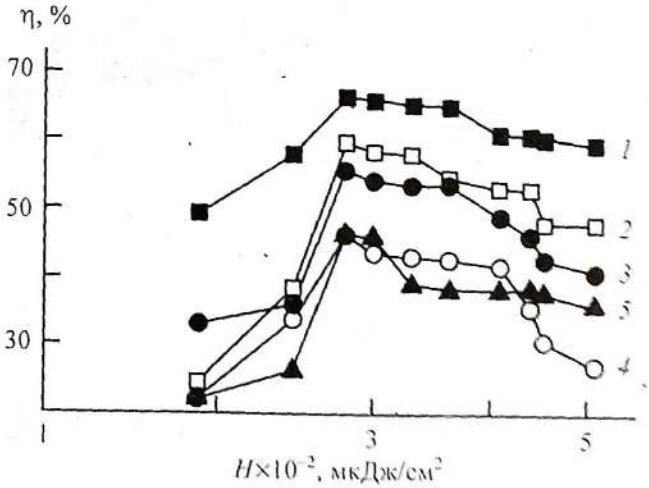

Рис. 4. Зависимости дифракционной эффективности от экспозиции для реверсивно отбеленных голограмм на фотопластинках ПФГ-01 при обработке в проявителе РААС, содержащем различное количество фенидона (аскорбиновая кислота 20 г, сода 120 г). *1* – 0,2, *2* – 0,4, *3* – 0,8, *4* – 1,4, *5* – 2 г.

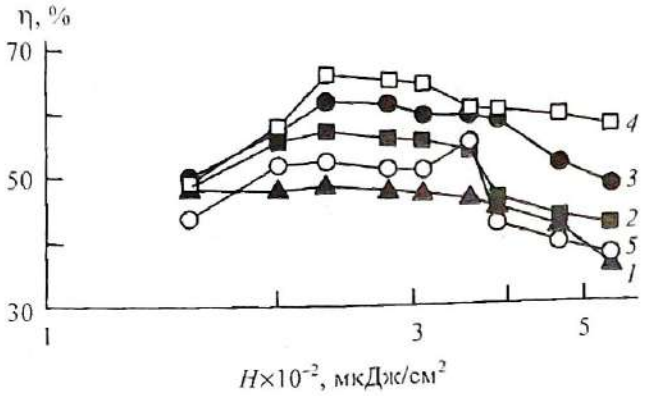

Рис. 5. Зависимости дифракционной эффективности от экспозиции для реверсивно отбеленных голограмм на фотопластинках ПФГ-01 при обработке в проявителе РААС, содержащем различное количество соды (аскорбиновая кислота 20 г, фенидон 0,2 г). *1* – 30, *2* – 60, *3* – 100, *4* – 120, *5* – 150 г.

На рис. 5 приведены кривые зависимости дифракционной эффективности от экспозиции для реверсивно отбеленных голограмм, которые обрабатывались в проявителе РААС, содержащем различное количество углекислого натрия. Максимальная дифракционная эффективность достигнута при концентрации углекислого натрия 120 г/л. При концентрации углекислого натрия 20 г/л происходит быстрое падение дифракционной эффективности. Это связано с тем, что фенидон не активен при низком значении pH и активизируется при повышении pH раствора. Проявляющие свойства зависят от pH раствора, причем активность проявителя увеличивается с ростом pH. По сравнению с максимумом дифракционной эффективности в случае проявителя ААС, достигнутой при концентрации углекислого натрия 60 г/л, видно, что фенидон работает активнее при более высоком значении pH. Поэтому необходимо исследовать характеристики процесса проявления, в котором в качестве проявляющего вещества участвует фенидон.

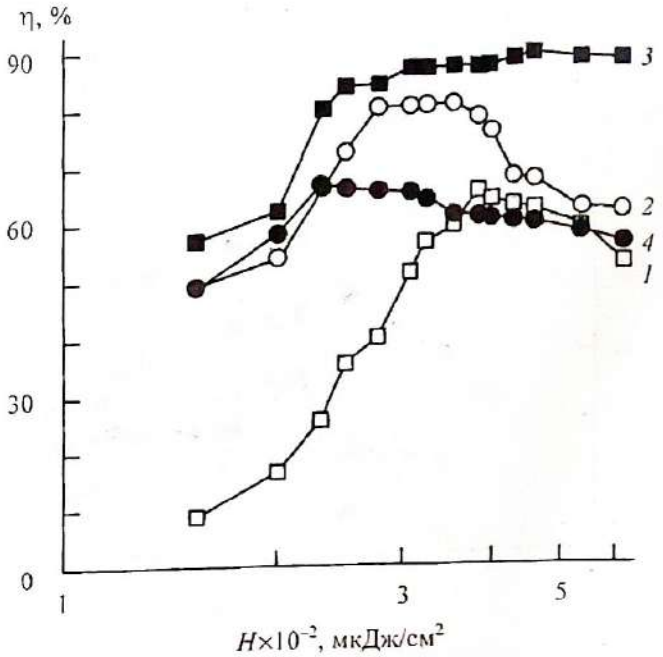

Рис. 6. Зависимости максимальной дифракционной эффективности от экспозиции для голограммных решеток, полученных методом реверсивного отбеливания и обработанных в четырех различных проявителях. *1* – D19, *2* – MAA, *3* – AAC, *4* – PAAC.

На рис. 6 показаны экспозиционные кривые для голограммных решеток, полученных с помощью реверсивного отбеливания при проявлении в четырех различных проявителях (D-19, MAA, AAC и PAAC). Из этого рисунка видно, что наибольшая дифракционная эффективность достигается для голограмм, проявленных в проявителе ААС. Максимальная дифракционная эффективность любых голограмм, обработанных в проявителях (D-19, MAA, PAAC) с двумя проявляющими веществами в различных количествах, ниже, чем у голограмм, обработанных в проявителе ААС. Супераддитивный эффект проявителя MQ позволил получить хорошие результаты при обычном отбеливании [7]. Однако реверсивное отбеливание не смогло дать более высокой дифракционной эффективности, несмотря на различные сочетания двух проявляющих веществ. В случае проявителя MQ восстанавливающий потенциал смеси двух проявляющих веществ выше, чем сумма восстанавливающих потенциалов компонентов [15]. Эти эффекты приводят к проявлению галогенида серебра в неэкспонированных зонах и, как следствие, уменьшению коэффициента модуляции показателя преломления, поскольку количество микрокристаллов галогенида серебра в неэкспонированных зонах уменьшается.

Выводы

Исследовано влияние состава проявителей на реверсивно отбеленные голограммы, записанные в сходящихся пучках на фотопластинках ПФГ-01. Проявители содержали в качестве проявляющих веществ аскорбиновую кислоту, метолфенидон и углекислый натрий в различных количествах. Фотопластинки ПФГ-01 ОАО "Компания Славич" существенно отличаются от других фотопластинок (Agfa, Kodak и т. д.), поэтому оптимальные концентрации различных компонентов проявляющих растворов подбирались таким образом, чтобы голограммы, обработанные методом реверсивного отбеливания, имели высокую дифракционную эффективность. Установлено, что наиболее высокое значение (89%) дифракционной эффективности голограмм на фотопластинках ПФГ-01 достигается при обработке в проявителе ААС, содержащем аскорбиновую кислоту с концентрацией 20 г/л и углекислый натрий с концентрацией 60 г/л. Хороший результат получен при обычном отбеливании с проявителем MQ,

обладающим супераддитивным эффектом проявления, причем с реверсивным отбеливанием такого результата получить не удалось. Предположительно это связано с тем, что во время проявления усиливаются эффект диффузионного переноса и процесс сверхвосстановления. Восстановление галогенида серебра в неэкспонированной зоне, усиленное эффектом диффузионного переноса, приводит к уменьшению модуляции показателя преломления и понижению дифракционной эффективности. Показано, что дифракционная эффективность и скорость проявления зависят от типа проявителя и концентрации проявляющих веществ. Максимум дифракционной эффективности может быть получен путем подбора типа проявителя и концентрации вещества, являющегося ускорителем проявления.

Таким образом, результаты, представленные в настоящей статье, показывают, что необходима оптимизация типа и концентрации компонентов проявителя. Сделан вывод, что при использовании реверсивного отбеливания и подборе компонентов проявителя может быть достигнута высокая дифракционная эффективность. Мы полагаем, что фотопластинки ПФГ-01 являются хорошей заменой других фотопластинок для получения реверсивно отбеленных пропускающих голограмм.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Domingo M., Arias I., Garcia A.* Achromatic Fourier processor with holographic optical lenses // Appl. Opt. 2001. V. 40. P. 2267–2274.
2. *Kim J.M., Cjoi B.S., Kim S.I., Bjelkhagen H.J., Phillips N.J.* Holographic optical elements recorded in silver halide sensitized gelatin emulsions. Part I. Transmission holographic optical elements // Appl. Opt. 2001. V. 40. P. 622–632.
3. *Solymar L., Cook D.J.* Volume Holography and Volume Gratings. London: Academic Press, 1981. P. 315–326.
4. *Upatnieks J., Leonard C.* Diffraction efficiency of bleached, photographically recorded interference patterns // Appl. Opt. 1969. V. 8. P. 85.
5. *McMahon D.H., Franklin A.R.* Efficient high-quality R-10 bleached holographic diffraction gratings // Appl. Opt. 1969. V. 8. P. 1927.
6. *Niepp C., Belendez A., Pascual I.* The influence of the development in silver halide sensitized gelatin holograms derived from PFG-01 plates // Opt. Commun. 2000. V. 173. P. 161–167.
7. *Hariharan P., Chidly C.M.* Rehalogenating bleaches for photographic phase holograms: the influence of halide type and concentration on diffraction efficiency and scattering // Appl. Opt. 1987. V. 26. P. 3895–3898.
8. *Niepp C., Pascual I., Belendez A.* Effects of overmodulation in fixation-free rehalogenating bleached hologram // Appl. Opt. 2001. V. 40. P. 3402–3408.
9. *Niepp C., Pascual I., Belendez A.* Theoretical and experimental analysis of overmodulation effects in volume holograms recorded on BB-640 emulsion // Appl. Opt. 2001. V. 3. P. 504–513.
10. *Hariharan P., Chidly C.M.* Photographic phase holograms: special frequency effects with conventional and reversal bleaches // Appl. Opt. 1988. V. 47. P. 3065–3067.
11. *Ulibarena M., Mendez M.J., Carretero L., Madrigal R., Femia A.* Comparison of direct, rehalogenating, and solvent bleaching processes with BB-640 plates // Appl. Opt. 2002. V. 41. P. 4120–4123.
12. *Bjelkhagen H.I.* Silver-Halide Recording Materials for Holography and Their Processing. Berlin: Springer, 1995.
13. *Hariharan P., Chidly C.M.* Photographic phase hologram: the influence of developer composition on scattering and diffraction efficiency // Appl. Opt. 1987. V. 26. P. 1230–1234.
14. *Oliva J., Boj P.G., Prado M.* Dichromated gelatin holograms derived from Agfa 8E75HD plates // Appl. Opt. 1984. V. 23. P. 196.
15. *Walls H.J., Attrige G.G.* Basic Photo Science. London, New York: Focal Press, 1977. P. 195–196.