04

Слои бихромированного желатина для голографической регистрации (обзор)

© Н.М. Ганжерли[1], С.Н. Гуляев[2], И.А. Маурер[1]

[1] ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,
Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия

e-mail: nina.holo@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 25.11.2024 г.
В окончательной редакции 25.11.2024 г.
Принята к публикации 10.12.2024 г.

Рассмотрены физико-химические свойства светочувствительных материалов на основе бихромированного желатина (БХЖ). Описаны химические и физико-химические процессы, происходящие в системе „желатин-вода“ в ходе изготовления слоя и записи голограмм. Представлены разные технологии полива слоев БХЖ, а также наиболее частые варианты их использования в голографии, такие как голограммные оптические элементы и изобразительные голограммы.

Ключевые слова: желатин, бихромированный желатин, бихромат аммония, голограммные оптические элементы, метиленовый голубой, дифракционная эффективность.

DOI: 10.61011/OS.2025.01.59878.7381-24

Введение

Использование желатина с добавками хромовокислых солей в качестве светочувствительной среды для записи голограмм впервые было предложено в 1968 г. [1]. Автор статьи обнаружил, что максимальная дифракционная эффективность (ДЭ) голографических решеток на слоях бихромированного желатина (БХЖ) для низких пространственных частот ($\sim 100\,\mathrm{mm}^{-1}$) и малых толщин ($< 1\,\mu\mathrm{m}$) составляла 33%, а для более высоких пространственных частот ($1000-3000\,\mathrm{mm}^{-1}$) и больших толщин ($1.3-3\,\mu\mathrm{m}$) приближалась к 80–90%, что близко к теоретически предсказываемым пределам для тонких и объемных голографических структур. Голографическая информация в данном случае, по мнению автора, записывалась за счет формирования поверхностного рельефа вследствие травления желатина в воде, или перемещения его объемов вследствие возникновения сил натяжения при обезвоживании изопропанолом.

Слои БХЖ наряду с галоидосеребряными фотоэмульсиями традиционно считаются одними из ведущих регистрирующих сред для голографии благодаря своим высоким оптическим свойствам, близким к идеальным [2]. На этих слоях, обладающих высокой разрешающей способностью, превышающей $3000\,\mathrm{mm}^{-1}$, можно создавать высокоэффективные голографические структуры толщиной от долей до тысяч микрометров и получать как тонкие, так и объемные голограммы с высокой селективностью и очень низким уровнем шума [3–5]. Материал может быть использован для записи как отражательных, так и пропускающих голограмм, а ДЭ объемных голограмм может приближаться к теоретическому пределу — 100%.

Голографическая чувствительность слоя БХЖ на несколько порядков уступает чувствительности галоидосеребряных фотоматериалов [3,4] (табл. 1). Кроме того, слои без добавления сенсибилизаторов имеют ограниченный спектральный диапазон светочувствительности (350–530 nm).

Основным компонентом слоя БХЖ является желатин, который в значительной мере определяет свойства материала [5]. Желатин бесцветен, не имеет запаха, вкуса, не растворим в органических растворителях, экологически безопасен, прост в обращении, экономичен, а также обладает хорошей прозрачностью, биоразлагаемостью и другими полезными свойствами. Такие характеристики желатина, как вязкость, прочность геля, размягчение, температура плавления, могут быть изменены с помощью ультрафиолетового излучения, тепла, химических веществ и ультразвука. Для желатина характерна высокая совместимость с широким спектром веществ от простых минеральных солей (галогениды серебра, бихроматы и др.) до сложных органических соединений (например, красители). Желатиновые пленки хорошо пропускают свет с длинами волн от 350 до 2000 nm. Добавление красителя-сенсибилизатора позволяет желатину быть чувствительным к широкому диапазону электромагнитного излучения от УФ до среднего ИК. Несенсибилизированный желатин чувствителен к воздействию коротковолнового УФ, ИК и ионизирующего излучения достаточно большой мощности. Свойства БХЖ зависят и от другого компонента слоя — бихромата аммония (БХА) и его количественного соотношения с желатином.

Таблица 1. Типичные и минимальные значения энергетической чувствительности светочувствительных сред на основе желатина

Значения энергетической чувствительности, J/cm^2	БХЖ	Галоидосеребряная фотоэмульсия
Типичные	$50-500 \cdot 10^{-3}$	$50-150 \cdot 10^{-6}$
Минимальные	$0.5-10 \cdot 10^{-3}$	$0.5-10 \cdot 10^{-6}$

Некоторые задачи голографии требуют обеспечить оптическое качество поверхности слоя, используемого, например, для изготовления голограммных оптических элементов (ГОЭ) на плоских или неплоских подложках. ГОЭ, в том числе изготовленные на слоях БХЖ, находят применение в оптическом приборостроении в качестве решеток для спектральных приборов, линз, светофильтров, зеркал, а также в устройствах оптической обработки изображений [6,7].

Применение ГОЭ позволяет снизить сложность оптических систем, значительно сократить их размеры и вес, что актуально для использования их в космосе [8,9]. Телескопы, которые необходимо запускать в космос (чтобы увеличить дальность обзора и фокусировки, не лимитированных флуктуациями земной атмосферы), ограничены по весу и размеру стеклянных и ситалловых зеркал. Напротив, лёгкая гибкая голографическая линза, которую можно было бы сворачивать для запуска и разворачивать в космосе, может достигать десятков метров в диаметре. Уникальность свойств и широкие возможности ГОЭ привлекают к себе внимание исследователей, занимающихся разработкой оптико-электронных телескопических комплексов (ОЭТК) космического базирования. Это объясняется возможностью улучшения характеристик проектируемых оптико-электронных систем за счет способности ГОЭ одновременно выполнять функции нескольких оптических элементов, например светоделителя, спектрального фильтра и формирующей оптической системы. Использование ГОЭ в ОЭТК позволяет также улучшить разрешающую способность, поле зрения и т. д.

Широко используются на практике голографические дифракционные решётки [3,10]. Они просты в изготовлении, дешевле нарезных и не имеют дефектов, связанных с ошибками оптико-механических систем, управляющих движением резца.

Слои БХЖ неустойчивы к воздействию внешних факторов: действию влажности воздуха, колебаниям температуры окружающей среды, механическим повреждениям, загрязнению поверхности пылью, что приводит к ухудшению оптических характеристик. Для обеспечения стабильности оптических характеристик ГОЭ на БХЖ в различных условиях хранения и эксплуатации на слой наносят защитные покрытия. Например, на оптическую поверхность ГОЭ со стороны слоя БХЖ наносят слой полимерного клея, на нём размещают покровное силикатное стекло с последующим отверждением полимерного клея [11].

Как и на начальных этапах развития голографии, продолжает совершенствоваться изобразительная голография в трехмерных средах по методу Ю.Н. Денисюка на слоях БХЖ, позволяющая получать высокоэффективные реальные изображения трехмерных объектов. История развития изобразительной голографии в СССР, а также огромный вклад отечественных инженеров и ученых в совершенствование изобразительного метода представлена в [12,13]. Свой вклад в использование слоев БХЖ внесли наши соотечественники: Ш.Д. Какичашвили, В.А. Ванин, Г.А. Соболев, О.Б. Серов, Л.В. Танин, М.К. Шевцов и ряд других исследователей. Изготовленные ими художественные голограммы неоднократно экспонировались на отечественных и международных выставках изобразительных голограмм [13,14]. Также приобретает популярность использование изобразительных цветных голограмм в музейных технологиях. Примеры современного состояния изобразительной голографии зарубежом приведены в [15–17].

Автор статьи [18], занимающийся голографией как художник, продемонстрировал создание на слоях БХЖ цветных голограмм размером $1.2 \times 1.5\,\mathrm{m}^2$. Запись голограмм осуществлялась по схеме Денисюка во встречных пучках. В статье [19] исследователь из Японии для создания архитектурных инсталляций использовал голограммы на БХЖ размером $35 \times 40\,\mathrm{cm}^2$. Достижения последних лет в области технологии синтеза и других применений голограмм на БХЖ в изобразительной голографии представлены М.К. Шевцовым в докладе [20] на последней Международной конференции по дисплейной голографии в Сеуле в 2023 г.

Важными моментами исследований является изучение химических и физико-химических процессов, происходящих в системе „желатин-вода“ в ходе изготовления слоя БХЖ и записи голограмм, а также методов формирования структуры слоя и технологий фотохимической обработки.

1. Механизм записи голограмм на слоях БХЖ

Механизм записи голограмм на слоях БХЖ изучен достаточно подробно и продолжает исследоваться [4,21–24]. Известно, что структура желатина может изменяться при воздействии радиационной или химической обработки, при этом подвергаясь структурированию или деструкции. Свет ультрафиолетовой или сине-зеленой областей спектра может вызвать в слое БХЖ в присутствии бихроматов образование перекрестных связей (сшивание молекул желатина). Это сшивание известно под названием дубления. После экспонирования облученная часть слоя становится нерастворимой в воде, в то время как необлученная может быть легко удалена

водой, в результате чего формируется рельефное изображение интерференционной картины.

Существует и другой процесс, при котором слой БХЖ первоначально химически задубливается до такой степени, при которой неэкспонированный слой не растворяется водой. После экспонирования интерференционной картины голограмма промывается водой для необходимого набухания желатина и удаления бихромата, не прореагировавшего со светом. Далее голограмма подвергается быстрому обезвоживанию в ваннах с начальной концентрацией изопропилового спирта в воде (ИПС) более 50–60% и далее вплоть до 100% с целью завершения процесса проявления. Голограмма записывается как на поверхности, так и в объеме слоя. Вследствие предварительного задубливания на стадии промывки не происходит растворения и удаления желатина. Вместо этого желатин поглощает воду, набухает, увеличиваясь в объеме. Последнее происходит неравномерно. Набухание уменьшается с ростом прочности желатинового слоя. Более экспонированный желатин задублен сильнее, а неоднородное распределение интенсивности света соответствует распределению набухания слоя. Если при быстром обезвоживании в ИПС вода удаляется из желатина со скоростью, превышающей нормальную скорость усадки, то возникшее пространственное неоднородное увеличение объема сохраняется.

В итоге известные способы получения слоев БХЖ отличаются степенью дубления матрицы желатина в процессе изготовления слоя. Слои можно разделить на задубленные и незадубленные. Незадубленные слои БХЖ предполагают получение слоя на основе желатина с хромовокислой солью без какого-либо химического или термического дубления перед экспонированием. Очувствление, или сенсибилизация слоя, осуществляется на этапе изготовления светочувствительной композиции путем введения солей бихроматов в раствор желатина. Химическое или термическое дубление до экспонирования приводит к формированию задубленных слоев.

Первичная фотохимическая реакция переноса электрона в слое в результате поглощения света комплексом, состоящим из молекул донора (желатин) и акцептора (ион хрома) происходит, по крайней мере, по двум каналам [24]. Поглотив квант света, ион хрома Cr^{6+}, находящийся в эмульсии, восстанавливается до Cr^{4+} и Cr^{5+}. Ионы Cr^{4+} со временем самопроизвольно переходят в состояние Cr^{5+} или, в результате темновых реакций (задубливание без света), в Cr^{3+}, который является основным дубящим агентом желатина. Ионы Cr^{5+} стабильны и переходят в состояние Cr^{3+} только под действием воды, при проявлении. В водном растворе инициируется процесс перехода „спираль-клубок“. Этот процесс требует времени. После экспонирования слоя БХЖ, кроме записи оптической информации за счет перехода ионов хрома Cr^{6+} в Cr^{5+} и переходов „спираль-клубок“, происходит диффузия ионов Cr^{6+} в засвеченные области. Слой желатина, подвергшийся экспонированию светом высокой интенсивности, будет задубливаться сильнее, чем желатин, получивший меньшее количество световой энергии. В результате последующей стадии обезвоживания в спиртовых растворах происходит образование локальных неоднородностей (пор, микротрещин), местоположение которых точно соответствует интерференционной картине при записи голограммы [4,21–23].

В растворе молекулы желатина находятся преимущественно в конформационном состоянии клубка [22,24,25]. Центром скрытого изображения в БХЖ является участок макромолекулы желатина, переходящий под действием фотовозбуждения иона хрома из спирального в клубковое состояние. При проявлении экспонированного слоя происходит значительное уменьшение размера центра скрытого изображения. Предельная разрешающая способность слоя БХЖ поэтому зависит от энергии экспозиции и режима проявления и доходит до $0.2\,\mu$m. Модуляция показателя преломления связана с самыми разнообразными процессами — от внутримолекулярного перехода „клубок-спираль“ до чисто механического растрескивания слоя при быстром обезвоживании в ИПС.

При понижении температуры раствора происходит его студенение, осуществляется переход клубок-спираль и формируется конформация коллагеноподобной спирали. Если студенится раствор желатина с введенными солями бихроматов, то конформационный переход клубок-спираль затормаживается.

2. Технологии формирования слоев БХЖ

Первоначальная технология полива слоев БХЖ описана в работе [1]. Имеется ряд более поздних исследований по разработке методов формирования слоев БХЖ. Известна методика создания технологических основ изготовления и обработки высокочувствительного малозадубленного слоя БХЖ с высокими голографическими параметрами [26]. В этой работе на основе комплексного голографического и физико-химического исследования проведена оптимизация рецептуры композиции БХЖ и технологии полива слоя, в том числе на подложки неплоской формы, а также в производственных условиях. Автором изучена зависимость голографических параметров от состава и типов желатина, количественно обоснован оптимальный состав композиции слоев БХЖ, включая концентрацию добавок, повышающих светочувствительность и ДЭ. Предложен и разработан способ формования регистрирующей среды, обеспечивающий достижение оптического качества поверхности светочувствительного слоя на стеклянной или полимерной подложке различной геометрической формы, что весьма актуально для создания ГОЭ. В предложенном автором составе слоя БХЖ на основе раствора 6–10% желатина с добавлением БХА до 10% от веса сухого

желатина присутствует небольшая добавка глюкозы в количестве 0.1% от веса сухого желатина, что приводит к повышению светочувствительности.

В авторском свидетельстве [27] исследователи предлагают способ повышения голографической чувствительности более чем в 3 раза. Вместо известного способа изготовления незадубленного слоя БХЖ, в котором формирование матрицы БХЖ осуществляется путем полива на подложку раствора желатина с введенными солями бихроматов и последующей операции студенения и сушки, авторы очувствляют слой желатина в растворе солей бихроматов уже после студенения и сушки желатинового слоя. При этом наличие спиралевидной структуры молекул желатина позволяет оптимальнее осуществлять взаимодействие с ионами хрома при введении солей бихроматов, чем у клубковой структуры, которая наблюдается в случае введения солей бихроматов в раствор желатина. Описанный в [27] способ позволяет расширить область использования БХЖ как регистрирующей среды в голографии, так как при увеличении чувствительности фотоматериала открывается перспектива изготовления крупногабаритных голограмм (как в изобразительной голографии, так и в голограммной оптике) без увеличения мощности излучения экспонирующих лазеров. Кроме того, достаточно протяженный во времени процесс изготовления слоя желатина проходит в условиях освещения белым светом, что значительно проще для изготовителя. Полученные слои БХЖ могут сохраняться длительное время без сенсибилизации и очувствление производится лишь перед использованием. При этом исчезает возможность старения слоев с течением времени и повышается воспроизводимость результатов.

Аналогичный вариант очувствления сухого желатинового слоя купанием его в растворе БХА описан в статье [24]. Получено, что максимальное значение ДЭ порядка 83% достигается при концентрации БХА в растворе 2%. Интересно, что для очувствления авторы использовали частично или полностью утратившие эксплуатационные свойства пластинки ПФГ-03М (ОАО Компания „Славич“, г. Переславль-Залесский).

Первоисточником подобных исследований является описанный еще в 70-х годах двадцатого века в [28–30] вариант технологии изготовления слоев БХЖ при использовании промышленно выпускаемых галоидосеребряных фотоматериалов Kodak 649F и Agfa 8E75 HD. Авторы широко известной монографии [28] для получения чистого желатинового слоя рекомендуют растворить в фиксирующем растворе галогенид серебра, содержащийся в непроявленной фотопластинке и промыть ее в воде и метаноле. Для очувствления они предлагают купать фотопластинку в 5% водном растворе БХА в течение 5 min и далее подвергнуть ее медленной сушке в темноте в течение 4–6 h. Сенсибилизированные фотопластинки можно хранить несколько месяцев при температуре 10°C в холодильнике.

3. Использование слоев БХЖ для изготовления ГОЭ

Многочисленные исследования посвящены использованию слоев БХЖ для создания ГОЭ. В статье [31] приведено подробное описание основных этапов получения ГОЭ высокого оптического качества на слоях БХЖ толщиной от нескольких микрометров до 100 μm. Технология полива слоев разработана в конце 1970-х в ГИПО (Казань). Процесс формирования слоя до полного высыхания можно регулировать во времени. По схеме Ю.Н. Денисюка на слоях зарегистрированы селективные голограммные зеркала и узкополосные фильтры, имеющие широкий круг применения от визуальной индикации на лобовом стекле самолета до спектроделителей и устройств преобразования солнечной энергии. Созданы объемно-фазовые решетки, превосходящие по величине ДЭ своих рельефных конкурентов. Для оптических систем телекоммуникации изготовлены гризмы для выравнивания ДЭ для различных поляризаций падающего излучения, которые представляют собой комбинацию из двух призм и объемно-фазовой пропускающей решетки между ними.

В диссертационной работе [32] рассматривается применение незадубленных толстых слоев БХЖ для создания высокоэффективных ГОЭ для ультрафиолетовой, видимой и ближней ИК областей спектра (УВИ области спектра). Контрнаправленная схема Ю.Н. Денисюка использовалась для изготовления селективных голограммных зеркал и узкополосных фильтров. Голограммные решетки записывались в сходящихся пучках. Автором проведены систематические комплексные исследования влияния параметров окружающей среды на оптические характеристики ГОЭ, получаемых на толстых (толщиной до 250 μm) незадубленных слоях БХЖ для всех звеньев технологической цепочки (нанесение фотослоя на подложку, экспонирование, физико-химическая обработка и т. д.).

Авторами работы [33] теоретически и экспериментально проанализированы возможности использования регистрации голографических зеркал для создания спектроделителя с пространственным разделением двух длин волн в спектральной области 290–330 nm при использовании незадубленных слоев БХЖ, изготовленных согласно [24]. Данные слои обладают более высокой чувствительностью по сравнению со слоями, изготовленными по другим известным методикам. Существенное повышение эффективности использования ГОЭ достигается при совмещении нескольких функций в одном элементе. Возможно использование слоев БХЖ толщиной не более 25 μm.

В патенте [34] описан способ специальной голографической записи на слое БХЖ. По утверждению авторов, способ может быть использован в различных разделах прикладной голографии, например, для изготовления сувенирных голограмм, циферблатов часов, в рекламе, оптическом дизайне. Это обусловлено представленной в

патенте сложной схемой регистрации зеркальной голограммы, согласно которой направление распространения восстановленного пучка света перпендикулярно плоскости голограммы.

В статье [35] предложена методика получения на слоях БХЖ голограммных зеркал, отражающих свет в широком диапазоне длин волн. Необходимость в таких зеркалах обусловлена тем, что в некоторых прикладных задачах (в том числе в изобразительной голографии) существует потребность создания голографических структур, неселективных относительно спектрального состава восстанавливающего света. Появление эффекта „неселективности" при обычной записи голограммы во встречных пучках по способу Липпмана-Денисюка авторы связали с уникальными свойствами БХЖ. Сильное поглощение света в толщине светочувствительной среды на некоторых длинах волн, используемых для регистрации, приводит к градиенту оптической толщины структуры желатина. Иными словами, после полной обработки голограмма на БХЖ представляет набор слоев с отличающимися пространственными частотами („многослойная структура"), что и обусловливает хорошее отражение света от голографического зеркала в широком спектральном диапазоне.

Вопросы, связанные с изготовлением по методу Денисюка плоского и сферического голограммных зеркал на основе толстого слоя бихромированного желатина, рассмотрены авторами статьи [36]. Зеркала предназначены для работы в составе окулярной системы очков ночного видения. В работе использовался способ переноса слоя БХЖ с изготовленной в условиях серийного производства плоской фотопластинки ПФГ-04 на выпуклую поверхность сферической подложки.

В работах [37–39] на основе голограммы Габора разработан и исследован новый вид голограмм, которые позволяют компенсировать искажения, характерные для такой простейшей осевой голограммы. В частности, был предложен осевой голографический экран на основе безопорной толстослойной голограммы, которая не пропускает нулевой порядок, не создает гало и сопряженного изображения в отличие от полученных по такой же оптической схеме голограмм на тонких слоях галоидосеребряных фотоэмульсий [40]. Для регистрации экрана использовался самопроявляющийся глицеринсодержащий БХЖ толщиной $0.10-1.15$ mm. Такой экран может использоваться для систем проекции изображений через голографический экран, используемых, например, в качестве тренажеров. Отмечен эффект концентрации света в зону видения. Продемонстрирована возможность регистрации экрана одной длиной волны, а реконструкции и проецирования изображения другой, в том числе и белым светом.

В статьях [41,42] предложена модификация технологии обработки слоев БХЖ для изготовления высокочастотных тонких рельефно-фазовых голографических решеток, работающих на пропускание, при регистрации которых используется голографическая схема в сходящихся пучках. Метод основан на применении в качестве травящего реагента ледяной уксусной кислоты (ЛУК) после деструктивного воздействия коротковолнового УФ излучения с длиной волны менее 270 nm [43]. Использовались как промышленно выпускаемый фотоматериал ПФГ-04 (производство ОАО „Компания Славич", г. Переславль-Залесский) толщиной до $26\,\mu$m и голографической чувствительностью $2500\,\mathrm{J/m^2}$, так и политые в лабораторных условиях подобно способу, описанному в работе [1], слои БХЖ толщиной от 0.7 до $11\,\mu$m.

В отличие от применения описываемой технологии в отношении галоидосеребряных фотоэмульсий [41] в слоях БХЖ осуществляется непосредственное изменение физико-химических свойств желатина при голографической записи интерференционной картины за счет избирательного светового дубления излучением He-Cd-лазера длиной волны $0.44\,\mu$m [42] в присутствии бихроматов и последующей водной обработки. В эксперименте регистрировались голографические решетки с пространственной частотой до $1600\,\mathrm{mm^{-1}}$ по симметричной оптической схеме двумя сходящимися плоскими пучками. При этом происходило структурирование, т. е. установление большого количества поперечных связей в максимумах интенсивности интерференционной картины. Фотолитически задубленные участки БХЖ менее подвержены разрушающему воздействию коротковолнового УФ излучения с длиной волны менее 270 nm [43]. Затем проводилось купание образцов решеток в 2% растворе сульфита натрия, водная промывка и сушка. Далее следовало облучение образцов коротковолновым УФ излучением ртутно-кварцевой лампы ДРТ-220 в течение $20-25$ min. При этом менее задубленные участки желатина, лежащие в минимумах интерференционной картины, разрушались сильнее под воздействием УФ излучения. В результате последующего короткого по времени травления эти участки удалялись с поверхности слоя в первую очередь. Травление поверхностного слоя желатина проводилось в воде или в смеси ЛУК и ИПС в течение примерно 10 s. Травление прерывалось ванной 100% ИПС. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Образцы рельефно-фазовых голографических решеток на ПФГ-04 продемонстрировали высокую ДЭ на пространственной частоте $1600\,\mathrm{mm^{-1}}$ до 67%, а решетки на лабораторных слоях БХЖ имели ДЭ $50-64$% при толщине $0.7-5.6\,\mu$m.

Также была показана возможность переноса голографической структуры, первоначально зарегистрированной на слоях БХЖ, на материал подложки из полиметилметакрилата (ПММА) [44]. Оптимизацией режимов обработки и подбором проявляющих составов на основе метилизобутилкетона удалось создать на подложках из ПММА рельефно-фазовые голографические решетки с высокой ДЭ около 25% и максимальной глубиной поверхностного рельефа порядка $1\,\mu$m [44].

Таблица 2. Сводная таблица экспериментальных результатов обработки образцов рельефно-фазовых решеток на светочувствительных слоях на основе БХЖ. Звездочкой отмечены образцы, изготовленные в лабораторных условиях по методу, описанному в [1]

Тип фотоматериала	Толщина слоя, μm	Тип травителя	ДЭ, % для $\lambda = 0.63\,\mu$m
* Лаб. БХЖ по Шенкоффу	0.7	H_2O	50
	1.1	Смесь ЛУК и ИПС в отношении 1:1	41
	1.94	Смесь ЛУК и ИПС в отношении 1:3	48
	5.7	Смесь ЛУК и ИПС в отношении 1:1	64
	11	Смесь ЛУК и ИПС в отношении 1:3	28.4
ПФГ-04	26	H_2O	54
	26	Смесь ЛУК и ИПС в отношении 1:1	67

Предложенная усовершенствованная методика обработки БХЖ способствует увеличению диапазона регистрируемых пространственных частот при формировании рельефно-фазовых голографических структур и тем самым расширяет сферу использования БХЖ в голографии. Применение УФ облучения и неравновесного проявления (короткого травления) приводит к образованию обладающих низкой угловой селективностью эффективных высокочастотных рельефно-фазовых структур, которые могут быть использованы в дифракционной оптике. Высокие значения ДЭ можно также получить на образцах решеток со сверхмалой толщиной в доли микрометра, что способствует экономному использованию светочувствительного материала при его производстве, уменьшению аберраций и искажений голографического изображения из-за неоднородностей внутри и на поверхности светочувствительного слоя. Достоинством новой методики обработки является ее применимость для промышленно выпускаемого фотоматериала ПФГ-04 на основе БХЖ. Таким образом, показана возможность использования традиционно применяемого в голографии материала в новом качестве — как тонкой среды для записи голограммных оптических элементов, обладающей низкой угловой селективностью.

Формирование сильного поверхностного рельефа на слоях БХЖ можно осуществить не только применяя избирательную фотодеструкцию желатина под воздействием коротковолнового УФ излучения, но и используя другие, чисто химические методы. Например, авторы работы [45] использовали излучение неодимового лазера ($\lambda = 468$ nm) или ближний ультрафиолет ртутной лампы для светового дубления (структуризации) толстых слоев БХЖ. Для травления желатина в менее экспонированных местах применялись растворы энзима папаина в воде. Исследовались пространственно-периодические структуры, полученные копированием контактным способом решеток Ронки с низкими пространственными частотами от 4 до $10\,\mathrm{mm}^{-1}$ на слои БХЖ с толщиной до $50\,\mu$m. Применение папаина позволило увеличить глубину поверхностного рельефа почти в 7 раз по сравнению с обработанными в воде образцами и довести ее до величины около $15\,\mu$m. По мнению авторов, полученные сверхглубокие пространственно-периодические структуры можно эффективно использовать в инфракрасном диапазоне излучения с длиной волны $\lambda = 1-15\,\mu$m.

В обзорной статье [46] рассматривается использование голографических линз (ГЛ) для концентрации солнечной энергии в фокальную точку или фокальную линию, где она может быть преобразована в электрическую или тепловую энергию. Оценивается возможность использования светочувствительных сред, в том числе и слоев БХЖ, для изготовления ГЛ. Несмотря на то, что БХЖ зарекомендовал себя как универсальный материал для записи голограмм с высокими ДЭ и оптическим качеством и может использоваться на жестких или гибких подложках, плоских или криволинейных поверхностях, низкая чувствительность БХЖ, а также его токсичность, по мнению авторов, может привести к ограничению его применения в голографических гелиоконцентраторах.

Ряд исследований был посвящен использованию слоев БХЖ в интегральной и планарной оптике [47,48]. Например, авторы работы [47] изготовили многоплоскостную 32-канальную оптическую шину для осуществления межсоединения в локальных сетях и параллельных компьютерных системах. Для этого было использовано объединение одномодового волновода, изготовленного на поверхности стеклянного субстрата, с записанными на слоях БХЖ объемными голографическими решетками. Другим примером является применение слоев БХЖ для изготовления планарных голографических линз, которые можно использовать для получения изображений [48]. Описанные в этой работе планарные голографические линзы обладают высокой ДЭ (более 50%), малыми аберрациями и низкой селективностью по отношению к углу падения ($\sim 16^\circ$). Такие линзы могут быть включены в ряд компактных систем формирования изображения.

4. Толстослойные светочувствительные материалы на основе БХЖ

Особый интерес представляют толстослойные светочувствительные материалы, позволяющие осуществлять регистрацию объемных голограмм, обладающих рядом уникальных свойств по сравнению с двумерной голограммой [49,50]. Среди этих свойств необходимо отметить высокие угловую и спектральную селективности, отсутствие сопряженного изображения, возможность реконструкции изображения в белом свете и др. [49–51]. Это позволяет использовать объемные голограммы при развитии таких направлений, как получение трехмерных изображений, оптическая память и др.

В статьях [52–54] приведены примеры создания и использования толстослойных светочувствительных материалов на основе БХЖ, работающих в реальном времени. Одна из первых статей об использовании слоев БХЖ в реальном времени (без дополнительной фотохимической обработки) была опубликована в 1984 г. [55]. В статье была показана возможность использования для оптической обработки информации непроявленных слоев БХЖ с ДЭ 0.1–0.7% при экспозиции 200 mJ/cm^2. Там же отмечалось, что нахождение слоев БХЖ во влажной атмосфере в течение нескольких часов ведет к увеличению ДЭ.

Процесс обработки голограммы, записанной на БХЖ, требует наличия воды в количестве, достаточном для проявления скрытого изображения. В первом случае была создана сэндвичевая структура, в которой БХЖ находился между двумя стеклянными пластинами [52]. Процесс изготовления гелеобразного слоя был аналогичен известной технологии полива БХЖ [1]. Основное отличие заключалось в том, что голограмма записывалась непосредственно в насыщенном влагой слое. Сам слой представлял собой довольно плотный гель толщиной от 1 до 5 mm, в котором голограмма может записываться так же легко, как в твердой пленке БХЖ.

Во втором случае [53] были изготовлены и исследованы содержащие глицерин сухие слои БХЖ для регистрации объемных голограмм. Толщина слоев после высыхания на воздухе была от 100 до 600 μm. Впервые введение определенного количества глицерина в состав БХЖ для повышения доли реакционноспособных молекул воды было описано авторами работ [56,57]. Глицерин смешивается с водой в любых отношениях. Глицерин в слоях повышает количество молекул воды, которые могут проявлять скрытое изображение в силу наличия водородных связей. Введение глицерина в слои БХЖ, кроме обеспечения самопроявления, позволяет повысить светочувствительность и расширить спектральную чувствительность в длинноволновую область спектра. Тип слоев самопроявляющегося бихромированного желатина с добавками глицерина до 95% от веса сухого желатина, имеющих толщину после высыхания 5–10 μm, был ранее описан в работе [58]. Было показано, что оптимальная концентрация свободной воды в слое для достижения максимальной чувствительности достигается при введении в БХЖ 90–95% глицерина от веса сухого желатина.

Для изучения дифракционных свойств двух вариантов толстослойного самопроявляющегося БХЖ регистрировались голографические решетки по симметричной оптической схеме излучением He-Cd-лазера ($\lambda = 0.44\,\mu$m) мощностью 16 mW. Голографические параметры решеток на слоях БХЖ, содержащих глицерин, оказались лучше, чем на гелеобразных слоях. Максимальная достигаемая ДЭ составляла 15–40% в зависимости от толщины слоя и концентрации БХА. Чувствительность толстых содержащих глицерин слоев БХЖ была около 6–10 J/cm^2, что близко к чувствительности толстослойного гелеобразного желатина (10 J/cm^2). Содержащий глицерин БХЖ характеризуется практически бесконечным временем хранения записанных голограмм в отличие от гелеобразного БХЖ, который имел срок хранения записанной информации несколько часов.

Оба типа слоев БХЖ представляют собой простые в изготовлении материалы, которые могут быть использованы для записи трехмерных голограмм, а также для проведения ряда модельных экспериментов по изучению различных схем голографической записи. В частности, гелеобразный материал использовался для регистрации так называемых селектограмм [59]. Однако низкое значение ДЭ голограмм и ограниченное время хранения зарегистрированной информации вносят определенные ограничения при его использовании.

Содержащие глицерин слои БХЖ использовались для изготовления такого ГОЭ, как одномерный диффузор [60], который эффективно рассеивает свет в одной плоскости и использовался, например, при регистрации безопорных селектограмм. Материал также применялся для записи и мультиплицирования трехмерных осевых голограмм [61], в том числе сдвиговых спекл-голограмм [62].

При синтезе сверхтолстых слоев БХЖ (более 0.5 mm) возникает проблема их „сушки“, протекающей значительное время (более трех суток) и сопровождающейся студенением, или „дозреванием“, коллоидной среды. В работе [63] рассматривалось использование при синтезе эмульсии лазерного отжига мощным инфракрасным излучением длиной волны 1.06 μm для „сушки“и студенения коллоидных слоев миллиметровой толщины. Авторами экспериментально продемонстрирована возможность улучшения свойств самопроявляющегося БХЖ под действием ИК лазерного излучения. Применение лазерного отжига для структурирования, кроме сокращения времени синтеза слоя, привело к повышению значения ДЭ, улучшению однородности свойств по всему объему системы, что очень важно для слоев толщиной 1–5 mm. И в целом лазерный отжиг выступал в качестве дополнительного инструмента управления технологическим процессом.

Для расширения спектральной чувствительности БХЖ используют оптическую сенсибилизацию хромированных коллоидных систем посредством введения красителя, имеющего максимум поглощения в нужной области спектра. Основная трудность при подборе сенсибилизатора — низкая растворимость ряда красителей в присутствии БХА. Интересным с практической точки зрения является расширение области чувствительности БХЖ в красную область спектра для использования слоев при записи голограмм He-Ne-лазером. Согласно работе [64], собственная чувствительность БХЖ к красному излучению очень мала (около $15-150\,\mathrm{J/cm^2}$ для слоев толщиной порядка $10-30\,\mu$m).

Как показано в статье [25], собственная чувствительность обусловлена комплексами ионов хрома, локализованными в области ядра глобулы макромолекулы желатина. Поэтому для обеспечения максимальной светочувствительности к излучению красного спектрального диапазона необходимо использовать слои БХЖ с глобулярной структурой. Автором разработаны способы синтеза глобулярных слоев БХЖ, позволяющие оптимизировать характеристики голограммных оптических элементов.

Наибольшее число публикаций по сенсибилизации слоев БХЖ к красному излучению относится к использованию в качестве красителя метиленового голубого (МГ) [65–69]. Добавление МГ к обычным слоям БХЖ толщиной порядка $20\,\mu$m увеличивает чувствительность (т. е. уменьшает требуемую энергию экспозиции) почти на 3 порядка. Однако при этом чувствительность БХЖ к красному свету остается по крайней мере на один–два порядка хуже, чем при использовании для записи голограмм синим и зеленым лазерным светом.

Сенсибилизатор МГ также выпадает в осадок в водном растворе БХА. Экспериментальные данные показывают, что успешное функционирование системы БХЖ+МГ связано с необходимостью поддержания в растворе pH не менее 9.0. Поддержание pH среды более 9.0 можно достичь добавлением в состав определенных количеств аммиака, а также выполнением условия, чтобы после полива и студенения слои оставались закрытыми стеклом до проведения эксперимента.

В статье [54] рассмотрен вариант технологии создания слоев БХЖ, чувствительных в красной области спектра, как в виде сэндвичевой структуры, так и с открытой поверхностью. У зарегистрированной по симметричной схеме картины интерференции двух плоских волн излучением He-Ne-лазера на длине волны $0.63\,\mu$m измерялась ДЭ решеток. В эксперименте варьировались угол схождения интерферирующих лучей от 15 до 35°, плотность мощности записывающего излучения, концентрация бихромата калия (БХК) от 20 до 60% от веса сухого желатина и концентрация МГ. Голографические характеристики снимались каждый раз через 24 h после полива слоев. Толщина слоя была от 0.9 до 1.2 mm. В течение 24 h толщина уменьшалась на 15–20%. Достигнута максимальная ДЭ 26, 23, 18, 9 и 2% для угла схождения 17, 20, 25, 39 и 35° соответственно. Максимальная ДЭ 29% при концентрации бихромата калия 60% получена для слоя толщиной 1.3 mm.

Разработанный материал, чувствительный в красной области спектра, допускает получение восстановленного голограммой изображения в реальном времени. Это позволяет использовать его для изучения особенностей записи голограмм. Материал прост в приготовлении, дешев и обладает хорошей воспроизводимостью параметров и характеристик.

Расширение чувствительности к зеленой области спектра описано, например, авторами работы [70]. Они получили яркие голограммы, используя излучение аргонового лазера с длиной волны 514 nm, применив постэкспозиционный отжиг при 100°C. За счет использования термического отверждения в присутствии глицерина светочувствительность БХЖ к зеленому свету увеличилась более чем в 3 раза. Для светочувствительного материала на основе БХЖ производства ОАО „Компания Славич“ ПФГ-04 авторами статьи [71] также была рекомендована термическая обработка при температуре 100°C (дубление в термостате при 100°C в течение 0–60 min в зависимости от срока хранения пластинок). В этой работе дан пример использования в реальном времени светочувствительного материала на основе БХЖ, в котором в качестве сенсибилизатора использовался БХК. В эксперименте излучением аргонового лазера с длиной волны 532 nm регистрировались по симметричной оптической схеме записи голографические решетки. Измерение ДЭ решеток осуществлялось при считывании He-Ne-лазером с длиной волны 633 nm. При концентрации БХК 1%, толщине слоя $10\,\mu$m, энергии облучения $18\,\mathrm{J/cm^2}$ и угле между сходящимися пучками 2.2° была достигнута ДЭ 19%. По мнению авторов, увеличение чувствительности, ДЭ и срока службы материала могут быть достигнуты добавлением в материал глицерина, красителя или при использовании более короткой длины волны при записи, а также при облучении материала УФ излучением и введением процедуры проявления.

Авторы работы [72], проведя очувствление БХЖ с помощью МГ к красному свету, показали, что, используя три лазера с длинами волн 647.1, 514.5, 476.5 nm, можно получать полноцветные отражательные голограммы в одном слое с высокой дифракционной эффективностью (около 80%). Авторами представлен упрощенный способ приготовления БХЖ, при котором слои можно сушить без использования аммиака. Разработанная технология приготовления слоев может быть использована в изобразительной голографии.

Заключение

В статье продемонстрирована востребованность светочувствительных материалов на основе БХЖ для голографии и ее приложений. Новейшие исследования в области слоев БХЖ позволяют рассматривать эту

светочувствительную среду перспективным материалом для записи оптической информации, изготовления различных голограммных оптических элементов, создания голографических дисплеев и других практических приложений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] T.A. Shankoff. Appl. Opt., **7**, 2101 (1968). DOI: 10.1364/AO.7.002101

[2] В.А. Барачевский. Опт. и спектр., **124** (3), 371 (2018). DOI: 10.21883/OS.2018.03.45659.238-17 [V.A. Barachevsky. Opt. Spectrosc., **124** (3), 373 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18030062].

[3] С.Н. Корешев. *Основы голографии и голограммной оптики* (Университет ИТМО, СПб., 2016).

[4] С.Н. Гуляев. В сб.: *Юрий Николаевич Денисюк — основоположник отечественной голографии* (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПбГУ ИТМО, НПК ГОИ им. С.И. Вавилова, СПб., 2016), с. 168–180. URL: http://www.ioffe.ru/loeg/index5.html

[5] Sergio Calixto, Nina Ganzherli, Sergey Gulyaev, Susana Figueroa-Gerstenmaier. Molecules, **23** (8), 2064 (2018). DOI: 10.3390/molecules23082064

[6] B.J. Chang, C.D. Leonard. Appl. Opt., **18**, 2407 (1979). DOI: 10.1364/AO.18.002407

[7] B.J. Chang. Opt. Eng., **19** (5), 642 (1980). DOI: 10.1117/12.7972582

[8] Ian M. Barton, Jerald A..Britten, Shamasundar N. Dixit, Leslie J. Summers, Ian M. Thomas, Michael C. Rushford, Katy Lu, A. Roderick, Michael D. Perry. Appl. Opt., **40** (4), 447 (2001). DOI: 10.1364/AO.40.000447

[9] M.L. Hsieh, T.D. Ditto, Y.W. Lee et al. Sci. Rep., **11**, 20764 (2021). DOI: 10.1038/s41598-021-99955-w

[10] Н.К. Павлычева. Оптический журн., **89** (3), 28 (2022). DOI: 10.17586/1023-5086- 2022-89-03-28-41 [N.K. Pavlycheva. J. Optical Technology, **89** (3), 142 (2022). DOI: 10.1364/JOT.89.000142].

[11] Л.М. Восковцова, З.Ю. Давлетшина, Ю.Б. Камардин, Т.П. Плотникова, Д.Н. Карпюк. *Способ защиты голограммных оптических элементов на бихромированном желатине*. Патент РФ № 2076349. МПК G03H 1/00. Заявка 26.08.1994. Публ. 27.03.1997.

[12] Развитие голографии в России. URL: https://dzen.ru/a/ZJQkwJw6eT_RawJF

[13] Л.В. Танин, В.А. Танин. Фотоника, **13** (8), 744 (2019). DOI: 10.22184/1993?7296.FRos.2019.13.8.744.748

[14] Выставка голограмм „Магия света“. URL: https://dzen.ru/a/ZMIpQGnRbGcDyApc

[15] For These Top Artists, Holograms Offer a New Dimension. URL: https://www.nytimes.com/2024/08/20/arts/design/holograms-getty-schreiber-bourgeois-pst-art.html

[16] Художественная голография — искусство будущего. URL: https://hsedesign.ru/project/4d7a9cadbf204a569325f59b9300d97f

[17] S. Ishii. In: *Proc. of 12th International Symposium on Display Holography* (ISDH-2023), (Seoul, Korea) p. 18. URL: https://isdh2023.kr/

[18] A. Muth. In: *Proc. of 10th International Symposium on Display Holography* (ISDH-2015) (Saint-Petersburg, Russia, 2015), p. 86. URL: https://zenodo.org/records/2575762

[19] S. Ishii. In: *Proc. of 10th International Symposium on Display Holography* (ISDH-2015) (Saint-Petersburg, Russia, 2015), p. 68–74. URL: https://zenodo.org/records/2575762

[20] M. Shevtsov. In: *Proc. of 12th International Symposium on Display Holography* (ISDH-2023), (Seoul, Korea, 2023), p. 439. URL: https://isdh2023.kr/

[21] R.K. Curran, T.A. Shankoff. Appl. Opt., **9** (7), 1651 (1970). DOI: 10.1364/AO.9.001651

[22] А.Н. Малов, А.В. Неупокоева. *Голографические регистрирующие среды на основе дихромированного желатина: супрамолекулярный дизайн и динамика записи* (ИВВАИУ(ВИ), Иркутск, 2006).

[23] Е.Н. Денежкин. *Оптическая голография*: Учебное пособие (НГТУ, Новосибирск, 2002).

[24] В.В. Ильина, В.Н. Михайлов, В.В. Барминская, О.О. Абрамова. Актуальные вопросы современной науки, **6**–**1**, 77 (2009).

[25] Ю.Н. Выговский. *Фазовые переходы в пленках дихромированного желатина при записи объемных и красных радужных голограмм*. Автореф. канд. дис. (Иркутск. гос. ун-т., Иркутск, 1997). URL: http://www.dslib.net/kondensat/fazovye-perehody-v-plenkah-dihromirovannogo-zhelatina-pri-zapisi-obemnyh-i.html

[26] С.Б. Шевченко. *Малозадубленные слои бихромированной желатины для голографии*. Автореф. канд. дис. (ГОИ, Л., 1990). URL: https://tekhnosfera.com/malozadublennye-sloi-bihromirovannoy-zhelatiny-dlya-golografii

[27] З.Н. Каляшова, Ю.Е. Кузилин, А.Г. Михайлова. *Способ изготовления голографического материала*. Патент RU2008716C1. МПК G03 H 1/18 Заявка 25.12.1990. Публ. 28.02.1994. URL: https://patents.google.com/patent/RU2008716C1

[28] Р. Кольер, К. Беркхарт, Л. Лин. *Оптическая голография*. Перевод с английского под ред. Ю.И. Островского (Мир, М., 1973).

[29] L.H. Lin. Appl. Opt., **8** (5), 963 (1969). DOI: 10.1364/AO.8.000963

[30] J. Oliva, P.G. Boj, M. Pardo. Appl. Opt., **23** (2), 196 (1984). DOI: 10.1364/AO.23.000196

[31] А.В. Лукин, Н.М. Шигапова. В сб.: *Юрий Николаевич Денисюк — основоположник отечественной голографии* (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, СПбГУ ИТМО, НПК ГОИ им. С.И. Вавилова, Санкт-Петербург, 2016), с. 144–147. URL: http://www.ioffe.ru/loeg/index5.html

[32] Т.А. Лукина. *Высокоэффективные рельефно- и объемно-фазовые голограммные оптические элементы*. Автореф. канд. дис. (НПО ГИПО, Казань, 1999). URL: https://freereferats.ru/product_info.php?products_id=213665

[33] В.С. Образцов, А.Г. Михайлова, В.И. Подоба. Письма в ЖТФ, **30** (10), 6 (2004).

[34] С.П. Воробьев, Л.Н. Горелкина. *Способ получения зеркальных голограмм*. Патент RU 2068195C1. МПК G03 H 1/18. Заявка 27.12.1993. Публ. 20.10.1996. URL: https://patents.google.com/patent/RU2068195C1

[35] Ш.Д. Какичашвили, З.В. Вардосанидзе, Д.В. Леселидзе. Письма в ЖТФ, **14** (7), 602 (1988).
[36] Н.И. Гусарова, Д.С. Лушников, В.В. Маркин, С.Б. Одиноков, В.В. Поздняков. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. „Приборостроение“, (4), 39 (2010).
[37] Н.М. Ганжерли, Ю.Н. Денисюк, И.А Маурер, Д.Ф. Черных. ЖТФ, **75** (2), 135 (2005). [N.M. Ganzherli, Y.N. Denisyuk, I.A. Maurer, D.F. Chernykh. Tech. Phys., **50** (2), 274 (2005). DOI: 10.1134/1.1866449].
[38] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли, И.А. Маурер, Д.Ф. Черных. Известия РАН. Серия физическая, **69** (8), 1147 (2005). [Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli, I.A. Maurer, D.F. Chernykh. Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, **69** (8), 1283 (2005)].
[39] Н.М. Ганжерли, Ю.Н. Денисюк, А.П. Сердобинцева, Д.Ф. Черных. Письма в ЖТФ, **32** (12), 71 (2006). [N.M. Ganzherli, Yu.N. Denisyuk, A.P. Serdobintseva, D.F. Chernykh. Technical Physics Letters, **32** (6), 542 (2006). DOI: 10.1134/S1063785006060289].
[40] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли. ЖТФ, **75** (1), 65 (2005).
[41] Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, И.А. Маурер. Опт. и спектр., **129** (10), 1276–1279 (2021). DOI: 10.21883/OS.2021.10.51493.2283-21 [N.M. Ganzherli, S.N. Gulyaev, I.A. Maurer. Opt. Spectrosc., **130** (13), 2011 (2022). DOI: 10.21883/EOS.2022.13.53982.2283-21].
[42] А.В. Архипов, Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, И.А. Маурер. Оптический журнал, **90** (3), 38 (2023). [A.V. Arkhipov, N.M. Ganzherli, S.N. Gulyaev, I.A. Maurer. J. Opt. Technol., **90** (3), 38 (2023). DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-03-38-47].
[43] С.Н. Гуляев, В.П. Ратушный. Оптический журнал, **70** (2), 45 (2003). [S.N. Gulyaev, V.P. Ratushnyi. J. Opt. Technol., **70** (2), 105 (2003). DOI: 10.1364/JOT.70.000105].
[44] Н.М. Ганжерли, С.Н. Гуляев, И.А. Маурер, Д.Р. Хазвалиева. Опт. и спектр., **124** (3), 400 (2018). DOI: 10.21883/OS.2018.03.45660.246-17 [N.M. Ganzherli, S.N. Gulyaev, I.A. Maurer, D.R. Khazvalieva. Opt. Spectrosc., **124** (3), 408 (2018). DOI: 10.1134/S0030400X18030116].
[45] S. Calixto, V. Piazza, G. Garnica. Gels, **8**, 102 (2022). DOI: 10.3390/gels8020102
[46] E. Afrago, T. Lloret, J.M. Vilardy, M. Bastidas, M. Morales-Vidal, I. Pascual. Polymers, **16** (6), 732 (2024). DOI: 10.3390/polym16060732
[47] F. Lin, E.M. Strzelecki, C. Nguyen, T. Jannson. Optics Lett., **16** (3), 183 (1991). DOI: 10.1364/OL.16.000183
[48] R. Shechter, S. Reinhorn, Y. Amitai, A.A. Friesem. Appl. Surface Sci., **106**, 369 (1996). DOI:10.1016/S0169-4332(96)00434-5
[49] Ю.Н. Денисюк. ДАН СССР, **144** (6), 1275 (1962).
[50] Ю.Н. Денисюк. Опт. и спектр., **15**, 523 (1963).
[51] P.J. Van Heerden. Appl. Opt., **2**, 393 (1963). DOI: 10.1364/AO.2.000393
[52] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли, И.А. Маурер. Письма в ЖТФ, **21** (17), 51 (1995).
[53] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли, И.А. Маурер, С.А. Писаревская. Письма в ЖТФ, **25** (5), 64 (1999).
[54] Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli, S.P. Konop, I.F. Maurer, D.F. Chernykh. Proc. SPIE, **3956**, 326 (2000). DOI: 10.1117/12.380013
[55] S. Calixto, R. Lessard. Appl. Opt., **23** (12), 1989 (1984). DOI: 10.1364/AO.23.001989
[56] V.P. Sherstyuk, A.N. Malov, S.M. Maloletov, V.V. Kalinkin. Proc. SPIE, **1238**, 218 (1991). DOI: 10.1117/12.19417
[57] Yu.N. Vygovskii, S.P. Konop, A.N. Malov, S.N. Malov. Laser Physics, **8** (4), 901 (1998).
[58] S.P. Konop, A.G. Konstantinova, A.N. Malov. In: *Proc. SPIE*, **2969**, 274 (1996). DOI: 10.1117/12.262655
[59] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли, Н.А. Савостьяненко. Опт. и спектр., **81** (4), 670 (1996).
[60] Н.М. Ганжерли, Ю.Н. Денисюк, И.А. Маурер. Письма в ЖТФ, **29** (22), 53 (2003).
[61] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли, И.А. Маурер, С.А. Писаревская. Опт. и спектр., **86** (6), 1023 (1999).
[62] Ю.Н. Денисюк, Н.М. Ганжерли, Д.Ф. Черных. Письма в ЖТФ, **26** (9), 25 (2000). [Yu.N. Denisyuk, N.M. Ganzherli, D.F. Chernykh. Technical Phys. Lett., **26**, 369 (2000)].
[63] Ю.Н. Выговский, Л.Е. Кручинин, А.Н. Малов, С.Н. Малов, А.А. Петров. Компьютерная оптика, **19**, 125 (1999).
[64] C. Solano, R.A. Lessard., P.C. Roberge. Appl. Opt., **24** (8), 1189 (1985). DOI: 10.1364/AO.24.001189
[65] T. Kubota, T. Ose, M. Sasaki, K. Honda. Appl. Opt., **15** (2), 556 (1976). DOI: 10.1364/AO.15.000556
[66] T. Kubota, T. Ose. Appl. Opt., **18** (15), 2538_1-2539 (1979). DOI: 10.1364/AO.18.2538_1
[67] R. Changkakoti, S.S.C. Babu, S.V. Pappu. Appl. Opt., **27** (2), 324 (1988). DOI: 10.1364/AO.27.000324
[68] R. Changkakoti, S.V. Pappu. Appl. Opt., **28**, 340 (1989). DOI: 10.1364/AO.28.000340
[69] J. Blyth. Appl. Opt., **30**, 1589 (1991). DOI: 10.1364/AO.30.001598
[70] J. Blyth, C.R. Lowe, J.F. Pecorab. In: *Proc. International Symposium on Display Holography* (2006). DOI: 10.1016/j.physd.2006.03.003
[71] Y. Ponce de Leon, B. Montano Flores, M. Ortiz-Gutierrez, J.C. Ibarra Torres, M. Perez Cortes. Optik, **242**, 167310 (2021). DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.167310
[72] K. Kurokawa, S. Koike, S. Namba, T. Mizuno, T. Kubota. Appl. Optics, **37** (14) 3038 (1998). DOI: 10.1364/AO.37.003038