

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 778.38.01 : 535

СВОЙСТВА МОНОХРОМНЫХ И ДВУХЦВЕТНЫХ ГОЛОГРАММ
В СЛОИСТЫХ ФОТОПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛАХ*В. В. Шелковников^{1,2}, Е. В. Васильев¹, В. В. Русских¹, Л. В. Эктова¹,
В. Н. Бережная¹, Е. Ф. Пен³¹Новосибирский институт органической химии им. Н. Н. Ворожцова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 9²Томский государственный университет,
634050, г. Томск, просп. Ленина, 36³Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
E-mail: vice@nioch.nsc.ru

Разработаны и исследованы слоистые системы голографических фотополимерных материалов для записи цветных голограмм. Получены монохромные и двухцветные (зелёно-красные, красно-синие, зелёно-синие) объёмные отражательные голограммы с использованием He—Ne-, Ar⁺- и DPSS-лазеров в красной, зелёной и синей областях спектра. Рассмотрены эффекты кроссобесцветивания использованных красителей, а также голографические свойства монохромных и двухцветных голограмм в слоистых системах. Экспериментально показано, что дифракционная эффективность этих голограмм составляет ~ (70–80 %) и сравнима с эффективностью монохромных голограмм, полученных в однослойных голографических фотополимерных материалах.

Ключевые слова: регистрирующие среды, фотополимерные материалы, цветная голография.

DOI: 10.15372/AUT20160413

Введение. Голографические фотополимерные материалы (ГФПМ) успешно используются в изобразительной и защитной голографии, системах хранения данных, голографических сенсорах и дисплеях [1–4]. Обычно ГФПМ — это плёночные системы, состоящие из подложки, одного монохромного или панхроматического светочувствительного фотополимерного слоя и защитной плёнки. Эксперименты показали, что дифракционная эффективность (ДЭ) в монохромных материалах достигает 90 % и более, в то же время в панхроматическом материале ДЭ голограмм каждого из основных цветов (красного, зелёного и синего) значительно ниже, поскольку диапазон фотоиндуцированного изменения показателя преломления такого материала должен быть разделён соответственно на три части [2, 3, 5]. Это главный недостаток однослойных материалов. Кроме того, условия для мультиплексной записи голограмм неравны, потому что каждая предыдущая засветка влияет на последующую запись. С химической точки зрения дизайн однослойных многоцветных ГФПМ очень сложен, так как должна быть гарантирована совместимость всех химических компонент, особенно трудно предотвратить фотохимическое взаимодействие между несколькими красителями и соинициаторами.

*Работа выполнена при поддержке компании "Samsung Electronics" (GRO Agreement # 410/03533903/01195) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-02-00732).

Высокая ДЭ каждого цвета в многоцветной голограмме может быть получена с помощью слоистых систем из нескольких светочувствительных слоёв, разделённых барьерными плёнками. В этом случае процессы фотополимеризации, в том числе изменения показателей преломления, в каждом слое протекают независимо. Слоистые системы, по отношению к которым часто применяется термин «сэндвич-голограмма», имеют разное функциональное назначение в изобразительной голографии, head-up-дисплеях [6], интерферометрии [7], защитных голограммах и голографической памяти. При этом с помощью слоистых систем могут формироваться как отражательные, так и пропускающие голограммы, обладающие индивидуальными спектральными характеристиками и угловой селективностью отдельного слоя.

Использование нескольких светочувствительных слоёв в цветных голографических материалах описано в [5, 8]. Наиболее близкий аналог предлагаемой разработке — это фотополимерная система [5], содержащая два слоя, один из которых чувствителен к излучению в сине-зелёной области спектра, а второй — к излучению в зелёно-красной области спектра. В [5, 8] экспериментально показано, что такая слоистая система обеспечивает более высокую ДЭ каждого из трёх основных цветов, чем однослойная панхроматическая система, однако значения ДЭ не превышают 65 %. Возможно, одна из причин этого обстоятельства — игнорирование эффектов кроссобесцветивания применяемых красителей.

Цель данной публикации состоит в детальном экспериментальном исследовании свойств слоистых фотополимерных материалов, которое включает разработку монохромных и двухцветных композиций, изучение проявлений эффектов кроссобесцветивания использованных красителей при облучении парой лазеров (зелёным и красным, а также синим и красным), создание технологии приготовления слоистых ГФПМ, тестирование этих материалов в режимах последовательной и одновременной засветок и в конечном итоге достижение высоких значений ДЭ для каждой из цветовых компонент многослойных отражательных голограмм.

Химический дизайн и технология приготовления слоистых ГФПМ. Для приготовления слоистых ГФПМ были использованы разработанные нами материалы и технологии [9], а также оригинальная фотополимерная композиция, подробно представленная в [10]. Эта композиция, пригодная для записи как пропускающих, так и отражательных голограмм, чувствительна к излучению во всём видимом диапазоне спектра и содержит следующие основные компоненты: полимерное связующее — поливинилацетат (CAS Number 9003-20-7), синтезированный мономер — N-акрилоилтиоморфолин, сшивающий мономер — 1,4-бисакрилоилпиперазин (CAS Number 6342-17-2), а также системы фотоиницирования. Отметим, что такие мономеры являются активными при фотополимеризации свободнорадикального типа.

Для очувствления ГФПМ к красному (R , $\lambda = 570\text{--}660$ нм), зелёному (G , $\lambda = 510\text{--}580$ нм) и синему (B , $\lambda = 440\text{--}510$ нм) свету применялись три системы фотоиницирования, включавшие различные красители и соинициаторы. Структурные формулы красителей этих соединений приведены на рис. 1, *a—c*. Красная система фотоиницирования содержала краситель-сенсibilизатор Метиленовый Голубой (CAS Number 6586-05-6, см. рис. 1, *a*) и соинициаторы: донор электронов — 5-метил-1,3,4-тиадиазол-2-тиол (CAS Number 29490-19-5) и донор водорода — 1-(4-гидроксифенил)-1H-тетразол-5-тиол (CAS Number 52431-78-4). Зелёная система включала синтезированный краситель-сенсibilизатор Тиоэритрозин триэтиламмониевый (см. рис. 1, *b*) и соинициаторы: донор электронов — 5-метил-1,3,4-тиадиазол-2-тиол (CAS Number 29490-19-5) и акцептор электронов — бис(4-трет-бутилфенил)йодония трифторметансульфонат (CAS Number 84563-54-2). Также в качестве эффективного акцептора электронов использовался синтезированный бис(4-трет-бутилфенил)йодония 4-((диэтилкарбамотиоилтио)метил)бензоат. Синяя система фотоиницирования содержала синтезированный краситель-сенсibilизатор

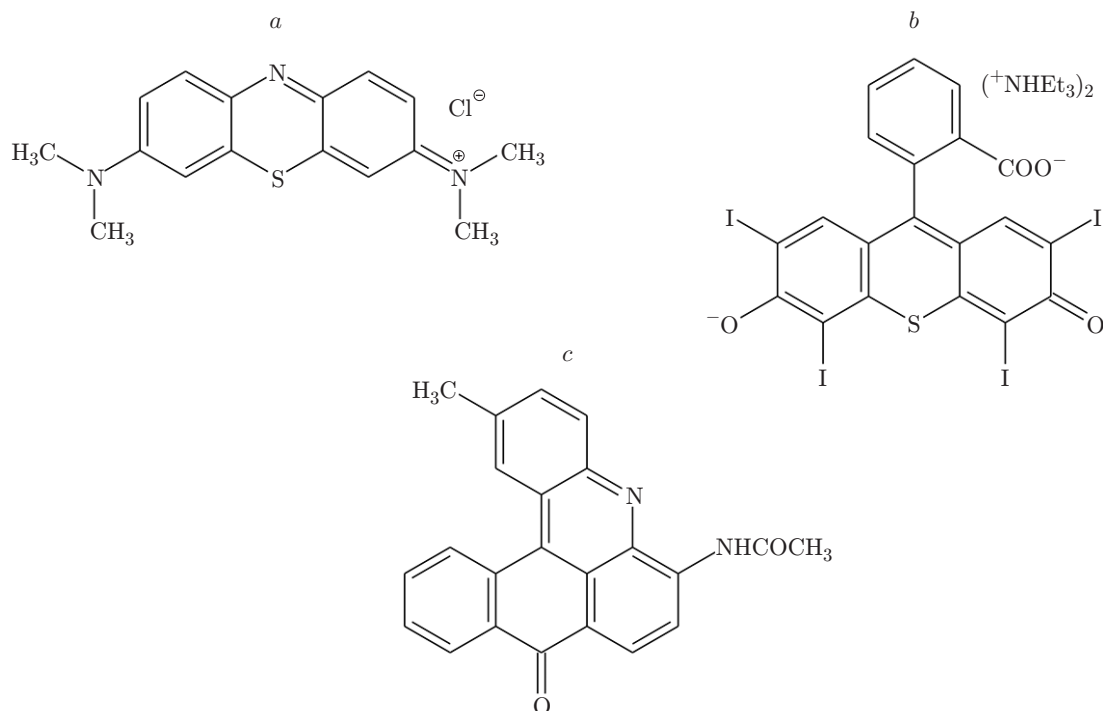


Рис. 1. Структурные формулы красителей ГФПМ: *a* — Метиленовый Голубой, *b* — Тиоэритрозин триэтиламмониевый, *c* — 6-ацетиламино-2-метилкерамидонин

6-ацетиламино-2-метилкерамидонин (см. рис. 1, *c*) и соинициаторы: доноры электронов — 5-метил-1,3,4-тиадиазол-2-тиол (CAS Number 29490-19-5) и трифенилбутилборат тетрабутиламмония (CAS Number 960-71-4).

Экспериментальные образцы приготавливали следующим образом. Твёрдые компоненты композиции последовательно растворяли в смеси хлороформа и ацетона в соотношении от 1 : 1 до 1 : 1,5. Затем добавляли жидкие компоненты композиции и тщательно смешивали, 650 мкл подготовленного раствора наносили на предметное стекло (76 × 26 × 1 мм) с помощью микропипетки. Предметное стекло располагали на отъюстированной горизонтальной поверхности. Полученный образец закрывали чашкой Петри, чтобы достичь оптимальной концентрации паров растворителя над поверхностью фотополимерного слоя. Слой сушили при наличии паров растворителя в течение 18–20 ч при температуре 23–26 °С и влажности 50 %.

Количество нанесённой композиции определяет конечную толщину фотополимерного слоя. В результате высушивания 30–35 мкл/см² фотополимерной композиции, содержащей около 90 % массовой доли растворителя, получается фотополимерный слой толщиной 35–45 мкм. После сушки на фотополимерный слой накатывали защитную полиэтилентерефталатную (ПЭТ) плёнку, которая предотвращает доступ кислорода к фоточувствительному слою, а также служит для защиты ГФПМ от механических повреждений и воздействий окружающей среды. Толщина защитной ПЭТ-плёнки равна 100 мкм.

Основываясь на описанной методике приготовления экспериментальных образцов, с указанным составом композиций были получены однослойные и многослойные ГФПМ, схемы конструкций которых показаны на рис. 2, *a, b*. В качестве промежуточного этапа разработки слоистых систем изготовлены образцы фотополимерных однослойных монохромных *R*-, *G*- и *B*-материалов, чувствительных соответственно к красному, зелёному и синему лазерным излучениям. На рис. 3, *a* представлены спектры пропускания этих ГФПМ.

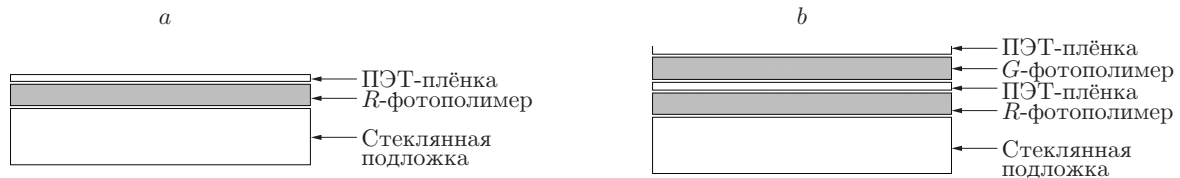


Рис. 2. Схемы конструкций слоистых ГФПМ: *a* — однослойного (*R*), *b* — двухслойного (*RG*) материалов

Концентрации красителей подбирались с учётом рекомендаций [11] таким образом, чтобы пропускание на указанных длинах волн лазерного излучения составляло 35–45 %.

Экспериментальные образцы слоистых, в частности двухслойных двухцветных *RG* ГФПМ, изготавливались следующим образом. Первый монохромный *R*-слой формировался по вышеописанной технологии. Второй монохромный *G*-слой наносился поверх первого аналогично и также закрывался защитной плёнкой.

Спектры пропускания (до экспозиции) разработанных фотополимерных *RG*-, *RB*- и *GB*-материалов представлены на рис. 3, *b–d* соответственно. В случае *RG*- и *RB*-образцов хорошо видны две области преимущественного поглощения света в красно-зелёном и красно-синем диапазонах спектра.

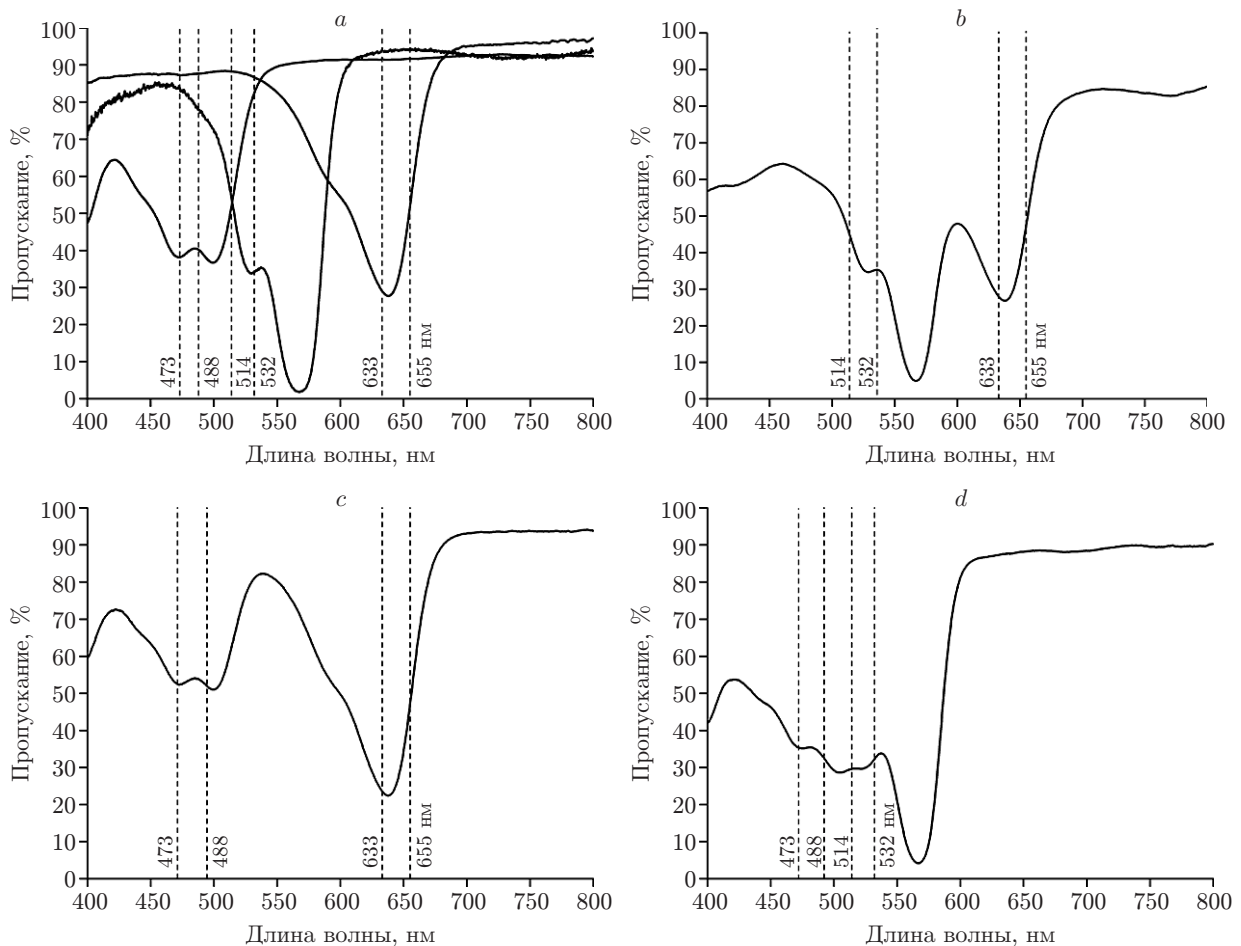


Рис. 3. Спектры пропускания: фотополимерных однослойных *B*-, *G*-, *R*- (*a*), двухслойных *RG*- (*b*), *RB*- (*c*), *GB*- (*d*) материалов

Нами была использована короткая постобработка ГФПМ (одновременно УФ-облучение и нагрев с помощью осветительной галогенной лампы мощностью 500 Вт в течение 1 мин на дистанции 10 см от образца) для обесцвечивания остаточного красителя и увеличения амплитуды модуляции показателя преломления вследствие более полного завершения процесса фотополимеризации при повышенной температуре. Эта процедура значительно быстрее и проще, чем постобработка фотополимеров DuPont, требующая кроме УФ-засветки нагрева при температуре 120 °С в течение 2 часов [2].

Экспериментальная установка записи и тестирования голограмм. Для записи и тестирования двухцветных объёмных отражательных голограмм была изготовлена экспериментальная установка, функциональная оптическая схема которой изображена на рис. 4. В разных вариантах реализации установка содержала: 1 — Ar^+ -лазер (длина волны излучения 514 или 488 нм с интенсивностью 10 мВт/см²) или DPSS-лазер (производство "Beijing Viasho Technology Co., Ltd" (Китай), длина волны излучения 532 или 473 нм с интенсивностью 10 мВт/см²); 2 — фотозатворы; 3 — He—Ne-лазер (длина волны излучения 633 нм с интенсивностью 15 мВт/см²) или красный диодный лазер (фирмы "Sanyo Electric Co., Ltd" (Япония), длина волны излучения 655 нм с интенсивностью 50 мВт/см²); 4 — светоделительный кубик; 5 — зеркала; 6 — образец ГФПМ; 7 — спектроскопическая галогенная лампа для формирования пробного пучка белого света; 8 — спектрофотометры AvaSpec-3048 (фирмы "Avantes" (Голландия)), «Колибри-2» (производство «ВМК Оптоэлектроника» (Россия)); 9 — управляющий компьютер. Мощность лазерного излучения измерялась прибором VEGA с фотоэлектрическим датчиком (производство фирмы OPHIR (Израиль)).

Отношение интенсивностей объектного и опорного пучков составляло 1 : 1,2, при этом объектный пучок падал примерно по нормали к поверхности голограммы, а опорный — с обратной стороны относительно образца с фотополимером. Диаметры голограмм для DPSS-лазера и лазерного диода равнялись 3 мм, а для Ar^+ - и He—Ne-лазеров — около 8 мм.

Тестирование ГФПМ заключалось в измерении ДЭ отражательной голограммы в зависимости от энергии экспозиции. Величина ДЭ оценивалась по степени изменения спектра пропускания в полосе спектрального отклика. Отметим, что установка позволяла проводить измерение ДЭ непосредственно в процессе записи голограмм по методике из [12].

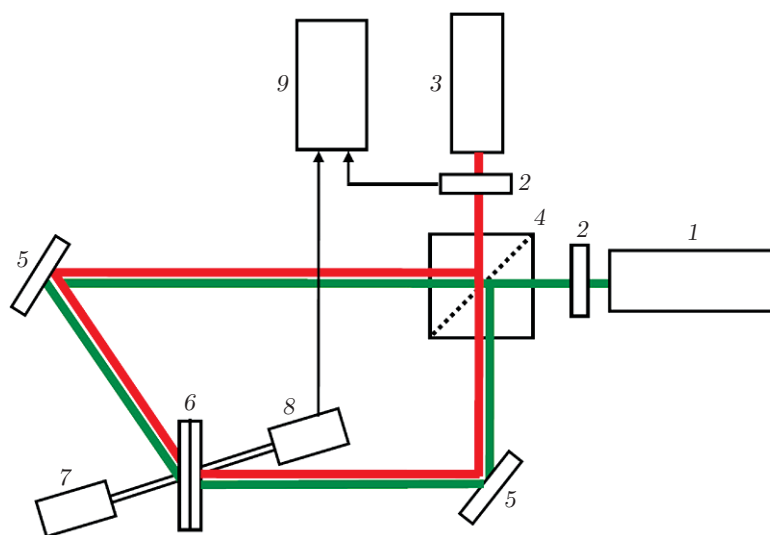


Рис. 4. Функциональная оптическая схема установки для записи и тестирования двухцветных объёмных отражательных голограмм

Цель тестирования — определить максимально достижимую величину ДЭ исследуемых материалов. На практике отражательные голограммы реальных объектов часто записывают по хорошо известной схеме Ю. Н. Денисюка [13], когда локальная ДЭ зависит от характера поверхности объекта. Если поверхность почти зеркальная, то ДЭ близка к максимально возможной (примерно 80 %). В случае диффузной поверхности не только снижается степень отражения, которая определяет соотношение интенсивностей предметной и опорной волн, а следовательно, влияет на ДЭ, но и уширяется угловая диаграмма предметной волны, что приводит к увеличению спектра. Здесь целесообразно использовать интегральную ДЭ как по поверхности голограммы, так и по спектру, что, по мнению авторов [2], лучше передаёт воспринимаемую яркость голограммы.

Результаты экспериментов и их обсуждение. Рассмотрим результаты экспериментов по записи объёмных отражательных голограмм на однослойных и слоистых ГФПМ и сравним их характеристики.

Монохромные однослойные ГФПМ. Вначале были изготовлены отражательные голограммы на фотополимерных однослойных монохромных *R*-, *G*- и *B*-плёнках. Запись и тестирование голограмм проводились на вышеописанной экспериментальной установке. Энергия экспозиции, необходимая для достижения ДЭ ~ 75 %, составляла 30–50 мДж/см² в спектральном диапазоне 400–700 нм. При толщине регистрирующего слоя ГФПМ 35 мкм уровень ДЭ соответствовал амплитуде модуляции показателя преломления $\sim 0,005$.

На рис. 5 представлены типичные спектральные отклики отражательных голограмм, полученных на однослойных монохромных фотополимерных плёнках с помощью Ag^+ - ($\lambda = 488$ или 514 нм) и He—Ne-лазеров ($\lambda = 633$ нм). Видны глубокие провалы в спектрах пропускания, обусловленные не поглощением света, а его отражением, что свидетельствует о высокой ДЭ. Спектральный сдвиг рефлексов голограмм относительно значения длины волны излучения лазера, используемого при записи, объясняется наклонным падением зондирующего пучка света ($\sim 15^\circ$ относительно нормали к поверхности голограммы), а также влиянием усадки толщины голограммы (~ 3 %) вследствие процессов фотополимеризации и термической постобработки голограммы.

Следует пояснить, что повышенный уровень шума в интервале 450–500 нм на рис. 5, *b* не является шумом материала, а обусловлен малой чувствительностью экземпляра спектрофотометра в этой области спектра фотодетекторов.

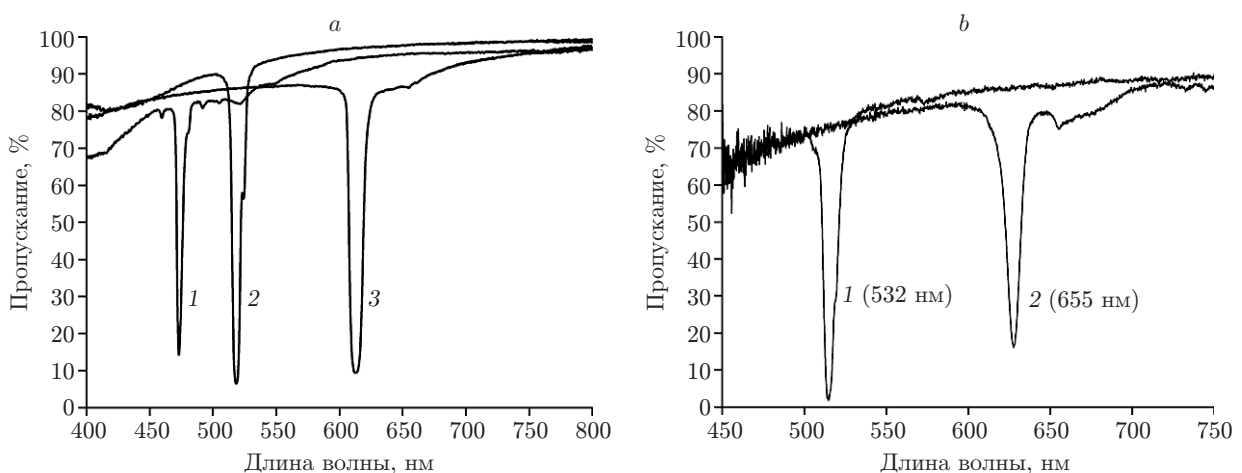


Рис. 5. Вид спектральных откликов отражательных голограмм, полученных на однослойных монохромных ГФПМ: *a* — кривая 1 (*B*), кривая 2 (*G*), кривая 3 (*R*); *b* — кривая 1 (*G*), кривая 2 (*R*)

Двухцветные слоистые ГФПМ. Ранее отмечалось, что эффекты кроссбесцвечивания красителей существенно влияют на результаты записи цветных голограмм. Поэтому данный аспект применительно к красителям был изучен нами детально. С этой целью слоистые ГФПМ облучались парами лазеров: зелёным и синим, зелёным и красным, синим и красным, и одновременно с процессом облучения измерялся спектр пропускания материалов.

С учётом спектров пропускания монохромных *R*-, *G*- и *B*-фотополимеров, графики которых приведены на рис. 3, *a*, кроссбесцвечивание красителей *G&B* было ожидаемым и не вызвало затруднений при выборе режима записи *GB*-голограмм. Однако степень кроссбесцвечивания использованных нами красителей *G&R* и *R&B* была неизвестна и требовала детального исследования.

Результаты экспериментов, представленные на рис. 6, показали, что облучение излучением с длиной волны 532 нм заметно обесцвечивает красный краситель (рис. 6, *a*), в то время как облучение излучением с длиной волны 655 нм лишь незначительно обесцвечивает зелёный краситель (рис. 6, *b*). Кривые 1 и 2 соответствуют моментам времени начала и окончания облучения (спустя 20 с при интенсивности облучения 25 мВт/см²). Это означает, что при записи двухцветных голограмм на данных материалах вначале необходимо осуществлять засветку красным лазером, а затем зелёным, что подтверждается экспериментами. Подобные исследования с *R&B*-фотополимерами не выявили значительного кроссбесцвечивания использованных нами красителей при облучении красным и синим лазерами.

На следующем этапе исследований слоистых ГФПМ были получены монохромные и двухцветные голограммы с вариациями режима их записи:

- 1) вначале записывалась голограмма с помощью красного лазера в левой части слоистого образца ГФПМ, затем с помощью зелёного лазера в правой части этого же образца (неэкспонированной);
- 2) на одном и том же месте слоистого образца ГФПМ вначале записывалась голограмма с помощью красного лазера, а затем с помощью зелёного;
- 3) на одном и том же месте слоистого образца ГФПМ вначале записывалась голограмма с помощью зелёного лазера, а затем с помощью красного;
- 4) на одном и том же месте слоистого образца ГФПМ записывалась двухцветная голограмма путём одновременной засветки красным и зелёным лазерами.

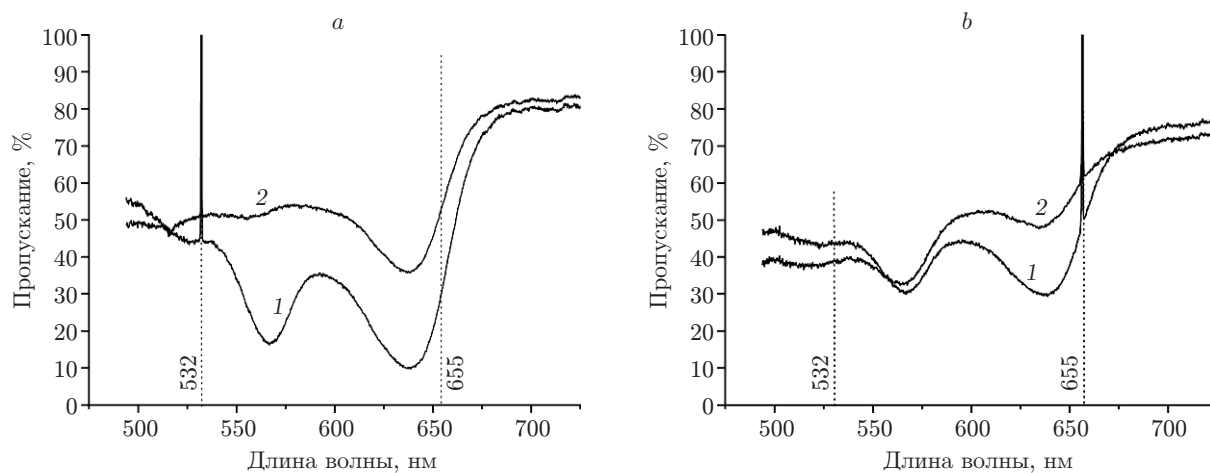


Рис. 6. Вид спектра пропускания слоистого фотополимерного *RG*-материала в результате кроссбесцвечивания: при воздействии излучениями 532 нм (*a*) и 655 нм (*b*)

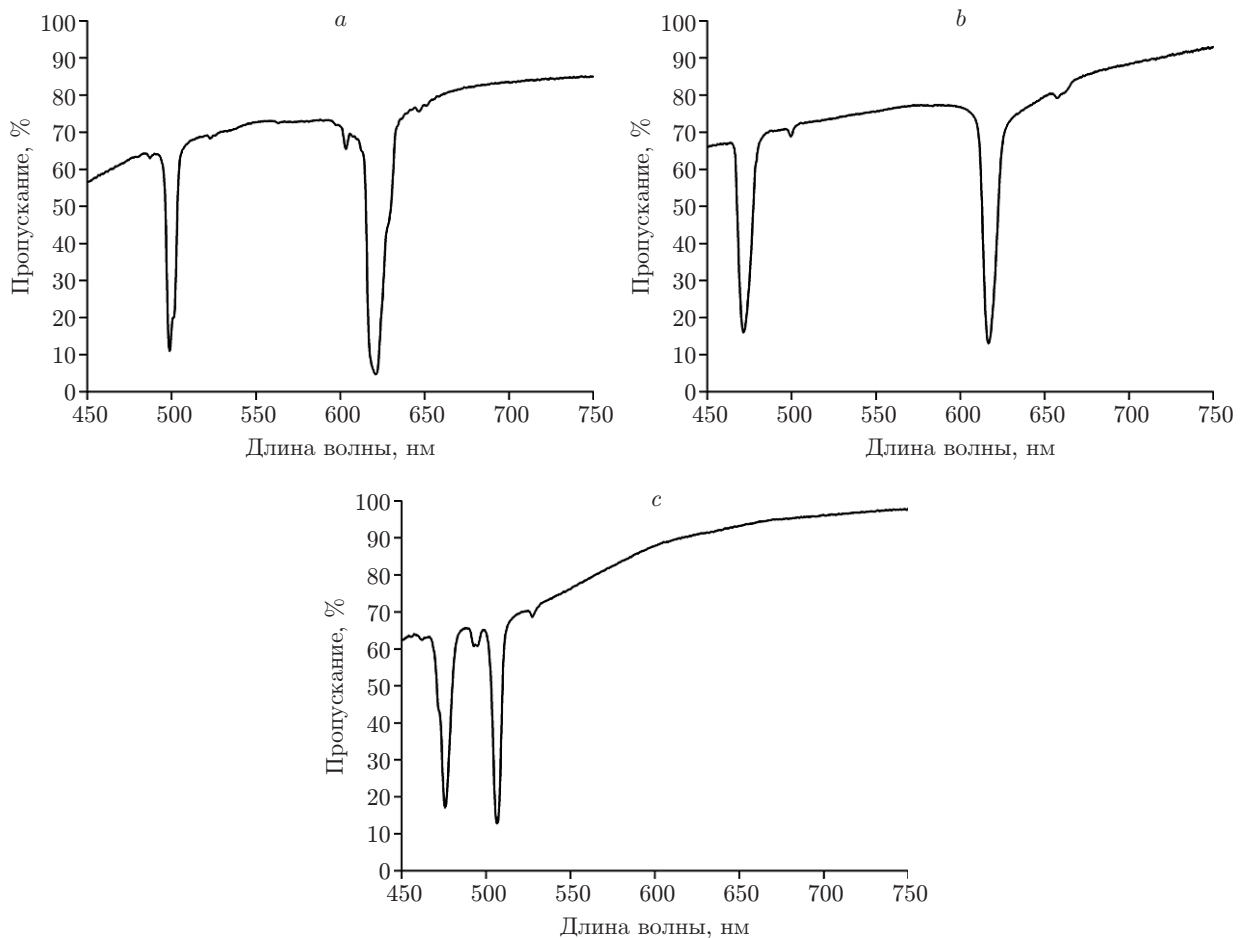


Рис. 7. Вид спектральных откликов двухцветных отражательных голограмм, полученных на слоистых фотополимерных плёнках: *a* — *RG* с помощью Ag^+ -лазера ($\lambda = 514$ нм) и He—Ne-лазера ($\lambda = 633$ нм); *b* — *RB* с помощью Ag^+ -лазера ($\lambda = 488$ нм) и He—Ne-лазера ($\lambda = 633$ нм); *c* — *GB* с помощью Ag^+ -лазера ($\lambda = 514$ и 488 нм)

Для всех перечисленных экспериментов интенсивности и энергии экспозиции были близки к аналогичным параметрам при записи монохромных голограмм в уже упомянутых однослойных фотополимерных *R*-, *G*- и *B*-системах.

После засветки и описанной выше процедуры постобработки все голограммы подвергались измерению спектров пропускания и расчёту ДЭ. Результаты сравнения вариаций 2–4 показали, что наибольшие значения ДЭ как для красной, так и для зелёной голограмм достигнуты в случае 2.

Рис. 7 иллюстрирует спектральные отклики отражательных голограмм, полученных на слоистых фотополимерных *RG*-, *RB*- и *GB*-плёнках.

Следует также отметить, что после УФ-засветки и нагрева в процессе постобработки неэкспонированные области ГФПМ характеризуются заметным остаточным поглощением, особенно в голубой области спектра. По нашему мнению, основной вклад в это поглощение вносят непрореагировавшие комплексы красителей-сенсibilизаторов.

Результаты экспериментов по записи монохромных голограмм на однослойных ГФПМ и двухцветных голограмм на двухслойных материалах показаны на рис. 8. Некоторые искажения восприятия цветов представленных изображений связаны с наличием защитных плёнок (слева видна одна плёнка, справа — две), на которых нанесены номера образцов, а также условиями фотосъёмки.

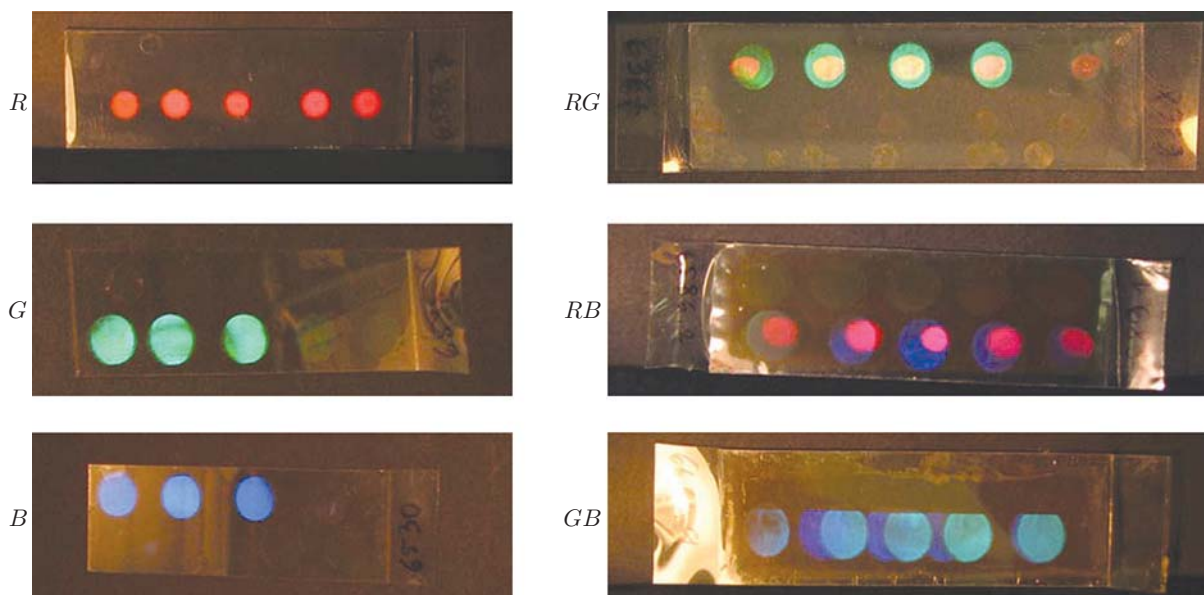


Рис. 8. Фотографии образцов монохромных (R, G, B — левый столбец) и двухцветных (RG, RB, GB — правый столбец) голограмм

Голографические характеристики двухцветных голограмм на слоистых ГФПМ

Тип системы ГФПМ	Тип голограммы	Цвет	Длина волны излучения, нм	Энергия экспозиции, мДж/см ²	ДЭ, %
Однослойная	Монохромная	R	655	60	70
			633	35	85
		G	532	40	85
			514	35	85
		B	488	40	80
			473	25	90
Двухслойная RG	Монохромная	R	655	90	70
			633	60	85
		G	532	40	85
			514	40	85
	Двухцветная	R/G	655/532	90/40	70/75
			633/514	40/40	80/75
Двухслойная RB	Монохромная	R	655	90	90
			633	35	80
		B	488	40	80
			473	25	95
	Двухцветная	R/B	655/473	90/25	90/95
			633/488	35/40	85/75
Двухслойная GB	Монохромная	G	514	40	90
		B	488	35	80
	Двухцветная	G/B	514/488	40/35	80/70

Определение величины дифракционной эффективности объёмных отражательных голограмм осуществлялось спектроскопическим методом [14] по формуле

$$ДЭ = (1 - T_r/T_0) \cdot 100 \%,$$

где T_r — пропускание голограммы на длине волны максимума спектрального отклика, T_0 — остаточное пропускание образца ГФПМ вне участка голограммы. Например, для спектрального отклика зелёной голограммы на рис. 5 имеем $T_r = 8 \%$ и $T_0 = 89 \%$, что даёт $ДЭ = 90 \%$.

В таблице сведены результаты экспериментов на однослойных и двухслойных голографических фотополимерных материалах, включая монохромные и двухцветные голограммы, длины волн лазерного излучения, энергии экспозиций и достигнутые при этом величины $ДЭ$ с погрешностью $\pm 5 \%$.

Результаты экспериментов подтверждают теоретические ожидания того, что для слоистых ГФПМ дифракционные эффективности каждого цвета двухцветных и монохромных голограмм, полученных в однослойных ГФПМ, примерно одинаковы и составляют не менее 70–80 %.

Заключение. В данной работе улучшены голографические характеристики слоистых ГФПМ за счёт применения новых фотополимерных композиций, чувствительных в широком спектральном диапазоне; разработана лабораторная технология приготовления экспериментальных образцов этих материалов; исследованы эффекты кроссобесцвечивания использованных красителей и установлено, что в случае записи двухцветных (красно-зелёных) голограмм сначала следует осуществлять облучение таких ГФПМ красным лазером, а затем зелёным. Экспериментально доказано, что дифракционная эффективность каждого цвета двухцветных голограмм в слоистых ГФПМ и монохромных голограмм, полученных в однослойных ГФПМ, примерно одинакова. Слоистые системы голографических фотополимерных материалов могут найти применение в изобразительной и защитной голографии, head-up дисплеях, голографической памяти.

Авторы выражают благодарность Л. Н. Огневой, В. И. Ковалевскому за обсуждение результатов работы, помощь в приготовлении фотополимерных композиций и образцов ГФПМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jurbergs D., Bruder F.-K., Deuber F. et al. New recording materials for the holographic industry // Proc. SPIE. 2009. **7233**. 72330K.
2. Gambogi W. J., Weber A. M., Trout T. J. Advances and applications of DuPont holographic photopolymers // Proc. SPIE. 1994. **2043**. P. 2–13.
3. Trout T. J., Gambogi W. J., Stevenson S. H. Photopolymer materials for color holography // Proc. SPIE. 1995. **2577**. P. 94–105.
4. **Holography: Basic Principles and Contemporary Applications** /Ed. E. Mihaylova. Rijeka, Croatia: InTech, 2013. 390 p. DOI: 10.5772/46111.
5. Kawabata M., Sato A., Sumiyoshi I., Kubota T. Photopolymer system and its application to a color hologram // Appl. Opt. 1994. **33**, Is. 11. P. 2152–2156.
6. Mukawa H., Akutsu K., Matsumura I. et al. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms // Journ. Soc. Inform. Display. 2009. **17**, Is. 3. P. 185–193.
7. Abramson N. Sandwich hologram interferometry: a new dimension in holographic comparison // Appl. Opt. 1974. **13**, Is. 9. P. 2019–2025.

8. Hirabayashi K., Kanbara H., Mori Y. Multilayer holographic recording using a two-color-absorption photopolymer // Appl. Opt. 2007. **46**, Is. 35. P. 8402–8410.
9. Шелковников В. В., Васильев Е. В., Пен Е. Ф., Твердохлеб П. Е. Развитие голографических фотополимерных материалов и методов их исследований // Сб. тр. Всеросс. семинара «Юрий Николаевич Денисюк — основоположник отечественной голографии». С.-Пб.: ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН, 2007. С. 241–261.
10. Пат. 2552351 РФ. Фотополимерные композиции для записи отражательных голограмм в широком спектральном диапазоне /В. В. Шелковников, Е. Ф. Пен, Е. В. Васильев и др. Опубл. 10.06.2015, Бюл. № 16.
11. Shelkovnikov V. V., Pen E. F., Kovalevsky V. I. Optimal optical density of the absorbing holographic materials // Opt. Mem. Neural Networks. 2007. **16**, N 2. P. 75–83.
12. Pen E. F., Shelkovnikov V. V., Goulanian E. H. et al. Method for research of dynamics of the spectral characteristics of reflection holograms in photopolymer materials // Proc. SPIE. 2002. **4900**. P. 957–961.
13. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Оптика и спектроскопия. 1963. **XV**, вып. 4. С. 522–532.
14. Smothers W. K., Monroe B. M., Weber A. M., Keys D. E. Photopolymers for holography // Proc. SPIE. 1990. **1212**. P. 20–29.

Поступила в редакцию 22 июня 2015 г.
