

УДК 778.38:681.7

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА И ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ МУЛЬТИПЛЕКСНЫХ ГОЛОГРАММ В СИСТЕМАХ АРХИВНОЙ ОПТИКО-ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

© 2009 г. С. Б. Одиноков\*, канд. техн. наук; Н. М. Вереникина\*, канд. техн. наук; В. В. Маркин\*; Д. С. Лушников\*; Е. А. Усович\*; А. С. Гончаров\*; А. С. Кузнецов\*; А. Ю. Павлов\*; А. И. Николаев\*\*; О. В. Андреева\*\*\*, канд. физ.-мат. наук

\* Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

\*\* “Голография-Сервис”, Москва

\*\*\* Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: odinokov@rl2.bmstu.ru

Предложен и исследован метод мультиплексирования микроголограмм, позволяющий повысить скорость записи и считывания информации. Разработана и экспериментально апробирована оптическая система для реализации данного метода. Показана возможность мультиплексирования голограмм при использовании многоканальной записывающей головки и одновременного их считывания при использовании многоканальной считывающей головки. Преимущества и перспективность использования предложенного метода мультиплексирования и разработанной оптической системы для создания систем архивной оптико-голографической памяти заключаются в исключении необходимости механических перемещений элементов системы как при мультиплексировании на стадии записи, так и при восстановлении мультиплексированных голограмм, отсутствии перекрестных помех в пучках, восстановленных с мультиплексированных голограмм, а также в возможности использования для записи относительно тонких регистрирующих сред.

**Ключевые слова:** микроголограмма, мультиплексная голограмма, архивная оптико-голографическая память.

Коды OCIS: 090.4220

Поступила в редакцию 09.02.2009

Все возрастающий объем хранимой информации и прогнозирование достижений теоретических пределов для традиционных технологий хранения информации [1] обуславливает перспективность разработки новых информационных технологий, обеспечивающих более плотную запись информации и высокие скорости записи и считывания информации. В полной мере этим требованиям отвечают системы архивной оптико-голографической памяти (АОГП), основанные на голографических принципах хранения информации. Разработка систем АОГП в настоящее время ведется достаточно интенсивно. Анализ результатов работ в этом направлении показывает, что к настоящему времени опубликовано значительное число работ, в том числе

патентов, посвященных вопросам разработки оптических устройств и голографических регистрирующих материалов для АОГП [2–7].

Основное достоинство применения голографического принципа для систем хранения информации состоит в возможности записи на одном участке регистрирующей среды мультиплексной голограммы в виде большого числа наложенных друг на друга микроголограмм, каждая из которых содержит “страницу” входной информации [1, 2]. Записанная таким образом мультиплексная голограмма обеспечивает селективное оптическое считывание отдельных микроголограмм, поскольку каждой микроголограмме соответствует интерференционная картина, однозначно закодированная соответ-

ствующим опорным пучком, и она с достаточной эффективностью откликается лишь на данный опорный пучок. Однако выполнение этого требования зависит от выбора оптической схемы и характеристик регистрирующей среды. В настоящее время наибольшее внимание уделяется объемным фазовым голограммам, обладающим высокой дифракционной эффективностью (ДЭ) и хорошей селективностью.

Как известно [8], ДЭ ( $\eta$ ) объемной фазовой пропускающей голограммы определяется фазовой модуляцией  $\Delta\varphi$

$$\eta = \sin^2 \Delta\varphi = \sin^2 [(\pi \Delta n T) / (\lambda_0 \cos \theta_0 n_0)], \quad (1)$$

где  $\Delta n$  – фотоиндуцированное изменение показателя преломления регистрирующей среды,  $T$  – толщина среды,  $\lambda_0$  – длина волны излучения лазера, используемого при записи голограммы,  $2\theta_0$  – угол между записываемыми пучками в среде с показателем преломления  $n_0$ .

Селективность определяется допустимыми с точки зрения уменьшения значения ДЭ отклонениями угловым  $\delta\theta$  или спектральным  $\delta\lambda$  от значений параметров  $\theta_0$  и  $\lambda_0$ , при которых значение ДЭ имеет максимальное значение и которые связаны известным соотношением Брэгга

$$2n_0 d \sin \theta_0 = \lambda_0, \quad (2)$$

где  $d$  определяет пространственный период решетки в области записи.

В свою очередь, для случая фазовой пропускающей голограммы значение  $\delta\theta$  может быть представлено соотношением [8]

$$\delta\theta = \frac{\xi}{(2\pi n_0 / \lambda_0) T \sin \theta_0}, \quad (3)$$

в котором  $\xi$  – параметр, выбираемый из приведенных в работе [8] графиков зависимостей относительной дифракционной эффективности  $(\eta/\eta_0)\xi$  ( $\eta$  и  $\eta_0$  – соответственно дифракционные эффективности при отклонении от угла Брэгга на  $\delta\theta$  и при нулевом отклонении от этого угла).

Из выражения (3) с учетом (2) получаем

$$\delta\theta = \frac{\xi d}{\pi T}. \quad (4)$$

При этом из соотношения (2) следует зависимость между  $\delta\theta$  и  $\delta\lambda$

$$\delta\theta = \frac{\delta\lambda}{\lambda_0} \operatorname{tg} \theta_0. \quad (5)$$

Из выражений (1), (4) и (5) видно, что рассмотренные параметры  $\eta$ ,  $\delta\theta$  и  $\delta\lambda$ , определяющие

возможности мультиплицирования в отношении числа одиночных микроголограмм в мультиплексной голограмме, в первую очередь зависят от пространственного периода  $d$  голограммы и от ее толщины  $T$ ; в частности, повышение селективных свойств объемной голограммы, выражающееся в уменьшении значений  $\delta\theta$  и  $\delta\lambda$ , связано с увеличением ее толщины.

Для организации регистрации большого числа наложенных микроголограмм с целью повышения плотности записи за счет селективности голограмм в настоящее время используется целый ряд методов мультиплексирования [9, 10], основными из которых являются: метод углового мультиплексирования, метод сдвигового мультиплексирования, метод мультиплексирования по длине волны, метод фазового мультиплексирования, метод мультиплексирования перистрофик, осуществляемый за счет относительного поворота регистрирующей среды и плоскости, включающей параллельный опорный и предметный пучки.

Разрабатываются системы АОГП, использующие комбинации нескольких из вышеприведенных методов мультиплексирования, например, перистрофического, углового и сдвигового мультиплексирования [6].

Наиболее широко из указанных используется метод углового мультиплексирования. Ряд модификаций систем АОГП, использующих этот метод, представлен в патенте [7]. Запись отдельных микроголограмм в составе мультиплексной голограммы ведется последовательной регистрацией поля интерференции предметного и опорного пучков в одной и той же области толстой регистрирующей среды при постоянном угле наклона сходящегося предметного пучка и различных углах падения на регистрирующую среду параллельного опорного пучка. Запись мультиплексных голограмм в отдельных слоях регистрирующей среды может осуществляться как за счет смещения среды в направлении, перпендикулярном плоскости регистрирующей среды, так и в направлении предметного пучка. При этом указанное смещение сопровождается угловым поворотом регистрирующей среды. В одной из основных модификаций системы этот поворот происходит относительно линии, являющейся линией пересечения регистрирующей среды и плоскости, включающей оси предметного и опорного пучков. В другой модификации поворот среды происходит в плоскости среды относительно точки, являющейся точкой пересечения осей предметного и опорного пучков. Восстановление

отдельных голограмм в составе мультиплексной голограммы осуществляется последовательно пучком, сопряженным опорному пучку, использовавшемуся при записи, при соответствующих пространственных положениях регистрирующей среды. Указанные выше угловые смещения регистрирующей среды на стадии записи обеспечивают на стадии восстановления отсутствие перекрестных помех от соседних мультиплексных голограмм, находящихся в области прохождения восстанавливающего пучка.

Следует отметить следующие недостатки систем, использующих приведенные выше методы мультиплексирования. Реализация этих методов предполагает наличие достаточно большого количества оптических элементов, большая часть из которых должна быть подвижна, что определяет сложность оптико-механических устройств системы в целом. При этом предполагается использование толстых регистрирующих сред для записи мультиплексных голограмм, обладающих угловой и спектральной селективностью, достаточной для раздельного восстановления изображений с отдельных голограмм. Кроме того, восстановление голограмм в составе мультиплексных голограмм осуществляется последовательно, что снижает скорость воспроизведения информации. В России разработка систем АОГП тормозится отсутствием серийно изготавливаемых толстых регистрирующих сред, в первую очередь, фотополимерных материалов [8, 9].

В настоящей статье рассматриваются пути создания АОГП на основе тонкой регистрирующей среды (галогенидосеребряных или фотополимерных материалов) с минимальным числом оптико-механических устройств перемещения и возможностью параллельного считывания информации.

### Разработка метода и оптической системы для мультиплексирования голограмм и их считывания на основе многоканальных оптических головок

Для разработки устройства АОГП с высокой информационной емкостью и высокой скоростью считывания информации предлагается метод мультиплексирования, согласно которому при регистрации микроголограмм обеспечивается перпендикулярное падение опорного пучка на поверхность регистрирующей среды и наклонное падение предметных пучков (с числом пучков, равных числу наложенных микроголограмм)

при их концентрическом положении относительно оси опорного пучка.

На рис. 1 представлена оптическая схема устройства записи мультиплексных голограмм с использованием многоканальной записывающей оптической головки с числом каналов, соответствующим числу микроголограмм в мультиплексной голограмме (до 20-ти), при их концентрическом положении относительно оси опорного пучка. Здесь излучение лазера 1 после прохождения через окно затвора 2 и отражения плоским зеркалом 4 расширяется и фильтруется системой в составе микрообъектива 9 и точечной диафрагмы 10 и затем коллимируется объективом 11. В схеме осуществляется пространственное деление общего коллимированного пучка излучения на опорный и предметные пучки по числу каналов записывающей головки. Для простоты изображения на оптической схеме представлены только два диаметрально противоположных ка-

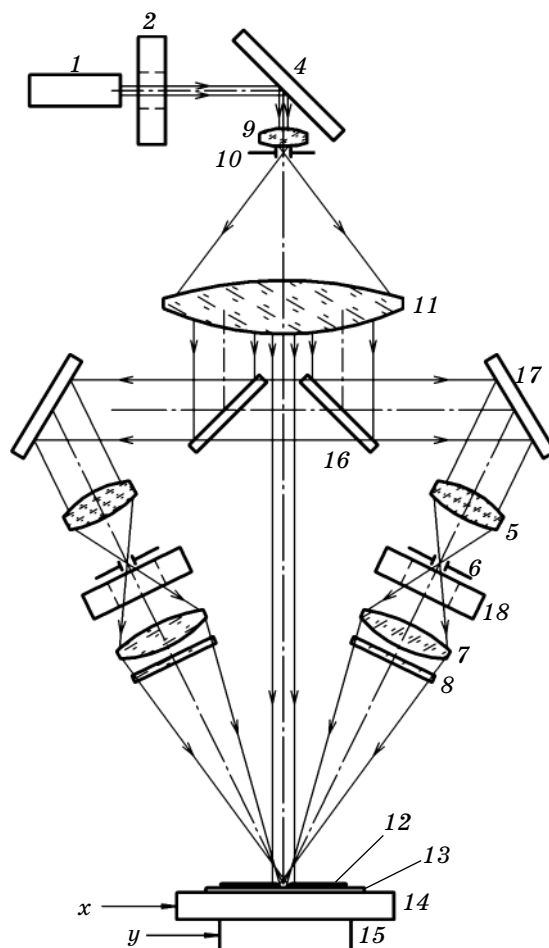


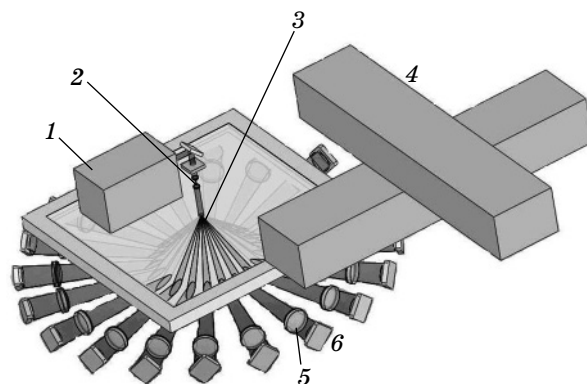
Рис. 1. Устройство записи мультиплексных голограмм в системе архивной оптико-голографической памяти с использованием многоканальной записывающей головки.

нала многоканальной записывающей головки. Центральная часть коллимированного пучка используется в качестве опорного пучка, падающего на фоточувствительную среду перпендикулярно ее поверхности. Периферийная кольцевая часть коллимированного пучка системой зеркал 16 и 17 распределяется по каналам многоканальной записывающей головки, расположенным симметрично относительно оси опорного пучка. В каждом из каналов излучение фильтруется системой в составе объектива 5 и точечной диафрагмы 6 и после прохождения через окно затвора 18 поступает на фурье-преобразующий объектив (ФПО) 7 и пространственно-временной модулятор света (ПВМС) 8. Голографическая запись информации осуществляется путем последовательной регистрации поля интерференции на фоточувствительной пластинке 13 в области пересечения предметных и опорного пучков на площади, ограниченной диафрагмой 12. Электронное управление работой затворов обеспечивает последовательную быструю запись микроголограмм при поочередном открывании затворов 18. Для записи всего массива мультиплексных голограмм осуществляется перемещение регистрирующей фотопластинки в плоскости, совпадающей с ее поверхностью, по координатам  $X$  и  $Y$  с помощью двухкоординатного устройства перемещения в составе частей 14 и 15.

При считывании информации с мультиплексной голограммы, записанной с помощью данного устройства записи, пучки излучения со всех микроголограмм, составляющих мультиплексную голограмму, восстанавливаются одновременно при том, что эти пучки являются пространственно разделенными. Считывание информации осуществляется с помощью многоканальной считывающей оптической головки с числом фотоприемных каналов считывания, равным числу записанных микроголограмм.

На рис. 2 представлено 3D-изображение 20-ти канальной считывающей головки, где 1 – лазер, 2 – оптическая система формирования считывающего пучка, 3 – матрица мультиплексных голограмм, 4 – 2-х координатное устройство перемещения, 5 – оптическая система считывающего канала, 6 – фотоприемное устройство на основе видеокамеры.

Таким образом, построение устройства АОГП по предложенному методу мультиплексирования и использование в устройстве многоканальной оптической головки записи, а при последующем считывании многоканальной считывающей оптической головки при одновременной работе



**Рис. 2.** 3D-изображение конструкции 20-ти канальной оптической считывающей головки АОГП.

каналов на стадии считывания, во-первых, позволяет устранить вращение регистрирующей среды, тем самым упростить систему и уменьшить требования к ее механической стабильности, во-вторых, позволяет реализовать параллельный процесс считывания отдельных микроголограмм, что обеспечивает соответственно более высокие скорости считывания информации.

Реализация этого метода, предполагающего использование многоканальных головок для голографической записи и считывания информации, не является излишне экономически затратной в связи с возможностью изготовления отдельных каналов головок с применением недорогих элементов, как чисто оптических (зеркала, малогабаритные объективы), так и ПВМС и фотоприемных матричных устройств, при отсутствии прецизионных электромеханических узлов вращения и перемещения элементов.

### **Экспериментальное апробирование предложенного метода и оптической системы записи мультиплексных голограмм**

В предложенном методе можно использовать регистрирующие среды с различной толщиной фоточувствительного слоя: от 7–20 мкм до 1 мм, на котором регистрируются как тонкослойные трехмерные голограммы, так и объемные (3D) голограммы. В работе были проведены измерения основных параметров перспективных для АОГП фотополимерных и галогенидосеребряных материалов (ФПМ и ГСМ) (таблица).

Как показали исследования, ФПМ “Диффен” ( $T = 1000–2000$  мкм) [11], в котором реализован принцип диффузного усиления, обладает самой

Основные параметры фоточувствительных материалов для архивной оптико-голографической памяти

| Фоточувствительный материал/изготовитель  | Дифракционная эффективность, % | Чувствительность, Дж/см <sup>2</sup>     | Угловая селективность $\Delta\theta_{0,1}$ , град | Время постэкспозиционной обработки, ч |
|---|--------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| Фотополимерный материал/ИОХ и ИА и Э СО РАН, Новосибирск [12]                           | до 15                          | 20<br>$\lambda = 650$ нм                 | 3,3   | 0,5                                   |
| Фотополимерный материал “Диффен” / Санкт-Петербургский ГУ ИТМО [11]                     | до 80                          | $2 \times 10^{-2}$<br>$\lambda = 480$ нм | 0,5   | 50                                    |
| Пластины с галогенидосеребряным слоем ПФГ-03М / ОАО “Славич”, Переславль-Залесский [13] | до 2-3                         | $2 \times 10^{-4}$<br>$\lambda = 632$ нм | 4   | 0,5                                   |

**Примечание:** численные значения параметров приведены для случая регистрации 20 микроголограмм в одной мультиплексной голограмме;

ДЭ для голограмм на пластинах ПФГ-03М приводится для условий реальной работы на макете оптико-электронного устройства для записи информации (при соотношении плотностей мощностей предметного и опорного пучков в плоскости регистрации 1:5).

высокой ДЭ и угловой селективностью, высокой однородностью и стабильностью интерференционной структуры. Однако по чувствительности он уступает ГСМ.

Недостатком ГСМ являются необходимость “мокрой” фотохимической постобработки и небольшая толщина, хотя по угловой селективности он близок к угловой селективности ФПМ [12]. Однако ГСМ обладают очень высокой чувствительностью (что позволяет значительно снизить время экспонирования и ускорить процесс записи голограмм) и технологичностью, а также демонстрируют значительные сроки хранения голограмм без потери их качества (более 10 лет). Поэтому для записи матрицы мультиплексных голограмм в качестве фоточувствительного материала были использованы серийно выпускаемые ГСМ – голографические фотопластинки ПФГ-03М с толщиной фоточувствительного слоя 7–12 мкм, серийно изготавливаемые на ОАО “Славич” в г. Переславль-Залесский [13].

Предложенный метод мультиплексирования был исследован на макете устройства записи АОГП с использованием гелий-кадмиевого лазера с длиной волны 0,441 мкм и мощностью 150 мВт, электромеханического затвора, обеспечивающего минимальное время экспонирования 1,0 мс, микрообъектива ОМ-27 и точечной диафрагмы диаметром 10 мкм. Расширенный концентрический пучок направлялся плоским зеркалом на ФПО (объектив “Триплет”, 2,8/80) с непосредственно за ним расположенным жидкокристаллическим (ЖК) ПВМС (600×800 элемен-

тов с шагом исходной структуры 14 мкм, диагональ рабочего поля 14 мм, частота смены кадров 60 Гц). Регистрируемая в виде микроголограммы часть интерференционного поля выделялась диафрагмой диаметром 3 мм, расположенной непосредственно на поверхности фоточувствительной пластины.

Количество записываемых микроголограмм на одну мультиплексную голограмму определяется не только угловой селективностью и динамическим диапазоном регистрирующего материала, но также габаритными соображениями, поскольку изображения со всех наложенных голограмм восстанавливаются одновременно и должны быть пространственно разнесены. Экспериментально проверена возможность записи мультиплексных голограмм, каждая из которых содержит 20 микроголограмм. Время ввода цифровой информации на один ЖК-ПВМС 16 мс, а период записи 20 мс. При этом общее время записи информации на мультиплексную голограмму составляет 0,4 с.

Считывание информации с мультиплексной голограммы осуществляется пучком, идентичным опорному пучку, использовавшемуся при записи микроголограмм. Восстанавливаются пространственно разделенные пучки, тождественные предметным пучкам, а оси восстановленных пучков равномерно распределяются на конической поверхности с углом при вершине 90°. Несмотря на небольшую толщину чувствительного слоя галогенида серебра ( $T = 7-12$  мкм), осуществляется брэгговская селекция 1-го порядка, что позволяет

избежать наложения разных порядков дифракции и уменьшает перекрестные помехи.

На макете АОГП были записаны мультиплексные голограммы вплотную друг к другу в виде ортогональной матрицы с шагом 3 мм. Предельная размерность матрицы, которая была записана на фоточувствительную пластину размером  $127 \times 127 \text{ мм}^2$ , –  $40 \times 40$  мультиплексных голограмм. В дальнейшем размер мультиплексной голограммы может быть существенно уменьшен, а число наложенных микроголограмм увеличено посредством совершенствования оптической системы устройства.

На рис. 3а приведена структура информационной страницы, выводимой на ЖК-ПВМС при записи микроголограммы. Структура представляет собой “шахматное поле”. Каждая клетка шахматного поля соответствует одному биту информации (включая кодирование информации) и представлена участком ЖК-ПВМС  $4 \times 4$  пиксела, что позволяет уверенно производить запись и считывание информационной страницы емкостью  $200 \times 150$  бит. На рис. 3б приведена фотография фрагмента, восстановленного с микроголограммы и спроецированного на поверхность матричного фотоприемника. В качестве фотоприемного устройства в системе считывания был использован матричный приемник на КМОП матрице типа MT9T001P12STC (производства *Micron Technology Inc.*) с числом пикселей  $1600 \times 1200$ , быстродействием до 20 кадров/с (время считывания одной страницы 50 мс), размером пиксела  $3,0 \times 3,2 \text{ мкм}$ , размером активной области  $6,55 \times 4,92 \text{ мм}$ .

Таким образом, в ходе экспериментов по записи матрицы голограмм были получены следующие параметры матрицы мультиплексных голограмм: число мультиплексных голо-

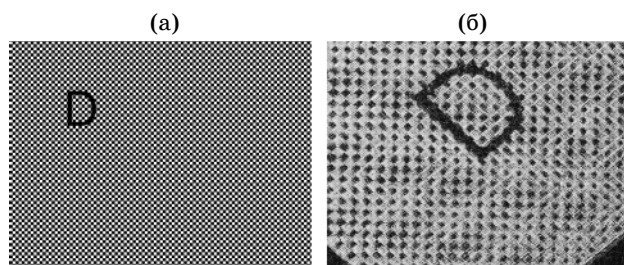
грамм в матрице – до  $40 \times 40$  шт., диаметр одной мультиплексной голограммы 2,5–3 мм, число наложенных микроголограмм на одну фоточувствительную площадку – от 10 до 20 шт., общее количество микроголограмм – до 32000 шт., информационная емкость матрицы мультиплексных голограмм (при размере пластинки  $127 \times 127 \text{ мм}$ ) – до 150 Мбайт.

## Заключение

В ходе проведенных исследований в области разработки устройств АОГП был предложен метод мультиплексирования, который позволяет обеспечить достаточно высокую скорость считывания информации, а также исключить вращательное движение элементов устройства, уменьшив тем самым требования к стабильности системы, и упростить конструкцию устройства АОГП.

Экспериментальные исследования применения данного метода в разработанной оптической системе показали возможность последовательной записи 20 наложенных микроголограмм путем последовательного электронного переключения каналов ЖК-ПВМС в записывающей головке и одновременного воспроизведения их без перекрестных искажений, что позволило записать матрицу мультиплексных микроголограмм на пластинке размером  $127 \times 127 \text{ мм}$  информационной емкостью 150 Мбайт.

Предложенный метод обеспечивает возможность использования относительно тонких регистрирующих сред, как например, серийно выпускаемых отечественной промышленностью галогенидосеребряных материалов. В пределах принципиально возможна запись фазово-рельефных мультиплексных голограмм на подходящих регистрирующих средах, например, на фоторезистивных материалах. Это дает возможность тиражирования записанной рассмотренным методом информации известными способами копирования поверхностного рельефа.



**Рис. 3.** Фотографии структуры входной страницы информации, подаваемой на ПВМС (а), и фрагмента выходной страницы информации на фотоприемнике (б).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Holographic Data Storage / Ed. by Coufal H.J., Psaltis D., Sincerbox G.T. Berlin: Springer, 2000. 486 p.
2. Orlov S.S., Phillips W., Bjornson E., Takashima Y., Sundaram P., Hesselink L., Okas R., Kwan D., Snyder R. High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system // Appl. Opt. 2004. V. 43. № 25. P. 4902–4914.

3. *Waldman D.A., Li H.-Y.S., Horner M.G.* Volume shrinkage in slant fringe gratings of cationic ring-opening volume hologram recording material // *J. Imaging Sci. Technol.* 1997. V. 41. № 5. P. 497–514.
4. *Wu S.-D., Glytsis E.N.* Characteristics of DuPont photopolymers for slanted holographic grating formations // *JOSA. B.* 2004. V. 21. № 10. P. 1722–1731.
5. *Dhar L., Hale A., Katz H.E., Schilling M.L., Schnoes M.G., Schilling F.C.* Recording media that exhibit high dynamic range for digital holographic data storage // *Opt. Lett.* 1999. V. 24. № 7. P. 487–489.
6. *Ju-Seong Jang, Dong-Hak Shin, Youn-Sup Park.* Holographic data storage by combined use of peristrophic, angular, and spatial multiplexing // *Opt. Eng.* 2000. V. 39. № 11. P. 2975–2981.
7. *Okada K., Nagasaka Y.* Multiplexing hologram recording and reconstructing apparatus and method therefore // Patent US № 20080239427. 2008.
8. *Kogelnik H.* Coupled Wave for Thick Gratings // *System Technical Journal.* 1969. V. 48. № 9. P. 2909–2947.
9. *Barbastathis G., Psaltis D.* Volume holographic multiplex methods // *Holographic Data Storage/* Ed. by *Coufal H.J., Psaltis D., Sincerbox G.T.* Berlin: Springer, 2000. P. 21–63.
10. *Fernandez E., Garcia C., Pascual I., Ortuno M., Gallego S., Belendez A.* Optimization of a thick polyvinyl alcohol-acrylamide photopolymer for data storage using a combination of angular and peristrophic holographic multiplexing // *Appl. Opt.* 2006. V. 45. № 29. P. 7661–7666.
11. *Андреева О.В., Бандюк О.В., Парамонов А.А., Кушнаренко А.П., Лесничий В.В., Начаров А.П., Андреева Н.В.* Высокоэффективные мультиплексные голограммы на полимерном материале “Диффен” // *Оптический журнал.* 2006. Т. 73. № 9. С. 60–63.
12. *Пен Е.Ф., Родионов М.Ю., Шелковников В.В.* Влияние неоднородности объемных голограмм в фотополимерных материалах на их селективные свойства // *Оптический журнал.* 2006. Т. 73. № 7. С. 60–64.
13. <http://www.slavich.ru>