

## Разработка и исследование метода и оптической системы получения мультиплексных голограмм в системах архивной оптико-голографической памяти

**77-30569/280962**

# 11, ноябрь 2011

Одиноков С. Б., Вереникина Н. М., Кузнецов А. С., Маркин В. В.,  
Лушников Д. С., Павлов А. Ю., Соломашенко А. Б.

УДК 778.38:681.7

МГТУ им. Н.Э. Баумана

[r12@bmstu.ru](mailto:r12@bmstu.ru)

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 соответствующим 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  $\Delta\varphi$

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

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 записывающими 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

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

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]

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

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

Из (3) с учетом (2) получаем

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

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

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

Из (1), (4) и (5) видно, что рассмотренные параметры  $\eta$ ,  $\delta\theta$  и  $\delta\lambda$ , определяющие возможности мультилиплицирования 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, выражющееся 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 выше-приведенных методов мультиплексирования, например, *перистроического, углового и сдвигового мультиплексирования* [6].

Наиболее широко из указанных методов 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 линией 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 рисунке 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 (рисунок 1) представлены только два диаметрально противоположных канала 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, расположенных 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 пластины фотопластинки в плоскости, совпадающей с ее поверхностью, по координатам X и Y с помощью двухкоординатного устройства перемещения в составе частей 14 и 15.

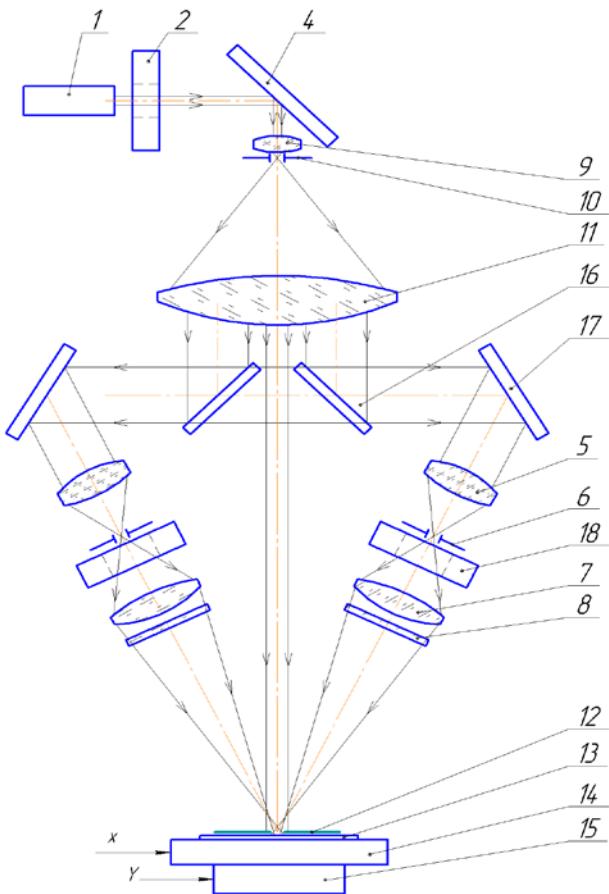


Рисунок 1 - Устройство записи мультиплексных голограмм в системе архивной оптико-голографической памяти с использованием многоканальной записывающей головки

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 считающей оптической головки с числом фотоприемных каналов считывания, равным числу записанных микроголограмм.

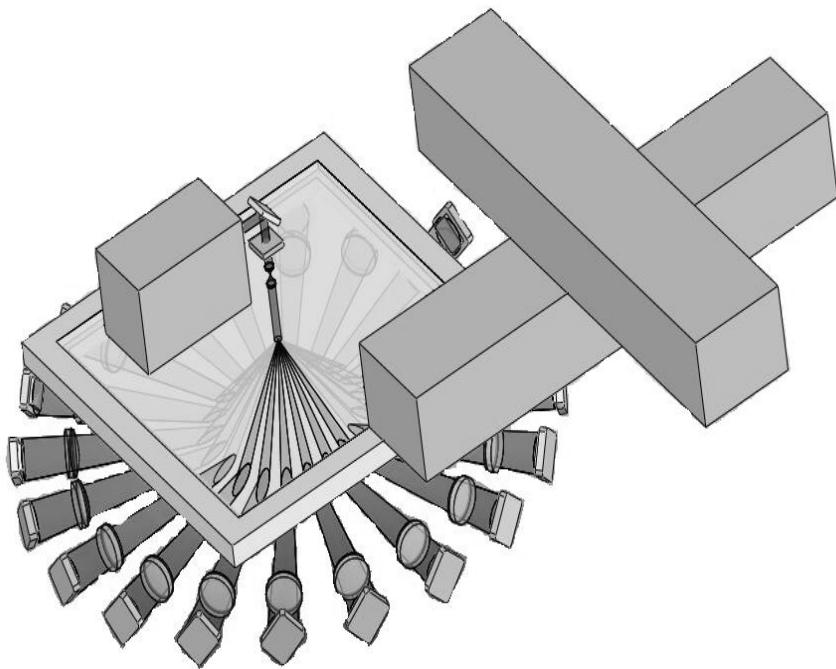


Рисунок 2 – 3D-изображение конструкции 20-ти канальной оптической считающей головки АОГП

На рисунке 2 представлено 3D-изображение 20-ти канальной считающей головки, где 1 – лазер, 2 – оптическая система формирования считающего пучка, 3 – матрица мультиплексных голограмм, 4 – 2-х координатное устройство перемещения, 5 – оптическая система считающего 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 считающей оптической головкой при одновременной работе каналов на стадии считывания, во-первых, позволяет устраниить 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), представленных в таблице 1.

Таблица 1

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

Как показали исследования, ФПМ «Дифfen» ( $T \sim 1000$ -2000 мкм) [11], в котором реализован принцип диффузного усиления, обладает самой 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.

Предложенный метод мультиплексирования был исследован на макете устройства записи АОГП с использованием гелий-кадмievого лазера с длиной волны 0,441 мкм и мощностью 150 мВт, электро-механического 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 (600x800 элементов 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 ( $T \sim 7\text{-}12$  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  $127 \times 127$  мм<sup>2</sup>, - 40×40 мультиплексных голограмм. В дальнейшем размер мультиплексной голограммы может быть существенно уменьшен, а число наложенных микроголограмм – увеличено посредством совершенствования оптической системы устройства.

На рисунке 3 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 4×4 пикселя, что позволяет уверенно производить запись и считывание информационной страницы емкостью 200×150 бит.

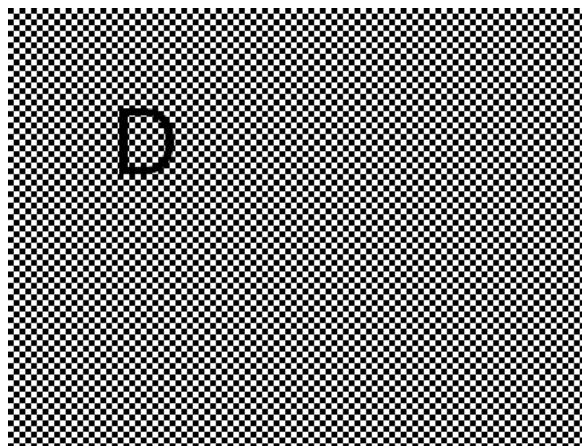


Рисунок 3 – Фотография структуры входной страницы информации, подаваемой на ПВМС

Таким образом, в ходе экспериментов по записи матрицы голограмм были получены следующие параметры матрицы мультиплексных голограмм: число мультиплексных голограмм в матрице – до 40×40 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 пластиинки 127×127 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 размере 127x127 мм информационной емкостью 150 Мбайт.

Предложенный метод обеспечивает возможность использования относительно тонких регистрирующих сред, как, например, серийно выпускаемых отечественной промышленностью галогенидосеребряных материалов. В пределе 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 поверхности рельефа.

## **Благодарности**

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках государственного контракта от 28.04.2011 № 16.513.12.3006 ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007-2013 годы".

## **Литература**

1. Coufal H.J., Psaltis D., Sincerbox G.T. (eds.), *Holographic Data Storage*, 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, Iss. 25, P. 4902-4914.
3. Waldman D.A., Li H.-Y.S., Horner M.G.. Volume shrinkage in slant fringe gratings of a cationic ring-opening holographic recording material// J. Imaging Sci. Technol., 1997, V. 41, <http://www.technomag.edu.ru/doc/280962.html>

No. 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 // Optical Engineering, 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., and 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» // Оptический 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 // Оptический журнал, 2006. Т. 73, № 7. С. 60-64.

---

**The development and research of method and optical system  
for creating multiplex holograms in the systems  
of archival optical-holographic memory**

**77-30569/280962**

# 11, November 2011

**Odinokov S.B., Verenikina N.M., Кузнецов А. С., Markin V.V., Lushnikov D.S.,  
Pavlov A.Yu., Solomashenko A.B.**

Bauman Moscow State Technical University

[r12@bmstu.ru](mailto:r12@bmstu.ru)

Micro-hologram multiplexing method was proposed and researched; it allowed to increase data writing and reading speed. This method was implemented in the developed and tested system. The ability to multiplex holograms, with the usage of multichannel write head, and simultaneous reading of those holograms with the usage of multichannel read head, was shown. The advantages and the perspective of this method and developed optical system usage for creating multiplex holograms in the systems of archival optical-holographic memory are listed below. The first is the elimination of need for mechanical motion of system elements both when multiplexing on the stage of writing and when restoring of multiplex holograms. The second is the absence of crisscross interference in the beams, restored from multiplex holograms. And last, but not least, it is the ability to use relatively thin recording environment for the writing.

---

Publications with keywords: [hologram](#), [multiplexing](#), [holographic memory](#)

Publications with words: [hologram](#), [multiplexing](#), [holographic memory](#)

---

Reference

1. Coufal H.J., Psaltis D., Sincerbox G.T. (eds.), *Holographic Data Storage*, 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. 43 (25) (2004) 4902-4914.
3. Waldman D.A., Li H.-Y.S., Horner M.G., Volume shrinkage in slant fringe gratings of a cationic ring-opening holographic recording material, J. Imaging Sci. Technol. 41 (5) (1997) 497-514.

4. Wu S.-D., Glytsis E.N., Characteristics of DuPont photopolymers for slanted holographic grating formations, JOSA. B. 21 (10) (2004) 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. 24 (7) (1999) 487-489.
6. Ju-Seong Jang, Dong-Hak Shin, Youn-Sup Park., Holographic data storage by combined use of peristrophic, angular, and spatial multiplexing, Optical Engineering 39 (11) (2000) 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 48 (9) (1969) 2909-2947.
9. Barbastathis G., Psaltis D., Volume holographic multiplex methods, in: Coufal H.J., Psaltis D., Sincerbox G.T. (Ed.), Holographic Data Storage, Berlin, Springer, 2000, pp. 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. 45 (29) (2006) 7661 – 7666.
11. Andreeva O.V., Bandiuk O.V., Paramonov A.A., Kushnarenko A.P., Lesnichii V.V., Na- charov A.P., Andreeva N.V., Opticheskii zhurnal 73 (9) (2006) 60-63.
12. Pen E.F., Rodionov M.Iu., Shelkovnikov V.V., Opticheskii zhurnal 73 (7) (2006) 60-64.