

А. Ю. Бетин, В. И. Бобринев, А. Ю. Жердев,
С. Б. Одинокоев, Е. Ю. Злоказов,
Р. С. Стариков

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ МИКРОГОЛОГРАММ ФУРЬЕ

Предложен новый метод записи микроголограмм для систем голографической памяти, основанный на компьютерном кодировании страницы бинарных данных в виде синтезированной голограммы Фурье. Численно рассчитанные голограммы вводятся в проекционную оптическую систему с помощью пространственно-временного модулятора света. Приведены результаты математического моделирования и экспериментальной реализации метода.

E-mail: odinokov@bmstu.ru

Ключевые слова: хранение данных, голографическая память, микроголограмма.

Введение. Разработка методов компактного и долгосрочного хранения данных является важной проблемой современных информационных технологий. Применение голографических методов записи и восстановления волновых фронтов света для задач хранения данных позволяет достичь высокой информационной плотности [1]. Последние достижения в области голографической памяти показали возможность записи до 500 Гб данных на носитель размером с обычный DVD-диск [2]. Известные системы голографической памяти используют двухлучевые схемы формирования микроголограмм [3, 4]. Высокая плотность информации достигается за счет мультиплексирования. В данной работе представлен метод записи микроголограмм на носитель с использованием проекционной схемы. При этом голограммы синтезируются на компьютере и вводятся в оптическую схему с помощью пространственно-временного модулятора света (ПВМС).

Компьютерный синтез микроголограмм. В системах голографической памяти стандартным объектом для записи является бинарное изображение страницы данных, закодированных по стандарту ЕСМА-377. На рис. 1 представлен пример такого изображения.

Для компьютерного синтеза микроголограмм выбран метод расчета амплитудных голограмм Фурье. Компьютерно-синтезированные голограммы Фурье более всего соответствуют требованиям поставленной задачи благодаря возможности пространственного разделения нулевого и ± 1 -го порядков при их восстановлении.

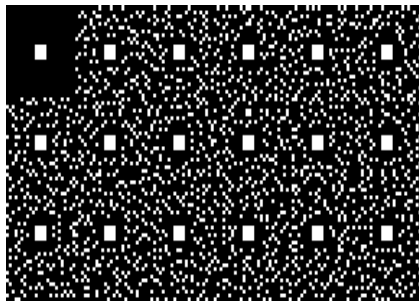


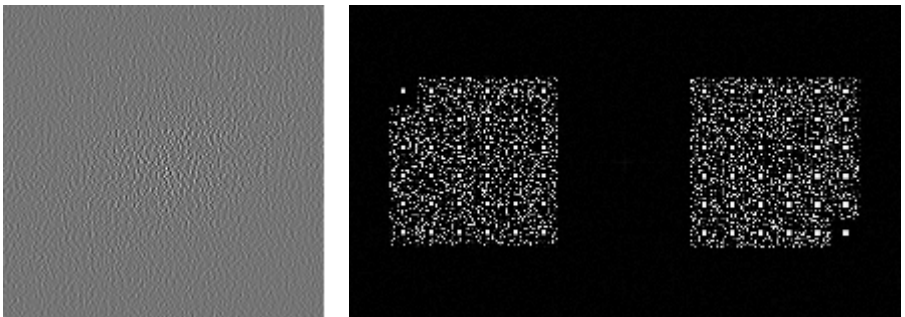
Рис. 1. Пример представления данных по стандарту ЕСМА-377

При расчете голограммы Фурье опорный и предметный лучи формируются путем использования в предметной плоскости (X^{ob} , Y^{ob}) изображения, состоящего из δ -функции в центре (опорный луч) и записываемого объекта h , смещенного относительно центра на величину Δ вдоль оси X (предметный луч). Голограмма H синтезируется в плоскости Фурье (X^f , Y^f):

$$H(x_f, y_f) = C + \text{Re}[F\{h(x - \Delta, y) + \delta(x, y)\}],$$

где C — матрица постоянных величин, выбор которой происходит в соответствии с условием $H \geq 0$; символ F обозначает преобразование Фурье.

Расчеты восстановленного поля с синтезированными голограммами показали, что их дифракционная эффективность (ДЭ) не превышает 0,1 %. Для увеличения ДЭ к кодируемым объектам добавлялась псевдослучайная фазовая маска. На рис. 2, *а* представлена голограмма, синтезированная в соответствии с приведенной выше формулой для страницы данных с добавленной фазовой маской, на рис. 2, *б* — восстановленное поле голограммы с подавленным нулевым порядком. Расчеты показали, что при использовании фазовой маски ДЭ голограммы может возрасти до 3 %.



а

б

Рис. 2. Синтезированная голограмма размерностью 1024×768 пикселей для объекта с добавленной фазовой маской (*а*) и ее численно восстановленное выходное поле (*б*)

Реализация компьютерно-синтезированных голограмм. Для ввода синтезированной голограммы в оптическую схему использован пространственно-временной модулятор света на основе жидкокристаллической матрицы Sony LCX-017. Размер пиксела модулятора 32 мкм, размерность модулятора 1024×768 пиксела, динамический диапазон модуляции пропускания на линейном участке характеристики порядка 100 уровней. На рис. 3 приведен снимок страницы данных, восстановленной с голограммы на экспериментальном макете каскада Фурье.

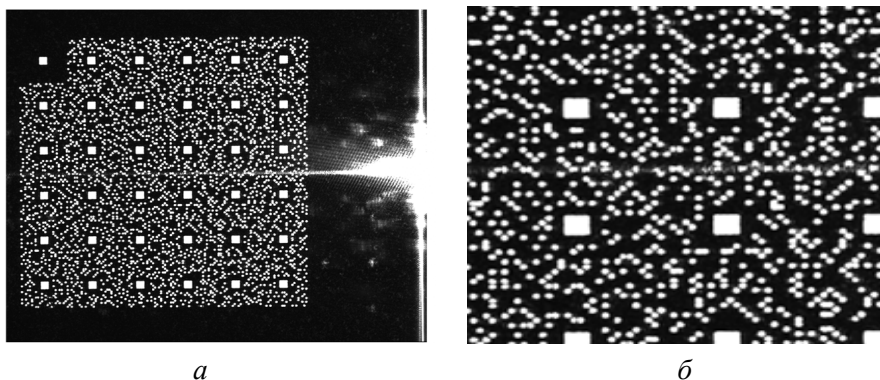


Рис. 3. Восстановленное изображение страницы данных (а) и его увеличенный фрагмент (б) при реализации голограммы с использованием ПВМС

Видно, что, несмотря на заметные искажения формы реперных точек и информационных битов, качество восстановленного изображения страницы данных позволяет осуществлять их считывание матричным фотодетектором с высокой точностью.

Запись микроголограмм на голографический носитель. Для записи компьютерно-синтезированных микроголограмм на носитель собран экспериментальный макет проекционной схемы записи. Эксперименты проводились как для когерентного, так и для некогерентного света. На рис. 4 приведена принципиальная схема проекционной установки с использованием в качестве когерентного источника излучения полупроводникового лазера 1 с длиной волны $\lambda = 0,638$ мкм.

Для формирования светового пучка достаточной ширины свет от лазера попадает в телескопическую систему, состоящую из микрообъектива 2 и длиннофокусного объектива 3 . Увеличение телескопической системы определяется из условия необходимой равномерной засветки апертуры жидкокристаллического (ЖК) модулятора 4 . Вывод синтезированных голограмм и управление ЖК-модулятором осуществляется с персонального компьютера (ПК) 5 . Проекция апертуры ЖК-модулятора на голографический носитель 11 осуществля-

ется объективом Фурье 6 с фокусным расстоянием $F = 500$ мм, объективом 9 ($F = 250$ мм) и микрообъективом 10 ($F = 10$ мм). Анализатор 7 используется для подавления нулевого порядка в восстановленном с голограммы поле. Диафрагма 8 , расположенная в фокальной плоскости объектива 6 , осуществляет пространственную фильтрацию спектра структуры ПВМС и восстановленного поля голограммы.

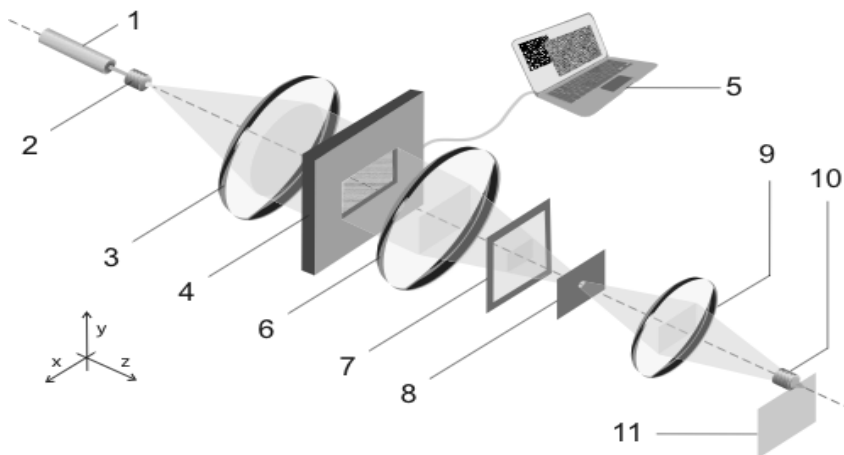


Рис. 4. Принципиальная оптическая схема когерентной проекции:

1 — лазер; 2 — микрообъектив; 3 — объектив; 4 — ПВМС; 5 — ПК; 6 — объектив Фурье; 7 — анализатор; 8 — диафрагма; 9 — объектив; 10 — микрообъектив; 11 — голографическая пластинка

Для проведения экспериментов в некогерентном свете применяли модифицированную схему. В качестве источника излучения использовали светодиод с длиной волны $\lambda = 0,61$ мкм. Микрообъектив 2 (см. рис. 4) заменен на двухлинзовый конденсор. Перед ЖК-модулятором был установлен поляризатор, плоскость поляризации которого перпендикулярна плоскости поляризации анализатора.

При уменьшении апертуры ПВМС в 20 раз размер микроголограммы составлял $2 \times 1,5$ мм, частота линий — 200 лин./мм. Запись микроголограмм осуществляли на высокоразрешающие фотографические пластинки ПФГ-01 и ПФГ-03.

На рис. 5 представлены результаты экспериментов по восстановлению микроголограмм, записанных с использованием разных фотографических эмульсий (ПФГ-01 и ПФГ-03) в когерентной и некогерентной проекционных схемах.

Максимальная ДЭ записываемых голограмм, полученная при проведении экспериментов, составила примерно 10 %. На рис. 5, a , b видно, что на восстановленном изображении с микроголограммы, записанной на эмульсии ПФГ-01, реперные точки имеют более чет-

кие границы, контраст восстановленного изображения выше, уровень шума существенно ниже по сравнению с изображением, восстановленным с микроголограммы, записанной на эмульсии ПФГ-03. Такое различие объясняется тем, что рассчитанная голограмма представляет собой структуру с незначительным перепадом градации серого от одного элемента (пиксела) изображения к другому. Поэтому для записи такой структуры лучше подходит эмульсия с большей концентрацией галогенидов серебра. Концентрация серебра в эмульсии ПФГ-03 $1,7 \text{ г/м}^2$, в эмульсии ПФГ-01 — 3 г/м^2 .

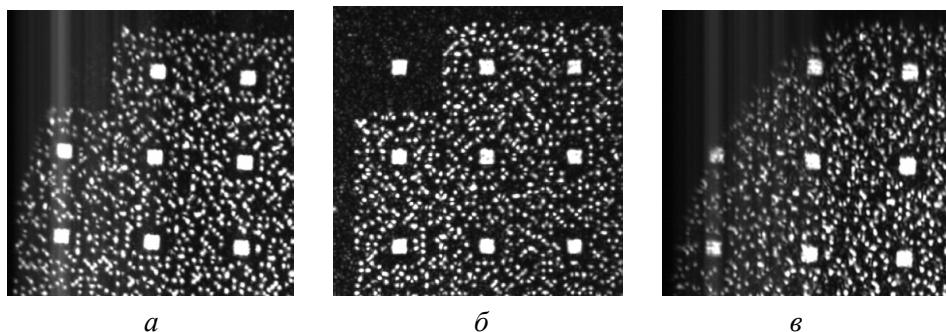


Рис. 5. Вид восстановленного изображения с голограммы, спроецированной на фоточувствительный носитель (размер голограммы $2 \times 1,5 \text{ мм}$):

а, б — в когерентной и некогерентной проекционных схемах (ПФГ-01); *в* — в когерентной проекционной схеме

Сравнительный анализ изображений, восстановленных с микроголограмм, записанных при когерентной и некогерентной проекционных схемах показал, что существенного отличия в качестве изображений нет. При когерентной проекционной схеме несколько ухудшается соотношение сигнал/шум.

Заключение. Результаты исследований подтверждают возможность записи двумерных страниц бинарных данных путем их представления в виде компьютерно-синтезированных голограмм Фурье, реализуемые с помощью ПВМС в проекционной оптической схеме. Качество восстановленных изображений страниц бинарных данных позволяет считать их матричным фотодетектором.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения о предоставлении гранта № 14.В37.21.1279 по НИР «Исследование и разработка технологии создания нового поколения миниатюрной оптико-голографической памяти на основе компьютерно-синтезированных микроголограмм» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system / S.S. Orlov, W. Phillips, E. Bjornson et al. // *Appl. Opt.* 2004. Vol. 43. Iss. 25. P. 4902–4914.
2. Okada K., Nagasaka Y. Multiplexing hologram recording and reconstructing apparatus and method therefore. Patent US No. 20080239427. 2008.
3. Hideyoshi Horimai, Xiaodi Tan. Collinear technology for a holographic versatile disk // *Applied Optics*. 2006. Vol. 45. Iss. 5. P. 910–914.
4. Разработка и исследование метода и оптической системы получения мультиплексных голограмм в системах архивной оптико-голографической памяти / С.Б. Одинокоев, Н.М. Вереникина, А.С. Кузнецов и др. // *Электронное научно-техническое издание «Наука и образование»*. 11 ноября 2011 г.

Статья поступила в редакцию 28.09.2012.