

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ЗВУКА

УДК 778.38.01:535

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНО-СИНТЕЗИРОВАННЫХ МИКРОГОЛОГРАММ ФУРЬЕ В ПРОЕКЦИОННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ

С.Б. Одинок¹, Н.М. Вереникина¹, С.С. Донченко¹,
А.Ю. Бетин¹, Е.Ю. Злоказов², В.И. Бобринёв¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: odinokov@bmstu.ru

²Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”,
Москва, Российская Федерация

Приведены результаты экспериментальных исследований проекционной системы записи компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье на фоточувствительный носитель и системы восстановления информации. Разработаны специализированные макеты, реализующие проекционный метод получения голографического носителя и считывания зарегистрированной на нем информации. Проведена оптимизация параметров канала компьютерной генерации и проекционного оптического канала записи микроголограмм Фурье системы голографической памяти. Представлены результаты экспериментальных исследований разработанной системы, подтверждающие высокое качество записанных голограмм. Экспериментально подтверждена возможность повышения плотности записи информации на фоточувствительный носитель путем использования метода мультиплексирования.

Ключевые слова: голографическая память, компьютерно-синтезированные голограммы, проекционная запись, пространственно-временной модулятор света, мультиплексирование.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE METHOD PRODUCING COMPUTER-GENERATED FOURIER MICROHOLOGRAMS IN THE HOLOGRAPHIC MEMORY OPTICAL SYSTEM OF PROJECTION TYPE

S.B. Odinokov¹, N.M. Verenikina¹, S.S. Donchenko¹,
A.Yu. Betin¹, E.Yu. Zlokazov², V.I. Bobrinev¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: odinokov@bmstu.ru

²National Research Nuclear University “MEPhI”
(Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russian Federation

The article presents the results of experimental studies of the projection system recording computer-generated Fourier microholograms on photosensitive media as well as the information recovery system. Task-orientated prototypes implementing the projection method of generating holographic medium and reading the information registered in it are developed. The parameter optimization technique for both the Fourier microholograms of a digital generation channel and the projection optical

recording channel of the holographic memory system is provided. The results of the system experimental study that confirm the high quality of the recorded holograms are presented. The conducted experiments also confirm the possibility of increasing the information density on a photosensitive medium by using the multiplexed recording microholograms.

Keywords: holographic memory, computer generated hologram, projection recording, spatial light modulator, holograms multiplexing.

Введение. В комплексе проблем современных информационных технологий, связанных с обработкой больших объемов информации, одной из актуальных является задача компактного и долгосрочного хранения данных. Применение голографических методов записи и восстановления волновых фронтов света для задач хранения данных позволяет достичь высокой информационной емкости и скорости считывания информации при постраничной организации данных, а также имеет другие преимущества. Современные разработки голографической памяти (ГП) базируются на использовании многолучевой схемы получения интерференционной картины и метода мультиплексирования для повышения плотности записи [1–5]. Широкому коммерческому использованию разработанных систем препятствуют высокие требования к точности и стабильности оптических систем ГП и высокая стоимость применяемого для записи голограмм оборудования. В связи с этим продолжают исследования, направленные на совершенствование технологических проблем существующих схем и поиск новых методов записи (или считывания) информации.

В качестве альтернативы многолучевых голографических схем записи голограмм в настоящей работе предложено использовать методы компьютерного синтеза голографических дифракционных элементов [6, 7] и проекционный метод записи голографических носителей в ГП [8–10]. В этом случае страница данных с помощью численного расчета кодируется (синтезируется) в голограмму. Скорость такого кодирования с применением современных вычислительных средств может достигать 1000 страниц в секунду. Сама голограмма представляется в виде цифрового изображения, которое с помощью пространственно-временного модулятора света (ПВМС) вводится в оптическую систему, проецирующую компьютерно-синтезированную голограмму на носитель. Разрешающая способность современных коммерчески доступных устройств ПВМС позволяет одновременный вывод до 250 кбайт информации. При этом линейные размеры голограммы, спроецированной на фоточувствительную среду, могут составлять несколько миллиметров. Преимущество такого подхода заключается в отсутствии необходимости использования точных многолучевых голографических схем, а также в возможности при компьютерном синтезе исключить неинформационные порядки дифракции, учесть нелинейности ПВМС и голографического носителя, а, следовательно, улучшить качество

восстановленного сигнала. В настоящей работе представлены экспериментальные макеты и результаты экспериментальных исследований метода формирования микроголограмм Фурье (МГФ) с использованием компьютерного синтеза и проекции их на фоточувствительный носитель для оптимизации расчета МГФ и параметров оптических схем для улучшения характеристик системы ГП. Проведены экспериментальные исследования применения метода многократной записи микроголограмм – метода мультиплексирования для повышения плотности записи информации на фоточувствительный носитель и повышения емкости голографической памяти.

Экспериментальные макеты проекционной системы записи компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье и системы восстановления информации. Для записи компьютерно-синтезированных микроголограмм на фоточувствительный носитель был разработан и собран макет проекционной системы, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

В экспериментальных исследованиях в качестве модулятора света использовалась жидкокристаллическая (ЖК) матрица Sony LCX-017 с разрешением 1024×768 пиксел и с шагом исходной структуры 32 мкм, работающая в режиме модуляции интенсивности на просвет, динамический диапазон модуляции пропускания на линейном участке характеристики около 100 уровней. Вывод синтезированных голограмм и управление ЖК-модулятором осуществлялись с персонального компьютера. Экран ПВМС, на который выводилась рассчитанная МГФ, освещался коллимированным пучком света полупроводникового ла-

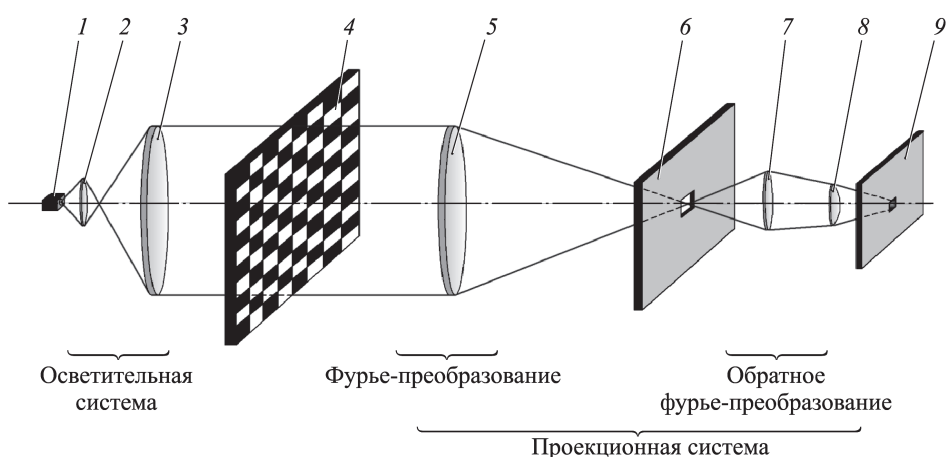


Рис. 1. Принципиальная схема проекционной оптической системы записи МГФ:

1 – источник излучения (лазер); 2 – конденсор; 3 – длиннофокусный коллимационный объектив осветительной системы; 4 – ЖК-модулятор света; 5 – фурье-объектив; 6 – диафрагма; 7 – объектив; 8 – микрообъектив; 9 – плоскость фоточувствительного носителя (голографическая высокоразрешающая пластинка типа ПФГ-01)

зера 1 CLD-DS16.001 с длиной волны излучения 0,638 мкм. Пучок света формировался осветительной системой — телескопической системой, состоящей из конденсора 2 и длиннофокусного объектива 3, увеличение телескопической системы обеспечивает равномерную за-светку апертуры ЖК-модулятора 4. При этом проекционная оптическая система формирует изображение апертуры ЖК-модулятора на фоточувствительном слое голографической высокоразрешающей пластинки типа ПФГ-01 (см. рис. 1, поз. 9) с 10-кратным уменьшением. Собственно проекционная система включает в себя фурие-объектив 5, объектив 7 и микрообъектив 8. Диафрагма 6, расположенная в фокальной плоскости фурие-объектива, осуществляет выделение информационной части спектра и пространственную фильтрацию спектра структуры ПВМС [10].

Принципиальная схема макета считывания информации с фоточувствительного носителя показана на рис. 2. Эта оптическая система позволяет восстановить исходную страницу данных, записанную на носитель информации, при этом используется обратное фурие-преобразование.

Применение компьютерной генерации голографических структур и проекционного метода получения голографического носителя позволяют исключить многолучевые методы получения интерференционной картины и значительно упростить оптическую схему получения голографического носителя. Цифровой голографический синтез микроголограмм также дает возможность улучшить качество восстановленного изображения путем учета нелинейных ошибок системы записи.

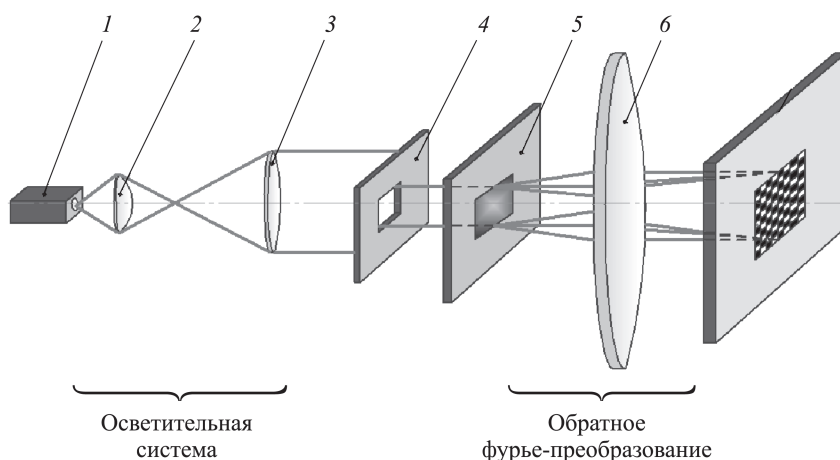


Рис. 2. Принципиальная схема макета считывания информации с фоточувствительного носителя:

1 — источник излучения (He-Ne лазер с длиной волны $\lambda = 633$ нм); 2 — микрообъектив; 3 — длиннофокусный объектив; 4 — диафрагма; 5 — фоточувствительный носитель информации; 6 — фурие-объектив

Компьютерный синтез МГФ для ГП позволяет математически подавить нулевой порядок и исключить неинформационные порядки дифракции в восстановленном изображении, включая автокорреляционный член опорного сигнала, а также провести фазовое кодирование и ограничить динамический диапазон, что приводит к значительному повышению дифракционной эффективности в восстановленном изображении объекта.

При стандартной реализации компьютерного синтеза МГФ такого объекта в восстановленном изображении возникает яркая точка в нулевом порядке и два сопряженных изображения восстановленного объекта в ± 1 дифракционных порядках. Для рассчитанных голограмм соотношения интенсивностей нулевого и первого порядков составили 10^4 . Для “сглаживания” спектра и повышения дифракционной эффективности на страницу входных данных накладывают кодирующую фазовую маску. Поэтому при компьютерном синтезе МГФ важнейшим является процесс кодирования страницы входных данных с помощью фазовой маски [8, 9]. Численные расчеты показали, что максимальная дифракционная эффективность голограмм может быть достигнута при добавлении к кодируемым объектам псевдослучайных фазовых масок. В случае использования псевдослучайных фазовых масок для кодируемого объекта отношение интенсивности нулевого порядка к интенсивности -1 составило около 10^3 [9].

Для определения параметров МГФ важна оценка влияния геометрических параметров устройства ввода компьютерно-синтезированной микроголограммы в оптический тракт — ЖК ПВМС на параметры пространственно-частотного спектра.

Увеличение объема информации, записанной на голограмму, приводит к увеличению размера самой голограммы. Поскольку возможность используемого для ввода голограммы пространственного модулятора ограничена его размерностью, при реализации МГФ большего размера ее часть, соответствующая высокочастотным элементам пространственного спектра, будет отсечена. Подобное искажение голограммы приводит к расплыванию границ элементов записываемого объекта, что может повлиять на считывание восстановленного объекта. Такое “урезание” в значительной степени может влиять на точность восстановления мелких элементов записанного объекта, размерность которых 1–2 пиксел. В работе [10] показано, что для сохранения целостности информационных элементов, восстановленных голограммой, необходимо, чтобы разрешение записываемого объекта было как минимум в 4 раза меньше разрешения голограммы.

На качество восстановления информации с компьютерно-синтезированной МГФ также оказывают влияние погрешность дискретизации при расчете фурье-спектра объекта, число уровней квантования, нели-

нейность характеристики пропускания ЖК ПВМС, на который выводится голограмма, и нелинейность чувствительности фотоматериала, на который записывается голографическая структура.

Шумами, вносимыми быстрыми фурье-преобразованиями, можно пренебречь. В работе [8] было показано, что при ограничении числа уровней квантования голограммы до 8, соотношение сигнал/шум принимает значение около 5 и выше. Нелинейную характеристику фоточувствительного материала учитывают подбором экспозиции.

Наибольшее влияние на соотношение сигнал/шум восстановленного изображения оказывают нелинейности амплитудной характеристики ЖК ПВМС, что приводит к искажениям в передаче градаций серого рассчитанной голографической структуры. Практические исследования показали следующее: сигнал/шум вследствие нелинейных искажений может упасть до 1, что сделает невозможным считывание записанной информации без ошибок.

В связи с изложенным для улучшения качества изображения, восстановленного с голограммы, необходимо при компьютерном синтезе микроголограммы учитывать амплитудную характеристику пропускания ЖК ПВМС (как правило, нелинейную), вводя поправочные коэффициенты для минимизации искажений.

Экспериментальные результаты. Как показали эксперименты (рис. 3), учет характеристики ЖК ПВМС при синтезе МГФ привел к существенному улучшению качества восстановленного объекта. Полученное в результате экспериментов отношение сигнал/шум скорректированной голограммы, равное 3–4, обеспечивает корректное восстановление записанной информации.

Проведены экспериментальные исследования мультиплексирования компьютерно-синтезированных микроголограмм. Мультиплексированная запись голограмм — широко распространенный метод для увеличения плотности записи информации и емкости устройств ГП [3–5]. Для подтверждения принципиальной возможности мультиплек-

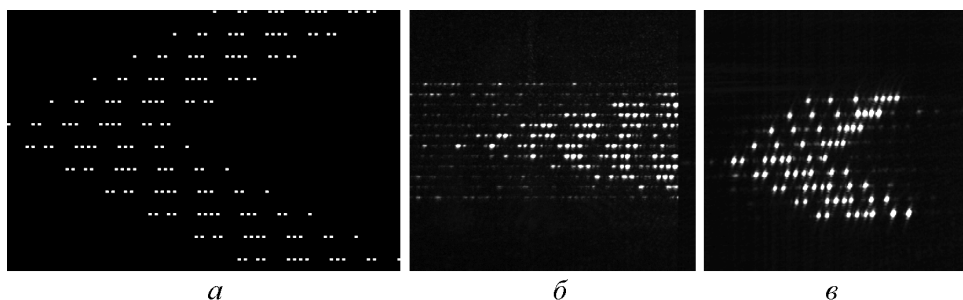


Рис. 3. Тестовый объект (*а*), восстановленное изображение с искажениями (*б*), вызванными нелинейностью ЖК ПВМС, и линейаризованная синтезированная голограмма (*в*)

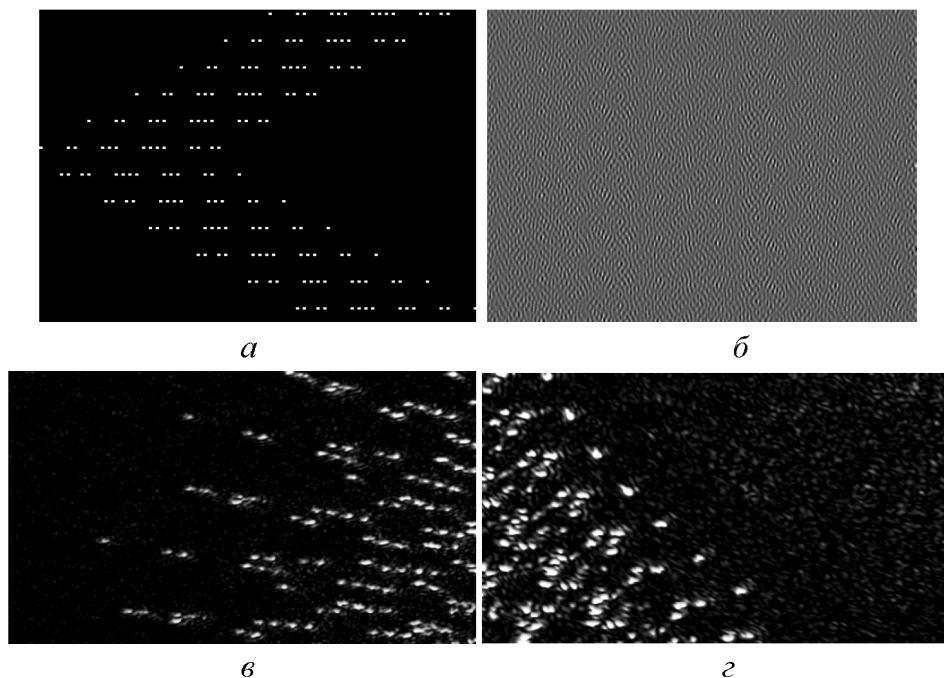


Рис. 4. Экспериментальное исследование мультиплексирования компьютерно-синтезированных МГФ в случае проекционного метода записи на носитель:

a — тестовый объект; *б* — рассчитанная голографическая структура тестового объекта; *в* — восстановленное изображение тестового объекта при 20 наложенных голограммах; *г* — восстановленное изображение тестового объекта при 40 наложенных голограммах

сирования сложных голографических структур на фоточувствительный носитель были проведены эксперименты со съемкой двумерных голограмм тестового объекта с угловым мультиплексированием (при 10-кратном уменьшении апертуры ЖК-модулятора; размер голограммы $3,5 \times 2,5$ мм). Изображение тестового объекта представлено на рис. 4, *a*, синтезированная МГФ — на рис. 4, *б*, восстановленные изображения множества страниц данных при разном числе наложенных голограмм — на рис. 4, *в* (20 мультиплексированных голограмм, угол поворота голограммы 9°) и рис. 4, *г* (40 мультиплексированных голограмм, угол поворота голограммы 4°).

Согласно данным эксперимента, отношение сигнал/шум ухудшается по мере увеличения числа наложенных голограмм, но и при 40 наложенных голограммах отношение сигнал/шум остается приемлемым: неперекрывающиеся фрагменты множества восстановленных изображений тестового объекта различимы и подлежат дальнейшей идентификации. Результаты экспериментального мультиплексного проецирования компьютерно-синтезированных голограмм на голографические носители и их последующего восстановления свидетельствуют о том, что искажения формы отдельных битов в изображении тестового объ-

екта вполне приемлемы даже в случае 40-кратного мультиплексирования и точность восстановленных объектов достаточна для их считывания матричным фотодетектором.

В системах ГП объектом для записи согласно международному стандарту ЕСМА–377 [11] является страница двоичных данных с реперными точками, выполняющими техническую роль при считывании. Особенность такого объекта — информационность каждого его пикселя, поэтому любые искажения критичны для целостности восстановления данных. В связи с этим вопрос мультиплексирования в системе записи цифровых данных требует тщательного рассмотрения и подбора угла поворота микроголограмм, при котором не происходит взаимного наложения восстановленных изображений, либо разработки микроголограмм, более чувствительных к угловым рассогласованиям, например, одномерных компьютерно-синтезированных МГФ, и более сложных оптических систем записи (или восстановления) информации [12–15].

Заключение. Разработаны экспериментальные макеты устройства получения компьютерно-синтезированных голограмм Фурье проекционным методом и устройства считывания информации. Установленные зависимости дифракционной эффективности и отношения сигнал/шум в восстановленном исходном объекте от шага кодирующей фазовой маски, размерности ПВМС и нелинейности амплитудной характеристики ЖК ПВМС позволяют оптимизировать алгоритм расчета голографических структур и параметры проекционной оптической системы записи и в конечном счете повысить точность считывания информации. Экспериментально подтверждена возможность записи компьютерно-синтезированных МГФ проекционным способом сложного объекта на фоточувствительный носитель при многократной экспозиции фоточувствительного носителя — запись голограмм с мультиплексированием, что повышает плотность записи информации и емкость ГП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения базовой части государственного задания “Организация проведения научных исследований” и проектной части государственного задания”, проект № 3.9.2014К.

ЛИТЕРАТУРА

1. *High-transfer-rate high-capacity holographic disk data-storage system / S.S. Orlov, W. Phillips, E. Bjornson, Y. Takashima, P. Sundaram, L. Hesselink, R. Okas, D. Kwan, R. Snyder // Applied Optics. 2004. Vol. 43. P. 4902–4914.*

2. *Horimai H., Tan X.* Collinear technology for a holographic versatile disk // *Applied Optics*. 2006. Vol. 45 (5). P. 910–914.
3. *Разработка* и исследование метода и оптической системы получения мультиплексных голограмм в системах архивной оптико-голографической памяти / С.Б. Одинокоев, Н.М. Вереникина, В.В. Маркин, Д.С. Лушников, Е.А. Усович, А.С. Гончаров, А.С. Кузнецов, А.Ю. Павлов, А.И. Николаев, О.В. Андреева // *Оптический журнал*. 2009. Т. 76. № 7. С. 1–9.
4. *Research* of a method and optical system for record multiplex holograms in system of holographic memory / S.B. Odinokov, E.A. Usovich, N.M. Verenikina, V.V. Markin, A.S. Goncharov, D.S. Lushnikov, A.S. Kuznetsov, A.Y. Pavlov, A.I. Nikolaev, O.V. Andreeva // *Proc. of SPIE*. 2009. Vol. 7358.
5. *Оптическая* система для записи мультиплексных микроголограмм на фоточувствительный материал в системе голографической памяти / А.С. Кузнецов, С.Б. Одинокоев, Н.М. Вереникина, В.В. Маркин, Д.С. Лушников, А.Ю. Павлов, М.С. Ковалев, А.Б. Соломашенко // *Естественные и технические науки*. 2011. № 4. С. 405–406.
6. *Dallas W.J.* Computer-generated holograms. Springer-Verlag, 1980.
7. *Yaroslavsky L., Astora J.* Introduction to digital holography. Bentham e-books, 2013. 197 p.
8. *Оптическая* система устройства записи и считывания больших объемов информации, основанная на использовании мультиплексной записи одномерных голограмм / А.Ю. Бетин, В.И. Бобринёв, Н.Н. Евтихийев, А.Ю. Жердев, Е.Ю. Злоказов, Д.С. Лушников, В.В. Маркин, С.Б. Одинокоев, С.Н. Стариков, Р.С. Стариков // *Квантовая электроника*. 2013. Т. 43. № 1. С. 87–89.
9. *Holographic* memory optical system based on computer-generated Fourier holograms / A.Yu. Betin, V.I. Bobrinev, S.B. Odinokov, N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, S.N. Starikov, E.Yu. Zlokazov // *Applied Optics*. 2013. Vol. 52. № 33. P. 8142–8145.
10. *Одинокоев С.Б., Вереникина Н.М., Подгородняя А.С., Донченко С.С.* Метод компьютерного синтеза микроголограмм Фурье и оптическая система их записи на голографический диск памяти // *Инженерный журнал: наука и инновации*. 2013. Вып. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/916.html>
11. *Standard ECMA-377: Information Interchange on Holographic Versatile Disc (HVD) Recordable Cartridges Capacity: 200 Gbytes per Cartridge.*: Ecma International, 1st ed., 2007.
12. *Синтез* одномерных голограмм Фурье для системы голографической памяти с проекционной схемой записи / Е.Ю. Злоказов, Р.С. Стариков, С.Н. Стариков, С.Б. Одинокоев, Н.М. Вереникина, А.С. Кузнецов, С.С. Донченко, А.Ю. Бетин // *Естественные и технические науки*. 2013. № 5. С. 48–51.
13. *Компьютерное* моделирование и синтез одномерных микроголограмм Фурье для оптико-голографической памяти / А.С. Подгородняя, С.Б. Одинокоев, Н.М. Вереникина, В.И. Бобринёв, А.Ю. Бетин, Е.Ю. Злоказов // *Мир техники кино*. 2014. № 1 (13). С. 25–31.
14. *Оптическая* система устройства записи и считывания больших объемов информации, основанная на использовании мультиплексной записи одномерных голограмм / В.И. Бобринёв, Н.М. Вереникина, С.С. Донченко, Е.Ю. Злоказов, С.Б. Одинокоев, А.С. Подгородняя // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*. 2014. № 2 (95). С. 120–135.
15. *Holographic* memory system based on projection recording of computer-generated 1D Fourier holograms / A.Yu. Betin, V.I. Bobrinev, S.S. Donchenko, S.B. Odinokov, N.N. Evtikhiev, R.S. Starikov, S.N. Starikov, E.Yu. Zlokazov // *Optical Society of America. Applied Optics*. 1 October 2014. Vol. 53. No. 28. P. 6591.

REFERENCES

- [1] 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. *Applied Optics*, 2004, vol. 43, pp. 4902–4914.
- [2] Horimai H., Tan X. Collinear technology for a holographic versatile disk. *Applied Optics*, 2006, vol. 45 (5), pp. 910–914.
- [3] Odinkov S.B., Verenikina N.M., Markin V.V., Lushnikov D.S., Usovich E.A., Goncharov A.S., Kuznetsov A.S., Pavlov A.Yu., Nikolaev A.I., Andreeva O.V. Development and Research of the Method and Optical System for Generating Multiplex Holograms in the Systems of Archival Optical-Holographic Memory. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2009, vol. 76, no. 7, pp. 1–9 (in Russ.).
- [4] Odinkov S.B., Usovich E.A., Verenikina N.M., Markin V.V., Goncharov A.S., Lushnikov D.S., Kuznetsov A.S., Pavlov A.Y., Nikolaev A.I., Andreeva O.V. Research of a method and optical system for record multiplex holograms in system of holographic memory. *Proc. of SPIE*, 2009, vol. 7358.
- [5] Kuznetsov A.S., Odinkov S.B., Verenikina N.M., Markin V.V., Lushnikov D.S., Pavlov A.Yu., Kovalev M.S., Solomashenko A.B. The Optical System for Recording Multiplexed Microholograms to a Photosensitive Material in a Holographic Memory System. *Estestv. i tekhn. nauki* [Natural and engineering sciences], 2011, no. 4, pp. 405–406 (in Russ.).
- [6] Dallas W.J. Computer-generated holograms. *Springer-Verlag*, 1980.
- [7] Yaroslavsky L., Astora J. Introduction to digital holography. Bentham-books, 2013. 197 p.
- [8] Betin A.Yu., Bobrinev V.I., Evtikhiev N.N., Zherdev A.Yu., Zlokazov E.Yu., Lushnikov D.S., Markin V.V., Odinkov S.B., Starikov S.N., Starikov R.S. The Optical System of Recording and Reading Large Amounts of Information, Based on Multiplex Recording One-Dimensional Holograms. *Kvantovaya Elektronika* [Quantum Electronics], 2013, vol. 43, no. 1, pp. 87–89 (in Russ.).
- [9] Betin A.Yu., Bobrinev V.I., Odinkov S.B., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu. Holographic memory optical system based on computer-generated Fourier holograms. *Applied Optics*, 2013, vol. 52, no. 33, pp. 8142–8145.
- [10] Odinkov S.B., Verenikina N.M., Podgorodnyaya A.S., Donchenko S.S. Method of computer generation of Fourier microholograms and optical system of their record on a holographic memory disk. *Jelekt. nauchno-tehn. Izd. "Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovacii"* [El. Sc.-Techn. Publ. "Eng. J.: Science and Innovation", 2013, iss. 9. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/916.html>
- [11] Standard ECMA–377: Information Interchange on Holographic Versatile Disc (HVD) Recordable Cartridges Capacity: 200 Gbytes per Cartridge.: Ecma International, 1st ed., 2007.
- [12] Zlokazov E.Yu., Starikov R.S., Starikov S.N., Odinkov S.B., Verenikina N.M., Kuznetsov A.S., Donchenko S.S., Betin A.Yu. Synthesis of One-Dimensional Fourier Holograms for Holographic Memory System with a Projection Recording Scheme. *Estestv. i tekhn. nauki* [Natural and Engineering Sciences], 2013, no. 5, pp. 48–51 (in Russ.).
- [13] Podgorodnyaya A.S., Odinkov S.B., Verenikina N.M., Bobrinev V.I., Betin A.Yu., Zlokazov E.Yu. Computer Simulation and Synthesis of One-Dimensional Fourier Microholograms for Optical-Holographic Memory. *Mir tekhniki kino* [World of cinema technology], 2014, no. 1 (13), pp. 25–31 (in Russ.).

- [14] Bobrinev V.I., Verenikina N.M., Donchenko S.S., Zlokazov E.Yu., Odinokov S.B., Podgorodnyaya A.S. Optical System of a Device for Recording and Reading Large Data Amounts Based on Using Multiplex Recording of One-dimensional Holograms. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2014, no. 2 (95), pp. 120–135 (in Russ.).
- [15] Betin A.Yu., Bobrinev V.I., Donchenko S.S., Odinokov S.B., Evtikhiev N.N., Starikov R.S., Starikov S.N., Zlokazov E.Yu. Holographic memory system based on projection recording of computer-generated 1D Fourier holograms. *Optical Society of America. Applied Optics*. 1 October 2014, vol. 53, no. 28, p. 6591.

Статья поступила в редакцию 03.02.2015

Одиноков Сергей Борисович — д-р техн. наук, профессор кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана, заместитель директора НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области голографии, оптической обработки информации, оптико-голографических систем памяти. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Odinokov S.B. — Dr. Sci. (Eng.), professor of the Laser and Optic-Electronic Systems Department of the Bauman Moscow State Technical University, deputy director of the Research Institute of Radio-Electronics and Laser Technology at the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the fields of holography, optical data processing, optical holographic memory systems. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Вереникина Нина Михайловна — канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 130 научных работ в области голографии и голографических систем обработки информации. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Verenikina N.M. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of the Laser and Optic-Electronic Systems Department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 130 publications in the fields of holography, holographic data processing systems. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Донченко Сергей Сергеевич — инженер НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор трех научных работ в области оптико-голографических систем памяти. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Donchenko S.S. — engineer of the Research Institute of Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of three publications in the field of optical holographic memory systems. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Бетин Александр Юрьевич — инженер НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области голографии и оптико-голографических систем памяти. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Betin A.Yu. — engineer of the Research Institute of Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the fields of holography and optical holographic memory systems. Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Злоказов Евгений Юрьевич — инженер НИЯУ “МИФИ”. Автор более 20 научных работ в области голографии, голографических систем памяти, оптико-голографических систем обработки информации.

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Российская Федерация, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31.

Zlokazov E.Yu. — engineer of the National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute). Author of more than 20 publications in the fields of holography, holographic memory systems, optical holographic systems for data processing.

National Research Nuclear University “MEPhI” (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoe sh. 31, Moscow, 115409 Russian Federation.

Бобринёв Владимир Иванович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 научных работ в области голографии, голографических систем отображения информации, оптико-голографических систем памяти.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5.

Bobrinev V.I. — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the Research Institute of Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 150 publications in the fields of holography, holographic data display systems, optical holographic memory systems.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Одинокоев С.Б., Вереникина Н.М., Донченко С.С., Бетин А.Ю., Злоказов Е.Ю., Бобринёв В.И. Экспериментальные исследования метода получения компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье в проекционной оптической системе голографической памяти // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2015. № 3. С. 104–115.

Please cite this article in English as:

Odinokov S.B., Verenikina N.M., Donchenko S.S., Betin A.Yu., Zlokazov E.Yu., Bobrinev V.I. Experimental studies of the method producing computer-generated fourier microholograms in the holographic memory optical system of projection type. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2015, no. 3, pp. 104–115.