

УДК 535.417; 535.317; 778.38

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТА НА ИЗОБРАЖАЮЩИЕ СВОЙСТВА СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПРОЕКЦИОННЫХ ГОЛОГРАММ

© С. Н. Корешев¹, Д. С. Смородинов², М. А. Фролова¹,
С. О. Старовойтов¹

¹ Университет информационных технологий, механики и оптики,
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49

² Общество с ограниченной ответственностью «ИнТех Консалтинг»,
115280, Москва, ул. Ленинская Слобода, 26, стр. 28
E-mail: smorodinov.denis@gmail.com

Приведены результаты исследования влияния структуры объекта и формы его представления на качество, разрешающую способность и глубину резкости изображений, восстанавливаемых с помощью бинарных синтезированных голограмм-проекторов. Критерием качества выбрана степень соответствия восстановленного изображения объекту, оцениваемая как диапазон градаций порога при пороговой обработке восстановленного изображения, при котором его структура полностью соответствует структуре исходного объекта. Разработан метод проекционной голографической фотолитографии, основанный на математическом моделировании реальных физических процессов синтеза и восстановления голограмм плоских бинарных транспарантов.

Ключевые слова: синтез голограмм, форма представления, бинаризация, глубина резкости, фотолитография.

DOI: 10.15372/AUT20200212

Введение. Голография, согласно определению, приведённому в работе [1], — это интерференционный метод регистрации световых волн, дифрагировавших на объекте, освещённом когерентным светом. Изображающие свойства голограмм во многом задаются характеристиками объектной волны, использованной при формировании интерференционного поля. Они, в свою очередь, определяются структурой объекта и параметрами пучка, освещающего объект. Всё это справедливо и в случае синтеза бинарных голограмм-проекторов [2–4], предназначенных для использования в процессе проекционной голографической фотолитографии. Так, в литературе описано существенное влияние на изображающие свойства синтезированных голограмм (т. е. на степень соответствия восстановленного изображения объекту и на глубину его резкости) периода дискретизации объекта, формы его представления в процессе синтеза голограммы и распределения фазы по поверхности объекта, задаваемых в процессе синтеза голограммы-проектора [5–7]. Акцентирование внимания на указанных изображающих свойствах объясняется целевым назначением данной публикации, направленной на разработку и исследование процессов синтеза рельефно-фазовых отражательных голограмм-проекторов, заменяющих фотошаблон и проекционную оптическую систему в проекционном фотолитографическом процессе. Её экспериментальная часть, включающая в себя синтез и восстановление бинарных голограмм двумерных бинарных объектов (фотошаблонов), проводилась методом математического моделирования реальных физических процессов синтеза и восстановления голограмм бинарных транспарантов. При этом критерием оценки качества восстановленного изображения принималось число допустимых уровней (градаций) его пороговой обработки, при которых структура восстановленного изображения полностью соответствует структуре

исходного объекта. Правомочность использования такого критерия объясняется пороговыми свойствами фоторезистов. Чем больше число допустимых уровней пороговой обработки восстановленного изображения, тем больший диапазон экспозиционных доз допустим в фотолитографическом процессе.

Влияние структуры объекта на выбор параметров синтеза голограмм-проекторов и качество восстановленного изображения. Рассматривая влияние формы представления объекта, т. е. математического описания объектной волны на степень соответствия объекта восстановленному изображению, следует отметить ряд моментов. Заметное влияние на неё оказывает задаваемый период дискретизации объекта. Так, в [8] сообщалось, что обеспечение непрерывности тонких проводников в изображении, восстановленном с помощью синтезированных голограмм-проекторов, при использовании высокоразрешающих фоторезистов требует существенного уменьшения, по крайней мере в 4 раза, периода дискретизации объекта при его математическом описании по сравнению с периодом, предсказываемым теоремой отсчётов [9]. При этом применение фазовых масок со случайным в интервале $0-\pi$ распределением фазы недопустимо, поскольку приводит к появлению спеклов в восстановленном изображении и делает его непригодным для применения в фотолитографии. В случае использования регистраторов изображения с разрешающей способностью, равной или меньшей периода дискретизации объекта, период может быть выбран исходя из теоремы отсчётов.

Однако для выбора оптимальных параметров синтеза голограмм-проекторов, обеспечивающих высокую степень соответствия восстановленного изображения объекту, необходимо принимать во внимание не только период дискретизации и распределение фазы в его плоскости, но и структуру самого объекта. Так, равная интенсивность линий различной ширины в изображениях, восстановленных с помощью бинарных голограмм-проекторов, может быть достигнута лишь путём оптимизации уровня бинаризации голограмм. Отметим, что бинарные голограммы получаются бинаризацией предварительно синтезированных полутоновых голограмм чаще всего по верхнему порогу, при котором интенсивность в конкретной точке полутоновой голограммы сравнивается с некоторым значением t — уровнем бинаризации. Если значение интенсивности в выбранной точке голограммы до бинаризации больше либо равно t , то оно изменяется на максимальное, в остальных случаях значение обнуляется. В результате образуется голограмма, которая в разных точках структуры имеет одно из двух возможных значений функции её амплитудного пропускания. Выбор конкретного алгоритма бинаризации существенного влияния на качество восстановленного изображения не оказывает [10]. В [11] показано, что есть лишь два интервала уровней бинаризации, позволяющие обеспечить равномерную интенсивность восстановленных изображений, содержащих линии разной толщины. При этом положения центров этих интервалов во многом определяются структурой объекта и соответственно восстановленного изображения.

В целях доказательства данного предположения было синтезировано и восстановлено несколько голограмм тестовых объектов (рис. 1). Среди них объекты в виде двух параллельных Щелей размерами 2×40 пикселей (рис. 1, слева) и 6×40 пикселей (рис. 1, по центру) с расстоянием между щелями 1 пиксель, а также тест-объект Уголки, представляющий собой крест толщиной 1 пиксель и несколько Уголков толщиной от 1 и до 3 пикселей (рис. 1, справа). Общий размер последнего объекта равен 23×23 пикселя.

Параметры синтеза были определены в соответствии с результатами работы [8], основанными на использовании теоремы выборки. Согласно им для успешного восстановления изображения дискретного объекта период дискретизации синтезированной голограммы должен быть, как минимум, в 4 раза меньше периода дискретизации самого объекта, а разрешающая способность регистратора должна быть равна этому периоду. Таким образом, при размерах пикселя объекта $a_t 80 \times 80$ нм размеры пикселя голограммы d_d составляли



Рис. 1. Внешний вид тест-объектов: Щели (слева), Широкие щели (по центру), Уголки (справа)

20×20 нм, а расстояние между голограммой и плоскостью объекта $R_h = 20\,345$ нм. Рабочая длина волны выбрана близкой к коротковолновой границе ультрафиолетового излучения и составляла $\lambda = 13,5$ нм, а угол падения опорного пучка $\alpha = 14,67^\circ$. В остальном возможные ограничения на выбор физических и технологических характеристик не отличаются от тех, что используются в традиционной фотолитографии.

Эксперименты проводились с помощью разработанного в Университете информационных технологий, механики и оптики программного комплекса, предназначенного для осуществления синтеза и цифрового восстановления голограмм для фотолитографии [12].

Восстанавливаемое с помощью данного комплекса изображение представляет собой полутоновый объект, состоящий из дискретных ячеек, в каждой из которых регистрируется одно из 256 значений серого цвета, при этом значение 0 соответствует чёрному цвету, 255 — белому. Таким образом, всего получается 256 возможных уровней пороговой обработки изображения. Поскольку исходный объект является бинарным, то количество уровней обработки, при которых структура восстановленного изображения полностью идентична структуре исходного объекта (допустимых уровней), может использоваться как показатель качества изображения. Чем больше таких уровней, тем изображение качественнее.

В рамках проводимых экспериментов для каждого из исследуемых объектов была выявлена зависимость числа допустимых уровней пороговой обработки от уровня бинаризации голограммы. Графики зависимостей числа допустимых уровней пороговой обработки восстановленного изображения от уровня бинаризации голограммы-проектора представлены на рис. 2, где по оси абсцисс отложены нормированные на единицу уровни бинаризации голограммы, а по оси ординат — нормированное по максимуму число допустимых уровней (градаций) пороговой обработки, при котором структура восстановленного изображения была идентична структуре объекта.

Заметим, что вне зависимости от выбранного объекта, существует два интервала уровней бинаризации, которые можно считать оптимальными, поскольку при них восстановленное изображение имеет наиболее высокое с точки зрения количества градаций пороговой обработки качество. Из графиков, представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что структура объекта оказывает заметное влияние как на численное значение оптимального уровня бинаризации, так и на максимальное число допустимых уровней пороговой обработки. По мере усложнения структуры объекта количество уровней обработки на изображении снижается, что позволяет сделать вывод о том, что бинарные голограммы наиболее выгодно использовать при восстановлении изображений относительно простых объектов (отдельных отрезков, уголков, дуг и т. д.). Более сложные по структуре объекты целесообразно разбить на несколько простых элементов и синтезировать отдельные голограммы каждого из них.

Рассматривая влияние структуры объекта и формы его представления на степень соответствия восстановленного изображения объекту, нельзя обойти вниманием влияние

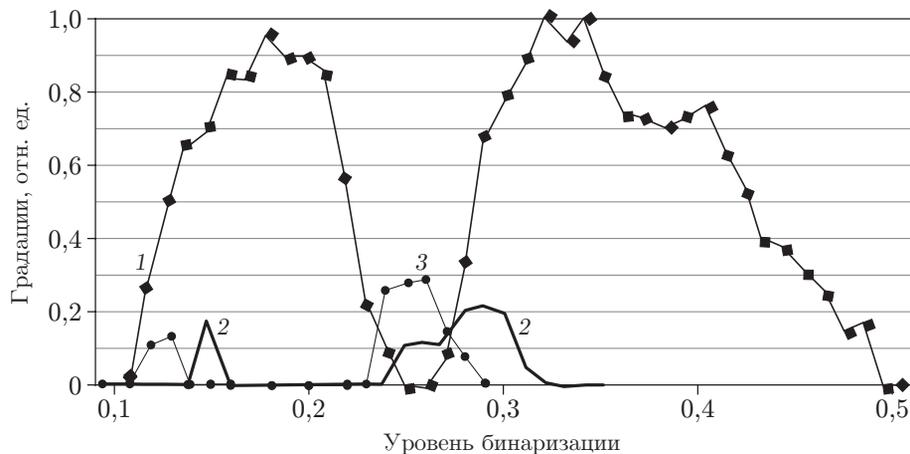


Рис. 2. Графики зависимостей числа уровней на изображении от уровня бинаризации для объектов: 1 — Щели, 2 — Широкие щели, 3 — Уголки

формы представления объектной волны, определяемой используемым методом синтеза голограммы, на взаимоотношение расстояния между объектом и голограммой R_h , которое равно расстоянию от голограммы до восстановленного изображения, и качества восстанавливаемого изображения. Из всех существующих методов синтеза голограмм для целей фотолитографии наиболее подходящим является метод, основанный на принципе Гюйгенса, в соответствии с которым дискретный объект представляется в виде совокупности источников сферических волн. Также перспективна идея создания элементарных полей объектных волн типовых пикселей, сформированных в заданной плоскости синтеза голограммы [12]. Такие типовые распределения можно накладывать на плоскость синтеза по типу штампа, в связи с чем такая модификация получила название метода штамповки. Отличие голограмм-проекторов, синтезированных с помощью этих методов, состоит в их несколько отличающейся «избыточности», обусловленной присущему методу штамповки большему значению апертуры краевых зон объекта.

От расстояния R_h напрямую зависит размер голограммы и время её синтеза, поэтому обычно оно выбирается минимальным из возможных исходя из необходимости обеспечения пространственного разделения восстанавливающего и восстановленного пучков лучей. В то же время увеличение расстояния в ряде случаев позволяет улучшить качество восстановленного изображения за счёт пространственного разделения не только восстановленного и восстанавливающего пучков, но и порядков внутри восстановленной волны [13, 14].

Однако в случае объектов с ярко выраженной периодической структурой при использовании для синтеза голограммы-проектора метода Гюйгенса обнаруживается прямо противоположный эффект. Рассмотрим два объекта, представляющие собой дифракционные решётки с периодами $2a_t$ (рис. 3, слева) и $4a_t$ (рис. 3, справа), где a_t — размер пикселя 80 нм. Общий размер каждой из решёток равен 23×23 пикселя.

Расстояние между щелями решётки составляло a_t и $2a_t$, где соответственно ширина самих щелей была равна расстоянию между ними. Экспериментальное исследование проводилось для указанных в предыдущем эксперименте параметров синтеза. Отличие между различными экспериментами было только в расстоянии R_h . Также для сравнения при тех же расстояниях был синтезирован и восстановлен объект Уголки (см. рис. 1, с).

Качество восстановленных изображений также оценивалось с помощью количества уровней пороговой обработки. Для удобства оценки результаты сведены в таблицу.

Связь такого эффекта с формой представления объекта, т. е. с методом расчёта амплитуды объектной волны при синтезе голограммы, становится очевидной при рассмотрении

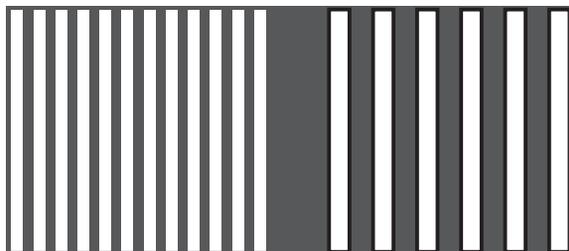


Рис. 3. Тестовые объекты: дифракционные решётки с периодами $2a_t$ (слева) и $4a_t$ (справа)

Таблица

Зависимости чисел допустимых уровней пороговой обработки на изображении от структуры объекта и расстояния между объектом и голограммой

Расстояние R_h , нм	Решётка с периодом $2a_t$, количество уровней	Решётка с периодом $4a_t$, количество уровней	Уголки, количество уровней
20 345	63	44	36
20 373	66	43	38
20 610	59	38	36
20 847	55	34	39
21 084	48	29	50
21 321	43	27	63
21 558	40	24	68

ряда изображений дифракционной решётки с периодом $4a_t$, восстановленных с помощью голограммы-проектора, синтезированной методом штамповки. В этом случае степень соответствия восстановленного изображения объекту слабо варьируется при изменении расстояния от объекта $R_h = 20\,345$ до голограммы $R_h = 24\,080$ нм.

Наблюдаемое для простых объектов (типа решётки) различие зависимостей степени соответствия восстановленного изображения и объекта от расстояния между ним и голограммой связано, скорее всего, с изменением её площади, несущей информацию о структуре объекта, т. е. с изменением степени избыточности голограммы-проектора по мере увеличения расстояния между объектом и плоскостью голограммы. Для объектов с относительно сложной структурой этот эффект будет отчасти нивелирован даже без использования типовых штампов. Однако при синтезе голограмм периодических объектов следует учитывать влияние описанного эффекта и подбирать оптимальное расстояние R_h либо использовать метод штамповки.

Зависимость глубины резкости от формы представления объекта. Ещё одной из важнейших характеристик используемых в фотолитографии проекционных оптических систем, к которым относятся и голограммы-проекторы, является глубина резко изображаемого пространства. Её величина отражает допустимую величину сдвига плоскости регистрации изображения вдоль оптической оси относительно точки фокуса, при которой изображение остаётся достаточно резким [15].

Существует ряд способов увеличения глубины резкости, чаще всего основанных на различных манипуляциях на стадии регистрации изображений [16] или модификациях оптических систем [17], усложняющих их конструкцию. Однако наиболее подходящим для фотолитографии является метод изменения глубины резкости путём изменения формы объекта. В рамках этого метода объект представляется в виде нескольких последователь-

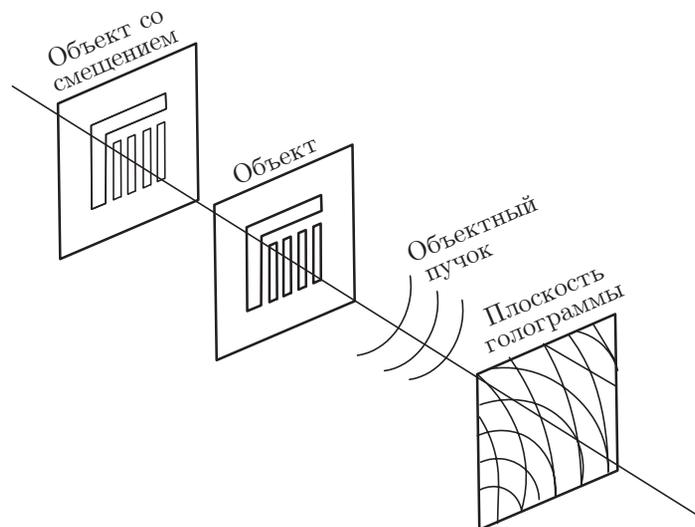


Рис. 4. Представление объекта в виде набора транспарантов

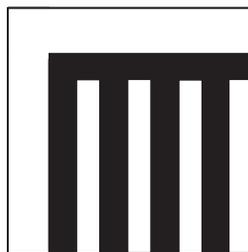


Рис. 5. Тест-объект Уголок и Линии

но установленных плоских транспарантов [18], на которых изображён один и тот же набор элементов, составляющих объект (рис. 4).

Расстояние между транспарантами в соответствии с результатами работы [18] должно обеспечивать синфазность объектных волн в центре голограммы и не должно превышать традиционную для оптики глубину резкости объекта, которая, в свою очередь, определяется апертурой и размерами элементов, составляющих объект, в частности шириной линий. Однако, поскольку объект может состоять из отрезков разной ширины, остаётся вопрос: должны ли быть все транспаранты одинаковыми или на дополнительных транспарантах достаточно отображать лишь тонкие элементы структуры объекта, имеющие наименьшее значение глубины резкости? В литературе также не рассматривается, достижима ли максимально возможная глубина резкости при представлении исходного объекта в виде двух транспарантов, или же их должно быть больше. Для получения ответа на эти вопросы было проведено экспериментальное исследование, которое включало в себя синтез нескольких голограмм-проекторов, осуществлённый при различных формах представления объекта. В выполненных численных экспериментах использовался специальный тестовый объект Уголок и Линии размером 10×10 пикселей, состоящий из четырёх параллельных отрезков шириной 1 пиксель размером 1×7 пикселей и двух отрезков шириной 2 пикселя размером 2×10 пикселей, составляющих уголок (рис. 5). Расчётное значение глубины резкости для такого объекта в соответствии с работой [18] равно ± 237 нм.

В первом эксперименте дополнительные фотошаблоны не применялись. Для представления объекта во втором эксперименте использовались два одинаковых фотошаблона, расположенные друг от друга на расстоянии 199 нм, выбранном в качестве оптимального

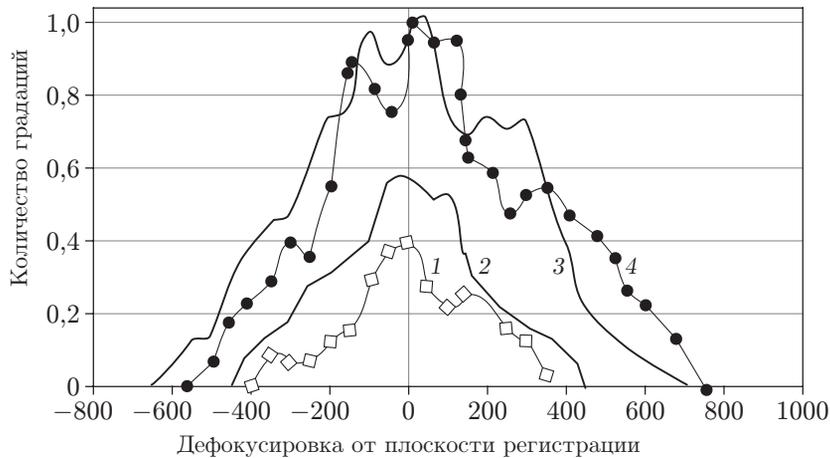


Рис. 6. Графики зависимостей качества восстановленного изображения объекты Уголок и Линии от дефокусировки для различной формы представления объекта при синтезе: 1 — без установки второй плоскости; 2 — использование двух идентичных фотошаблонов; 3 — использование второго фотошаблона, содержащего лишь тонкую линию; 4 — использование трёх фотошаблонов, содержащих объект целиком

по результатам работы [18]. В третьем эксперименте применялись также два фотошаблона, но второй фотошаблон, располагаемый на том же расстоянии (199 нм), содержал в этом случае изображение только тонкой линии. Четвёртый эксперимент проводился при условии представления объекта тремя одинаковыми фотошаблонами, каждый из которых содержал объект целиком, при этом расстояние между вторым и третьим фотошаблоном также было равно 199 нм. Непосредственная оценка глубины резкости проводилась путём синтеза ряда голограмм и восстановления с их помощью изображений на расстояниях, отличающихся от расстояния R_h на значения от -800 до 1000 нм с шагом 50 нм. Прочие параметры синтеза были аналогичны параметрам, используемым в экспериментах, описанных в разд. 1.

Результаты экспериментов представлены на рис. 6 в виде графиков, где на оси абсцисс выведены значения дефокусировки, а на оси ординат — нормированное по максимуму число допустимых уровней (градаций) пороговой обработки, при котором структура восстановленного изображения была идентична структуре объекта.

На графиках хорошо видно, что использование второго фотошаблона, содержащего только тонкую линию, позволяет увеличить как глубину резкости в 1,5–2 раза по сравнению с применением объекта без дополнительных фотошаблонов, так и качество изображения. Однако использование второго фотошаблона в полном объёме является более эффективным. При этом подстановка третьего фотошаблона не приносит значительных результатов в плане увеличения глубины резкости, что обусловлено превышением расстояния между первым и третьим фотошаблоном по сравнению с расчётным значением глубины резкости.

Заключение. В рамках данной работы показано существенное влияние структуры исходного объекта, т. е. размера и вида составляющих его элементов, на синтезируемую голограмму-проектор и, следовательно, на восстановленное изображение. Рассмотрены зависимости оптимальных условий синтеза и бинаризации полутоновой голограммы от структуры объекта.

Продемонстрирована эффективность метода увеличения глубины резкости восстановленного изображения путём подстановки дополнительного объектного фотошаблона. Уста-

новлена зависимость глубины резкости восстановленного изображения от формы представления объекта, синтезированного при использовании двух фотошаблонов. Показано, что полное представление объекта на обоих транспарантах является более эффективным, чем представление на втором фотошаблоне только части структуры объекта, содержащей лишь малоразмерные детали. По результатам проведённых исследований выработаны рекомендации по выбору параметров синтеза голограммы и формы представления объекта, обеспечивающих наибольшую глубину резкости восстановленного изображения и как можно большее соответствие восстановленного изображения объекту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кольер Р., Беркхард К., Лин Л.** Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
2. **Clube F. S., Gray S., Struchen D. et al.** Holographic microlithography // *Opt. Eng.* 1995. **34**, N 9. P. 2724–2730.
3. **Maiden A., McWilliam R., Purvis A. et al.** Nonplanar photolithography with computer-generated holograms // *Opt. Lett.* 2005. **30**, N 11. P. 1300–1302.
4. **Bay C., Hübner N., Freeman J., Wilkinson T.** Maskless photolithography via holographic optical projection // *Opt. Lett.* 2010. **35**, N 13. P. 2230–2232.
5. **Levenson M. D., Johnson K. M., Hanchett V. C., Chiang K.** Projection photolithography by wave-front conjugation // *JOSA.* 1981. **71**, N 6. P. 737–743.
6. **Martinez-Leon L., Clemente P., Mori Y. et al.** Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination // *Opt. Express.* 2017. **25**, N 5. P. 4975–4984.
7. **Zhang Y., Lu Q., Ge B.** Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography // *Opt. Commun.* 2004. **240**, N 4–6. P. 261–267.
8. **Корешев С. Н., Никаноров О. В., Смородинов Д. С.** Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства // *Компьютерная оптика.* 2016. **40**, N 6. С. 793–801.
9. **Гудмен Дж.** Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.
10. **Курбатова Е. А., Черёмхин П. А.** Бинаризация цифровых голограмм для задач с применением микрзеркального модулятора // Тез. докладов XVI междунар. конф. по голографии и прикладным оптическим технологиям. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. С. 356–359.
11. **Корешев С. Н., Смородинов Д. С., Никаноров О. В., Громов А. Д.** Обеспечение равной интенсивности элементов изображений бинарных объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов // *Оптика и спектроскопия.* 2013. **114**, № 2. С. 150–155. DOI: 10.7868/S003040341302013X.
12. **Корешев С. Н., Никаноров О. В., Громов А. Д.** Метод синтеза голограмм-проекторов, основанный на разбиении структуры объекта на типовые элементы, и программный комплекс для его реализации // *Оптический журнал.* 2012. **79**, № 12. С. 30–37.
13. **Корешев С. Н., Смородинов Д. С., Старовойтов С. О.** Влияние нелинейности синтезированных голограмм на их изображающие свойства // *Оптический журнал.* 2019. **86**, № 4. С. 38–44. DOI: 10.17586/1023-5086-2019-86-04-38-44.
14. **Ландсберг Г. С.** Оптика. М.: Физматлит, 2003. 848 с.
15. **Фотокинетика: Энциклопедия** / Гл. ред. Е. А. Иофис. М.: Сов. энциклопедия, 1981. 447 с.
16. **Басов И. В., Краснобаев А. А.** Методы увеличения глубины резкости оптико-цифровых регистраторов изображения. М.: ИПМ им. М. В. Келдыша, 2010. **37**. 32 с. (Препр. / ИПМ РАН; 2010-37.)
17. **Shain W. J., Vickers N. A., Goldberg B. B. et al.** Extended depth-of-field microscopy with a high-speed deformable mirror // *Opt. Lett.* 2017. **42**, N 5. P. 995–998.

18. **Корешев С. Н., Смородинов Д. С., Фролова М. А.** Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм // Оптический журнал. 2018. **85**, № 11. С. 50–57. DOI: 10.17586/1023-5086-2018-85-11-50-57.

Поступила в редакцию 22.11.2019

После доработки 20.01.2020

Принята к публикации 22.01.2020
