

УДК 535.421

## МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС СИНТЕЗА И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ ФРЕНЕЛЯ

С.Н. Коршев, А.Д. Громов, О.В. Никаноров

Представлен модернизированный вариант специализированного программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля. Примененный алгоритм основан на новом методе синтеза голограмм-проекторов, заключающемся в разбиении объекта на типовые элементы его структуры. Достоинством метода является обеспечиваемая им возможность существенного сокращения объема требуемых вычислений. Проведена оценка производительности предлагаемого метода. Приведены результаты экспериментальной проверки работоспособности модернизированного комплекса.

**Ключевые слова:** голографическая проекционная фотолиитография, голограмма-проектор, синтез голограмм, цифровое восстановление голограмм, алгоритм, программный комплекс.

### Введение

В современной литературе имеются сведения о разработках голографических фотолиитографических систем на основе практически всех известных видов голограмм, в частности, голограмм Френеля [1, 2], голограмм сфокусированного изображения [3, 4]. Особый интерес вызывает возможность использования синтезированных голограмм [5, 6]. Наиболее перспективными представляются системы, основанные на использовании отражательной рельефно-фазовой синтезированной голограммы-проектора Френеля (ГПФ), рассчитываемой с помощью компьютера и отображаемой на носителе с помощью лазерного или электронно-лучевого генератора изображения.

Основные трудности при изготовлении синтезированных ГПФ вызывают процессы синтеза и отображения на носителе рассчитанной голограммной структуры. В процессе синтеза объект представляется в виде работающего на пропускание бинарного двумерного дискретного транспаранта. Сложность синтеза ГПФ обуславливается, в первую очередь, необходимостью предельно точного математического описания процесса формирования голографического поля, не допускающего использования приближения Фраунгофера и Френеля, так как при выборе оптимальных параметров схемы предполагается использовать малое расстояние между плоскостью объекта и голограммы [7, 8] в сочетании с необходимостью минимизации влияния дискретного представления двумерного объекта и синтезированной голограммы, присущего цифровым голограммам, на качество восстанавливаемых с их помощью изображений [7].

Из доступной литературы, посвященной синтезу и отображению на носителе ГПФ, предназначенных для использования в фотолитографическом процессе, наибольший интерес вызывают работы [5, 6, 9]. Отметим, что демонстрация фотолитографического процесса, реализованного с помощью синтезированной ГПФ, была осуществлена в СПб НИУ ИТМО [9] с помощью разработанного авторами специализированного комплекса синтеза и восстановления ГПФ [10]. Реализованные в этом комплексе методы синтеза и восстановления основывались на принципе Гюйгенса–Френеля. В основу метода положено математическое описание физических процессов записи и восстановления ГПФ.

Соответствующий ему алгоритм синтеза моделирует физический процесс формирования голографического поля. При этом считается, что объект, представляющий собой работающий на пропускание бинарный двумерный транспарант, установленный параллельно плоскости синтеза голограммы на расстоянии  $h$  от нее, освещается параллельным пучком когерентного излучения, нормально падающего на поверхность транспаранта. В качестве опорной волны в рассматриваемом методе используется плоская волна, падающая под углом  $\theta$  на плоскость синтеза ГПФ. Расчет распределения амплитуды объектной волны в плоскости синтеза голограммы в этом методе сводится к векторному суммированию комплексных амплитуд полей, формируемых точками объекта (рис. 1).

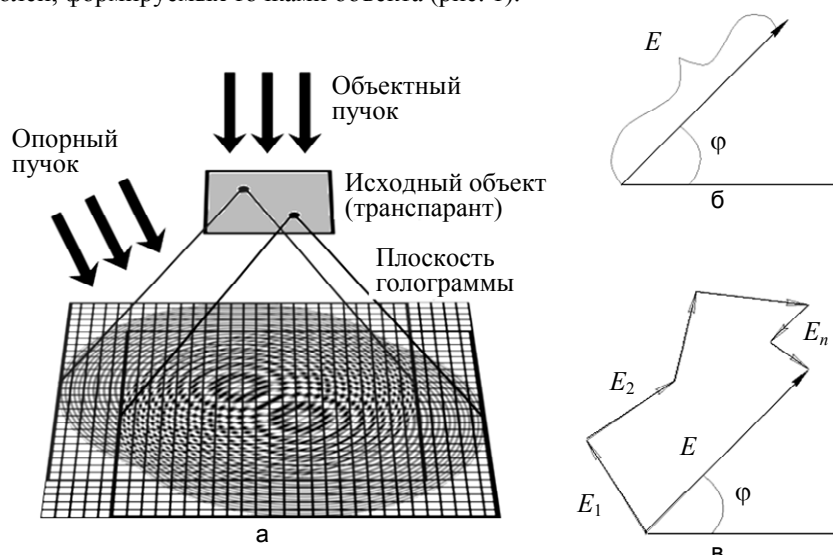


Рис. 1. Метод синтеза ГПФ на основе вычисления комплексного вектора электромагнитного поля, состоящий в суммировании комплексных амплитуд полей, формируемых точками объекта (а), в представлении комплексной амплитуды в виде вектора (б) и в суммировании комплексных амплитуд (в)

Амплитуда объектной волны, рассчитанная для каждой точки плоскости синтеза голограммы, складывается с соответствующей амплитудой опорной волны. Полученная сумма амплитуд возводится по модулю в квадрат, тем самым, определяется распределение интенсивности голографического поля, соответствующего синтезируемой ГПФ.

Описанный метод синтеза ГПФ обладает несомненным достоинством, заключающимся в возможности достижения высокой точности расчета структуры ГПФ. Вместе с тем он не свободен от недостатков. Основным из них, на взгляд авторов, является большой объем требуемых вычислений, особенно при сложной структуре объекта, например, при разводке жидкокристаллических дисплеев.

#### Метод синтеза ГПФ, основанный на использовании типовых элементов структуры объекта

Необходимость повышения производительности процесса синтеза ГПФ привела к разработке нового метода. В его основу положено разбиение исходного объекта на типовые элементы его структуры с последующим использованием в процессе синтеза голограммы заранее рассчитанных амплитуд волновых полей, сформированных этими типовыми элементами объекта. Суть алгоритма состоит в том, что

одинаковые элементы объекта, например точки, формируют одинаковые картины распределения комплексных амплитуд в плоскости синтеза голограммы до момента наложения опорной волны.

Таким образом, представляя объект в виде набора типовых элементов, при расчете амплитуды объектной волны в процессе синтеза голограммы можно ограничиться лишь расчетом локальной области распределения комплексной амплитуды для каждого типа элементов из этого набора. Это допустимо из-за дискретизации голограммы, приводящей к ограничению максимальной частоты, которая может быть записана [7]. Описываемую картину распределения комплексной амплитуды, полученную от типового элемента, условно назовем «штампом». Также стоит отметить, что для исключения несовмещения фрагментов штампов необходимо, чтобы отношение периода дискретизации объекта к периоду дискретизации голограммы было целым числом.

Впоследствии необходимо последовательно накладывать штампы в местах голограммы, соответствующих одинаковым элементам, на которые разбит объект; условно назовем этот метод «штамповкой». При пересечении штампов производится сложение значений комплексных амплитуд.

Голограммы, полученные с использованием нового алгоритма, представлены на рис. 2.

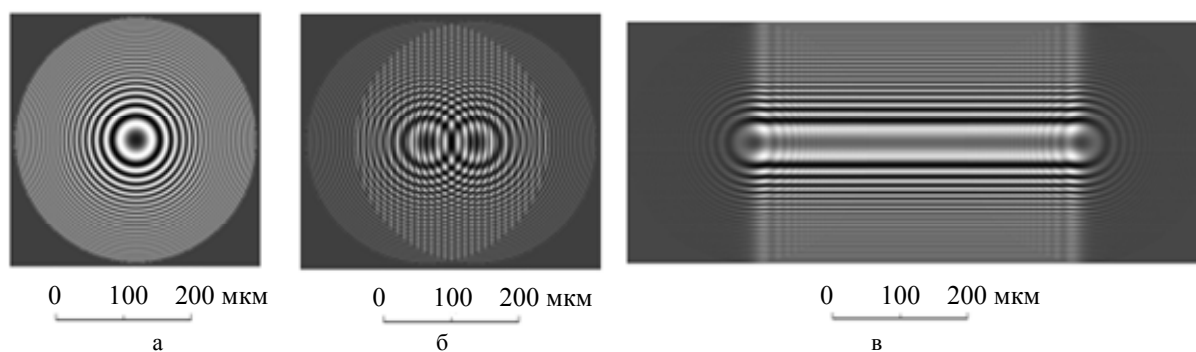


Рис. 2. Голограммы точки (а), двух точек (б) и линии (в), синтезированные с помощью предлагаемого метода

#### Оценка производительности предлагаемого метода

При сравнительной оценке производительности описываемого метода следует выделить два наиболее ресурсоемких показателя синтеза голограммы одной светящейся точки:  $P_e$  – количество машинных операций, необходимое для расчета распределения комплексной амплитуды от одной светящейся точки (расчет штампа);  $P_{sum}$  – количество операций, необходимое для записи штампа в матрицу, описывающую плоскость голограммы. Количество операций, необходимое для расчета голограммы из  $N$  элементов, при использовании предыдущего метода составляет

$$P_1 = (P_e + P_{sum})N,$$

а для предлагаемого –

$$P_2 = P_e + P_{sum}N.$$

Тогда снижение ресурсоемкости синтеза можно оценить как

$$k = \frac{(P_e + P_{sum})N}{P_e + P_{sum}N}.$$

При расчете голограмм особо сложных объектов величиной  $P_e$  в знаменателе можно пренебречь, тогда

$$k \approx \frac{(P_e + P_{sum})N}{P_{sum}N} = \frac{P_e}{P_{sum}} + 1.$$

Необходимо учитывать, что из-за отсутствия сложных операций (возведение в степень, извлечение квадратного корня и т.д.)  $P_{sum}$  намного меньше  $P_e$ .

При этом целесообразно проводить разбивку объекта на типовые элементы, обладающие различными видами симметрии, в результате чего возможно дополнительное сокращение времени, затрачиваемого на расчет штампов, так как распределение комплексной амплитуды у симметричных объектов также симметрично.

На рис. 3 проиллюстрирован типовой алгоритм расчета картины распределения комплексной амплитуды для элемента с центральной симметрией на примере вещественной части штампа. В данном случае необходимо провести расчет только одной «четверти» распределения. Полученную в итоге «четверть» необходимо скопировать с поворотом на остальные 3 «четверти». Это действие не приведет к дополнительному боковому смещению фрагментов при рекомендованном выше выборе соотношения дискретизации голограммы и объекта и повороте на угол, кратный  $90^\circ$ .

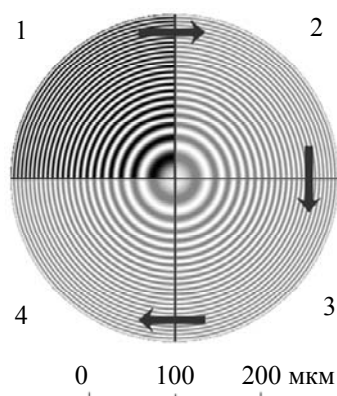


Рис. 3. Синтез картины распределения комплексной амплитуды элемента с центральной симметрией (на примере вещественной части штампа)

При практической оценке производительности с помощью комплексов, в которых реализованы сравниваемые методы, были синтезированы голограммы размером  $1560 \times 1560$  пикселей с периодом дискретизации 1 мкм. В качестве объекта использовалось бинарное изображение размером  $80 \times 80$  пикселей с периодом дискретизации 4 мкм. Площадь структуры составляла 20% от общей площади. Длина волны излучения  $\lambda$  была выбрана равной 488 нм, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы  $h$  составило 5,062 мм, а угол падения опорного пучка  $\theta$  был принят равным  $10,5^\circ$ . Выбор таких параметров предопределен результатами работы [7]. При оценке результатов было установлено, что использование модернизированного комплекса позволяет сократить время расчета тестовой голограммы с 1 часа 13 минут 40 секунд до 14 минут 26 секунд.

#### Проверка работоспособности модернизированного программного комплекса

Работоспособность предлагаемого метода синтеза была проверена экспериментально. С помощью программных комплексов, реализующих прежний и модернизированный методы, и при использовании параметров, выбранных в соответствии с результатами работы [7], синтезированы две отражательные рельефно-фазовые бинарные ГПФ, предназначенные для работы с длиной волны излучения  $\lambda = 13,5$  нм. В качестве тестового использовалось бинарное изображение реперных знаков размером  $23 \times 23$  пикселя (рис. 4) с периодом дискретизации  $a = 80$  нм.

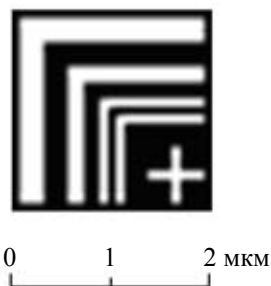


Рис. 4. Изображение исходного объекта

Размер синтезированных ГПФ составлял  $435 \times 435$  пикселей с периодом дискретизации  $d = 20$  нм, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы  $h$  было принято равным 20,3 мкм, а угол падения опорного пучка  $\theta$  составил  $14,7^\circ$ .

На рис. 5 представлены изображения бинаризованных голограмм, синтезированных с помощью сравниваемых программных комплексов.

Восстановление синтезированных бинарных рельефно-фазовых отражательных голограмм осуществлялось в виртуальном пространстве с помощью программного комплекса в соответствии с параметрами их синтеза. Восстановленные изображения (рис. 6) имеют схожий интервал уровней порога, имитирующего реакцию фоторезиста на засветку актиничным излучением. По величине этого интервала можно судить о сложности подбора экспозиции при физическом восстановлении, а значит, данная величина может быть выбрана критерием качества восстанавливаемого изображения [10].

Схожий интервал уровней порога (62 и 72 градации серого из 256) и идентичность структур после пороговой обработки свидетельствует о работоспособности модернизированного программного ком-

плекса, т.е. существует значение экспозиции, при которой можно получить изображение идентичное исходному объекту [10].

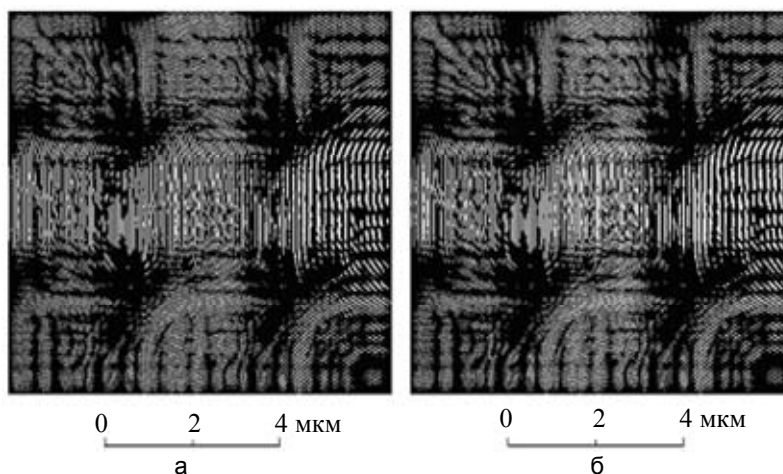


Рис. 5. Бинарные голограммы, синтезированные с помощью немодернизированного (а) и модернизированного программного комплекса (б)

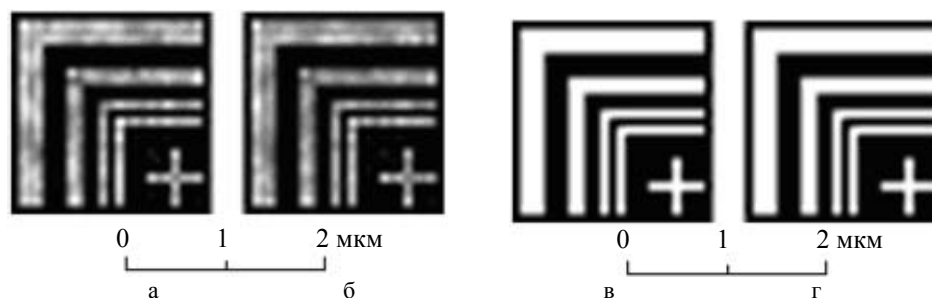


Рис. 6. Изображения, полученные при восстановлении голограммы, синтезированной немодернизированным комплексом (а) и модернизированным комплексом (б); те же изображения после пороговой обработки: немодернизированным комплексом (в) и модернизированным комплексом (г)

### Заключение

Проведена модернизация программного комплекса синтеза голограммы-проектора Френеля. Применен метод «штамповки», в основу которого положено разбиение исходного объекта на типовые элементы его структуры и последующее использование в процессе синтеза голограммы заранее рассчитанных амплитуд волновых полей, сформированных этими типовыми элементами. Это позволило существенно сократить время синтеза голограммы-проектора Френеля. Представлена теоретическая и экспериментальная оценка производительности предлагаемого метода синтеза. Работоспособность комплекса подтверждена экспериментально в ходе сравнения результатов синтеза и восстановления голограмм, полученных при использовании исходного и модернизированного комплексов.

### Литература

1. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Использование метода голографии для получения изображений двумерных объектов при решении задач фотолитографии высокого разрешения // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71. – № 10. – С. 32–39.
2. Koreshev S.N., Ratushnyi V.P. Holographic method for obtaining images with limiting high resolution for extreme shot-wave lithography problems // Proc. SPIE. – 2004. – V. 5290. – P. 221–232.
3. Clube F., Gray S., Struchen D., Tisserand J., Malfroy S., Darbellay Y. Holographic microlithography // Opt. Eng. – 1995. – V. 34. – № 9. – P. 2724–2730.
4. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Голограммы сфокусированного изображения в задаче высокоразрешающей проекционной голографической фотолитографии // Оптика и спектроскопия. – 2006. – Т. 101. – № 6. – С. 1038–1042.
5. Jacobsen C., Howells M. Projection x-ray lithography using computer-generated holograms: A study of compatibility with proximity lithography // J. Appl. Phys. – 1992. – V. 71. – P. 2993–3001.

6. Naullenau P.P., Salmassi F., Cullikson E.M., Liddle J.A. Design and fabrication of a high-efficiency extreme-ultraviolet binary phase-only computer-generated hologram // *Appl. Optics.* – 2007. – V. 46. – № 14. – P. 258–2585.
7. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Козулин И.А. Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов для фотолинтографии // *Оптический журнал.* – 2008. – Т. 75. – № 9. – С. 29–34.
8. Домненко В.М., Бурсов М.В., Иванова Т.В. Моделирование формирования оптического изображения: Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 141 с.
9. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Ратушный В.П. Восстановление синтезированных голограмм-проекторов Френеля при углах падения восстанавливающей волны, превышающих угол падения опорной волны при синтезе голограммы // *Оптика и спектроскопия.* – 2011. – Т. 111. – № 1. – С. 156–161.
10. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Иванов Ю.А., Козулин И.А. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов: влияние параметров синтеза на качество восстановленного изображения // *Оптический журнал.* – 2010. – Т. 77. – № 1. – С. 42–48.

- Корешев Сергей Николаевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Koreshev@list.ru
- Громов Александр Дмитриевич** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Warhammer@bk.ru
- Никаноров Олег Викторович** – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, инженер-программист, Nikanorovov@gmail.com