

УДК 535.421

**ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СИНТЕЗА И ЦИФРОВОГО  
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ****О.В. Никаноров, Ю.А. Иванов, С.Н. Корешев**

Рассмотрены особенности синтеза голограмм-проекторов, предназначенных для использования в голографическом варианте фотолитографического процесса. Сформулирована и обоснована необходимость поиска альтернативных методов фотолитографии. Основное внимание уделено алгоритмам синтеза и восстановления голограмм-проекторов. Представлен интерфейс созданного программного комплекса. Обсуждаются примеры синтеза и последующего восстановления изображения тестового объекта.

**Ключевые слова:** голограмма, синтез, восстановление, фотолитография.

**Введение**

В настоящее время наметилась тенденция к разделению подходов к фотолитографическим технологиям, используемым для изготовления различных электронных, оптоэлектронных и дисплейных элементов и систем. Для первого подхода основной задачей является стремление к более высокому разрешению, что приводит к необходимости применения малых полей зрения, при втором же подходе для ускорения производственных процессов и понижения стоимости продукции первоочередным является использование широких полей зрения при достаточно высоком разрешении. При этом уменьшения минимального отображаемого характеристического размера изготавливаемых структур добиваются путем увеличения разрешающей способности используемых для этих целей оптических систем. Традиционный метод повышения разрешения основан на увеличении апертуры объектива и уменьшении длины волны. Он приводит к постепенному переходу в более коротковолновую область, в том числе и экстремально коротковолновую ультрафиолетовую и рентгеновскую, для которых нет оптически

прозрачных сред, пригодных для создания объективов-рефракторов. Так, при работе на длине волны 13 нм могут использоваться только зеркальные объективы. Существенными недостатками зеркальных систем являются малые поля зрения, необходимость большого количества отражающих поверхностей и сложность их изготовления [1, 2].

Все вышеперечисленное приводит к необходимости поиска альтернативных методов фотолитографии. Одним из перспективных вариантов решения данной проблемы является использование отражательных рельефно-фазовых голограмм, так как в этом случае не используются прозрачные среды, а размер одновременно экспонируемой области полупроводниковой пластины в большей степени зависит от когерентности источников излучения и характеристик расширителей пучков, чем от полевых aberrаций проекционного объектива, в качестве которого используется голограмма-проектор.

В современной литературе имеются сведения о разработках голографических фотолитографических систем на основе практически всех известных видов голограмм, в частности, голограмм Френеля, голограмм сфокусированного изображения и синтезированных голограмм [3]. Метод цифровой голографии, основанный на применении синтезированных голограмм-проекторов при решении фотолитографических задач, заключается в цифровом синтезе и аналоговом физическом восстановлении топологии микросхем. Под голограммой-проектором в настоящей работе мы понимаем голограммы, предназначенные для точного, т.е. безабберационного, формирования действительного изображения двумерных амплитудных бинарных транспарантов, пригодных для использования в фотолитографических технологиях [4].

Применение цифровой голографии позволяет исключить этап использования физического фотошаблона для создания голограммы. Вместо этого достаточно создать виртуальный цифровой шаблон, с использованием которого синтезируется цифровая голограмма, наносимая с помощью генератора изображения на стеклянную пластину, покрытую слоем фоторезиста. При этом в зависимости от пространственных частот изготавливаемой голограммы отображение голограммной структуры на носителе может осуществляться с помощью коммерчески доступных лазерных и электронно-лучевых генераторов изображений [5]. В известной нам на данный момент литературе описаны лазерные генераторы изображений, способные воспроизводить элементы порядка 1 мкм. Однако уже есть технологии, позволяющие фокусировать пучки электронов в точку, размеры которой не превышают 10 нм.

В доступной нам литературе содержатся сведения о попытках использования принципов цифровой голографии при решении задач ультракоротковолновой проекционной фотолитографии, однако практически полностью отсутствует описание используемых алгоритмов и программно-аппаратного комплекса. Кроме того, в доступных нам источниках отсутствуют сведения об успешном внедрении методов цифровой голографии в фотолитографический процесс. Все сказанное приводит к необходимости разработки оригинального метода цифрового синтеза голограмм, пригодных для использования в фотолитографическом процессе. С этой целью нами была выполнена работа, направленная на создание программного комплекса синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов. При этом восстановление использовано нами для проверки работоспособности алгоритма синтеза.

### **Метод синтеза голограмм-проекторов**

При создании алгоритма синтеза был выбран метод на основе вычисления комплексного вектора электромагнитного поля, так как при расчетах в нем меньше приближений в сравнении с методами Фурье и Френеля. Данный метод описывает физические процессы при регистрации реальной голограммы. Его суть сводится к вычислению

для каждой точки голограммы комплексной амплитуды голографического поля, формируемого всеми точками исходного объекта.

В данной работе рассматривается случай, при котором виртуальный транспарант освещается когерентным пучком, перпендикулярно падающим на ее поверхность. Таким образом, транспарант можно представить в виде набора точечных когерентных источников света с одинаковой фазой. Поэтому набег фазы от источника до точки голограммы (1) будет зависеть от расстояния между ними  $l$ , описанного выражением (2):

$$\varphi_{u,v,n,m} = \frac{2\pi l_{u,v,n,m}}{\lambda}, \quad (1)$$

$$l_{u,v,n} = \sqrt{(u-m)^2 + (v-n)^2 + h^2}. \quad (2)$$

Тогда выражение (3) описывает комплексный вектор электромагнитного поля точки на голограмме.

$$\varphi_{u,v,n,m} = \frac{2\pi l_{u,v,n,m}}{\lambda}, \quad (3)$$

где  $u, v$  и  $x, y$  – координаты на голограмме и транспаранте соответственно, а  $h$  – расстояние между этими плоскостями. На рис. 1 представлено графическое отображение данного выражения.

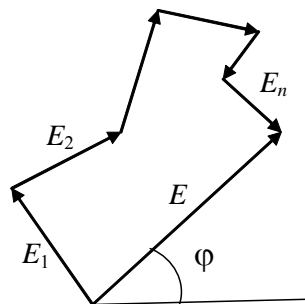


Рис. 1. Суммирование комплексных амплитуд

Представим опорную волну в виде параллельного пучка, падающего под углом  $\Theta$ . Исходя из геометрии задачи (рис. 2), можно определить зависимость фазы опорного пучка на поверхности голограммы от координат и угла наклона (4):

$$\phi_{\text{оп}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \Delta}{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot x \cdot \sin \Theta}{\lambda}. \quad (4)$$

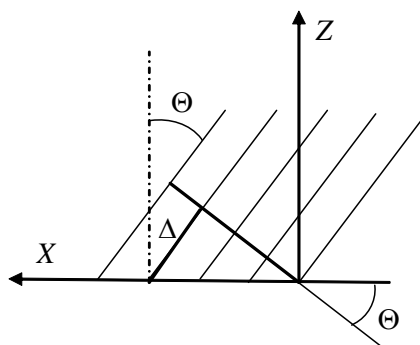


Рис. 2. Параллельный опорный пучок

Далее для каждой точки голограммы складываются комплексные амплитуды электромагнитного поля опорного пучка и излучения, прошедшего через транспарант. Тем самым мы получаем массив общих комплексных амплитуд для каждой точки голограммы необходимый для ее отображения и печати. Возведя каждый элемент выборки в квадрат, получим набор интенсивностей точек голограммы [5, 6].

После расчета голограмма может быть нанесена на какой-либо физический носитель и восстановлена. При использовании генераторов изображений, отображающих только две градации, необходимо произвести бинаризацию. В данной работе она осуществляется способом, описанным выражением (5):

$$\begin{cases} 1, & I \geq t, \\ 0, & I < t, \end{cases} \quad (5)$$

где  $t$  – уровень бинаризации. Преимущество бинарной голограммы в сравнении с серой голограммой заключается в возможности практического отображения голограммы на носителе, а также в большей дифракционной эффективности [7].

Для проверки созданного алгоритма и исследования влияния параметров синтеза на формируемое голограммой изображение был создан алгоритм восстановления, причем для надежности был выбран другой алгоритм, нежели при синтезе.

Метод восстановления изображения с помощью преобразования Френеля является параксиальным приближением интеграла Рэлея–Зоммерфельда. Основой этого метода является вычисление интеграла Френеля, который описывает распределение интенсивности в плоскости изображений. Преобразование Френеля для двумерного объекта при этом принимает вид (6), а его дискретное представление – (7) [8–14].

$$G(\xi, \eta) = \iint_{-\infty}^{\infty} t(x, y) \exp \left\{ -i \frac{\pi}{\lambda d} [(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2] \right\} dx dy, \quad (6)$$

$$G(\xi, \eta) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N t(n, m) \exp \left\{ -i \frac{\pi}{\lambda h} [(\xi - n)^2 + (\eta - m)^2] \right\}. \quad (7)$$

### Интерфейс программы

На рис. 3 представлен интерфейс созданной программы.

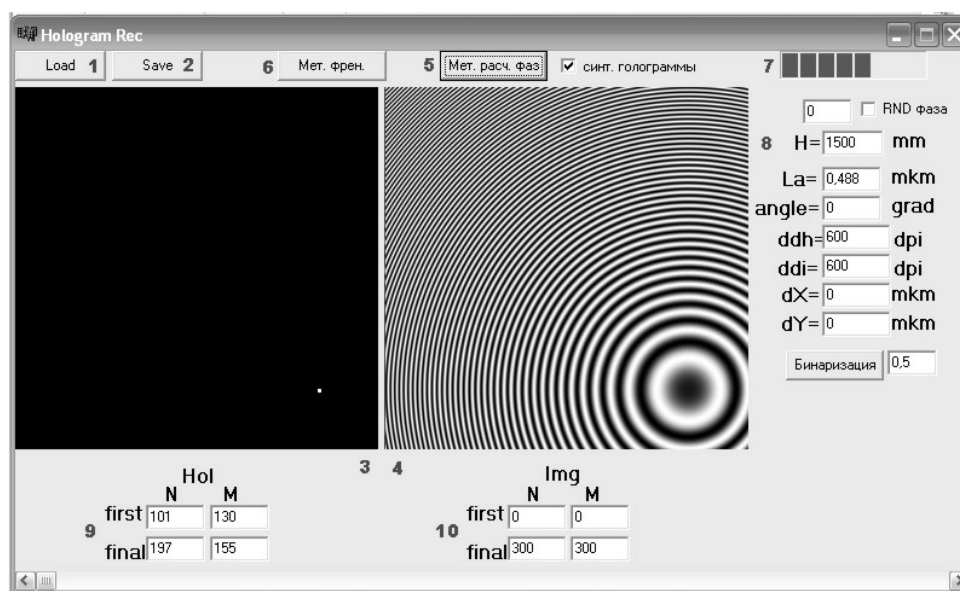


Рис. 3. Интерфейс программы

Пунктами **1** и **2** отмечены кнопки для загрузки исходного и сохранения в файл рассчитанного изображения, которые отображаются в областях **3** и **4**. В поле **7** отображается ход выполнения расчета. Кнопка **5** служит для запуска алгоритма синтеза голограммы, а **6** – для восстановления. В полях **8** задаются такие параметры, как  $H$  – рас-

стояние между плоскостями голограммы и изображения, разрешение, угол падения опорного пучка  $\Theta$  и смещение области регистрации в пространстве. Пунктами **9** и **10** отмечены поля, в которых можно задать области голограммы и изображения, которыми будет оперировать алгоритм. Кнопка **11** запускает алгоритм бинаризации по уровню, указанному в поле **12**.

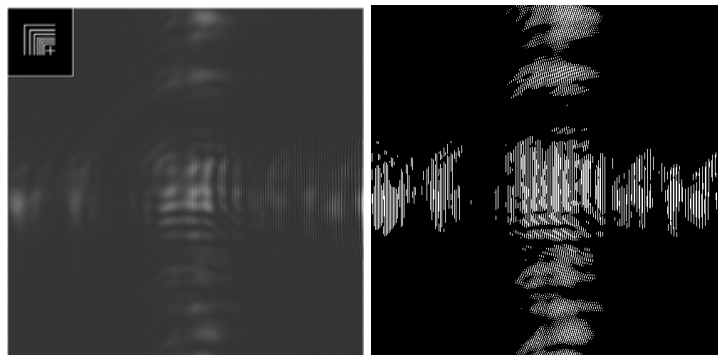


Рис. 4. Пример синтезированной голограммы в тоновом и бинарном виде

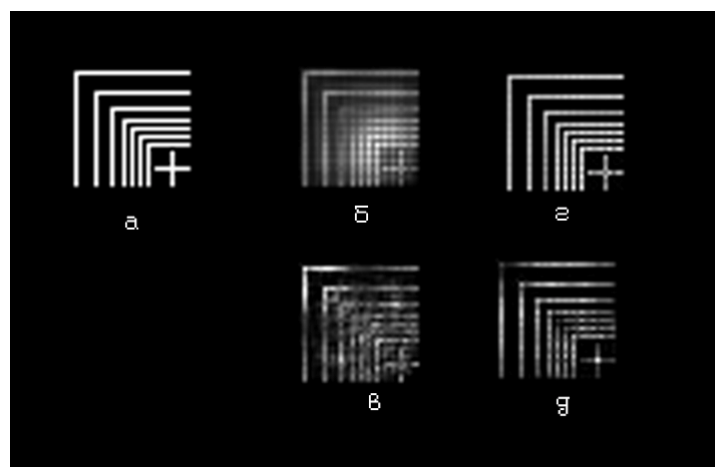


Рис. 5. Варианты изображений: а – исходное; б, г – при различных углах падения опорного пучка; в, д – от бинарных голограмм

Было проведено тестирование программного комплекса, показавшее положительные результаты. На рис. 4 приведен пример исходного изображения (слева сверху) и синтезированных с его помощью голограмм-проекторов.

При восстановлении были получены результаты, представленные на рис. 5. Изображения рис. 5, б и в, были получены при нормальном падении опорного пучка, а рис. 5, г и д – при  $\Theta = 10,5^\circ$ . Улучшение качества структуры связано с пространственным разделением порядков дифракции. Заметно, что бинаризация привела к потере информации, записанной на голограмме (рис. 5, в, д).

### Заключение

Данная работа была направлена на исследование возможности компьютерного синтеза голограмм для последующего использования в фотолитографии. Основные результаты настоящей работы состоят в следующем:

- разработан алгоритм синтеза голограмм-проекторов;
- разработан алгоритм восстановления;

- реализована программная оболочка и создан интерфейс программы;
- проведено тестирование, показавшее положительные результаты.

### 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. Clube F., Gray S., Struchen D., Tisserand J., Malfoy S., Darbellay Y. Holographic microlithography // Opt. Eng. 1995. – Vol. 34. – № 9. – P. 2724–2730.
3. 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.
4. 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.
5. 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. 2581–2585.
6. Кольер Р., Беркхард К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
7. Семенов Г.Б., Корешев С.Н. Дифракционная эффективность и некоторые особенности спектров дискретных амплитудных бинарных голограмм // Оптика и спектроскопия. – 1976. – Т. 41. – № 2. – С. 310–314.
8. Гудмен Дж. введение в Фурье-оптику. – М.: Мир, 1970. – 364 с.
9. W. Silfvast High Precision Soft X-ray Optics // Proceedings of a workshop held in Rockville, MD, Oct. 1989.
10. Levenson M., Johnson K., Hanchett V. Projection photolithography by wave-front conjugation // J. Opt Soc. Am. – 1981. – Vol. 71. – P. 737–739.
11. Lohmann A.W., Paris D.P. Binary Fraunhofer Holograms, Generated by Computer // JOSA. – 1967. – Vol. 56. – № 4. – P. 535.
12. Lohmann A.W. Variable Fresnel zone pattern // Appl. Optics – 1967. – Vol. 6. – P. 9.
13. Cooley J.W., Tukey J.W. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series // Math. of Comput. – 1965. – Vol. 19. – P. 297–301.
14. Ландсберг Г. С. Оптика: Учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2003.

**Никаноров Олег Викторович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, магистр технических наук, аспирант, nikanorovov@ya.ru

**Иванов Юрий Александрович**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, бакалавр технических наук, студент, drunkcow@mail.ru

**Корешев Сергей Николаевич**

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, koreshev@list.ru