

ГОЛОГРАФИЯ

УДК 535.417; 535.317; 778.38

СИНТЕЗ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ НА НЕПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

© 2015 г. С. Н. Корешев, доктор техн. наук; О. В. Никаноров, канд. техн. наук;
Д. С. Смородинов, аспирант; А. Д. Громув, аспирант

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: smorodinov.denis@gmail.com

Рассмотрено влияние бинаризации и диффузной подсветки объекта на глубину резкости изображения, восстанавливаемого с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля. Приведены результаты экспериментального исследования, подтверждающие возможность и эффективность использования специализированного программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля для синтеза голограмм-проекторов, предназначенных для реализации голографического варианта фотолитографического процесса на неплоских поверхностях.

Ключевые слова: синтез голограмм, криволинейная поверхность, фотолитография, объёмный объект, голограмма-проектор Френеля, глубина резкости, бинаризация, диффузная подсветка.

Коды OCIS: 090.0090

Поступила в редакцию 25.09.2014

Введение

Современное развитие электроники и микропроцессорной техники невозможно без постоянного совершенствования технологии фотолитографии. В настоящее время можно выделить устойчивую тенденцию к уменьшению размеров электронных и оптоэлектронных элементов, обуславливающую необходимость увеличения разрешающей способности используемых для их изготовления оптических фотолитографических систем. Традиционный метод повышения разрешающей способности оптической системы основан на увеличении её апертуры и уменьшении рабочей длины волны. Его применение, как правило, приводит к уменьшению глубины резкости оптической системы и к уменьшению размеров одномоментно отображаемого участка изготавливаемого изделия. Из этого следует практическая невозможность использования традиционных фотолитографических систем для получения больших по площади изображений с высоким разрешением на неплоских поверхностях. В качестве приме-

ров таких криволинейных поверхностей можно привести полусферу, конус, параболоид, гиперболоид и другие поверхности, которые используются при изготовлении разнообразных оптических элементов, электротехнических разводок проводников, сеток, шкал, экранов и др.

Используемые в настоящее время технологии получения структур на подобных поверхностях весьма трудоёмки и обладают целым рядом ограничений, среди которых можно отметить невозможность одновременного экспонирования значительного по площади участка поверхности изделия и сложность обеспечения равномерного освещения неплоских шаблонов.

В связи с этим весьма перспективным, на наш взгляд, представляется использование для этих целей голограмм-проекторов. В современной литературе имеются сведения о разработках голографических фотолитографических систем на основе практически всех известных видов голограмм, в частности, голограмм Френеля [1, 2], голограмм сфокусированного изображения [3, 4] и синтезированных голограмм [5, 6]. Особый интерес вызывают фотолито-

графические системы, использующие отражающие рельефно-фазовые синтезированные голограммы-проекторы. В качестве основных преимуществ таких голограмм-проекторов можно назвать возможность синтеза голограмм виртуальных объектов сложной формы с последующим восстановлением изображения на неплоских поверхностях и отсутствие необходимости использования оптических материалов, прозрачных в рабочем диапазоне спектра. Кроме того процесс их создания не требует применения реального фотошаблона сложной формы и обеспечения его специфической подсветки, обеспечивающей равномерное освещение его поверхности. Отметим также, что синтезированная голограмма, предназначенная для рассматриваемого фотолитографического процесса на криволинейных поверхностях, может быть выполнена на плоской подложке, что существенно облегчает процесс её отображения на носителе.

Метод синтеза голограмм-проекторов Френеля для фотолитографии на неплоских поверхностях

Из доступной нам литературы, посвящённой синтезу и отображению на носителе голограмм-проекторов, предназначающихся для использования в фотолитографическом процессе, наибольший интерес вызывают работы [5–7]. Отметим, что демонстрация фотолитографического процесса, реализованного с помощью синтезированной голограммы-проектора Френеля, впервые была описана в публикации [7]. Синтез использованной при этом голограммы осуществлялся с помощью разработанного авторами специализированного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля [8]. Реализованный в этом комплексе метод синтеза и восстановления основан на принципе Гюйгенса. В нём заложено математическое описание физических процессов записи и восстановления голограмм-проекторов Френеля, основанное на идеи сложения полей, порождённых типовыми элементами структуры объекта.

При разработке этого метода, предназначавшегося для моделирования телесцентрического хода лучей при освещении фотошаблона, предполагалось, что одинаковые элементы структуры объекта формируют одинаковую картину распределения комплексных ампли-

туд на плоскости голограммы до момента наложения опорной волны. Следовательно, если представить объект в виде набора одинаковых элементов, то останется только рассчитать распределение комплексной амплитуды для каждого типа элементов из этого набора. Такое распределение было условно названо штампом, а основанный на его использовании метод синтеза голограмм – методом штамповки. В соответствии с ним процесс расчета голограммной структуры сводится к последовательному наложению штампов на соответствующие области голограммы. При этом в областях пересечения проводится сложение комплексных амплитуд парциальных волновых полей, порождённых типовыми элементами структуры объекта (рис. 1). Отметим, что применение метода штамповки существенно сокращает время синтеза голограммы, особенно в случае объекта сложной структуры.

В данной работе рассматривается случай внеосевой голограммы с плоской опорной волной, падающей под углом на плоскость синтеза голограммы. При этом объект, т.е. фотошаблон, освещаемый падающим по нормали к нему параллельным пучком света, представляется в виде совокупности двумерных амплитудных бинарных транспарантов, расположенных параллельно плоскости синтеза голограммы, на разном удалении от неё так, что геометрический центр каждого из них считается лежащим на нормали, восстановленной из центра голограммы. При таком взаимном расположении объекта и голограммы штамп объектного поля, т.е. математическое описание пространственного распределения комплексной амплитуды



Рис. 1. Схема синтеза голограммы-проектора изображения, нанесённого на неплоскую поверхность.

волны, порожденной типовым элементом объекта, имеет вид матрицы, подобной математическому образу голограммы. Пространственно штамп привязывается к той же плоскости что и голограмма, т.е. они совмещены, при этом центр типового элемента объекта считается лежащим на нормали, восстановленной из центра штампа. Его размер может быть рассчитан тем же способом, что и размер голограммы, исходя из габаритов типового элемента и параметров схемы синтеза.

После завершения процесса штамповки рассчитанная для каждой точки плоскости синтеза голограммы амплитуда объектной волны складывается с соответствующей амплитудой опорной волны. Полученная таким образом сумма амплитуд возводится по модулю в квадрат и, тем самым, рассчитывается распределение интенсивности голографического поля, соответствующего синтезируемой голограмме-проектору.

Отметим, что настоящая работа направлена на исследование особенностей синтеза и восстановления голограмм объектов, представляющих собой не плоские транспаранты, а транспаранты, выполненные на некой криволинейной поверхности. Поэтому при синтезе голограмм-проекторов существует необходимость разбиения виртуального объекта на набор плоских транспарантов, расстояние между которыми не должно превышать глубину резкости голограммы.

Глубина резкости

Глубина резкости представляет собой один из важнейших параметров фотолитографических проекционных систем [9]. Определим её для описанного выше случая внеосевой голограммы с плоской опорной волной, падающей под углом на плоскость синтеза голограммы. При этих условиях числовая апертура излучения, дифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры фотошаблона, может быть описана с помощью следующего выражения:

$$A = n \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_t}, \quad (1)$$

где A – числовая апертура пучка, n – показатель преломления среды между фотошаблоном и голограммой (для воздуха $n = 1$), α – апертурный угол дифрагировавшего излучения, λ – рабочая длина волны, a_t – характеристический

размер фотошаблона, т.е. минимальный размер элемента его структуры. Из интерференционной теории формирования изображения следует, что глубина резкости формируемого изображения не может превышать значения, описываемого выражением [10]

$$|b| < \frac{2\lambda n}{A^2}. \quad (2)$$

В оптике при расчёте глубины резкости реальных оптических систем традиционно пользуются более строгим выражением [11]

$$b = \pm \frac{\lambda n}{2A^2}. \quad (3)$$

Из представленных выражений видно, что чем больше числовая апертура, а соответственно и разрешающая способность проекционной системы, тем меньше глубина резкости получаемого изображения, и, следовательно, чаще должны располагаться плоские транспаранты при синтезе голограммы объекта, представляющего собой изображение, нанесённое на криволинейную поверхность.

Влияние особенностей структуры голограмм-проекторов на глубину резкости восстанавливаемого изображения

Важной особенностью синтезированных голограмм-проекторов, пригодных для практического использования в фотолитографическом процессе, является то, что для обеспечения работы в коротковолновой области спектра они должны быть рельефно-фазовыми и отражательными. При этом сложность, а в ряде случаев и невозможность отображения требуемой формы профиля рельефа обуславливает необходимость бинаризации голограмм перед их отображением на носителе.

С целью исследования влияния бинаризации на глубину резкости изображения с помощью разработанного ранее программного комплекса [8] были синтезированы и численно восстановлены отражательные рельефно-фазовые голограммы-проекторы Френеля, предназначаемые для работы в излучении с длиной волны 13,5 нм. Синтез осуществлялся при использовании параметров, выбранных в соответствии с результатами работы [12]. В качестве объекта использовалось представленное на рис. 2 бинарное изображение объекта размером 23×23 пиксела,

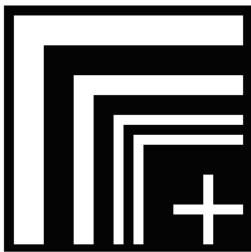


Рис. 2. Изображение исходного объекта.

обладающее характеристическим размером 80 нм (ширина самой тонкой линии на рис. 2). Размер синтезированных голограмм-проекторов был равен 435×435 пикселов, угол падения опорного пучка – $14,7^\circ$, расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы было принято равным 20,35 мкм. Глубина резкости восстановленного изображения при таких параметрах синтеза, согласно выражению (3), должна быть равна ± 237 нм.

В ходе настоящего исследования сравнивались изображения, полученные с помощью полуточновой голограммы и голограмм, бинаризованных при двух оптимальных, с точки зрения качества восстановленного изображения, уровнях бинаризации – 0,33 и 0,22 и при неоптимальном уровне – 0,35 [13]. Расчет распределения интенсивности восстановленного изображения проводился для плоскостей, располагающихся параллельно голограмме на расстоянии 50 нм друг от друга. Расстояние от первой из указанных поверхностей до плоскости голограммы было на 400 нм меньше расстояния от плоскости голограммы до объекта, использовавшегося при синтезе голограммы. Расстояние от голограммы до последней поверхности на 400 нм превышало его. В качестве критерия качества изображения, восстановленного в каждой из указанных плоскостей, принималось, как обычно, число допустимых уровней пороговой обработки восстановленного изображения [7]. Результаты исследования представлены на рис. 3 в виде графиков зависимости числа допустимых уровней пороговой обработки, отнесенных к максимальному числу уровней, достигаемому при данных параметрах синтеза и восстановления голограммы, от дефокусировки. Под последней понималось расстояние между плоскостью, в которой проводился анализ, и плоскостью наилучшей фокусировки изображения, располагающейся на том же расстоянии от голограммы, что и объект при её синтезе. Из представленных графиков следует, что бинаризация синтезированной голограммы

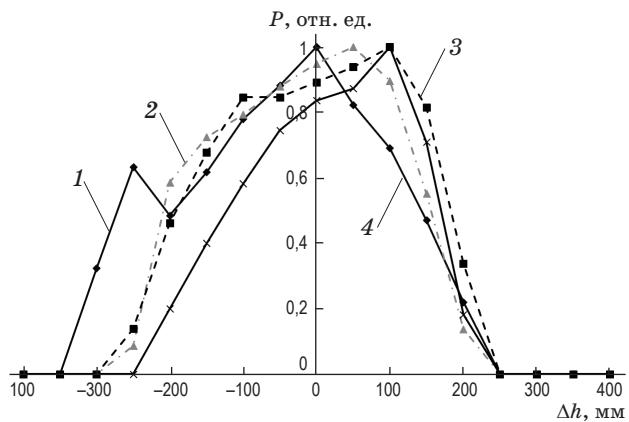


Рис. 3. График зависимостей качества изображения P от дефокусировки при восстановлении бинарных голограмм. 1 – полуточновая голограмма, 2–4 – голограммы, бинаризованные при уровнях бинаризации 0,22, 0,33 и 0,35 соответственно.

практически не оказывает влияния на глубину резкости восстанавливаемого изображения. Наблюдаемые же небольшие отличия в форме представленных на рис. 3 кривых связаны с общим ухудшением качества изображения при переходе от полуточновой голограммы к бинарным голограммам.

Исследование характера влияния диффузной подсветки объекта на глубину резкости синтезированных голограмм осуществлялось путём синтеза и последующего цифрового восстановления голограмм-проекторов Френеля при 6 различных значениях пределов случайног изменения фазы проходящей через объект волны ($0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, 3\pi/2$ и 2π). Цифровое восстановление этих голограмм-проекторов осуществлялось для расстояний от объекта до голограммы, отличавшихся от расстояния, использовавшегося при синтезе, на значения от -400 до 400 нм. Шаг изменения расстояния был выбран равным 50 нм. Работа выполнялась для того же тестового объекта и при тех же параметрах синтеза и восстановления голограмм, которые были использованы в предыдущем эксперименте.

Результаты исследования, нормированные по максимальному числу градаций, представлены на рис. 4. Необходимо заметить, что на представленном графике не наблюдается значительных отличий глубины резкости при восстановлении голограмм с разными вариантами диффузной подсветки, а уменьшение диапазона допустимых уровней пороговой обработки

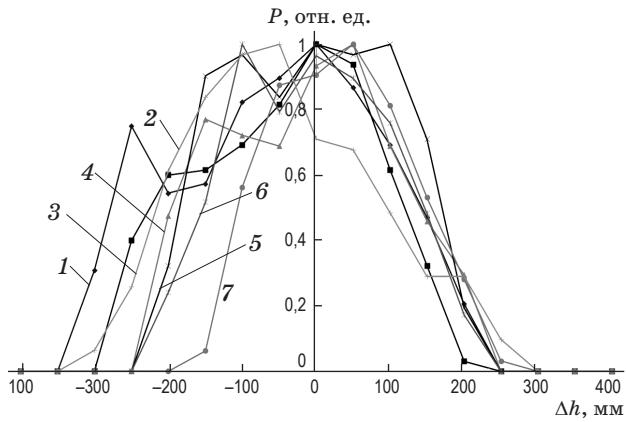


Рис. 4. График зависимостей качества изображения от дефокусировки при различных значениях диапазона диффузной подсветки $\Delta\phi$: 0 – 1, $0,25\pi$ – 2, $0,5\pi$ – 3, $0,75\pi$ – 4, π – 5, $1,5\pi$ – 6, 2π – 7.

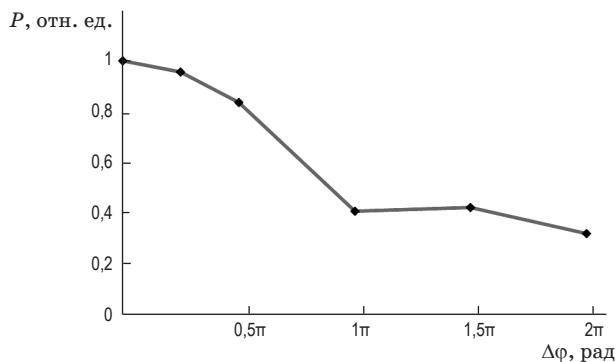


Рис. 5. График зависимости качества изображения от диапазона диффузной подсветки.

связано с общим ухудшением качества изображения при увеличении диапазона случайного изменения фазы. Качество изображения, получаемого с помощью исследуемых голограмм при отсутствии дефокусировки, иллюстрирует рис. 5.

Демонстрация пригодности синтезированных голограмм-проекторов для формирования изображения на неплоских поверхностях

Рассмотренный выше метод синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии на неплоских поверхностях предполагал разбиение виртуального криволинейного объекта на набор плоских транспарантов, расстояние между которыми не превышает глубину резкости голограммы-проектора. Возможность и эффективность такого представления объекта

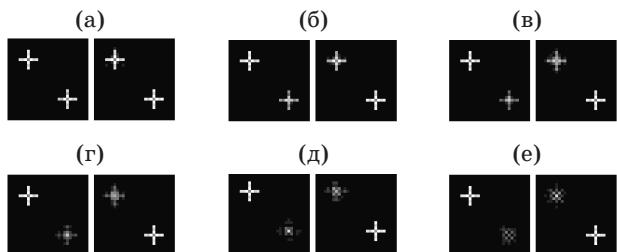


Рис. 6. Изображения, восстановленные в плоскостях, удалённых от голограммы на расстояния h_1 (слева) и h_2 (справа) при различном расстоянии между транспарантами Δh , нм при синтезе голограммы: 200 (а), 300 (б), 400 (в), 500 (г), 600 (д), 700 (е).

при синтезе голограммы-проектора была продемонстрирована экспериментально. С этой целью были синтезированы голограммы объекта, представляющего собой два пространственно разнесенных изображения перекрестий, расположенных на различных расстояниях от голограммы. Разница расстояний от голограммы до первого и второго перекрестий изменялась от голограммы к голограмме и лежала в пределах от 200 до 700 нм, с шагом 100 нм. Работа выполнялась при тех же параметрах синтеза и восстановления голограмм, которые были использованы в предыдущих экспериментах. Восстановление каждой голограммы проводилось для двух значений расстояния между ней и плоскостью регистрации изображения (h_1 и h_2), каждое из которых обуславливало наилучшее восстановление изображения соответствующего транспаранта. Результаты проведённого исследования представлены на рис. 6. Необходимо отметить, что расчётная глубина резкости голограмм при выбранных параметрах их синтеза в соответствии с выражением (3) составляла ± 237 нм.

Из приведённых результатов видно, что пока расстояние между транспарантами не превышает рассчитанное значение глубины резкости, изображения обоих перекрестий остаются достаточно чёткими, что и отображено на рис. 6а–в. На рис. 6б, в заметно, что у границы глубины резкости изображение начинает расплываться, но структура перекрестья всё ещё сохраняет различимые границы. Дальнейшее увеличение расстояния между транспарантами, как показывают рис. 6г–е, приводит к значительному ухудшению качества изображения.

Заключение

В работе описаны особенности алгоритма и программы синтеза голограмм-проекторов Френеля, формирующих изображения на неплоских поверхностях. Сообщается об адаптации специализированного программного комплекса синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля под синтез голограмм-проекторов для фотолитографии

на неплоских поверхностях. Рассмотрена глубина резкости восстанавливаемого изображения и влияние на неё бинаризации и диффузной подсветки транспаранта. Приведены результаты экспериментов, подтверждающие возможность и эффективность использования программного комплекса для синтеза голограмм-проекторов, предназначенных для реализации фотолитографического процесса на неплоских поверхностях.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Использование метода голограммии 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., Malfoy 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 голограммической фотолитографии // Опт. и спектр. 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 // 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. Opt. 2007. V. 46. № 14. P. 2581–2585.
7. 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 // Опт. и спектр. 2011. Т. 111. № 1. С. 156–161.
8. 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.
9. Данилина Т.И. Технология тонкопленочных микросхем / Учебное пособие. Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2007. 21 с.
10. Франсон М. Оптика спеклов. М.: Мир, 1980. 172 с.
11. Цуканова Г.И., Карпова Г.В., Багдасарова О.В., Карпов В.Г., Кривопустова Е.В., Ежова К.В., под редакцией профессора Шехонина А.А. Прикладная оптика. Часть 2 / Учебно-методическое пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2003. С. 32.
12. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Козулин И.А. Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 9. С. 29–34.
13. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Громов А.Д., Никаноров О.В. Обеспечение равной интенсивности элементов изображений бинарных объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов // Опт. и спектр. 2013. Т. 114. № 2. С. 150–155.