

ГОЛОГРАФИЯ

УДК 535.417; 535.317; 778.38

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ СИНТЕЗА И ЦИФРОВОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ: ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

© 2010 г. С. Н. Корешев, доктор техн. наук; О. В. Никаноров; Ю. А. Иванов; И. А. Козулин

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: koreshhev@list.ru

Сообщается о разработке программного комплекса для синтеза и восстановления голограмм-проекторов. Работа выполнена в целях практической реализации голограммического варианта фотолитографического процесса, в котором синтезированная голограмма одновременно выполняет функции фотошаблона и проекционного объектива. Описаны программные возможности комплекса и используемые в нем алгоритмы. Приведены результаты успешного тестирования разработки. Показана возможность использования комплекса для оптимизации параметров синтеза голограмм-проекторов.

Ключевые слова: голограмма-проектор, цифровой синтез голограмм, преобразование Френеля, принцип Гейгенса-Френеля.

Коды OCIS: 090.1760

Поступила в редакцию 22.09.2009

Один из перспективных вариантов решения проблемы коротковолновой фотолитографии основан на использовании отражательных рельефно-фазовых голограмм-проекторов [1]. Его практическая реализация не требует использования оптических сред, прозрачных в рабочем диапазоне спектра. Кроме того, при использовании голографической проекции, как это хорошо известно, размер одновременно экспонируемой области фоторезиста в большей степени ограничивается мощностью источника излучения, чем полевыми aberrациями проекционной системы, в качестве которой в этом случае используется голограмма-проектор. Последняя может быть изготовлена как методом аналоговой физической записи, так и методом цифрового синтеза [2]. Применение цифрового синтеза наиболее перспективно при создании голограмм-проекторов, предназначенных для работы в экстремально коротковолновой ультрафиолетовой и рентгеновской области спектра. Об этом, в частности, говорится в работе [2], в которой приведены результаты компьютерного моделирования процесса проекционной голографической фотолитографии, показавшие

возможность ее использования в рентгеновском диапазоне спектра для изготовления структур с характеристическим размером 0,06 мкм. Расчеты, описанные в этой работе, проводились для длины волны излучения 5 нм при расстоянии от голограммы до плоскости установки пластины с фоторезистом 0,2 мм. Сама голограмма при расчетах считалась пропускающей, выполненной из пластины углерода толщиной 0,1 мм. В работе [3] приведены результаты синтеза, отображения на носителе и исследования изображающих свойств отражательной синтезированной голограммы, предназначаемой для использования в излучении с длиной волны 13,5 нм. К сожалению, спекловая структура изображения, восстановленного с помощью этой голограммы, не позволяет использовать ее в литографическом процессе, однако, сам факт ее изготовления и восстановления свидетельствует о принципиальной возможности и перспективности использования синтезированных голограмм в экстремально коротковолновой области спектра.

При реализации голографической фотолитографии, основанной на использовании синтезированных голограмм-проекторов, основные

трудности вызывают процессы синтеза и отображения на носителе голограммной структуры. При этом, если отображение голограммы на носителе предполагает применение уже имеющихся в наличии и используемых для других целей лазерных и электронно-лучевых генераторов изображений [4], то процесс синтеза голограмм-проекторов требует использования узко специализированного программного комплекса, способного решать задачи как синтеза, так и цифрового восстановления голограмм. Необходимость включения в комплекс инструментов не только синтеза голограмм, но и их восстановления объясняется, во-первых, сильной зависимостью оптимальных, с точки зрения качества получаемого изображения, параметров синтеза голограмм-проекторов от структуры фотошаблона и, соответственно, необходимостью их подбора для каждого конкретного объекта. Во-вторых, относительной дороговизной и сложностью проведения физических экспериментов по синтезу голограмм и исследованию их изображающих свойств, особенно в коротковолновой области спектра.

Отсутствие в доступной авторам статьи литературе сведений о таких комплексах, наблюдающиеся на фоне перспективности использования синтезированных голограмм-проекторов в задачах коротковолновой голографической проекционной фотолитографии, обусловило постановку и проведение работы, направленной на создание описываемого в настоящей статье программного комплекса для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов.

Комплекс состоит из двух основных блоков: блока собственно синтеза голограмм-проекторов и блока цифрового восстановления синтезированных голограмм. Реализованный в описываемом программном комплексе алгоритм синтеза моделирует физический процесс формирования голографического поля. Его суть сводится к вычислению для каждой точки голограммы комплексной амплитуды поля, формируемого всеми точками исходного объекта [3]. При разработке алгоритма считалось, что виртуальный объект – фотошаблон, представляющий собой работающий на пропускание бинарный двумерный транспарант, установлен параллельно плоскости синтеза голограммы на расстоянии h от нее и освещается параллельным пучком когерентного излучения, нормально падающего на поверхность фотошаблона. В этом случае набег фазы излучения, прошедшего через точку объекта с координатами m, n и попавшего на голограмму

в точку с координатами u, v , на пути от объекта до голограммы – $\Phi_{u, v, m, n}$ рассчитывается с помощью следующего выражения:

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

где

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

Если предположить, что координаты точек объекта и голограммы u, v, n, m могут принимать лишь целочисленные значения, то можно получить выражение (3), описывающее комплексную амплитуду электромагнитного поля в произвольной точке на поверхности голограммы – $g(u, v)$,

$$g(u, v) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N t(n, m) \{ \sin(\Phi_{u, v, n, m}) - i \cos(\Phi_{u, v, n, m}) \}, \quad (3)$$

где $t(n, m)$ – коэффициент пропускания фотошаблона по амплитуде.

Опорная волна в рассматриваемом алгоритме предполагается плоской, падающей под углом θ на плоскость синтеза голограммы, следовательно, распределение фаз в ней на поверхности голограммы – $\Phi_{\text{оп}}$ может быть описано следующим выражением:

$$\Phi_{\text{оп}} = \frac{2\pi x \sin \theta}{\lambda}. \quad (4)$$

Отсюда, складывая комплексные амплитуды опорной волны и излучения, прошедшего через транспарант, получаем массив значений комплексных амплитуд голографического поля в плоскости синтеза голограммы. Возвведение каждого его элемента в квадрат по модулю обуславливает формирование массива значений интенсивности этого поля, необходимого для отображения структуры голограммы-проектора на соответствующем носителе. Так, если синтезируемую голограмму предполагается отображать в виде амплитудной дифракционной структуры, то указанные выше значения интенсивности должны отображаться в виде пропорциональных им значений амплитудного коэффициента пропускания голограммы. При отображении синтезируемой голограммы в виде рельефно-фазовой структуры рассчитанные значения интенсивности должны быть пропорциональны вариациям толщины носителя по апертуре голограммы-проектора. Невозможность обеспечения современными устройствами отображения голограмм на носителях точного соответствия

модулируемых параметров голограммы, т. е. ее коэффициента пропускания или толщины, рассчитанным пространственным вариациям интенсивности голографического поля обуславливает введение в алгоритм синтеза голограмм-проекторов операции их бинаризации.

Восстановление синтезированных голограмм-проекторов в рассматриваемом программном комплексе может осуществляться двумя методами. Один из них основан на том же алгоритме, что и синтез голограмм, т. е. основан на использовании принципа Гюйгенса–Френеля, а второй метод основан на преобразовании Френеля. Отметим, что оба указанных выше метода восстановления предполагают восстановление действительного изображения объекта и реализованы в настоящее время как для амплитудных, так и для рельефно-фазовых отражательных голограмм. Заложенная в комплекс возможность использования двух методов цифрового восстановления одних и тех же голограмм-проекторов позволяет снизить жесткость ограничений, накладываемых на расстояние между объектом и голограммой, а также гарантирует отсутствие однотипных ошибок в алгоритмах синтеза и восстановления, основанных на принципе Гюйгенса–Френеля.

Описываемый программный комплекс имеет простой интуитивно понятный интерфейс, позволяющий легко задавать основные параметры синтеза и восстановления голограмм (рис. 1).

Среди них области координатного пространства, занимаемые объектом и синтезированной голограммой, расстояние от голограммы до объекта, рабочая длина волны, периоды дискретизации объекта и голограммы, порог бинаризации голограммы, угол падения опорной и восстанавливающей волн, глубина случайной модуляции фазы при имитации диффузной подсветки фотшаблона и выбранный метод восстановления голограммы.

Работоспособность программного комплекса проверялась в ходе синтеза и восстановления голограмм бинарного амплитудного транспаранта, представляющего собой набор полосок шириной 4, 8 и 12 мкм. Работа выполнялась при основных параметрах синтеза и восстановления, выбранных в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе [4] для лазерного генератора изображений. То есть при угле падения опорной волны 10° и при расстоянии от объекта до голограммы 0,8 мм, что при размере апертуры голограммы $0,3 \times 0,3$ мм, длине волны 0,488 мкм, размере объекта $0,1 \times 0,1$ мм и периодах дискретизации голограммы и объекта 1 и 4 мкм, соответствовало дифракционному ограничению размера восстанавливаемого изображения 2,6–4 мкм для разных точек поверхности объекта.

Цифровое восстановление синтезированных голограмм осуществлялось без их бинаризации двумя методами. Один из них был основан на использовании преобразования Френеля, а

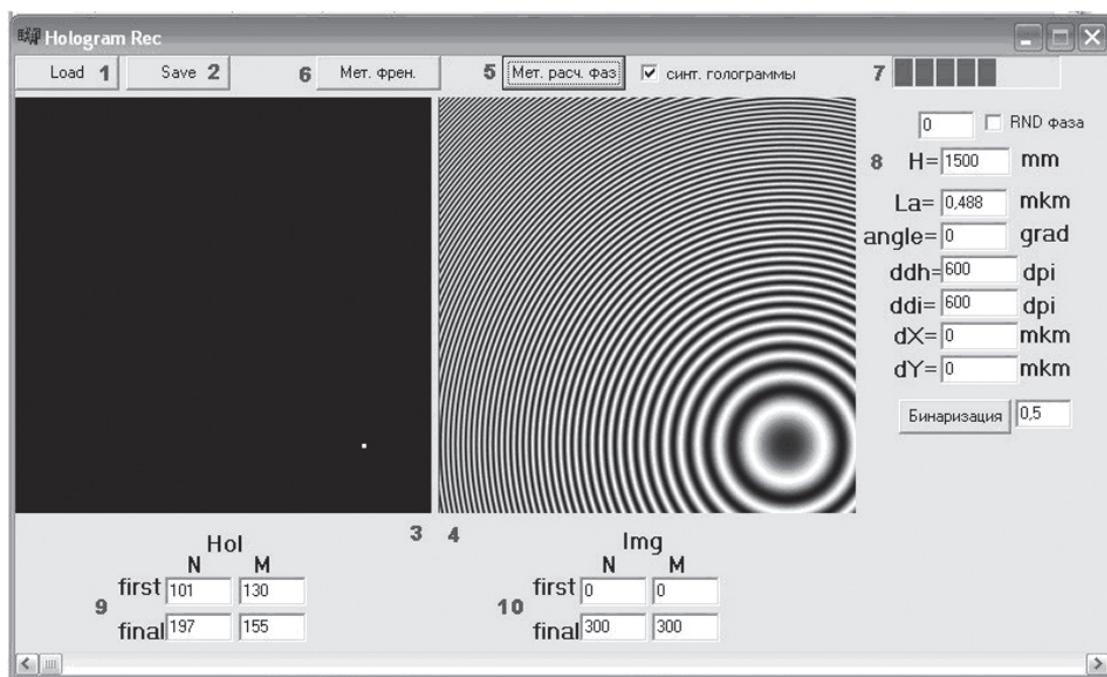


Рис. 1. Интерфейс программного комплекса.

другой на когерентном сложении амплитуд излучения, приходящего в каждую точку объекта от всех точек голограммы, т. е. на принципе Гюйгенса–Френеля. Результаты восстановления в полутонах виде представлены на рис. 2 и 3. Отметим, что для удобства отображения они инвертированы, т. е. их светлые участки представлены темными и наоборот. Наблюдаемая на рисунках "полосатость" светлых участков восстановленного изображения объясняется, скорее всего, помехами дискретизации голограммы. Эти помехи когерентны основному изображению. Обусловленная ими модуляция интенсивности в светлых участках изображения существенно превышает ту, что реализуется в его темных участках.

На рис. 4 и 5 представлены эти же изображения, но прошедшие осуществляемое с помощью программы Photoshop пороговое преобразование, имитирующее реакцию фоторезиста на за- светку актиничным излучением [5]. Отметим,

что интервал уровней порога, не приводящих к потере качества восстановленного изображения, у изображения, восстановленного с помощью преобразования Френеля, лежал в пределах 245–246 градаций серого и был существенно меньше интервала уровней порога, допустимого для изображения, представленного на рис. 5, лежавшего в пределах 225–251 градации серого. Интервал уровней порога, обеспечивающего наибольшее соответствие прошедшего пороговой обработке восстановленного изображения исходному объекту, был выбран авторами критерием качества восстанавливаемого изображения. Целесообразность введения именно такого критерия качества восстановленного изображения может быть объяснена тем, что обусловленная дискретностью, присущей синтезированным голограммам, потеря качества восстанавливаемых с их помощью изображений выражается, прежде всего, в появлении ложных дополнительных изображений – помех, которые

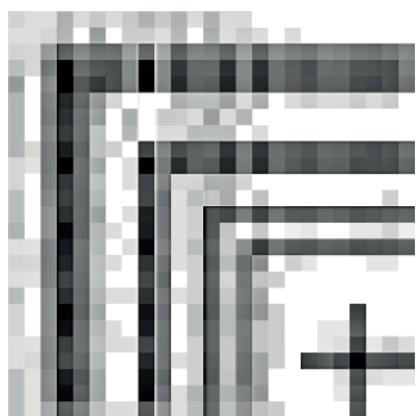


Рис. 2. Изображение, восстановленное с помощью преобразования Френеля.



Рис. 4. Изображение, восстановленное с помощью преобразования Френеля, после порогового преобразования.

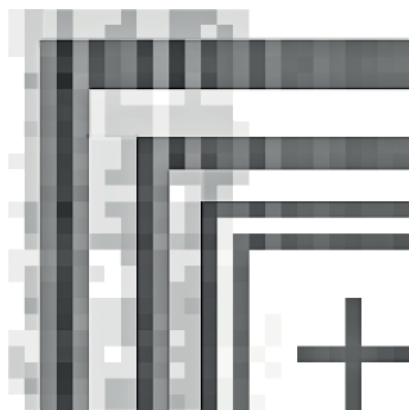


Рис. 3. Изображение, восстановленное на основе принципа Гюйгенса–Френеля.



Рис. 5. Изображение, восстановленное на основе принципа Гюйгенса–Френеля, после порогового преобразования.

могут накладываться на основное изображение и искажать его структуру [4]. При этом допустимые в голограммическом фотолитографическом процессе значения обусловленных этими помехами вариаций интенсивности восстановленного изображения в значительной степени определяются пороговыми свойствами используемого фоторезиста. Фоторезисты, как правило, считаются пороговыми материалами, изменяющими свою растворимость в проявителе при определенном критическом значении экспозиции. При меньших и больших значениях, по сравнению с критическим, их растворимость в проявителе практически не зависит от полученной энергии экспонирующего излучения. Вместе с тем, у реальных фоторезистов вблизи критического значения есть некий интервал экспозиций, в пределах которого скорость растворения фоторезиста в проявителе зависит от экспозиции. Чем больше этот “пороговый” интервал экспозиций, тем хуже фоторезист работает как дискриминатор деталей изображения по интенсивности. Таким образом, выбранный критерий качества восстановленного изображения по сути своей определяет требования, предъявляемые к характеристической кривой фоторезиста, пригодного для работы с восстановленным изображением. Чем больше интервал допустимых уровней порога подавления помех дискретизации, тем больший “пороговый” интервал экспозиций допустим для используемого фоторезиста. Сравнение изображений, представленных на рис. 2 и 3, 4 и 5, позволяет сделать вывод о том, что при выбранных параметрах синтеза и восстановления голограмм метод восстановления, основанный на принципе Гюйгенса–Френеля, дает лучшие результаты, чем метод, основанный на преобразовании Френеля. В качестве иллюстрации влияния расстояния от плоскости синтеза голограммы до объекта на эффективность того или иного алгоритма восстановления голограммы на рис. 6 и 7 представлены прошедшие пороговое преобразование изображения. Они получены исследуемыми методами восстановления с помощью полутоновой голограммы, синтезированной на расстоянии 4 мм от объекта. Сравнение структур этих изображений позволяет сделать вывод о том, что при восстановлении голограмм, полученных при расстоянии от объекта до плоскости синтеза 4 мм, оба испробованных в работе алгоритма дают совершенно одинаковые результаты. Даже интервал уровней порога, соответствующий наилучшему качеству изображения, получился одинаковым, лежащим в пределах

237–247 градаций. Следовательно, при относительно малых расстояниях от плоскости синтеза голограммы до объекта, не превышающих 10 размёров голограммы, при восстановлении наиболее целесообразно пользоваться алгоритмом, основанным на использовании принципа Гюйгенса–Френеля. Хорошо наблюдаемые на рис. 6 и 7 искажения структуры восстановленного изображения – первые два “уголка” разрушились и пропал промежуток между ними, обусловлены недостаточной разрешающей способностью голограммы, ограниченной размером ее апертуры. Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности программного комплекса и возможности его использования для синтеза и восстановления голограмм двумерных бинарных объектов.



Рис. 6. Изображение, восстановленное при расстоянии от объекта до голограммы 4 мм с помощью преобразования Френеля при пороговом преобразовании.

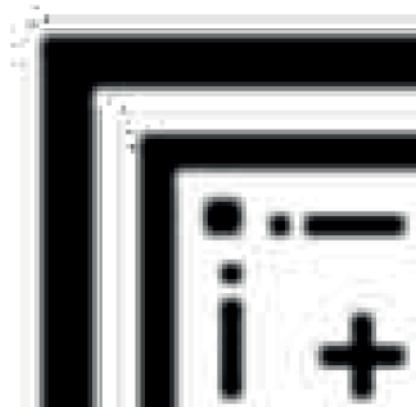


Рис. 7. Изображение, восстановленное при расстоянии от объекта до голограммы 4 мм на основе принципа Гюйгенса–Френеля при пороговом преобразовании.

Возможность использования разработанного программного комплекса для оптимизации параметров синтеза голограмм-проекторов проверялась в процессе исследования зависимости качества восстанавливаемого изображения от размера голограммы, от угла падения опорной волны на плоскость синтеза голограммы и от соотношения выбранных периодов дискретизации объекта и голограммы. Это исследование проводилось при тех же параметрах объекта и голограммы и для той же длины волны восстанавливающего излучения, что и ранее описанные эксперименты. Методика работы включала в себя использование выражений, приведенных в работе [4] для расчета оптимальных параметров синтеза голограммы-проектора, и дальнейшую оценку качества изображения, восстанавливаемого с использованием преобразования Френеля в виртуальном пространстве с помощью голограмм, синтезированных как при теоретически оптимальных, так и при отличающихся от них параметрах синтеза. Критерием качества восстановленного изображения здесь, по-прежнему, был интервал градаций серого, который мог быть выбран в качестве порога при пороговой обработке восстановленного изображения и обеспечивал бы его максимальное сходство с объектом. Указанные выше рабочая длина волны, размеры объекта и периоды дискретизации объекта и голограммы обусловили следующие значения оптимальных параметров синтезируемой голограммы-проектора: расстояние между синтезируемой голограммой и объектом – 1,5 мм, угол падения плоской опорной волны на плоскость синтеза – 10,6°, размер голограммы – 0,471×0,471 мм. Качество изображения, восстанавливаемого с помощью голограммы-проектора, синтезированной при указанных выше параметрах, иллюстрируют рис. 8 и 9, на которых представлено восстановленное изображение до и после его пороговой обработки соответственно. Интервал градаций серого, который мог бы быть использован в качестве порога при пороговой обработке изображения, представленный на рис. 8, был равен 47 градациям. Результаты проведенных экспериментов по изменению параметров синтеза голограммы-проектора показали следующее. Уменьшение, равно, как и увеличение линейной апертуры синтезированной голограммы по сравнению с апертурой, рассчитываемой в соответствии с работой [4], приводит к уменьшению интервала градаций серого. Так уменьшение размера голограммы до 0,4×0,4 мм

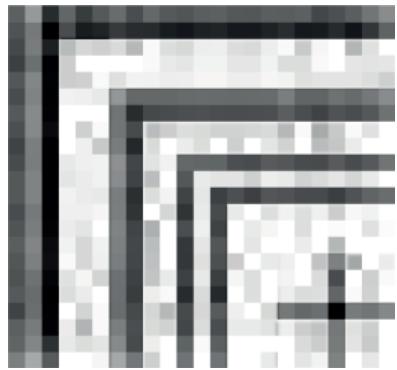


Рис. 8. Восстановленное изображение до пороговой обработки.

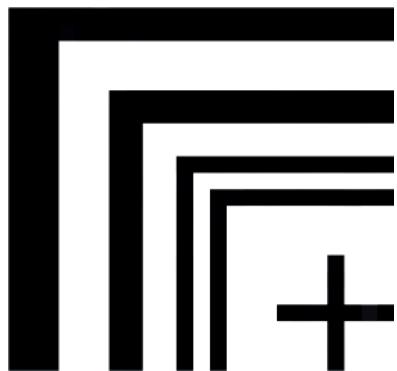


Рис. 9. Восстановленное изображение после пороговой обработки.

привело к уменьшению допустимого диапазона уровней порога до 16 градаций. Дальнейшее уменьшение размера голограммы обусловило еще и потерю разрешения в восстановленном с ее помощью изображении. Увеличение апертуры голограммы до 0,6×0,6 мм также сопровождалось уменьшением допустимого диапазона порога до 13 градаций. По всей видимости, это можно объяснить увеличением доли площади голограммы, на которой пространственные частоты голограммной структуры превышают значения, определяемые теоремой отсчетов [6]. Выявленный в ходе проведенных исследований характер зависимости качества восстановленного изображения от угла падения опорной волны свидетельствует о том, что наибольший допустимый диапазон градаций серого, который может быть принят за порог при обработке восстановленных изображений, равный примерно 50, соответствует диапазону углов падения опорной волны 10–14°. Отметим, что при используемых в настоящей работе параметрах дискретизации

голограммы и ее рабочей длине волны угол падения опорной волны 15° соответствует для центра голограммы-проектора предельной несущей пространственной частоте, определяемой в соответствии с теоремой отсчетов [6].

Полученные экспериментальные данные и их хорошее соответствие результатам теоретического анализа, изложенных в работе [4], подтверждают справедливость приведенных в ней рекомендаций, а также свидетельствуют о работоспособности разработанного авторами настоящей статьи программного комплекса и о возможности и перспективности его использования для оптимизации параметров синтеза голограмм-проекторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Koreshev S.N., Ratushnyi V. Holographic method for obtaining images of two-dimensional objects with limiting high resolution for extreme shot-wave lithography problems // Practical holography XVIII: Materials and Applications. Proc. SPIE. 2004. V. 5290. P. 221–232.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Моро У. Микролитография. М.: Мир, 1990. 1240 с.
6. Гудмен Дж. Введение в Фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.