

ГОЛОГРАФИЯ

УДК 535.421

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ СФОКУСИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

© 2011 г. С. Н. Корешев, доктор техн. наук; И. Н. Корепин, студент

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

E-mail: korepin404@gmail.com

Рассмотрена реализация фотолитографического процесса, основанного на синтезированных голограммах “сфокусированного” изображения, работающих совместно с объективом невысокого качества. Сформулированы и обоснованы рекомендации по выбору параметров синтеза и отображения голограмм, определяющих качество восстановляемых с их помощью изображений. Обоснована перспективность применения данной системы для решения проблем ультракоротковолновой фотолитографии. Установлено, что совместное использование голограммы и проекционной системы позволяет достичь предельного для оптики минимального характеристического размера элемента фотшаблона, равного длине волны восстанавливющего излучения.

Ключевые слова: голография, фотолитография, голограмма “сфокусированного изображения”, синтезированная голограмма.

Коды OCIS: 090.1760.

Поступила в редакцию 15.02.2011.

Введение

Необходимость снижения стоимости современных электронных устройств и повышения степени их интеграции вынуждают производителей искать пути усовершенствования и оптимизации существующих вариантов проекционной фотолитографии. Один из них основан на использовании синтезированных голограмм, предназначенных для формирования на поверхности фоторезиста изображения структуры изготавливаемого электронного прибора (см., например, [1, 2]). Так, в [3] рассмотрен вариант фотолитографического процесса на основе синтезированных рельефно-фазовых отражательных голограмм-проекторов Френеля. В нем функцию проекционного объектива выполняет дискретная бинарная голограмма Френеля. Синтез такой голограммы предлагается осуществлять с помощью специализированного программного комплекса, а отображать на носителе – с помощью лазерного или электронного генератора изображения [4]. При восстановлении голограммы-проектора пучком, сопряженным с опорным пучком, на слое фоторезиста формируется действительное изображение структуры изготавливаемого изделия. Основные особен-

ности рассмотренного метода состоят в следующем:

во-первых, отсутствие необходимости использования оптических сред прозрачных в рабочей области спектра;

во-вторых, возможность построения безаберрационного изображения в пределах больших полей, что ограничивает размер одновременно экспонируемого участка фоторезиста лишь мощностью источника;

в-третьих, использование синтезированных голограмм-проекторов устраниет необходимость изготовления реального фотшаблона, заменяя его самой синтезированной голограммой-проектором. Все это делает этот вариант процесса весьма перспективным для использования в экстремально коротковолновой УФ области спектра.

Анализ, проведенный в работе [3], показал, что принципиально свойственная синтезированным голограммам дискретизация приводит к ограничению характеристического размера восстанавливаемых изображений величиной $1,5\lambda$, т. е. делает невозможным использование такого подхода для формирования изображений с предельным для оптики характеристическим размером, равным длине волны восстанавливющего излучения.

Применение в фотолитографическом процессе синтезированных голограмм “сфокусированного” изображения совместно с объективом невысокого качества

По нашему мнению, более перспективным для фотолитографии, является использование, проекционной системы из синтезированной голограммы сфокусированного изображения (СГСИ), работающей совместно с объективом невысокого качества. Такая система позволяет преодолеть отмеченный в [3] предел характеристического размера элемента в $1,5\lambda$ и довести его до предельного для оптики значения за счет подбора увеличения объектива. При этом качество последнего может быть существенно ниже, чем качество традиционных проекционных оптических систем для фотолитографии. Так, в работе [5] описано получение безаберрационного изображения с линейным размером элемента 0,81 мкм на длине волны 0,488 мкм при совместном использовании голограмм сфокусированного изображения и проекционного объектива, с размерами пятна рассеяния в центре и на краю поля 20 и 26 мм соответственно.

Что касается синтеза голограмм сфокусированного изображения, то в доступной нам литературе информации о нем отсутствует. Такое состояние дел и очевидная перспективность использования СГСИ в фотолитографии обусловили необходимость постановки настоящей работы, направленной на оптимизацию, с точки зрения качества формируемого изображения, параметров синтеза и восстановления СГСИ.

При ее выполнении мы исходили из того, что алгоритм синтеза рассматриваемой голограммы должен соответствовать реальным физическим процессам регистрации и восстановления голограмм и, как следствие, должен включать в себя следующие основные этапы.

1. Расчет комплексной амплитуды излучения, дифрагировавшего на объектном транспаранте, в плоскости входного зрачка объектива. Этот этап подобен описанному в работе [4] расчету поля объектной волны в плоскости синтеза голограммы-проектора, проводимого на основе принципа Гюйгенса-Френеля. Он заключается в расчете распределения комплексной амплитуды формируемого поля объектной волны в плоскости входного зрачка оптической системы.

2. Учет преобразования волнового фронта, осуществляемого проекционным объективом.

Прямым решением этой задачи являются непосредственный расчет каждого луча, участвующего в построении, и определение соответствующего фазового набега. Однако такой подход необычайно трудоемок и требует огромных ресурсов компьютера. Более эффективным способом, по нашему мнению, является использование метода расчета фазового набега путем разложения функции волновой aberrации по круговым полиномам Цернике [6]. Применение для решения задачи этого этапа широко распространенных систем автоматизированного расчета оптических систем позволяет не только значительно упростить вычисление фазы при распространении поля от входного зрачка оптической системы до выходного, но и вынести саму оптическую систему за рамки алгоритма моделирования рассматриваемого процесса, используя лишь вычисленные для нее коэффициенты полиномов Цернике. В работе [7] отмечено, что применение такого метода не приводит к каким-либо заметным ошибкам в точности определения фаз в различных точках выходного зрачка. Так, в частности, там показано, что для большинства современных объективов эти ошибки не превышают нескольких сотых долей длины волны.

3. Последний этап – расчет распределения поля от выходного зрачка оптической системы до плоскости голограммы – аналогичен первому и может быть решен теми же способами.

Необходимость учета оптической системы в алгоритме синтеза-восстановления обуславливает специфические требования, предъявляемые к выбору параметров синтеза и восстановления голограмм сфокусированного изображения, работающих с объективом невысокого качества, отличные от требований, приведенных в работе [3] для голограмм-проекторов Френеля. Рассмотрим эти требования более подробно.

Влияние проекционного объектива на выбор периодов дискретизации фотошаблона, входного и выходного зрачков оптической системы и голограммы

Наличие в рассматриваемой схеме объектива требует определить допустимые значения периодов дискретизации входного и выходного зрачков оптической системы, а также разрешающей способности генератора изображения, необходимого для отображения голо-

граммной структуры при дифракционном качестве формируемого изображения.

Рассмотрим эту задачу для случая внеосевой голограммы сфокусированного изображения, регистрируемой с наклонным параллельным опорным пучком лучей. При этом будем считать фотошаблон бинарным амплитудным транспарантом, освещаемым параллельным нормально падающим пучком когерентного излучения. Кроме того, будем считать, что центры параллельно расположенных голограммы и транспаранта находятся на оптической оси проекционного объектива.

При указанных выше условиях числовая апертура пучка, проdifрагировавшего на наименьшем элементе структуры объекта, может быть описана соотношением

$$A = n \sin \alpha = \lambda / a_t, \quad (1)$$

где A – числовая апертура проdifрагировавшего пучка, n – показатель преломления среды между фотошаблоном и оптической системой (в нашем случае $n = 1$); α – апертурный угол проdifрагировавшего излучения, λ – рабочая длина волны, a_t – характеристический размер фотошаблона.

Так как пучок лучей, проdifрагированный на минимальном по размеру элементе фотошаблона, распространяется в наибольшем телесном угле, то этот угол можно считать максимальным передним апертурным углом оптической системы. Тогда задняя числовая апертура может быть выражена уравнением

$$A' = A / \beta = n' \sin \alpha', \quad (2)$$

где A' – задняя числовая апертура, β – линейное увеличение оптической системы, n' – показатель преломления среды между объективом и голограммой (в нашем случае также $n' = 1$); α' – задний апертурный угол.

Отсюда определим минимально допустимый угол падения опорного параллельного пучка лучей на плоскость регистрации голограммы (θ), обеспечивающий пространственное разделение объектного и опорного пучков при восстановлении голограммы. Для точечного объекта этот угол должен выбираться из условия $\theta \geq \alpha'$. Тогда минимальный пространственный период голограммной структуры может быть описан с помощью следующего выражения:

$$T_{\min} \leq \frac{\lambda}{2 \sin \alpha'} \leq \frac{\lambda \beta}{2 \sin \alpha}. \quad (3)$$

Из (1)–(3) следует, что период дискретизации голограммы d_d зависит от характеристического

размера фотошаблона, а также от линейного увеличения оптической системы. Теорема Котельникова (теорема отсчетов) позволяет получить выражение, описывающее данную зависимость:

$$d_d \leq \frac{1}{2} T_{\min} \leq \frac{a_t \beta}{4}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что период дискретизации голограммы и диаметр рабочего фокального пятна генератора изображения, используемого для отображения голограммы на носителе, могут варьироваться путем подбора увеличения проекционной оптической системы. Такая возможность позволяет снизить требования, предъявляемые к разрешающей способности генератора изображения, что делает выбор данной схемы синтеза – восстановления более привлекательным по сравнению со схемой на основе голограмм Френеля, приведенной в работах [2–4].

Отметим, что выражение (4) не зависит от λ и, следовательно, справедливо для любых длин волн. Однако следует учитывать, что при использовании проекционного объектива на основе преломляющих элементов их материалы должны быть прозрачны для данной длины волны.

Периоды дискретизации входного ($d_{d \text{ вх зр}}$) и выходного ($d_{d \text{ вых зр}}$) зрачков могут быть выбраны исходя лишь из передней и задней апертур оптической системы соответственно. Следовательно, они могут быть описаны выражениями

$$d_{d \text{ вх зр}} \leq \frac{1}{2} T_{\min \text{ вх зр}} \leq \frac{\lambda}{4 \sin \alpha} \leq a_t / 4, \quad (5)$$

$$d_{d \text{ вых зр}} \leq \frac{1}{2} T_{\min \text{ вых зр}} \leq \frac{\lambda}{4 \sin \alpha'} \leq a_t \beta / 4. \quad (6)$$

Такой выбор параметров обеспечивает регистрацию на голограмме всей информации о структуре фотошаблона.

Оптимизация параметров дискретизации фотошаблона и голограммы, обеспечивающая минимизацию потерь качества восстанавливаемых изображений

Задача оптимизации параметров дискретизации синтезированных голограмм рассматривалась ранее для одномерных амплитудных синтезированных голограмм Френеля в работе [3].

В ней было показано, что дискретный характер синтезированной голограммы обуславливает периодическое повторение спектра поля, восстановляемого с помощью непрерывной голограммы. При этом период мультиплексации спектра определяется как $\xi_n = 1/d_d$, где d_d – период дискретизации голограммы. Там же была приведена зависимость спектра восстановленного поля от размера фокального пятна генератора изображения. Даны рекомендации по выбору оптимальных параметров дискретизации фотошаблона и голограммы, обеспечивающих, с одной стороны, возможность пространственного разделения компонентов поля, а с другой – максимально возможную ширину спектра объекта при минимальном уровне помех. В частности, было показано, что при выполнении соотношения

$$a = d_d, \quad (7)$$

где a – диаметр фокального пятна генератора изображения, т. е. при выборе периода дискретизации голограммы, равным диаметру фокального пятна генератора изображения, достигается подавление мультиплексации спектра восстанавливющей волны. Кроме того, из-за необходимости обеспечения пространственного разделения компонентов поля, восстанавливаемого с помощью голограммы, было получено условие выбора угла падения опорной волны при синтезе голограммы, который определяется как

$$\sin |\theta| = \frac{1,5\lambda}{4d_d}. \quad (8)$$

Рассуждения и выводы, приведенные в работе [3] для синтезированных голограмм-проекторов Френеля, справедливы и для случая, рассматриваемого в настоящей статье.

Подстановка (4) в (8) позволяет получить выражение, описывающее зависимость угла падения опорной волны от характеристического размера изображения, формируемого синтезированной голограммой, и линейного увеличения оптической системы, –

$$\sin |\theta| = \frac{1,5\lambda}{a_t \beta}. \quad (9)$$

Из (9) следует, что при выборе увеличения проекционной оптической системы $|\beta| \geq 1,5$, учитывая, что $\sin |\theta| \leq 1$, возможно формирование изображений с предельным для оптики характеристическим размером, равным рабочей длине волны λ . Однако дальнейшее увеличение

параметра β не приведет к уменьшению характеристического размера формируемого изображения, так как в выражении (1) должно выполняться условие $\sin \alpha \leq 1$.

Выражения (4) и (8) позволяют определить оптимальные, с точки зрения указанных выше критериев, параметры синтеза голограммы, а именно: период дискретизации голограммы, угол падения опорной волны, длину волны восстанавливющего излучения и необходимый диаметр фокального пятна генератора изображения. Присутствие в обоих выражениях параметра β позволяет сделать вывод, что наличие проекционной системы дает возможность корректировать требования к описанным выше параметрам и формировать изображения фотошаблона с минимально возможным для оптики характеристическим размером элемента, равным длине волны восстанавливющего излучения.

Выбор оптимальных параметров оптической системы, предназначенной для совместного использования с синтезированной голограммой сфокусированного изображения

При определении требований, предъявляемых к оптической системе, используемой совместно с голограммой сфокусированного изображения, будем исходить из того, что необходимость обеспечения непрерывности линий восстановленного изображения при синтезе голограммы требует соблюдения равенства периода дискретизации фотошаблона характеристическому размеру его восстановленного изображения. Это обуславливает необходимость ограничения участка линейной апертуры синтезированной голограммы, несущего информацию о каждом элементе дискретизации объекта, величинами D_a и D'_a , для передней и задней апертур соответственно равными

$$D_a = 2R \operatorname{tg}[\arcsin(\lambda/a_t)], \quad (10)$$

$$D'_a = 2R' \operatorname{tg}[\arcsin(\lambda/(a_t \beta))], \quad (11)$$

где R – расстояние от плоскости фотошаблона до плоскости входного зрачка оптической системы, R' – расстояние от выходного зрачка оптической системы до плоскости голограммы.

Отсюда можно определить необходимые размеры входного (D_d) и выходного (D'_d) зрачков

$$D_d = D_t + D_a, \quad (12)$$

$$D'_d = D_g + D'_a, \quad (13)$$

где D_t – размер фотошаблона, D_g – размер голограммы.

Из выражений (12) и (13), зная параметры D_d , D'_d и d_d , d'_d , можно определить общее число пикселов входного M_D и выходного $M'_{D'}$ зрачков оптической системы

$$M_D = 1 + (D_t + D_a)/d_{dt}, \quad (14)$$

$$M'_{D'} = 1 + (D_g + D'_a)/d_d, \quad (15)$$

где d_{dt} – период дискретизации фотошаблона.

Значения параметров R и R' определяются выбранной проекционной оптической системой. Однако необходимо учесть, что параметр R' нужно выбирать таким образом, чтобы он обеспечивал пространственное разделение восстанавливаемого изображения пучка лучей и восстанавливаемого изображения фотошаблона. В случае отражательной голограммы, формирующей действительное изображение фотошаблона, расположенного параллельно плоскости голограммы так, что центр восстановленного изображения и центр голограммы лежат на оптической оси проекционной системы, минимально возможная величина R' может быть получена из выражения

$$R'_{\min} = D_g / \left\{ \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(\frac{1,5\lambda}{a_t \beta} \right) \right] - \operatorname{tg} \left[\arcsin \left(\frac{\lambda}{a_t \beta} \right) \right] \right\}, \quad (16)$$

где D_g – размер голограммы.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ehbets P., Herzog H., Kuittinen M., Clube F., Darbellay Y.* High. Carrier-frequency fan-out gratings fabricated by total internal reflection holographic lithography // Opt. Eng. 1995. V. 34. № 8. P. 2377–2383.
2. Корешев С.Н., Ратушный В. П. Использование метода голограммы для получения изображений двумерных объектов при решении задач фотолитографии высокого разрешения // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 10. С. 32–39.
3. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Голограммы сфокусированного изображения в задаче высокоразрешающей проекционной голографической фотолитографии // Опт. и спектр. 2006. Т. 101. № 6. С. 1038–1042.
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. 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.
6. Born M., Wolf E. Principles of optics. L.: Pergamon press, 1964. 986 p. Перевод: С.Н. Бреус, А.И. Головашкин, А.А. Шубин под ред. Г.П. Мотулевич. М.: Наука, 1973. 856 с.
7. Родионов С.А. Автоматизация проектирования оптических систем. Л.: Машиностроение, 1982. 270 с.

Размер голограммы D_g определяется размером синтезируемого фотошаблона, увеличением оптической системы, а также диаметром пятна рассеяния, зависящим от aberrаций объектива. В рассматриваемом нами случае одномерной голограммы ее размер может быть определен выражением

$$D_g = D_t \beta + D_{IP}, \quad (17)$$

где D_{IP} – диаметр пятна рассеяния на краю поля.

Из вышеописанного можно сделать вывод, что правильный выбор параметров оптической системы также влияет на качество изображения, восстанавливаемого с помощью синтезированной голограммы.

Заключение

Рассмотрен вариант проекционной системы, состоящей из синтезированной голограммы сфокусированного изображения и объектива невысокого качества, для решения проблем ультракоротковолновой фотолитографии. Обоснована перспективность ее применения. Проведен анализ параметров расчета и отображения голограмм и параметров проекционной оптической системы. Выведены соотношения, позволяющие определить оптимальные (с точки зрения качества восстановленного изображения) значения данных параметров. Показано, что наличие проекционной системы позволяет ослабить требования к разрешающей способности генератора изображения, а также достичь предельного для оптики минимального характеристического размера элемента фотошаблона, равного длине волны восстанавливаемого излучения.