

07;12

О возможности применения киноформных элементов в зеркальных проекционных системах для ВУФ-литографии

© В.Ю. Венедиктов

Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова,
199034 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: venediktov@pochta.ru

(Поступило в Редакцию 30 мая 2006 г.)

Проанализированы возможности технологии отражательных дифракционных (голографических) оптических элементов для ВУФ-диапазона и их применения в проекционной фотолитографии.

PACS: 85.85.+j

Большинство авторов и групп, работающих в области проекционной ВУФ-литографии, рассматривают только отражательные системы. Однако сегодня в оптике ИК-, видимого и УФ-диапазонов активно применяются так называемые дифракционные, или голограммные, оптические элементы (ДОЭ или ГОЭ). Создание таких элементов на основе отражательных подложек вполне возможно и в ВУФ-диапазоне, поэтому представляется целесообразным проанализировать те возможности, которые могло бы дать применение таких элементов в проекционной ВУФ-литографии, и возможные физические и технические ограничения.

Прежде всего, заметим, что в современной оптике возможность применения ГОЭ разделяются на

— применение голограмм для коррекции случайных искажений, вносимых погрешностями и ошибками изготовления других оптических элементов (т.е. для решения задач так называемой адаптивной оптики);

— применение ГОЭ в качестве собственно элемента системы, обладающего оптической силой (например, для замены асферических зеркал).

В первом случае используются голографические корректоры искажений, т.е. собственно голограммы этих искажений, при освещении которых световым пучком с искаженным волновым фронтом восстанавливается неискаженный. Такого рода системы были рассмотрены и реализованы как в статическом [1], так и динамическом варианте [2]. В этом случае голограмма записывается при интерференции световых волн в диапазоне длин волн, близком к используемому при работе системы. Однако технология записи голограмм в ВУФ-диапазоне пока не разработана достаточно, чтобы обсуждать возможности данного метода применительно к ВУФ-литографии.

В то же время уже сегодня можно обсуждать применение ГОЭ в качестве составных элементов оптических систем, так как такие ГОЭ могут быть записаны в другом спектральном диапазоне или синтезированы неоптическими методами.

Голограммный оптический элемент — это обобщающее название различных оптических элементов, воздействие которых на волновой фронт основано на дифракции. По способу получения голограммы могут быть записываемыми (интерференционными) и синтезированными. Записываемые голограммы могут быть получены в результате регистрации интерференционной картины, получаемой с помощью специальных оптических устройств — так называемых схем записи, — которые включают в себя оптическую систему опорного (референтного) и рабочего волновых фронтов. Интерференция этих двух фронтов на поверхности регистрации дает периодическую структуру, которая и является основой голограммного элемента. Синтезированные голограммы, иначе называемые киноформами, изготавливаются без этапа получения интерференционной картины, а дифракционная структура изготавливается иными способами непосредственно, на основе того закона распределения фаз, который получен расчетным путем для данной голограммы.

По способу модуляции падающего волнового фронта ГОЭ (ДОЭ) могут быть амплитудными или фазовыми. В амплитудных дифракционных оптических элементах периодическая структура представляет собой элемент с периодически изменяющимся коэффициентом пропускания (точнее, модулем комплексного коэффициента). В фазовых ДОЭ периодически изменяется только добавленная фаза при сохранении постоянной амплитуды световых колебаний. В частности, при создании синтезированных голограмм наиболее удобно создавать киноформные элементы, в которых плавный профиль фазы заменен ступенчатым. Принцип действия киноформа иллюстрирует рис. 1.

Аберрационные свойства ГОЭ, как интерференционных, так и синтезированных, дают дополнительные возможности разработчикам для построения сложных оптических систем различных классов для решения весьма разнообразных задач. С точки зрения применения для коррекции аберраций на сегодняшний день наиболее перспективными представляются синтезированные киноформы.

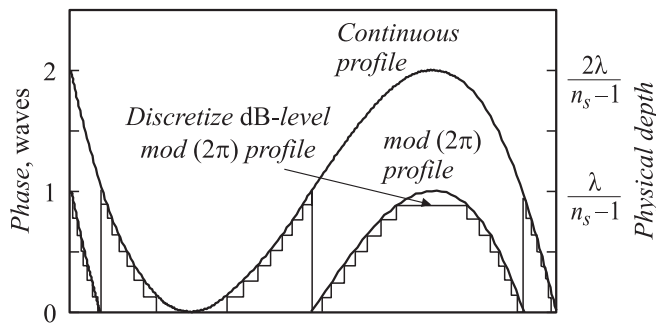


Рис. 1. Профиль фазовой модуляции в киноформе (синтезированном ГОЭ со ступенчатым профилем). Необходимый плавный профиль заменяется кусочно-непрерывными функциями, в которых фаза меняется в пределах 2π , а затем аппроксимируется ступенчатой функцией с шагами меньшей глубины.

Технология создания отражательных фазовых дифракционных решеток — ГОЭ для ВУФ-диапазона — с теоретической возможностью дифракционной эффективности в рабочий порядок дифракции до 100% от максимальной величины отражения в нулевой порядок запатентована в США [3,4]. Запатентованная идея, впрочем, достаточно близка к хорошо известным и практически освоенным в России еще в 1980-е гг. методам создания металлических отражательных ДОО с помощью фотолитографии, использующей проецирование (обычно с уменьшением) на фоторезист заранее изготовленного шаблона (маски). Затем экспонированная деталь подвергается травлению. Фоторезист, используемый в этих технологиях, имеет существенно иную скорость травления, нежели материал подложки, что позволяет формировать рельеф произвольной структуры, например, с профилем штриха, который обеспечивает эффективность дифракции в первый порядок до 100% от коэффициента отражения материала подложки. Наиболее развиты в настоящее время методы создания ГОЭ на прозрачных подложках из стекла и других материалов (освоенный диаметр — 100–150 мм) с последующим напылением металлического отражающего слоя.

Собственно, отличие технологий, запатентованных в [3,4] от вышеуказанных сводится лишь к тому, что на подложку ГОЭ с нанесенным дифракционным рельефом наносится многослойное отражательное покрытие, подобное используемому на остальных зеркальных элементах ВУФ-схемы. В этом случае зеркальное покрытие на поверхности ГОЭ должно выглядеть примерно так, как это показано на рис. 2, где чередующиеся светлые и темные слои соответствуют парам слоев брэгговского зеркала. Заметим, что речь идет о дополнительных слоях на поверхности брэгговского зеркала с большим числом пар слоев и высоким коэффициентом отражения.

Создание такой структуры вполне возможно. Это видно из приведенной на рис. 3 зависимости фазового набега, вносимого в волновой фронт ВУФ-излучения на

длине волны $\lambda = 13.4$ nm при отражении от брэгговского зеркала с разным количеством слоев (данные взяты из [5], где также рассматривается возможная технология создания дифракционных элементов). Как видно из этих данных, добавление одной дополнительной пары слоев изменяет фазовую задержку примерно на 0.05λ . Иными словами, вполне возможно создать киноформ с числом уровней квантования фазы (количество ступенек в ступенчатой аппроксимации плавной функции при ее изменении на 2π) около 10. Как известно из теории киноформ, это позволяет создавать элементы с дифракционной эффективностью почти 100%.

Одной из наиболее вероятных областей применения киноформов в ВУФ-оптике может стать замена асферических зеркал сферическими или упрощение профиля зеркал. Для анализа возможностей такого подхода в настоящей работе был проведен анализ возможности такой замены применительно к ранее рассчитанному

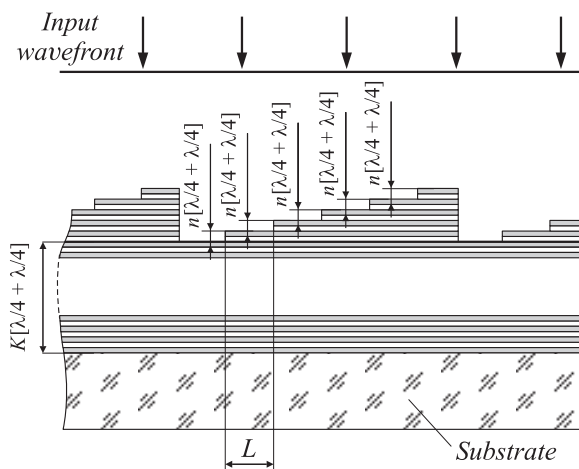


Рис. 2. Схематический разрез отражающего слоя на поверхности ГОЭ для ВУФ-диапазона.

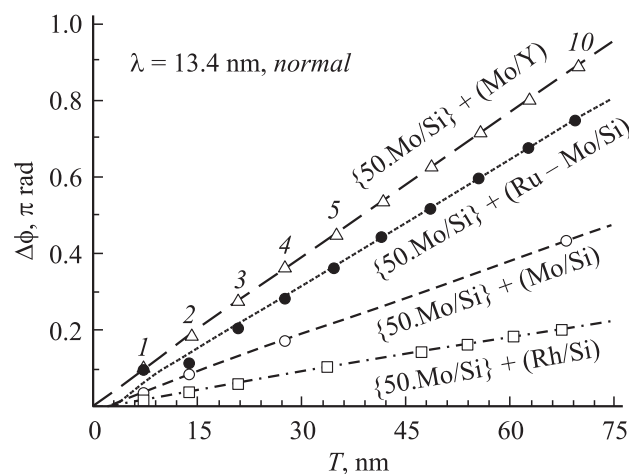


Рис. 3. Зависимость фазового набега отраженного излучения на длине волны 13.4 nm в зависимости от количества пар слоев в структуре для разных комбинаций веществ в брэгговской структуре. Данные взяты из работы [5].

двухзеркальному ВУФ проекционному объективу [6]. В этом объективе роль вторичного зеркала играет выпуклое ВУФ-зеркало с асферической поверхностью 4-го порядка. Были сделаны расчеты вариантов системы, в которых такая поверхность заменялась киноформом, нанесенным на сферическую поверхность и асферическую 2-го порядка. Расчеты производились с помощью программного пакета DEMOS [7], обладающего развитыми возможностями моделирования ГОЭ.

В данной работе рассмотрено несколько модификаций двухзеркального проекционного объектива для ВУФ-литографии с применением киноформа. Предполагается, что киноформ обладает симметрией вращения.

Несмотря на схожесть влияния на волновой фронт асферических поверхностей и киноформов, невозможно напрямую заменить асферический элемент в оптической системе киноформным, не изменив остальных оптических элементов. В нашем случае это означает, что, введя киноформ на одно из зеркал, необходимо внести изменения и в уравнение асферической поверхности второго зеркала даже при отсутствии изменений в расстояниях и рабочих отрезках. Для точного воспроизведения габаритных параметров объектива при расчетах его киноформных вариантов внесем изменения только в эксцентриситет и коэффициенты высших порядков уравнения асферики, не изменяя радиус при вершине.

Достаточное количество коэффициентов уравнения киноформа позволяет достичь точного воспроизведения габаритных и абберационных свойств объектива при различных сочетаниях их значений. Свободные параметры характеристического уравнения и параметров асферики можно использовать для оптимизации пространственных параметров киноформа, например, распределения пространственной плотности дифракционной структуры. Управление пространственными параметрами структуры киноформа возможно за счет варьирования значений коэффициента, определяющего его оптическую силу, совместно с кривизной подложки, с использованием коэффициентов асферики второго (не киноформного) зеркала.

Оптимальной для киноформного элемента представляется структура с монотонным нарастанием фазы без смены знака приращения фазы, примерно постоянной плотности при минимально возможном значении плотности.

Заметим, что изменения формы поверхности вогнутого асферического зеркала при нанесении киноформа на выпуклое минимальны и не влияют существенно на основные технологические параметры, определяющие трудоемкость изготовления асферики. Отступление от ближайшей сферы, крутизна поверхности, дифференциал асферизации и другие параметры при пересчетах остаются очень близкими к первоначальному варианту.

Сначала был рассмотрен вариант, при котором выпуклое асферическое зеркало высокого порядка заменяется на сферическое с киноформом. Габаритные параметры

объектива и его абберации полностью повторяют исходный вариант. После оптимизации структура киноформа имеет следующие параметры:

- общее число зон (по 1λ) ~ 800 ;
- нарастание фазы от центра к краю монотонное;
- пространственная плотность структуры, zon/mm ; вблизи центрального отверстия ~ 260 , наибольшая, вблизи середины световой зоны ~ 350 , наименьшая, на внешней границе световой зоны ~ 82 .

Как видим, создание такой системы находится в пределах возможностей современной фотолитографии, и использование ее не представляется целесообразным.

Далее было смоделировано использование выпуклой асферической поверхности второго порядка. Использование в качестве выпуклой асферической поверхности именно поверхности второго порядка (в нашем случае гиперблоида) может иметь важное значение для упрощения процесса изготовления оптических деталей. Дело в том, что для контроля выпуклой асферической поверхности высшего порядка необходимы сложные схемы контроля, в то время как выпуклый гиперблоид может быть проконтролирован в схеме Хиндла (свободной от использования асферики), или в паре с параболоидальным зеркалом. Рассмотрен вариант, при котором выпуклое асферическое зеркало высокого порядка заменяется поверхностью второго порядка с киноформом.

Габаритные параметры объектива и его абберации полностью повторяют исходный вариант. После оптимизации структура киноформа имеет следующие параметры:

- общее число зон (по 1λ) ~ 17.5 ;
- нарастание фазы от центра к краю — монотонное;
- пространственная плотность структуры $\sim 0.6 \text{ zon/mm}$.

Был также смоделирован и другой вариант использования выпуклого гиперблоида с киноформом, который имеет немонотонное изменение характеристической функции по радиусу.

Габаритные параметры объектива и его абберации полностью повторяют исходный вариант. После оптимизации структура киноформа имеет следующие параметры:

- общее число зон (по 1λ) ~ 5 ;
- монотонное нарастание фазы от центра к краю отсутствует;
- пространственная плотность структуры $\sim 0.2 \text{ zon/mm}$.

В заключение можно сказать, что применение киноформной оптики может удешевить и упростить изготовление выпуклого асферического компонента объектива проекционного нанолитографа (за счет применения более простой асферической поверхности и более простой схемы ее проверки). Разумеется, в данной работе был рассмотрен лишь один из возможных модельных вариантов. В дальнейшем предполагается исследовать технологические возможности изготовления таких киноформов.

Автор признателен А.А. Старкову и А.П. Жевлакову за плодотворные обсуждения.

Работа частично основана на результатах, полученных в ходе выполнения гранта МНТЦ № 991.

Список литературы

- [1] Денисюк Ю.Н., Соскин С.И. // Опт. и спектр. 1971. Т. 31. Вып. 6. С. 991.
- [2] Беренберг В.А., Васильев М.В., Венедиктов В.Ю. и др. // Опт. журн. 1998. Т. 65. Вып. 12. С. 70.
- [3] Naulleau P.P. Method of fabricating reflection-mode EUV diffraction elements. USA Patent 6,392,792, 2002.
- [4] Sweatt W.C., Ray-Chaudhuri A.K. Diffractive element in extreme-UV lithography condenser. USA Patent 6, 118,577, 2000.
- [5] Singh M., Braat J.J.M. Lithographic apparatus, device manufacturing methods, devices manufactured thereby, method of manufacturing a reflector, reflector manufactured thereby and phase shift mask. US Patent 6,777,140.
- [6] Voznesensky N.B., Zhevnikov A.P. // Proc. SPIE. 2004. Vol. 5482. P. 136–144.
- [7] Gan M.A., Zhdanov D.D., Novoselsky V. et al. // Opt. Eng. 1992. Vol. 31. P. 696.