

УДК 535.417, 535.317, 778.38

**ОЦЕНКА ДОПУСТИМЫХ ОШИБОК ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПРИ
ОТОБРАЖЕНИИ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ ФРЕНЕЛЯ
НА НОСИТЕЛЕ ДЛЯ ПОСЛЕДУЮЩЕГО ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В
ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ**

Старовойтов С. О. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – д.т.н., профессор Корешев С. Н.

(Университет ИТМО)

В рамках работы проведена оценка допустимых ошибок позиционирования при отображении отражательных рельефно-фазовых голограмм-проекторов на твердом носителе с помощью установок электронно-лучевой литографии. Работа выполнена методом численного моделирования процессов синтеза и восстановления голограмм Френеля в виртуальном пространстве. По итогам анализа технологических параметров современных комплексов электронно-лучевой литографии установлено, что существует возможность изготовления голограмм-проекторов с ошибками позиционирования, приводящими к не более чем 20% уменьшению числа допустимых уровней порога, применимых для реализации проекционного фотолитографического процесса в глубоком ультрафиолете.

Введение. Синтезированные голограммы в настоящее время находят применение в самых разных областях техники, среди которых можно особо отметить проекционную фотолитографию. Там использование синтезированных голограмм представляется особенно удобным, поскольку это позволяет обойтись без применения высокоразрешающих литографических объективов, конструкция которых непрерывно усложняется в связи с постоянным уменьшением проектных норм. Процесс получения синтезированных голограмм содержит в себе два этапа. Вначале проводится синтез голограммной структуры, то есть расчет распределения комплексной амплитуды в плоскости голограммы. Далее рассчитанная структура голограммы отображается на твердом носителе в виде отражательной рельефно-фазовой голографической решетки с помощью установок электронно-лучевой литографии. На обоих этапах процесса изготовления синтезированной голограммы существует ряд факторов, способных оказать существенное влияние на качество восстанавливаемого изображения. На первом этапе это в основном использованные параметры синтеза. На втором этапе – при отображении структуры голограммы на носителе – к потере качества восстановленного изображения могут привести ошибки позиционирования пикселей голограммы и ошибки формы поверхности, т. е. неплоскостность носителя, на который наносится требуемая голографическая структура. Задачей работы являлось рассмотрение влияния ошибок позиционирования пикселей на качество восстановленного изображения.

Основная часть. Исследование проводилось путем математического моделирования ошибок позиционирования пикселей голограмм, возникающих при их изготовлении с помощью установок электронно-лучевой литографии. Обычно при восстановлении синтезированных голограмм в качестве значения интенсивности в рассматриваемом пикселе используется значение интенсивности в точке, соответствующей центру данного пикселя. Для решения поставленной задачи требуется нарушить эквидистантность выборки отсчетов в плоскости голограммы. Тогда значение рассматриваемой ошибки для каждого пикселя голограммы можно определить через отклонение реального положения отсчета от центра соответствующего пикселя по осям X и Y . Это отклонение является случайной величиной с нормальным распределением и математическим ожиданием в центре пикселя. Теоретическое максимально допустимое значение данного отклонения, при котором качество восстановленного изображения практически не отличается от идеального, определялось исходя из применяемого в традиционной (аналоговой) голографии критерия Марешаля. В соответствии с ним, допуск на средний квадрат деформации волнового фронта не должен

превышать $1/14$. Для выбранных исходя из поставленной задачи реализации фотолитографического процесса в глубоком ультрафиолете параметров синтеза голограммы этот допуск составлял 4 нм.

Моделирование процессов синтеза и восстановления голограмм со случайными ошибками позиционирования пикселей проводилось в специализированном программном комплексе. В рамках работы были синтезированы и восстановлены в виртуальном пространстве голограммы ряда тест-объектов: «Уголки», «Штриховая мира» и «Крупные уголки». Процесс синтеза и восстановления проводился для каждого из рассматриваемых объектов четыре раза: при условии отсутствия ошибок позиционирования пикселей голограммы, а также при их распределении по нормальному закону с СКО равным 4 (что соответствует критерию Марешаля), 8 и 12 нм соответственно.

Качество восстановленных изображений оценивалось через численный критерий, равный количеству допустимых уровней пороговой обработки такого изображения, при котором оно по распределению интенсивности полностью соответствует исходному объекту. Чем таких уровней больше, тем более качественным можно считать изображение. По полученным численным оценкам качества восстановленных изображений можно сделать вывод о том, что при СКО ошибок позиционирования пикселей голограммы, равном 4 нм, качество восстановленного изображения довольно близко к качеству изображения, получаемого при условии отсутствия ошибок на голограмме. Это позволяет говорить о применимости критерия Марешаля для дискретных (синтезированных) голограмм.

Современные установки электронно-лучевой литографии способны обеспечить весьма небольшие значения ошибок позиционирования. Например, Jeol JBX-9500FS при величине рабочего поля, равной 1000×1000 мкм, обеспечивает в его пределах точность позиционирования пучка, равную ± 9 нм, и имеет диаметр рабочего электронного пучка, равный 4 нм. Фактически, величина ошибок позиционирования распределена относительно ожидаемых положений соответствующих пикселей по нормальному закону с СКО, равным 3 нм, что меньше максимально допустимого СКО, полученного исходя их критерия Марешаля. Это говорит о возможности изготовления синтезированных рельефно-фазовых голограмм-проекторов с размером пикселя 20 нм с использованием современных установок электронно-лучевой литографии.

Выводы. По полученным результатам видно, что при СКО ошибок позиционирования пикселя голограммы, равном 4 нм, качество восстановленного изображения довольно близко к качеству изображения, получаемого при условии отсутствия ошибок позиционирования на голограмме. Это позволяет сделать вывод о применимости критерия Марешаля для синтезированных голограмм при рассмотренных условиях синтеза. Анализ технологических параметров современных установок электронно-лучевой литографии показывает, что с их помощью существует возможность изготовления голограмм-проекторов с ошибками позиционирования, приводящими к не более чем 20% уменьшению числа допустимых уровней порога, с целью последующего их использования в фотолитографическом процессе в глубоком ультрафиолете.

Старовойтов С.О. (автор)

Корешев С.Н. (научный руководитель)