

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-352-360

УДК 535.417; 535.317; 778.38

## Оценка допустимых ошибок позиционирования пикселей при отображении на носителе синтезированных голограмм-проекторов для проекционной фотолитографии

Сергей Николаевич Корешев<sup>1</sup>, Сергей Олегович Старовойтов<sup>2</sup>✉,  
 Денис Сергеевич Смородинов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Филиал АО «Корпорация «Комета» — «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

<sup>2</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>3</sup> ООО «ИнТех Консалтинг», Москва, 115280, Российская Федерация

<sup>1</sup> koreshev@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8728-6122>

<sup>2</sup> s.starovoitov95@gmail.com✉, <http://orcid.org/0000-0003-4429-7929>

<sup>3</sup> smorodinov.denis@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9564-8074>

### Аннотация

**Предмет исследования.** Проведена оценка допустимых ошибок позиционирования при отображении отражательных рельефно-фазовых голограмм-проекторов, предназначенных для использования в голографической фотолитографии, на твердом носителе с помощью установок электронно-лучевой литографии. **Метод.** В работе применен метод синтеза и численного восстановления голограмм-проекторов. Синтез голограмм осуществлялся путем математического моделирования физических процессов записи и восстановления голограмм. Выбраны следующие параметры: характеристический размер бинарного объекта  $20 \times 20$  нм или  $80 \times 80$  нм, длина волны используемого излучения 13,5 нм, размер пикселя голограммы  $20 \times 20$  нм, расстояние между плоскостями объекта и голограммы от 20,4 до 31,6 мкм, угол падения плоской опорной волны  $14^\circ 42'$ . Для каждого рассмотренного объекта «Уголки», «Штриховая мира» и «Крупные уголки» выполнен синтез четырех голограмм с разной величиной среднеквадратического отклонения ошибок позиционирования пикселей. Моделирование ошибок осуществлялось путем нарушения эквидистантности расположения точек (пикселей) на апертуре голограммы. Искаженные таким образом голограммы подвергались стандартной процедуре численного восстановления в виртуальном пространстве. Сравнение вида изображений, полученных при разной величине ошибок позиционирования пикселей голограммы, позволило оценить их влияние на качество восстановленного изображения. **Основные результаты.** Установлено, что используемый для оценки допустимой величины ошибки позиционирования в аналоговой голографии критерий для синтезированных голограмм неприменим, что связано с особенностями структуры интерференционных полос у дискретных голограмм. Показана существенная зависимость допустимых, с точки зрения качества восстановленного изображения, ошибок позиционирования пикселей от формы представления объекта. Выявлена невозможность применения единого допуска на ошибки позиционирования пикселей для всех условий синтеза голограмм-проекторов, свидетельствующая о необходимости встраивания в используемый программный комплекс синтеза и восстановления голограмм блока оценки допустимых ошибок позиционирования голограммы. По итогам анализа технологических параметров современных комплексов электронно-лучевой литографии установлена возможность их использования для изготовления голограмм-проекторов для современной высокоразрешающей фотолитографии. **Практическая значимость.** Использование предложенного в работе метода моделирования допустимых ошибок позиционирования синтезированных голограмм позволяет оценить практическую возможность изготовления голограмм с требуемой структурой и высоким качеством восстановленного изображения с помощью конкретной установки электронно-лучевой литографии.

### Ключевые слова

синтезированные голограммы, отображение структуры голограммы на твердом носителе, фотолитография, электронно-лучевая литография, допустимые ошибки позиционирования пикселей, качество восстановленного изображения, пороговая обработка изображения

© Корешев С.Н., Старовойтов С.О., Смородинов Д.С., 2021

**Ссылка для цитирования:** Корешев С.Н., Старовойтов С.О., Смородинов Д.С. Оценка допустимых ошибок позиционирования пикселей при отображении на носителе синтезированных голограмм-проекторов для проекционной фотолитографии // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 3. С. 352–360. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-352-360

## Evaluation of permissible pixel positioning errors for displaying computer-generated holograms in projection photolithography

Sergey N. Koreshev<sup>1</sup>, Sergei O. Starovoitov<sup>2</sup>✉, Denis S. Smorodinov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Branch of JSC “Kometa Corporation” — Scientific and Design Center for Optoelectronic Observation Complexes, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

<sup>2</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>3</sup> InTech Consulting Ltd, Moscow, 115280, Russian Federation

<sup>1</sup> koreshev@list.ru, <http://orcid.org/0000-0002-8728-6122>

<sup>2</sup> s.starovoitov95@gmail.com✉, <http://orcid.org/0000-0003-4429-7929>

<sup>3</sup> smorodinov.denis@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9564-8074>

### Abstract

The authors carried out the estimation of the permissible positioning errors when displaying reflective phase holograms intended for application in holographic photolithography on solid media using electron-beam lithography devices. The work deals with the projection of holographic photolithography based on computer generated Fresnel holograms. The synthesis of holograms involved mathematical modeling of the physical processes of hologram recording and reconstruction using the following parameters: the characteristic size of the binary object is  $20 \times 20$  nm or  $80 \times 80$  nm, the wavelength of the radiation is 13.5 nm, the pixel size of the hologram is  $20 \times 20$  nm, the distance between the planes of the object and the hologram is from 20.4 to 31.6 microns, the angle of incidence of the reference wave is  $14^\circ 42'$ . For each of the three objects used in the modeling (namely, “Angles”, “Line grid target” and “Enlarged angles”), four computer-generated holograms were synthesized with different values for standard deviation of the pixel positioning error. The simulation of these errors was carried out by violating the equidistance of the points (pixels) on the hologram aperture. The holograms distorted in this way were subjected to the standard procedure of numerical reconstruction in virtual space. Comparison of the quality of the images obtained at different values of the positioning errors of the hologram pixels made it possible to evaluate their influence on the quality of the reconstructed image. It has been shown that the criterion used for estimating the permissible value of the positioning error in analog holography cannot be applied to synthesized holograms, because of the peculiar properties of interference fringes in discrete holograms. The results demonstrated a significant dependence of the permissible (in terms of image quality) pixel positioning errors on the object presentation method. The analysis revealed the impossibility of applying a single tolerance for pixel positioning errors to all possible synthesis conditions of computer-generated holograms and hence indicates the necessity of including a feature for estimating permissible hologram positioning errors into the software package for the synthesis and reconstruction of holograms. Based on the analysis of the technological parameters of modern electron-beam lithography devices, the authors confirmed the possibility of their use for manufacturing computer-generated holograms in modern high-resolution photolithography. Modeling the permissible positioning errors of computer-generated holograms by the proposed method allows evaluating the practical possibility of producing holograms with the required structure and high quality of the reconstructed image with a specific electron beam lithography device.

### Keywords

computer-generated holograms, display of the hologram structure on solid media, photolithography, electron-beam lithography, permissible errors of pixel positioning, quality of the reconstructed image, image thresholding

**For citation:** Koreshev S.N., Starovoitov S.O., Smorodinov D.S. Evaluation of permissible pixel positioning errors for displaying computer-generated holograms in projection photolithography. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 3, pp. 352–360 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-3-352-360

### Введение

Синтезированные голограммы в настоящее время применяются в различных областях техники, однако особенно перспективным представляется их использование в фотолитографии [1–5]. Такие голограммы позволяют одновременно формировать относительно большое по площади изображение, свободное от полевых аберраций, без необходимости применения высокоразрешающих литографических объективов, конструкция которых непрерывно усложняется в связи с постоянным уменьшением проектных норм (размеров транзисторов), изготавливаемых методом фотолитографии полупроводниковых изделий. Поскольку применяемые в фотолитографии объекты обычно имеют

вид плоских бинарных амплитудных транспарантов, их голограммы относительно легко можно синтезировать на компьютере и отобразить затем на физическом носителе для последующего восстановления.

Процесс изготовления синтезированных голограмм-проекторов содержит в себе два последовательно выполняемых этапа.

На первом этапе осуществляется непосредственно синтез голограммной структуры — расчет распределения комплексной амплитуды в плоскости регистрации голограммы. Для этого в компьютер вводится то изображение, голограмму которого необходимо получить. Отметим, что в фотолитографии чаще всего это бинарный амплитудный транспарант, работающий на пропускание. Далее с помощью специализированного

программного обеспечения, путем математического моделирования процесса физической регистрации голограммы, осуществляется расчет голографического поля, соответствующего введенному изображению.

На втором этапе рассчитанная структура голограммы отображается на твердом носителе в виде отражательной рельефно-фазовой голограммной решетки. В ходе процесса при отображении результаты расчета структуры голограммы, представляемые в виде набора значений интенсивности или фазы, соответствующих пикселям голограммы, поступают на установку электронно-лучевой литографии — генератор изображения. Применение таких установок в настоящее время является оптимальным методом изготовления голограмм с малым размером пикселя [6–8]. Генераторы изображений в режиме растрового либо векторного сканирования за счет взаимодействия сфокусированного оптического системой электронного пучка с материалом носителя в точно заданных участках рабочего поля устройства осуществляют изготовление синтезированной голограммы — отображение ее структуры на носителе. При необходимости получения структуры, превышающей по площади величину поля, осуществляется подвижка координатного стола. Высокая точность его перемещения достигается благодаря использованию прецизионных систем и систем интерференционного контроля положения. В случае изготовления рельефно-фазовых голограмм-проекторов необходимая структура рельефа создается за счет удаления фоторезиста с определенных участков апертуры носителя. После проявления проэкспонированного фоторезиста и нанесения отражающего покрытия полученная структура может быть использована как отражательная рельефно-фазовая голограмма-проектор для формирования действительного изображения на поверхности полупроводниковой пластины [9, 10].

Качество изображения, восстанавливаемого с помощью синтезированных голограмм-проекторов, наиболее удобно оценивать с помощью численного критерия, выражаемого через количество допустимых уровней (градиаций) его пороговой обработки, при которых оно по распределению интенсивности полностью идентично исходному объекту [11]. Правомочность использования такого критерия объясняется пороговыми свойствами фоторезистов. Чем больше число допустимых уровней пороговой обработки восстановленного изображения, тем больший диапазон экспозиционных доз допустим в фотолитографическом процессе, и тем менее пороговым может быть используемый в процессе фоторезист.

Этапы процесса изготовления голограмм-проекторов характеризуются рядом факторов, способных оказать существенное влияние на качество формируемого с помощью голограмм изображения. На первом этапе основное влияние на качество восстановленных изображений оказывают использованные параметры синтеза: периоды дискретизации объекта и голограммы, расстояние от объекта до голограммы, угол падения опорной волны, распределение фазы объектной волны в плоскости объекта и т. д. [12, 13]. На втором этапе отображения структуры голограммы на

физическом носителе к потере качества восстановленного изображения могут привести ошибки формы рабочей поверхности носителя и ошибки позиционирования пикселей голограммы, связанные с неточным наведением электронного пучка при сканировании, покрытого слоем фоторезиста носителя. Кроме того, это могут быть и ошибки сшивания поля, возникающие в том случае, когда площадь изготавливаемой структуры больше размера рабочего поля устройства, а также ошибки наложения при многослойной экспозиции [14, 15].

Допустимые ошибки формы рабочей поверхности носителя и, следовательно, синтезированной голограммы-проектора, могут быть относительно легко определены исходя из свойства полифункциональности отражательной рельефно-фазовой голограммы [16]. В соответствии с ним, преобразование волновых фронтов может быть представлено в виде двух последовательных актов: дифракции восстанавливающей волны на аналогичной по структуре пропускающей голограмме и последующего отражения восстановленной волны от рабочей поверхности голограммы. С учетом результатов работы [17], можно сделать вывод о пригодности использования, уменьшенного вдвое — из-за того, что голограмма работает на отражение — критерия Марешаля [18] для оценки допуска на допустимые ошибки формы рабочей поверхности голограммы-проектора. В соответствии с этим критерием, допуск на среднеквадратичное отклонение формы рабочей поверхности синтезированной отражательной голограммы-проектора может быть описан с помощью выражения:

$$D_{\text{скв}} \leq \frac{1}{28} \lambda,$$

где — рабочая длина волны голограммы.

Структуры синтезированных голограмм-проекторов, чаще всего отображаются на носителях с плоской рабочей поверхностью. По этой причине обеспечение требуемой плоскостности рабочей поверхности голограммы-проектора при современном уровне технологии формообразования не приводит к каким-либо существенным трудностям.

Рассмотрим оценку допустимых ошибок позиционирования пикселей голограммы. В аналоговой голографии ошибку позиционирования интерференционной полосы в большинстве случаев определяют исходя из известного численного равенства, вносимого ею дополнительного фазового набег, измеряемого в долях от  $2\pi$ , ошибке позиционирования интерференционной полосы, отнесенной к локальному периоду голограммной структуры [19]. Так как синтезированные голограммы обладают дискретной структурой, каждая их интерференционная полоса представляется в виде массивов отстоящих друг от друга пикселей. Следовательно, говорить об общей ошибке позиционирования интерференционной полосы для синтезированной голограммы нет смысла. Такая особенность структуры синтезированных голограмм привела к необходимости проведения исследования влияния ошибок позиционирования пикселей на качество восстановленного изображения,

результаты которого представлены в настоящей работе. Исследование выполнено методом математического моделирования и нацелено на проверку возможности использования допуска на ошибку позиционирования интерференционных полос, рассчитанного для аналоговых голограмм, к дискретным синтезированным голограммам-проекторам.

### Методика проведения исследования

Методика проведения исследования включала в себя синтез голограмм-проекторов двумерных объектов, представляющих бинарные амплитудные транспаранты. Результаты этого синтеза представлялись в виде двумерного массива значений интенсивности голографического поля, рассчитанных для эквидистантно расположенных точек апертуры голограммы. Для получения рельефно-фазовой синтезированной голограммы каждое значение интенсивности массива автоматически пересчитывалось в пропорциональный ему фазовый набег от 0 до  $\pi/2$  (максимальное значение интенсивности соответствовало набегу в  $\pi/2$ , а минимальное — в 0). Набег в дальнейшем, при отображении голограммы на носитель, кодируется в виде поверхностного рельефа, лежащего в пределах от 0 до  $\lambda/4$ . На стадии численного восстановления синтезированной голограммы эквидистантное расположение точек (пикселей) на апертуре голограммы нарушалось, что позволяло моделировать ошибки позиционирования пикселей при отображении синтезированной голограммы-проектора на носитель. Значение вносимой ошибки для каждого элемента (пикселя) голограммы определялось через отклонение реального положения отсчета от центра соответствующего пикселя по осям  $X$  и  $Y$ . Это отклонение принималось случайной величиной, распределенной по нормальному закону с математическим ожиданием в центре рассматриваемого пикселя. Величины вносимых ошибок позиционирования характеризовались их среднеквадратичным значением для всех пикселей голограммы. После внесения данных изменений в положение отсчетов модифицированная голограмма восстанавливалась обычным образом в виртуальном пространстве. Сравнение качества изображений, полученных при наличии и отсутствии ошибок позиционирования пикселей голограммы, позволяет оценить влияние ошибок позиционирования пикселей на качество восстановленного изображения. Качество восстановленного изображения оценивается с помощью критерия, численно выражаемого через количество допустимых уровней (градаций) пороговой обработки восстановленного изображения, при котором оно по распределению интенсивности полностью идентично исходному объекту.

Математическое моделирование процессов синтеза и восстановления голограмм со случайными ошибками позиционирования пикселей проведено в специализированном программном комплексе. Синтез голограмм в рамках исследования осуществлялся методом Гюйгенса–Френеля, с использованием традиционного для фотолитографии телецентрического хода лучей в объектном пучке. Синтез голограмм некоторых объек-

тов выполнен в случае использования для освещения объекта пучка лучей, сходящегося в центр голограммы, как показано в работе [12], что позволяет повысить качество восстанавливаемого изображения и при этом сократить площадь голограммы.

В связи с тем, что исследование нацелено на реализацию процесса голографической фотолитографии в глубоком ультрафиолете, была выбрана рабочая длина волны  $\lambda = 13,5$  нм. Расстояние от объекта до голограммы принято равным 20,4 мкм. Размер пикселя голограммы  $R_H$  составлял  $20 \times 20$  нм, а угол падения опорной волны  $\theta = 14^\circ 42'$ . Объекты в исследовании рассматривались при размерах пикселя  $80 \times 80$  нм и  $20 \times 20$  нм, что связано с использованием различных подходов к выбору частоты их дискретизации: в первом случае проводился при строгом соблюдении условий теоремы отсчетов, а во втором — на основании критерия разрешения Рэля. Приведенные параметры выбраны как оптимальные для синтеза голограмм в глубоком ультрафиолете, и получены в результате анализа изображающих свойств синтезированных голограмм-проекторов, подробно изложенного в работе [13].

Характеристический размер — минимальный размер структуры объекта, всегда равен 80 нм, так как успешное восстановление изображения возможно только в том случае, когда период дискретизации синтезированной голограммы как минимум в четыре раза меньше периода дискретизации самого объекта.

С учетом выбранных параметров голограммной структуры рассчитано максимально допустимое значение отклонения интерференционной полосы по критерию Марешаля. Для этого определена несущая частота голограммы по углу схождения опорного и объектного пучков лучей:

$$\xi = \frac{\sin \theta}{\lambda}.$$

Период, соответственно, равен  $T = \frac{\lambda}{\sin \theta} = \frac{13,5}{\sin 14^\circ 42'} = 53,2$  нм.

Учитывая, что ошибка позиционирования полосы в один период приводит к волновой aberrации  $2\pi$  в точке апертуры голограммы, можно найти среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибок позиционирования в флуктуации волновой aberrации по апертуре голограммы с помощью критерия Марешаля:

$$\Delta_{\max} = 53,2 \times \frac{1}{14} = 3,8 \text{ нм.}$$

Для выбранных параметров голограммной структуры — для несущего пространственного периода 53,2 нм в случае аналоговой (не дискретной) голограммы, допустимой с точки зрения критерия Марешаля ошибкой позиционирования интерференционных полос (страт) можно считать среднеквадратичную ошибку положения полос, равную 4 нм. В связи с этим выполненные исследования синтезированных голограмм проводились для наибольшей допустимой по критерию Марешаля ошибки 4 нм, а также для увеличенных ошибок — 8 и 12 нм.

### Результаты экспериментов

Возможность практического применения допуска на ошибку позиционирования интерференционной полосы оценена в результате математического моделирования процесса голографической записи. Для этого были проведены синтез и численное восстановление в виртуальном пространстве голограмм трех объектов, приведенных на рис. 1: «Уголки», «Штриховая мира» и «Крупные уголки».

Объект «Уголки» (рис. 1, *a*) имеет размер  $23 \times 23$  пикселей и представляет совокупность линий шириной от 1 до 3 пикселей. Линии креста имеют размер  $1 \times 7$  пикселей. Из отрезков толщиной в 1 пиксел составлены два ближайших к кресту уголка, расстояние между которыми 1 пиксел. Ширина третьего уголка 2 пиксела, четвертого, самого дальнего от креста, — 3 пиксела. Расстояние между вторым и третьим уголками равно 2 пиксела, между третьим и четвертым — 3 пиксела. Объект «Штриховая мира» (рис. 1, *b*) представляет три линии шириной 4 пиксела и длиной 30 пикселей с промежутком между ними шириной в 4 пиксела. Объект «Крупные уголки» (рис. 1, *c*) состоит из уголка, ширина линий которого 6 пикселей. Внутри уголка располагаются линии шириной от 1 до 4 пиксела и длиной 17 пикселей. Общий размер данного объекта составляет  $28 \times 28$  пикселей. Для избавления от искажений, возникающих вследствие интерференции нулевого и первого восстановленных порядков при восстановлении голограмм данного объекта, расстояние между объектом и голограммой увеличено со стандартного 20,4 мкм до 31,6 мкм. Каждый рассматриваемый объект представляет собой бинарный амплитудный транспарант, работающий на пропускание.

Синтез голограмм тест-объектов, представленных на рис. 1, выполнен для случая, когда размер пиксела объекта составляет  $80 \times 80$  нм, и в объектном пучке использован телецентрический ход лучей. Процесс синтеза и восстановления голограммы осуществлен для каждого из рассматриваемых объектов четыре раза: при условии отсутствия ошибок позиционирования пикселей голограммы, а также при их распределении по нормальному закону с математическим ожиданием в центре рассматриваемого пиксела и СКО, равным 4, 8 и 12 нм соответственно. Таким образом, синтезировано и численно восстановлено двенадцать голограмм. Восстановленные изображения представлены в табл. 1.

Оценка качества осуществлялась с использованием критерия, численно выражаемого через количество допустимых уровней (градаций) пороговой обработки восстановленного изображения, при котором оно по распределению интенсивности полностью идентично исходному тест-объекту. Восстанавливаемое с помощью программного комплекса изображение представляет дискретный полутоновой объект. Цвет каждого пиксела соответствует одному из 256 оттенков серого цвета в соответствии с так называемой «серой шкалой» [20], где уровень 0 соответствует черному цвету, 255 — белому. Существуют всего 256 возможных уровней пороговой обработки изображения. Чем больше количество уровней пороговой обработки, при которых структура восстановленного изображения соответствует структуре исходного объекта, тем изображение можно считать более качественным, а значит, при реализации фотолитографического процесса снижаются требования к контрасту фоторезиста и точности подбора экспозиционной дозы [21]. Таким образом, количество уровней (градаций) можно использовать как численную оценку качества восстановленного изображения. Результаты оценки качества полученных изображений показаны в табл. 2.

Используя описанный выше критерий численной оценки качества восстановленных изображений, можно сделать вывод что при СКО ошибок позиционирования пикселей голограммы 4 нм, качество восстановленного изображения близко к качеству изображения, получаемого при условии отсутствия ошибок позиционирования пикселей голограмм. Это говорит о применимости критерия Марешаля, используемого в случае аналоговых голограмм, для дискретных (синтезированных) голограмм при рассмотренных условиях синтеза и телецентрическом ходе лучей объектного пучка.

С целью изучения влияния телецентрического хода лучей при синтезе голограммы на величину допустимых ошибок позиционирования пикселей голограммы-проектора выполнен синтез голограмм объекта «Уголки» (размер пиксела объекта составлял  $80 \times 80$  нм) при использовании для освещения объекта гомоцентрического пучка лучей, сходящихся в центр апертуры голограммы. Для этого в плоскости объекта при синтезе голограммы задано распределение фаз, соответствующее его освещению нормально падающим гомоцентрическим пучком, сходящимся в центр голограммы. Такая схема освещения позволяет сократить

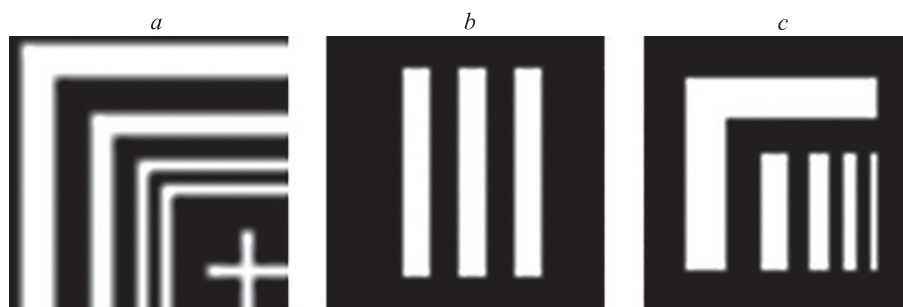
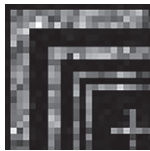
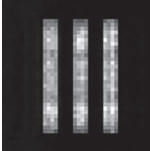
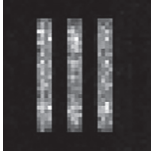


Рис. 1. Объекты: «Уголки» (*a*); «Штриховая мира» (*b*); «Крупные уголки» (*c*)

Fig. 1. Objects: “Angles” (*a*); “Line grid target” (*b*); “Enlarged angles” (*c*)

Таблица 1. Восстановленные изображения объектов

Table 1. Reconstructed images

| Объект           | Изображение при отсутствии ошибок позиционирования пикселей голограммы            | Изображения при наличии ошибок, распределенных по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением, нм |                                                                                     |                                                                                     |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                  |                                                                                   | 4                                                                                                            | 8                                                                                   | 12                                                                                  |
| «Уголки»         |  |                             |  |  |
| «Штриховая мира» |  |                             |  |  |
| «Крупные уголки» |  |                             |  |  |

площадь голограммы и одновременно повысить качество восстановленного изображения [12]. Полученные с помощью синтезированных подобным образом голограмм-проекторов восстановленные изображения приведены на рис. 2.

В результате синтеза для восстановленного изображения объекта «Уголки», при полной идентичности исходному объекту, получено число допустимых градаций пороговой обработки равное: 113 (рис. 2, а); 107 (рис. 2, b); 86 (рис. 2, c); 52 (рис. 2, d).

Таким образом, критерий Марешаля применим и в данном случае, а качество каждого из восстановленных изображений оказывается более высоким, чем у соответствующих изображений в табл. 1, полученных при использовании телецентрического хода лучей в объектном пучке, несмотря на уменьшенный размер голограммы.

Исследование влияния периода дискретизации объекта на величину допустимых ошибок позиционирования пикселей синтезированной голограммы проведено с помощью объекта «Штриховая мира» при стандарт-

ном телецентрическом ходе лучей, и с повышенной частотой дискретизации на объекте, учитывающей требования критерия Рэлея для разрешающей способности [13]. Согласно критерию Рэлея, изображение соседних точек будет восприниматься как непрерывное, в случае если расстояние между их центрами не превышает величину радиуса диска Эйри:

$$R_E = \frac{1,22\lambda}{2A},$$

где  $A$  — числовая апертура системы, определяемая как  $A = \sin\alpha = \frac{\lambda}{a_t}$ ;  $\lambda$  — рабочая длина волны;  $a_t$  — размер отдельной точки как минимального элемента объекта.

Так как речь идет о дискретных объектах, все расстояния измерялись в периодах, а соотношения между ними были кратны двум. Следовательно, значение  $R_E$  не может превышать величины, равной половине  $a_t$ . Для восстановления непрерывного изображения периоды дискретизации объекта и голограммы при синтезе должны были быть равны между собой, т. е. равны

Таблица 2. Оценка качества восстановленных изображений с помощью численного критерия, основанного на подсчете числа допустимых уровней (градаций) пороговой обработки восстановленного изображения, при размере пиксела объекта  $80 \times 80$  нм с использованием телецентрического хода лучей в объектном пучке

Table 2. Evaluation of the quality of reconstructed images using a numerical criterion based on the number of acceptable levels (gradations) of threshold processing of the reconstructed image, with an object pixel size of  $80 \times 80$  nm using the telecentric object beam

| Объект           | Число допустимых уровней (градаций) пороговой обработки восстановленного изображения (позиционирования пикселей голограммы) |                                                |    |    |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----|----|
|                  | При отсутствии ошибок                                                                                                       | При среднеквадратическом отклонении ошибок, нм |    |    |
|                  |                                                                                                                             | 4                                              | 8  | 12 |
| «Уголки»         | 70                                                                                                                          | 70                                             | 47 | 10 |
| «Штриховая мира» | 76                                                                                                                          | 57                                             | 34 | 5  |
| «Крупные уголки» | 55                                                                                                                          | 39                                             | 20 | 2  |

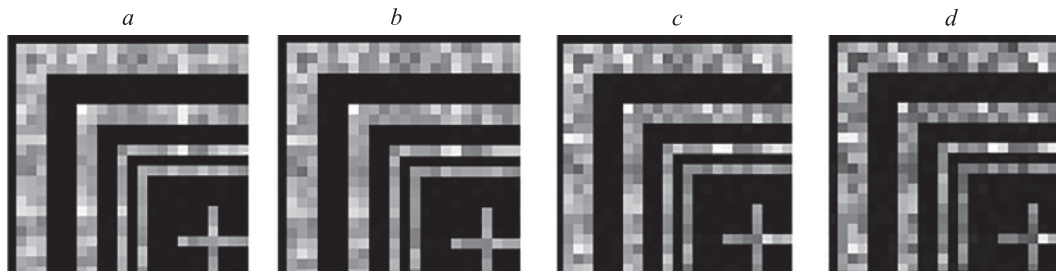


Рис. 2. Восстановленные изображения объекта «Уголки» с использованием сходящегося на голограмме объектного пучка при отсутствии ошибок позиционирования пикселей голограммы (a) и в случае, когда эти ошибки распределены по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением, равным: 4 (b), 8 (c) и 12 нм (d)

Fig. 2. Reconstructed images of the “Angles” object, obtained with the object beam converging on the hologram, in the absence of positioning errors of the hologram pixels (a) and in the case when these errors are normally distributed with standard deviation equal to 4 (b), 8 (c) and 12 nm (d)

20 × 20 нм. Восстановленные изображения объекта «Штриховая мира» приведены на рис. 3.

В результате синтеза для восстановленного изображения объекта «Штриховая мира», при полной идентичности исходному объекту, получено число допустимых градаций пороговой обработки равное: 26 (рис. 3, a); 2 (рис. 3, b); 0 (рис. 3, c, d).

Это означает, что критерий Марешаля в данном случае использовать нельзя, и допуск на ошибки позиционирования пикселей должен быть существенно ужесточен. Для определения значения допуска про-

ведены дополнительные эксперименты с объектом «Штриховая мира» и идентичными параметрами синтеза, но уменьшенными величинами ошибок позиционирования. Восстановленные изображения приведены на рис. 4.

В результате синтеза с уменьшенными величинами ошибок позиционирования, для восстановленного изображения объекта «Штриховая мира», при полной идентичности исходному объекту, получено число допустимых градаций пороговой обработки равное: 22 (рис. 4, a); 17 (рис. 4, b); 12 (рис. 4, c); 7 (рис. 4, d).

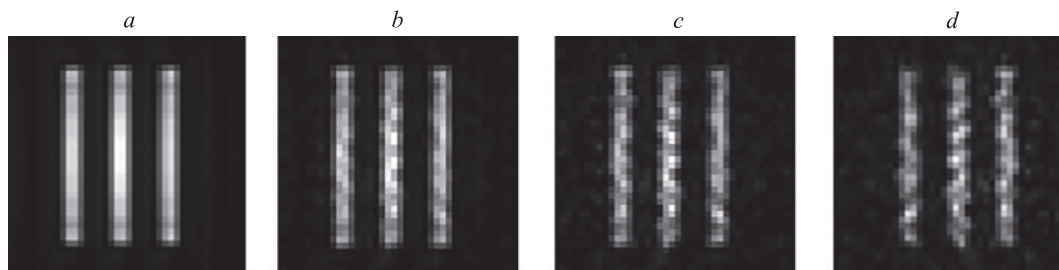


Рис. 3. Восстановленные изображения объекта «Штриховая мира» с размером пиксела 20 × 20 нм, полученные с использованием телецентрического объектного пучка при отсутствии ошибок позиционирования пикселей голограммы (a) и в случае, когда эти ошибки распределены по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением, равным: 4 (b), 8 (c) и 12 нм (d)

Fig. 3. Reconstructed images of the “Line grid target” object with a pixel size of 20 × 20 nm obtained using a telecentric object beam in the absence of positioning errors of the hologram pixels (a) and in the case when these errors are normally distributed with standard deviation equal to 4 (b), 8 (c) and 12 nm (d)

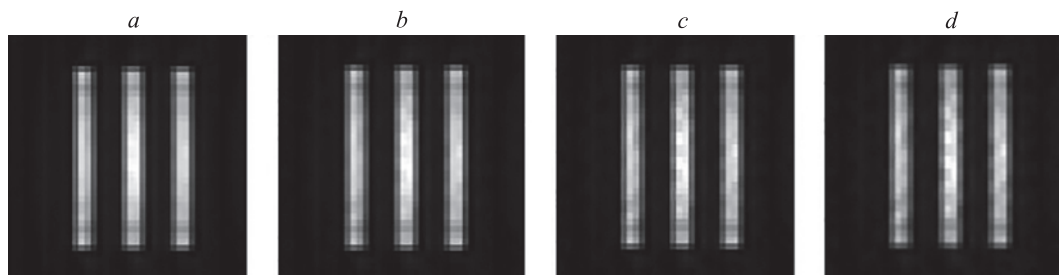


Рис. 4. Восстановленные изображения объекта «Штриховая мира» с размером пиксела 20 × 20 нм, полученные в случае, когда ошибки распределены по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением, равным: 0,5 (a); 1 (b); 1,5 (c); 2 нм (d)

Fig. 4. Reconstructed images of the “Line grid target” object with a pixel size of 20 × 20 nm, obtained in the case when these errors are normally distributed with standard deviation equal to 0.5 (a), 1 (b), 1.5 (c) and 2 nm (d)

Исходя из критерия разрешения Рэлея, допустимое снижение количества уровней пороговой обработки восстановленного изображения относительно их количества при отсутствии ошибок позиционирования пикселей голограммы принято равным 20 %. В связи с этим при использовании объектов с повышенной частотой дискретизации СКО допустимых ошибок позиционирования не должно превышать 0,5 нм.

Выявленная невозможность применения единого допуска на ошибки позиционирования пикселей для всех условий синтеза голограмм-проекторов свидетельствует о необходимости встраивания в программный комплекс синтеза и восстановления голограмм блока оценки допустимых ошибок позиционирования голограммы. Это позволит индивидуально определять величину допуска для каждой из синтезируемых голограмм-проекторов.

### Анализ возможности изготовления полученных голограмм с использованием современных установок электронно-лучевой литографии

Для отображения синтезированной голограммы выбранная установка электронно-лучевой литографии должна иметь возможность сформировать элемент с размером, равным размеру пикселя голограммы, а ошибки позиционирования при отображении требуемой структуры должны быть невелики, чтобы качество изображения, восстанавливаемого с помощью такой голограммы, оставалось высоким. Современные установки электронно-лучевой литографии характеризуются малыми диаметрами формируемого фокального пятна. Так, CABL-UH (Crestec, Япония) способна формировать рабочее фокальное пятно диаметром 1,6 нм, что позволяет изготавливать структуры с минимальной шириной элемента 7 нм. Для JBX-9500FS (Jeol, Япония) минимальный диаметр пятна составляет 4 нм. Таким образом, их можно применять для отображения голограмм, имеющих размер пикселя, равный 20 нм.

Согласно данным производителя, установка JBX-9500FS при величине рабочего поля 1000×1000 мкм,

обеспечивает в его пределах точность позиционирования пучка  $\pm 9$  нм. Фактически, величина ошибок позиционирования распределена относительно ожидаемых положений соответствующих пикселей по нормальному закону с СКО, равным 3 нм [15], что меньше максимально допустимого СКО, полученного исходя из критерия Марешаля. Это говорит о возможности изготовления синтезированных рельефно-фазовых голограмм-проекторов с размером пикселя 20 нм с использованием современных установок электронно-лучевой литографии.

### Заключение

В работе рассмотрены особенности влияния ошибок отображения синтезированных отражательных рельефно-фазовых голограмм-проекторов на носителе на качество восстановленного изображения. Установлено, что при соблюдении соотношения периодов дискретизации объекта и голограммы 4:1, известный из аналоговой голографии критерий Марешаля применим для оценки допустимых ошибок позиционирования пикселей синтезированных голограмм. Если же эти условия нарушаются, требования к позиционированию при отображении голограмм значительно ужесточаются, и критерий Марешаля использовать нельзя, что связано с особенностями структуры дискретных голограмм. Это говорит о необходимости предварительного автоматизированного расчета допустимых ошибок позиционирования перед изготовлением каждой голограммы. Анализ технологических параметров современных установок электронно-лучевой литографии показывает, что существует возможность изготовления голограмм-проекторов с ошибками позиционирования, приводящими к уменьшению не более, чем на 20 % числа допустимых уровней (градаций) пороговой обработки восстановленного изображения, с целью последующего их использования в фотолитографическом процессе в глубоком ультрафиолете.

### Литература

1. Maiden A., McWilliam R., Purvis A., Johnson S., Williams G.L., Seed N.L., Ivey P.A. Nonplanar photolithography with computer-generated holograms // *Optics Letters*. 2005. V. 30. N 11. P. 1300–1302. doi: 10.1364/OL.30.001300
2. Naulleau 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 // *Applied Optics*. 2007. V. 46. N 14. P. 2581–2585. doi: 10.1364/AO.46.002581
3. Cheng Y.-C., Isoyan A., Wallace J., Khan M., Cerrina F. Extreme ultraviolet holographic lithography: Initial results // *Applied Physics Letters*. 2007. V. 90. N 2. P. 023116. doi: 10.1063/1.2430774
4. Bay C., Hübner N., Freeman J., Wilkinson T. Maskless photolithography via holographic optical projection // *Optics Letters*. 2010. V. 35. N 13. P. 2230–2232. doi: 10.1364/OL.35.002230
5. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Наука-Физматлит, 2007. 416 с.
6. Gao F., Zhu J., Huang Q., Zhang Y., Zeng Y., Gao F., Guo Y., Cui Z. Electron-beam lithography to improve quality of computer-generated hologram // *Microelectronic Engineering*. 2002. V. 61–62. P. 363–369. doi: 10.1016/S0167-9317(02)00570-1

### References

1. Maiden A., McWilliam R., Purvis A., Johnson S., Williams G.L., Seed N.L., Ivey P.A. Nonplanar photolithography with computer-generated holograms. *Optics Letters*, 2005, vol. 30, no. 11, pp. 1300–1302. doi: 10.1364/OL.30.001300
2. Naulleau 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. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 14, pp. 2581–2585. doi: 10.1364/AO.46.002581
3. Cheng Y.-C., Isoyan A., Wallace J., Khan M., Cerrina F. Extreme ultraviolet holographic lithography: Initial results. *Applied Physics Letters*, 2007, vol. 90, no. 2, pp. 023116. doi: 10.1063/1.2430774
4. Bay C., Hübner N., Freeman J., Wilkinson T. Maskless photolithography via holographic optical projection. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, no. 13, pp. 2230–2232. doi: 10.1364/OL.35.002230
5. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 416 p. (in Russian)
6. Gao F., Zhu J., Huang Q., Zhang Y., Zeng Y., Gao F., Guo Y., Cui Z. Electron-beam lithography to improve quality of computer-generated hologram. *Microelectronic Engineering*, 2002, vol. 61–62, pp. 363–369. doi: 10.1016/S0167-9317(02)00570-1

7. Freese W., Kämpfe T., Rockstroh W., Kley E.B., Tünnermann A. Optimized electron beam writing strategy for fabricating computer-generated holograms based on an effective medium approach // *Optics Express*. 2011. V. 19. N 9. P. 8684–8692. doi: 10.1364/OE.19.008684
8. Tamura H., Ishii Y. Computer-generated hologram fabricated by electron-beam lithography for noise reduction // *Optical Review*. 2012. V. 19. N 2. P. 50–57. doi: 10.1007/s10043-012-0012-z
9. Корешев С.Н. Голограммные оптические элементы и устройства. СПб.: НИУ ИТМО, 2013. 143 с.
10. Плебанович В.И. Безмасковая литография — требование сегодняшнего дня // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2015. № 7(147). С. 112–118.
11. Корешев С.Н., Старовойтов С.О., Смородинов Д.С., Фролова М.А. Методы оценки качества изображений бинарных объектов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм-проекторов // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2020. Т. 20. № 3(127). С. 327–334. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-327-334
12. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Старовойтов С.О., Фролова М.А. Влияние структуры объектного пучка на качество изображения, восстанавливаемого с помощью синтезированной голограммы-проектора Френеля // *Оптический журнал*. 2020. Т. 87. № 7. С. 41–48. doi: 10.17586/1023-5086-2020-87-07-41-48
13. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Никаноров О.В. Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства // *Компьютерная оптика*. 2016. Т. 40. № 6. С. 793–801. doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801
14. Aida Y. Development of the JBX-8100FS electron beam lithography system // *Jeol News*. 2018. V. 53. N 1. P. 59–62.
15. Greibe T., Anhøj T.A., Johansen L.S., Han A. Quality control of JEOL JBX-9500FSZ e-beam lithography system in a multi-user laboratory // *Microelectronic Engineering*. 2016. V. 155. P. 25–28. doi: 10.1016/j.mee.2016.02.003
16. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Полифункциональность рельефо-фазовых отражательных голограммных оптических элементов // *Оптический журнал*. 2001. Т. 68. № 12. С. 28–32.
17. Jagoszewski E. The influence of the hologram surface curvature on the holographic imaging quality // *Optik*. 1985. V. 69. N 2. P. 85–88.
18. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. Дифракционная теория и влияние когерентности света. М.: Мир, 1964. 295 с.
19. Корешев С.Н. О построении схем записи голограммной структуры на поверхности главного зеркала адаптивного телескопа и о требованиях, предъявляемых к их геометрическим параметрам // *Оптика и спектроскопия*. 1994. Т. 76. № 1. С. 109–115.
20. Johnson S. *Stephen Johnson on Digital Photography*. USA, Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2006. 305 p.
21. Ежова К.В. Моделирование и обработка изображений: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 93 с.
7. Freese W., Kämpfe T., Rockstroh W., Kley E.B., Tünnermann A. Optimized electron beam writing strategy for fabricating computer-generated holograms based on an effective medium approach. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 9, pp. 8684–8692. doi: 10.1364/OE.19.008684
8. Tamura H., Ishii Y. Computer-generated hologram fabricated by electron-beam lithography for noise reduction. *Optical Review*, 2012, vol. 19, no. 2, pp. 50–57. doi: 10.1007/s10043-012-0012-z
9. Koreshev S.N. *Holographic Optical Elements and Devices*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2013, 143 p. (in Russian)
10. Plebanovich V. Maskless lithography is a current requirement. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2015, no. 7(147), pp. 112–118. (in Russian)
11. Koreshev S.N., Starovoitov S.O., Smorodinov D.S., Frolova M.A. Quality assessment of binary object images reconstructed by computer-generated holograms. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2020, vol. 20, no. 3(127), pp. 327–334. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-327-334
12. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Starovoitov S.O., Frolova M.A. Influence of the structure of the object beam on the quality of images reconstructed using a synthesized Fresnel hologram-projector. *Journal of Optical Technology*, 2020, vol. 87, no. 7, pp. 417–421. doi: 10.1364/JOT.87.000417
13. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Nikanorov O.V. Influence of the discreteness of synthetic and digital holograms on their imaging properties. *Computer Optics*, vol. 40, no. 6, pp. 793–801. (in Russian). doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801
14. Aida Y. Development of the JBX-8100FS electron beam lithography system. *Jeol News*, 2018, vol. 53, no. 1, pp. 59–62.
15. Greibe T., Anhøj T.A., Johansen L.S., Han A. Quality control of JEOL JBX-9500FSZ e-beam lithography system in a multi-user laboratory. *Microelectronic Engineering*, 2016, vol. 155, pp. 25–28. doi: 10.1016/j.mee.2016.02.003
16. Koreshev S.N., Ratushnyi V.P. Polyfunctionality of relief-phase reflective holographic optical element. *Journal of Optical Technology*, 2001, vol. 68, no. 12, pp. 889–892. doi: 10.1364/JOT.68.000889
17. Jagoszewski E. The influence of the hologram surface curvature on the holographic imaging quality. *Optik*, 1985, vol. 69, no. 2, pp. 85–88.
18. Maréchal A., Françon M. *Diffraction, structure des images: influence de la cohérence de la lumière*. Paris, Éditions de la Revue d'optique théorique et instrumentale, 1960, 204 p. (in French)
19. Koreshev S.N. On construction of recording schemes for a holographic structure on the surface of the primary adaptive telescope mirror and on requirements for their geometrical parameters. *Optics and Spectroscopy*, 1994, vol. 76, no. 1, pp. 101–106.
20. Johnson S. *Stephen Johnson on Digital Photography*. USA, Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2006, 305 p.
21. Ezhova K.V. *Image Modeling and Processing*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2011, 93 p. (in Russian)

## Авторы

**Корешев Сергей Николаевич** — доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Филиал АО «Корпорация «Комета» — «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация, [koreshev@list.ru](mailto:koreshev@list.ru), <http://orcid.org/0000-0002-8728-6122>, <http://orcid.org/0000-0003-4429-7929>, [s.starovoitov95@gmail.com](mailto:s.starovoitov95@gmail.com)

**Старовойтов Сергей Олегович** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [s.starovoitov95@gmail.com](mailto:s.starovoitov95@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0003-4429-7929>, [s.starovoitov95@gmail.com](mailto:s.starovoitov95@gmail.com)

**Смородинов Денис Сергеевич** — кандидат технических наук, программист, ООО «ИнТех Консалтинг», Москва, 115280, Российская Федерация, [smorodinov.denis@gmail.com](mailto:smorodinov.denis@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0002-9564-8074>

Статья поступила в редакцию 29.03.2021  
Одобрена после рецензирования 12.04.2021  
Принята к печати 29.05.2021

## Authors

**Sergey N. Koreshev** — D.Sc., Professor, Leading Researcher, Branch of JSC “Kometa Corporation” — Scientific and Design Center for Optoelectronic Observation Complexes, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [koreshev@list.ru](mailto:koreshev@list.ru), <http://orcid.org/0000-0002-8728-6122>, <http://orcid.org/0000-0003-4429-7929>, [s.starovoitov95@gmail.com](mailto:s.starovoitov95@gmail.com)

**Sergei O. Starovoitov** — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [s.starovoitov95@gmail.com](mailto:s.starovoitov95@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0003-4429-7929>, [s.starovoitov95@gmail.com](mailto:s.starovoitov95@gmail.com)

**Denis S. Smorodinov** — PhD, Software Engineer, InTech Consulting Ltd, Moscow, 115280, Russian Federation, [smorodinov.denis@gmail.com](mailto:smorodinov.denis@gmail.com), <http://orcid.org/0000-0002-9564-8074>

Received 29.03.2021  
Approved after reviewing 12.04.2021  
Accepted 29.05.2021



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»