

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ OPTICAL ENGINEERING

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-433-441

УДК 535.417; 535.317; 778.38

Влияние соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности в формируемом с их помощью голографическом поле

Сергей Николаевич Корешев¹, Сергей Олегович Старовойтов²✉

¹ Филиал АО «Корпорация «Комета» – «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург, 194021, Российская Федерация

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский информационно-аналитический центр, Санкт-Петербург, 191040, Российская Федерация

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

² s.starovoirov95@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>

Аннотация

Предмет исследования. Представлены результаты исследования влияния соотношения интенсивностей опорного и объектного пучков на модуляцию коэффициента пропускания синтезированных и аналоговых голограмм. Особое внимание уделено режиму формирования голограммы, при котором интенсивность объектного пучка превышает интенсивность опорного пучка (режим перемодуляции). Работа актуальна в случаях применения синтезированных голограмм в проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете. **Метод.** Выполнено математическое моделирование физических процессов записи и восстановления голограмм-проекторов. Характеристический размер бинарного тестового объекта составил 80×80 , длина волны используемого излучения 13,5 нм, размер пиксела голограммы 20×20 , расстояние между плоскостями объекта и голограммы 20,4 мкм, угол падения плоской опорной волны $14^\circ 42'$. Синтез и восстановление голограмм-проекторов выполнены в режиме перемодуляции, при различном ходе лучей в объектном пучке. **Основные результаты.** Показано, что небинаризованные синтезированные голограммы всегда отображаются и восстанавливаются как квантованные голограммы с интервалом квантования, в зависимости от параметров схемы синтеза. Установлено, что влияние режима перемодуляции на качество восстановленного изображения при использовании синтезированных голограмм значительно уменьшается при использовании аналоговых голограмм, но также определяется динамическим диапазоном интенсивности объектного пучка в плоскости синтеза голограммы. Отмечено, что при синтезе голограммы влияние режима перемодуляции минимально при использовании объектного пучка, сходящегося в центре голограммы. **Практическая значимость.** Выбор правильного интервала квантования и соотношения интенсивностей опорного и объектного пучков позволяет обеспечить высокое качество восстанавливаемого изображения при использовании синтезированных голограмм-проекторов Френеля в проекционной фотолитографии в глубоком ультрафиолете.

Ключевые слова

голография, синтезированные голограммы, восстановление голограммы, фотолитография, полутонные голограммы, соотношение интенсивностей объектного и опорного пучков, режим перемодуляции

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта НИРМА Физико-технического мегафакультета Университета ИТМО.

Ссылка для цитирования: Корешев С.Н., Старовойтов С.О. Влияние соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности в формируемом с их помощью голографическом поле // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 3. С. 433–441. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-433-441

Influence of the ratio of the intensities of the reference and object waves on the intensity distribution in the holographic field

Sergey N. Koreshev¹, Sergey O. Starovoitov²✉

¹ Branch of JSC Corporation “Kometa”, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation

² ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² Saint Petersburg Information and Analytical Center, Saint Petersburg, 191040, Russian Federation

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

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

Abstract

The results of the research focused on the reference and object beam intensity ratio effect on the transmittance of computer-generated and analog holograms are presented. Particular attention is paid to the hologram synthesis mode in which the intensity of the object beam exceeds the intensity of the reference beam (overmodulation mode). The study is relevant in cases where computer-generated holograms are used in extreme ultraviolet projection photolithography. Mathematical modeling of the physical processes of recording and reconstructing holograms has been performed. The characteristic size of the binary test object was 80×80 nm, the radiation wavelength was 13.5 nm, the hologram pixel size was 20×20 nm, the distance between the object and hologram planes was 20.4 μm , and the incidence angle of the plane reference wave was $14^\circ 42'$. Synthesis and reconstruction of holograms were carried out in an overmodulation mode, with different beam paths in the object beam. It is shown that the computer-generated holograms, unless binarized, are always displayed and reconstructed as quantized holograms with a quantization interval depending on the parameters of the synthesis scheme. It has been established that the influence of the overmodulation mode on the quality of the reconstructed image when using computer-generated holograms will be much less than in the case of using analog holograms, but will also be determined by the dynamic range of the object beam intensity in the hologram synthesis plane. It is noted that the influence of overmodulation mode is minimal if an object beam converging at the center of the hologram is used during synthesis. The choice of the adequate quantization interval and the ratio of the intensities of the reference and object beams will ensure high quality of the reconstructed image when using computer-generated Fresnel holograms in extreme ultraviolet projection photolithography.

Keywords

holography, computer-generated holograms, hologram reconstruction, photolithography, halftone holograms, intensity ratio between object and reference beam, overmodulation mode

Acknowledgements

The study is funded by RPMA grant of School of Physics and Engineering of ITMO University.

For citation: Koreshev S.N., Starovoitov S.O. Influence of the ratio of the intensities of the reference and object waves on the intensity distribution in the holographic field. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 3, pp. 433–441 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-3-433-441

Введение

Синтезированные голограммы в настоящее время применяются во многих областях науки и техники. Проекционная фотолиграфия представляется одной из наиболее перспективных сфер их использования [1–5]. Это обусловлено возможностью таких голограмм формировать большие по площади и свободные от aberrаций действительные изображения, в том числе изображения объектов, широко применяемых в фотолитографическом процессе — бинарных амплитудных транспарантов.

При современном уровне развития компьютерной техники синтез голограмм таких объектов не требует значительных затрат временных и вычислительных ресурсов.

Использование голограмм в фотолиграфии позволяет исключить из схем фотолитографических установок многокомпонентные проекционные объективы, конструкция которых постоянно усложняется из-за уменьшения проектных норм изготавливаемой полупроводниковой продукции. Отметим, что для успешного практического применения синтезированных голограмм в фотолитографическом процессе требуется, чтобы восстановленные изображения обладали качеством и глубиной резкости, достаточными для

корректного отображения транспаранта на фоточувствительном носителе — фоторезисте. При этом недопустимо наличие разрывов, не предусмотренных топологией изготавливаемого изделия, а изменение размеров элементов структуры изделия относительно рассчитанных значений не должно превышать 10 %.

Процесс получения синтезированной голограммы можно разделить на два последовательных этапа: компьютерный расчет структуры и физическое изготовление рассчитанной голограммы с использованием установок электронно-лучевой литографии. Каждый этап характеризуется рядом факторов, способных оказать существенное влияние на изображающие свойства получаемой голограммы, а значит, и на качество восстанавливаемого изображения.

Рассмотрим начальный этап получения синтезированной голограммы. Применение компьютерных технологий для синтеза голограмм вместо непосредственной регистрации на фоточувствительном носителе реально существующего голографического поля приводит к тому, что подобные голограммы обладают рядом особенностей, отличающих их от традиционных, так называемых физических голограмм. Например, дискретная структура синтезированных голограмм предъявляет специфические требования к условиям их регистрации и восстановления, что в ряде случаев приводит к огра-

ничению качества восстанавливаемых изображений. В то же время компьютерный синтез голограмм позволяет при выполнении определенных условий добиться улучшения их изображающих свойств. Например, существует возможность значительно увеличить глубину резкости восстанавливаемого изображения за счет изменения формы представления голографируемого объекта [6–8], а также уменьшить влияние спеклов на качество изображения путем применения различных методик пространственной фильтрации [9–11].

В настоящей работе рассмотрен один из ключевых параметров схемы записи голограмм, оказывающих влияние на их изображающие свойства — соотношение интенсивностей объектного и опорного пучков и их влияние на качество восстановленного изображения. Отметим, что, как правило, при компьютерном синтезе голограмм Френеля это соотношение принимают равным 1:1 [12]. Проблема влияния соотношения между интенсивностями объектного и опорного пучков в процессе физической записи голограмм, а также их компьютерного синтеза, известна из научных публикаций. Так, в работах [13, 14] показано, что несмотря на то, что условием получения максимальной видности регистрируемых интерференционных полос голографического поля является равенство единице отношения интенсивностей опорной и объектной волн, для обеспечения условия линейности записи голограммы данное отношение должно быть более единицы. Особенно актуально данное условие для случая диффузной подсветки голографируемого объекта. Использование опорной волны, превосходящей по интенсивности объектную, позволяет бороться с интермодуляционными помехами в восстановленном изображении [15–18] и увеличивает дифракционную эффективность записываемых голографических дифракционных решеток [19]. При этом режим перемодуляции — случай, в котором интенсивность объектной волны превышает интенсивность опорной, и влияние этого режима на вид и качество восстановленного изображения, особенно при использовании цифровых и синтезированных голограмм, подробно в научных работах не рассматривался.

Анализ влияния соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности формируемого с их помощью голографического поля

Рассмотрим влияние соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности формируемого голографического поля. Примем, что амплитуда опорной волны A_r в плоскости регистрации голограммы, за исключением случая протяженного опорного источника, постоянна или слабо изменяется. Допустим, что A_r постоянна для всех точек апертуры голограммы. Переменную по апертуре голограммы амплитуду объектной волны A_o опишем в виде произведения A_r и некоторого переменного по апертуре голограммы множителя m , зависящего от координат x и y рассматриваемой точки голографического поля:

$$A_o = m(x, y)A_r.$$

Отметим, что множитель m положителен в точках апертуры голограммы, в которых опорная и объектная волны синфазны, и отрицателен там, где они находятся в противофазе. В этом случае распределение интенсивности голографического поля в плоскости регистрации голограммы $I(x, y)$:

$$I(x, y) = A_r A_r^* + m^2(x, y) A_r A_r^* + 2m(x, y) A_r A_r^* = I_r [1 + m(x, y)]^2, \quad (1)$$

где I_r — интенсивность опорной волны; A_r^* — величина, комплексно-сопряженная амплитуде опорной волны. Из (1) получим выражения, описывающие максимальное I_{\max} и минимальное I_{\min} значения интенсивностей голографического поля в плоскости регистрации голограммы:

$$I_{\max} = I_r [1 + m(x, y)]^2, \\ I_{\min} = I_r [1 - m(x, y)]^2.$$

Рассмотрим опорную волну, превышающую по интенсивности объектную, т. е. примем модуль m лежащим в пределах от 0 до 1. В этом случае интенсивность голографического поля будет изменяться по апертуре голограммы в пределах от 0 до $4 I_r$. Для линейной регистрации такой голограммы регистрирующая среда должна обладать характеристической кривой, линейной в интервале экспозиций от 0 до $4 I_r t$, где t — время экспонирования голограммы, соответствующее середине линейного участка характеристической кривой регистрирующей среды. При этом средняя экспозиция, оптимальная для всех значений m указанного выше интервала, будет постоянной, т. е. не зависящей от $A_o = 2 I_r t$.

В случае амплитуды объектной волны, превышающей, либо равной амплитуде опорной волны, модуль множителя m будет превышать или равен 1.

Допустим, модуль лежит в пределах от 1 до N . Тогда для N , много больших единицы, амплитуда модуляции интенсивности голографического поля будет стремиться к 0, а сама интенсивность голографического поля примерно равна $N^2 I_r$. При этом для обеспечения линейности регистрации голограммы оптимальное среднее время экспонирования t должно выбираться таким, чтобы середина линейного участка характеристической кривой была близка к экспозиции $t N^2 I_r$. Рассмотрим случай, когда m незначительно превышает по модулю 1, например $m = 1,5$. Тогда интенсивность голографического поля будет лежать в пределах от $0,25 I_r$ до $6,25 I_r$, т. е. требуемый для линейной регистрации голограммы линейный участок характеристической кривой значительно увеличился. Его середина при этом должна соответствовать экспозиции $3,25 t I_r$. При $m = |4|$ интенсивность голографического поля будет лежать в пределах от $9 I_r$ до $25 I_r$, а необходимая величина средней экспозиции равна $17 t I_r$. Полученные результаты показаны на рис. 1.

Из графиков видно, что режим формирования голографического поля, при котором интенсивность опорной волны превышает интенсивность объектной, характеризуется минимальными требованиями к линей-

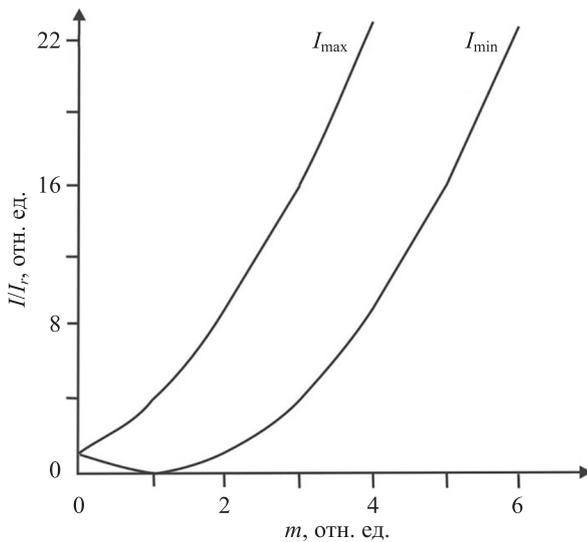


Рис. 1. Графики зависимости максимальной и минимальной интенсивностей голографического поля от величины множителя m

Fig. 1. Graph of the maximum and minimum intensities of the holographic field versus the value of the multiplier m

ности характеристической кривой используемой для регистрации голограммы регистрирующей среды. При этом такой режим обеспечивает возможность выбора оптимального времени экспонирования голограммы для всех точек ее апертуры, т. е. выбор времени экспонирования, не зависящего от A_0 . Заметим, что выбор времени экспонирования осуществляется таким образом, чтобы средняя экспозиция при регистрации голограммы приблизительно соответствовала середине линейного участка характеристической кривой регистрирующей среды. Переход в режим перемодуляции, при котором интенсивность объектной волны превышает интенсивность опорной, приводит к необходимости использования регистрирующих сред с большим интервалом экспозиций, соответствующих линейному участку характеристической кривой и к невозможности выбора единого для всей апертуры голограммы времени ее экспонирования. При этом с ростом множителя m , при значениях, существенно превышающих 1, одновременно уменьшаются видность голографического поля V и оптимальная величина времени экспонирования голограммы. Отметим, что видность голографического поля V определяется в соответствии с выражением:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Видность голографического поля — одна из важнейших характеристик, определяющих дифракционную эффективность получаемых голограмм. График зависимости видности от множителя m представлен на рис. 2.

Главная опасность режима перемодуляции заключается не столько в уменьшении видности и дифракционной эффективности голограммы, сколько в отсутствии возможности выбора единого для всей апертуры голограммы оптимального времени ее экспонирования, приводящей к значительной нелинейности регистрируемой

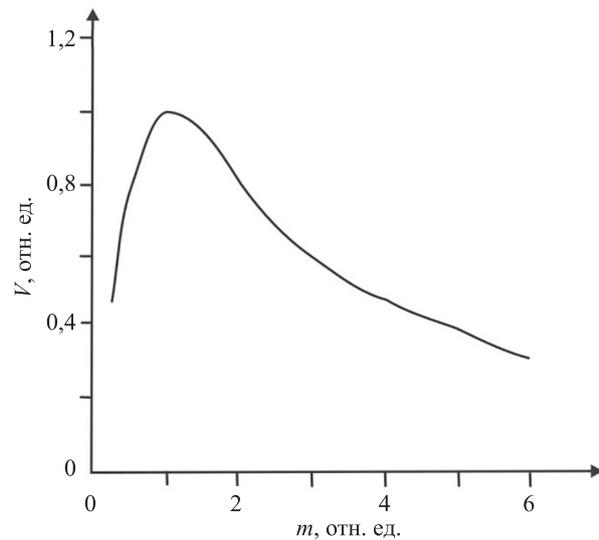


Рис. 2. График зависимости видности голографического поля от величины множителя m

Fig. 2. Graph of the interferometric visibility of the holographic field versus the value of the multiplier m

голограммы. Результатом нелинейности могут быть помехи и артефакты в восстановленных голограммах.

Приведенные выше рассуждения справедливы для случаев аналоговых и цифровых голограмм. В случае синтезированных голограмм, особенно голограмм, восстанавливаемых в виртуальном пространстве, процесс восстановления протекает иначе. Это связано с тем, что при синтезе голограмм время экспонирования считается постоянным, а значение I_{\max} приравнивается к максимальному числу отображаемых градаций. В случае представления синтезированных голограмм с использованием так называемой «серой шкалы» $I_{\max} = 256$ [20]. Рассчитаем значение одной градации δI :

$$\delta I = \frac{I_r(1 + m_{\max})^2}{256}, \quad (2)$$

где m_{\max} — значение множителя m , соответствующего максимальной амплитуде объектного пучка в какой-либо точке плоскости синтеза голограммы. Из (2) следует, что синтезированные голограммы нельзя считать полутоновыми, поскольку учитываемое при их отображении на носителе изменение интенсивности голографического поля не может быть менее δI . Таким образом, синтезированные голограммы, если они не были бинаризованы, всегда отображаются с интервалом квантования, описываемым выражением (2). При отображении таких голограмм на носителе все интервалы интенсивности голографического поля, лежащие в пределах от $k\delta I$ до $(k+1)\delta I$, где k — постоянная, будут отображены на носителе равными этим двум значениям интервалов, причем какое из значений будет отображено, определяется средним значением интенсивности голографического поля в этой точке его апертуры. Резкое уменьшение разности максимального и минимального значений интенсивности голографического поля в данной области

синтезированной голограммы, выраженное в интервалах квантования F , при увеличении множителя m может быть описано с помощью выражения:

$$F = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{\delta I} = \frac{km}{(1+m)^2}.$$

В результате можно сделать вывод, что при относительно небольших m , лежащих в пределах от 1 до нескольких единиц, степень нелинейности голографической записи, а, следовательно, и качество восстановленного изображения будут относительно слабо зависеть от величины множителя m при синтезе голограммы. При дальнейшем увеличении m вероятность потери качества восстанавливаемого изображения вырастет из-за заметного уменьшения величины F и снижения видности страт [13] в плоскости синтеза голограммы. Из проведенного анализа следует, что влияние режима перемодуляции на качество восстановленного изображения при использовании синтезированных голограмм будет значительно меньшим, чем в случае аналоговых голограмм, но также будет определяться динамическим диапазоном интенсивности объектного пучка в плоскости синтеза голограммы. Чем больше динамический диапазон, тем хуже качество восстановленного изображения. В работе [21] показано, что использование объектной волны, сходящейся в центре голограммы, приводит к повышению плотности записи информации об объекте и сокращению регистрируемого диапазона изменений интенсивности голографического поля по сравнению со стандартным случаем синтеза, когда объектная волна гомоцентрична.

Можно предположить, что влияние режима перемодуляции на качество восстановленного в виртуальном пространстве с помощью синтезированных голограмм изображения будет меньшим в случае использования объектной волны, сходящейся в центр голограммы, по сравнению с влиянием, оказываемом при гомоцентрическом ходе лучей. Выполним проверку данной гипотезы методом математического моделирования.

Методика проведения математического моделирования влияния соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на восстановленное изображение

Методика проведения математического моделирования включала в себя синтез рельефно-фазовых голограмм-проекторов двумерных объектов, представляющих собой бинарные амплитудные транспаранты. Синтез осуществлен методом Гюйенса–Френеля [22], с использованием двух типов объектного пучка: с традиционным для фотолитографии телецентрическим ходом лучей, и с использованием объектного пучка, сходящегося в центре плоскости регистрации голограммы. В общем случае применение такой объектной волны позволяет повысить качество восстанавливаемого изображения и сократить размер голограммы [21].

Результаты синтеза представлены в виде двумерного массива значений интенсивности голографического поля, рассчитанных для эквидистантно расположенных

точек апертуры голограммы. Для получения отражательной рельефно-фазовой синтезированной голограммы каждое значение интенсивности массива автоматически пересчитано в пропорциональный ему фазовый набег от 0 до $\pi/2$ (максимальное значение интенсивности соответствует набегу в $\pi/2$, а минимальное — в 0). Далее голограмма подвергнута численному восстановлению в виртуальном пространстве, и полученное изображение сохранено в виде графического файла.

Математическое моделирование процессов синтеза и восстановления голограмм с различным соотношением интенсивностей объектного и опорного пучков проведено в специализированном программном комплексе¹. Численные параметры синтеза голограмм выбраны в соответствии с требованиями, установленными в работе [23]:

- для пространственного разделения порядков дифракции дискретной голограммы должно выполняться условие, чтобы размер ее пиксела составлял не более 1/4 от размера минимального элемента структуры объекта;
- для обеспечения наложения всей плоской опорной волны на голограмму без экранирования объектом необходимо, чтобы используемая длина волны не превышала величины, равной 2,7 периодов дискретизации голограммы;
- расстояние от плоского тест-объекта до голограммы принято $R_z = 20345$ нм при рабочей длине волны $\lambda = 13,5$ нм, которая используется в литографических установках компании ASML, предназначенных для реализации фотолитографического процесса в экстремально коротковолновой ультрафиолетовой области спектра [24];
- размер пиксела голограммы составил 20×20 нм, а угол падения опорной волны равен $14^\circ 42'$;
- размер пиксела тест-объекта 80×80 нм, поскольку успешное восстановление изображения возможно только в том случае, когда период дискретизации синтезированной голограммы как минимум в 4 раза меньше периода дискретизации самого объекта.

Результаты математического моделирования

С целью оценки влияния режима перемодуляции на вид и качество восстановленного изображения выполнен синтез и численное восстановление в виртуальном пространстве голограммы объекта «Уголки» (рис. 3).

Размер объекта 23×23 пикселов и представляет совокупность линий шириной от 1 до 3 пикселов. Размер линии креста 1×7 пикселов. 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 — 2 пиксела, между третьим и четвертым — 3 пиксела.

¹ Программный комплекс разработан в Университете ИТМО и прошел государственную регистрацию (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013616036 от 25.06.2013).

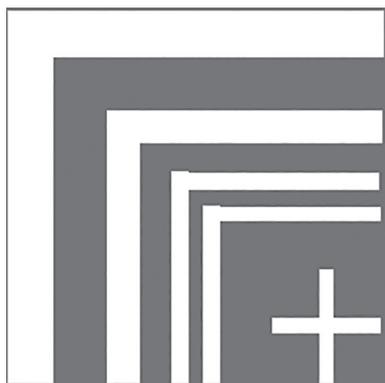


Рис. 3. Объект «Уголки»
Fig. 3. Object “Angles”

Синтез голограмм объекта «Уголки» проведен при различных соотношениях интенсивностей опорной и объектной волн: 1:1 (стандартная ситуация в цифровой

голографии), 1:2, 1:4, 1:6 и 1:8. Другими словами, рассматривались случаи, когда интенсивность объектной волны превышала интенсивность опорной в 1, 2, 4, 6 и 8 раз. Для каждого случая получено две голограммы, с использованием телецентрического и сходящегося объектного пучков. В результате было синтезировано 10 голограмм, результаты численного восстановления которых представлены в табл. 1.

Сравнение качества изображений, полученных при использовании разной формы представления опорной волны, позволяет оценить влияние размера динамического диапазона голограммы на качество восстанавливаемых изображений в режиме перемодуляции. Оценка качества осуществлена с использованием критерия, численно выражаемого через количество допустимых уровней (градаций) пороговой обработки полученного изображения, при котором оно по распределению интенсивности полностью идентично исходному объекту. Чем больше таких уровней (градаций), тем изображение можно считать более качественным, а значит, при

Таблица 1. Восстановленные изображения объектов
Table 1. Reconstructed images of the objects

Соотношение интенсивностей объектного и опорного пучков	Изображение при телецентрическом ходе лучей объектного пучка	Изображение при сходящемся объектном пучке
1:1		
1:2		
1:4		
1:6		
1:8		

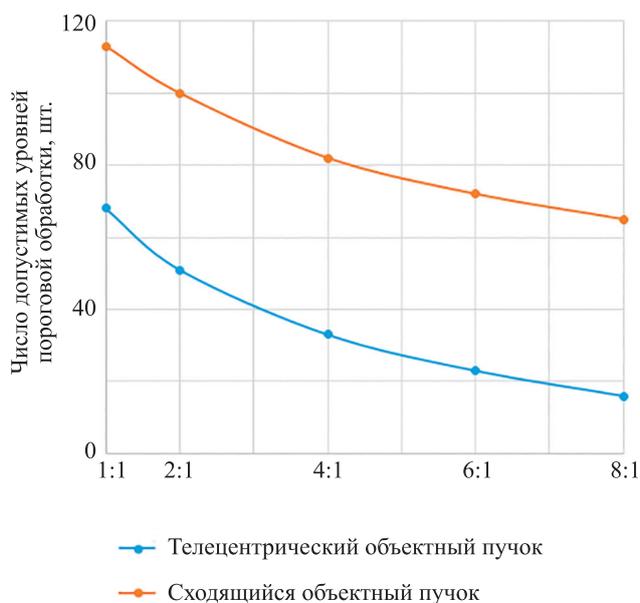


Рис. 4. График зависимости числа допустимых уровней пороговой обработки от отношения величин интенсивности объектного и опорного пучков для двух схем хода лучей

Fig. 4. Graph of the number of allowable thresholding levels versus the ratio of the intensity values of the object and reference beams for two ray paths

практической реализации фотолитографического процесса с использованием синтезированных голограмм снижаются требования к контрасту фоторезиста и точности подбора экспозиционной дозы [25]. Результаты оценки качества восстановленных изображений с помощью данного критерия (рис. 4) показаны в виде графика зависимости числа допустимых градаций пороговой обработки восстановленных изображений от формы объектного пучка и отношения интенсивностей объектного и опорного пучков.

По полученным результатам видно, что синтез голограмм в режиме перемодуляции приводит к большому снижению качества восстанавливаемого изображения, при снижении интенсивности опорного пучка относительно объектного. При этом качество изображений, восстановленных с помощью голограмм, полученных с использованием сходящегося на голограмме объектного пучка, при совпадении прочих условий синтеза оказывается выше, чем качество изображений, восстанов-

ленных при условии использования телецентрического хода объектного пучка.

Как видно из рис. 4, при использовании сходящегося объектного пучка ухудшение качества восстановленного изображения со снижением интенсивности опорного пучка происходит медленнее, чем при использовании телецентрического объектного пучка. Так, при снижении интенсивности опорной волны в 8 раз относительно интенсивности объектной волны, количество допустимых уровней пороговой обработки восстановленного изображения в случае использования сходящегося объектного пучка уменьшится на 42,5 %, а в случае использования телецентрического объектного пучка — на 76,5 %. Это позволяет сделать вывод о том, что величина динамического диапазона оказывает значительное влияние на качество изображений, полученных с помощью голограмм-проекторов, синтезированных в режиме перемодуляции.

Отметим, что в случае физически восстанавливаемых синтезированных голограмм влияние режима перемодуляции на качество восстановленного изображения значительно увеличится за счет нелинейности процесса отображения структуры голограммы в материале носителя.

Заключение

В работе исследовано влияние соотношения интенсивностей опорной и объектной волн на распределение интенсивности формируемого с их помощью голографического поля для случаев аналоговых и синтезированных голограмм. Показано, что не подвергнутые бинаризации синтезированные голограммы отображаются и восстанавливаются не как полутонные, а как квантованные голограммы. Интервал квантования определяется интенсивностями объектного и опорного пучков, а также числом отображаемых градаций на голограмме. Установлено, что влияние режима перемодуляции в процессе записи голограмм на качество получаемого изображения при использовании синтезированных голограмм меньше, чем при использовании аналоговых. Методом математического моделирования показано, что для синтезированных голограмм это влияние будет минимальным при условии использования при синтезе голограммы объектного пучка, сходящегося в ее центре.

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. <https://doi.org/10.1364/OL.30.001300>
2. 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 // *Applied Optics*. 2007. V. 46. N 14. P. 2581–2585. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1063/1.2430774>
4. Bay C., Hübner N., Freeman J., Wilkinson T. Maskless photolithography via holographic optical projection // *Optics Letters*.

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. <https://doi.org/10.1364/OL.30.001300>
2. 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. *Applied Optics*, 2007, vol. 46, no. 14, pp. 2581–2585. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1364/OL.35.002230>
5. Гусев А.И. *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. М.: Физматлит, 2007. 416 с.
 6. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Фролова М.А. Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм // *Оптический журнал*. 2018. Т. 85. № 11. С. 50–57. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-11-50-57>
 7. Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. *Методы цифровой голографии*. М.: Наука, 1977. 192 с.
 8. Pan W. Multiplane imaging and depth-of-focus extending in digital holography by a single-shot digital hologram // *Optics Communications*. 2013. V. 286. N 1. P. 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.09.013>
 9. Bianco V., Memmolo P., Leo M., Montresor S., Distante C., Paturzo M., Picart P., Javidi B., Ferraro P. Strategies for reducing speckle noise in digital holography // *Light: Science & Applications*. 2018. V. 7. N 1. P. 48. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0050-9>
 10. Huang X., Jia Z., Zhou J., Yang J., Kasabov N. Speckle reduction of reconstructions of digital holograms using gamma-correction and filtering // *IEEE Access*. 2017. V. 6. P. 5227–5235. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2751540>
 11. Castaneda R., Garcia-Sucerquia J., Doblas A. Speckle noise reduction in coherent imaging systems via hybrid median–mean filter // *Optical Engineering*. 2021. V. 60. N 12. P. 123107. <https://doi.org/10.1117/1.OE.60.12.123107>
 12. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Никаноров О.В., Громов А.Д. Обеспечение равной интенсивности элементов изображений бинарных объектов, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов // *Оптика и спектроскопия*. 2013. Т. 114. № 2. С. 318–323. <https://doi.org/10.7868/S003040341302013X>
 13. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. *Оптическая голография*. М.: Мир, 1973. 686 с.
 14. Hariharan P. *Basics of Holography*. Cambridge University Press, 2002. 174 p.
 15. Jeong T.H. Basic principles and applications of holography // *Fundamentals of Photonics*. 2008. P. 381–417. <https://doi.org/10.1117/3.784938.ch10>
 16. Seelamantula C.S., Pavillon N., Depeursinge C., Unser M. Zero-order-free image reconstruction in digital holographic microscopy // *Proc. of the IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Micro (ISBI)*. 2009. P. 201–204. <https://doi.org/10.1109/ISBI.2009.5193018>
 17. Castañeda R., Hincapie D., Garcia-Sucerquia J. Experimental study of the effects of the ratio of intensities of the reference and object waves on the performance of off-axis digital holography // *Optik*. 2017. V. 132. P. 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.12.062>
 18. Seelamantula C.S., Pavillon N., Depeursinge C., Unser M. Exact complex-wave reconstruction in digital holography // *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 2011. V. 28. N 6. P. 983–992. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.28.000983>
 19. Su W.-C., Huang C.-Y., Chen J.-Y., Su W.-H. Effect of recording-beam ratio on diffraction efficiency of polarization holographic gratings in dye-doped liquid-crystal films // *Optics Letters*. 2010. V. 35. N 3. P. 405–407. <https://doi.org/10.1364/OL.35.000405>
 20. Johnson S. *Stephen Johnson on Digital Photography*. USA, Sebastopol, CA, O'Reilly Media, Inc., 2006. 305 p.
 21. 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. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2020-87-07-41-48>
 22. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Старовойтов С.О. Влияние метода синтеза голограмм-проекторов и распределения фазы в плоскости объекта на качество восстановленного изображения // *Компьютерная оптика*. 2020. Т. 44. № 2. С. 203–208. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-613>
 23. 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. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801>
 - 2010, vol. 35, no. 13, pp. 2230–2232. <https://doi.org/10.1364/OL.35.002230>
 5. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 416 p. (in Russian)
 6. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Frolova M.A. Method for increasing the depth of field of images of flat transparencies reconstructed using synthesized holograms. *Journal of Optical Technology*, 2018, vol. 85, no. 11, pp. 696–702. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000696>
 7. Jaroslavskij L.P., Merzljakov N.S. *Methods of the Digital Holography*. Moscow, Nauka, 1977, 192 p. (in Russian)
 8. Pan W. Multiplane imaging and depth-of-focus extending in digital holography by a single-shot digital hologram. *Optics Communications*, 2013, vol. 286, no. 1, pp. 117–122. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.09.013>
 9. Bianco V., Memmolo P., Leo M., Montresor S., Distante C., Paturzo M., Picart P., Javidi B., Ferraro P. Strategies for reducing speckle noise in digital holography. *Light: Science & Applications*, 2018, vol. 7, no. 1, pp. 48. <https://doi.org/10.1038/s41377-018-0050-9>
 10. Huang X., Jia Z., Zhou J., Yang J., Kasabov N. Speckle reduction of reconstructions of digital holograms using gamma-correction and filtering. *IEEE Access*, 2017, vol. 6, pp. 5227–5235. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2751540>
 11. Castaneda R., Garcia-Sucerquia J., Doblas A. Speckle noise reduction in coherent imaging systems via hybrid median–mean filter. *Optical Engineering*, 2021, vol. 60, no. 12, pp. 123107. <https://doi.org/10.1117/1.OE.60.12.123107>
 12. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Nikanorov O.V., Gromov A.D. Intensity equalization for elements for binary-object images reconstructed using synthesized hologram projectors. *Optics and Spectroscopy*, 2013, vol. 114, no. 2, pp. 288–292. <https://doi.org/10.1134/S0030400X13020136>
 13. Collier R.J., Burckhardt C.B., Lin L.H. *Optical Holography*. New York, NY, Academic Press, 1971.
 14. Hariharan P. *Basics of Holography*. Cambridge University Press, 2002, 174 p.
 15. Jeong T.H. Basic principles and applications of holography. *Fundamentals of Photonics*, 2008, pp. 381–417. <https://doi.org/10.1117/3.784938.ch10>
 16. Seelamantula C.S., Pavillon N., Depeursinge C., Unser M. Zero-order-free image reconstruction in digital holographic microscopy. *Proc. of the IEEE International Symposium on Biomedical Imaging: From Nano to Micro (ISBI)*, 2009, pp. 201–204. <https://doi.org/10.1109/ISBI.2009.5193018>
 17. Castañeda R., Hincapie D., Garcia-Sucerquia J. Experimental study of the effects of the ratio of intensities of the reference and object waves on the performance of off-axis digital holography. *Optik*, 2017, vol. 132, pp. 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.12.062>
 18. Seelamantula C.S., Pavillon N., Depeursinge C., Unser M. Exact complex-wave reconstruction in digital holography. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*, 2011, vol. 28, no. 6, pp. 983–992. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.28.000983>
 19. Su W.-C., Huang C.-Y., Chen J.-Y., Su W.-H. Effect of recording-beam ratio on diffraction efficiency of polarization holographic gratings in dye-doped liquid-crystal films. *Optics Letters*, 2010, vol. 35, no. 3, pp. 405–407. <https://doi.org/10.1364/OL.35.000405>
 20. Johnson S. *Stephen Johnson on Digital Photography*. USA, Sebastopol, CA, O'Reilly Media, Inc., 2006, 305 p.
 21. 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. <https://doi.org/10.1364/JOT.87.000417>
 22. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Starovoitov S.O. Influence of computer-generated holograms synthesis method and phase distribution in the object plane on the quality of the reconstructed image. *Computer Optics*, 2020, vol. 44, no. 2, pp. 203–208. (in Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-613>
 23. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Nikanorov O.V. Influence of the discreteness of synthetic and digital holograms on their imaging properties. *Computer Optics*, 2016, vol. 40, no. 6, pp. 793–801. (in Russian). <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801>
 24. Fu N., Liu Y., Ma X., Chen Z. EUV lithography: State-of-the-art review. *Journal of Microelectronic Manufacturing*, 2019, vol. 2, pp. 19020202. <https://doi.org/10.33079/jomm.19020202>

24. Fu N., Liu Y., Ma X., Chen Z. EUV lithography: State-of-the-art review // *Journal of Microelectronic Manufacturing*. 2019. V. 2. P. 19020202. <https://doi.org/10.33079/jomm.19020202>
25. Ежова К.В. Моделирование и обработка изображений: учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 93 с.

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, [sc 6603811394](https://orcid.org/0000-0002-8728-6122), <https://orcid.org/0000-0002-8728-6122>, koreshev@list.ru

Старовойтов Сергей Олегович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; ведущий технический писатель, Санкт-Петербургский информационно-аналитический центр, Санкт-Петербург, 191040, Российская Федерация, [sc 57211837718](https://orcid.org/0000-0003-4429-7929), <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>, s.starovaitov95@gmail.com

Статья поступила в редакцию 04.02.2022
Одобрена после рецензирования 02.04.2022
Принята к печати 19.05.2022

Authors

Sergey N. Koreshev — D. Sc. (Eng.), Professor, Leading Researcher, Branch of JSC Corporation “Kometa” – “Scientific and design center of optoelectronic surveillance systems”, Saint Petersburg, 194021, Russian Federation, [sc 6603811394](https://orcid.org/0000-0002-8728-6122), <https://orcid.org/0000-0002-8728-6122>, koreshev@list.ru

Sergei O. Starovaitov — PhD student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Leading Technical Writer, Saint Petersburg State Unitary Enterprise “Saint Petersburg Information and Analytical Center”, Saint Petersburg, 191040, Russian Federation, [sc 57211837718](https://orcid.org/0000-0003-4429-7929), <https://orcid.org/0000-0003-4429-7929>, s.starovaitov95@gmail.com

Received 04.02.2022
Approved after reviewing 02.04.2022
Accepted 19.05.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»