

УДК 535.417; 535.317; 778.38

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-327-334

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЙ БИНАРНЫХ ОБЪЕКТОВ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ

С.Н. Корешев^а, С.О. Старовойтов^а, Д.С. Смородинов^б, М.А. Фролова^а

^а Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

^б ООО «ИнТех Консалтинг», Москва, 115280, Российская Федерация

Адрес для переписки: s.starovoitov95@gmail.com

Информация о статье

Поступила в редакцию 13.03.20, принята к печати 07.04.20

Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: 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. С. 327–334. doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-327-334

Аннотация

Предмет исследования. Рассмотрены вопросы объективной оценки качества голограмм-проекторов и восстановленных с их помощью изображений двумерных бинарных объектов. **Метод.** Работа выполнена применительно к методу проекционной голографической фотолитографии, реализуемой с помощью синтезированных голограмм-проекторов. Синтез голограмм осуществлялся путем математического моделирования физических процессов записи и восстановления голограмм в оригинальном программном комплексе с использованием следующих параметров: характеристический размер бинарного объекта 80×80 нм, длина волны используемого излучения 13,5 нм, размер пикселя голограммы 20×20 нм, расстояние между плоскостями объекта и голограммы 20,4 мкм, угол падения плоской опорной волны $14^\circ 42'$. Синтез голограммы каждого исследуемого объекта проводился для случая двух разных параметров схемы. Восстановленные изображения этих объектов сравнивались с помощью трех методов: метода расчета пикового отношения сигнала к шуму, метода расчета индекса структурного сходства и метода оценки качества изображения путем сравнения количества уровней пороговой обработки, который является имитацией реакции фоторезиста на засветку актиничным излучением. **Основные результаты.** Обосновано применение для оценки качества проекционных фотолитографических систем, в том числе и голограмм-проекторов, традиционного для оптических систем критерия дифракционно-ограниченного качества изображения, а не реализуемой с их помощью нормы проектирования электронных приборов. Установлено, что для задач проекционной голографической фотолитографии наиболее подходящими методами оценки качества восстановленного изображения являются методы, основанные на расчете индекса структурного сходства и на оценке числа допустимых уровней пороговой обработки восстановленного изображения. При этом второй из указанных методов не требует проведения дополнительных расчетов. **Практическая значимость.** Использование адекватного метода оценки качества дает возможность быстро и объективно сравнивать восстановленные при разных параметрах схемы записи изображения одного и того же объекта, и выбирать наиболее подходящую для конкретной задачи форму представления объекта и схему записи голограммы.

Ключевые слова

голография, синтезированные голограммы, восстановление голограммы, фотолитография, цифровая обработка изображений, индекс SSIM, пороговая обработка

doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-327-334

QUALITY ASSESSMENT OF BINARY OBJECT IMAGES RECONSTRUCTED BY COMPUTER-GENERATED HOLOGRAMS

S.N. Koreshev^a, S.O. Starovoitov^a, D.S. Smorodinov^b, M.A. Frolova^a

^a ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

^b InTech Consulting Ltd, Moscow, 115280, Russian Federation

Corresponding author: s.starovoitov95@gmail.com

Article info

Received 13.03.20, accepted 07.04.20

Article in Russian

For citation: 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, pp. 327–334 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2020-20-3-327-334

Abstract

Subject of Research. The paper considers the issues of objective quality assessment of computer-generated Fresnel holograms and reconstructed binary object images. **Method.** The work is performed by the method of projection holographic photolithography based on computer-generated Fresnel holograms. The synthesis of holograms was carried out by mathematical modeling of the physical processes of hologram recording and reconstruction in the original software package using the following parameters: the binary object characteristic size of 80×80 nm, laser wavelength of 13.5 nm, hologram pixel size of 20×20 nm, the distance between an object and hologram planes equal to 20.4 μm , reference wave incidence angle of $14^\circ 42'$. The hologram synthesis for each object under research was carried out for the case of two different synthesis setup parameters. The reconstructed images of these objects were compared by three methods: the peak signal-to-noise ratio calculation method, the structural similarity index calculation method, and the method of image quality assessment based on the calculation of the number of levels at the threshold image processing, which is an imitation of photoresist response to actinic radiation exposure. **Main Results.** Diffraction-based criterion, traditionally applied in optics, is proven to be the most relevant for the quality evaluation of projection photolithographic systems, including systems based on computer-generated holograms. It is established that the methods based on the calculation of the structural similarity index and on estimation of the number of levels at the threshold image processing are the most suitable methods for assessing the reconstructed image quality in the field of projection holographic photolithography. Moreover, the second method does not require any additional calculations. **Practical Relevance.** Application of an adequate quality assessment method makes it possible to compare quickly and objectively the reconstructed images of the same objects obtained for various parameters of the synthesis setup and select the object representation form and the hologram synthesis setup that is the most suitable for a particular task.

Keywords

holography, computer-generated holograms, hologram reconstruction, photolithography, digital image processing, SSIM index, threshold processing

Введение

Синтезированные голограммы в настоящее время применяются в различных областях техники, среди которых можно отметить фотолитографию [1, 2]. Это связано с тем, что они позволяют формировать свободные от aberrаций большие по площади действительные изображения, в том числе и изображения объектов, типичных для фотолитографии — бинарных двумерных транспарантов. Использование отражательных голограмм-проекторов в фотолитографии позволяет обойтись без применения многокомпонентных оптических систем, конструкция которых постоянно усложняется по мере ужесточения требований к качеству изображений, формируемых с помощью фотолитографического объектива. К тому же отсутствие требований к наличию оптически прозрачных материалов позволяет уменьшить рабочую длину волны и, соответственно, увеличить разрешение фотолитографических изображений.

Для успешного использования синтезированных голограмм в фотолитографии необходимо, чтобы рассчитанная на компьютере голограмма могла формировать восстановленное изображение высокого качества, иначе корректное изготовление требуемой структуры в фотолитографическом процессе будет невозможным. В связи с этим возникает вопрос о выборе объективного метода оценки качества изображений, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм, который бы позволил быстро и адекватно сравнивать качество различных изображений с использованием численного критерия, а также о том, какой в принципе минимальный размер элемента структуры можно получить с помощью голографической фотолитографии на определенной длине волны. На сегодняшний день единого эталонного метода оценки качества обработанных и восстановленных изображений нет [3], поэтому

встает вопрос о выборе объективного метода, который позволит правильно оценивать качество как самих голограмм-проекторов, так и восстанавливаемых с их помощью изображений. В данной работе применительно к задаче оценки качества изображений, формируемых с помощью синтезированных голограмм, сравнивается эффективность применения двух широко распространенных объективных методов оценки качества цифровых изображений относительно специфического для синтезированной голографии метода оценки качества изображения путем сравнения количества уровней пороговой обработки. Сравнение проводится на восстановленных в виртуальном пространстве изображениях ряда тест-объектов при различных конфигурациях схемы синтеза голограмм.

Оценка качества голограмм-проекторов и других проекционных оптических систем, предназначенных для фотолитографического процесса

В качестве важнейшей характеристики практически любой изображающей оптической системы, в том числе и проекционной фотолитографической системы, можно отметить минимальный размер формируемого с ее помощью изображения. Однако критерий определения этого размера неодинаков для оптических систем различного назначения. Традиционно в оплотехнике минимально возможный размер элемента структуры формируемого изображения $L_{opt\ min}$ ограничивается первыми минимумами картины дифракции и определяется выражением

$$L_{opt\ min} = \frac{\lambda}{NA}, \quad (1)$$

где NA — числовая апертура, равная произведению показателя преломления на выходную угловую апертуру

оптической системы; λ — длина волны используемого излучения.

Максимально возможное значение числовой апертуры равно показателю преломления, т. е. минимально возможный элемент структуры изображения не может быть меньше длины волны в пространстве между оптической системой и плоскостью изображения. Правомочность такого определения минимально возможного размера элемента структуры формируемого изображения подтверждается тем, что именно такой размер элемента равен минимальному размеру объекта, информация о котором может содержаться в волне, дифрагированной на объекте и распространяющейся в свободном пространстве. Отметим, что дифракция излучения на объектах меньших размеров приведет к образованию лишь эванесцентных волн, затухающих на расстояниях менее длины волны от объекта [4].

Такое определение минимально возможного элемента формируемого изображения используется при разработке систем оптической памяти, в том числе дисковой памяти [5]. В таких системах элемент изображения минимального размера называется питом. И этот пит должен быть считан оптической системой извлечения информации с диска, т. е. размер пита принципиально не может быть менее рабочей длины волны системы памяти. Именно поэтому максимально возможная плотность информации на диске определяется как отношение площади диска к квадрату рабочей длины волны.

В фотолитографии со структуры, сформированной в результате фотолитографического процесса, не требуется считывать информацию с помощью оптических систем, и не нужно заботиться о недопущении формирования эванесцентных волн. При разработке технологии фотолитографии применяют другое определение минимально возможного размера элементов формируемых структур, учитывающее технологические особенности не только операции оптического проецирования изображения на покрытую фоторезистом поверхность полупроводниковой пластины, но и особенности последующих операций экспонирования, химического или ионного травления, и т. д.

Минимально возможный размер элемента структуры формируемого изображения в фотолитографии L_{\min} описывается с помощью следующего выражения [6], отличного от выражения (1):

$$L_{opt\ min} = k_1 \frac{\lambda}{NA}, \quad (2)$$

где k_1 — коэффициент, учитывающий технологические особенности фотолитографического процесса.

Современная фотолитография использует излучение эксимерных лазеров с длиной волны 193 нм. При этом достигнутые к настоящему времени минимальные размеры элементов изготавливаемых структур приближаются к 30 нм. Подставляя данные значения в (2), получаем, что современная технология фотолитографии позволяет добиться величины коэффициента k , равной примерно 0,16. Такое значение коэффициента достигается путем использования различных техник повышения разрешения: экспонирование фоторезиста отдельными фрагментами дифракционной картины;

использование степеров; экспонирование по участкам апертуры полупроводникового прибора; подбор оптимальной для конкретного изделия пространственной структуры и поляризации освещающего фотошаблон пучка; добавление к элементам топологического рисунка на фотошаблоне дополнительных служебных элементов, повышающих точность передачи рисунка на фоторезистивную маску [7–9]. При этом минимальный размер изображений, формируемых используемыми в фотолитографии оптическими системами, как и обычно в оптотехнике, ограничен дифракционным пределом и по-прежнему равен или превышает рабочую длину волны 193 нм. Задачей разработчиков проекционных систем для фотолитографии является именно достижение дифракционно-ограниченного их качества.

Оценка качества изображений, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм

Для успешного применения голограмм-проекторов в различных областях техники необходимо, чтобы восстанавливаемые с их помощью изображения обладали высоким качеством. Качество восстановленных изображений может оцениваться как с помощью методов, применяемых при цифровой обработке изображения в системах различного назначения, так и с использованием специфических методов, связанных с технологией фотолитографического процесса. В зависимости от наличия исходного, не искаженного шумами и помехами изображения, используемые в настоящее время методы оценки качества изображений, прошедших цифровую обработку, можно разделить на эталонные (full-reference, FR) и безэталонные (no-reference, NR) [10]. Применительно к рассматриваемому случаю оценки качества изображений, восстановленных с помощью синтезированных голограмм-проекторов, исходными изображениями являются непосредственно сами объекты, которые в большинстве случаев представляют собой работающие на пропускание бинарные амплитудные транспаранты. В связи с этим в рамках данной работы имеет смысл рассматривать только эталонные метрики оценки качества изображений. Наиболее широко применяются два из них – пиковое отношение сигнала к шуму (Peak Signal-to-Noise Ratio, PSNR) и индекс структурного сходства (Structural Similarity, SSIM) [11].

PSNR характеризует соотношение между максимумом возможного значения сигнала и мощностью шума, искажающего значения амплитуды сигнала. В задачах синтезированной голографии восстановленные изображения нередко являются полутоновыми, и их пиксели состоят из 8 битов, поэтому пиковое значение сигнала не может превышать 255. Поскольку многие сигналы имеют широкий динамический диапазон, PSNR обычно измеряется по логарифмической шкале в децибелах. Расчет PSNR осуществляется через среднеквадратичное отклонение (MSE), которое для двух полутоновых изображений I и K размера $m \times n$, одно из которых считается зашумленным приближением другого, и определяется:

$$MSE = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2,$$

где $I(i, j)$ — значение интенсивности пикселя с координатами i, j на исходном объекте-транспаранте; $K(i, j)$ — значение интенсивности пикселя с координатами i, j на восстановленном изображении.

PSNR, в свою очередь, определяется:

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right) = 20 \log \left(\frac{MAX_I^2}{\sqrt{MSE}} \right),$$

MAX_I , как уже упоминалось ранее, есть максимально возможное значение интенсивности, принимаемое пикселем, и равно 255.

В отличие от PSNR, метод SSIM учитывает искажение яркости и контраста, а также структурное сходство между исследуемыми изображениями [12]. Он получил широкое распространение благодаря его достаточно высокой точности оценки и простоте математической формулировки [13]. Значение SSIM рассчитывается локально в пределах окон x и y на сравниваемых изображениях I и K по трем составляющим:

1) яркость:

$$L(x, y) = \frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1};$$

2) контраст:

$$C(x, y) = \frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2};$$

3) структура:

$$S(x, y) = \frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3};$$

где μ_x и μ_y — средние значения интенсивности в соответствующих окнах; σ_x^2 и σ_y^2 — дисперсии значений интенсивности в соответствующих окнах; σ_{xy} — ковариация в окнах x и y ; $C_1 = (k_1 \times MAX_I)^2$, $C_2 = (k_2 \times MAX_I)^2$, $C_3 = \frac{C_2}{2}$; $k_1 = 0,01$, $k_2 = 0,03$ — экспериментально определенные константы.

В таком случае значение SSIM будет рассчитываться как

$$SSIM = \left(\frac{2\mu_x\mu_y + C_1}{\mu_x^2 + \mu_y^2 + C_1} \right)^\alpha \times \left(\frac{2\sigma_x\sigma_y + C_2}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + C_2} \right)^\beta \times \left(\frac{\sigma_{xy} + C_3}{\sigma_x\sigma_y + C_3} \right)^\gamma,$$

где α, β, γ — весовые коэффициенты, обычно принимаемые равными единице.

Процесс нахождения глобального значения SSIM для всего изображения сводится к следующему: «скользящее» окно (набор пикселей, в пределах которого вычисляется локальное значение SSIM) заранее заданного размера, начиная из верхнего левого угла изображения, проходит пиксель за пикселем по всем строкам и столбцам значений интенсивности в этом изображении. При этом на каждом шаге вычисляется SSIM для текущей области. Глобальное значение $SSIM_g$ определяется как

среднее арифметическое значений SSIM для каждого шага:

$$SSIM_g = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m SSIM_i,$$

где m — количество окон, внутри которых вычисляется SSIM.

Из специфических методов качества изображения, связанных с технологией фотолитографического процесса, нельзя не отметить предложенный в [14] метод оценки качества изображения путем сравнения количества уровней пороговой обработки, основанный на имитации реакции фоторезиста на засветку актиничным излучением путем выполнения порогового преобразования восстановленного изображения с использованием команды «Порог» в программе Photoshop. Как уже отмечалось ранее, восстанавливаемые изображения являются полутоновыми, а их пиксели кодируются с помощью 8 бит, поэтому общее число возможных уровней пороговой обработки (градаций интенсивности) составляет 256, от 0 (черного цвета) до 255 (белого цвета), в соответствии с так называемой «серой шкалой» [15]. Соответственно, чем больше количество уровней (градаций) пороговой обработки, при которых дискретное изображение по распределению интенсивности полностью соответствует исходному дискретному объекту, тем изображение можно считать более качественным [16]. Применительно к фотолитографическому технологическому процессу последний вывод можно сформулировать следующим образом. Чем больше восстановленное изображение соответствует исходному объекту, тем менее чувствительным может быть используемый в процессе фоторезист.

Перспективность использования вышеописанных методов для оценки качества изображений, формируемых с помощью голограмм-проекторов, была исследована методом численного эксперимента. С помощью разработанного на факультете прикладной оптики Университета ИТМО специализированного программного комплекса [17, 18] были синтезированы и восстановлены в виртуальном пространстве голограммы нескольких тест-объектов, приведенных на рис. 1. Для каждого из них проводилась запись двух голограмм, соответствующих различным условиям синтеза. Так, тест-объект «Близкие щели» рассматривался при условии синфазности излучения, падающего на его элементы, а также при условии его противофазности. Второй случай соответствует применению фазосдвигающих масок, известных из традиционной фотолитографии, обеспечивающих увеличение разрешения на получаемом изображении [19]. Синтез голограмм тест-объектов «Мира» и «Крупные уголки» осуществлялся методом Гюйгенса–Френеля, а также с использованием модифицированного метода таблиц соответствия, также называемого методом «штамповки», заключающегося в разбиении объекта на типовые элементы его структуры [17]. В последнем случае голограмма дискретного объекта по сути «складывается» из набора элементарных, ограниченных в размерах, полей объектных волн, накладывающихся на плоскость синтеза в соответствии с формой объекта. Голограммы тест-объекта «Уголки»

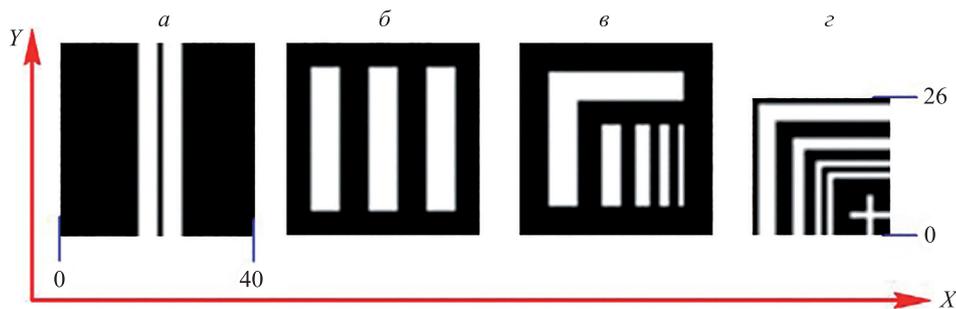


Рис. 1. Тест-объекты: «Близкие щели» (а); «Мира» (б); «Крупные уголки» (в); «Уголки» (г). Синим цветом обозначен размер в пикселях

записывались при условии телецентрического хода лучей, падающих на фотошаблон, а также с использованием сходящегося в плоскости голограммы пучка лучей.

Параметры синтеза голограмм были выбраны в соответствии с требованиями, установленными в работе [20]:

- для пространственного разделения порядков дифракции дискретной голограммы необходимо, чтобы размер ее пикселя составлял не более 1/4 от размера минимального элемента структуры объекта;
- для обеспечения наложения опорной волны на голограмму без засветки ею объекта необходимо, чтобы рабочая длина волны восстановления синтезированной голограммы-проектора не превышала величины, равной 2,7 периодов дискретизации голограммы;
- расстояние от плоского тест-объекта до голограммы было принято равным $R_z = 20,4$ мкм при рабочей длине волны $\lambda = 13,5$ нм;
- размер пикселя голограммы составлял 20×20 нм, а угол падения опорной волны был равен $14^\circ 42'$;
- размер пикселя тест-объектов составлял 80×80 нм, кроме тест-объекта «Близкие щели», однако и для него непосредственный характеристический размер структуры оставался равным 80 нм, поскольку успешное восстановление изображения возможно только в том случае, когда период дискретизации синтезированной голограммы как минимум в че-

тыре раза меньше периода дискретизации самого объекта.

На рис. 2 и в таблице приведены, соответственно, восстановленные изображения и полученные для них с помощью трех описанных выше методов значения качества. Расчет PSNR и SSIM осуществлялся в программе MATLAB. Как уже было упомянуто, при вычислении SSIM размер «скользящего» окна может варьироваться. В связи с тем, что рассматриваемые тест-объекты состоят из элементов с очень небольшими габаритными размерами, размер окна был принят равным $r = 3$.

Оценка качества восстановленных изображений осуществлялась следующим образом. Для всех рассмотренных тест-объектов (рис. 1) синтез и восстановление голограммы проводились дважды, при различных параметрах схемы записи. Оба полученных изображения (например, рис. 2, а, б) сравнивались с исходным тест-объектом с помощью вышеописанных объективных методов оценки качества, т. е. для каждого из них было получено три численных значения, отражающих значение качества данного изображения с точки зрения соответствующих методов. Эти значения представлены в таблице. Далее производилось сравнение качества непосредственно между двумя восстановленными изображениями, соответствующими разным схемам синтеза голограммы одного и того же тест-объекта: если численное значение качества первого изображения, полученное некоторым методом,

Таблица. Результаты оценки качества восстановленных изображений с помощью различных методов

Восстановленное изображение		Значение пикового отношения сигнала к шуму (PSNR)	Значение индекса структурного сходства (SSIM)	Число уровней (градаций) пороговой обработки
Тест-объект	Условия синтеза			
«Близкие щели»	без фазовой маски	14,421	0,527	0
	с фазовой маской	13,042	0,629	25
«Мира»	методом Гюйгенса–Френеля	12,427	0,627	53
	методом «штамповки»	19,735	0,817	162
«Крупные уголки»	методом Гюйгенса–Френеля	12,502	0,704	58
	методом «штамповки»	20,535	0,884	173
«Уголки»	с телецентрическим ходом лучей в пространстве предметов	13,384	0,753	68
	с использованием сходящегося пучка	13,526	0,813	112

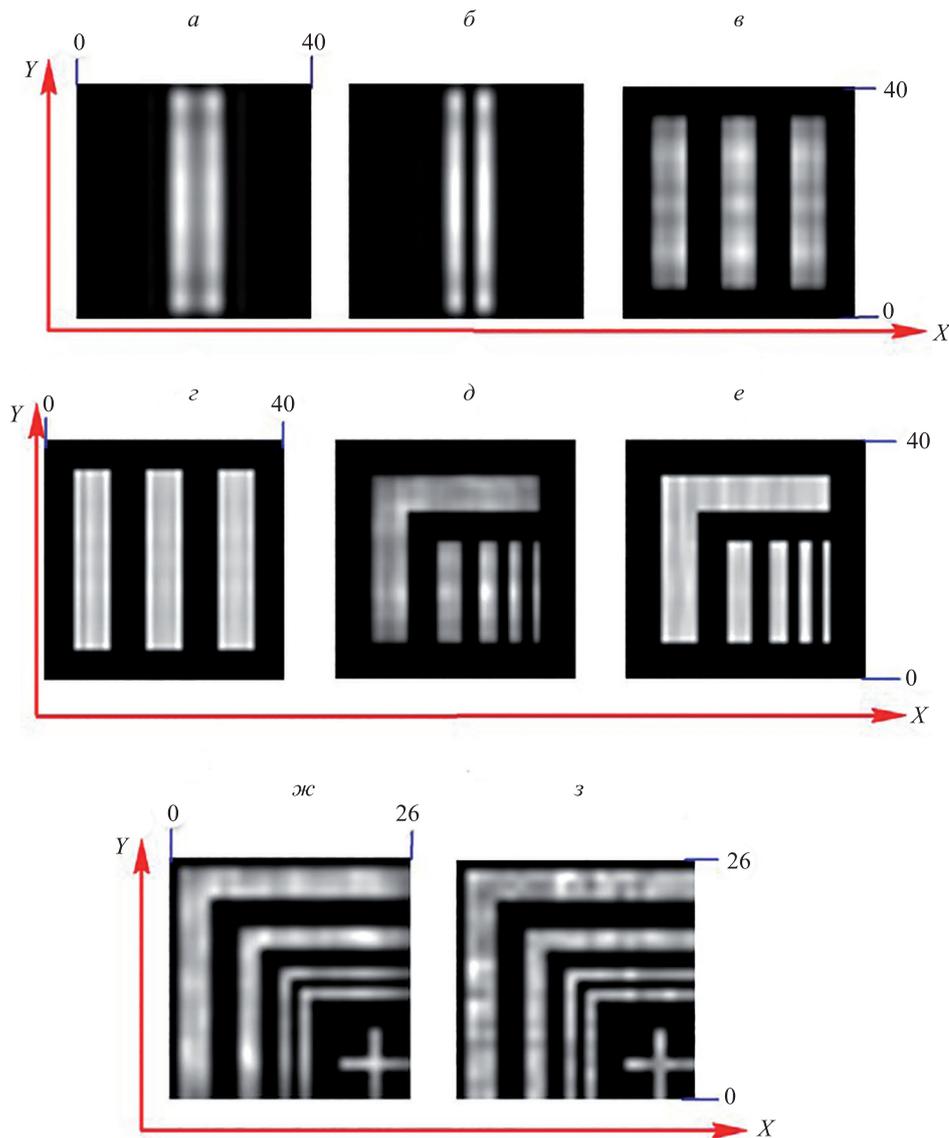


Рис. 2. Восстановленные изображения тест-объектов: «Близкие щели» — без фазовой маски (а) и с фазовой маской (б); «Мира» — методом Гюйгенса–Френеля (в) и методом «штамповки» (г); «Крупные уголки» — методом Гюйгенса–Френеля (д) и методом «штамповки» (е); «Уголки» — с телецентрическим ходом лучей в пространстве предметов (ж) и с использованием сходящегося пучка (з).

Синим цветом обозначен размер восстановленных изображений в пикселях

больше, чем численное значение качества второго изображения, полученного тем же методом, значит первое изображение является более качественным с точки зрения этого метода.

После проведения такого сравнения заметно, что метод PSNR не соответствует визуальной оценке (являющейся субъективной, в отличие от рассмотренных методов, и потому невыразимой в виде численного критерия оценкой оператора, какое из двух восстановленных изображений одного и того же объекта является более качественным) уровня качества восстанавливаемого изображения (изображение тест-объекта «Близкие щели» (рис. 2, а), полученное без использования метода фазовой коррекции эффекта близости, и изображение (рис. 2, б), полученное с использованием метода фазовой коррекции). Полученный результат ставит под сомнение применимость метода оценки пикового

отношения сигнала к шуму для оценки качества изображений, восстановленных с помощью синтезированных голограмм. При этом метод оценки качества изображения путем сравнения количества уровней пороговой обработки корректно учитывает положительное влияние компенсации эффекта близости, ограничения апертуры при использовании метода «штамповки» и увеличения контраста по всему полю изображения в случае подсветки тест-объекта не телецентрическим, а сходящимся пучком лучей в процессе синтеза голограммы. Это говорит о возможности использовать его для сравнения качества изображений, сформированных синтезированными голограммами. Метод оценки качества восстановленного изображения, основанный на расчете индекса структурного сходства, также позволяет получать адекватную оценку качества изображения, но требует проведения дополнительных расчетов.

Заключение

В работе рассмотрены различия в оценке минимально возможного размера элементов формируемых структур в традиционной оптике и фотолитографии. Проведено сравнение различных методов объективной оценки качества изображений применительно к изображениям, восстанавливаемым с использованием синте-

зированных голограмм для применения в голографической фотолитографии. Установлено, что наравне со специфическим для голографической фотолитографии методом оценки качества изображения путем сравнения количества уровней пороговой обработки может применяться метод расчета индекса структурного сходства, однако его использование требует проведения дополнительных расчетов.

Литература

1. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Наука-Физматлит, 2007. 416 с.
2. 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
3. Сидоров Д.В. К вопросу оценки качества множества восстановленных изображений // *Прикладная информатика*. 2008. № 4(16). С. 92–95.
4. Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
5. Боухьюз Г., Браат Дж., Хейсер А. и др. Оптические дисковые системы. М.: Радио и связь, 1991. 280 с.
6. Моро У. Микролитография: Принципы, методы, материалы. М.: Мир, 1990. 1240 с.
7. Mack C. *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. John Wiley & Sons, 2007. 534 p. doi: 10.1002/9780470723876
8. Wong A. *Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography*. Bellingham: SPIE Press, 2001. 234 p. doi: 10.1117/3.401208
9. Киреев В.Ю. Нанотехнологии в микроэлектронике. Нанолитография — процессы и оборудование: учебно-справочное руководство. Долгопрудный: Интеллект, 2016. 319 с.
10. Sonawane S., Deshpande A. Image quality assessment techniques: An overview // *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2014. V. 3. N 4. P. 2013–2016.
11. Corda R., Giusto D., Liotta A., Song W., Perra C. Recent advances in the processing and rendering algorithms for computer-generated holography // *Electronics*. 2019. V. 8. N 5. P. 556–573. doi: 10.3390/electronics8050556
12. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity // *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004. V. 13. N 4. P. 600–612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861
13. Старовойтов В.В. Уточнение индекса SSIM структурного сходства изображений // *Информатика*. 2018. Т. 15. № 3. С. 41–55.
14. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Иванов Ю.А., Козулин И.А. Программный комплекс для синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов: влияние параметров синтеза на качество восстановленного изображения // *Оптический журнал*. 2010. Т. 77. № 1. С. 42–48.
15. Johnson S. *Stephen Johnson on Digital Photography*. USA, Sebastopol, CA: O'Reilly Media, Inc., 2006. 305 p.
16. Ежова К.В. Моделирование и обработка изображений: учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2011. 93 с.
17. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Громов А.Д. Метод синтеза голограмм-проекторов, основанный на разбиении структуры объекта на типовые элементы, и программный комплекс для его реализации // *Оптический журнал*. 2012. Т. 79. № 12. С. 30–37.
18. Корешев С.Н., Громов А.Д., Никаноров О.В. Модернизированный комплекс синтеза и восстановления голограмм-проекторов Френеля // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2012. Т. 12. № 6. С. 12–17.
19. Корешев С.Н., Старовойтов С.О., Смородинов Д.С. Влияние эффекта близости на разрешение в изображениях, восстановленных с помощью синтезированных голограмм // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2019. Т. 19. № 4. С. 608–613. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-608-613
20. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Никаноров О.В. Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изо-

References

1. Gusev A.I. *Nanomaterials, Nanostructures, Nanotechnologies*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2007, 416 p. (in Russian)
2. 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
3. Sidorov D.V. On quality evaluation of restored images. *Journal of Applied Informatics*, 2008, no. 4(16), pp. 92–95. (in Russian)
4. Collier R.J., Burckhardt Ch.B., Lin L.H. *Optical Holography*. New York, Academic Press, 1971. doi: 10.1016/B978-0-12-181050-4.X5001-X
5. Bouwhuis G., Braat J., Huijser A. et al. *Principles of Optical Disc Systems*. A. Hilger, 1985, 277 p.
6. Moreau W.M. *Semiconductor Lithography: Principles, Practices and Materials*. New York, Plenum Press, 1988.
7. Mack C. *Fundamental Principles of Optical Lithography: The Science of Microfabrication*. John Wiley & Sons, 2007, 534 p. doi: 10.1002/9780470723876
8. Wong A. *Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography*. Bellingham, SPIE Press, 2001, 234 p. doi: 10.1117/3.401208
9. Kireev V.Yu. *Nanotechnology in Microelectronics. Nanolithography: Processes and Equipment*. Dolgoprudny, Intellect Publ., 2016, 319 p. (in Russian)
10. Sonawane S., Deshpande A. Image quality assessment techniques: An overview. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 2014, vol. 3, no. 4, pp. 2013–2016.
11. Corda R., Giusto D., Liotta A., Song W., Perra C. Recent advances in the processing and rendering algorithms for computer-generated holography. *Electronics*, 2019, vol. 8, no. 5, pp. 556–573. doi: 10.3390/electronics8050556
12. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, vol. 13, no. 4, pp. 600–612. doi: 10.1109/TIP.2003.819861
13. Starovoitov V.V. Enhancement of the structural similarity index SSIM. *Informatics*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 41–55. (in Russian)
14. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Ivanov Yu.A., Kozulin I.A. Program system for synthesis and digital reconstruction of holograms-projectors: Synthesis parameters effect on image reconstruction quality. *Journal of Optical Technology*, 2010, vol. 77, no. 1, pp. 3337. doi: 10.1364/JOT.77.000033
15. Johnson S. *Stephen Johnson on Digital Photography*. USA, Sebastopol, CA, O'Reilly Media, Inc., 2006, 305 p.
16. Ezhova K.V. *Image Modeling and Processing*. St. Petersburg, NIU ITMO, 2011, 93 p. (in Russian)
17. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Gromov A.D. Method of synthesizing hologram projectors based on breaking down the structure of an object into typical elements, and a software package for implementing it. *Journal of Optical Technology*, 2012, vol. 79, no. 12, pp. 769774. doi: 10.1364/JOT.79.000769
18. Koreshev S., Gromov A., Nikanorov O. Modernized software complex for synthesis and reconstruction of fresnel holograms-projectors. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, vol. 12, no. 6, pp. 12–17. (in Russian)
19. Koreshev S.N., Starovoitov S.O., Smorodinov D.S. Impact of proximity effect on resolution in images reconstructed by computer-generated holograms. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 608–613. (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-608-613

бражающие свойства // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 793–801. doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801

20. 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). doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801

Авторы

Корешев Сергей Николаевич — доктор технических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 6603811394, ORCID ID: 0000-0002-8728-6122, koreshev@list.ru

Старовойтов Сергей Олегович — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57211837718, ORCID ID: 0000-0003-4429-7929, s.starovoitov95@gmail.com

Смородинов Денис Сергеевич — кандидат технических наук, программист, ООО «ИнТех Консалтинг», Москва, 115280, Российская Федерация, Scopus ID: 55755497000, ORCID ID: 0000-0002-9564-8074, smorodinov.denis@gmail.com

Фролова Марина Алексеевна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, Scopus ID: 57194332006, ORCID ID: 0000-0001-9120-4671, marrain6@yandex.ru

Authors

Sergey N. Koreshev — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 6603811394, ORCID ID: 0000-0002-8728-6122, koreshev@list.ru

Sergei O. Starovoitov — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57211837718, ORCID ID: 0000-0003-4429-7929, s.starovoitov95@gmail.com

Denis S. Smorodinov — PhD, Software Engineer, InTech Consulting Ltd, Moscow, 115280, Russian Federation, Scopus ID: 55755497000, ORCID ID: 0000-0002-9564-8074, smorodinov.denis@gmail.com

Marina A. Frolova — Postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, Scopus ID: 57194332006, ORCID ID: 0000-0001-9120-4671, marrain6@yandex.ru