

УДК 535.417; 535.317; 778.38

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-608-613

## ВЛИЯНИЕ ЭФФЕКТА БЛИЗОСТИ НА РАЗРЕШЕНИЕ В ИЗОБРАЖЕНИЯХ, ВОССТАНОВЛЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ

С.Н. Корешев<sup>а</sup>, С.О. Старовойтов<sup>а</sup>, Д.С. Смородинов<sup>б</sup>

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

<sup>б</sup> ООО «ИнТех Консалтинг», Москва, 115114, Российская Федерация

Адрес для переписки: s.starovoitov95@gmail.com

### Информация о статье

Поступила в редакцию 17.04.19, принята к печати 31.05.19

Язык статьи — русский

**Ссылка для цитирования:** 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

### Аннотация

**Предмет исследования.** Проведено исследование влияния оптического эффекта близости, известного из традиционной фотолитографии, на качество изображений, восстанавливаемых с помощью синтезированных рельефно-фазовых отражательных голограмм-проекторов Френеля. **Метод.** Исследование выполнено путем математического моделирования реальных физических процессов синтеза и восстановления в виртуальном пространстве голограмм бинарных транспарантов различной структуры. Каждый из транспарантов рассмотрен в двух вариантах: в первом он освещался синфазно, а во втором излучение, падающее на его соседние элементы, было в противофазе. Проведено сравнение качества восстановленных изображений. Критерий качества восстановленного изображения выражен через число градаций при пороговой обработке этого изображения, при котором распределение интенсивности в восстановленном изображении было бы идентично распределению интенсивности в исходном объекте. **Основные результаты.** Установлено, что при восстановлении изображений с помощью синтезированных голограмм метод фазовой компенсации эффекта близости положительно влияет на разрешение в восстановленном изображении. Наиболее явно эффект близости проявляется при расстоянии между элементами объектов-транспарантов, не превышающих один пиксель вне зависимости от размера самого пикселя и структуры применяемого объекта-фотошаблона. **Практическая значимость.** Даны рекомендации по практическому применению метода компенсации эффекта близости для улучшения качества изображений, получаемых методом голографической фотолитографии.

### Ключевые слова

голограмма, синтезированная голограмма, восстановление голограммы, фазовая коррекция, эффект близости

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-608-613

## IMPACT OF PROXIMITY EFFECT ON RESOLUTION IN IMAGES RECONSTRUCTED BY COMPUTER-GENERATED HOLOGRAMS

S.N. Koreshev<sup>a</sup>, S.O. Starovoitov<sup>a</sup>, D.S. Smorodinov<sup>b</sup>

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

<sup>b</sup> LLC InTex Consulting, Moscow, 115114, Russian Federation

Corresponding author: s.starovoitov95@gmail.com

### Article info

Received 17.04.19, accepted 31.05.19

Article in Russian

**For citation:** 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

### Abstract

**Subject of Research.** The paper presents research results on the impact of the optical proximity effect, well-known in traditional photolithography, on the quality of images reconstructed using computer-generated phase modulated Fresnel holograms. **Method.** The study was carried out through mathematical modeling of real physical processes of synthesis and reconstruction of holograms of various structure binary transparencies in the virtual space. Each of the transparencies was examined in two versions: in the first one, it was illuminated in phase, and in the second one, the radiation incident on its neighboring elements

was out of phase. Further, quality comparison of the reconstructed images was carried out. A criterion for the quality estimation of reconstructed image was expressed in terms of a number of gradations in the threshold processing of this image, in which the intensity distribution in the reconstructed image would be identical to the intensity distribution in the original object. **Main Results.** It is established that at image reconstruction by computer-generated holograms, the method of phase compensation of proximity effect has a positive impact on the resolution in the reconstructed image. The proximity effect manifests itself most clearly when the distances between the elements of the transparency objects do not exceed one pixel, regardless of the pixel size itself and the structure of the photomask object used. **Practical Relevance.** We give recommendations on the practical application of the proximity effect compensation method for improving the quality of images obtained by the holographic photolithography method.

#### Keywords

hologram, synthesized hologram, hologram reconstruction, phase correction, proximity effect

## Введение

Синтезированные с помощью компьютера голограммы имеют характерные особенности по сравнению с голограммами, записываемыми традиционными методами [1, 2]. В частности, при их изготовлении вместо реально существующих объектов обычно используются их математические модели. По этой причине они предоставляют широкие возможности для манипуляции формой представления объекта с целью влияния на особенности формирования изображений с помощью голограммы. В качестве примера можно привести работы [3–5], в которых предложены методы устранения части интермодуляционных помех, увеличения глубины резкости в восстановленном изображении и увеличения угла падения восстанавливающей волны по сравнению с углом падения опорной волны при синтезе голограммы.

Одной из перспективных областей применения синтезированных голограмм является фотолитография. Это в первую очередь обусловлено возможностью одновременного безаберрационного восстановления больших по площади действительных изображений, в том числе и изображений объектов, типичных для фотолитографии — бинарных двумерных фотошаблонов-транспарантов [1, 6, 7]. Синтезировать голограммы-проекторы таких объектов относительно просто при наличии современной техники. Использование голограмм в проекционной фотолитографии позволяет обойтись без применения многокомпонентных оптических систем, конструкция которых постоянно усложняется по мере ужесточения требований к качеству изображения, формируемого с помощью фотолитографического объектива.

Выбор параметров синтеза, позволяющих изготовить голограмму, формирующую изображения требуемого качества, в целом рассмотрен в работах [1, 4]. Однако существующая тенденция к уменьшению размеров электронных элементов приводит к необходимости постепенного увеличения разрешающей способности оптических систем. В свою очередь при малых размерах элементов возникают дополнительные дифракционные явления, одним из которых является эффект близости.

В данной работе с целью повышения разрешающей способности голограмм-проекторов предлагается использовать традиционный для проекционной фотолитографии метод фазовой коррекции эффектов близости.

## Эффект близости и его коррекция

Явление эффекта близости заключается в том, что вторичные дифракционные максимумы влияют на качество близко расположенных элементов изображения [8]. Предлагаемый метод фазовой коррекции эффекта близости аналогичен методу, который применяется в традиционной оптической фотолитографии: повышение разрешающей способности осуществляется за счет минимизации влияния вторичных дифракционных максимумов на качество восстановленного изображения фотошаблона. Для этого в пространстве предметов используются фазовые маски, которые обеспечивают противофазность волновых фронтов, формирующих изображения соседних элементов структуры объекта. При суперпозиции этих, находящихся в противофазе волн в области между изображениями, соответствующих элементов происходит деструктивная интерференция вторичных дифракционных максимумов, которая снижает уровень помех и повышает разрешающую способность системы.

Как уже было сказано выше, использование компьютерных технологий при синтезе голограмм-проекторов позволяет в определенных пределах манипулировать процессом, происходящим в виртуальном пространстве. В частности, для применения метода коррекции эффекта близости в данном случае не требуется использование реальных фазовых масок. По сути процесс сводится к коррекции математической модели фотошаблона, т. е. введению необходимой фазовой модуляции в его функцию пропускания.

Выясним границы применимости метода компенсации эффекта близости, т. е. условия, при которых элементы структуры фотошаблона могут считаться соседними, рассматриваемый метод оказывает положительное влияние на качество восстанавливаемого изображения. Сделать это можно было либо путем решения задачи дифракции излучения, либо экспериментально, например, с помощью численных экспериментов. Для их проведения был использован метод математического моделирования и специализированный комплекс синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов Френеля [9]. Методика работы включала в себя,

как отмечалось выше, проведение ряда численных экспериментов по синтезу и цифровому восстановлению рельефно-фазовых отражательных голограмм-проекторов плоского объекта, представляющего собой две рядом расположенные щели в непрозрачном экране. При их выполнении полагалось, что эффективность метода коррекции эффекта близости должна зависеть от ширины щелей и расстояния между ними. Проверка этой гипотезы и составляла цель настоящей работы.

При ее выполнении параметры синтеза голограмм выбирались исходя из требований, описанных в работах [1, 10]. Так, рабочая длина волны  $\lambda$  была выбрана равной 13,5 нм; размер пикселей объекта и голограммы  $d_d$  составлял  $20 \times 20$  нм<sup>2</sup>. Характеристический размер элемента объекта  $b$ , т. е. размер минимального элемента его структуры был равен 80 нм. При этом выбор размера пикселя объекта связан с требованиями соблюдения критерия Рэля [10]. Угол падения параллельного опорного пучка при синтезе всех голограмм выбирался равным  $14,7^\circ$ , а расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы составляло  $R_h = 20345$  нм.

Исследование зависимости эффекта близости от расстояния между элементами структуры объекта проводилось путем синтеза и цифрового восстановления голограмм двух щелей (отрезков) размером  $4 \times 40$  пикселей, т. е.  $80 \times 800$  нм каждая, результаты которого приведены на рис. 1 в виде графиков распределения интенсивности на восстановленных изображениях.

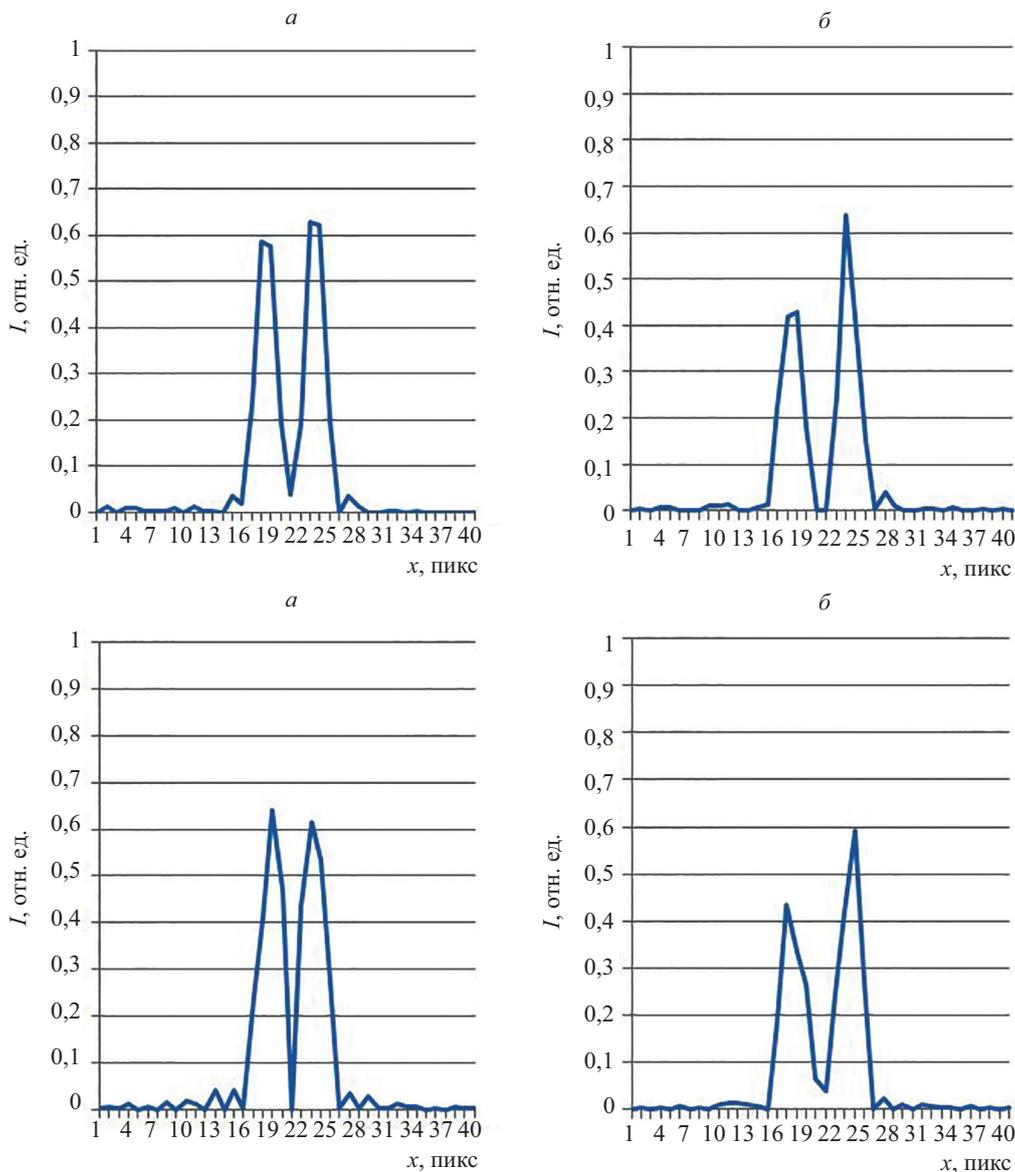


Рис. 1. Распределение интенсивности в изображениях, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных при синфазном излучении от щелей (верхний ряд) и противофазном (нижний ряд) при расстояниях между щелями 20 (а) и 40 нм (б)

Согласно критерию Рэля, два точечных источника, за которые в данном случае принимаются узкие щели, полностью разрешаются, если дифракционный максимум одного из них накладывается на дифрак-

ционный минимум другого. Поэтому в рамках экспериментов имеет смысл рассматривать только такие расстояния между щелями, при которых они не разрешаются по Рэлею при условии когерентного излучения. Для исследуемых щелей это расстояние равно 57 нм. Таким образом, расстояния между щелями в экспериментах составляли от 1 до 2 пикселей, т. е. от 20 до 40 нм. Для каждого из указанных расстояний между щелями синтезировались две голограммы — одна для случая, когда падающее на щели излучение было синфазным, другая для случая, когда оно было в противофазе. Таким образом, были синтезированы четыре голограммы, с помощью которых в виртуальном пространстве были восстановлены соответствующие изображения. На графиках, представленных на рис. 1, на оси абсцисс отложены координаты в пикселях, а на оси ординат — доля от максимума интенсивности в соответствующем пикселе. Отметим, что поскольку для изображения восстановленных изображений используется так называемая «серая шкала» [11], существует ограниченное количество градаций интенсивности в изображении. В соответствии с этим становится возможным определение относительной интенсивности в каждой из точек восстановленного изображения по сравнению с максимально возможным значением, которое одинаково для всех восстановленных изображений. Для удобства визуальной оценки уровня помех на рис. 1 показаны распределения интенсивности ( $I$ ) в тех строках пикселей полученных изображений, где средняя интенсивность пикселей щелей минимальна.

В соответствии с упомянутой выше «серой шкалой» всего существует 256 возможных градаций, где 0 соответствует черному цвету, т. е. отсутствию интенсивности, а 255 — белому цвету, т. е. максимальной интенсивности в изображении. Соответственно чем больше количество уровней (градаций) пороговой обработки, при которых изображение соответствует исходному объекту, тем изображение можно считать более качественным [10]. Так, изображения, восстановленные с помощью голограмм, записанных при синфазности излучения, соответствовали исходным объектам в интервале 16 градаций пороговой обработки при расстоянии между щелями 20 нм и 20 градаций — при 40 нм. При противофазности излучения изображение соответствовало исходному объекту в интервале 36 градаций при расстоянии между щелями 20 нм и 18 градаций — при 40 нм. Таким образом, в случае минимально возможного расстояния между щелями (20 нм) наблюдается значительное увеличение числа градаций при пороговой обработке на восстановленном изображении в случае освещения щелей в противофазе, в том случае, как при расстоянии между щелями в 40 нм его качество одинаково при использовании обоих методов синтеза. Сравнение распределений интенсивности позволяет сделать вывод о том, что именно подавление шумов в пространстве между изображениями обеих щелей, вызванное наложением их центральных максимумов с обратным знаком, позволяет добиться разрешения изображения в первом случае.

Теперь рассмотрим, каким образом эффект близости проявляется в более сложных по структуре объектах. Для этого с помощью ранее упомянутого программного комплекса были синтезированы и восстановлены рельефно-фазовые отражательные голограммы-проекторы Френеля плоского объекта типа «Уголки», представляющего собой крест толщиной в один пиксель и уголки толщиной от одного пикселя до трех пикселей, который представлен на рис. 2. Расстояние между каждым из элементов объекта составляло один пиксель. В рамках исследования использовались следующие параметры объекта-транспаранта и схемы записи: рабочая длина волны  $\lambda$  была выбрана равной 13,5 нм; размер пикселей голограммы  $d_d$  составлял  $20 \times 20$  нм<sup>2</sup>, а размер пикселей объекта  $a_t$  —  $80 \times 80$  нм<sup>2</sup>. Характеристический размер элемента объекта  $b$ , т. е. размер минимального элемента его структуры также был равен 80 нм. Угол падения опорной волны выбирался равным  $14,7^\circ$ , а расстояние между плоскостью объекта и плоскостью регистрации голограммы составляло  $R_h = 20345$  нм.

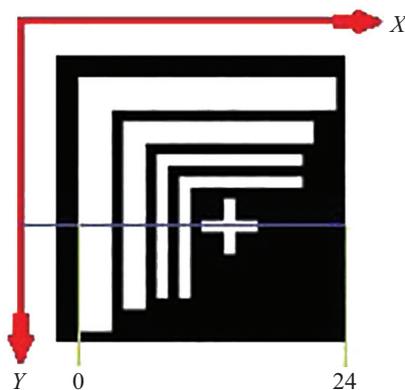


Рис. 2. Объект «Уголки»: синим цветом обозначено сечение, по которому проводилось измерение, а зеленым — интервал пикселей, значения интенсивности в котором приведены на гистограмме на рис. 3

Таким образом, были синтезированы и восстановлены две голограммы рассматриваемого объекта «Уголки»: для случая полной синфазности излучения, освещающего все составляющие его элементы, и для случая, когда излучение, падающее на соседние элементы объекта, находилось в противофазе. На рис. 3

в виде гистограмм представлены распределения интенсивности ( $I$ ) в восстановленных изображениях, взятые в строке пикселей, обозначенной на рис. 2 синей линией.

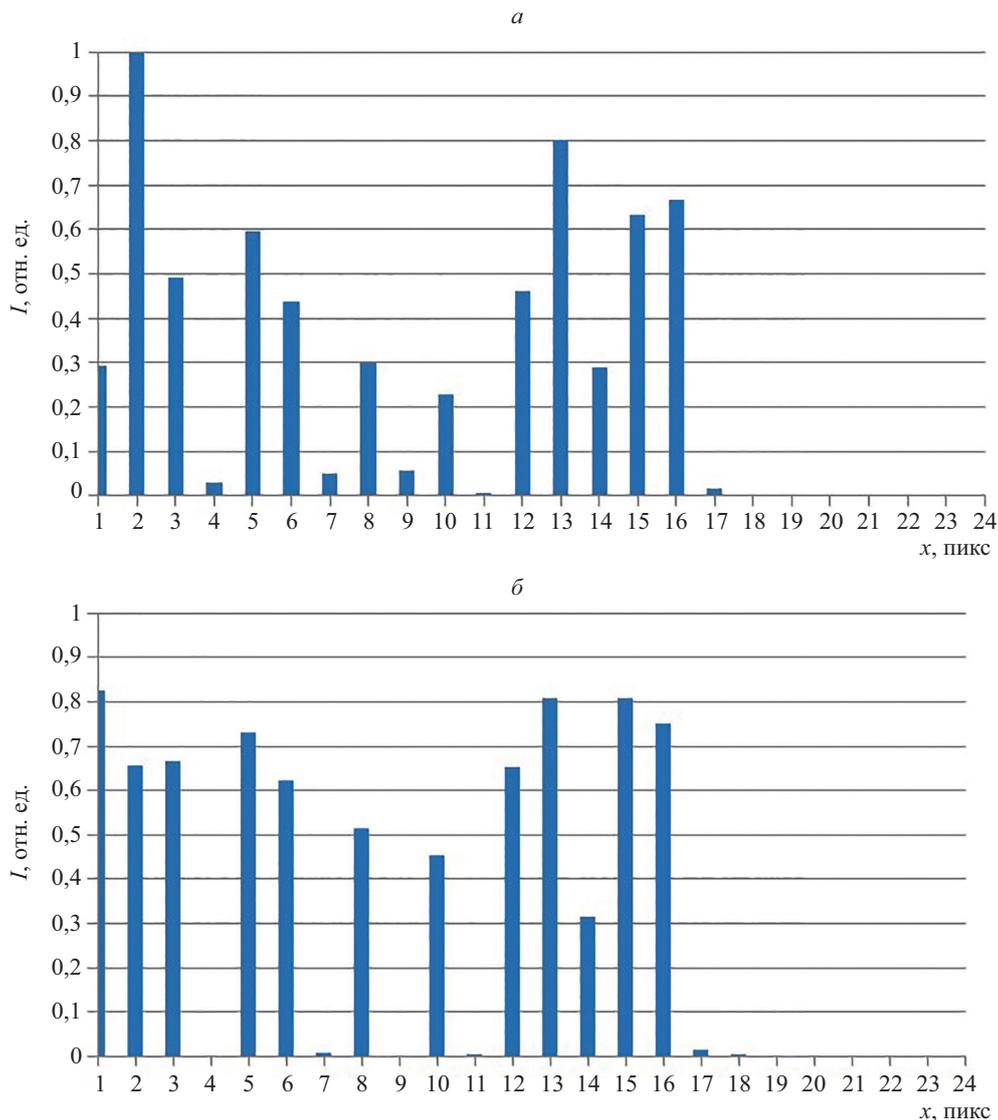


Рис. 3. Распределение интенсивности в строке пикселей, содержащей горизонтальный элемент крестика в изображении объекта «Уголки», восстановленного с помощью голограмм, синтезированных при синфазности освещения соседних элементов объекта (а) и противофазе (б)

Как видно по представленным на рис. 3 гистограммам, использование объекта, в котором соседние элементы подсвечиваются в противофазе, позволяет добиться увеличения качества восстановленного изображения. Изображение транспаранта, освещаемое при полной синфазности падающего на него излучения, соответствовало исходному объекту на протяжении 41 градации, а при подсветке близко расположенных его элементов в противофазе – на протяжении 68 градаций. По графикам распределения интенсивности заметно, что при подсветке соседних элементов уголков в противофазе (рис. 3, б) происходит почти полное подавление шумов в пространстве между элементами объекта. Особенно ярко это видно на примере узких щелей (элементы 8 и 10 графиков). Также при работе в противофазе интенсивность широких щелей является более равномерной, что и повышает качество восстанавливаемого изображения в данной схеме записи.

### Заключение

Численные эксперименты показали, что при восстановлении изображений с помощью синтезированных голограмм известный из фотолитографии метод компенсации эффекта близости положительно влияет на разрешение в восстановленном изображении. Эффект близости наиболее явно проявляется при малых расстояниях между элементами изображений — не более одного пиксела, вне зависимости от размера самого пиксела и структуры рассматриваемого объекта-фотошаблона. Эффективность метода продемон-

стрирована с помощью математического моделирования процессов синтеза и восстановления двумерных и рельефно-фазовых отражательных голограмм-проекторов Френеля.

### Литература

1. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С. 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
2. Martinez-Leon L., Clemente P., Mori Y., Climent V., Lancis J., Tajahuerce E. Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination // Optics Express. 2017. V. 25. N 5. P. 4975–4984. doi: 10.1364/oe.25.004975
3. Zhang Y., Lu Q., Ge B. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography // Optics Communications. 2004. V. 240. N 4-6. P. 261–267. doi: 10.1016/j.optcom.2004.06.040
4. 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. doi: 10.17586/1023-5086-2018-85-11-50-57
5. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Ратушный В.П. Восстановление синтезированных голограмм-проекторов Френеля при углах падения восстанавливающей волны, превышающих угол падения опорной волны при синтезе голограммы // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 111. № 1. С. 143–148.
6. Maiden A., McWilliam R., Purvis A., Johnson S., Williams G.L., Seed N.L., Ivey A.P. Nonplanar photolithography with computer-generated holograms // Optics Letters. 2005. V. 30. N 11. P. 1300–1302. doi: 10.1364/ol.30.001300
7. 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
8. Моро У. Микролитография. М.: Мир. 1990. 1240 с.
9. 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.
10. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С., Громов А.Д. Влияние метода представления объекта на изображающие свойства синтезированных голограмм // Оптический журнал. 2015. Т. 82. № 4. С. 66–73.
11. Johnson S. Stephen Johnson on Digital Photography. O'Reilly Media, 2006. 305 p.

### 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, ORCID ID: 0000-0003-4429-7929, s.starovoitov95@gmail.com

**Смородинов Денис Сергеевич** — кандидат технических наук, программист, ООО «ИнТех Консалтинг», Москва, 115114, Российская Федерация, Scopus ID: 55755497000, ORCID ID: 0000-0002-9564-8074, smorodinov.denis@gmail.com

### References

1. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Smorodinov D.S. Influence of the discreteness of synthetic and digital holograms on their imaging properties. *Computer Optics*, 2016, vol. 40, no. 6, pp. 793–801. doi: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-793-801
2. Martinez-Leon L., Clemente P., Mori Y., Climent V., Lancis J., Tajahuerce E. Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination. *Optics Express*, 2017, vol. 25, no. 5, pp. 4975–4984. doi: 10.1364/oe.25.004975
3. Zhang Y., Lu Q., Ge B. Elimination of zero-order diffraction in digital off-axis holography. *Optics Communications*, 2004, vol. 240, no. 4-6, pp. 261–267. doi: 10.1016/j.optcom.2004.06.040
4. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Frolova M.A. Method of sharpness depth increasing on flat transparencies images reconstructed using synthesized holograms. *Opticheskiy Zhurnal*, 2018, vol. 85, no. 11, pp. 50–57 (in Russian). doi: 10.17586/1023-5086-2018-85-11-50-57
5. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Ratushnyi V.P. Reconstruction of synthesized holograms-Fresnel projectors at angles of incidence of reconstructing wave that exceed the angle of incidence of the reference wave in hologram synthesis. *Optics and Spectroscopy*, 2011, vol. 111, no. 1, pp. 134–138. doi: 10.1134/S0030400X11070113
6. Maiden A., McWilliam R., Purvis A., Johnson S., Williams G.L., Seed N.L., Ivey A.P. Nonplanar photolithography with computer-generated holograms. *Optics Letters*, 2005, vol. 30, no. 11, pp. 1300–1302. doi: 10.1364/ol.30.001300
7. 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
8. Moreau W.M. *Semiconductor Lithography: Principles, Practices, and Materials*. Springer, 1988.
9. 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. 769–774.
10. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Smorodinov D.S., Gromov A.D. How the method of representing an object affects the imaging properties of synthesized holograms. *Journal of Optical Technology*, 2015, vol. 82, no. 4, pp. 246–251. doi: 10.1364/JOT.82.000246
11. Johnson S. *Stephen Johnson on Digital Photography*. O'Reilly Media, 2006, 305 p.

### 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

**Sergey O. Starovoitov** — postgraduate, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, ORCID ID: 0000-0003-4429-7929, s.starovoitov95@gmail.com

**Denis S. Smorodinov** — PhD, Software engineer, LLC InTex Consulting, Moscow, 115114, Russian Federation, Scopus ID: 55755497000, ORCID ID: 0000-0002-9564-8074, smorodinov.denis@gmail.com