

УДК 535.417; 535.317; 778.38

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-825-831

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТА НА ГЛУБИНУ РЕЗКОСТИ ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ ФРЕНЕЛЯ

С.Н. Корешев, М.А. Фролова

Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация
 Адрес для переписки: marrain6@yandex.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 08.06.19, принята к печати 15.07.19
 Язык статьи — русский

Ссылка для цитирования: Корешев С.Н., Фролова М.А. Влияние формы представления объекта на глубину резкости восстановленных изображений, полученных с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 5. С. 825–831. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-825-831

Аннотация

Предмет исследования. Проведено исследование влияния формы представления объекта на глубину резкости изображений, восстановленных с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля. **Метод.** Исследование осуществлялось путем проведения математического моделирования синтеза и восстановления в виртуальном пространстве голограмм различных объектов с характеристическим размером 20×20 . Метод основан на представлении объектной волны при синтезе голограммы в виде суперпозиции объектных волн, исходящих от двух одинаковых объектов, расположенных на различных расстояниях от плоскости синтеза голограммы. Все численные эксперименты проводились с помощью специализированного программного комплекса при следующих значениях параметров синтеза и восстановления голограмм: длина волны используемого излучения 13,5 нм, размер пиксела голограммы 20×20 , расстояние между плоскостями объекта и голограммы 20,3 мкм, угол падения опорной волны $14,7^\circ$. Критерий качества восстановленного изображения выражался 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.** На основании проведенных экспериментов была выявлена зависимость глубины резкости изображений, восстановленных с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля, от формы представления объекта. В частности, было установлено, что наиболее эффективным является полное представление объекта на транспарантах, чем представление только одной его части, содержащей лишь малоразмерные элементы структуры объекта. **Практическая значимость.** Применение данного метода позволяет выбрать оптимальные параметры структуры объекта, т. е. вида и размеров составляющего его элементов при синтезе для разработки голограмм-проекторов Френеля с увеличенной глубиной резкости.

Ключевые слова

голограмма, синтезированная голограмма, восстановление голограммы, глубина резкости, синтез голограмм, форма представления объекта

doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-825-831

EFFECT OF OBJECT REPRESENTATION FORM ON DEPTH RESOLUTION OF RESTORED IMAGES OBTAINED BY SYNTHESIZED FRESNEL HOLOGRAMS

S.N. Koreshev, M.A. Frolova

ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation
 Corresponding author: marrain6@yandex.ru

Article info

Received 08.06.19, accepted 15.07.19
 Article in Russian

For citation: Koreshev S.N., Frolova M.A. Effect of object representation form on depth resolution of restored images obtained by synthesized Fresnel holograms. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 825–831 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-5-825-831

Abstract

Subject of the Research. The paper presents the study on the effect of object representation form on the depth resolution of images reconstructed via computer-generated Fresnel holograms-projectors. **Method.** The study was performed by mathematical

modeling of synthesis and reconstruction of holograms-projectors of various objects with a characteristic size of 20×20 in virtual space. The method is based on object wave representation at hologram synthesis as a superposition of object waves emanating from two identical objects located at different distances from the hologram synthesis plane. All numerical experiments were carried out using a specialized software package with the following parameters for the synthesis and reconstruction of holograms: the wavelength of the radiation used is 13.5 nm, the pixel size of the hologram is 20×20 , the distance between the object and the hologram planes is 20.3 μm , the reference wave angle of incidence is 14.7° . The quality criterion of the reconstructed image was expressed in terms of the number of gradations at the threshold processing of this image with the intensity distribution in the reconstructed image identical to the intensity distribution in the original object. **Main Results.** Following the carried out experiments, the dependence was drawn out for the depth resolution of the images reconstructed by computer-generated Fresnel holograms-projectors on object representation form. In particular, it was found that full object representation based on transparencies is the most effective rather than representation of just one its part with the small-sized elements of the object structure. **Practical Relevance.** The application of this method makes it possible to optimize the object structure parameters, that is, the form and sizes of its elements during the synthesis of Fresnel holograms-projectors with the higher depth resolution for holographic photolithography.

Keywords

hologram, synthesized hologram, hologram reconstruction, depth resolution, hologram synthesis, object representation form

Введение

Глубина резко изображаемого пространства является одной из важнейших характеристик оптических систем, поскольку отражает допустимую величину сдвига вдоль оптической оси относительно плоскости наилучшей установки, при которой изображение все еще можно считать резким. Особое значение она приобретает в случае проекционных фотолитографических оптических систем. Дело в том, что в проекционной фотолитографии традиционные способы уменьшения норм проектирования изготавливаемых изделий, основанные на уменьшении рабочей длины волны и увеличении апертуры проекционных оптических систем, обуславливают значительное сокращение глубины резко отображаемого пространства. Это приводит к необходимости обеспечения высокой точности позиционирования полупроводниковой пластины, на поверхности которой формируется изображение структуры изготавливаемого прибора. Это приводит к значительному усложнению и удорожанию фотолитографического оборудования и, как следствие этого, к необходимости поиска альтернативных способов изготовления фотолитографической продукции. В настоящее время известны различные методы, позволяющие увеличить глубину резкости изображений. К примеру, существуют способы, основанные на использовании фазовых масок [1], модификаций оптических установок [2], особой цифровой обработки изображений на стадии их синтеза либо регистрации [3].

В рассматриваемом случае голографической проекционной фотолитографии, реализуемой с помощью синтезированных голограмм-проекторов, наибольший интерес представляет способ [3]. В его основу положена возможность осуществляемой в виртуальном пространстве модификации математического описания объекта при синтезе рельефно-фазовой голограммы-проектора [4–6], причем модификации, недоступной для реализации в физическом пространстве. Способ позволяет значительно увеличить глубину резкости восстановленного изображения. Для синтеза голограммы с увеличенной глубиной резкости следует использовать объектную волну, представляющую собой суперпозицию двух или более объектных волн, формируемых одинаковыми транспарантами-фотошаблонами, расположенными параллельно плоскости голограммы на разных заданных расстояниях от нее (рис. 1). Расстояние между фотошаблонами при этом не должно превышать традиционной для оптики глубины резкости [7]. В данном случае значение глубины резкости b будет определяться исходя из оптимального положения значения Δ .

В геометрической оптике под глубиной резкости понимается такое смещение плоскости наблюдения, при котором диаметр изображения точечного объекта, представляемого в виде геометрической точки, не превышает диаметр центрального кружка картины Эйри. Выражение, позволяющее определить глубину резкости оптической системы в соответствии с этим критерием, имеет вид [8]:

$$|b| = \pm \frac{\lambda n}{2A^2}, \quad (1)$$

где A — числовая апертура системы, λ — длина волны используемого излучения, n — показатель преломления среды, равный 1 в случае воздуха. При компьютерном синтезе голограмм-проекторов числовая апертура излучения, дифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры объекта — пикселе, имеющем размер a_p , может быть описана выражением:

$$A = n \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_p}, \quad (2)$$

где α — апертурный угол дифрагировавшего излучения.

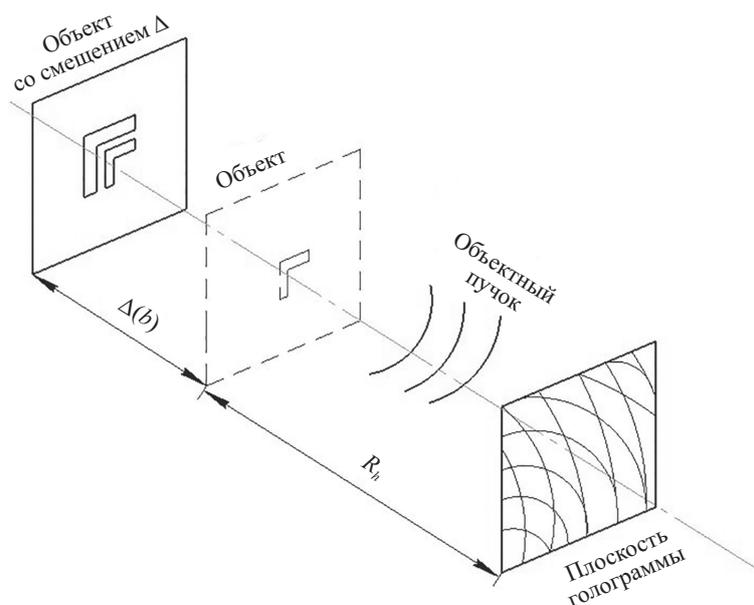


Рис. 1. Представления объекта в виде суперпозиции нескольких объектных волн, формируемых одним и тем же фотошаблоном при различных расстояниях от плоскости синтеза голограммы: $\Delta(b)$ — точное расстояние между фотошаблонами, позволяющими определить глубину резкости, а R_r определяет расстояние от объекта до плоскости регистрации голограммы

Из (1) и (2) следует, что рабочая длина волны λ и размер пикселя объекта a_i являются единственными параметрами, влияющими на глубину резкости изображения, восстановленного с помощью синтезированной голограммы. Также из (1) и (2) следует, что глубина резкости изображения сложного объекта будет различной для различных элементов структуры объекта, отличающихся своими размерами и, следовательно, характеризующимися различными величинами числовой апертуры. Отсюда можно сделать вывод о том, что при практической реализации способа увеличения глубины резкости [3] можно считать допустимым отображение полной структуры объекта лишь на одном из двух используемых фотошаблонов, а на дополнительном фотошаблоне можно ограничиться лишь отображением малоразмерных элементов структуры объекта, обладающих наименьшей глубиной резкости. Достигаемая при этом глубина резкости всего восстановленного изображения, казалось бы, должна быть равна глубине резкости крупных элементов структуры объекта, отображенных лишь на одном фотошаблоне. В настоящей работе приведены результаты исследования справедливости описанного выше вывода. Они представлены в виде выявленной зависимости глубины резкости восстановленного изображения от использованной при синтезе голограмм-проекторов формы представления объекта, т. е. от структуры использовавшихся фотошаблонов.

Выбор параметров синтеза и восстановления голограмм-проекторов

Экспериментальное исследование зависимости глубины резкости восстановленного изображения от формы представления объекта включало в себя синтез голограмм-проекторов объекта при различных формах его представления, цифровое восстановление синтезированных голограмм-проекторов и последующую оценку достигнутой глубины резкости восстановленных изображений. В качестве объекта в работе использовался объект, получивший название «уголки» общим размером 10×10 пикселей, состоявший из двух отрезков шириной по 1 пикселю размером 1×7 пикселей и двух отрезков шириной 2 пикселя размером 2×10 пикселей (рис. 2).



Рис. 2. Тест-объект «уголки»

Параметры синтеза были определены в соответствии с результатами работы [9], таким образом, при размерах пикселя объекта a_p , равных 20×20 нм, равен размеру пикселя на голограмме d_d , а расстояние между голограммой и плоскостью ближайшего к ней объекта составляло $R_h = 20345$ нм. Рабочая длина волны составляла $\lambda = 13,5$ нм, а угол падения опорного пучка $\alpha = 14,67^\circ$, значение d_d определяется, как период дискретизации голограммы.

Глубина резкости в восстановленном изображении, рассчитанная в соответствии с выражением (1) при таких параметрах составляет ± 237 нм. Синтез и восстановление голограмм в ходе проведения исследования осуществлялся с помощью специализированного программного комплекса, разработанного в Университете ИТМО и предназначенного для осуществления синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов [10]. Оценка качества восстановленного изображения производилась с использованием описанного в работе [11] критерия, основанного на подсчете количества градаций пороговой обработки изображения. В соответствии с используемой для отображения восстановленного изображения «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.

Зависимость глубины резкости восстановленного изображения от формы представления объекта

Методика исследования зависимости глубины резкости восстановленного изображения от формы представления объекта включала в себя синтез голограмм с использованием трех различных форм представления объекта, их цифровое восстановление и последующее определение глубины резкости восстановленных изображений. Первая форма представляла собой одиночный фотошаблон, содержащий все изображение объекта (рис. 3).

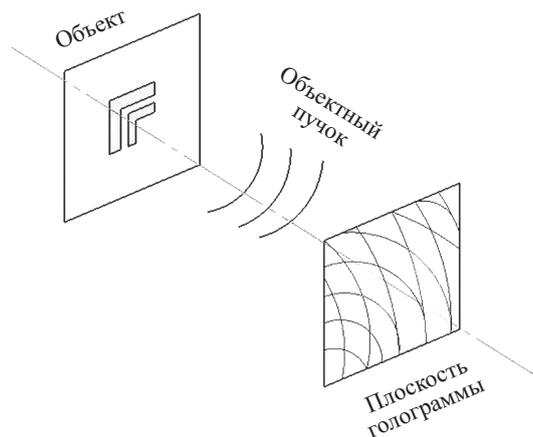


Рис. 3. Одиночный фотошаблон, содержащий все изображение объекта

Вторая форма, представленная на рис. 4, подразумевала использование двух фотошаблонов-транспарантов, расположенных друг от друга на расстоянии 199 нм, выбранном экспериментально, как оптимальное и не превосходящее расчетной глубины резкости [3].

Третья форма представления, как показано на рис. 5, заключалась в использовании двух фотошаблонов, располагаемых друг от друга на том же расстоянии, что и при второй форме отображения объекта. При этом один из фотошаблонов содержал полное изображение объекта, а второй содержал изображение только тонких линий, поскольку в восстановленном изображении именно они должны характеризоваться наименьшей глубиной резкости.

Для непосредственной оценки глубины резкости изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных при различных формах представления объекта, был восстановлен ряд изображений на расстояниях, отличающихся от расстояния R_h на значения от -500 до 1000 нм, с шагом 50 нм. Результаты исследования, нормированные по максимальному числу градаций, соответствующих случаю использования лишь одного фотошаблона, приведены на рис. 6.

На приведенных графиках (рис. 6) хорошо заметно, что использование второго фотошаблона, содержащего только часть «уголка», позволяет увеличить как глубину резкости в 1,5–2 раза по сравнению с применением объекта без дополнительных фотошаблонов, так и качество изображения. Однако использование второго фотошаблона, содержащего все изображение объекта, а не только его малоразмерные детали,

является более эффективным и позволяет добиться большей глубины резкости восстановленных изображений. Таким образом, сделанный ранее вывод о возможности отображения на дополнительном фотошаблоне лишь малоразмерных элементов структуры объекта справедлив, однако, на практике наилучшие результаты с точки зрения достигаемой глубины резкости обеспечиваются при отображении всего объекта на основном и дополнительных фотошаблонах. Использование второго фотошаблона лишь с малоразмерными элементами структуры объекта может быть признано целесообразным лишь при наличии ограничений на число математических операций при синтезе голограммы-проектора.

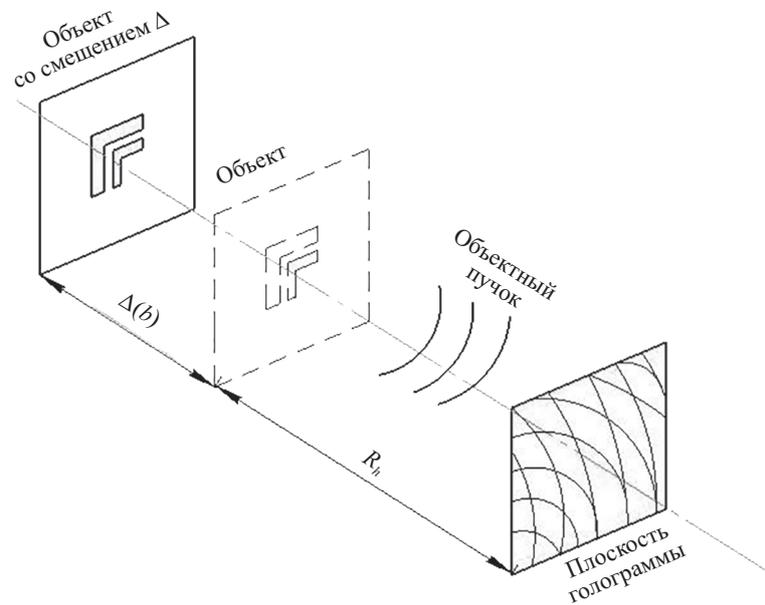


Рис. 4. Использование двух фотошаблонов-транспарантов, расположенных друг от друга на расстоянии 199 нм

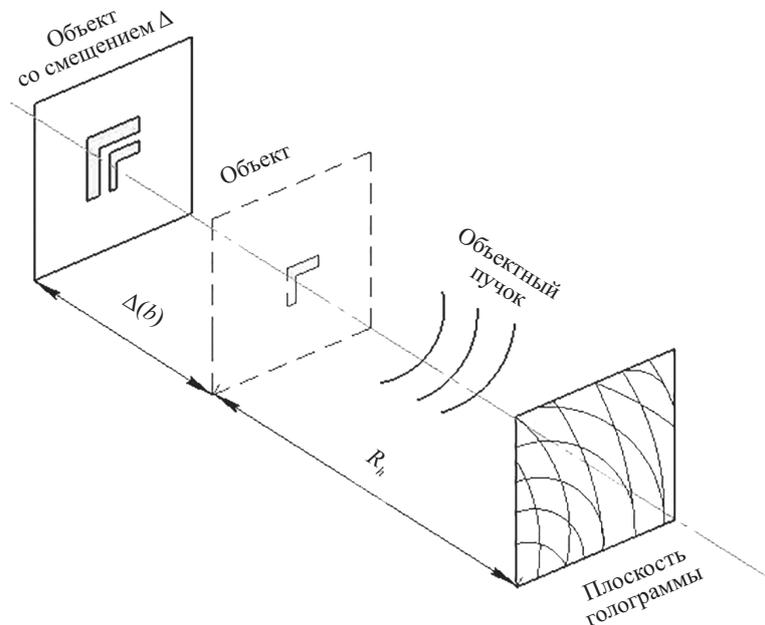


Рис. 5. Использование двух фотошаблонов-транспарантов, расположенных друг от друга на расстоянии 199 нм, где второй фотошаблон содержит изображение только тонких линий

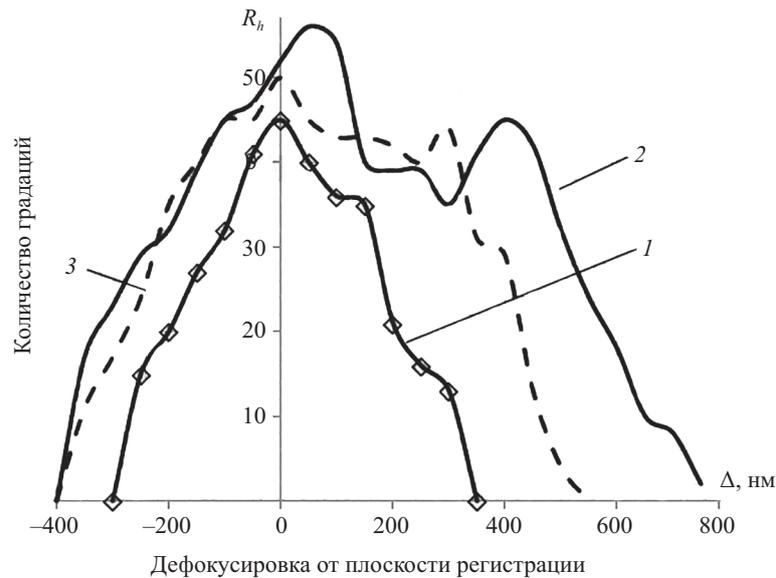


Рис. 6. График зависимости качества восстановленного изображения объекта «уголки» от дефокусировки (Δ) относительно плоскости регистрации (R_h) при различной форме представления объекта при синтезе:

1 — без установки второй плоскости; 2 — использование двух идентичных фотошаблонов; 3 — использование второго фотошаблона, содержащего лишь часть «уголка»

Заключение

В результате выполнения настоящей работы была определена зависимость глубины резкости восстановленного изображения от формы представления объекта, синтезированного при использовании двух объектных транспарантов. В частности, было показано, что полное представление объекта на обоих транспарантах является более эффективным, чем представление на втором фотошаблоне только части структуры объекта, содержащей лишь малоразмерные детали. Установлено, что использование второго фотошаблона лишь с малоразмерными элементами структуры объекта может быть признано целесообразным лишь при наличии ограничений на число математических операций при синтезе голограммы-проектора.

Литература

1. Shain W.J., Vickers N.A., Goldberg B.B., Bifano T., Mertz J. Extended depth-of-field microscopy with a high-speed deformable mirror // *Optics Letters*. 2017. V. 42. N 5. P. 995–998. doi: 10.1364/OL.42.000995
2. Басов И.В., Краснобаев А.А. Методы увеличения глубины резкости оптико-цифровых регистраторов изображения // *Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша*. 2010. № 37. С. 1–32.
3. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Фролова М.А., Новицкая Я.А., Хисамов Р.И. Методы увеличения разрешающей способности и глубины резкости синтезированных голограмм-проекторов // *Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 12. С. 62–68.
4. Levenson M.D., Johnson K.M., Hanchett V.C., Chiang K. Projection photolithography by wave-front conjugation // *Journal of the Optical Society of America*. 1981. V. 71. N 6. P. 737–743. doi: 10.1364/JOSA.71.000737
5. Maiden A., McWilliam R., Purvis A., Johnson S., Williams G.L., Seed N.L., Ivey P.A. Nonplanar photolithography with computer-generated holograms // *Optics Letters*. 2005. V. 30. N 11. P. 1300–1302. doi: 10.1364/OL.30.001300
6. 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
7. 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

References

1. Shain W.J., Vickers N.A., Goldberg B.B., Bifano T., Mertz J. Extended depth-of-field microscopy with a high-speed deformable mirror. *Optics Letters*, 2017, vol. 42, no. 5, pp. 995–998. doi: 10.1364/OL.42.000995
2. Basov I.V., Krasnobaev A.A. Methods of depth-of-field extending of optical-digital image detectors. *Preprints of the Keldysh Institute of Applied Mathematics*, 2010, no. 37, pp. 1–32. (in Russian)
3. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Frolova M.A., Novitskaya Ya.A., Khisamov R.I. Methods of increasing the resolving power and depth of field of synthesized hologram-projectors. *Journal of Optical Technology*, 2016, vol. 83, no. 12, pp. 760–764. doi: 10.1364/JOT.83.000760
4. Levenson M.D., Johnson K.M., Hanchett V.C., Chiang K. Projection photolithography by wave-front conjugation. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, vol. 71, no. 6, pp. 737–743. doi: 10.1364/JOSA.71.000737
5. Maiden A., McWilliam R., Purvis A., Johnson S., Williams G.L., Seed N.L., Ivey P.A. Nonplanar photolithography with computer-generated holograms. *Optics Letters*, 2005, vol. 30, no. 11, pp. 1300–1302. doi: 10.1364/OL.30.001300
6. 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
7. 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. doi: 10.1364/JOT.85.000696

8. Цуканова Г.И., Карпова Г.В., Багдасарова О.В., Карпов В.Г., Кривоустова Е.В., Ежова К.В. Прикладная оптика. Часть 2: Учебно-методическое пособие / Под ред. проф. А.А. Шехонина. СПб.: СПб ГУИТМО, 2003. 77 с.
9. Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Фролова М.А. Влияние периода дискретизации объекта на глубину резкости изображений, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля // Оптический журнал. 2017. Т. 84. № 11. С. 69–72.
10. 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.
11. Корешев С.Н., Никаноров О.В., Смородинов Д.С. Изображающие свойства дискретных голограмм. I. Влияние дискретности голограмм на восстановленное изображение // Оптический журнал. 2014. Т. 81. № 3. С. 14–19.
8. Tsukanova G.I., Karpova G.V., Bagdasarova O.V., Karpov V.G., Krivopustova E.V., Yezhova K.V. *Applied Optics. Part 2: Handbook*. Ed. by Professor Shekhonin A.A. St. Petersburg, SPb GITMO (TU), 2003, 73 p. (in Russian)
9. Koreshev S.N., Smorodinov D.S., Frolova M.A. Effect of object-discretization period on the depth of field of images reconstructed using synthesized Fresnel hologram-projectors. *Journal of Optical Technology*, 2017, vol. 84, no. 11, pp. 773–776. doi: 10.1364/JOT.84.000773
10. 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. doi: 10.1364/JOT.79.000769
11. Koreshev S.N., Nikanorov O.V., Smorodinov D.S. Imaging properties of discrete holograms. I. How the discreteness of a hologram affects image reconstruction. *Journal of Optical Technology*, 2014, vol. 81, no. 3, pp. 123–127. doi: 10.1364/JOT.81.000123

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

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

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