

## 26. Влияние формы представления объекта на глубину резкости изображений, восстановленных с помощью синтезированных голограмм — проекторов Френеля

*М. А. Фролова, С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов*

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

Выявлена и исследована зависимость глубины резкости изображений, восстановленных с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля, от формы представления объекта. Исследование выполнено в интересах разработки оптических систем с увеличенной глубиной резкости. Особое внимание уделено случаю синтеза голограмм-проекторов двумерных бинарных объектов, предназначенных для использования в фотолитографическом процессе.

*Ключевые слова:* Глубина резкости, Разность фаз, Синтез голограмм, Форма представления объекта.

*Цитирование:* **Фролова, М. А.** Влияние формы представления объекта на глубину резкости изображений, восстановленных с помощью синтезированных голограмм — проекторов Френеля / М. А. Фролова, С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 140–143.

### Введение

Современные тренды развития проекционных фотолитографических технологий «заточены» на увеличение разрешающей способности и полей проекционных оптических систем. Как правило, задача увеличения разрешающей способности решается путем уменьшения рабочей длины волны, что, в свою очередь, приводит как к уменьшению размеров участка изображения, свободного от аберраций, так и глубины резкости оптической системы. Этим обусловлена необходимость значительного усложнения конструкции фотолитографического оборудования и, как следствие этого, необходимость поиска альтернативных способов изготовления фотолитографической продукции. Например, способов, основанных на принципах голографии, позволяющих обойтись без сложных проекционных оптических систем, заменив их плоскими отражательными рельефно-фазовыми голограммами-проекторами. Отметим, что поскольку в фотолитографии объекты представляют собой бинарные двумерные транспаранты, то требуемые голограммы-проекторы относительно легко можно синтезировать в виртуальном пространстве, что позволяет оказывать существенное влияние на их изображающие свойства, в том числе и на глубину резко отображаемого пространства, путем целенаправленных манипуляций с формой представления объекта в процессе синтеза. Затем такие голограммы можно отобразить на реальном носителе с последующим физическим восстановлением [1–3].

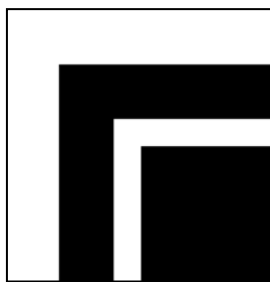


Рис. 1. Тест-объект «Уголки»

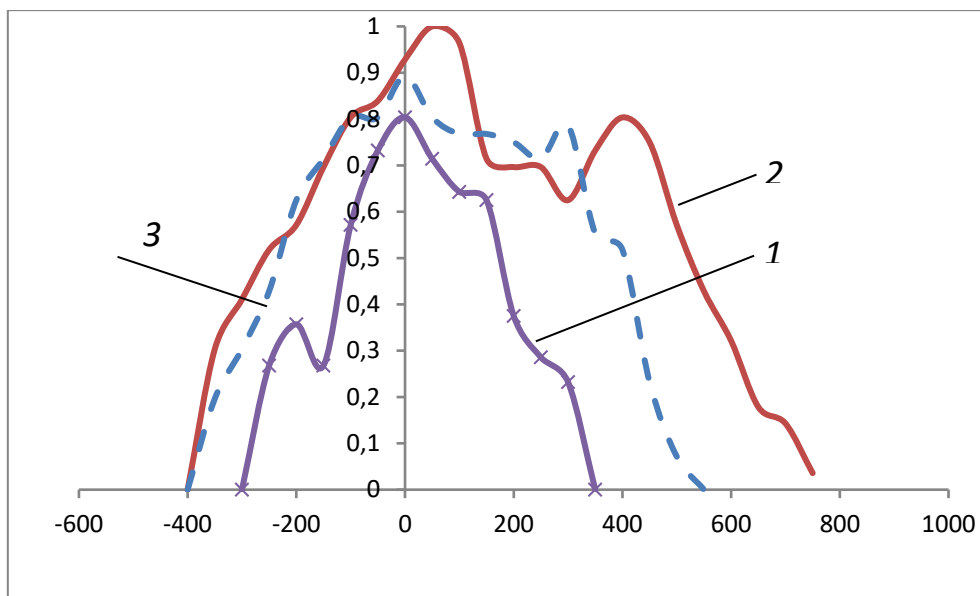
В настоящее время известны различные методы, позволяющие увеличить глубину резкости изображений. В частности, существуют способы, основанные на использовании фазовых масок [4], модификаций оптических установок [5] и особой цифровой обработки изображений на стадии их регистрации [6]. Однако не все из этих методов подходят для применения в фотолитографии. Наилучшие результаты в этом случае может дать метод увеличения глубины резкости восстановленного изображения, основанный на использовании голограммы-проектора, формирующей не одно, а сразу два или более изображений одного и того же объекта, расположенных на некотором небольшом расстоянии друг от друга [7]. Для синтеза такой голограммы следует использовать объектную волну, которая представляла бы собой суперпозицию двух или более объектных волн, формируемых одинаковыми транспарантами-фотошаблонами, расположенными параллельно плоскости голограммы на разных заданных расстояниях от нее. Расстояние между фотошаблонами при этом не должно превышать традиционной для оптики глубины резкости [8]. При этом остается открытым вопрос, должны ли быть одинаковыми все фотошаблоны, используемые при синтезе голограммы-проектора, или на дополнительных фотошаблонах необходимо отображать лишь мелкие элементы структуры объекта, характеризующиеся минимальной глубиной резкости. Поиску ответа на этот вопрос и посвящена настоящая работа. В ней приведены результаты исследования зависимости глубины резкости от использованной при синтезе голограмм-проекторов формы представления объекта, т. е. от структуры использовавшихся фотошаблонов.

### **Экспериментальное исследование метода увеличения глубины резкости**

Экспериментальная оценка зависимости глубины резкости восстановленного изображения от формы представления объекта включала в себя синтез голограмм-проекторов нескольких различных объектов (рисунок 1).

Объект, получивший название «уголки» общим размером  $10 \times 10$  пикселей состоял из двух отрезков шириной по 1 пикселю размером  $1 \times 7$  пикселей и двух отрезков шириной 2 пикселя размером  $2 \times 10$  пикселей.

Параметры синтеза были определены в соответствии с результатами работы [10], таким образом, при размерах пикселя объекта  $a_t$  равных  $20 \times 20$  нм размеры пикселя голограммы  $d_d$  составляли  $20 \times 20$  нм, 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



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

Рис. 2. График зависимости качества восстановленного изображения объекта «уголки» от дефокусировки при различной форме представления объекта при синтезе

опорного пучка  $\alpha = 14,67^\circ$ . Для проведения экспериментов использовался специализированный программный комплекс, разработанный в Университете ИТМО и предназначенный для осуществления синтеза и цифрового восстановления голограмм-проекторов. Оценка качества восстановленного изображения производилась с использованием описанного в работе [9] критерия, основанного на подсчёте количества градаций пороговой обработки изображения. Изображение при этом не должно отличаться по структуре от исходного или может отличаться на несколько пикселей, чтобы процент нарушений не превышал 20 %. Это связано с тем, что изображение в данном случае восстанавливалось с более высоким, чем в предыдущих экспериментах, разрешением — размер одного пикселя восстановленного изображения составлял те же 20 нм.

Для непосредственной оценки глубины резкости изображений, восстановленных с помощью голограмм, синтезированных при некоторой форме 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 качества изображений, нормированные по максимальному числу градаций, приведены на рисунке 2. Первый объект использовался без дополнительных фотошаблонов. Для представления второго объекта использовались два транспаранта, расположенных друг от друга на расстоянии 199 нм, выбранном экспериментально как оптимальное, не превосходящее расчетной глубины резкости [10]. Третья форма представления заключалась в использовании второго шаблона, содержащего изображения только тонкой линии, располагаемого на расстоянии 199 нм, так как зависящая от апертуры дифрагировавшего на объекте излучения глубина резкости широкой линии превосходит глубину резкости тонкой линии.

На графике хорошо заметно, что использование второго фотошаблона, содержащего только часть «уголка» позволяет увеличить как глубину резкости 1,5–2 раза по сравнению с применением объекта без дополнительных фотошаблонов, так и качество изображения. Однако использование второго фотошаблона в полном объеме является более эффективным.

### Заключение

В результате выполнения настоящей работы была выявлена зависимость глубины резкости изображения объекта, восстановленного с помощью голограммы, синтезированной при использовании двух объектных транспарантов, от формы их представления при синтезе голограммы-проектора. В частности, было установлено, что полное представление объекта на транспарантах является более эффективным, чем представление только одной его части, содержащей лишь малоразмерные элементы структуры объекта.

### Список источников

- [1] **Levenson, M. D.** Projection photolithography by wave-front conjugation / M. D. Levenson, K. M. Johnson, V. C. Hanchett, K. Chiang // *J. Opt Soc. Am.* — 1981. — Vol. 71. — P. 737–743.
- [2] **Maiden, A.** Nonplanar photolithography with computer-generated holograms / A. Maiden, R. McWilliam, A. Purvis, S. Johnson, G. L. Williams, N. L. Seed and P. A. Ivey // *Optics Letters.* — 2005. — Vol. 30. — № 11. — P. 1300–1302.
- [3] **Bay, C.** Maskless photolithography via holographic optical projection / C. Bay, N. Hübner, J. Freeman and T. Wilkinson // *Optics Letters.* — 2010. — Vol. 35. — № 13. — P. 2230–2232.
- [4] **Shain, W. J.** Extended depth-of-field microscopy with a highspeed deformable mirror / W. J. Shain, N. A. Vickers, B. B. Goldberg, T. Bifano, J. Mertz // *Optics Letters.* — 2017. — Vol. 42. — № 5. — P. 995–998.
- [5] **Basov, I. V.** Methods of increasing the depth of field of optical-digital image recorders [In Russian] / I. V. Basov, A. A. Krasnobaev // *Preprints of Keldysh Institute of Applied Mathematics.* — 2010. — P. 37.
- [6] **Корешев, С. Н.** Распределение комплексной амплитуды и интенсивности в трёхмерной фигуре рассеяния, формируемой оптической системой при осевом расположении точечного объекта / С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов, О. В. Никаноров, М. А. Фролова // *Компьютерная оптика.* — 2018. — Том 42. — № 3. — С. 377–384
- [7] **Корешев, С. Н.** Методы увеличения разрешающей способности и глубины резкости синтезированных голограмм-проекторов / С. Н. Корешев, О. В. Никаноров, М. А. Фролова, Я. А. Новицкая, Р. И. Хисамов // *Оптический журнал.* — 2016. — Том 83. — № 12. — С. 62–68
- [8] **Корешев, С. Н.** Влияние периода дискретизации объекта на глубину резкости изображений, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов Френеля / С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов, М. А. Фролова // *Оптический журнал.* — 2017. — Том 84. — № 11. — С. 69–72
- [9] **Корешев, С. Н.** Изображающие свойства дискретных голограмм. I. Влияние дискретности голограммы на восстановленное изображение / С. Н. Корешев, О. В. Никаноров, Д. С. Смородинов // *Оптический журнал.* — 2014. — Том 81. — № 3. — С. 14–19.
- [10] **Корешев, С. Н.** Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм / С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов, М. А. Фролова, С. О. Старовойтов // *Оптический журнал.* — 2018. — Том 85. — № 11. — С. 50–57.