

19. Влияние метода освещения объекта на качество изображений, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов

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

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Приведены результаты исследования влияния метода освещения объекта при синтезе голограмм-проекторов Френеля на качество восстановленного изображения. Работа выполнена методом математического моделирования синтеза голограмм-проекторов двумерных амплитудных бинарных транспарантов, предназначенных для применения в голографической фотолиитографии. Установлено, что освещение объекта гомоцентрическим пучком лучей, сходящимся в центр апертуры синтезируемой голограммы, обеспечивает формирование изображения более высокого качества, чем в случае использования телецентрического хода лучей, вне зависимости от периода дискретизации объекта.

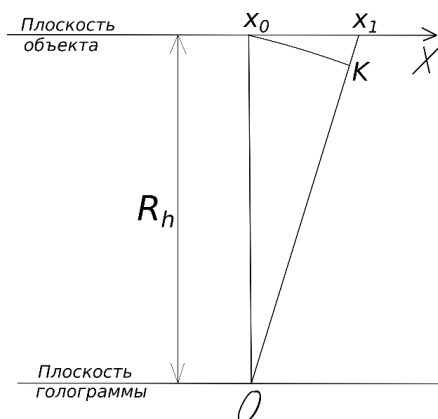
Ключевые слова: синтезированные голограммы, телецентрический ход лучей, сходящийся пучок, голограммы, фотолиитография, изображающие свойства.

Цитирование: Старовойтов, С. О. Влияние метода освещения объекта на качество изображений, восстанавливаемых с помощью синтезированных голограмм-проекторов / С. О. Старовойтов, С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов, М. А. Фролова // HOLOEXPO 2020 : XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 123–130.

Введение

Существующая в технике тенденция к уменьшению размеров электронных приборов приводит к необходимости постоянно увеличивать разрешающую способность оптических систем, используемых для освещения объекта (транспаранта). В проекционной фотолиитографии нередко приходится для каждого изделия подбирать особую структуру освещающего фотошаблон пучка, которая бы обеспечила достижение оптимальных параметров фотолиитографического процесса [1, 2]. Телецентрический ход лучей в проекционной схеме позволяет добиться лучших результатов в ходе составляющей фотолиитографический процесс операции химического либо ионного травления и потому чаще всего используется в фотолиитографии, однако с точки зрения обеспечения равномерного распределения контраста по всему полю сформированного изображения он, как правило, оказывается не оптимальным.

В голографической фотолиитографии, в которой вместо многокомпонентных проекционных систем используются синтезированные голограммы-проекторы, также в основном используется телецентрический ход лучей [3, 4]. Применяемые в ней объекты обычно являются бинарными двумерными транспарантами с дискретной структурой, поэтому их голограммы относительно несложно синтезировать при использовании современной компьютерной тех-



X_0 — центральная точка объекта, X_1K — разность хода между центральным лучом и боковым,

R_h — расстояние между голограммой и объектом

Рис. 1. Расчёт сдвига фаз при сходящемся пучке

ники. Как правило, процесс синтеза голограмм заключается в расчёте комплексной амплитуды голографического поля в плоскости его регистрации с помощью математического моделирования процессов, происходящих при физической регистрации голограммы [5, 6]. Значительным преимуществом синтезированной голографии является то, что в процессе синтеза возможно улучшить изображающие свойства голограмм за счет модификации формы представления объекта или же самой голограммы [7–9].

1. Методика проведения исследования

Настоящая работа включала в себя синтез голограмм-проекторов Френеля двух типов и их численное восстановление в виртуальном пространстве. В первом случае за счет постоянной равной нулю фазы во всех точках объекта-транспаранта имитировалась его подсветка нормально падающим параллельным пучком лучей, т. е. ход объектного пучка являлся телецентрическим. Во втором случае в плоскости объекта задавалось такое распределение фаз, которое соответствует его освещению гомоцентрическим пучком, сходящимся в центре голограммы. За ноль принималась величина фазы в центральной точке объекта, расположенной непосредственно над центром синтезируемой голограммы, а фазовая задержка в прочих точках объекта рассчитывалась исходя из их координат и расстояния между плоскостями объекта и голограммы R_h .

Известно, что величина фазовой задержки между двумя лучами определяется величиной разности хода между ними Δl , а также рабочей длиной волны λ [10].

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta l. \quad (1)$$

В случае дискретного объекта с величиной пикселя (периодом дискретизации) a_t , величину фазовой задержки в точке объекта с координатами (x_1, y_1) относительно центральной точки объекта (x_0, y_0) можно описать следующим выражением.

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{[(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2] a_t^2 + R_h^2} - R_h \right). \quad (2)$$

Для получения восстановленного изображения высокого качества необходимо, чтобы на голограмме было зарегистрировано все излучение, диафрагмировавшее в пределах главного дифракционного максимума на всех точках объекта. Поэтому, для случая телецентрического хода размер голограммы должен составлять [11]

$$D_1 = d + 2R_h \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{\lambda}{a_t} \right) \approx d + 2R_h \frac{\lambda}{a_t}, \quad (3)$$

где d — размер объекта.

Поскольку при синтезе голограмм второго типа, т. е. в случае, когда объект освещается пучком, сходящимся в центр голограммы, ее размер мог быть уменьшен на размер объекта и рассчитывался исходя из следующего выражения.

$$D_2 = 2 \frac{\lambda}{a_t} R_h. \quad (4)$$

Восстановление в виртуальном пространстве изображение представляло собой полутоновой дискретный объект, каждая из точек которого могла принимать значения интенсивностей от чёрного цвета (0) до белого (255). Качество восстанавливаемого изображения оценивалось двумя методами. В первом из них критерием качества служило число допустимых градаций пороговой обработки восстановленного изображения, при котором оно было практически идентично исходному бинарному объекту. Чем больше таких уровней, тем изображение, соответственно, качественнее. Во втором из них производился расчет индекса структурного сходства (SSIM) между восстановленным изображением и исходным объектом-транспарантом. Данный метод широко используется для оценки качества цифровых изображений, в том числе голографических [12, 13].

Исследование проводилось для различных периодов дискретизации объекта и размеров его пикселей. В первом случае они выбирались исходя из теоремы отсчётов и составляли 80×80 нм, а во втором — исходя из критерия Рэля и составляли 20×20 нм [8, 14].

2. Влияние метода освещения объекта качество восстановленного изображения при выборе периода дискретизации на основе теоремы отсчётов

Настоящая работа выполнялась с помощью бинарного тестового объекта «Уголки» размером 23×23 пиксела, представленного на рисунке 2а. Ширина самого крупного уголка составляла 3 пикселя, ширина самых узких уголков, как и отрезков, составляющих крест, была равна 1 пикселю. Расстояния между элементами, составляющими объект, составляло от 1 до 3 пикселей. Центр объекта был расположен в точке с координатами (12, 12), если считать относительно левого верхнего угла.

Параметры синтеза для данного эксперимента были выбраны согласно требованиям, определенным в работе [8]. Так, размер пиксела объекта a_t составлял 80×80 нм, размер пиксела плоскости голограммы, в соответствии с теоремой отсчётов [11, 15], был в четыре раза

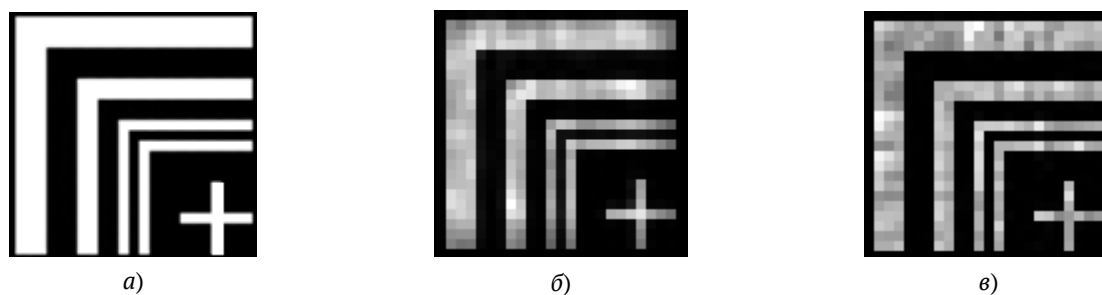


Рис. 2. Тестовый объект (а) и его изображения, восстановленные с помощью голограмм, синтезированных при использовании телецентрического (б) и сходящегося в центре голограммы (в) объектных пучков

меньше $d_d = 20 \times 20$ нм. Рабочая длина волны λ была выбрана близкой к коротковолновой границе ультрафиолетового излучения — 13,5 нм. Расстояние между плоскостями объекта и голограммы R_h было выбрано минимально возможным с учётом необходимости пространственного разделения восстанавливающего и восстановленного пучков и составляло 20345 нм, а угол падения плоской опорной волны α был выбран равным $14,67^\circ$. В соответствии с выражениями (3) и (4), размер синтезированной голограммы для случая телецентрического хода лучей объектного пучка был равен 442×442 пикселям, а для случая сходящегося пучка — 344×344 пикселям.

Изображение тестового объекта, восстановленное с помощью голограммы, синтезированной при использовании телецентрического объектного пучка, представлено на рисунке 2б. На рисунке 2в представлено изображение аналогичного объекта, восстановленное с помощью голограммы, синтезированной при использовании объектного пучка, сходящегося в центре голограммы.

Оценка качества восстановленных выражений первым из вышеописанных методов показала, что изображение, представленное на рисунке 2б сохраняет структуру, идентичную исходному объекту, на протяжении 68 уровней пороговой обработки, а при использовании сходящегося пучка — на протяжении 112 уровней. Индекс структурного сходства между восстановленным изображением и оригинальным объектом составлял 0,7528 для изображения на рисунке 2б, и 0,8127 — для изображения на рисунке 2в.

Подобное улучшение качества восстанавливаемого изображения связано с тем, что использование сходящегося пучка и возможность уменьшить за счет этого площадь голограммы ведет к повышению плотности записи информации об объекте и сокращению регистрируемого диапазона изменений интенсивности голографического поля.

Помимо этого, если при телецентрическом пучке потери локальных пространственных частот, связанные с дискретностью синтезированной голографии (часть информации попадает между пикселями), для всех точек объекта одинаковы, то при использовании сходящегося пучка потери для разных точек объекта оказываются индивидуальными и, в целом, оказывают меньшее влияние на качество восстановленного изображения. Справедливость этого



Рис. 3. Внешний вид голограмм объекта «Уголки», синтезированных в телецентрическом ходе лучей (а) и при использовании сходящегося пучка (б)

вывода подтверждают изображения синтезированных голограмм, приведенные на рисунках 3а и 3б.

С целью ответа на вопрос, насколько критичен достигнутый эффект повышения качества восстановленного изображения к расстоянию от объекта до точки схождения освещающего его пучка лучей, были синтезированы и восстановлены еще две голограммы. При синтезе первой из них плоскость фокусировки освещающего объект пучка находилась на расстоянии от объекта, равном $1,5 R_h$. При синтезе второй голограммы на объект накладывалась фазовая маска, имитирующая диффузную подсветку объекта. В обоих описанных случаях качество восстановленного изображения было хуже качества, достигнутого при использовании пучка лучей, сходящегося в центр голограммы.

3. Влияние метода освещения объекта качество восстановленного изображения при выборе периода дискретизации на основе теоремы отсчётов

В случае, если приёмник имеет разрешение, превышающее таковое у исходного объекта, при синтезе необходимо учитывать критерий разрешения Рэля. В соответствии с ним для восстановления непрерывного изображения, оба периода дискретизации должны быть равны между собой, то есть равны значению d_d [12]. Для избавления от вызываемых интерференцией нулевого и первого восстановленного порядков вертикальных полос на восстановленном изображении расстояние между объектом и голограммой R_h было увеличено в 2 раза, до 40690 нм. Соответственно, были увеличены и размер голограмм: в соответствии с выражениями (3) и (4) он составлял 790×790 пикселей для телецентрического хода лучей и 688×688 — для случая освещения объекта сходящимся пучком. Все прочие параметры синтеза не отличались от использованных в предыдущем эксперименте. На рисунке 4 представлены восстановленные изображения объекта.

Качество восстановленного изображения также было оценено с использованием двух методов. Отметим, что при таком высоком разрешении приёмника восстановленного изображения нарушения при пороговой обработке сохраняются практически всегда, поэтому каче-

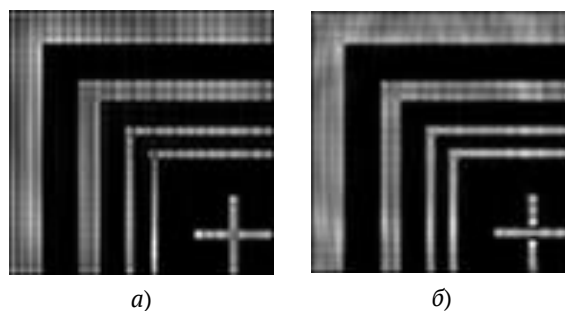


Рис. 4. Изображения тестового объекта, восстановленные с помощью голограмм, синтезированных с учётом критерия Рэлея при телецентрическом ходе лучей (а) и в сходящемся пучке (б)

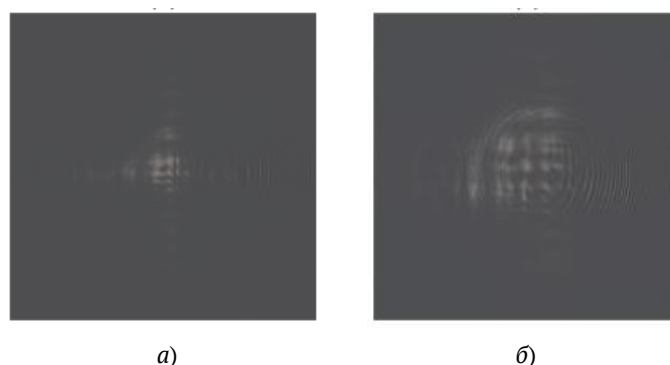


Рис. 5. Внешний вид голограмм объекта «Уголки», синтезированных с учетом критерия Рэлея в телецентрическом ходе лучей (а) и при использовании сходящегося пучка (б)

ство изображения при таком разрешении считается приемлемым во всех случаях, когда процент искаженных пикселей не превышает 20% [16]. Изображение, представленное на рисунке 4а соответствует этому условию лишь на одном уровне пороговой обработки, а представленное на рисунке 4б — на 12. Индекс структурного сходства между восстановленным изображением и оригинальным объектом составлял 0,3928 для изображения на рисунке 4а, и 0,4607 — для изображения на рисунке 4б.

Изображения голограмм, синтезированных при проведении настоящего исследования, представлено на рисунке 5а и 5б.

При анализе результатов настоящего исследования следует учитывать тот факт, что использование критерия Рэлея само по себе приводит к увеличению плотности записи информации и к минимизации потерь информации (что заметно по представленным на рисунке 5 голограммам), обусловленных дискретной структурой голограммы, поэтому использование сходящегося пучка лучей в этом случае даёт несколько меньший выигрыш в качестве восстановленного изображения.

Заключение

В рамках работы описан способ синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии с использованием объектного пучка, сходящегося в центре голограммы путем внесения соответ-

ствующего сдвига ход его лучей. Продемонстрировано заметное увеличение качества изображения, восстанавливаемого с помощью голограмм, синтезированных с использованием сходящегося пучка лучей по сравнению с голограммами, синтезированными в условиях телецентрического хода лучей объектного пучка вне зависимости от периода дискретизации объекта.

Список источников

- [1] **Иванова, Т. В.** Использование алгоритма «имитации отжига» для оптимизации параметров источника освещения фотолитографической установки / Т. В. Иванова, А. В. Жадин // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2017. — Том 17. — №2 (108). — С. 242–248.
- [2] **Иванова, Т. В.** Исследование способов дискретизации источника при моделировании фотолитографического изображения / Т. В. Иванова, Л. В. Зуева // Оптический журнал. — 2012. — Том 79. — №5. — С. 48–52.
- [3] **Гусев, А. И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. — М. : Наука-Физматлит, 2007. — 416 с.
- [4] **Bay, C.** Maskless photolithography via holographic optical projection / C. Bay, N. Hübner, J. Freeman, T. Wilkinson // Optics Letters. — 2010. — Vol 35. — № 13. — P. 2230–2232.
- [5] **Кольер, Р.** Оптическая голография / Р. Кольер, К. Беркхард, Л. Лин. — М. : Мир, 1973. — 686 с.
- [6] **Cviljušac, V.** Computer generated holograms of 3D points cloud / V. Cviljušac, A. Divjak, D. Modrić // Tehnički Vjesnik. — 2018. — Vol. 25. — №4. — 1020–1027.
- [7] **Pasko, S.** Improvement methods of reconstruction process in digital holography / S. Pasko, R. J. O. Wicki // Opto-electronic review. — 2003. — Vol. 11. — № 3. — 203–209.
- [8] **Корешев, С. Н.** Влияние дискретности синтезированных и цифровых голограмм на их изображающие свойства / С. Н. Корешев, О. В. Никаноров, Д. С. Смородинов // Компьютерная оптика. — 2016. — Том 40. — №6. — С. 793–801.
- [9] **Корешев, С. Н.** Изображающие свойства дискретных голограмм. II. Влияние модификации структуры голограммы и высокой, превышающей частоту Найквиста, несущей пространственной частоты голограммной структуры на восстановленное изображение / С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов, О. В. Никаноров // Оптический журнал. — 2014. — Том 81. — №4. — С. 48–53.
- [10] **Ландсберг, Г. С.** Оптика. — Изд. 6-е, стер. — М. : Физматлит, 2003. — 848 с.
- [11] **Корешев, С. Н.** Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии / С. Н. Корешев, О. В. Никаноров, И. А. Козулин // Оптический журнал. — 2008. — Том 75. — №9. — С. 29–34.
- [12] **Wang, Z.** Image quality assessment: From error visibility to structural similarity / Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. — 2004. — Vol. 13. — №4. — P. 600–612.
- [13] **Corda, R.** Recent Advances in the Processing and Rendering Algorithms for Computer-Generated Holography / R. Corda, D. Giusto, A. Liotta, W. Song, C. Perra // Electronics. — 2019. — Vol. 8. — №5. — P. 556–573.
- [14] **Корешев, С. Н.** Влияние метода представления объекта на изображающие свойства дискретных голограмм / С. Н. Корешев, О. В. Никаноров, Д. С. Смородинов, А. Д. Громов // Оптический журнал. — 2015. — Том 82. — №4. — С. 66–73.
- [15] **Биккенин, Р. Р.** Теория электрической связи / Р. Р. Биккенин, М. Н. Чесноков. — М. : Издательский центр «Академия» — 2010. — 329 с.

- [16] **Корешев, С. Н.** Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм / С. Н. Корешев, Д. С. Смородинов, М. А. Фролова // Оптический журнал. — 2018. — Vol. 85. — № 11. — С. 50–57.