

УДК 535.417, 535.317, 778.38

## Влияние структуры объектного пучка на качество изображения, восстанавливаемого с помощью синтезированной голограммы-проектора Френеля

© 2020 г. **С. Н. КОРЕШЕВ**, ДОКТОР ТЕХН. НАУК; **Д. С. СМОРОДИНОВ**, КАНД. ТЕХН. НАУК;  
**С. О. СТАРОВОЙТОВ**, АСПИРАНТ; **М. А. ФРОЛОВА**, АСПИРАНТ

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: smorodinov.denis@gmail.com

Поступила в редакцию 10.02.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-07-41-48

Применительно к процедуре синтеза голограмм-проекторов двумерных бинарных транспарантов рассмотрено влияние распределения фаз в плоскости объекта на качество восстановленного изображения. Установлено, что наилучшее качество изображения как с точки зрения числа допустимых уровней его пороговой обработки, так и с точки зрения глубины резкости восстановленного изображения достигается при использовании распределения фаз, соответствующего освещению объектного транспаранта гомоцентрическим пучком лучей, сходящимся в центр апертуры синтезируемой голограммы. Методом численного эксперимента показано, что эффект повышения качества восстановленного изображения при освещении объекта сходящимся пучком лучей наблюдается независимо от используемого при синтезе голограммы периода дискретизации объекта. Даны рекомендации по выбору параметров синтеза голограмм-проекторов.

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

**Код OCIS:** 090.0090

### ВВЕДЕНИЕ

При разработке микроскопов, установок для фотолитографии и другого проекционного оборудования большое внимание уделяется оптическим системам осветителей объекта (транспаранта), оказывающим в ряде случаев существенное влияние на разрешающую способность и контраст формируемого с их помощью изображения. В проекционной фотолитографии дело доходит до того, что практически для каждого изделия приходится подбирать структуру освещающего фотошаблон пучка, обеспечивающую достижение оптимальных параметров фотолитографического

процесса [1, 2]. Здесь необходимо отметить, что с точки зрения получения лучших результатов в ходе составляющей фотолитографический процесс операции химического либо ионного травления наилучшие результаты обеспечиваются при телецентрическом ходе лучей в проекционной системе. Но с точки зрения обеспечения равномерного распределения видности (контраста) по всему полю сформированного изображения телецентрический ход лучей, как правило, оказывается не оптимальным.

Использование преимущественно телецентрического хода лучей из традиционной

фотолитографии «перекочевало» и в голографическую фотолитографию, основанную на использовании голограмм-проекторов вместо сложных многокомпонентных оптических систем [3, 4]. Использование в фотолитографии голограмм-проекторов как аналоговых, так и синтезированных, позволяет упростить фотолитографический процесс. В фотолитографии объекты обычно являются бинарными двумерными транспарантами с дискретной структурой, поэтому их голограммы относительно несложно синтезировать при использовании современной компьютерной техники. Как правило, процесс синтеза голограмм заключается в расчете структуры голографического поля в плоскости его регистрации с помощью алгоритмического описания процессов, происходящих при физической регистрации голограммы [5, 6]. Кроме того, в процессе синтеза голограмм возможно внесение дополнительных модификаций в их структуру с целью улучшения изображающих свойств без усложнения реальных физических процессов [7].

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ И МЕТОДЫ ЕЕ ДОСТИЖЕНИЯ

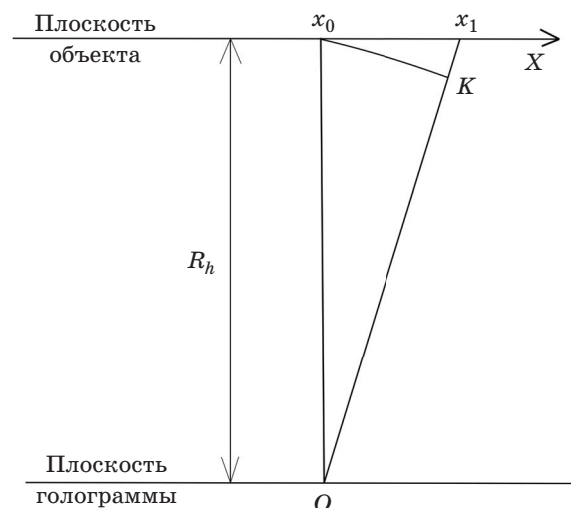
Настоящая работа содержит результаты исследования влияния структуры пучка, освещающего объектный транспарант при синтезе голограммы-проектора, на качество восстановленного с ее помощью изображения. Работа поставлена в интересах разработки метода проекционной голографической фотолитографии в экстремально коротковолновой области спектра [7, 8] с целью сравнения качества восстановленного изображения, формируемого с помощью голограмм-проекторов, синтезированных при двух различных структурах пучка, освещающего объектный транспарант. Работа выполнена методом численных экспериментов с помощью разработанного в Университете ИТМО комплекса синтеза и цифрового восстановления голограмм Френеля [8].

Методика работы заключается в синтезе голограмм-проекторов Френеля двух типов. Первый тип голограмм синтезирован в условиях, имитирующих подсветку объектного транспаранта нормально падающим на него параллельным пучком лучей, т.е. в условиях постоянной принимаемой за ноль фазы всех

точек объекта. Этот тип голограмм соответствует голограммам с телецентрическим ходом лучей объектного пучка. Второй тип голограмм синтезирован при задании в плоскости объекта распределения фаз, соответствующего освещению объектного транспаранта нормально падающим на него гомоцентрическим пучком, сходящимся в центр голограммы. И в том, и в другом случае голограммы синтезировались при условии нормального падения объектного пучка на плоскость синтеза голограммы-проектора.

Отметим, что упомянутый выше программный комплекс синтеза голограмм, реализующий принцип Гюйгенса–Френеля, позволяет при расчете структуры голограммы вносить дополнительные фазовые задержки в каждый из пикселей исходного объекта. В случае использования для освещения объекта сходящегося пучка за ноль принималось значение фазы в центральной точке объекта, расположенной непосредственно над центром синтезируемой голограммы, при этом фазовая задержка в каждой из прочих точек объекта рассчитывалась исходя из знания координат точек, а также расстояния между плоскостями голограммы и объекта (рис. 1).

Известно, что фазовая задержка между двумя лучами определяется разностью хода



**Рис. 1.** Расчет сдвига фаз при сходящемся пучке.  $x_0$  — центральная точка объекта, расположенная над центральной точкой голограммы  $O$ ,  $x_1K$  — разность хода между центральным лучом и боковым,  $R_h$  — расстояние между голограммой и объектом.

между ними  $\Delta l$ , а также рабочей длиной волны  $\lambda$  [9]

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

В случае дискретного объекта с размером пиксела (периодом дискретизации)  $a_t$  и расстояния между плоскостями голограммы и объекта, равного  $R_h$ , фазовую задержку в точке объекта с координатами  $(x_1, y_1)$  относительно центральной точки объекта  $(x_0, y_0)$  можно описать следующим выражением:

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

Для обеспечения регистрации на голограмме излучения, дифрагировавшего в пределах главного дифракционного максимума на всех точках объекта, при телецентрическом ходе объектного пучка, т.е. при постоянной фазе всех точек объекта, размер голограммы первого типа  $D_1$  выбирался исходя из следующего соотношения [10]:

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

где  $d$  — размер объекта.

Поскольку при синтезе голограмм второго типа объект освещался пучком, сходящимся в центр голограммы, ее размер мог быть уменьшен на размер объекта. Соответственно размер голограмм второго типа  $D_2$ , т.е. голограмм, синтезируемых при условии освещения объекта гомоцентрическим пучком, сходящимся в их центр, был выбран исходя из следующего выражения:

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

Несмотря на уменьшенный размер, такие голограммы также позволяют зарегистрировать излучение, продифрагировавшее на всех пикселах объектного транспаранта, т.е. сохраняют информацию обо всех элементах структуры объекта.

Восстановление синтезированных голограмм осуществлялось в виртуальном пространстве методом численного эксперимента.

Восстановленное при этом изображение представляло собой полутоновой дискретный объект. Каждая из его точек могла принимать один из 256 оттенков серого от черного (0) до белого (255). В качестве критерия качества подобного изображения традиционно было использовано число допустимых градаций пороговой обработки восстановленного изображения, при котором оно было практически идентично исходному бинарному объекту. Иначе говоря, чем больше таких уровней, тем изображение качественнее.

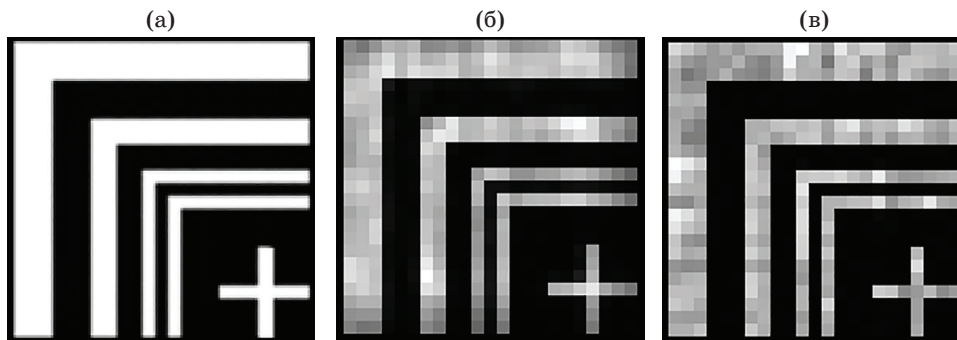
Исследование проводилось для периодов дискретизации объекта и размеров его пикселей, выбранных как исходя из теоремы отсчетов и составлявших  $80 \times 80$  нм, так и выбранных исходя из критерия Рэлея и составлявших в рассматриваемом случае  $20 \times 20$  нм [7, 11].

#### ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОСВЕЩАЮЩЕГО ОБЪЕКТА ПУЧКА НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ ПЕРИОДА ДИСКРЕТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕМЫ ОТСЧЕТОВ

Настоящая работа выполнялась с помощью бинарного тестового объекта «уголки» размером  $23 \times 23$  пиксела. Его вид представлен на рис. 2а.

Ширина самого крупного уголка составляла 3 пиксела, ширина самых узких уголков, как и отрезков, составляющих крест, соответствовала 1 пикселу. Расстояния между элементами, входящими в объект, составляли от 1 до 3 пикселей. Центр объекта был расположен в точке с координатами (12, 12), если считать относительно левого верхнего угла.

Параметры синтеза в ходе проведения исследования выбраны в соответствии с условиями, определенными в работе [7]. Размер пиксела объекта  $a_t$  составлял  $80 \times 80$  нм, размер пиксела плоскости голограммы в соответствии с теоремой отсчетов [10, 12] был в четыре раза меньше  $d_d$  —  $20 \times 20$  нм. Рабочая длина волны  $\lambda$  выбрана близкой к коротковолновой границе ультрафиолетового излучения — 13,5 нм. При таких условиях расстояние между плоскостями объекта и голограммы  $R_h$  выбрано минимально возможным с учетом необходимости пространственного разделения восстанавливаемого и восстановленного пучков и составляло 20345 нм, а угол падения



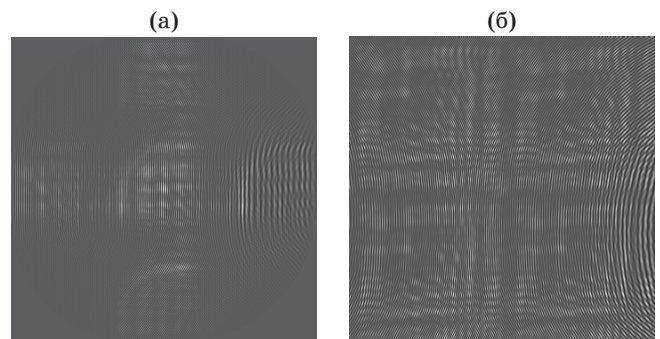
**Рис. 2.** Тестовый объект (а) и его изображения, восстановленные с помощью голограмм, синтезированных при использовании телецентрического объектного пучка (б) и объектного пучка, сходящегося в центре голограммы (в).

опорной волны  $\alpha$  был выбран равным  $14,67^\circ$ . Сама опорная волна считалась плоской. Размер синтезируемых голограмм рассчитывался в соответствии с выражениями (3) и (4) и для случая телецентрического хода лучей объектного пучка был равен  $442 \times 442$  пиксела, а для случая сходящегося пучка —  $344 \times 344$  пиксела.

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

Оценка качества восстановленных изображений показала, что изображение, представленное на рис. 2б, сохраняет структуру, идентичную исходному объекту, на протяжении 68 уровней пороговой обработки. В то же время при использовании сходящегося пучка, несмотря на уменьшенный размер голограммы, изображение сохраняет структуру на протяжении 112 уровней. То есть наблюдается почти двукратный выигрыш в числе допустимых уровней пороговой обработки.

Подобный результат связан с тем, что использование сходящегося пучка и сокращение площади голограммы позволяют повысить плотность записи информации об объекте и сократить регистрируемый диапазон изменений интенсивности голографического поля. Помимо этого, если при телецентрическом пучке потери локальных пространственных частот, связанные с дискретной структурой (часть информации попадает между пиксе-



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

лами), для всех точек объекта одинаковы, то при использовании сходящегося пучка потери в разных точках объекта оказываются индивидуальными и в целом оказывают меньшее влияние на качество восстановленного изображения. Справедливость этого вывода подтверждают изображения синтезированных голограмм, приведенные на рис. 3.

С целью ответа на вопрос, насколько критичен достигнутый эффект повышения качества восстановленного изображения в отношении расстояния от объекта до точки схождения освещающего его пучка, были синтезированы и восстановлены еще две голограммы: голограмма-проектор, характеризующаяся расстоянием от объекта до плоскости фокусировки освещающего его пучка лучей, превышающим в 1,5 раза расстояние от объекта до голограммы  $R_h$ , и голограмма, при синтезе которой на объект накладывалась фазовая маска, имитирующая диффузную подсветку объекта.



В обоих описанных случаях качество восстановленного изображения хуже качества, достигнутого при использовании пучка лучей, сходящегося в центр голограммы.

### ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОСВЕЩАЮЩЕГО ОБЪЕКТА ПУЧКА НА КАЧЕСТВО ВОССТАНОВЛЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ ВЫБОРЕ ПЕРИОДА ДИСКРЕТИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЯ РЭЛЕЯ

Использование при синтезе голограмм соотношения между периодами дискретизации объекта  $a_t$  и голограммы  $d_d$ , равного 4:1, удобно в случаях, когда восстановленное изображение регистрируется на приемнике с относительно низким разрешением, не превышающим разрешение исходного объекта. В случае если приемник имеет повышенное разрешение, при синтезе необходимо учитывать критерий разрешения Рэля. В соответствии с ним для восстановления непрерывного изображения оба периода дискретизации должны быть равны между собой, т.е. равны значению  $d_d$  [11].

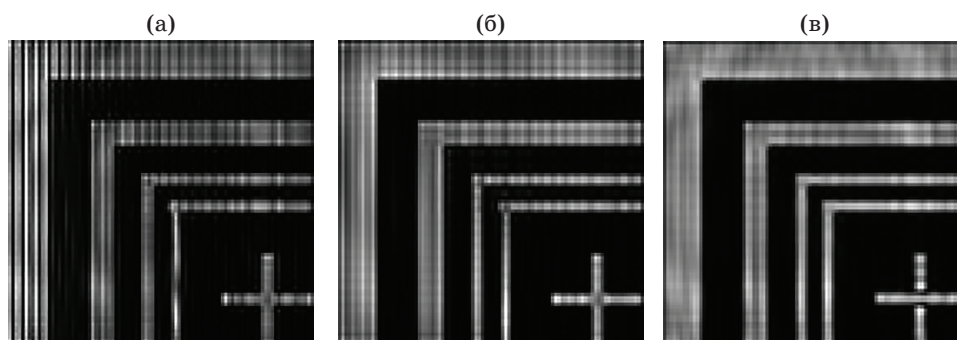
На рис. 4а представлено изображение тестового объекта, зарегистрированное с помощью приемника, разрешение которого также равно  $d_d$ . Изображение восстановлено с помощью голограммы, синтезированной с учетом критерия Рэля при телецентрическом ходе лучей, все прочие параметры синтеза соответствовали использовавшимся в предыдущих экспериментах. На рисунке заметны вертикальные полосы, возникающие вследствие интерференции нулевого и первого восстановленных порядков. Отметим, что их появление

обусловлено увеличением ширины спектра гало из-за уменьшения периода дискретизации объекта. Для того чтобы избавиться от влияния интерференции порядков восстановленного изображения, расстояние между плоскостями объекта и голограммы было увеличено по сравнению с указанным в предыдущем разделе статьи. Оно увеличено в 2 раза — до 40690 нм. При таком расстоянии был увеличен и размер голограммы. В соответствии с выражениями (3) и (4) он составлял  $790 \times 790$  пикселей для голограмм, синтезированных при телецентрическом ходе лучей, и  $688 \times 688$  — для голограмм, синтезированных при объектом пучке, сходящемся в центре голограммы.

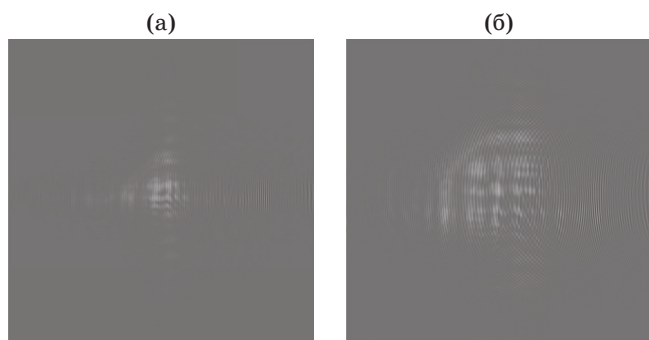
Изображение на рис. 4б отличается от представленного на рис. 4а тем, что при синтезе и восстановлении голограммы использовалось увеличенное расстояние между голограммой и объектом 40690 нм.

Приведенное на рис. 4в изображение получено с помощью голограммы, синтезированной с учетом критерия Рэля при увеличенном расстоянии  $R_h$ , а также при использовании сходящегося в центре голограммы пучка лучей. Использование сходящегося пучка для освещения объекта и в этом случае позволило увеличить качество восстановленного изображения по сравнению с качеством изображения, полученном при телецентрическом ходе лучей. Если в первом случае изображение полностью соответствует структуре исходного объекта лишь на одном уровне пороговой обработки, то во втором — на 12.

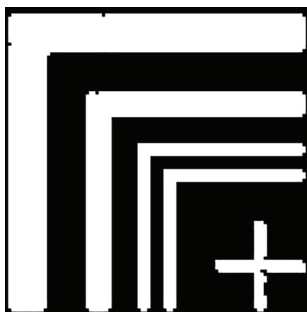
Изображения голограмм, синтезированных при проведении настоящего исследования, представлено на рис. 5.



**Рис. 4.** Изображения тестового объекта, восстановленные с помощью голограмм, синтезированных с учетом критерия Рэля при телецентрическом ходе лучей (а, б) и в сходящемся пучке (в) при  $R_h = 20345$  нм (а) и 40690 нм (б, в).



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



**Рис. 6.** Изображение тестового объекта, восстановленное с помощью голограммы, синтезированной с учетом критерия Рэлея при использовании сходящегося пучка после пороговой обработки.

Отметим, что при таком высоком разрешении приемника восстановленного изображения, не превышающем 20 нм, нарушения при пороговой обработке сохраняются практически всегда (рис. 6), поэтому качество изображения при таком разрешении считается приемлемым во всех случаях, когда процент искаженных пикселей не превышает 20% [13]. Но даже при такой оценке использование при синтезе сходящегося пучка лучей позволяет увеличить качество восстанавливаемого изображения.

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, обусловленных дискретной структурой голограммы, поэтому использование сходящегося пучка лучей в этом случае дает несколько меньший выигрыш в качестве восстановленного изображения.

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ОСВЕЩАЮЩЕГО ОБЪЕКТА ПУЧКА НА ГЛУБИНУ РЕЗКОСТИ ВОССТАНАВЛИВАЕМОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Увеличение качества изображения в целом означает не только повышение его контраста, но и увеличение практически достигаемой глубины резкости за счет снижения уровня помех при неизменном значении интенсивности восстановленного изображения. Получение изображений с большой глубиной резкости особенно важно в фотолитографии, где малый размер элементов структуры изображений приводит к необходимости обеспечения очень высокой точности позиционирования приемника изображения.

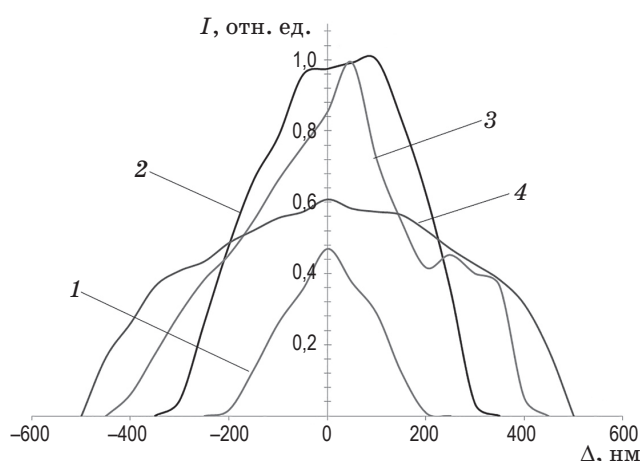
В работе [13] предложен метод увеличения глубины резкости изображений, восстанавливаемых с помощью голограмм-проекторов, путем модификации формы представления объекта. Модификация состоит в том, что вместо одного плоского объекта-транспаранта в процессе синтеза голограммы используются два транспаранта, расстояние между которыми близко к предельному значению глубины резкости, равному [14]

$$|b| = \pm \frac{\lambda n}{2A^2}, \quad (5)$$

где  $n$  — показатель преломления среды, равный в случае воздуха 1,  $A = \lambda/a_t$  — числовая апертура излучения, дифрагировавшего на одном пикселе объекта. Таким образом, регистрируемая на голограмме объектная волна представляется в виде суперпозиции двух объектных волн, формируемых с помощью двух фотошаблонов.

Эффект увеличения глубины резкости восстановленного изображения, наблюдаемый при использовании в процессе синтеза голограммы сходящегося пучка, проиллюстрируем с помощью результатов нескольких численных экспериментов.

В первом из них была синтезирована традиционная голограмма тестового объекта «уголки» в телецентрическом ходе лучей при параметрах, использовавшихся в первом из экспериментов, описанных во второй части настоящей работы. При проведении второго эксперимента в процессе синтеза голограммы объектная волна представлялась в виде суперпозиции волн, сформированных двумя



**Рис. 7.** График зависимости качества восстановленного изображения объекта «Уголки» от дефокусировки при различной форме представления объекта при синтезе. 1 — один фотошаблон, телецентрический ход лучей, 2 — один фотошаблон, сходящийся пучок, 3 — два фотошаблона, телецентрический ход лучей, 4 — два фотошаблона, сходящийся пучок.

аналогичными по структуре фотошаблона, расположенными на расстоянии 199 нм друг от друга. Отметим, что это расстояние не превышало глубины резкости изображения, традиционно реализуемого в оптических системах при указанных параметрах синтеза голограмм [13].

Третий и четвертый эксперименты отличались от первых двух тем, что при синтезе использовался пучок, сходящийся в центр голограммы. Измерения достигнутой глубины резкости основывались на исследовании

качества изображений, восстанавливаемых на расстояниях, отличающихся от расчетного расстояния  $R_h$  на значения от  $-600$  до  $600$  нм с шагом  $50$  нм.

Результаты экспериментов представлены на рис. 7. На приведенных графиках по оси абсцисс отложены значения дефокусировки, а по оси ординат — число допустимых уровней пороговой обработки, нормированное на максимальное для каждой из голограмм число допустимых уровней пороговой обработки, при котором структура восстановленного изображения оказывалась идентичной структуре исходного объекта. На рисунке хорошо заметно, что использование второго фотошаблона совместно со сходящимся пучком позволяет получить наибольшее значение глубины резкости восстановленного изображения.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В рамках работы описан способ синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии с использованием объектного пучка, сходящегося в центре голограммы. Для регистрации подобных голограмм предложено применять модификацию стандартной схемы записи с внесением в ход лучей фазового сдвига. Продемонстрировано заметное повышение качества изображения, восстанавливаемого с помощью голограмм, синтезированных с использованием сходящегося пучка лучей по сравнению с голограммами, синтезированными в условиях телецентрического хода лучей объектного пучка.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванова Т.В., Жадин А.В. Использование алгоритма «имитации отжига» для оптимизации параметров источника освещения фотолитографической установки // Научно-техн. вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2. С. 242–248.
2. Иванова Т.В., Зуева Л.В. Исследование способов дискретизации источника при моделировании фотолитографического изображения // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 5. С. 48–52.
3. Гусев А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии. М.: Наука-Физматлит, 2007. 416 с.
4. Bay C., Hübner N., Freeman J., Wilkinson T. Maskless photolithography via holographic optical projection // Opt. Lett. 2010. V. 35. № 13. P. 2230–2232.
5. Martinez-Leon L., Clemente P., Mori Y., Climent V., Lancis J., Tajahuerce E. Single-pixel digital holography with phase-encoded illumination // Opt. Exp. 2017. V. 25. № 5. P. 4975–4984.
6. Кольер Р., Беркхард К., Лин Л. Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
7. 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.

8. *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.
9. *Ландсберг Г.С.* Оптика. М.: Физматлит, 2003. 848 с.
10. *Корешев С.Н., Никаноров О.В., Козулин И.А.* Выбор параметров синтеза голограмм-проекторов для фотолитографии // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 9. С. 29–34.
11. *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.
12. *Биккенин Р.Р., Чесноков М.Н.* Теория электрической связи. М.: Изд. центр «Академия», 2010. 329 с.
13. *Корешев С.Н., Смородинов Д.С., Фролова М.А., Старовойтов С.О.* Метод увеличения глубины резкости изображений плоских транспарантов, восстановленных с помощью синтезированных голограмм // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 11. С. 50–57.
14. *Цуканова Г.И., Карпова Г.В., Багдасарова О.В., Карпов В.Г., Кривоустова Е.В., Ежова К.В.* Прикладная оптика. Ч. 2 / под ред. Шехонина А.А. Уч.-мет. пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2003. 32 с.