

УДК 535.417; 535.317; 778.38

ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ СИНТЕЗА ГОЛОГРАММ-ПРОЕКТОРОВ ДЛЯ ФОТОЛИТОГРАФИИ

© 2008 г. С. Н. Корешев, доктор техн. наук; О. В. Никаноров; И. А. Козулин

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий,
механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: koreshev@list.ru

Рассмотрены особенности синтеза голограмм-проекторов, предназначенных для использования в голографическом варианте фотолитографического процесса. Основное внимание уделено влиянию дискретизации объекта и голограммы на структуру восстанавливаемого изображения. Сформулированы и обоснованы требования, предъявляемые к параметрам расчета и отображения синтезированных голограмм. Установлено, что дискретизация синтезированных голограмм приводит не только к появлению дополнительных восстанавливаемых изображений, но и к ограничению минимального размера элементов восстанавливаемых изображений величиной $1,5\lambda$.

Коды OCIS: 090.1760.

Поступила в редакцию 26.03.2008.

Введение

Развитие современной электроники сопровождается перманентной необходимостью минимизации размеров элементов структуры изготавливаемых устройств, в том числе интегральных микросхем, жидкокристаллических и плазменных панелей и т. д. До настоящего времени в традиционной фотолитографии эта задача решалась, в основном, за счет уменьшения рабочей длины волны фотолитографических устройств. При этом с минимизацией длины волны используемого излучения и, следовательно, с уменьшением минимального размера элементов отображаемых структур наблюдается устойчивая тенденция уменьшения безабберационного участка поля проекционных объективов. В связи с этим возникает необходимость замены традиционных систем проекционной фотолитографии альтернативными широкопольными системами проекционной фотолитографии. При этом весьма перспективными представляются системы голографической фотолитографии, характеризующиеся возможностью формирования полностью свободных от аберраций, в том числе и полевых, действительных изображений элементов структуры изготавливаемых устройств.

В современной литературе имеются сведения о разработках голографических фотолитографических систем на основе практически всех известных видов голограмм, в частности, голограмм Френеля [1, 2], голограмм сфокусированного изображения [3, 4] и синтезированных голограмм [5, 6]. Наибо-

лее заманчивым из них представляется вариант, основанный на использовании синтезированных голограмм, рассчитываемых с помощью компьютера и отображаемых на носителе с помощью лазерных либо электронно-лучевых генераторов изображения.

Особенно выигрышным применение синтезированных голограмм может оказаться в экстремально коротковолновом ультрафиолете и рентгеновском диапазоне спектра. Дело в том, что практически все используемые на сегодняшний день методы фотолитографии рентгеновского диапазона спектра основываются либо на технике контактной печати, либо на использовании чисто зеркальных проекционных объективов. Та и другая технологии имеют существенные недостатки, ограничивающие сферу их возможного применения. Альтернативой указанных методов может служить метод голографической проекционной рентгеновской фотолитографии, в котором вместо фотшаблона используется его синтезированная голограмма. При практической реализации этого метода основные трудности вызывают процессы синтеза и отображения на носителе голограммной структуры. Сложность синтеза голограмм-проекторов обуславливается в первую очередь необходимостью предельно точного математического описания процесса формирования голографического поля, не допускающего непосредственное применение преобразований Френеля и Фурье, а также необходимостью минимизации влияния, присущего цифровым голограммам дискретно-

го представления объектного транспаранта, и синтезированной голограммы на качество восстанавливаемых с их помощью изображений. Сложность отображения синтезированных голограмм-проекторов обуславливается в первую очередь более высокими требованиями, предъявляемыми к используемым для этой цели генераторам изображений, по сравнению с требованиями, предъявляемыми к ним при изготовлении соответствующих фотошаблонов.

Настоящая работа имела своей целью проведение сравнительного анализа требований, предъявляемых к разрешающей способности генераторов изображений, предназначенных для изготовления фотошаблона и отображения голограммной структуры, а также оптимизацию параметров дискретизации объектного транспаранта и голограммы, обеспечивающих минимизацию потерь качества восстанавливаемых изображений.

Сравнительный анализ разрешающей способности генератора изображений, необходимой для изготовления фотошаблона, и формирующей его изображение голограммы – проектора

Для проведения этого анализа определялась зависимость требуемого характеристического размера голограммной структуры, т. е. требуемого минимального размера ее элементов, от минимального размера элементов структуры фотошаблона. Рассмотрим наиболее удобный для практической реализации случай внеосевой голограммы с наклонным параллельным опорным пучком и бинарным амплитудным объектным транспарантом, освещаемым параллельным нормально падающим пучком лучей и располагаемом параллельно голограмме так, что геометрический центр транспаранта совпадает с нормалью, восстановленной из центра голограммы. При этих условиях числовая апертура пучка, дифрагировавшего на минимальном по размеру элементе структуры фотошаблона, может быть описана с помощью следующего выражения:

$$A = n \sin \alpha = \frac{\lambda}{a_t}, \quad (1)$$

где A – числовая апертура пучка, n – показатель преломления среды между фотошаблоном и голограммой (в нашем случае $n = 1$), α – апертурный угол дифрагировавшего излучения, λ – рабочая длина волны, a_t – характеристический размер фотошаблона, т. е. минимальный размер элемента структуры фотошаблона. Для голографической регистрации рассматриваемого пучка лучей одновременно с ним на плоскость регистрации голограммы должен быть

направлен параллельный опорный пучок лучей. При этом необходимость пространственного разделения опорного и объектного пучков обуславливает соответствующий выбор минимально допустимого угла падения опорного параллельного пучка лучей на плоскость регистрации голограммы. Из геометрических представлений следует, что для случая точечного объекта угол падения опорного пучка на плоскость регистрации голограммы θ должен выбираться из условия $\theta \geq \alpha$. При этом минимальная величина пространственного периода регистрируемой голограммной структуры T_{\min} может быть определена с помощью следующего выражения:

$$T_{\min} \leq \frac{\lambda}{2 \sin \alpha}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) с учетом теоремы Котельникова (теоремы отсчетов) можно получить выражение, описывающее зависимость требуемого периода дискретизации голограммы d_d от характеристического размера фотошаблона a_t :

$$d_d \leq \frac{1}{2} T_{\min} \leq \frac{a_t}{4}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что период дискретизации голограммы, а значит и диаметр рабочего фокального пятна генератора изображения, используемого для отображения на носителе синтезированной голограммы-проектора, предназначенной для формирования действительного изображения двумерного объекта, должен быть, как минимум, в 4 раза меньше характеристического размера объекта, т. е. в нашем случае – характеристического размера фотошаблона. Отметим, что выражение (3) не включает в себя параметр λ и, следовательно, справедливо для любых рабочих длин волн. Современные электронно-лучевые генераторы изображений характеризуются весьма малыми диаметрами формируемого с их помощью фокального пятна. Так, генератор изображения JEOL JBX-9300FS позволяет формировать рабочее фокальное пятно диаметром 4 нм, а генератор Leica VB-6HR – 10 нм. Отсюда с учетом (3) можно сделать вывод о том, что современные электронно-лучевые генераторы изображений могут быть использованы для отображения на носителях голограмм-проекторов, предназначенных для формирования изображений фотошаблонов с характеристическим размером (шагом проектирования) не менее 16–40 нм. Указанные характеристические размеры являются современным технологическим порогом применимости синтезированных голограмм-проекторов в фотолитографическом процессе. Отметим, что синтезированные голограммы-проекторы, отображаемые на носителе с помощью современных

широко распространенных лазерных генераторов изображений, работающих на длине волны 0,351 мкм и формирующих рабочее фокальное пятно 0,6–0,8 мкм, могут применяться лишь для формирования изображений с характеристическим размером более 3 мкм.

Оптимизация параметров дискретизации фотошаблона и голограммы, обеспечивающих минимизацию потерь качества восстанавливаемых изображений

Задача оптимизации параметров дискретизации синтезированных голограмм-проекторов решалась для случая синтеза одномерных амплитудных голограмм, характеризующихся направлением распространения опорной волны и расположением восстановленного изображения, подобными тем, что были рассмотрены в предыдущем разделе статьи. При этом авторы исходили из того, что если бы изготовление голограммы осуществлялось в непрерывном виде методом физической голографии, то функция ее амплитудного пропускания могла быть описана с помощью следующего выражения [7]:

$$t(x) = t_0 - kI(x), \quad (4)$$

где $I(x)$ – функция распределения интенсивности голографического поля в плоскости регистрации, t_0 – начальный уровень пропускания, k – коэффициент пропорциональности.

В рассматриваемом нами случае наклонно падающей плоской опорной волны распределение интенсивности голографического поля имеет вид

$$I(x) = A(x)A^*(x) + r^2 + A(x)r\exp(-2\pi i\xi_r x) + A^*(x)r\exp(2\pi i\xi_r x), \quad (5)$$

где $A(x)$ – комплексная амплитуда объектной волны, $A^*(x)$ – амплитуда волны, комплексно-сопряжен-

ной объектной волне, r – амплитуда плоской опорной волны, $\xi_r = \frac{\sin\theta}{\lambda}$ – пространственная частота опорной волны, θ – угол падения опорной волны относительно нормали к плоскости голограммы, λ – рабочая длина волны.

При восстановлении записанной таким образом голограммы опорной волной, использовавшейся при записи голограммы, распределение комплексной амплитуды восстановленного излучения в плоскости голограммы сразу за голограммой может быть описано следующим выражением:

$$W(x) = R(x)t(x) = t_0 r \exp(2\pi i\xi_r x) - kI(x)r \exp(2\pi i\xi_r x), \quad (6)$$

где $R(x) = r \exp(2\pi i\xi_r x)$ – комплексная амплитуда плоской восстанавливающей волны, равная комплексной амплитуде опорной волны.

В случае же дискретной синтезированной голограммы отображаемое на носителе с помощью генератора изображения распределение интенсивности голографического поля $I_d(x)$ будет отличаться от распределения, описываемого выражением (5), и будет иметь следующий вид [8]:

$$I_d(x) = \left(I(x) \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd) \right) \otimes \text{rect}(x/a), \quad (7)$$

где d – период дискретизации голограммы, a – диаметр пятна генератора изображений, отображающего голограмму, N – число элементов дискретизации голограммы. Подставив (7) в (4) и полученный результат в выражение (6), получается уравнение, описывающее распределение амплитуды излучения, восстановленного с помощью дискретной синтезированной голограммы в плоскости самой голограммы

$$\begin{aligned} W_d(x) &= t_0 r \exp(2\pi i\xi_r x) - k r \exp(2\pi i\xi_r x) \left[\left(I(x) \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd) \right) \otimes \text{rect}(x/a) \right] = \\ &= t_0 r \exp(2\pi i\xi_r x) - k r \exp(2\pi i\xi_r x) \left[\left([A(x)A^*(x) + r^2 + \right. \right. \\ &\left. \left. + A(x)r\exp(-2\pi i\xi_r x) + A^*(x)r\exp(2\pi i\xi_r x)] \sum_{n=-N}^N \delta(x - nd) \right) \otimes \text{rect}(x/a) \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Анализ структуры восстановленного поля проводился в частотном пространстве. Для этого ис-

пользовалось выражение, описывающее спектр восстановленного поля $U_d(\xi)$

$$U_d(\xi) = t_0 F[r \exp(2\pi i \xi_r x)] - k F[r \exp(2\pi i \xi_r x)] \otimes \left[\left(\left\{ F[A(x)A^*(x)] + F(r^2) + F[A(x)r \exp(-2\pi i \xi_r x)] + F[A^*(x)r \exp(2\pi i \xi_r x)] \right\} \otimes \sum_{n=-N}^N \delta(\xi - \xi_n) \right) a \sin(\pi \xi a) / \pi \xi a \right]. \quad (9)$$

Далее делалось допущение, что число дискретных элементов N на голограмме настолько велико, что сумму $\sum_{n=-N}^N \delta(\xi - \xi_n)$ можно считать равной сумме $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - nd)$. Фурье-образ этой бесконечной суммы дельта-функций, как известно, равен $\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\xi - \xi_n)$ [9].

Рассмотрим выражение (9), состоящее из двух слагаемых. Входящее в его состав первое слагаемое, обусловленное средним пропусканием голограммы, полностью аналогично первому слагаемому соответствующего выражения, описывающего спектр непрерывной голограммы. Имеющая место во втором слагаемом (9) свертка функции, описывающей спектры трех основных порядков дифракции непрерывной голограммы, с суммой дельта-функций описывает обусловленное дискретным характером синтезированной голограммы периодическое повторение спектра поля, восстанавливаемого с помощью непрерывной голограммы. При этом период мультипликации спектра $\xi_n = 1/d_d$, где d_d – период дискретизации голограммы. Содержащееся во втором слагаемом выражения (9) произведение мультиплицированного спектра с функцией $\sin(\pi \xi a) / \pi \xi a$ свидетельствует о наличии зависящей от размера фокального пятна генератора изображения модуляции спектра восстановленного поля. На рисунке, выполненном для случая объекта, характеризующегося полосой пространственных частот $\pm \Delta/2$, схематично представлен спектр амплитуды поля, восстанавливаемого с помощью дискретной голограммы. Отметим, что изображенные на нем пики шириной 2Δ соответствуют интермодуляционным помехам, в два раза более узкие пики соответствуют спектрам изображений, восстанавливаемых в ± 1 порядках дифракции голограммы, а стрелки – дельта-функциям, описывающим обусловленное дискретизацией голограммы периодическое повторение спектра восстанавливающей волны.

Из выражения (9) и рисунка можно сделать вывод о перспективе оптимизации параметров дискретизации и структуры голограммы, обеспечивающей, с одной стороны, возможность пространственного разделения компонентов восстановленного поля, а с другой стороны – максимально возможную ширину пространственного спектра объекта

при минимальном уровне помех. Так, при выполнении соотношения

$$a = d_d, \quad (10)$$

т. е. при выборе периода дискретизации голограммы, равном диаметру фокального пятна генератора изображения, обеспечивается подавление обусловленной дискретизацией голограммы мультипликации спектра восстанавливающей волны путем совмещения узлов огибающей с положениями мультиплицированных спектров восстанавливающей волны. При этом требование обеспечения пространственного разделения компонентов поля, восстанавливаемого с помощью голограммы, обуславливает необходимость ограничения ширины спектра регистрируемого объекта, т. е. необходимость обеспечения выполнения неравенства

$$\Delta \leq 1/4d_d, \quad (11)$$

а также выбор пространственной частоты опорной волны, равной

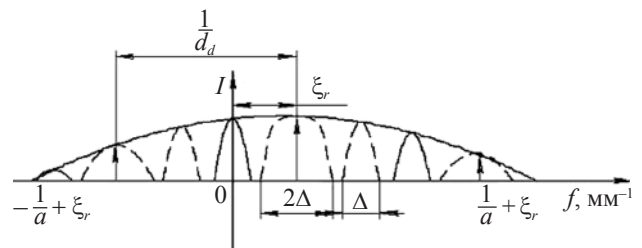
$$|\xi_r| = \sin|\theta|/\lambda = 1,5\Delta_{\max}, \quad (12)$$

где $\Delta_{\max} = 1/4d_d$.

Отсюда получим условие выбора угла падения опорной волны

$$\sin|\theta| = \frac{1,5\lambda}{4d_d}. \quad (13)$$

Из (13) следует ограничение, накладываемое на длину волны восстановления синтезированной голограммы. Поскольку $\sin|\theta|$ не может превышать единицы, рабочая длина волны восстановления синтезированной голограммы-проектора не может быть более 2,7 периода дискретизации голограммы.



Спектр поля, восстановленного с помощью синтезированной дискретной голограммы

Подстановка выражения (3) в (11) и (13) позволяет получить выражения, описывающие зависимость допустимых величин ширины спектра объекта и угла падения опорной волны от характеристического размера изображения, формируемого синтезируемой голограммой-проектором

$$\Delta \leq 1/a_t, \quad (14)$$

$$\sin|\theta| = 1,5\lambda/a_t. \quad (15)$$

Из (15) следует невозможность использования дискретных синтезированных голограмм для формирования изображений с предельным для оптики характеристическим размером, равным длине волны восстанавливающего излучения. Предельным для дискретных синтезированных голограмм является характеристический размер восстановленного изображения, равный $1,5\lambda$.

Выражения (3), (14) и (15) позволяют по известному характеристическому размеру фотошаблона определить оптимальные, с точки зрения указанных выше критериев, параметры синтеза голограммы-проектора, а именно: период дискретизации голограммы, угол падения опорной волны, длину волны восстанавливающего излучения и необходимый диаметр фокального пятна генератора изображения, используемого для отображения голограммы на носителе. Кроме того, требование непрерывности линий, составляющих формируемое изображение фотошаблона, математически сводящееся к необходимости соблюдения равенства периода дискретизации фотошаблона при синтезе голограммы характеристическому размеру его восстановленного изображения, обуславливает необходимость ограничения протяженности участка линейной апертуры синтезированной голограммы, несущего информацию о каждом элементе дискретизации объекта, величиной D_a , равной

$$D_a = 2R_o \operatorname{tg}[\arcsin(\lambda/a_t)], \quad (16)$$

где R_o – расстояние от голограммы до объекта. Отсюда можно определить необходимый размер голограммы-проектора – D_d :

$$D_d = D_t + D_a, \quad (17)$$

где D_t – размер фотошаблона.

Из (17), зная значения параметров D_d и d_d , можно определить общее число пикселей синтезируемой голограммы – M . Для рассматриваемого нами одномерного случая оно будет равно

$$M = 1 + (D_t + D_a)/d_d. \quad (18)$$

Величина параметра R_o при синтезе голограммы должна выбираться исходя из следующих сооб-

ражений. Во-первых, она должна быть предельно минимизирована, чтобы обеспечить минимальный размер голограммы и минимальное возможное количество пикселей ее составляющих. Во-вторых, она должна обеспечивать пространственное разделение восстанавливающего пучка лучей и восстановленного изображения фотошаблона. В наиболее интересном для практического использования случае отражательной синтезированной голограммы-проектора, формирующей действительное изображение фотошаблона, располагаемого параллельно плоскости голограммы так, что центр восстановленного изображения лежит на нормали, восстановленной из центра голограммы, минимально возможная величина параметра $R_o - R_{o\min}$ может быть рассчитана с помощью следующего выражения, полученного из чисто геометрических соображений:

$$R_{o\min} = \frac{D_t}{\operatorname{tg}[\arcsin(1,5\lambda/a_t)] - \operatorname{tg}[\arcsin(\lambda/a_t)]}. \quad (19)$$

Присутствие в выражениях (14)–(19) величины a_t свидетельствует о том, что именно характеристический размер формируемого изображения фотошаблона является ключевой величиной, определяющей все основные параметры синтеза голограммы-проектора и схемы ее восстановления.

Заключение

В настоящей работе рассмотрены особенности синтеза голограмм-проекторов, предназначенных для использования в голографическом варианте фотолиитографического процесса. Основное внимание уделено влиянию дискретизации объекта и голограммы на структуру восстанавливаемого изображения. Сформулированы и обоснованы требования, предъявляемые к параметрам расчета и отображения синтезированных голограмм. Установлено, что дискретизация синтезированных голограмм приводит не только к появлению помех в виде дополнительных восстанавливаемых изображений, но и к ограничению характеристического размера восстанавливаемых изображений величиной $1,5\lambda$. Выявлены и обоснованы зависимости, описывающие связь основных параметров синтеза и схемы восстановления синтезированных голограмм двумерного транспаранта с характеристическим размером формируемого с их помощью изображения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Корешев С.Н., Ратушный В.П. Использование метода голографии для получения изображений двумерных объектов при решении задач фотолиитографии высоко-

- го разрешения // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 10. С. 32–39.
2. *Koreshev S.N., Ratushnyi V.P.* Holographic method for obtaining images with limiting high resolution for extreme shot-wave lithography problems // Proc. SPIE. 2004. V. 5290. P. 221–232.
 3. *Clube F., Gray S., Struchen D., Tisserand J., Malfoy S., Darbellay Y.* Holographic microlithography // Opt. Eng. 1995. V. 34. № 9. P. 2724–2730.
 4. *Корешев С.Н., Ратушный В.П.* Голограммы сфокусированного изображения в задаче высокоразрешающей проекционной голографической фотолитографии // Опт. и спектр. 2006. Т. 101. № 6. С. 1038–1042.
 5. *Jacobsen C., Howells M.* Projection x-ray lithography using computer-generated holograms: A study of compatibility with proximity lithography // J. Appl. Phys. 1992. V. 71. P. 2993–3001.
 6. *Naullenau P.P., Salmassi F., Cullikson E.M., Liddle J.A.* Design and fabrication of a high-efficiency extreme-ultraviolet binary phase-only computer-generated hologram // Appl. Opt. 2007. V. 46. № 14. P. 2581–2585.
 7. *Кольер Р., Беркхард К., Лин Л.* Оптическая голография. М.: Мир, 1973. 686 с.
 8. *Семенов Г.Б., Корешев С.Н.* Дифракционная эффективность и некоторые особенности спектров дискретных амплитудных бинарных голограмм // Опт. и спектр. 1976. Т. 41. № 2. С. 310–314.
 9. *Гудмен Дж.* Введение в фурье-оптику. М.: Мир, 1970. 364 с.
-