

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УГЛОВ ПАДЕНИЯ ЛУЧЕЙ АКТИНИЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТЬ ФОТОШАБЛОНА НА УГЛОВЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ЛИМБОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ФОТОЛИТОГРАФИИ

© 2010 г. Д. Ю. Кручинин, канд. техн. наук

ПО “Уральский оптико-механический завод” им. Э.С. Яламова”, г. Екатеринбург

E-mail: krudu@planet-a.ru

Рассмотрены результаты исследования влияния углов падения лучей актиночного излучения на поверхность фотошаблона в операции контактного экспонирования технологического процесса обратной фотолитографии на угловые погрешности круговых оптических шкал (лимбов).

Ключевые слова: круговая оптическая шкала, лимб, угловая погрешность, обратная фотолитография.

Коды OCIS: 110.5220.

Поступила в редакцию 15.12.2009.

Введение

В работе [1] было установлено, что операция контактного экспонирования технологического процесса обратной фотолитографии [2] оказывает существенное влияние на угловые погрешности круговых оптических шкал (лимбов). Угловые погрешности расположения диаметров осей штрихов, вносимые операцией экспонирования, определяются в первую очередь второй и шестой гармониками, а также, возможно, четвертой гармоникой. Было сделано предположение, что одной из причин возникновения дополнительных угловых погрешностей шкалы в процессе экспонирования фоторезиста является отклонение от плоскости поверхности плиты установки экспонирования и, соответственно, отклонение от плоскости поверхности фотошаблона и поверхности подложки лимба с образованием между ними зазора переменной величины. Также можно предположить, что угловые погрешности, вносимые операцией экспонирования, определяются в значительной степени углами падения лучей актиночного излучения на поверхность фотошаблона, находящегося в контакте с подложкой, на которую нанесен слой фоторезиста. В каждой точке кольца, в котором расположены штрихи лимба, углы падения могут иметь произвольные значения, не превышающие 2° . Задача исследования – определить

влияние изменения углов падения лучей актиночного излучения на поверхность фотошаблона в операции контактного экспонирования технологического процесса обратной фотолитографии на угловые погрешности лимбов.

Методика проведения эксперимента

С помощью лазерного генератора изображений CLWS-300 [3] был изготовлен фотошаблон, представляющий собой замкнутую круговую шкалу, состоящую из 1080 прозрачных штрихов шириной 8 мкм, диаметр шкалы 90 мм. Один из штрихов увеличен в одну сторону на 0,5 мкм. Для исследования использовались две полированные подложки, имеющие отклонение от плоскости не хуже $N = 10$ и $\Delta N = 2$. Для формирования топологии использовался ДХН-фоторезист, толщина фоторезистивного покрытия составляла около 0,5 мкм. На каждой подложке формирование шкалы проводилось по 4 раза, при этом наклон плиты установки экспонирования, на которой помещался фотошаблон с подложкой, изменялся от нуля до трех градусов. Соответствующим образом изменялись и углы падения лучей актиночного излучения на поверхность фотошаблона. Экспонирование проводилось на установке экспонирования ЭМ576А, модернизированной с целью изготовления с ее помощью оптических шкал. Актиночное излу-

чение представляет собой сходящийся пучок лучей. Фотошаблон во всех случаях устанавливался на плиту установки экспонирования одинаковым образом. Зазор между фотошаблоном и подложками не превышал 1 мкм, что определялось по интерференционной картине. При первом нанесении шкалы подложки устанавливались на фотошаблон произвольным образом. Затем проводилось измерение угловых погрешностей лимбов на установке АС700: 18 измерений с поворотом лимба относительно оси шпинделя установки на 20° . Положение уширенного штриха определялось по характерному единичному выбросу на зависимости угловой погрешности расположения одной из границ штрихов. Далее в соответствии с фазостатистическим методом [4] было проведено усреднение всех полученных угловых зависимостей, причем за нулевой штрих принимался каждый раз уширенный штрих. Затем на каждой подложке было отмечено положение уширенного штриха, после чего шкала была удалена химическим способом. При повторных нанесениях шкалы подложки при экспонировании устанавливались на фотошаблон таким образом, чтобы положение уширенного штриха на подложках оказывалось в том же месте, что и при первом экспонировании. После каждого нанесения шкалы проводились измерения на установке АС700, результаты измерения обрабатывались с использованием фазостатистического метода. Наиболее часто встречающейся в конструкторской документации угловой погрешностью является угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов, поэтому исследования проводились именно для этого вида погрешности. Угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов характеризуется отсутствием в составе погрешности нечетных гармоник.

Результаты эксперимента и обсуждение

Результат измерения угловых погрешностей на установке АС700 можно представить в следующем виде [1]:

$$F(x) = F_k(x) + F_d(x),$$

где x – угловое положение штриха, $F_k(x)$ – погрешности, вносимые установкой АС700; $F_d(x)$ – погрешности лимба. Использование фазостатистического метода позволяет разделить эти погрешности и получить их в виде двух отдельных зависимостей [4]. Зависимость $F_d(x)$ в свою очередь можно представить в виде [1]

$$F_d(x) = F_{\text{фш}}(x) + F_{\text{эксп1}}(x) + F_{\text{эксп2}}(x) + F_{\text{п}}(x), \quad (1)$$

где $F_{\text{фш}}(x)$ – погрешности, вносимые фотоплоттером CLWS-300 через топологию фотошаблона; $F_{\text{эксп1}}(x)$ – погрешности, вносимые операцией экспонирования за счет неравномерности освещенности; $F_{\text{эксп2}}(x)$ – погрешности, вносимые операцией экспонирования в результате образования зазора переменной величины; $F_{\text{п}}(x)$ – погрешности, обусловленные влиянием формы подложки (клин, отклонение от плоскости рабочей стороны и др.) на результат измерения на установке АС700. Если рассматривать угловые погрешности расположения диаметров осей штрихов, то уравнение (1) примет следующий вид [1]:

$$F_d(x) = F_{\text{фш}}(x) + F_{\text{эксп2}}(x) + F_{\text{п}}(x). \quad (2)$$

Для каждой подложки при изменении угла наклона плиты установки экспонирования меняется $F_{\text{эксп2}}(x)$, а $F_{\text{фш}}(x)$ и $F_{\text{п}}(x)$ остаются неизменными.

В результате проведения эксперимента для каждой подложки получены зависимости $F_d(x)$ угловых погрешностей расположения диаметров осей штрихов при разных положениях плиты установки экспонирования (рис. 1 и рис. 2). Как видно из рис. 1, для первой подложки угловые погрешности определяются в основном второй (максимумы при 25° и 205°) и четвертой (два максимума при 120° и 300° , два других приблизительно совпадают с максимумами второй гармоники) гармониками. При угле наклона плиты 1° происходит уменьшение накопленной угловой погрешности расположения диаметров осей штрихов (табл. 1). Уменьшение погрешности составляет 0,81 угл. с. Минимальная накопленная угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов составляет 1,21 угл. с. При дальнейшем увеличении наклона плиты происходит увеличение накопленной угловой погрешности расположения диаметров осей штрихов. В табл. 1 представлены также результаты анализа спектров угловых погрешностей расположения диаметров осей штрихов для разных углов наклона плиты для первой подложки. Для анализа были взяты угловые погрешности расположения диаметров осей штрихов $F(x)$, полученные при отдельных измерениях, проведенных при одинаковых положениях подложки относительно оси шпинделя установки АС700. Наиболее сильное влияние на угловые погрешности оказывает вторая гармоника. Амплитуда второй гармоники имеет минимум при угле

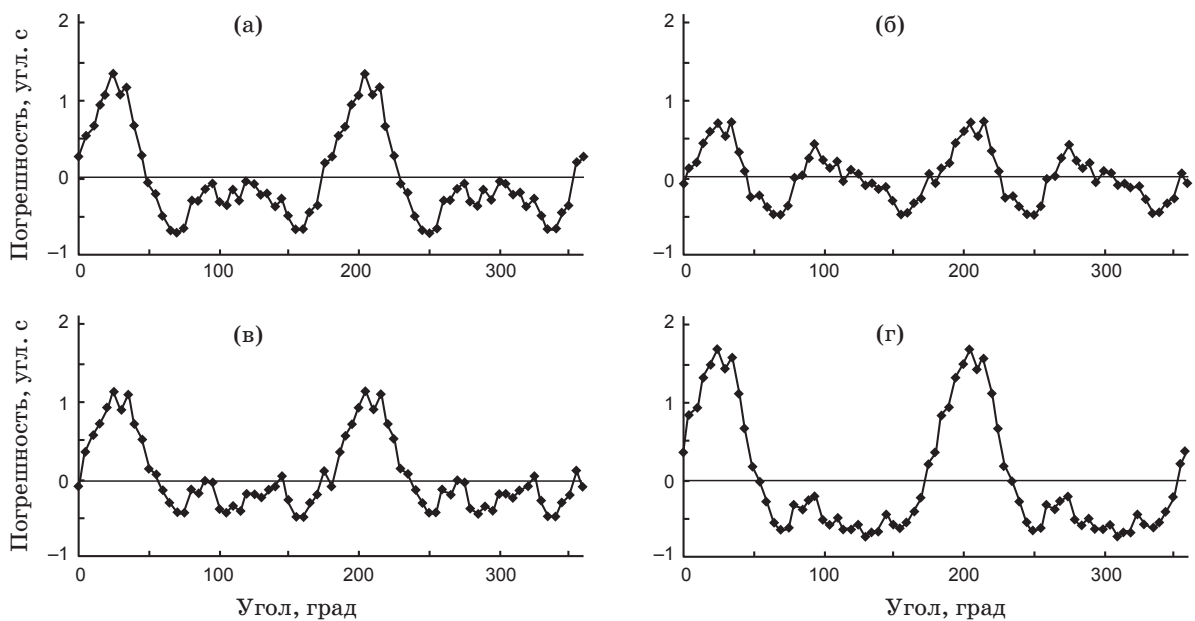


Рис. 1. Зависимости угловых погрешностей расположения диаметров осей штрихов (подложка № 1) для углов наклона плиты: а – 0° , б – 1° , в – 2° , г – 3° .

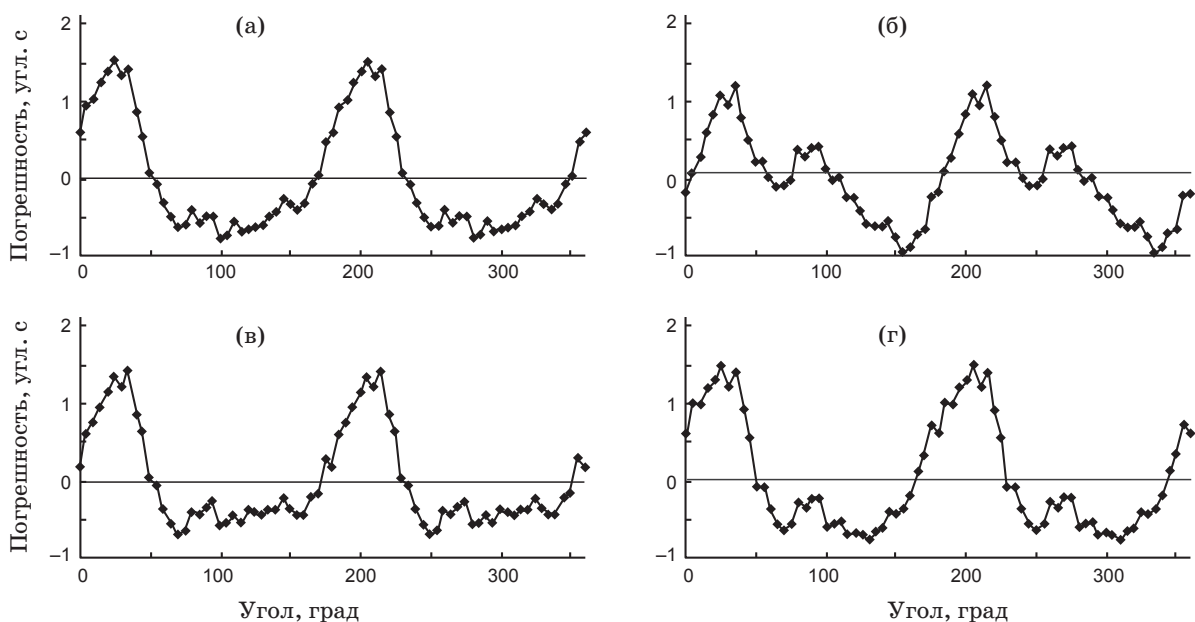


Рис. 2. Зависимости угловых погрешностей расположения диаметров осей штрихов (подложка № 2) для углов наклона плиты: а – 0° , б – 1° , в – 2° , г – 3° .

наклона плиты 1° . Амплитуды четвертой и шестой гармоник также имеют минимумы при угле наклона плиты 1° , хотя они изменяются в меньшей степени. Аналогичные изменения угловых погрешностей расположения диаметров осей штрихов при изменении углов падения актиничного излучения можно наблюдать и для второй подложки (рис. 2, табл. 2). В этом случае

минимум накопленной угловой погрешности расположения диаметров осей штрихов соответствует углу наклона плиты 2° , хотя минимум амплитуды второй гармоники соответствует углу наклона плиты 1° . Кроме того, изменения угловых погрешностей расположения диаметров осей штрихов происходят в меньшей степени. Уменьшение погрешности при угле наклона пли-

Таблица 1. Результаты исследования влияния изменения углов падения лучей актиничного излучения на накопленную угловую погрешность расположения диаметров осей штрихов и амплитуды гармоник (подложка № 1)

Угол наклона плиты, град	Накопленная угловая погрешность, угл. с	Амплитуды гармоник, угл. с		
		2	4	6
0	2,02	0,73	0,46	0,17
1	1,21	0,18	0,40	0,13
2	1,61	0,53	0,40	0,20
3	2,39	0,72	0,61	0,20

Таблица 2. Результаты исследования влияния изменения углов падения лучей актиничного излучения на накопленную угловую погрешность расположения диаметров осей штрихов и амплитуды гармоник (подложка № 2)

Угол наклона плиты, град	Накопленная угловая погрешность, угл. с	Амплитуды гармоник, угл. с		
		2	4	6
0	2,30	0,88	0,60	0,21
1	2,14	0,39	0,56	0,03
2	2,11	0,57	0,53	0,21
3	2,27	0,83	0,54	0,16

ты 2° составляет 0,19 угл. с. Минимальная накопленная угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов составляет 2,11 угл. с. Здесь, по-видимому, имеет значение влияние четвертой и шестой гармоник.

Можно утверждать, что при изменении углов падения лучей актиничного излучения на поверхность фотошаблона в операции контактного экспонирования технологического процесса обратной фотолитографии происходит сначала уменьшение накопленной угловой погрешности расположения диаметров осей штрихов, амплитуд второй, четвертой и шестой гармоник, а затем их увеличение; имеется угол наклона плиты установки экспонирования, при котором накопленная угловая погрешность расположения диаметров осей штрихов минимальна.

Угол падения актиничного излучения представляет собой зависимость от радиуса и от углового положения штриха в пределах рассматриваемой зоны (кольцо шириной 0,12 мм). Можно предположить, что эта зависимость должна

быть характерной для конкретной установки и, может быть, для конкретной лампы. В то же время при изменении наклона плиты установки экспонирования одновременно меняются все углы падения в одном направлении. Следует отметить, что в данном случае изменение наклона плиты не приводит к изменению углового положения нулевого и противоположного ему штрихов, так как при этом изменяется только радиальное положение штрихов. Максимальные изменения углового положения в результате изменения наклона плиты и, соответственно, углов падения лучей актиничного излучения возможны для штрихов, расположенных через 90° и 270° относительно нулевого штриха с учетом образования зазора (при отсутствии зазора угловые погрешности не могут появиться). Здесь необходимо отметить, что толщина фоторезистивного покрытия не оказывает заметного влияния на угловые погрешности расположения диаметров осей штрихов, так как наличие покрытия приводит к появлению первой гармоники (нечетной), а толщина фоторезиста может колебаться в пределах сотых долей микрона. Кроме того, первая гармоника удаляется программным способом при контроле на установке АС700 [4]. Изменение направления наклона плиты может привести к другим изменениям угловых погрешностей. Появление минимума накопленной погрешности расположения диаметров осей штрихов (табл. 1 и 2), по-видимому, является результатом сложения постоянных зависимостей $F_{\text{фш}}(x)$ и $F_{\text{п}}(x)$ (постоянная для конкретной подложки) и меняющейся от угла наклона плиты зависимости $F_{\text{эксн2}}(x)$.

При изменении угла наклона плиты изменяются амплитуды второй, четвертой и шестой гармоник. Из этого следует, что операция экспонирования вносит в угловые погрешности расположения диаметров осей штрихов получаемой круговой шкалы вклад, определяемый этими же гармониками. Полученные результаты соответствуют ранее сделанному выводу о влиянии операции экспонирования на угловые погрешности лимбов [1].

Заключение

Операция контактного экспонирования технологического процесса обратной фотолитографии оказывает существенное влияние на угловые погрешности круговых оптических шкал. Вклад, вносимый в угловые погрешности расположения диаметров осей штрихов, опре-

деляется в первую очередь второй гармоникой, а также четвертой и шестой гармониками. Влиять на угловые погрешности лимбов можно не только фазовым способом, регулируя расположение фотошаблона и подложки относительно плиты установки экспонирования, как было установлено ранее, а также изменяя углы падения лучей актиничного излучения на поверхность фотошаблона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кручинин Д.Ю., Анисимова О.В., Тырышкина А.С. Исследование угловых погрешностей лимбов, изготовленных методом обратной фотолитографии // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 6. С. 70–74.
2. Кручинин Д.Ю. Способ изготовления оптических шкал обратной фотолитографией // Патент России № 2370799. 2009.
3. Абрамов Ю.Ф., Кирьянов В.П., Кирьянов А.В., Кокарев С.А., Кручинин Д.Ю., Чугуй Ю.В., Яковлев О.В. Модернизация оптического делительного производства Уральского оптико-механического завода на основе современных лазерно-компьютерных и фотолитографических технологий // Оптический журнал. 2006. Т. 73. № 8. С. 61–65.
4. Bartik S.A., Frizin S.E., Kiryanov V.P., Kiryanov A.V., Kokarev S.A., Kruchinin D.Y., Nikitin V.G., Yakovlev O.B. Development of a technique for the determination of metrological parameters of technological system CLWS-300/C for synthesis of high precision angular measuring structures // 10 th IMEKO TC7 International Symposium. Saint-Petersburg, 2004. P. 316–320.