

УДК 534.4 : 621.317

## СОВМЕЩЕНИЕ ЗАПИСЫВАЮЩЕГО ПУЧКА С ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ ДИФРАКЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ ПРИ СИНТЕЗЕ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПОЛЯРНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ\*

Р. В. Шиманский, А. Г. Полещук, В. П. Корольков, В. В. Черкашин

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: shimansky@iae.nsk.su*

Разработан метод точного совмещения начала системы полярных координат, в которой задаётся положение лазерного пучка при записи дифракционных оптических элементов, с осью вращения оптической заготовки. Этот метод использован для повышения точности работы круговой лазерной записывающей системы при записи крупногабаритных дифракционных оптических элементов в полярной системе координат. Представлены результаты исследования новых алгоритмов определения и коррекции ошибок позиционирования круговой лазерной записывающей системы в процессе записи.

*Ключевые слова:* дифракционные оптические элементы, лазерная запись, нанопозиционирование, определение оси вращения заготовки.

DOI: 10.15372/AUT20170203

**Введение.** Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) рассчитываются с помощью компьютера и изготавливаются в основном с использованием оптических или электронно-лучевых устройств записи [1]. Популярность ДОЭ обусловлена тем, что они позволяют преобразовывать исходный волновой фронт в волновой фронт практически любой заданной формы. Дифракционная оптика предоставляет новые возможности для улучшения качества изображения, сокращения числа компонентов в оптической системе, снижения цены и веса прибора. Дифракционные оптические элементы уже давно перешли из объекта научных исследований в разряд элементной базы фотоники [2, 3]. В настоящее время их производством занимается ряд фирм, а некоторые типы ДОЭ предлагаются в каталогах [4] по «достаточно умеренным» ценам. Их широкое распространение связано, в частности, с тем, что технология производства большинства типов ДОЭ основана на методах литографии, применяемой в электронной промышленности [5]. В последнее десятилетие электроника совершила качественный скачок в область наноразмеров, а ставшее ненужным оборудование с проектными нормами 0,5–1 мкм нашло применение при изготовлении стандартных ДОЭ небольшого размера, у которых минимальные размеры структуры редко бывают меньше длины волны света.

Однако ряд направлений дифракционной оптики, таких как контроль больших асферических зеркал телескопов [6] и других крупногабаритных асферических компонентов, ставят задачи, не имеющие адекватного решения из-за отсутствия доступного оборудования и технологий микропрофилирования оптических поверхностей с минимальным размером элементов микроструктуры менее 0,5 мкм, световым полем в несколько сотен миллиметров и абсолютной погрешностью координат топологии менее 10–20 нм.

\*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-29-07227 офи\_м) и частичной поддержке Сибирского отделения РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 112).

Дифракционные оптические элементы такого назначения (особенно осесимметричные) могут быть изготовлены с высокой точностью с помощью устройств, использующих для записи полярную систему координат [7, 8]. В этих устройствах подложка со светочувствительным материалом крепится на торце шпинделя, вращаемого с большой скоростью (10–15 об/с) на аэростатических опорах с использованием прямого привода щётчного или бесщёточного двигателя. Такие устройства (круговые лазерные записывающие системы (КЛЗС)) были впервые разработаны в Институте автоматики и электрометрии СО РАН [9] и доведены до практической степени готовности совместно с Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН [10]. Бинарные дифракционные структуры с осевой симметрией изготавливаются КЛЗС последовательным экспонированием внутренней и внешней границы дифракционной зоны путём кругового сканирования и последующим заполнением внутренней части зоны пошаговым кольцевым или спиральным сканированием. Время записи крупноразмерного ДОО составляет десятки часов. Поэтому ключевым моментом при разработке этих прецизионных устройств было обеспечение долговременной нанометровой стабильности определения положения текущей координаты записывающего пучка по отношению к началу координат, в качестве которого выбран центр вращения поверхности подложки [11]. Анализ наиболее типичных источников ошибок записи [12] (погрешности угловой и радиальной координат, несовмещение начала координат, погрешности траектории вращения и автоматической фокусировки) показал, что долговременная нанометровая точность может быть обеспечена только с использованием различных методов коррекции непосредственно в процессе записи. Предложены и исследованы методы контроля и коррекции температурного дрейфа текущего положения записывающего пучка [13], траектории вращения шпинделя [14], системы автоматической фокусировки [15], регистрирующей среды [16, 17], условий записи [18] и др. Однако эти методы не позволяют обеспечить качественную запись крупногабаритных ДОО диаметром свыше 200 мм с погрешностью границ структуры менее 10–20 нм.

В данной публикации представлены результаты разработки и исследования нового метода прецизионного совмещения начала системы координат, в которой задаётся положение записывающего пучка, с осью вращения оптической заготовки [19].

**Система позиционирования КЛЗС.** На рис. 1 изображена схема КЛЗС типа CLWS-300IAE. Установка предназначена для изготовления прецизионных ДОО, угловых шкал и лимбов в полярной системе координат. Изготовление структуры ДОО производится методом прямой лазерной записи на светочувствительном слое 1 (например, плёнке хрома [20]), нанесённом на оптическую подложку 2, которая крепится на планшайбу 12 узла вращения с аэростатическим шпинделем 3. Кроме узла вращения, установка включает: блок записи и автофокусировки 4, блок перемещения по оси  $X$ , состоящий из двигателя 5 и интерферометра 6, блок перемещения по оси  $Y$  7. Блок 4 предназначен для автоматической фокусировки микрообъективом 8 пучка лазера 9 на поверхности светочувствительного слоя оптической заготовки 2 и управления мощностью лазерного пучка в процессе записи дифракционной структуры. Блок 4 содержит фотоэлектрический микроскоп для измерения величины отражённого от поверхности светочувствительного слоя 1 излучения. Блок перемещения по оси  $X$  предназначен для прецизионного позиционирования записывающего пучка вдоль радиальной координаты (до 150 мм) с использованием привода перемещения 5 на основе сигнала от лазерного интерферометра 6. Блок перемещения по оси  $Y$  предназначен для точного позиционирования в диапазоне  $\pm 0,05$  мм записывающего пучка в перпендикулярном направлении к радиальной координате с помощью привода перемещения 7 и энкодера 11. Этот блок используется для совмещения перед началом записи ДОО записывающего пучка 9 лазера с осью вращения планшайбы шпинделя, на которой закреплена оптическая заготовка 10. Фактически блоки перемещения по осям  $X$  и

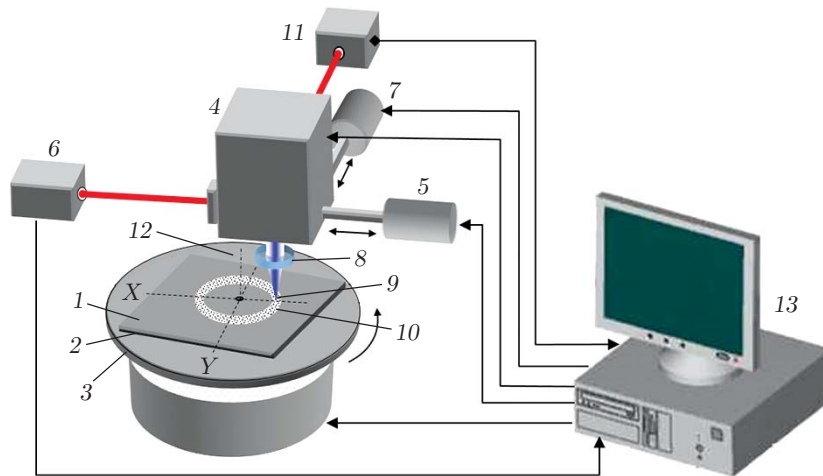


Рис. 1. Упрощённая схема КЛЗС

$Y$  обеспечивают позиционирование пучка в декартовой системе координат относительно неподвижного статора шпинделя. Управление всеми блоками КЛЗС и процессом записи производится компьютером 13.

Записываемая структура ДОЭ представляет собой набор элементарных ячеек с адресацией в полярной системе координат. Ячейки, перекрываясь, образуют картину полос или дифракционных зон. Пример сформированной таким образом линейной решётки с периодом 6 мкм приведён на рис. 2. На этой же микрофотографии схематично показано задание координаты  $P_i(r_i, \varphi_i)$  положения записывающего пучка при записи произвольной ячейки  $i$  в полярной системе координат  $(r_i, \varphi_i)$ . Угол  $\varphi_i$  определяется как разность между началом угловой координаты ( $\varphi = 0$ ) и текущим угловым положением вращающейся оптической заготовки. Величина радиальной координаты  $r_i$  отсчитывается от точки начала полярной системы координат  $r_0 = 0$ . Эта точка для простоты задана в системе координат перемещения пучка по осям  $X$  и  $Y$  как  $x = 0$  и  $y = 0$  и на рис. 2 находится в идеальном положении на оси вращения шпинделя.

**Влияние погрешностей позиционирования на качество волнового фронта, формируемого ДОЭ.** Процесс изготовления ДОЭ с помощью КЛЗС вносит погрешности в его структуру. Основная погрешность — это расстояние между расчётной  $P_i$  и записанной  $P'_i$  координатами ячеек. Определим величину  $\varepsilon_i = P_i - P'_i$  как погрешность координаты

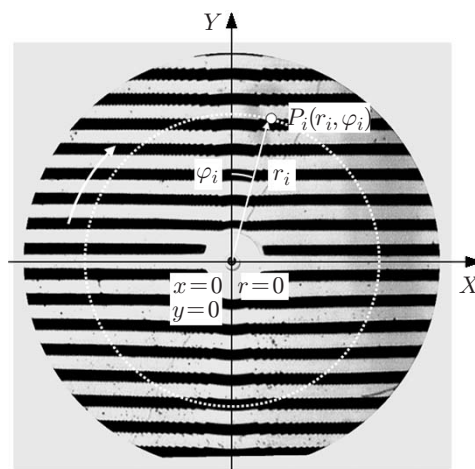


Рис. 2. Схема задания положения пучка в полярной и декартовой системах координат

записи. Абсолютная погрешность координаты  $\varepsilon_i$  зависит от точности перемещения записывающего сфокусированного лазерного пучка относительно центра вращающейся оптической заготовки. Эта погрешность после записи приводит к появлению дополнительного сдвига фазы волнового фронта светового потока, прошедшего через ДОО. Фазовый сдвиг (в долях длины волны излучения лазера) определяется по формуле [21]

$$W = m\lambda\varepsilon_i/T, \quad (1)$$

где  $m$  — порядок дифракции;  $T$  — период дифракционной структуры в данной области ДОО;  $\lambda$  — длина волны света;  $\varepsilon$  — погрешность координаты записи в направлении, перпендикулярном дифракционным зонам ДОО.

Из формулы (1) следует, что при требуемой погрешности волнового фронта изготавливаемого ДОО  $W = 0,01\lambda$  (СКО),  $T = 1$  мкм,  $\lambda = 0,633$  мкм,  $m = 1$  допустимая погрешность координаты записи КЛЗС не должна превышать  $\sim 0,01$  мкм в течение всего процесса записи. На практике эта величина должна быть ещё в 1,5–2 раза меньше.

Оптические узлы и блоки лазерных записывающих систем обычно устанавливаются на гранитных плитах, опирающихся на виброизолирующие опоры. Температурный коэффициент линейного расширения гранита составляет  $8 \cdot 10^{-6}$  1/°С. Таким образом, при изменении температуры окружающей среды на  $\pm 0,25^\circ$  деформация конструкции КЛЗС при записи ДОО с максимальным радиусом  $r_{\max} = 100$  мм составит около 0,4 мкм, что существенно больше допустимой величины погрешности записи  $\varepsilon$ . Кроме того, в КЛЗС есть множество локальных источников тепла, например двигатели, лазеры, фотоприёмники, модуляторы и т. д., которые также приводят к местным термическим деформациям.

Погрешность позиционирования записывающего пучка при записи ДОО на КЛЗС определяется в основном следующими факторами:

- 1) вибрацией установки от вращения шпинделя и погрешностями блока радиального позиционирования;
- 2) погрешностью фиксации точки начала координат записывающего пятна, вызванной погрешностью совмещения начала отсчёта радиальной координаты при записи ДОО с осью вращения оптической заготовки;
- 3) текущей погрешностью перемещения записывающего пятна в процессе записи ДОО, которая является результатом изменения характеристик окружающей среды.

Уменьшение погрешности позиционирования записывающего пучка — одна из основных задач при создании прецизионных установок для изготовления крупногабаритных ДОО.

**Предлагаемый метод уменьшения погрешности позиционирования.** Для обеспечения погрешности позиционирования лазерного пучка менее 50 нм в течение всего времени записи предложен комплексный подход [19], состоящий из нескольких основных шагов:

- 1) формирование записывающим пучком реперной микроструктуры (метки) непосредственно в светочувствительном слое вращающейся оптической заготовки перед началом записи;
- 2) измерение координат реперной микроструктуры тем же записывающим пучком, но с уменьшенной мощностью, а также величины смещения лазерного пучка относительно оси вращения оптической заготовки и минимизация этого смещения;
- 3) динамическая коррекция позиционирования лазерного пучка относительно оси вращения оптической заготовки в течение процесса записи.

**Формирование реперной структуры.** Микроструктура формируется в светочувствительном слое оптической заготовки на некотором расстоянии от оси вращения. На рис. 3 приведена реперная структура, предназначенная для определения величины смещения  $dx$  и  $dy$  начала координат системы позиционирования лазерного пучка вдоль осей

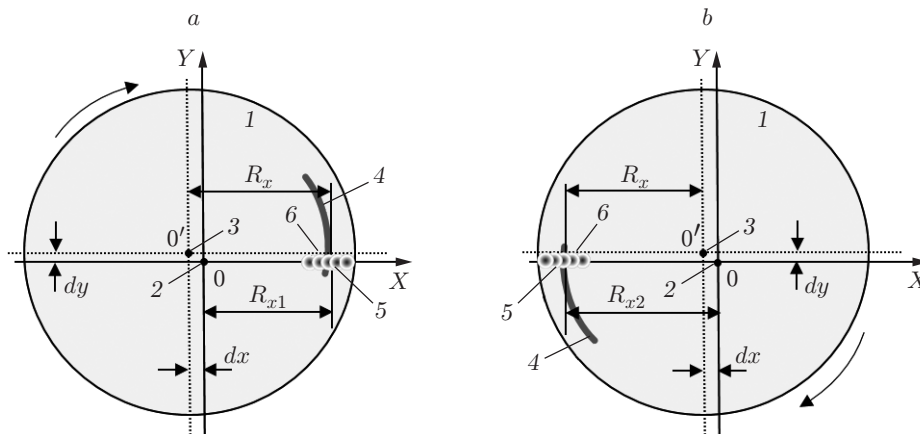


Рис. 3. Геометрия сканирования реперной структуры по радиальной координате: 1 — оптическая заготовка со светочувствительным слоем, 2 — начало отсчёта декартовой системы координат устройства позиционирования, 3 — ось вращения заготовки, 4 — реперная структура, 5 — сфокусированный пучок лазерного излучения, 6 — траектория сканирования реперной структуры

$X$  и  $Y$  относительно оси вращения заготовки. При этом предполагается, что оптическая заготовка жёстко связана со шпинделем в течение всего времени записи ДОО. Заготовка с регистрирующим слоем (например, тонкой плёнкой хрома) фиксируется на планшайбе шпинделя КЛЗС и приводится во вращение. Лазерный пучок перемещается на некоторое расстояние от предполагаемого центра вращения ( $R_x = 10\text{--}50$  мкм), и записывается дуга или тонкое кольцо (ширина менее 1 мкм) с радиусом  $R_x$ , как показано на рис. 3, *a*. Значение мощности записывающего пучка выбирается экспериментально в целях получения достаточного уменьшения отражения плёнки хрома (за счёт окисления, плавления или испарения [22]).

**Совмещение записывающего лазерного пучка с осью вращения оптической заготовки.** Началом полярной системы координат  $P(r = 0)$  в КЛЗС является точка на оси вращения оптической заготовки, расположенная на поверхности светочувствительного слоя. Однако определение положения точки  $P(r = 0)$  на оси вращения шпинделя с высокой точностью — значительная проблема. Известно несколько методов высокоточного нахождения оси вращения заготовки [23, 24]. Они основаны либо на замене заготовки специальным оптическим элементом (клин, решётка, линза), либо на формировании сложных тестовых структур в светочувствительном слое с их последующим изучением под микроскопом, что делает невозможным нахождение оси вращения заготовки в процессе записи. При использовании реперного метода для определения положения точки  $P(r = 0)$  записанная реперная структура сканируется в двух положениях относительно оси с помощью фотоэлектрического микроскопа (4 на рис. 1), как показано на рис. 3, *a, b*. Сканирование структуры проводится в областях  $R_x \pm D_x/2$  и  $-R_x \pm D_x/2$ , где  $R_x$  — предполагаемая координата центра реперной структуры по оси  $X$ ,  $D_x$  — диапазон сканирования. В процессе сканирования измеряется интенсивность  $I_r(x, \varphi)$  отражённого от поверхности пробного лазерного пучка, в качестве которого используется записывающий пучок, но с пониженной мощностью. Результатом сканирования такой структуры по оси  $X$  являются два (положение структуры 0 и  $180^\circ$ ) двумерных массива данных  $I_r(x, \varphi)$ . Далее рассчитываются координаты реперной структуры по оси  $X$  для положительной и отрицательной областей сканирования. Расчёт происходит в два этапа. На первом этапе усредняются исходные данные вдоль угловой оси для уменьшения шумов сканирования, на втором производится

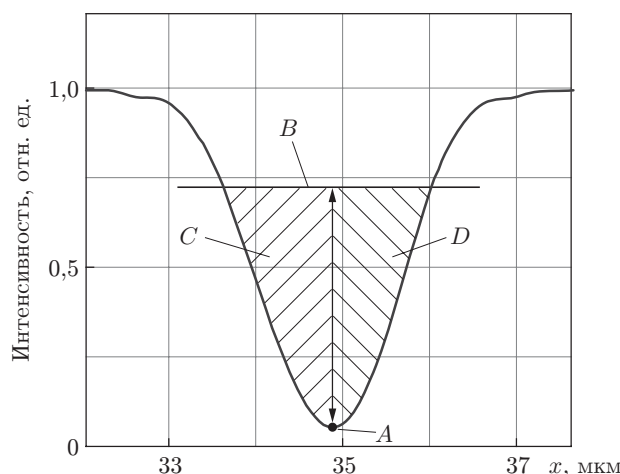


Рис. 4. Результат сканирования реперной структуры по оси  $X$

расчёт координаты реперной структуры с использованием модифицированного алгоритма поиска центра масс [25].

На рис. 4 приведён пример типичной зависимости  $I_r(x)$  с нормированным значением интенсивности, полученный в результате усреднения исходных данных вдоль угловой оси, и схема, поясняющая метод обработки данных. Для повышения точности используется информация из области, где сигнал фотоэлектрического микроскопа ниже порогового значения  $B$ , выбираемого обычно на уровне 30–40 % от полного диапазона сигнала. Точка  $A$  является «центром масс» и рассчитывается как координата, разбивающая график на две части, площади секторов  $C$  и  $D$  которых будут равны. Положение точки  $A$  считается координатой центра реперной структуры.

Используя вышеописанный метод, можно рассчитать координаты реперной структуры  $R_{x1}$  и  $R_{x2}$  для положительной и отрицательной областей сканирования (см. рис. 3,  $a, b$ ). Далее определяется величина смещения начала координат по оси  $X$  по формуле  $dx = (R_{x1} - R_{x2})/2$ .

Для определения величины смещения  $dy$  начала координат системы позиционирования по оси  $Y$  применяется аналогичный алгоритм. При этом сканирование реперной структуры проводится в направлении, перпендикулярном радиальной координате, с помощью блока 7 (см. рис. 1).

После окончания процедуры сканирования и вычисления значений  $dx$  и  $dy$  производится перемещение записывающего лазерного пучка в координаты  $-dx$  и  $-dy$  соответственно по осям  $X$  и  $Y$  и данное положение принимается за новое начало координат, чем обеспечивается совмещение начала системы координат с осью вращения.

**Экспериментальные результаты.** Запись и последующее сканирование реперной структуры (поиск центра) являются рутинной операцией и проводятся в начале (и многократно в процессе) записи любого ДОЭ, изготавливаемого с помощью КЛЗС. На рис. 5,  $a$  приведена микрофотография (сделанная на отражение) центральной области ДОЭ ( $100 \times 100$  мкм) с записанными реперными структурами: кольцом (радиус 50 мкм) и дугой (радиус 25 мкм). Запись осуществлялась на стеклянной подложке, покрытой плёнкой хрома (толщина 50 нм), сфокусированным лазерным пучком ( $\lambda = 532$  нм) с диаметром приблизительно 0,6 мкм и мощностью около 13 мВт, скорость вращения  $12 \text{ с}^{-1}$ . Для поиска центра достаточно одной дуги, однако если позволяет место, то для надёжности, как правило, записываются две дуги или окружность. Ширина дуги обычно составляет около 1–1,2 мкм, так как запись осуществляется методом локального плавления плёнки хрома при малой относительной скорости движения лазерного пятна ( $\sim 0,2$  мм/с) вблизи центра вращающейся подложки.

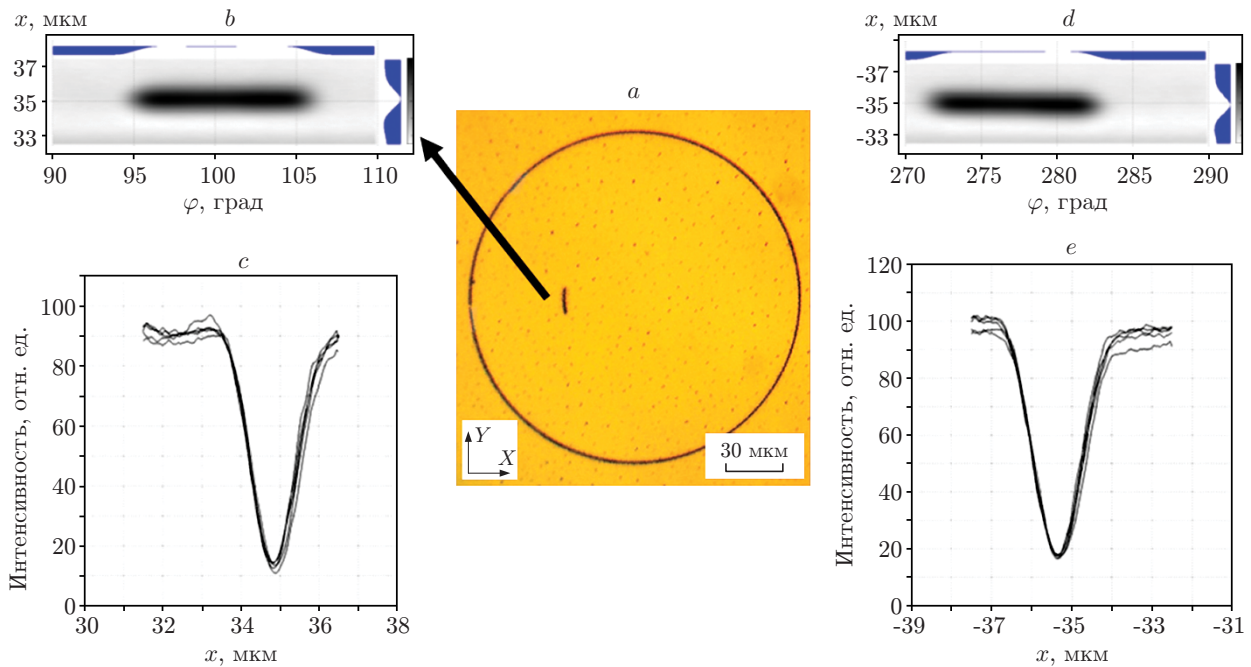


Рис. 5. Пример многопроходного сканирования реперной структуры

На рис. 5, *b, c* показаны результаты фотоэлектрического сканирования  $I_r(x, \varphi)$  записанной дуги при положении подложки  $0^\circ$ , а на рис. 5, *d, e* — при повороте подложки на  $180^\circ$ . Диапазон сканирования  $D_x = 4$  мкм при шаге сканирования  $0,05$  мкм. Кривая изменения интенсивности отражённого излучения  $I_r(x, \varphi)$  от поверхности плёнки хрома имеет чёткий минимум в области центра дуги, а её ширина (см. рис. 5, *c, e*) составляет около  $1,5$  мкм. Такая достаточно большая ширина кривой объясняется конечными размерами сканирующего лазерного пятна и записанной дуги. Для минимизации погрешности определения координаты минимума применяется алгоритм с несколькими повторными сканированиями (на рис. 5, *c, e* наложено пять кривых).

На рис. 6, *a* приведён пример измерения положения центра вращения по 114 измерениям, а на рис. 6, *b* — гистограмма этих данных, полученная в эксперименте. На гистограмме по горизонтальной оси отложены значения выборки отклонений от среднего значения, по вертикальной — количество выпадений для каждой выборки. Для графика на рис. 6, *a* рассчитанное за время 50 мин СКО составило около  $3,5$  нм.

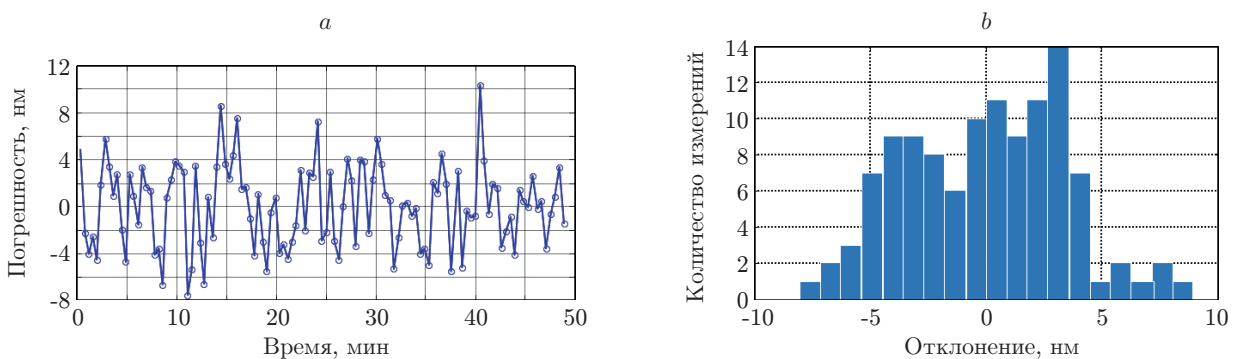


Рис. 6. Результаты измерения положения центра вращения в течение 50 мин: *a* — положение центра вращения с вычетом дрейфа, *b* — гистограмма погрешностей

**Заключение.** Для обеспечения высокой точности работы круговых лазерных записывающих систем в течение длительного времени необходимо гарантировать нанометровую точность позиционирования записывающего пучка относительно оси вращения заготовки со светочувствительным материалом на протяжении всего времени записи ДОО.

В данной работе рассмотрены факторы, определяющие погрешность позиционирования записывающего пучка при записи ДОО на КЛЗС, и метод уменьшения этой погрешности, включающий формирование реперной микроструктуры в светочувствительном слое перед началом записи, измерение её координат тем же записывающим пучком, определение и минимизацию величины смещения лазерного пучка относительно оси вращения оптической заготовки (совмещение записывающего лазерного пучка с осью вращения оптической заготовки). Обсуждаются экспериментальные результаты применения предлагаемого метода для измерения положения центра вращения в течение 50 мин. Рассчитанное СКО составило около 3,5 нм.

Разработанный метод с некоторыми изменениями может быть применён для технологических систем, использующих радиальное перемещение обрабатываемого инструмента (алмазного резца, электронного или ионного пучка) относительно вращающейся заготовки для случаев, когда важны абсолютные размеры формируемого изделия.

Экспериментальные исследования проводились на оборудовании ЦКП «Высокоразрешающая спектроскопия газов и конденсированных сред» в Институте автоматики и электротехники СО РАН.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O'Shea D. C., Suleski T. J., Kathman A. D., Prather D. W. *Diffractive Optics: Design, Fabrication, and Test*. Washington: SPIE Press, 2004. Vol. TT62. 260 p.
2. **Технологическая платформа «Инновационные лазерные, оптические и оптоэлектронные технологии — Фотоника»**. URL: <http://photonica.cislaser.com/> (дата обращения: 03.02.2017).
3. **Ленкова Г. А.** Высокоэффективный дифракционный поворотный фокусирующий элемент // *Автоматрия*. 2015. **51**, № 6. С. 32–40.
4. **Каталог оптических компонентов и оборудования**. URL: <https://www.thorlabs.com/> (дата обращения: 03.02.2017).
5. **Voelkel R.** Wafer-scale micro-optics fabrication // *Adv. Opt. Technol.* 2012. **1**, Is. 3. P. 135–150.
6. **Thirty Meter Telescope (TMT)**. URL: <http://www.tmt.org/> (дата обращения: 03.02.2017).
7. **Poleshchuk A. G., Churin E. G., Koronkevich V. P. et al.** Polar coordinate laser pattern generator for fabrication of diffractive optical elements with arbitrary structure // *Appl. Opt.* 1999. **38**, Is. 8. P. 1295–1301.
8. **Zhu F., Zhou C., Ma J.** Calibration and pre-compensation of direct laser writing system // *Proc. SPIE*. 2012. **8556**. 855612.
9. **Ведерников В. М., Вьюхин В. Н., Кирьянов В. П. и др.** Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов // *Автоматрия*. 1981. № 3. С. 3–16.
10. **Chugui Yu. V., Verkhoglyad A. G., Zavyalov P. S. et al.** Optical measuring and laser technologies for scientific and industrial applications // *Intern. Journ. Automat. Technol.* 2015. **9**, N 5. P. 515–524.
11. **Cherkashin V. V., Churin E. G., Korolkov V. P. et al.** Processing parameter optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films // *Proc. SPIE*. 1997. **3010**. P. 168–179.
12. **Полещук А. Г., Коронкевич В. П., Корольков В. П. и др.** Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: погрешности изготовления и их измерение // *Автоматрия*. 1997. № 6. С. 42–56.



13. **Полецук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. и др.** Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов // *Автометрия*. 2002. **38**, № 3. С. 3–19.
14. **Корольков В. П.** Измерение и коррекция траектории движения лазерного пучка в круговых записывающих системах // *Автометрия*. 2003. **39**, № 6. С. 13–25.
15. **Денк Д. Э., Полецук А. Г.** Исследование методов увеличения точности работы системы автоматической фокусировки кругового лазерного записывающего устройства // *Автометрия*. 2010. **46**, № 1. С. 107–117.
16. **Полецук А. Г.** Погрешности формирования дифракционных структур лазерным термохимическим методом записи // *Автометрия*. 2003. **39**, № 6. С. 39–45.
17. **Полецук А. Г., Корольков В. П., Седухин А. Г. и др.** Прямая лазерная запись в плёнках хрома полутоновых микроизображений с большим динамическим диапазоном // *Автометрия*. 2015. **51**, № 3. С. 87–93.
18. **Кирьянов В. П., Кирьянов А. В., Кручинин Д. Ю., Яковлев О. Б.** Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений (Аналитический обзор) // *Оптический журнал*. 2007. **74**, № 12. С. 40–49.
19. **Пат. 2540065 РФ.** Способ изготовления дифракционного оптического элемента (ДОО) /А. Г. Полецук, В. П. Корольков, Р. В. Шиманский, В. В. Черкашин. Оpubл. 27.01.2015, Бюл. № 3.
20. **Коронкевич В. П., Полецук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И.** Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов на пленках хрома // *Квантовая электроника*. 1985. **12**, № 4. С. 755–761.
21. **Chang Y.-C. R., Burge J. H.** Error analysis for CGH optical testing // *Proc. SPIE*. 1999. **3782**. P. 358–366.
22. **Вейко В. П., Корольков В. П., Полецук А. Г. и др.** Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур // *Квантовая электроника*. 2011. **41**, № 7. С. 631–636.
23. **Milster T. D., Vernoid C. L.** Technique for aligning optical and mechanical axes based on a rotating linear grating // *Opt. Eng.* 1995. **34**, Is. 10. P. 2840–2845.
24. **Кирьянов А. В., Кирьянов В. П.** Улучшение метрологических характеристик лазерных генераторов изображений с круговым сканированием // *Автометрия*. 2010. **46**, № 5. С. 77–93.
25. **Колмогоров А. Н.** Избранные труды. М.: Наука, 1985. Т. 1. Математика и механика. 470 с.

*Поступила в редакцию 10 августа 2016 г.*

---