

**В. П. Корольков**  
(Новосибирск)

**ИЗМЕРЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ  
ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА  
В КРУГОВЫХ ЗАПИСЫВАЮЩИХ СИСТЕМАХ**

Системы лазерной записи с круговым сканированием эффективно применяются в производстве дифракционных оптических элементов, микрооптики, кодовых дисков и лимбов. Однако точность формирования микроструктуры с помощью таких систем существенно зависит от радиального биения шпинделя, которое вызывает отклонение траектории движения записывающего пучка от круговой формы. Знание зависимости этого отклонения от угла поворота позволяет компенсировать влияние биения шпинделя, корректируя радиальное положение пучка. Предложен новый фотоэлектрический метод измерения траектории движения записывающего пучка для систем с круговым сканированием. Обсуждаются результаты его применения для коррекции положения пучка с помощью электромагнитного дефлектора.

**Введение.** Круговые лазерные записывающие системы [1–6] являются универсальным и гибким инструментом для лазерной микротехнологии изготовления дифракционной оптики и микрооптики. Они используют непрерывное вращение подложки с регистрирующим материалом, установленной на планшайбе, при пошаговом или непрерывном радиальном перемещении сфокусированного лазерного пучка (рис. 1). Фотошаблоны и фазовые микроструктуры заданной конфигурации формируются путем модуляции пучка в соответствии с данными, подготовленными управляющим компьютером для текущей угловой и радиальной координат.

Такие системы записи позволяют достичь более высокой точности изготовления осесимметричных дифракционных оптических элементов (зонные пластинки Френеля, аксиконы, корректоры аберраций), чем электронно-лучевые и лазерные  $x$ - $y$ -системы, за счет отсутствия дискретизации по угловой координате и точного выполнения границ дифракционных зон [7]. Однако радиальное биение шпинделя приводит к появлению неосесимметричной аберрации волнового фронта [8] вследствие отклонения траектории движения записывающего пучка от идеального круга при фиксированной радиальной координате фокусирующего объектива. Это отклонение является функцией угла поворота и связано с неточностью изготовления деталей шпинделя и несбалансированностью сил в электродвигателе вращения. Удаление поверхности подложки с регистрирующим материалом от центра шпинделя по оси вращения (точки на оси, равноудаленной от опорных поверхностей, со-

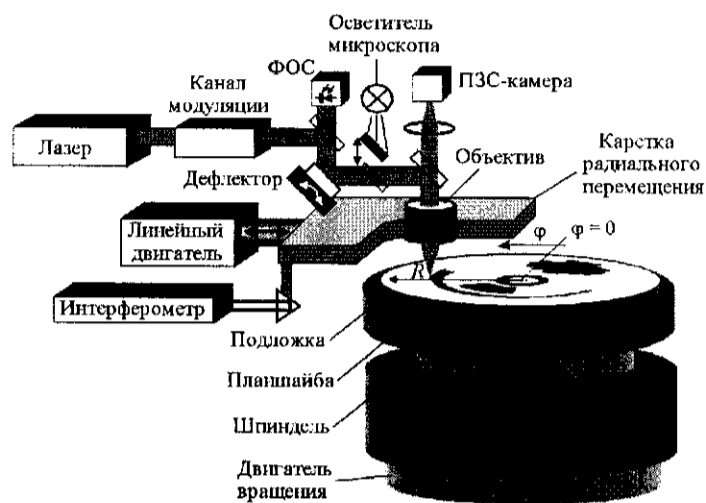


Рис. 1. Упрощенная блок-схема круговой лазерной записывающей системы

здающих жесткость вдоль оси вращения) увеличивает отклонение траектории. Типичная величина радиальных биений для шпинделей на аэростатических опорах лежит в диапазоне 0,05–0,5 мкм. Этот тип погрешности приводит не только к ошибке реальной радиальной координаты пучка, но и к ошибке его угловой координаты (при  $r \gg \Delta r$ ) [9]:

$$r' = r + \Delta r(\varphi), \quad \varphi' = \varphi + \arctg[\Delta r(\varphi - \pi/2)/2\pi r],$$

где  $r$  и  $\varphi$  – полярные координаты записывающего пучка, измеренные угловым и линейным датчиками перемещений;  $r'$  и  $\varphi'$  – реальные полярные координаты пучка;  $\Delta r(\varphi)$  – отклонение траектории пучка, вызванное радиальным биением шпинделя. Измерение функции  $\Delta r(\varphi)$  дает возможность не только определить предел точности записывающего устройства, но и улучшить точность за счет коррекции траектории движения записывающего пучка, если радиальное биение шпинделя синхронно с вращением и не изменяется в процессе записи. Коррекция может быть проведена различными методами:

1. Смещением каретки радиального перемещения. Этот метод наиболее прост, так как не требует никаких дополнительных устройств и драйверов, но применим только при низкочастотных радиальных биениях с небольшой амплитудой (до 0,1 мкм). Такое ограничение обусловлено тем, что периодическое движение массивной каретки радиального перемещения может привести к появлению механических резонансов и снижению точности позиционирования.

2. Смещением в радиальном направлении фокусирующего объектива относительно каретки радиального перемещения. Такой метод используется в проигрывателях компакт-дисков. Недостатком является то, что он пригоден только для легких и компактных пластиковых объективов, которые имеют невысокое оптическое качество и низкую лучевую прочность.

3. Угловым отклонением коллимированного лазерного пучка, поступающего на фокусирующий объектив. Угловое отклонение может быть осуществлено, например, с помощью электромагнитного или пьезоэлектрического дефлектора.

Последний метод в силу относительной простоты его реализации был использован в предлагаемой работе для компенсации радиального биения шпинделя на круговой лазерной записывающей системе CLWS-300 [10], разработанной совместными усилиями Конструкторско-технологического института научного приборостроения СО РАН и Института автоматизации и электрометрии СО РАН и эксплуатируемой с 1995 г. в Институте технической оптики (Университет г. Штутгарта, Германия).

**1. Методы измерения биений шпинделя.** Биения шпинделя разделяют по направлению движения на два основных класса: вдоль оси вращения – осевые биения, поперек оси вращения – радиальные. Осевые биения мы не рассматриваем, так как они полностью компенсируются системой автоматической фокусировки записывающего пучка. Радиальные биения можно измерять, непосредственно отслеживая радиальное перемещение одного (или нескольких) участка какой-либо доступной цилиндрической детали ротора шпинделя или тестового объекта сферической, конической или цилиндрической формы, помещенного на планшайбу шпинделя. В литературе описано несколько типов датчиков малых перемещений, применяемых для этой цели. Их можно разделить на контактные (механические микрометрические индикаторы или пьезоэлектрические преобразователи микроперемещений) и бесконтактные (емкостные и оптические). Контактные датчики имеют высокую точность [11], но измерения с ними можно производить только при малой скорости вращения (до 1 об./с). Это ограничение не распространяется на бесконтактные датчики. Первыми из них широко начали применяться емкостные датчики [12]. Недостатком их является то, что они могут использоваться только для токопроводящих поверхностей. Оптические методы более универсальны в отношении материала ротора шпинделя. Наилучшие результаты достигнуты для доплеровских лазерных виброметров [13]. Эти приборы позволяют с высокой точностью определять повторяющиеся и несинхронные биения. Однако они весьма дороги и не могут в связи с этим встраиваться в обрабатывающее оборудование для регулярного контроля биений шпинделя, которые изменяются при износе подшипников или опорных поверхностей и загрязнении инжекторов в аэростатических шпинделях.

Недостатком упомянутых выше методов контроля радиальных биений шпинделей является то, что они не позволяют контролировать форму траектории обрабатывающего инструмента на детали (резца токарного станка, грани резца установки алмазного точения или лазерного пучка круговой записывающей системы). Дело в том, что радиальные биения могут изменяться по фазе и амплитуде при изменении веса детали, расстояния от плоскости, в которой прикладывается воздействие обрабатывающего инструмента, до центра шпинделя по оси вращения. Исчерпывающая информация о траектории обрабатывающего инструмента на заготовке может быть получена измерением формы изготовленных деталей. При изготовлении дифракционных оптических элементов (ДОЭ) измерение геометрических размеров отдельных дифракционных зон является трудной задачей. Более простой и точный метод – измерение не топологии самого ДОЭ, а интерферометрический контроль aberrаций формируемого им волнового фронта. Однако без нуль-корректоров [14] этот метод применим только для ДОЭ, формирующих плоский или сферический волновой фронт. Его достоинством является высокая точность, связанная с тем, что тест-объект (волновой фронт) формируется большим числом дифракционных зон (до нескольких десятков тысяч). К сожалению, радиальные биения, как было отмечено, изменяются по фазе и амплиту-

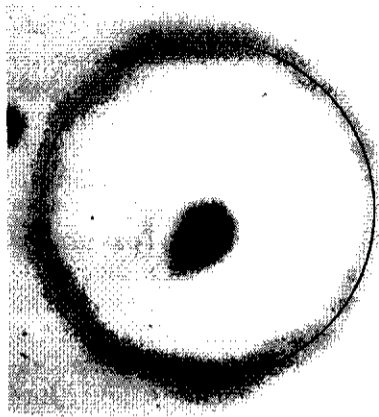


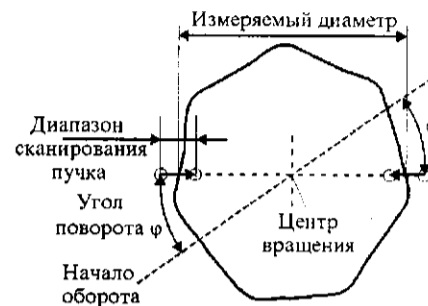
Рис. 2. Микрофотография записанного кольцевого трека с наложенным кругом

де, поэтому необходимо контролировать их непосредственно перед записью элемента. И следовательно, данные предварительного тестирования шпинделя или интерферометрических измерений aberrаций изготовленных ДОЭ не могут гарантировать, что рассчитанная на их основе функция управления компенсацией устранит влияние радиальных биений шпинделя при последующем изготовлении деталей. Для точной компенсации важно иметь

возможность не только измерить радиальные биения шпинделя, но и контролировать результат коррекции траектории лазерного пучка непосредственно на заготовке перед записью. Для того чтобы измерить геометрические параметры траектории пучка, ее надо визуализировать, т. е. путем прямого воздействия лазерного излучения на регистрирующую среду создать нестираемый кольцевой след, существенным образом меняющий отражение или пропускание света регистрирующей средой. Простейший метод измерения траектории по записанному кольцу может быть реализован на основе встроенного в записывающую систему микроскопа с ПЗС-камерой (см. рис. 1). Для его реализации записывается кольцо с диаметром меньше светового поля микроскопа, затем останавливается шпиндель и вводится изображение кольца с ПЗС-камеры в компьютер (рис. 2). С помощью последующей компьютерной обработки изображения необходимо найти в полярной системе координат с началом внутри кольца замкнутую кривую  $R(\varphi)$ , где  $R$  – радиальная координата максимума изменения оптических свойств на кольце при данном угле  $\varphi$ . Для получения траектории движения пучка необходимо с применением фурье-анализа убрать из  $R(\varphi)$  высокие шумовые гармоники для сглаживания и первую гармонику, вызванную несовпадением выбранного начала полярной системы координат с геометрическим центром кольца. Однако точность этого метода невысока при современном уровне развития ПЗС-камер. Например, для 40-кратного объектива со световым полем 100–200 мкм и ПЗС-камеры с матрицей  $2000 \times 3000$  элементов на измеряемое отклонение в 0,5 мкм придется всего 5–10 элементов. Этого явно недостаточно для получения высокой точности. Кроме того, оптика микроскопа должна быть очень высокого качества, чтобы формировать изображение на ПЗС-камере без искажений.

Для решения проблемы оперативного измерения траектории пучка и проверки ее коррекции был разработан фотоэлектрический метод [15] измерения диаметров кольца, записанного на регистрирующем материале (рис. 3). Метод предполагает, что несинхронные биения шпинделя отсутствуют или малы, а синхронные биения не меняются после установки и фиксации подложки с регистрирующим материалом на планшайбу шпинделя. Непрерывный кольцевой трек с радиусом несколько десятков микрон записывается лазерным пучком мощностью, достаточной для плавления или испарения регистрирующего материала, чтобы существенно изменить его коэффициент отражения или пропускания. Фотоэлектрическое сканирование вы-

Рис. 3. Фотоэлектрический метод измерения диаметров



полняется тем же самым пучком, но уровень мощности выбирается меньше, чем требуется для изменения оптических свойств регистрирующего материала. Пучок перемещается по радиусу (см. рис. 3) вращающейся подложки в диапазоне нескольких

микрон вокруг радиальной координаты кольца (сначала с одной стороны от центра вращения, а затем с другой). Относительное изменение интенсивности отраженного средой или проходящего через нее пучка измеряется с помощью фотоприемника (фотоприемник отраженного света (ФОС) на рис. 1). Диаметр кольца при данном угле поворота определяется как расстояние между двумя диаметрально противоположными точками, где измеряемый оптический параметр имеет экстремум (максимум или минимум в зависимости от типа среды и способа записи кольца). Достоинством метода является его оперативность (для измерений достаточно одной минуты). Однако его проверка на нескольких экземплярах системы CLWS-300 с различным характером радиальных биений шпинделей показала, что он позволяет измерять только четные гармоники по отношению к частоте вращения шпинделя. Так, например, при скорости вращения 10 об./с на CLWS-300, эксплуатируемой в Институте технической оптики, фотоэлектрический метод измерения диаметров дает траекторию движения пучка, которая имеет только четные гармоники с амплитудой выше шума (рис. 4). Между тем фурье-анализ интерферограмм волновых фронтов, формируемых ДООЭ, которые записаны на этой системе, показал существенный вклад нечетных гармоник – седьмой и девятой [16].

**2. Фотоэлектрический метод измерения траектории движения пучка с поворотом подложки.** Для решения этой проблемы был разработан новый метод измерения траектории движения записывающего пучка. Он осно-

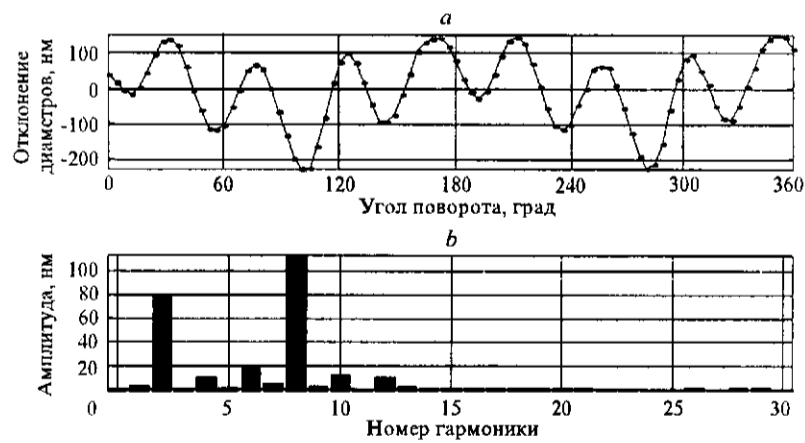


Рис. 4. Измерение диаметров фотоэлектрическим методом: функция отклонения диаметров (а), ее спектр (б)



где  $x_{wl}$  и  $x_{ml}$  – координаты записывающего и пробного пучков в колеблющейся в горизонтальном направлении системе координат с началом в точке сброса счетчика радиальной координаты (индекс  $l$  означает, что запись или измерение проводятся с левой стороны от центра вращения  $O$ , а индекс  $r$  – с правой стороны);  $\Delta x_w(\varphi)$  и  $\Delta x_m(\varphi)$  – эквивалентные ошибки радиального позиционирования при записи и при измерении. Координата  $x$  и эквивалентная ошибка  $\Delta x(\varphi)$  приняты положительными с левой стороны и отрицательными с правой стороны от идеального центра вращения шпинделя. Если включен дефлектор коррекции положения пучка, то он отклоняет пучок так, чтобы тот шел по идеальной круговой траектории (штрихпунктирная линия на рис. 5). В этом случае в выражениях (1) и (2) появятся дополнительные члены

$$r_w(\varphi) = x_{wl} + \Delta x_w(\varphi) - \text{def}_w(\varphi), \quad (3)$$

$$r_m(\varphi) = x_{ml} + \Delta x_m(\varphi) - \text{def}_m(\varphi), \quad (4)$$

где  $\text{def}_w(\varphi)$  и  $\text{def}_m(\varphi)$  – радиальный сдвиг пучка дефлектором при записи и при измерении соответственно. При измерении радиусов записанного кольца в зависимости от угла поворота  $\varphi$  пробный пучок сканируется в заданном радиальном диапазоне с целью определения  $x_{ml}$  для текущего угла, где  $r_w(\varphi) = r_m(\varphi)$ . При этом условии координата  $x_{ml}$  может быть получена из выражений (3) и (4):

$$x_{ml} = x_{wl} + \Delta x_w(\varphi) - \Delta x_m(\varphi) + \text{def}_m(\varphi) - \text{def}_w(\varphi). \quad (5)$$

Справа от центра вращения при том же угле  $\varphi$  будет измеряться участок траектории, сдвинутый на  $\pi$ . Тогда координата  $x_{mr}$  выражается следующим уравнением:

$$x_{mr} = -x_{wl} - \Delta x_w(\varphi + \pi) - \Delta x_m(\varphi) + \text{def}_m(\varphi) + \text{def}_w(\varphi + \pi). \quad (6)$$

Угловой сдвиг  $\pi$  в аргументах функций  $\Delta x_w$ ,  $\text{def}_w$  означает, что они относятся к противоположной точке кольца при текущем угле поворота шпинделя  $\varphi$ . Если траектории записывающего и пробного пучков одинаковы (измерение производится сразу после записи) и соответственно одинаковы функции компенсации для дефлектора при записи и измерении  $\text{def}_m(\varphi) = \text{def}_w(\varphi)$  (частный случай – выключенный в обоих случаях дефлектор), то величина  $x_{ml}$  не зависит от угла и равна  $x_{wl}$ . Информация о траектории пучка содержится только в радиусе  $x_{mr}$  с диаметрально противоположной стороны от места воздействия записывающего пучка. Поскольку мы рассматриваем повторяющиеся биения, то их спектр содержит только частоты, кратные частоте вращения. Эквивалентную ошибку (и соответственно функцию компенсации дефлектора  $\text{def}(\varphi)$ ) можно тогда представить как сумму четных и нечетных гармоник. Принимая во внимание, что для четных гармоник  $\Delta x^{\text{even}}(\varphi) = \Delta x^{\text{even}}(\varphi + \pi)$ , а для нечетных  $\Delta x^{\text{odd}}(\varphi) = -\Delta x^{\text{odd}}(\varphi + \pi)$ , выражение для правого радиуса приобретает следующий вид:

$$x_{mr} = -x_{wl} - 2\Delta x_w^{\text{even}}(\varphi) + 2\text{def}_w^{\text{even}}(\varphi), \quad (7)$$

т. е. измерение правого радиуса дает информацию только о четных гармониках траектории движения. Измерение диаметров по методу [14] дает ту же самую информацию, так как левый радиус  $x_{ml}$  – константа. Однако метод измерения диаметров работает даже при несоблюдении условий  $\Delta x_w(\varphi) = \Delta x_m(\varphi)$  и  $\text{def}_m(\varphi) = \text{def}_w(\varphi)$ , использованных при выводе выражения (7). Диаметр  $D$  измеряемого кольца вычисляется в этом общем случае из уравнений (5) и (6):

$$D = x_{ml} - x_{mr} = 2x_{wl} + \Delta x_w(\varphi) + \Delta x_w(\varphi + \pi) - \text{def}_w(\varphi) - \text{def}_w(\varphi + \pi). \quad (8)$$

Из этого уравнения видно, что измеренный диаметр совершенно не зависит от траектории пробного пучка и состояния дефлектора во время измерений. С учетом условий разложения эквивалентной ошибки и функции компенсации дефлектора на четные и нечетные гармоники выражение (8) сводится к виду, подобному уравнению (7):

$$D = 2x_{wl} + 2\Delta x_w^{\text{even}}(\varphi) - 2\text{def}_w^{\text{even}}(\varphi). \quad (9)$$

Таким образом, измерение  $D(\varphi)$  или  $x_{mr}(\varphi)$  не позволяет полностью восстановить траекторию движения записывающего пучка и может быть использовано только в том случае, если нечетные гармоники отсутствуют или дают незначительный вклад. Следует также отметить, что при соблюдении условий  $\Delta x_w(\varphi) = \Delta x_m(\varphi)$  и  $\text{def}_m(\varphi) = \text{def}_w(\varphi)$  предпочтительнее измерять только радиус  $x_{mr}(\varphi)$ , так как это ускоряет измерение и устраняет дополнительный источник погрешностей в  $x_{ml}(\varphi)$ .

Для полного определения траектории движения пучка предлагается внести дополнительный этап в процесс измерения. После записи кольца необходимо остановить шпиндель, повернуть подложку на планшайбе на угол  $180^\circ$  и совместить центр кольца с центром вращения шпинделя. Вопрос о влиянии неточности совмещения будет рассмотрен далее. При идеальном совмещении выражения (5) и (6) для левого и правого радиусов приводятся к следующему виду:

$$x_{ml} = x_{wl} + \Delta x_w(\varphi + \pi) - \Delta x_m(\varphi) + \text{def}_m(\varphi) - \text{def}_w(\varphi + \pi),$$

$$x_{mr} = -x_{wl} - \Delta x_w(\varphi) - \Delta x_m(\varphi) + \text{def}_m(\varphi) + \text{def}_w(\varphi).$$

Если эквивалентная ошибка одинакова при записи кольца и его измерении, а дефлектор выключен в обоих случаях, эти выражения упрощаются и с учетом разложения на четные и нечетные гармоники приводятся к виду

$$x_{ml} = x_{wl} - 2\Delta x_w^{\text{odd}}(\varphi), \quad (10)$$

$$x_{mr} = -x_{wl} - 2\Delta x_w(\varphi). \quad (11)$$

Таким образом, измерение радиусов со стороны, диаметрально противоположной положению записывающего пучка, произведенное после поворота подложки на шпинделе на  $180^\circ$ , дает полную информацию о траектории движения пучка.

Безусловно, недостатком предложенного метода является необходимость совмещения центра записанного кольца с осью вращения шпинделя



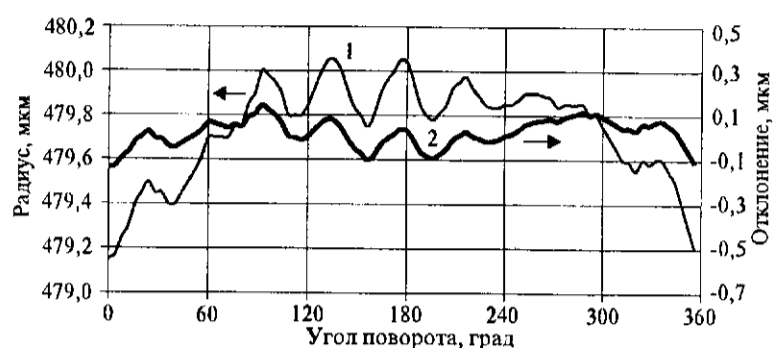


Рис. 6. Измерение радиальных биений: правый радиус  $x_{mr}(\varphi)$  (кривая 1), выделенное из него отклонение траектории записывающего пучка от круговой формы (кривая 2)

после поворота подложки. Как показал опыт, совмещение может быть сделано достаточно быстро с точностью не хуже 0,5 мкм при использовании 40-кратного фокусирующего объектива записывающей системы как части встроенного микроскопа. Остаточная ошибка совмещения приводит к появлению первой гармоники, которая может быть удалена с применением фурье-анализа. На рис. 6 показан измеренный график зависимости  $x_{mr}(\varphi)$  (кривая 1) с первой гармоникой, вызванной децентрировкой пластины. Функция отклонения траектории записывающего пучка (кривая 2) от круговой формы вычисляется из  $x_{mr}$  удалением постоянной составляющей и первой гармоники (в данном случае ее амплитуда, равная ошибке совмещения, составила 0,28 мкм) и делением на 2 оставшейся переменной составляющей в соответствии с (11).

Перед центрированием по радиусу необходимо установить пластину с угловым сдвигом  $180^\circ$  по отношению к первоначальному положению. Допустимую точность  $\Delta\varphi$  можно оценить, исходя из предельной относительной ошибки  $\delta$  при компенсации самой высокой корректируемой гармоники с номером  $k$ :

$$\max \left( \left| \sin k\varphi - \sin(k(\varphi + \Delta\varphi)) \right| \right) < \delta.$$

Задавшись величиной  $\delta = 0,1$ , получаем, что ошибка  $\Delta\varphi$  не должна превышать  $1/(10k)$  радиан. Поворот пластины на планшайбе удобно делать по меткам 0 и  $180^\circ$ , записанным на краю пластины, и метке начала оборота на планшайбе шпинделя. Например, при типичных параметрах (диаметр пластины 50 мм и  $k = 10$ ) эти метки необходимо совместить с точностью  $\pm 1,5$  мм.

Существенное влияние на точность измерения фотоэлектрическим методом оказывает неровность края записанного кольца. Это влияние может быть уменьшено путем записи нескольких колец перед поворотом шпинделя и усреднения результатов измерения. Расстояние между соседними кольцами фактически устанавливает ограничение на допустимую ошибку децентрировки, так как при фотоэлектрических измерениях в области сканирования должно находиться только одно записанное кольцо. Радиусы записываемых колец должны быть достаточно велики, чтобы на измерениях не сказывалась составляющая  $\Delta r_\perp$  радиальных биений шпинделя, перпендику-

лярная движению каретки. Возникающая из-за этой составляющей ошибка измерений  $\Delta r_m$  может быть с хорошей точностью оценена как  $\Delta r_{\perp} / (2R)$ , где  $R$  – радиус кольца. Задавая условием  $\Delta r_m < 0,01\Delta r_{\perp}$ , получаем радиус кольца больше  $50\Delta r_{\perp}$ .

**3. Коррекция траектории движения записывающего пучка.** Следующей задачей, возникающей после измерения траектории движения записывающего пучка, является расчет на ее основе управляющей функции для дефлектора таким образом, чтобы оптимальная компенсация достигалась без многократных попыток записи тестовых колец с коррекцией траектории и измерения ошибки коррекции. Эта задача может быть решена следующим образом:

1. Необходимо определить амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) и фазочастотную характеристику (ФЧХ) дефлектора.

2. Разложить в ряд Фурье измеренную зависимость  $x_{mr}(\varphi)$ , чтобы получить амплитуду и фазу гармоник со второй и выше.

3. Вычислить функцию компенсации как сумму ограниченного числа членов этого ряда Фурье с учетом АЧХ и ФЧХ дефлектора.

АЧХ и ФЧХ дефлектора могут быть измерены с помощью специальной оптоэлектронной схемы, в которой пучок лазера, отраженный от дефлектора, направляется на фотоприемник со сдвоенным фотодиодом. Размер пучка должен быть достаточно велик по сравнению с зазором между секциями фотодиода, а диапазон смещения пучка при колебании дефлектора не должен превышать световое поле фотодиода. Сравнение разностного сигнала с фотоприемника и управляющего сигнала позволяет измерить АЧХ и ФЧХ дефлектора. Однако в данном методе необходимо точно измерить угол отклонения дефлектора и точно знать фокусное расстояние объектива, чтобы определить смещение пучка в плоскости фокусировки. Другой метод измерения вытекает из уравнения (5). Если траектории записывающего и пробного пучков одинаковы и дефлектор был выключен во время записи кольца, то уравнение (5) преобразуется к виду

$$x_{ml} = x_{wl} + \text{def}_m(\varphi),$$

т. е. отклик траектории на управляющий сигнал дефлектора может быть измерен прямо в записывающей системе. Если подавать на дефлектор синусоидальный управляющий сигнал с частотой, кратной частоте вращения шпинделя, то можно измерить АЧХ и ФЧХ по конечному результату – смещению сфокусированного лазерного пучка.

На основе полученных экспериментальных данных функция компенсации вычисляется следующим образом:

$$U(\varphi) = 0,5 \sum_{i=2, k} A_i B_i \cos(2\pi i \nu + \alpha_i + \beta_i), \quad (12)$$

где  $A_i$  и  $\alpha_i$  – коэффициент передачи и фазовая задержка дефлектора для  $i$ -й гармоники;  $B_i$  и  $\beta_i$  – амплитуда и фаза  $i$ -й гармоники в спектре измеренной траектории;  $\nu$  – частота вращения шпинделя;  $k$  – номер наивысшей гармоники, выбранной для компенсации (он зависит от уровня шумов и частотного диапазона дефлектора). Коэффициент 0,5 следует из того, что  $x_{mr}(\varphi)$  дает удвоенную величину отклонения траектории пучка от круговой формы.

Для экспериментальной проверки предложенного метода измерения и коррекции траектории движения пучка были записаны прожиганием пленки хрома три кольца с радиусами 146, 142 и 138 мкм. После записи колец шпиндель был остановлен. Подложка с пленкой повернута на  $180^\circ$  и отцентрирована. Результаты последующего измерения усредненных по трем кольцам функций отклонения правого ( $\delta x_{mr}(\varphi) = (x_{mr}(\varphi) - x_{wl})$ ) и левого ( $\delta x_{ml}(\varphi) = (x_{ml}(\varphi) - x_{wl})$ ) измеряемых радиусов и их фурье-спектры показаны на рис. 7, *a, b*. Из спектра на рис. 7, *a* следует, что точность центрирования пластины составила 100 нм. Спектр отклонения левого радиуса на рис. 7, *b* имеет практически только нечетные гармоники, и их амплитуды равны амплитудам нечетных гармоник спектра на рис. 7, *a*. Это соответствует уравнениям (10) и (11) и доказывает правильность математической модели и основанного на ней метода измерения. Наличие на рис. 7, *b* небольшой по амплитуде восьмой гармоники может быть объяснено ошибкой измерения. Необходимо от-

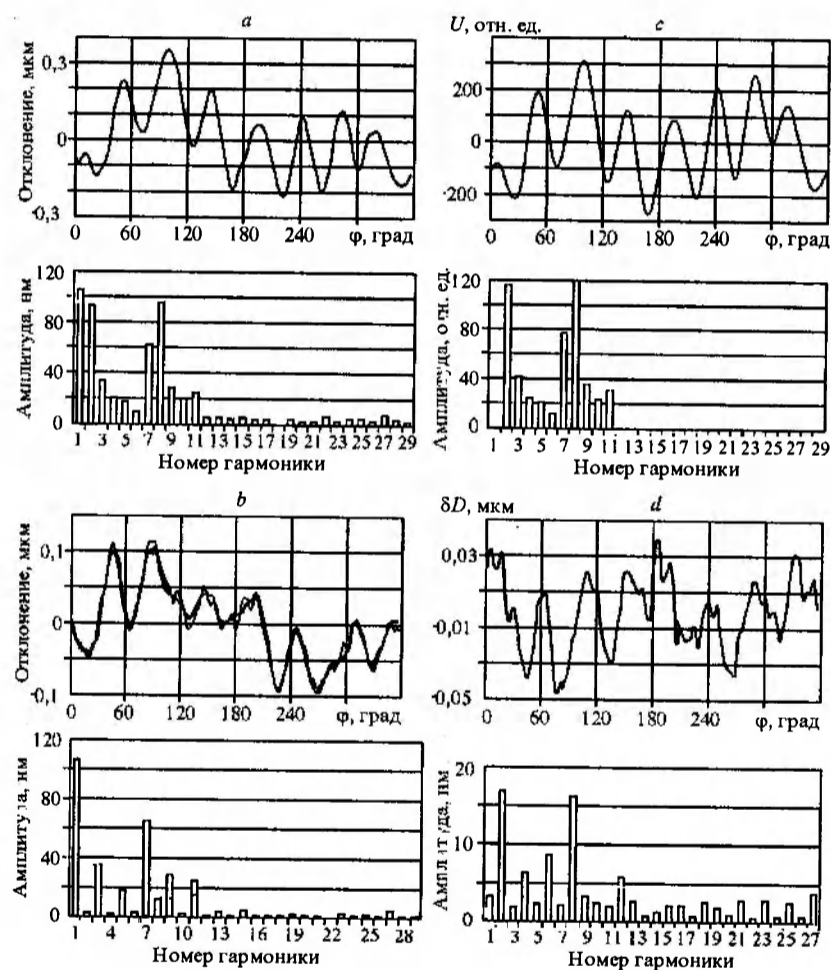


Рис. 7. Измерение и коррекция траектории пучка: усредненная функция отклонения  $\delta x_{mr}(\varphi)$  и ее спектр (*a*); функции отклонения  $\delta x_{ml}(\varphi)$  для трех колец и спектр усредненной функции  $\delta x_{ml}(\varphi)$  (*b*); функция компенсации  $U(\varphi)$  и ее спектр (*c*); функция отклонения диаметров  $\delta D(\varphi)$  скорректированной траектории и ее спектр (*d*)

метить, что все графики на рис. 7, *a, b* относятся к удвоенной величине  $\Delta x_w$  отклонения траектории от круговой формы в соответствии с уравнениями (9)–(11).

На основе этих экспериментальных данных и уравнения (12) была рассчитана функция компенсации для электромагнитного дефлектора. Номер  $k$  наивысшей корректируемой гармоники был выбран равным 11, так как амплитуда более высоких гармоник значительно ниже. Для использованного в экспериментах электромагнитного дефлектора АЧХ и ФЧХ не зависели от частоты в полосе частот до 110 Гц, т. е. до одиннадцатой гармоники при скорости вращения шпинделя  $10 \text{ с}^{-1}$ . Полученная функция компенсации и ее амплитудный спектр показаны на рис. 7, *c*. Функция компенсации была загружена в цифровой драйвер, и произведена запись нового кольца. Результат компенсации был оперативно проконтролирован с помощью фотоэлектрического метода измерения диаметров. Предполагалось, что если правильно скомпенсированы измеряемые этим методом четные гармоники, то нечетные гармоники скомпенсированы не хуже. Полученная функция отклонения диаметров показана на рис. 7, *d*. Сравнение амплитуд компенсируемых гармоник на рис. 7, *a, d* демонстрирует уменьшение отклонения траектории движения пучка от 2–3 раз на гармониках (4, 6, 10) с малой амплитудой до 6 раз для гармоник (2, 8) с большой амплитудой. Интегральное уменьшение отклонения траектории составило 5 раз по сравнению с усредненной функцией отклонения  $\Delta x_{mr}(\varphi)$  на рис. 7, *a* после устранения из нее первой гармоники.

Запись тестовых дифракционных элементов (линз Френеля) на CLWS-300 (Институт технической оптики Университета г. Штутгарта) с одинаковыми параметрами с включенным и выключенным дефлектором показала уменьшение среднеквадратичного значения неосесимметричной ошибки формируемого волнового фронта в 4,2 раза [17].

**Заключение.** Предложен и математически обоснован фотоэлектрический метод измерения траектории движения записывающего пучка для систем лазерной записи с круговым сканированием. Метод отличается от известного метода измерения диаметров записанного кольца тем, что позволяет измерить четные и нечетные гармоники радиальных биений шпинделя. Это достигается за счет поворота подложки относительно планшайбы шпинделя на  $180^\circ$  после записи кольца и измерений радиусов кольца с диаметрально противоположной стороны по отношению к положению лазерного пучка при записи. Юстировка пластины по углу должна быть произведена с точностью  $1/(10k)$  рад, где  $k$  – номер самой высокой корректируемой гармоники. Ошибка совмещения центра записанного кольца с осью вращения шпинделя после поворота подложки на  $180^\circ$  приводит к появлению первой гармоники, которая может быть удалена при последующем спектральном анализе.

Предложенный метод измерения траектории пучка и метод расчета функции компенсации для ее коррекции дефлектором проверены на практике. Экспериментально получено уменьшение отклонения траектории записывающего пучка от круговой формы в 5 раз и уменьшение среднеквадратичного значения неосесимметричной ошибки волнового фронта, формируемого тестовыми линзами Френеля, в 4,2 раза.

Автор выражает благодарность С. Райхельту (Институт технической оптики Университета г. Штутгарта, Германия) за помощь в компьютерной обработке экспериментальных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Schwider J., Burov R. Testing of aspherics by means of rotational-symmetric synthetic holograms // Opt. Appl. 1976. VI, N 3. P. 83.
2. Koronkevich V. P., Kiriyanov V. P., Kokoulin V. P. et al. Fabrication of kinoform optical elements // Optik. 1984. 67. S. 257.
3. Goltsov W., Liu S. Polar coordinate laser writer for binary optics fabrication // Proc. SPIE. 1990. 1211. P. 137.
4. Nomura T., Kamiya K., Miyashiro H. et al. An instrument for manufacturing zone-plates by using a lathe // Precis. Eng. 1994. 16, N 4. P. 290.
5. Bowen J. P., Michaels R. L., Blough C. G. Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation // Appl. Opt. 1997. 36. P. 8970.
6. Burge J. H. Measurement of large convex aspheres // Proc. SPIE. 1996. 2871. P. 362.
7. Cherkashin V. V., Churin E. G., Korolkov V. P. et al. Processing parameters optimization for thermochemical writing of DOEs on chromium films // Proc. SPIE. 1997. 3010. P. 168.
8. Pruss C., Reichelt S., Tiziani H. J. Specification and characterization of CGHs for interferometrical testing // SPIE. 2002. 4778. P. 206.
9. Коронкевич В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. и др. Синтез дифракционных оптических элементов в полярной системе координат: погрешности изготовления и их измерение // Автометрия 1997. № 6. С. 42.
10. 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, N 8. P. 1295.
11. Castle P. How to measure Roundness // Amer. Mach. December 1993. P. 41.
12. Martin D. Using Capacitance Probes to Measure the Limit of Machine Contouring Performance // <http://www.lionprecision.com/documents/other/articles/machinecontour.pdf>
13. Wang C. A new laser non-contact method for the measurement of spindle runout error motion // Proc. of ASPE. 2001. P. 1.
14. Burge J. H. Certification of null correctors for primary mirrors // Proc. SPIE. 1994. 1994. P. 248.
15. Полещук 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.
16. Poleshchuk A. G., Korolkov V. P., Cherkashin V. V. et al. Polar coordinate laser writing system: error analysis of fabricated DOEs // Proc. SPIE. 2001. 4440. P. 161.
17. Pruss C., Reichelt S., Korolkov V. et al. Performance improvement of CGHs for optical testing // Proc. SPIE. 2003. 5144. P. 460.

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
E-mail: korolkov@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию  
22 июля 2003 г.*