

УДК 534.4 : 621.317

**ДИНАМИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ  
КООРДИНАТЫ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА  
ПРИ ЗАПИСИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ  
ДИФРАКЦИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ АСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ\***

**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*

Создан метод увеличения точности работы круговой лазерной записывающей системы при записи крупногабаритных дифракционных оптических элементов в полярной системе координат и представлены результаты его использования. Предложен и исследован алгоритм коррекции ошибок позиционирования в процессе записи на круговой лазерной записывающей системе, разработанной в Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН. Показаны изготовленные с использованием разработанного метода высокоточные дифракционные оптические элементы и результаты применения этих элементов для контроля асферического зеркала диаметром 6,5 м нового космического телескопа «Джеймс Уэбб».

*Ключевые слова:* дифракционные оптические элементы, лазерная запись, нанопозиционирование.

DOI: 10.15372/AUT20170309

**Введение.** Ряд направлений современной оптики, например контроль формы асферических зеркал крупных телескопов [1], формирование лазерных пучков больших размеров [2], контроль угловых перемещений [3] и т. д., ставят задачи разработки уникального 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. Такие устройства (круговые лазерные записывающие системы (КЛЗС)) были впервые разработаны в Институте автоматики и электрометрии (ИАиЭ СО РАН) [4] и затем доведены до практической степени готовности совместно с Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН [5]. В настоящее время КЛЗС используются в ряде научных и промышленных организаций России, Германии, Китая [6–9]. Попытки создания аналогичных установок неоднократно предпринимались и в других странах [10, 11].

Исходные технические характеристики КЛЗС могут быть существенно улучшены с помощью новых алгоритмов позиционирования записывающего пучка лазера.

Время записи крупноразмерного дифракционного оптического элемента (ДОЭ) составляет десятки часов. Ключевой момент при разработке прецизионных устройств записи — обеспечение долговременной нанометровой стабильности определения положения текущей координаты записывающего пучка по отношению к началу координат, в качестве которо-

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01721) и частичной поддержке Сибирского отделения РАН (междисциплинарный интеграционный проект № 112).

го был выбран центр вращения подложки. В [12] представлен метод точного совмещения оси вращения оптической заготовки ДОЭ с центром записывающего лазерного пучка и результаты его применения.

В предлагаемой работе описан разработанный и исследованный новый алгоритм коррекции ошибок позиционирования КЛЗС [13] в процессе записи. Разработан метод изготовления ДОЭ с возможностью точного совмещения начала системы полярных координат, в которой задаётся положение записывающего пучка, с осью вращения оптической заготовки в течение всего времени записи. Представлены практические результаты изготовления ДОЭ для контроля асферического зеркала диаметром 6,5 м нового космического телескопа «Джеймс Уэбб» (JWST — James Webb Space Telescope) [14, 15].

**Постановка задачи и подход к её решению.** Использование реперной микроструктуры [12] позволяет совместить ось вращения оптической заготовки ДОЭ с центром записывающего лазерного пучка с погрешностью в несколько нанометров. Таким образом, начало системы полярных координат, в которой задаётся положение записывающего пучка при записи элементов, оказывается совмещённым с осью вращения оптической заготовки ДОЭ. Однако в процессе записи элемента из-за температурного дрейфа, нестабильности диаграммы излучения лазера, вибраций установки и т. д. между этими системами координат возникает рассогласование, которое за несколько часов может достигать 0,5–1,5 мкм, что приводит к полной неработоспособности изготавливаемого ДОЭ. Поэтому актуальной является задача разработки метода коррекции положения начала полярной системы координат в процессе записи элемента. Так как бóльшая часть дестабилизирующих факторов изменяется по времени достаточно медленно, предлагается в процессе записи через некоторые интервалы времени перемещать записывающий пучок лазера в область реперной микроструктуры, проводить измерение величины рассогласования и при дальнейшей записи делать программную коррекцию системы позиционирования [12].

**Динамическая коррекция позиционирования лазерного пучка.** Для обеспечения максимально точного совмещения оси вращения шпинделя и начала координат системы позиционирования лазерного пучка в процессе записи ДОЭ нами предложен метод динамической коррекции. Суть метода состоит в определении временной зависимости величины дрейфа реперной структуры вдоль осей декартовой системы координат устройства позиционирования пучка, вычислении скорости дрейфа и коррекции координат пучка лазерного излучения по отношению к оси вращения оптической заготовки в зависимости от скорости дрейфа реперной структуры непосредственно в процессе изготовления ДОЭ [16].

Как показано на рис. 1, для определения скорости дрейфа область записи структуры ДОЭ 1 на оптической заготовке 2 разбивают на кольцевые зоны (например, 3–5). Процесс записи ДОЭ прерывают между зонами (штриховые линии) для измерения текущего значения смещения  $dx_i$  и  $dy_i$  реперной структуры по осям  $X$  и  $Y$  в момент времени  $t_i$  относительно центра вращения заготовки 7. Реперная структура 8 предварительно записывается в области 9, свободной от структуры ДОЭ.

Текущие значения  $dx_i$  и  $dy_i$  наряду с результатами измерений на предыдущих зонах используются для расчёта оценочной скорости дрейфа реперной структуры на следующей зоне записи. Величина расчётной скорости дрейфа на очередной зоне ДОЭ вычисляется по формулам

$$Vx = f(dx_i, t_i, dX, T, P); \quad Vy = f(dy_i, t_i, dY, T, P), \quad (1)$$

где  $f$  — функция экстраполяции расчёта оценочной скорости дрейфа реперной структуры для следующей зоны записи;  $dX, dY$  — массивы значений измерений смещения реперной структуры по осям  $X, Y$  на предыдущих  $(0, 1, \dots, i - 1)$  зонах;  $T$  — массив значений времени измерения смещения реперной структуры на предыдущих зонах;  $P$  — параметры

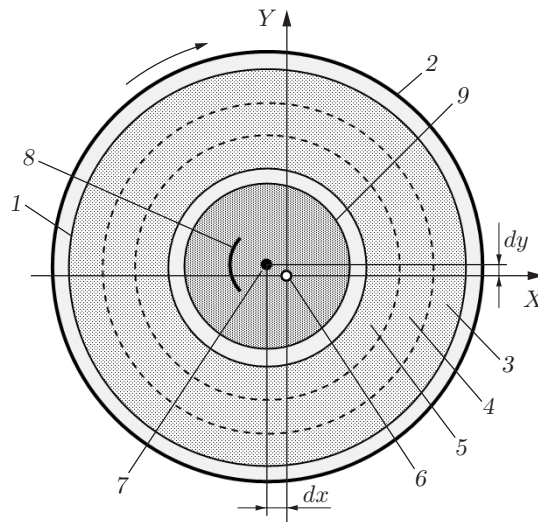


Рис. 1. Схема деления области записи ДОО на зоны (не в масштабе)

расчёта оценочной скорости дрейфа. Изменение скорости дрейфа по времени происходит плавно, поэтому в качестве базовой функции  $f$  используется линейная экстраполяция, которая имеет два компонента. Первый компонент  $V_1$  рассчитывается на большом временном диапазоне (1–1,5 ч) и определяет долгосрочную скорость дрейфа, второй компонент  $V_2$  — на малом временном диапазоне (10–20 мин) и предназначен для коррекции краткосрочных изменений скорости дрейфа. Результирующая скорость дрейфа рассчитывается отдельно по осям  $X$  и  $Y$  по формуле  $V = V_1K_1 + V_2K_2$ . Времена выборки для линейной экстраполяции и весовые коэффициенты  $K_b$ ,  $K_d$  определяются экспериментальным путём и задаются в наборе параметров  $P$ .

Вычисленные оценочные скорости дрейфа  $V_x$  и  $V_y$  используются для коррекции положения пучка лазерного излучения в течение записи следующей зоны. Расчёт значений координат пучка по осям  $X$  и  $Y$  производится по следующим формулам:

$$X_w = X_{\text{curr}} + Cx, \quad Cx = Cx_p + Vx(t_c - t_p), \quad (2)$$

$$Y_w = Cy, \quad Cy = Cy_p + Vy(t_c - t_p), \quad (3)$$

где  $Cx$  и  $Cy$  — текущие значения коррекции по осям  $X$  и  $Y$ ;  $t_p$  — время предыдущей коррекции;  $Cx_p$  и  $Cy_p$  — предыдущие значения коррекции по осям, вычисленные в момент времени  $t_p$ ;  $t_c$  — текущий момент времени;  $X_{\text{curr}}$  — текущая координата по оси  $X$ , являющаяся расчётной радиальной координатой для записи элемента.

На рис. 2 изображена блок-схема, описывающая основу алгоритма записи ДОО с динамической коррекцией позиционирования лазерного пучка. Блок-схема представляет вариант записи ДОО в направлении от максимальной радиальной координаты к центру подложки. Такой тип записи позволяет уменьшить влияние погрешностей записи на больших радиусах, на которых дифракционные периоды зон ДОО, как правило, минимальны.

Основные входные параметры алгоритма определяют диапазон записи ДОО и параметры расчёта коррекции:  $X_{\text{min}}$ ,  $X_{\text{max}}$  — минимальная и максимальная радиальные координаты записи ДОО,  $X_{\text{step}}$  — радиальный шаг записи,  $Zn$  — количество зон разбиения ДОО в диапазоне записи, между которыми производится измерение текущего смещения реперной структуры,  $P$  — набор параметров, используемый в функции расчёта скорости дрейфа.

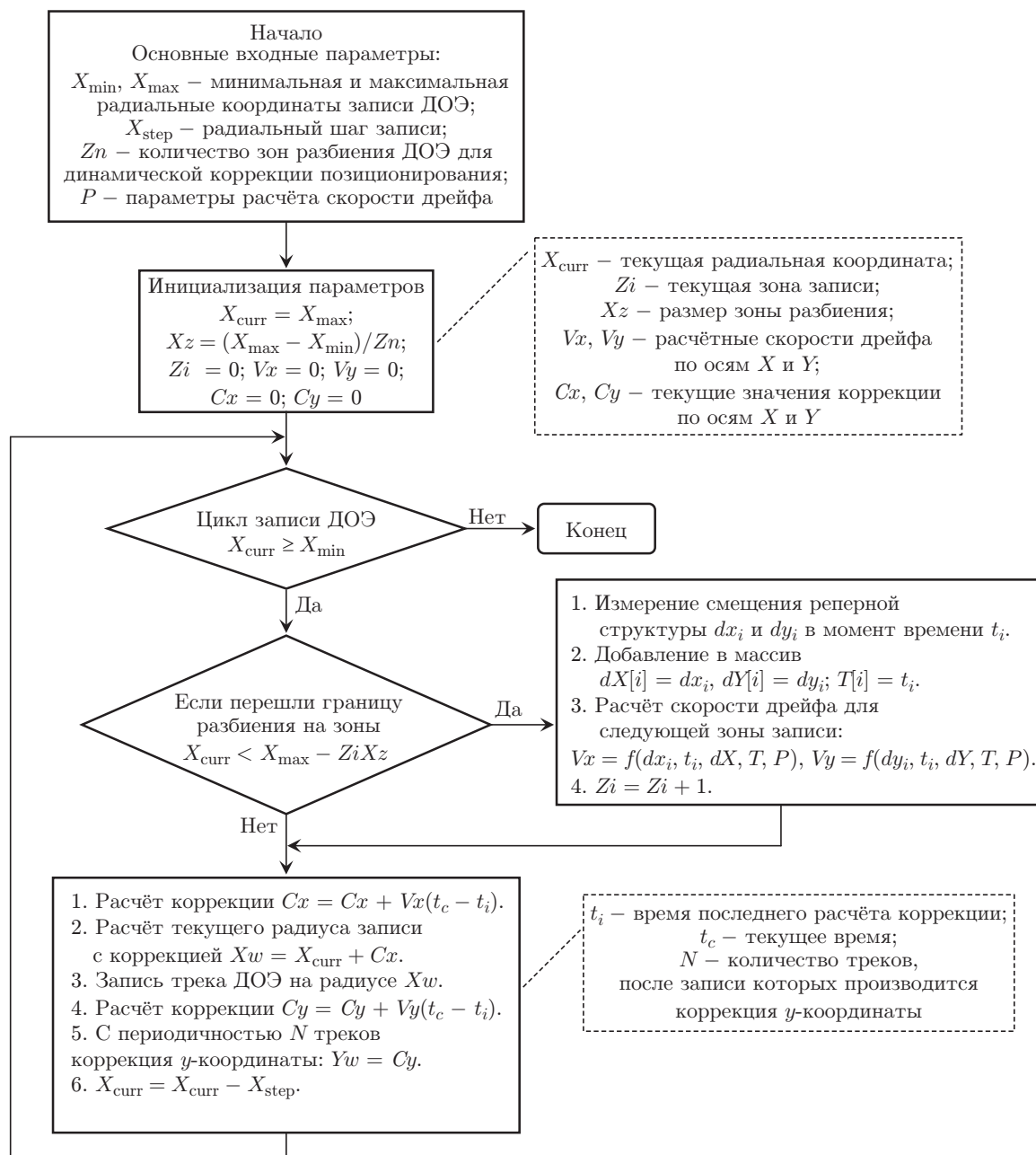


Рис. 2. Блок-схема, представляющая собой алгоритм записи ДОО с динамической коррекцией позиционирования лазерного пучка

**Экспериментальные результаты.** Описанный выше метод позиционирования реализован в установке CLWS-300IAE и показал свою эффективность при изготовлении крупноразмерных прецизионных ДОО. Приведённые экспериментальные результаты получены на установке с основными характеристиками, данными в табл. 1.

**Проверка алгоритма позиционирования.** Метод позиционирования экспериментально проверялся при записи тестовой дифракционной структуры диаметром 140 мм. На рис. 3 показаны типичные зависимости временного дрейфа координаты записи с коррекцией, без коррекции, а также изменение температуры воздуха в области измерительного пучка интерферометра контроля перемещения записывающей головки. Запись ДОО осуществлялась с внешнего радиуса по направлению к центру. Для определения скорости

Таблица 1

## Основные характеристики КЛЗС CLWS-300IAE

Параметр	Значение
Максимальный диаметр области записи	до 280 мм
Толщина подложки	1–25 мм
Ширина минимального элемента записываемой структуры	<0,6 мкм (кольцевой трек), 1 мкм (прямая линия)
Скорость вращения	до 15 об/с
Биения шпинделя (радиальные)	<10 нм (СКО)
Погрешность перемещения по радиусу	<20 нм (СКО)
Погрешность определения угла поворота	1–2 угл. с (СКО)
Тактовая частота записи	до 40 МГц
Записывающие лазеры	532 нм (2 Вт, CW DPSS), 405 нм (15 мВт, CW LD)
Методы записи	термохимическая технология (плёнки хрома), фоторезистная технология

дрейфа процесс записи автоматически прерывался каждые 10–12 мин и проводился поиск координаты центра вращения с помощью сканирования реперной микроструктуры. Видно, что дрейф центра вращения (кривая 2) имел явно выраженную температурную зависимость (кривая 3) и составил около 0,4 мкм за 140 мин записи, что согласуется с данными, полученными в работе [17]. При коррекции максимальная погрешность позиционирования не превышала 50 нм (кривая 1), а среднеквадратичная погрешность составляла 10 нм.

**Запись и контроль тестового ДОЭ.** Для экспериментальной проверки процесса записи крупногабаритных ДОЭ был изготовлен дифракционный имитатор (ДИ) отражающего сферического зеркала (диаметр 200 мм и радиус кривизны  $R = 600$  мм с минимальным периодом кольцевых зон  $T_{ДИ} = 1,9$  мкм). Дифракционный имитатор изготавливался по термохимической технологии на оптической подложке из ситалла (плоскостность около  $0,01\lambda$  (RMS), диаметр 230 мм), покрытой плёнкой хрома. Время записи ДИ на установке CLWS-300IAE составляло около 200 минут. Анализ отражённого и дифрагированного

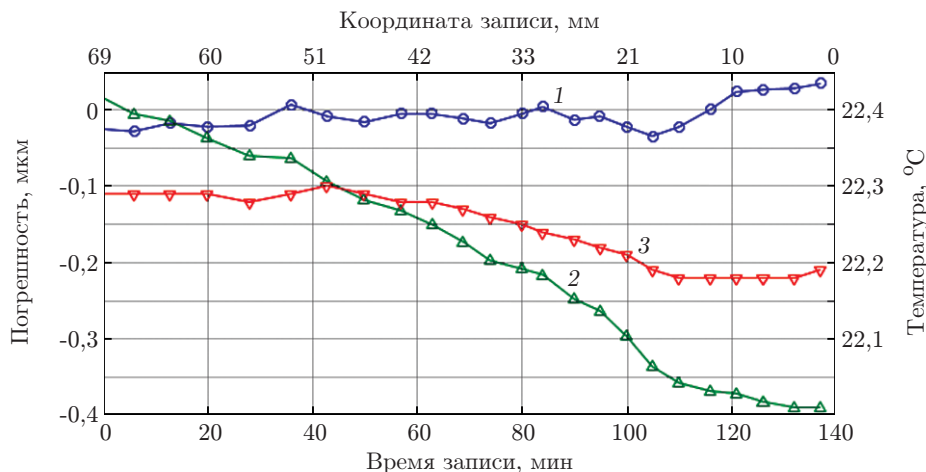


Рис. 3. Зависимости погрешностей позиционирования с коррекцией (кривая 1), без коррекции (кривая 2) и изменение температуры от времени записи (кривая 3)

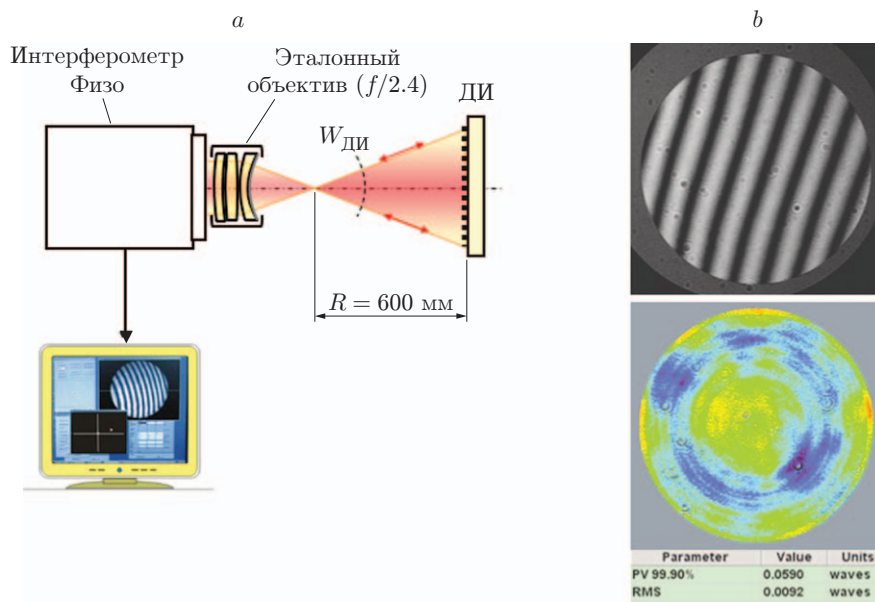


Рис. 4. Контроль изготовленного тестового ДИ: *a* — схема измерений, *b* — интерферограмма и фазовая карта отражённого волнового фронта

на структуре ДИ волнового фронта проводился с помощью интерферометра Физо типа "Intellium Z-100" и эталонного объектива с апертурой  $f/2.4$ . Этот объектив формировал сферический волновой фронт  $W_s$ , который отражался и дифрагировал (дифракционный порядок  $m = +1$ ) на структуре ДИ, а затем поступал обратно в интерферометр. На рис. 4 показаны схема измерений, типичная интерферограмма и карта волнового фронта ДИ. Погрешность волнового фронта составила около  $W_{ДИ} = 0,059\lambda$  (PV) и  $0,0092\lambda$  (RMS). Следует отметить, что реальная погрешность изготовления структуры ДИ несколько меньше, так как в полученную погрешность входят погрешность эталонного объектива и плоскостность подложки ДИ.

**Дифракционный оптический элемент для контроля главного зеркала телескопа JWST.** Разработанный метод динамической коррекции погрешностей позиционирования был применён при изготовлении комплекта ДОЭ, используемого для калибровки оптической системы контроля изготовления главного зеркала космического телескопа JWST. Этот телескоп — орбитальная инфракрасная обсерватория массой 6,5 тонн — будет находиться в космическом пространстве в точке Лагранжа L2, отстоящей от нашей

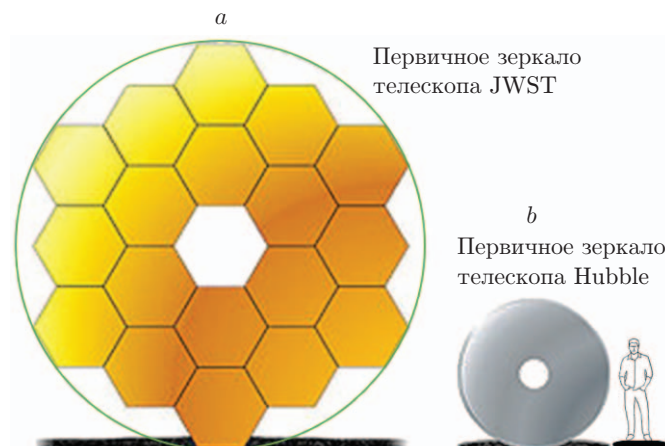


Рис. 5. Главные зеркала телескопов

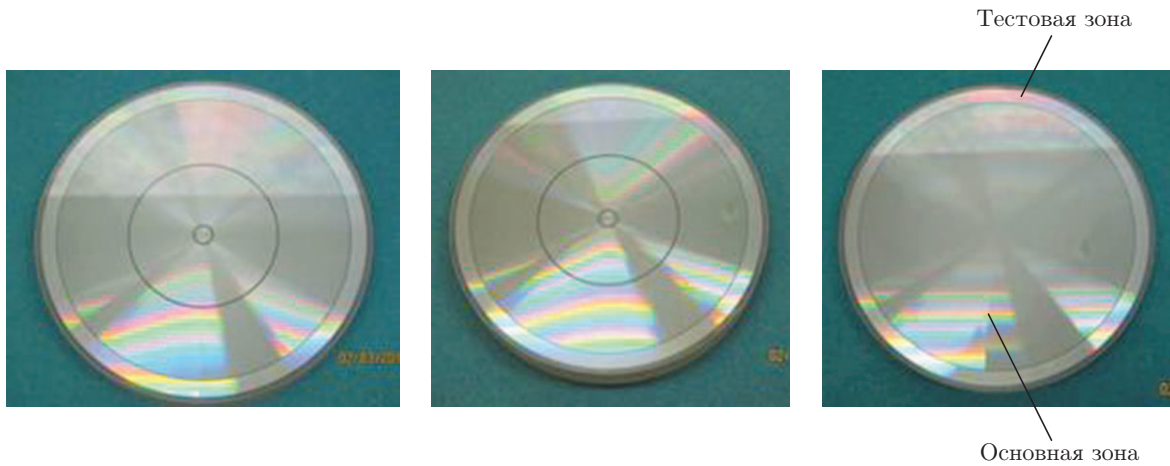


Рис. 6. Фотографии трёх изготовленных ДОЭ диаметром 165 мм

планеты на 1,5 млн км [18]. В конструкцию JWST входят сегментированное, покрытое золотом асферическое зеркало диаметром 6,6 м в поперечнике (рис. 5, *a*). Площадь этого зеркала в 5 раз больше, чем у телескопа Hubble (рис. 5, *b*). Главное зеркало телескопа имеет апертуру  $f/1.2$  и состоит из 18 бериллиевых сегментов, каждый из которых имеет 1,5 м в поперечнике. Радиус кривизны главного зеркала  $R \cong 16$  м.

Дифракционные оптические элементы для контроля главного зеркала изготавливались по термохимической технологии [19] на ситалловых подложках диаметром 165 мм и толщиной 20 мм. Размер ДОЭ около 160 мм. Плоскостность подложек проверялась интерферометрическим методом и составляла  $\sim 0,05\lambda$ . При контроле зеркала погрешность плоской поверхности вычиталась из результатов измерений. Комплект состоял из шести ДОЭ для контроля оптической системы зеркала при нормальной и криогенной температурах и в ИК-диапазоне. На рис. 6 приведены фотографии некоторых ДОЭ.

Каждый ДОЭ состоял из основной эталонной зоны и тестовой структуры (кольцевой зоны). В кольцевой зоне одновременно с основной записывался ДОЭ сферического волнового фронта. Этот вспомогательный ДОЭ проверялся интерферометрически, как показано на рис. 7. В процессе записи каждого ДОЭ проводился непрерывный мониторинг погрешнос-

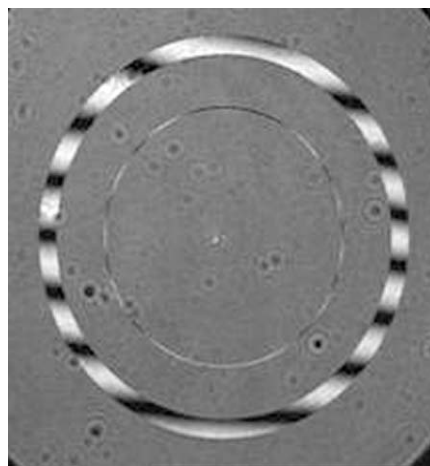


Рис. 7. Типичная интерферограмма волнового фронта от кольцевой структуры

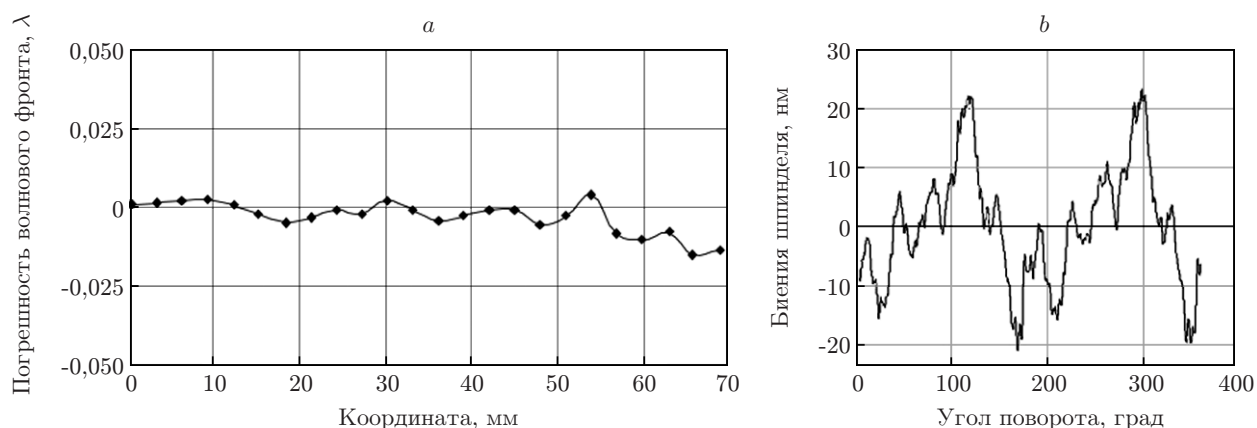


Рис. 8. Погрешности записи: *a* — волнового фронта ДОЭ, *b* — биения шпинделя

Таблица 2

#### Бюджет погрешностей изготовления ДОЭ

Погрешность изготовления ДОЭ ( $\lambda$ )	Величина RMS
Плоскостность подложки	0,011
Погрешности волнового фронта, вызванные дрейфом	0,006
Погрешности волнового фронта, вызванные траекторией вращения шпинделя	0,004
Суммарная погрешность (RSS)	0,013

тей КЛЗС. В качестве примера на рис. 8, *a* показана зависимость погрешности волнового фронта от координаты одного из изготовленных ДОЭ. Величина среднеквадратичного отклонения не превышала  $0,006\lambda$  (или 4 нм).

При записи ДОЭ также необходимо учитывать отклонение траектории вращения шпинделя от идеального круга [20]. На рис. 8, *b* приведена кривая биений аэростатического шпинделя КЛЗС. В табл. 2 сведены суммарные ошибки изготовления данного ДОЭ. Видно, что суммарная ошибка волнового фронта не превышает  $0,013\lambda$  (или 8 нм), причём основной вклад вносит плоскостность подложки. При вычитании погрешности плоскостности подложки эта величина уменьшается до 4 нм.

**Заключение.** Разработанная в ИАиЭ СО РАН круговая лазерная записывающая система — это высокоточное и универсальное устройство для записи ДОЭ различных типов: решёток, зонных пластинок, синтезированных голограмм, оптических шкал и т. д. Точность, пространственное разрешение и рабочее поле КЛЗС достаточны для решения широкого круга задач в оптике, измерительной технике, микромеханике, лазерной технике и физике. В настоящее время задача изготовления крупногабаритных ДОЭ с минимальным размером элементов микроструктуры (менее 0,5 мкм), световым полем в несколько сотен миллиметров и абсолютной погрешностью координат топологии менее 10–20 нм для контроля асферики может быть решена только с использованием разработанной КЛЗС.

Представлен новый алгоритм динамической коррекции ошибок позиционирования КЛЗС в процессе записи. Данный алгоритм базируется на методе прецизионного совмещения записывающего лазерного пучка с осью вращения оптической заготовки, описанном в [12]. Динамическая коррекция в процессе записи реализуется методом, включающим: определение временной зависимости величины дрейфа реперной структуры вдоль осей декартовой системы координат устройства позиционирования пучка, вычисление скорости дрейфа и коррекцию координат пучка лазерного излучения по отношению к оси вращения



оптической заготовки в зависимости от скорости дрейфа реперной структуры непосредственно в процессе изготовления ДОЭ.

Экспериментальная проверка разработанного метода совмещения начала системы координат, в которой задаётся положение лазерного пучка при записи ДОЭ, с осью вращения оптической заготовки показала погрешность поиска начала координат, не превышающую 3,5 нм за время 50 мин. С помощью предложенного адаптивного метода коррекции ошибок позиционирования КЛЗС в процессе записи длительностью 140 мин было выявлено, что максимальная погрешность не превышает 50 нм, а СКО составляет не более 10 нм.

По результатам изготовления и интерферометрического контроля ДОЭ с диаметром структуры 200 мм и фокусным расстоянием 300 мм ( $f/1.5$ ) погрешность волнового фронта составила около  $0,06\lambda$  (PV) и  $0,01\lambda$  (RMS), что соответствует погрешности положения зон дифракционной структуры менее 100 нм почти за 4 часа работы установки.

В качестве примера практической реализации полученных результатов изготовлен комплект из шести прецизионных синтезированных голограмм диаметром до 165 мм для контроля главного зеркала космического телескопа JWST. Показано, что суммарная ошибка волнового фронта одного из изготовленных ДОЭ не превышает  $0,013\lambda$  (или 8 нм), причём основной вклад вносит плоскостность подложки. При вычитании погрешности плоскостности подложки эта величина уменьшается до 4 нм.

Полученные результаты смогут значительно увеличить точность работы существующих и вновь создаваемых КЛЗС.

Авторы выражают благодарность коллективу лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН за помощь в проведении экспериментов и в работе с КЛЗС.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абдулкадыров М., Семенов А.** Современные способы изготовления астрономических и космических зеркал // Фотоника. 2015. № 3. С. 62–79.
2. **McAulay A. D.** Military Laser Technology for Defense: Technology for Revolutionizing 21st Century Warfare. Wiley-Interscience, 2011. 328 p.
3. **Кириянов В. П., Кириянов 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.
4. **Ведерников В. М., Вьюхин В. Н., Кириянов В. П. и др.** Прецизионный фотопостроитель для синтеза оптических элементов // Автометрия. 1981. № 3. С. 3–16.
5. **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.
6. **Кручинин Д. Ю., Яковлев О. Б., Андронов М. П.** Исследование влияния условий синтеза круговых оптических шкал, изготовленных с использованием лазерного генератора изображений CLWS-300, на их угловые погрешности // Оптический журнал. 2012. **79**, № 7. С. 41–44.
7. **Казанский Н. Л.** Исследовательский комплекс для решения задач компьютерной оптики // Компьютерная оптика. 2006. № 29. С. 58–77.
8. **Annual report 2013/2014** / Institut für Technische Optik Universität Stuttgart. Stuttgart, 2014. P. 3. URL: [http://www.ipv.uni-stuttgart.de/publikationen/jahresberichte/jb2013\\_2014.pdf](http://www.ipv.uni-stuttgart.de/publikationen/jahresberichte/jb2013_2014.pdf) (дата обращения: 10.08.2016).

9. **Duoshu W., Luo C., Xiong Y. et al.** Fabrication technology of the centrosymmetric continuous relief diffractive optical elements // *Phys. Procedia*. 2011. **18**. P. 95–99.
10. **Rhee H.-G., Song J.-B., Kim D.-I. et al.** Diffractive optics fabrication system for large aspheric surface testing // *Journ. Korean Phys. Soc.* 2007. **50**, N 4. P. 1032–1036.
11. **Bowen J. P., Michaels R. L., Blough C. G.** Generation of large-diameter diffractive elements with laser pattern generation // *Appl. Opt.* 1997. **36**, Is. 34. P. 8970–8975.
12. **Шиманский Р. В., Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В.** Совмещение записывающего пучка с осью вращения дифракционной структуры при синтезе дифракционных оптических элементов в полярной системе координат // *Автометрия*. 2017. **53**, № 2. С. 30–38.
13. **Пат. 2540065 РФ.** Способ изготовления дифракционного оптического элемента (ДОЭ) /А. Г. Полещук, В. П. Корольков, Р. В. Шиманский, В. В. Черкашин. Оpubл. 27.01.2015, Бюл. № 3.
14. **Полещук А. Г., Корольков В. П., Насыров Р. К.** Дифракционные оптические элементы для управления параметрами лазерного излучения и прецизионного контроля формы асферических поверхностей // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2015. **5**, № 2. С. 232–238.
15. **Olczak G., Wells C., Fischer D. J., Connolly M. T.** Wavefront calibration testing of the James Webb Space Telescope primary mirror center of curvature optical assembly // *Proc. SPIE*. 2012. **8450**. 84500R. DOI: 10.1117/12.927003.
16. **Шиманский Р. В., Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В.** Методы увеличения точности нанопозиционирования в системах синтеза дифракционной оптики // *Интерэкспо Гео-Сибирь*. 2015. **5**, № 1. С. 65–70.
17. **Кирьянов А. В., Кирьянов В. П.** Улучшение метрологических характеристик лазерных генераторов изображений с круговым сканированием // *Автометрия*. 2010. **46**, № 5. С. 77–93.
18. **Sabelhaus P. A., Decker J. E.** An overview of the James Webb Space Telescope (JWST) project // *Proc. SPIE*. 2004. **5487**. 550. DOI: 10.1117/12.549895.
19. **Вейко В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. и др.** Исследование пространственного разрешения лазерной термохимической технологии записи дифракционных микроструктур // *Квантовая электроника*. 2011. **41**, № 7. С. 631–636.
20. **Корольков В. П.** Измерение и коррекция траектории движения лазерного пучка в круговых записывающих системах // *Автометрия*. 2003. **39**, № 6. С. 13–25.

*Поступила в редакцию 10 августа 2016 г.*

---