

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ

УДК 535.8

### ИЗГОТОВЛЕНИЕ И СЕРТИФИКАЦИЯ ДИФРАКЦИОННОГО КОРРЕКТОРА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА ДИАМЕТРОМ 6 МЕТРОВ БОЛЬШОГО ТЕЛЕСКОПА АЗИМУТАЛЬНОГО РАН\*

Р. К. Насыров, А. Г. Полещук

*Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1  
E-mail: NasyrovRK@iae.sbras.ru*

Разработаны и изготовлены дифракционные корректор и имитатор для интерферометрического контроля формы поверхности шестиметрового главного зеркала Большого телескопа азимутального РАН. Исследовано влияние погрешностей изготовления и юстировки на качество измерительного волнового фронта. Проведён контроль корректора с помощью внеосевого дифракционного имитатора, работающего в режиме отражения. Измеренная погрешность составила менее  $0,0138\lambda$  (RMS).

*Ключевые слова:* дифракционная оптика, интерферометрия, контроль асферической оптики.

DOI: 10.15372/AUT20170511

**Введение.** Для интерференционного контроля формы асферических поверхностей в процессе производства в настоящее время используются линзовые, зеркально-линзовые, дифракционные корректоры (ДК) волнового фронта [1–3]. Они преобразуют сферический или плоский волновой фронт с выхода интерферометра в эталонный асферический, который должен соответствовать форме контролируемой поверхности. Однако из-за погрешностей изготовления или сборки корректоров возможно появление ошибок, приводящих к серьёзным последствиям при производстве дорогостоящих астрономических зеркал, как это случилось, например, с телескопом «Хаббл» [4]. В настоящее время для контроля качества (сертификации) всех типов корректоров широко используются дифракционные имитаторы (ДИ) [5, 6], которые воспроизводят волновой фронт, отражаемый от контролируемой поверхности идеальной формы, т. е. на этапе сертификации ДИ устанавливается на расчётном расстоянии от ДК и регистрируется интерференционная картина. Следует указать, что в ряде случаев погрешность установки ДИ по всем координатам не должна превышать долей микрона. Однако юстировка ДИ относительно корректора обычно производится методом «наилучшей установки» [7] по интерференционной картине. При этом возможна некоторая взаимная компенсация погрешностей интерферометра, корректора, имитатора их юстировкой. Также метод наилучшей установки не позволяет выявить погрешность радиуса кривизны волнового фронта корректора. Одним из путей решения проблемы может стать введение в ДК и ДИ дополнительных дифракционных структур, которые обеспечивают объективную взаимную прецизионную юстировку элементов [8].

Целью данной работы является создание метода интерференционного контроля и юстировки взаимного положения (пять степеней свободы) ДК и ДИ с погрешностью в доли

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 17-19-01721).

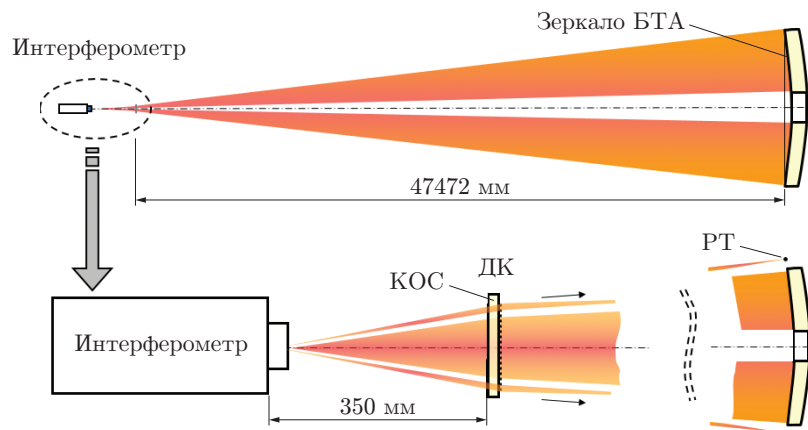


Рис. 1. Схема контроля главного зеркала БТА с помощью ДК (РТ — реперные точки)

микрона с помощью дополнительных дифракционных структур, а также метода сертификации ДК. Предлагаемые методы применены при изготовлении и сертификации ДК и ДИ для контроля нового главного зеркала Большого телескопа азимутального (БТА) РАН.

**Большой азимутальный телескоп** является самым большим российским телескопом [9], главное зеркало которого имеет форму параболы ( $x^2 = 2R_0z$ ) с радиусом  $R_0 = 48000$  мм, диаметром 6050 мм и толщиной 650 мм [10] (зеркало изготовлено на Лыткаринском заводе оптического стекла (АО «ЛЗОС», г. Лыткарино) и принято в эксплуатацию в 1975 году [10]). Для БТА было изготовлено два зеркала, одно из которых установлено на телескопе, а другое в настоящее время проходит стадию переполіровки в ЛЗОС [11] вследствие деградации поверхности. Контроль формы поверхности восстанавливаемого зеркала производится интерферометрическим методом (интерферометр ИТ-172) с использованием ДК, который был изготовлен в Институте автоматики и электрометрии (ИАиЭ) СО РАН (г. Новосибирск) [12], и описывается в данной работе.

**Оптическая схема контроля.** Схема контроля главного зеркала приведена на рис. 1. Дифракционный корректор представляет собой осесимметричную фазовую (бинарную) дифракционную структуру и преобразует падающий на него сферический волновой фронт от интерферометра в асферический, который соответствует форме зеркала. Вокруг основной структуры расположена вспомогательная кольцевая отражающая структура (КОС), служащая для установки ДК относительно интерферометра. При правильной установке ДК в области, соответствующей этому кольцу, на интерферограмме возникает поле равномерной интенсивности (бесконечная полоса). Расстояние от фокуса исходного сферического пучка до ДК равно 350 мм, а расстояние между зеркалом и ДК составляет 47472 мм. Для упрощения юстировки зеркала относительно ДК внутри кольцевой структуры выполнены вспомогательные структуры, которые фокусируют излучение интерферометра в четыре реперные точки по краям зеркала. Точки значительно облегчают установку зеркала, расстояние от которого до ДК более 47 метров.

Основной задачей при изготовлении ДК являлась его всесторонняя сертификация, т. е. процедура подтверждения характеристик на соответствие расчётным параметрам. Сертификация ДК проводилась в два этапа: при записи дифракционной структуры и после изготовления с помощью ДИ.

**Оптическая схема сертификации дифракционных корректоров с помощью дифракционных имитаторов.** Разработанная схема сертификации ДК приведена на рис. 2. Дифракционный корректор устанавливается в расчётное положение от фокальной точки сферического пучка интерферометра. Дифракционная структура ДИ рассчитывает-

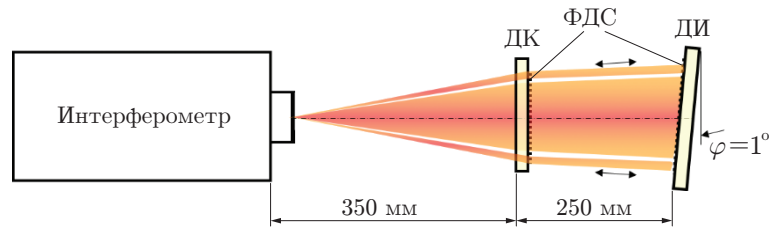


Рис. 2. Схема контроля ДК с помощью ДИ (ФДС — фокусирующие дифракционные структуры)

ся так, что падающий на неё волновой фронт отражается и дифрагирует строго назад, если его форма совпадает с формой контролируемого зеркала. Тогда интерферограмма, полученная с помощью ДИ, будет эквивалентна интерферограмме зеркала идеальной формы.

Особенностью данной схемы является наклон плоскости ДИ на угол  $1^\circ$  [13]. Обычно ДК и ДИ выполняются в виде осесимметричных дифракционных структур [5–7, 14]. В этом случае ошибки, связанные с лазерной записью, минимальны. Однако оба дифракционных элемента имеют кольцевую структуру и располагаются параллельно друг другу вдоль оптической оси. Это неизбежно приводит к возникновению новых дифракционных порядков и появлению областей с паразитной интерференцией на интерферограмме, что делает невозможным сертификацию всего ДК. Наклон ДИ позволяет полностью устранить паразитную интерференцию. Другой особенностью предложенной схемы является введение дополнительных фокусирующих дифракционных структур вне зоны основного элемента. Эти структуры дают возможность с высокой точностью отъюстировать ДК и ДИ между собой.

**Анализ погрешностей контроля зеркала.** Неправильная юстировка ДК относительно интерферометра приводит к искажению волнового фронта и соответственно погрешности измерений. Для точной юстировки ДК используется КОС (см. рис. 1). Анализ, проведённый с помощью программы Zemax [15], подтвердил возможность обеспечить погрешность позиционирования по наклону в пределах  $1,2$  угл. с, по поперечному смещению  $\sim 1,2$  мкм и по продольному смещению  $\sim 35$  мкм. Моделирование показало, что разъюстировка ДК в указанных пределах приводит к погрешности контроля поверхности зеркала в пределах допустимой величины (табл. 1). При расчёте результирующей формы волнового фронта (в двухпроходной схеме) вносилось смещение ДК, после чего получаемая погрешность компенсировалась смещением зеркала.

Таблица 1

Погрешность контроля зеркала в зависимости от смещения ДК

Смещение ДК и возникающая погрешность	Наклон	Поперечное смещение	Продольное смещение
Величина смещения ДК	10 угл. с	10 мкм	100 мкм
Погрешность контроля зеркала	$0,003\lambda/0,0006\lambda$	$0,0002\lambda/0,0003\lambda$	$0,15\lambda/0,04\lambda$
Погрешность после вычитания комы	$0,002\lambda/0,0004\lambda$	$0,0002\lambda/0,0002\lambda$	$0,15\lambda/0,04\lambda$
Погрешность после вычитания астигматизма	$0,003\lambda/0,0006\lambda$	$0,0002\lambda/0,0003\lambda$	$0,15\lambda/0,04\lambda$
Погрешность после вычитания сферической аберрации	$0,003\lambda/0,0006\lambda$	$0,0002\lambda/0,0003\lambda$	$0,04\lambda/0,006\lambda$

Таблица 2

**Погрешность контроля зеркала в зависимости от его смещения**

Смещение зеркала и возникающая погрешность	Наклон	Поперечное смещение	Продольное смещение
Величина смещения зеркала	10 угл. с	2,35 мм	100 мкм
Погрешность контроля зеркала	0,56λ/0,11λ		0,09λ/0,015λ
Погрешность после вычитания комы	0,12λ/0,017λ		0,09λ/0,015λ
Погрешность после вычитания астигматизма	0,56λ/0,11λ		0,09λ/0,015λ
Погрешность после вычитания сферической аберрации	0,56λ/0,11λ		0,05λ/0,007λ

Таблица 3

**Чувствительность к смещению ДИ**

Смещение ДИ и возникающая погрешность	Наклон	Поперечное смещение	Продольное смещение
Величина смещения ДИ	10 угл. с	43 мкм	100 мкм
Погрешность волнового фронта	0,54λ/0,11λ		0,09λ/0,015λ
Погрешность после вычитания комы	0,13λ/0,02λ		0,09λ/0,015λ
Погрешность после вычитания астигматизма	0,54λ/0,11λ		0,09λ/0,015λ
Погрешность после вычитания сферической аберрации	0,54λ/0,11λ		0,005λ/0,007λ

Из табл. 1 видно, что при наклоне возникает в основном кома, при поперечном смещении — астигматизм, а при продольном смещении — сферическая аберрация.

Неправильное выставление зеркала также приводит к погрешности его контроля. В табл. 2 сведены результаты моделирования влияния поперечного смещения зеркала с вычтенной дефокусировкой. При моделировании одновременно со смещением для компенсации наклон вносился так, чтобы количество полос на интерферограмме было минимальным. Соответственно столбцы наклона и смещение в таблице эквивалентны. Важно отметить, что в этом случае погрешность волнового фронта не минимальна. Если подобрать наклон, минимизирующий погрешность волнового фронта, то на интерферограмме будет несколько прямых интерференционных полос. Из таблицы видно, что при поперечном смещении погрешность волнового фронта представляла собой в основном кому, а при продольном смещении — сферическую аберрацию.

Для определения погрешности сертификации промоделировано влияние смещения и наклона ДОО-имитатора на результаты измерений (табл. 3). Из таблицы следует, что погрешности контроля, связанные с поперечным смещением имитатора, примерно соответствуют погрешностям смещения зеркала (см. табл. 2). Это свидетельствует о том, что чувствительность в разъюстировке у зеркала и ДИ имеет один и тот же характер и их применение оправдано.

**Изготовление дифракционных корректоров и имитаторов.** Дифракционные микроструктуры элементов изготавливались на полированных оптических подложках с напылённым слоем хрома толщиной около 50 нм. Изготовление ДК проводилось в два этапа. На первом этапе осуществлялась прямая запись микроструктуры по термохимической технологии [16] с использованием разработанной в ИАиЭ СО РАН установки CLWS-300IAE [17]. На втором этапе с помощью реактивного ионного травления формировалась

Таблица 4

## Основные параметры ДК и ДИ

Тип элемента	Размеры и качество подложки	Основная структура, мм	Вспомогательные структуры, мм	Тип структуры	Минимальный период, мкм	Дифракционная эффективность, %
ДК	Плавленный кварц, $\varnothing 102 \times 12,853$ мм, 0,061/0,01 PV/RMS	$\varnothing 80$	$\varnothing 81-94$	Осевая фазовая	13,5 2,4	40
ДИ	Ситал, $\varnothing 134 \times 17$ мм, 0,07/0,011 PV/RMS	$\varnothing 112$	$\varnothing 113-124$	Внеосевая амплитудная	26	6

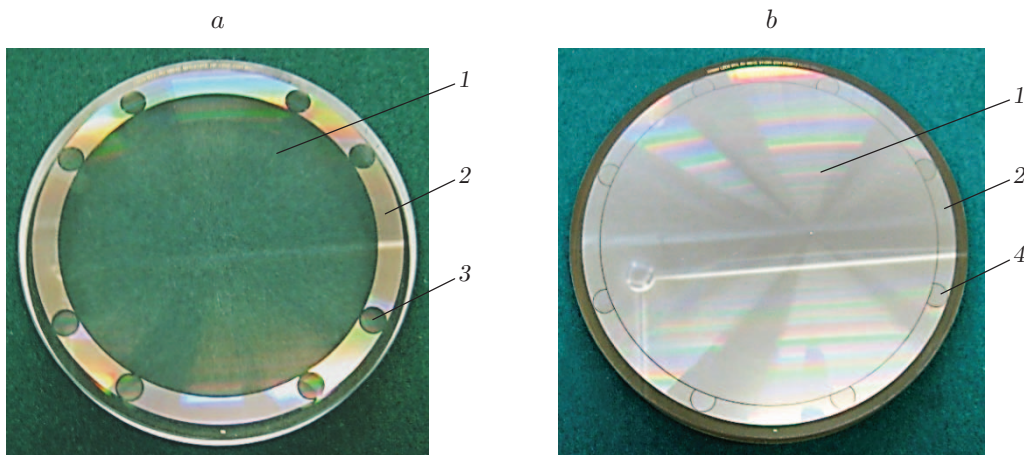


Рис. 3. Дифракционные элементы: корректор (а) и имитатор (b) (1 — основная структура (фазовая); 2 — структура для установки ДК относительно интерферометра; 3, 4 — фокусирующие элементы (фазовые) для установки зеркала и ДИ в заданное положение соответственно)

бинарная фазовая микроструктура глубиной около 680 нм, а остатки хрома удалялись. Дифракционный имитатор изготавливался в один этап по термохимической технологии, так как этот элемент полностью отражающий. Основные параметры элементов приведены в табл. 4, а внешний вид и назначение зон — на рис. 3.

Для обеспечения высокой (10–20 нм) взаимной точности расположения всех структур на подложке и компенсации температурного дрейфа системы записи использовалась динамическая коррекция позиционирования лазерного пучка [18]. В процессе изготовления ДК и ДИ погрешности координат записывающего лазерного пучка измерялись каждые 3 мм. Погрешность волнового фронта вычислялась по формуле [19]

$$W = \lambda \varepsilon_i / T,$$

где  $T$  — период дифракционной структуры,  $\lambda$  — длина волны света,  $\varepsilon$  — погрешность координаты записи в направлении, перпендикулярном дифракционным зонам. На рис. 4 приведены результаты вычисления погрешности волнового фронта в зависимости от радиуса ДК для  $\lambda = 633$  нм. Видно, что погрешность не превышает 5 нм.

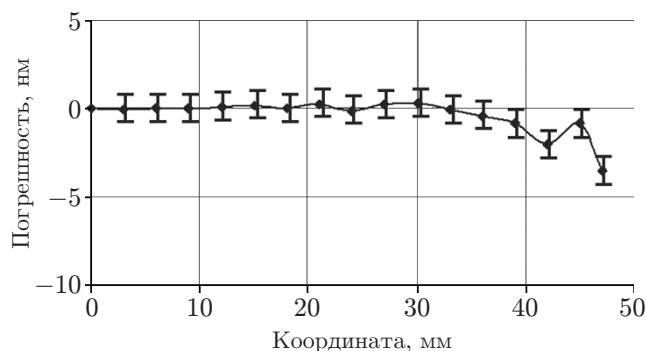
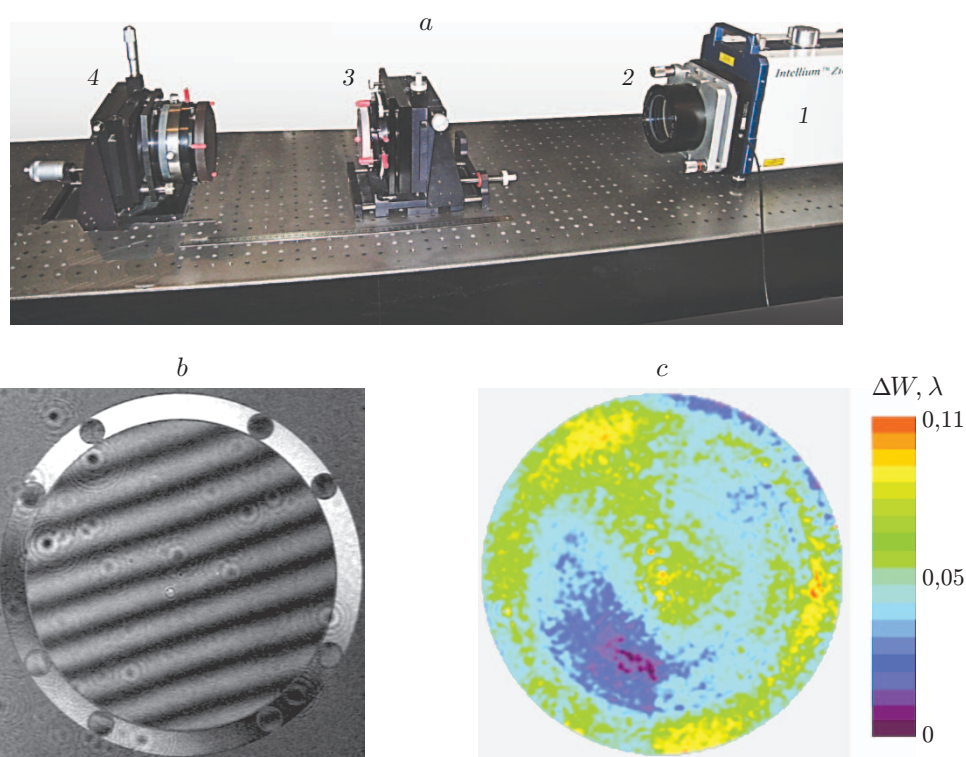


Рис. 4. Погрешность волнового фронта изготовленного ДК

Рис. 5. Сертификация ДК с помощью ДИ: *a* — измерительный стенд; *b, c* — результаты контроля (интерферограмма и фазовая карта соответственно)

**Сертификация дифракционного корректора с помощью дифракционного имитатора** проводилась в соответствии со схемой, приведённой на рис. 1. На рис. 5, *a* дана фотография измерительного стенда (1 — интерферометр IntelliWave Z100 с фазовым сдвигом, 2 — эталонный объектив F/3.3 для создания сферического пучка, 3 — ДК, 4 — ДИ), а на рис. 5, *b, c* — результаты контроля ДК с помощью ДИ. Отметим, что интерферограмма имеет хороший контраст и погрешность формы волнового фронта составляет  $0,113\lambda$  (PV) и  $0,0138\lambda$  (RMS).

**Контроль главного зеркала большого телескопа азимутального РАН** проводился с использованием ДК в акционерном обществе «ЛЗОС». На рис. 6 приведён пример интерферограммы зеркала на стадии полировки при контроле с помощью изготовленного ДК на интерферометре И-172.

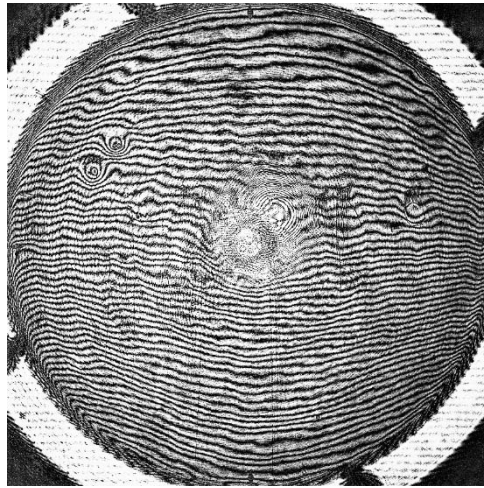


Рис. 6. Интерферограмма главного зеркала БТА в процессе полировки

**Заключение.** Разработаны физические и экспериментальные основы синтеза дифракционных оптических элементов для формирования и сертификации эталонных асферических волновых фронтов с погрешностью порядка несколько нанометров. Предложен и реализован на практике метод сертификации, базирующийся на применении дифракционных корректоров и имитаторов в сочетании с лазерными интерферометрами.

Показано, что одним из основных источников ошибок является взаимное положение интерферометра, ДК и ДИ. Разработан и исследован метод интерференционного контроля и юстировки взаимного положения (пять степеней свободы) этих элементов с погрешностью в доли микрона. Предлагаемые методы применены при изготовлении ДК для контроля нового главного зеркала Большого телескопа азимутального РАН в АО «ЛЗОС». Экспериментально апробирована установка ДК и ДИ в заданное положение по интерференционной картине с помощью дополнительных дифракционных структур. Асферический волновой фронт ДК был сертифицирован с использованием внеосевого ДИ, измеренная погрешность которого составила менее  $0,0138\lambda$  (RMS).

Авторы выражают благодарность коллективу лаборатории дифракционной оптики ИАиЭ СО РАН за помощь в изготовлении дифракционных элементов, а также сотрудникам ЛЗОС А. П. Семенову и Е. В. Патрикееву за полезное обсуждение и предоставление интерферограммы зеркала БТА.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Offner A.** A null corrector for paraboloidal mirrors // *Appl. Opt.* 1963. **2**, N 2. P. 153–155.
2. **Пуряев Д. Т., Граф Н. А.** Зеркально-линзовые компенсационные системы для контроля формы главных зеркал крупных телескопов // *Оптический журнал.* 2007. **74**, № 12. С. 8–9.
3. **Arnold S., Maxey L., Rogers J., Yoder R. C.** Figure metrology of deep aspherics using a conventional interferometer with CGH null // *Proc. SPIE.* 1996. **2536**. P. 106–116.
4. **Allen L., Angel J., Mongus J. et al.** The Hubble Space Telescope Optical System Failure Report. NASA report. Washington, USA, 1990. 107 p.
5. **Ларионов Н., Лукин А., Рафиков Р.** Имитатор главного зеркала телескопа на основе синтезированной голограммы // *ОМП.* 1980. № 1. С. 39–41.
6. **Burge J.** A null test for null correctors: error analysis // *Proc. SPIE.* 1993. **1993**. P. 87–97.
7. **Sasian J. M., Lerner S. A., Burge J. H., Martin H. M.** Design, tolerancing, and certification of a null corrector to test 8.4 meter mirrors // *Proc. SPIE.* 1999. **3739**. P. 444–448.



8. **Насыров Р. К., Полещук А. Г., Сокольский М. Н., Трегуб В. П.** Интерферометрический метод контроля качества сборки оптической системы с эксцентрично расположенной асферической линзой // *Автометрия*. 2017. **53**, № 5. С. 124–130.
9. **Теребиж В. Ю.** Современные оптические телескопы. М.: Физматлит, 2005. 65 с.
10. **Зверев В. А.** Большой телескоп азимутальный // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2010. **53**, № 3. С. 39–50.
11. **Абдулкадыров М., Семенов А.** Современные способы изготовления астрономических и космических зеркал // *Фотоника*. 2015. **51**, № 3. С. 62–79.
12. **Институт автоматизации и элетрометрии в 2013 г.: отчет о деятельности.** Новосибирск: ФГБУН ИАиЭ СО РАН, 2014. С. 13–14. [https://www.iae.nsk.su/images/stories/2\\_Science/3\\_AnnualReports/iaerep2013.pdf](https://www.iae.nsk.su/images/stories/2_Science/3_AnnualReports/iaerep2013.pdf) (дата обращения: 26.05.2017).
13. **Korolkov V. P., Nasyrov R. K., Poleshchuk A. G. et al.** Cross-certification of the diffractive corrector by diffractive imitator for Russian 6-m Large Altazimuth Telescope // *Proc. of the 4th EOS Conf. Manufacturing and Test. Opt. Comp. and World Photonics Congr. Munich, Germany, June 2015*. P. 91–92.
14. **Полещук А. Г., Маточкин А. Е.** Лазерные методы контроля асферической оптики // *Фотоника*. 2011. № 2. С. 38–44.
15. **Zemax** // URL: <http://www.zemax.com> (дата обращения: 26.05.2017).
16. **Veiko V. P., Poleshchuk A. G.** Laser-induced local oxidation of thin metal films: Physical fundamentals and applications // *Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies*. 2014. Vol. 195, Ch. 7. P. 149–171. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-05987-7\\_7/fulltext.html](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-05987-7_7/fulltext.html) (дата обращения: 26.05.2017).
17. **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. 1295–1301.
18. **Шиманский Р. В., Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В.** Динамическая коррекция позиционирования лазерного пучка при записи крупногабаритных дифракционных корректоров для контроля асферических зеркал // *Автометрия*. 2017. **53**, № 3. С. 64–73.
19. **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.

*Поступила в редакцию 26 мая 2017*

---