

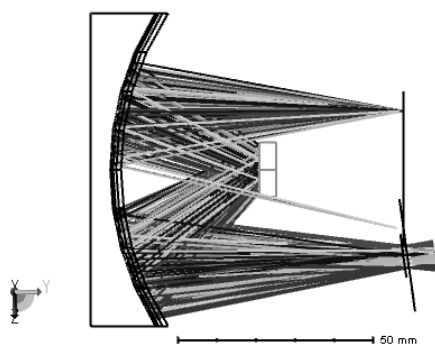


Рисунок 1 – Оптическая схема ГАЛС

Угловое поле зрения гиперспектрометра составило 28° , число регистрируемых спектральных каналов – около 100.

Внешний вид (модель) разработанной системы представлен на рисунке 2.

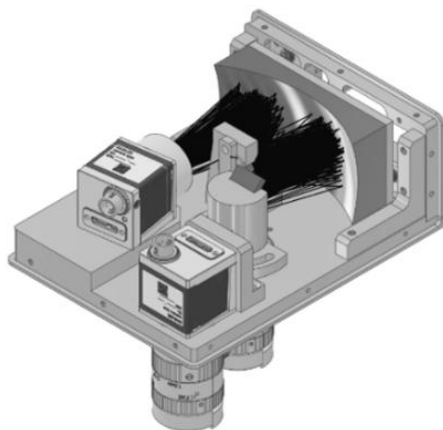


Рисунок 2 – Внешний вид разработанного гиперспектрометра (без защитного кожуха) ГАЛС

С помощью алгоритма, описанного в [1] была рассчитана зависимость отношения сигнал-шум SNR разрабатываемого гиперспектрометра от длины волны при регистрации спектра отражения

растительного объекта для типовых условий летного эксперимента. Рассчитанная зависимость представлена на рисунке 3.

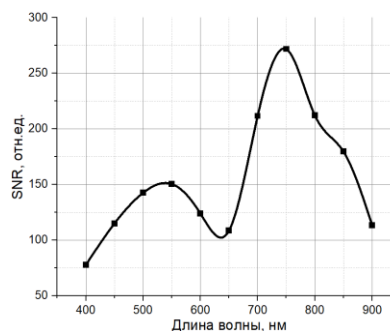


Рисунок 3 – Расчетная зависимость SNR для различных длин волн при регистрации спектра отражения типового растительного объекта в типовых условиях летного эксперимента

Заключение. Проведенные расчеты и проектирование подтвердили возможность создания компактной и эффективной оптической системы на основе спектрометра Оффнера, обеспечивающей более 100 спектральных каналов в заданном диапазоне (400–900 нм) и широкое угловое поле зрения (28°). Рассчитанные показатели отношения сигнал-шум (SNR) демонстрируют, что система способна работать в типовых условиях летного эксперимента и обеспечивать надежную регистрацию данных.

Благодарности. Работа проводится в рамках выполнения отдельного проекта Министерства Образования «Исследование и разработка методов интеллектуального анализа данных, регистрируемых с использованием гиперспектральной автоматизированной летной системы».

Литература

1. Optical Design of a Miniaturized Airborne Push-Broom Spectrometer / Y. Wang, Z. Gu, X. Meng [et al] // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, № 7. – Art. 2627.

УДК 535.313.2

ПРОБЛЕМЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ АСФЕРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

Луцкович З. М.², Федорцев Р. В.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²ОАО «Пеленг»

Минск, Беларусь

Аннотация. Проведен анализ совокупных факторов, оказывающих существенное влияние на точность изготовления отражающих поверхностей крупногабаритных асферических зеркал на различных этапах механической обработки. Рассмотрены этапы производства и технического контроля типового технологического процесса изготовления крупногабаритного зеркала объектива диаметром 450 мм.

Ключевые слова: крупногабаритный, асферическое зеркало, технологический процесс, точность формы.

PROBLEMS OF MANUFACTURING LARGE-SIZED OPTICAL ASPHERIC MIRRORS

Lutskovich Z. M.², Fiodartsau R. V.^{1,2}

¹Belarusian National Technical University

²Peleng JSC

Minsk, Belarus

Abstract. An analysis of the cumulative factors that significantly influence the manufacturing accuracy of reflective surfaces of large aspherical mirrors at various stages of machining is conducted. The production and technical control stages of a typical manufacturing process for a large 450 mm diameter lens mirror are examined.

Keywords: large-sized, aspherical mirror, technological process, shape accuracy.

Адрес для переписки: Луцкович З. М., пр-т. Независимости 65, уч.к.17, г. Минск 220013, Республика Беларусь e-mail: psf-ltt@bntu.by

К крупногабаритным круглым оптическим зеркалам относятся изделия диаметром от 200 до 6000 мм. Крупногабаритные оптические элементы требуют специальных материалов с высокой стабильностью, а также особых подходов к их обработке, чтобы избежать деформаций и сохранить форму.

Предпочтительное соотношение диаметра и толщины должно быть в диапазоне 1:5...1:8. Наилучшие марки материалов для изготовления: стекла ЛК-7, К8, К9, BK7, плавленый кварц, Pyrex, Supermax33 (Shott), астроситалл Sitall CO-115M, Zerodur, карбид кремния SiC, кварцевые стекла с ультранизким коэффициентом расширения (ULE) и т.д. В качестве отражающих покрытий используются: алюминий, серебро или золото с защитным слоем SiO₂. Выбор материала определяется рабочим спектральным диапазоном и устанавливается в техническом задании.

По конструктивному исполнению различают сферические или параболические осевые и внеосевые зеркала (рисунок 1) [1].

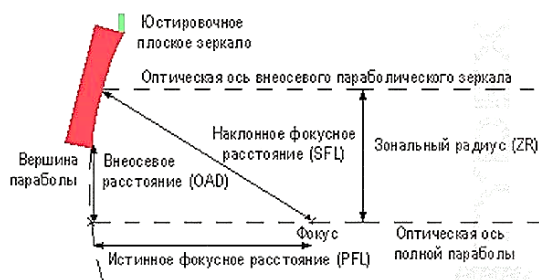


Рисунок 1 – Схема внеосевого параболического зеркала

Асферическая форма поверхности (тороидальная, параболическая, эллиптическая, гиперболическая) сложнее в обработке и полировке, чем сферическая, что требует более точных технологий и оборудования. Для снижения трудоемкости изготовления в качестве исходной заготовки для асферического зеркала выступает как раз сферическое зеркало с наиболее близким радиусом кривизны.

Стандартная точность обработки поверхности составляет: полный размах ошибки (PV) – $\lambda/5 \dots \lambda/10$ на контрольной длине волны 632,8 нм; среднеквадратическое отклонение (RMS) – $\lambda/40$. Фокусное расстояние от 150 мм до 12 метров. Максимальный класс чистоты от III до II. В таблице 1 представлен типовой технологический процесс изготовления вогнутого асферического зеркала диаметром 450 мм.

Основные проблемы изготовления крупногабаритных асферических оптических

зеркал включают сложность контроля качества больших выпуклых зеркал, требующих вспомогательных оптических элементов: например, тестовые пробные стекла или эталонные поверхности интерферометров, диаметр которых превышает диаметр самого контролируемого зеркала. Это создает существенные трудности в реализации и масштабировании методов контроля.

Таблица 1 – Типовой технологический процесс изготовления асферических зеркал

Наименование технологической операции	Марка абразивного материала	Режимы обработки (Давление и скорость вращения инструмента)	Время обработки, мин
Предварительное шлифование	M40	4000 гр. 1200 об/с	150
Среднее шлифование	M14	4000 гр. 1200 об/с	400
Финишное шлифование	M7	2000 гр. 1000 об/с	800
Полирование	M1	2000 гр. 800 об/с	10 800

Разработка новых методов контроля, таких как не интерференционные методы, позволяет решить проблему контроля качества больших выпуклых асферических зеркал, особенно на стадиях шлифовки, поскольку они менее зависимы от размеров вспомогательных оптических элементов.

Контроль точности формы поверхности производится контактным методом на контрольно-измерительных машинах производства компании Carl Zeiss. Пример такого измерения представлен на рисунке 2.

Такой метод измерения используется на стадии шлифовки, когда шероховатость поверхности 0,05–0,1 мкм и более. После полировки и достижения поверхностью шероховатости 0,025 мкм она начинает отражать свет и используется более точный бесконтактный способ измерения поверхности.

Применение современных компьютерных технологий для моделирования и управления процессом изготовления позволяет достичь высокой точности в производстве.

После каждой полировки производится интерферометрическое измерение формы поверхности, получаемая картина представлена на рисунке 3.

Это обеспечивает точное определение характера и расположения имеющихся ошибок поверхности внеосевого параболического зеркала. Затем информация из интерферометра поступает в компьютеризированное устройство

управления полировочной машиной. Строится рельефная карта представлена на рисунке 4, по которой назначается обработка.



Рисунок 2 – Контактный способ измерения поверхности асферического зеркала



Рисунок 3 – Интерференционная картина асферического зеркала 450 мм

Инженер подбирает необходимый инструмент, настраивает давление и скорость вращения компактной полирующей головки в зависимости от размеров неровностей поверхности для эффективной обработки. Программа рассчитывает оптимальные траекторию и скорость перемещения компактной полирующей головки для ретуширования возвышенных участков поверхности.

Обычно выполняется более 10 циклов интерферометрических измерений с последующим ретушированием. Безусловно, сложные зеркала требуют значительно большего числа циклов. Конечная шероховатость полированной поверхности может достигать 1 нм.

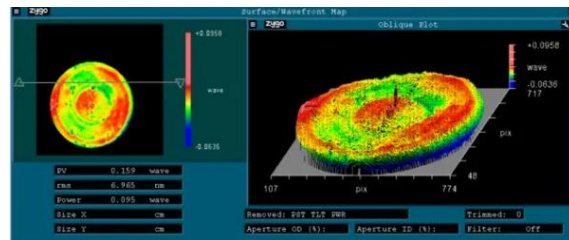


Рисунок 4 – Топограмма поверхности зеркала после программной обработки

Заключение. Представленная технология обработки крупногабаритных асферических зеркал показывает, насколько трудоемким и дорогостоящим является процесс изготовления такой оптики. Большие размеры зеркал в конечном итоге приводит к повышению стоимости изделия и длительности производственного цикла. Типовой процесс изготовления асферического крупногабаритного зеркала занимает не менее 2-х месяцев.

Литература

1. Внеосевые параболические зеркала // TYDEX: [сайт]. – 2025. – URL: https://www.tydexoptics.com/ru/products/spectroscopy/oap_mirrors/ (дата обращения: 20.12.2025).
2. Асферическая оптика // ООО «Электростекло»: [сайт]. – 2025. – URL: https://www.elektrosteklo.ru/asph_rus.htm (дата обращения: 20.12.2025).

УДК 681

ПАССИВНЫЙ ЗАТВОР НА ОСНОВЕ СИТАЛЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ИОНЫ Fe^{2+}

Маляревич А. М.,¹ Кисель В. Э.,¹ Ясюкевич А. С.,¹ Юмашев К. В.,¹ Дымшиц О. С.², Алексеева И. П.,² Жохова Ю. Р.,² Жилин А. А.³

¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

²АО «НПО ГОИ им. С. И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

³АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Представлены результаты исследования стеклокристаллических материалов (ситаллов) на основе литиевоалюмосиликатной и литиевогаллиевосиликатной систем, содержащих ионы железа Fe^{2+} , для применения в качестве пассивных затворов лазеров ближнего ИК диапазона спектра. Показано, что в лазере на основе эрбиевого стекла с поперечной диодной накачкой (длина волны излучения 1534 нм) с помощью указанного материала, содержащего 0,1 % оксида железа в исходной шихте, генерировались импульсы излучения длительностью 550 нс и энергией 41 мкДж.

Ключевые слова: ситаллы, двухвалентные ионы железа, пассивный затвор, лазеры ближнего ИК диапазона спектра.

SATURABLE ABSORBER BASED ON GLASS CERAMICS DOPED WITH Fe^{2+} IONS

Malyarevich A. M.,¹ Kisel V. E.,¹ Yasukevich A. S.,¹ Yumashev K. V.,¹ Dymshits O. S.,² Alekseeva I. P.,² Zhohova Yu. R.,² Zhilin A. A.³

¹Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

²S. I. Vavilov State Optical Institute, St. Petersburg, Russia

³JSC "NIEFA", St. Petersburg, Russia