



Журнал зарегистрирован в Научной Электронной Библиотеке  
Лицензионный договор № 727-11/2014

Учредитель и издатель – Общественная научно-техническая академия «Контенант»

Издается с 2002 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

### **РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

<b>Новиков А.Г., Скворцов И.В., Денисов И.Г., Иванов В.П., Шерстюков О.Н., Латыпов Р.Р.</b> Инновационный подход к проектированию оптико-элек- тронных систем .....	3
<b>Кольцов А.Ю. Хасанов А.М.</b> Влияние криогенных температур на спектральные характе- ристики многослойных интерференционных покрытий на основе материалов PbTe-ZnSe .....	9
<b>Малафеев И.Д., Муравьев Е.А.</b> Особенности изготовления покрытий для «солнечно- слепого» ультрафиолетового фильтра на вакуумной уста- новке «ORTUS 700».....	12
<b>Ахметов А.Р., Ахметов М.М., Белокопытов А.А., Любимов А.И., Скочиллов А.Ф.</b> Диэлектрические дифракционные решетки с высокой луче- вой стойкостью для компрессии лазерных импульсов .....	16
<b>Абдулкадыров М.А., Семенов А.П., Патрикеев В.Е., Папаев А.Ю., Пышнов В.Н.</b> Асферизация крупногабаритных высокоасферичных внео- севых поверхностей оптических деталей с произвольным внешним контуром .....	19
<b>Понин О.В., Галявов И.Р., Шаров А.А., Домнин А.В., Симонов П.В.</b> Разработка высокоточных конструкций крупногабаритных оптических систем .....	26
<b>Абдулкадыров М.А., Владимиров Н.М., Добриков Н.С., Патрикеев В.Е., Семенов А.П.</b> Инновационные решения АО ЛЗОС при изготовлении зеркал из карбида кремния .....	29
<b>Азербайев А.А., Мухаммедзянов Т.Р., Семенов А.П., Абдулкадыров М.А.</b> Инновационные вакуумные технологии в производстве крупногабаритных оптических деталей на АО ЛЗОС .....	35
<b>Абдулкадыров М.А., Патрикеев В.Е., Семенов А.П.</b> Метод определения профиля шлифованной асферической поверхности крупногабаритных астрономических зеркал ....	40
<b>Сорокин А.В., Кирикова Т.Н., Высоканов А.А., Кондрашов М.В., Стародубцева Л.Ф.</b> Фотометрический анализатор биологических микрочипов .....	47
<b>Гиндин П.Д., Карпов В.В., Айзенштат С.Д., Сорокин А.В.</b> Гражданская продукция ОАО «Швабе-Фотосистемы».....	50
<b>Кортаев В.В., Васильев А.С.</b> Применение комплексирования разносспектральных изо- бражений в оптико-электронных комплексах мониторинга техносферной безопасности .....	53



## СОДЕРЖАНИЕ

(продолжение)

<b>Коротаев В.В., Васильев А.С., Пантюшин А.В.</b> Разработка цифрового панорамного фотоаппарата .....	56
<b>Коротаев В.В., Перетягин В.С., Горбунова Е.В., Чертов А.Н.</b> Система комплексного анализа параметров и характеристик излучающих диодов .....	58
<b>Коротаев В.В., Чертов А.Н., Горбунова Е.В., Алёхин А.А., Перетягин В.С., Павленко Н.А.</b> Опτικο-электронные системы цветового анализа продуктов и материалов .....	61
<b>Кобылин А.В.</b> Метод реализации нелинейной Автоматической Регулиров- ки Усиления (АРУ) в матричных тепловизионных приборах .....	63
<b>Капустин А.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т.</b> О контроле формы поверхности зеркал радиотелескопа кос- мической обсерватории «миллиметр» .....	67
<b>Сальникова М.А.</b> Модуль взаимодействия между программными комплексами конечно-элементного моделирования и оптических расчетов .....	72
<b>Волков В.Г., Моисеев Е.А., Сенник Б.Н.</b> Современные тенденции в разработках и технологиях изготовления объективов для тепловизионных оптических приборов .....	77
<b>Модель С.С., Савельева Т.А., Линьков К.Г., Лощенов В.Б.</b> Установка для флуоресцентной диагностики и фотодинами- ческой терапии тканей глазного дна .....	80
<b>Михед А.Д.</b> Преобразователь координат системы стабилизации и наведения линии визирования .....	86
<b>Калюгин В.С., Сенник Б.Н.</b> Анализ поляризационных эффектов в случае оптического спектроредительного модуля .....	91
<b>ИНФОРМАЦИЯ</b> Информация для авторов, размещающих статьи в научной электронной библиотеке (РИНЦ) .....	96
Требования к публикациям в журнале «Контенант» .....	102

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

## ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

НОВИКОВ А.Г., СКВОРЦОВ И.В.\*, ДЕНИСОВ И.Г., ИВАНОВ В.П., ШЕРСТЮКОВ О.Н.\*,  
ЛАТЫПОВ Р.Р.\*

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

\* Казанский федеральный университет, г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru, skvorcov\_ilya@mail.ru

*Инновационный подход к системе 3D автоматизированного проектирования опτικο-электронных систем позволяет проводить анализ в привязке к конструкции разработанной системы электромагнитной и тепловой совместимости, компоновку, размещение, трассировку, многовариантный анализ и многокритериальную параметрическую оптимизацию проектных решений электронных модулей, что существенно снижает временные и финансовые затраты на разработку опτικο-электронной системы.*

**Ключевые слова:** проектирование, система автоматизированного проектирования, электромагнитная совместимость, опτικο-электронные системы.

При проектировании сложных цифровых опτικο-электронных приборов возникает проблема электромагнитной совместимости (ЭМС) электронных средств (прием, преобразование и обработка видеоданных) на следующих уровнях:

- компонентов и межсоединений в рамках печатной платы;
- межплатных соединений с учётом соединительных кабелей;
- прибора в целом.

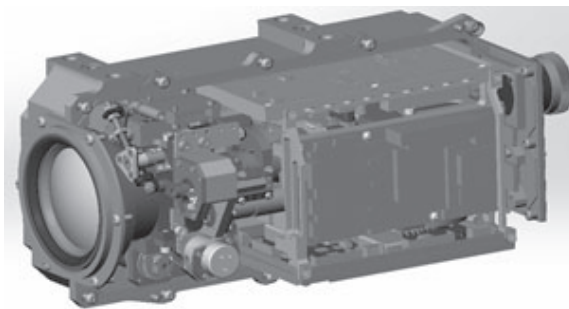
Основной трудностью в данном вопросе является определение проблемных с точки зрения ЭМС участков на стадии проектирования. Как следствие, с этими проблемами приходится бороться на этапе отладки блоков и изделий или, что еще хуже, после изготовления всего прибора. Зачастую на

решение подобных проблем уходит значительное время, и чем позже будет выявлена проблема ЭМС, тем меньше будет вариантов ее решения, и тем дороже обойдётся доработка, причём речь идет об удорожании стоимости на порядки.

С целью решения проблем ЭМС на стадии проектирования изделий разрабатывается технология сквозного проектирования.

САПР (система автоматизированного проектирования) Keysight Technologies позволяет проектировать на компонентном, платном и системном уровнях. Также имеется возможность интегрированного проектирования и тестирования. То есть САПР обладает встроенными виртуальными средствами измерения, причём достаточно точными.

В рамках данной работы рассматривается



*Рисунок 1.  
3D-модель изделия*

работа в основном с двумя пакетами САПР Keysight Technologies:

- САПР Advanced design system
- САПР ADS позволяет проектировать ВЧ/СВЧ схемы и высокоскоростные цифровые устройства, предлагая среду программного моделирования, позволяющую выполнять совместную разработку интегральных схем (ИС), корпусов и плат для высокочастотных приложений.

САПР Electromagnetic Professional (EMPro) представляет собой среду создания 3D объектов и моделирования с целью анализа объемного электромагнитного взаимодействия высокоскоростных, ВЧ и СВЧ компонентов.

В ADS создается схематика проекта, параллельно в EMPro создаются модели компонентов. Затем происходит взаимный обмен результатами. Из ADS в EMPro экспортируется топология, и на ее основе происходит 3D моделирование по методу конечных разностей во временной области, а в ADS из EMPro импортируются электромагнитные модели компонентов, и на основе этого можно выполнить планарное моделирование с помощью метода моментов.

Если обобщить результаты, то можно смоделировать практически любую объемную структуру с помощью метода конечных элементов. Актуально это тем, что с помощью этого метода можно просчитать наводки от объемного монтажа и взаимного расположения плат и устройств, что позволит оптимизировать прокладку кабелей и расположение устройств.

В настоящее время разработана технология адаптации конструкторской документации (КД) для проведения расчётов ЭМС и разработана методика расчёта и измерений ЭМС, также проведены измерения ЭМС конкретных плат.

Работа ведется на базе одного из серийно изготавливаемых изделий (рис. 1).

В ходе работы исследована плата аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Плата представляет собой 4 аналоговых тракта. Оцифрованные сигналы с каждого канала поступают на устройство видеообработки, где происходит их дальнейшая обработка. Схема одного из каналов представлена на рис.2.

Рис. 3 – результат конвертации схемы аналогового тракта платы АЦП в САПР ADS.

Снята амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) каждого из каналов. Результат представлен на рис. 4.

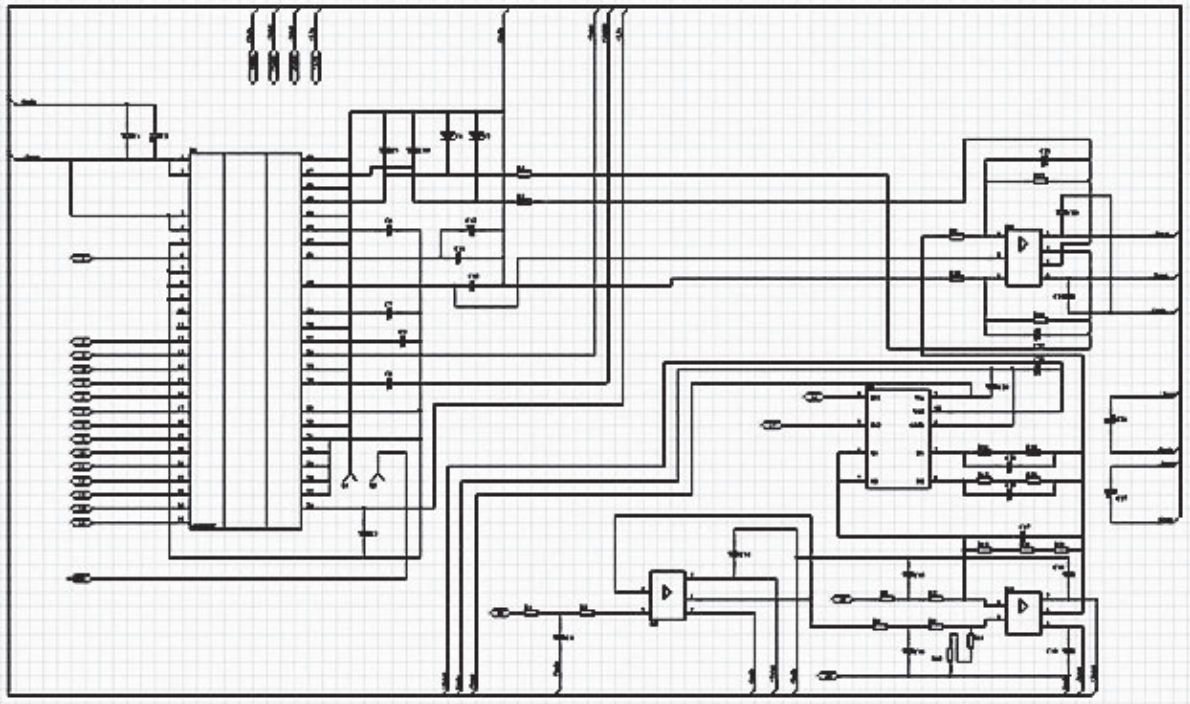
Из рис.4 очевидно, что АЧХ каналов 1, 2 и 4 идентичны, а вот канал 3 имеет существенное отклонение.

Плата АЦП была промоделирована в САПР ADS. Результат моделирования представлен на рис.5.

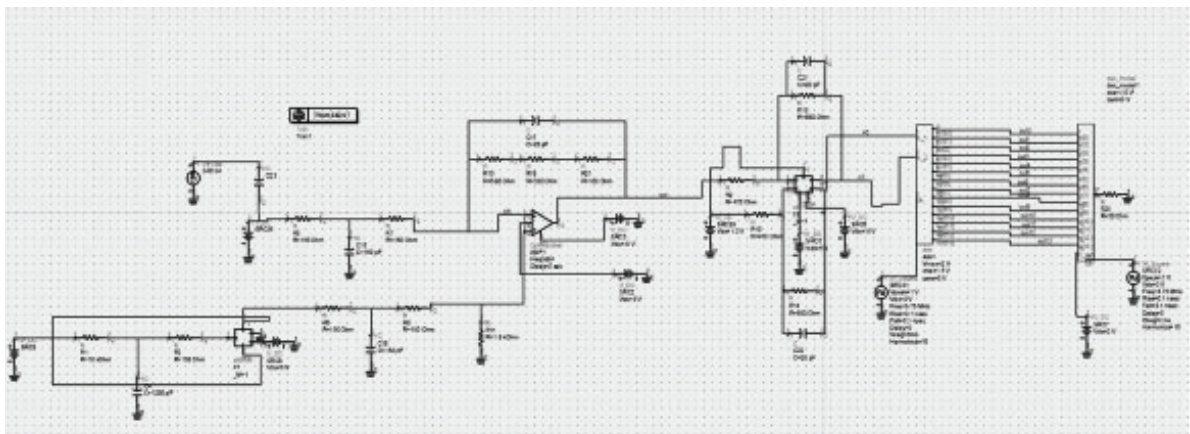
На рисунке видно распределение электромагнитного поля на плате АЦП. Наиболее излучающая часть платы – аналоговая (левая часть платы). Также налицо повышенное ЭМ излучение в области канала 3, что сопоставляется с АЧХ (рис. 6 выделено прямоугольной областью).

Для проверки точности моделирования был поставлен эксперимент. В ходе экспе-

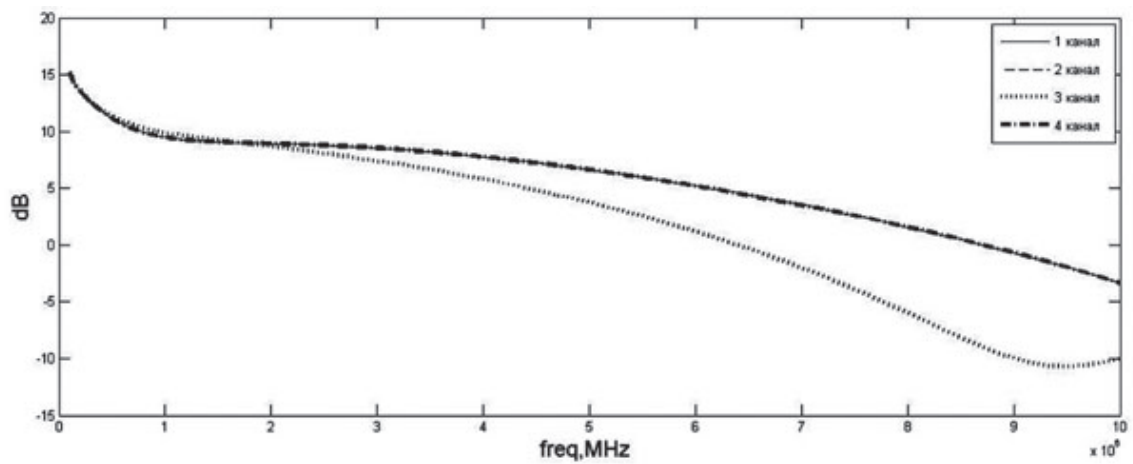




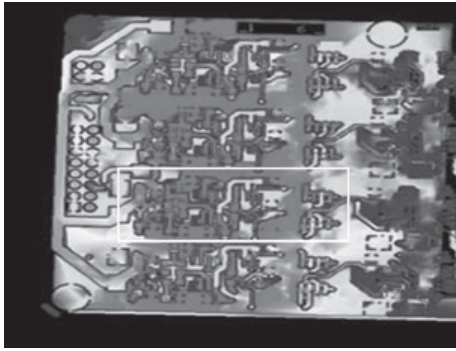
**Рисунок 2.**  
**Схема аналогового тракта платы АЦП**



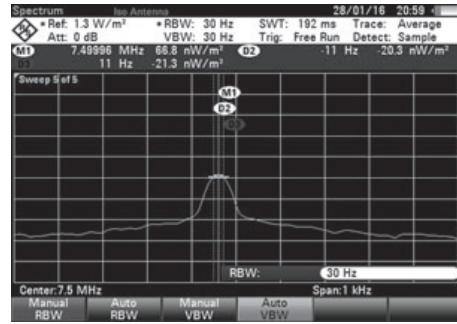
**Рисунок 3.**  
**Результат конвертации схемы аналогового тракта платы АЦП в САПР ADS**



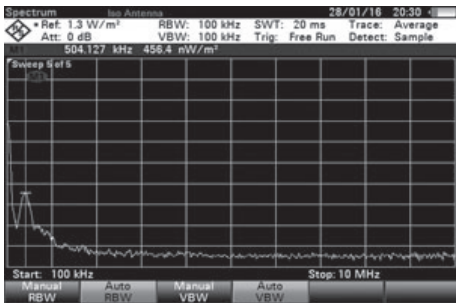
**Рисунок 4.**  
**АЧХ 4х каналов АЦП**



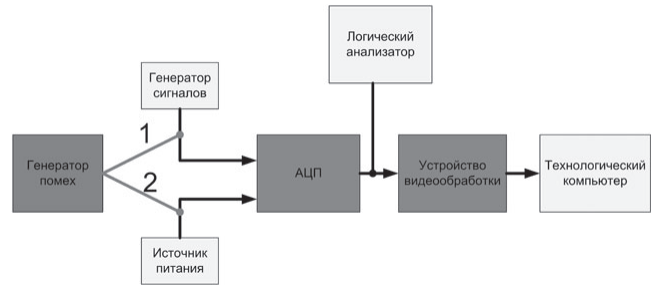
**Рисунок 5.**  
*Результат электромагнитного моделирования платы АЦП (часть платы)*



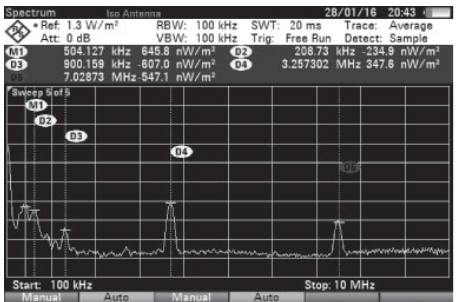
**Рисунок 9.**  
*Максимум 7,5 МГц*



**Рисунок 6.**  
*Спектральная диаграмма фоновых шумов*



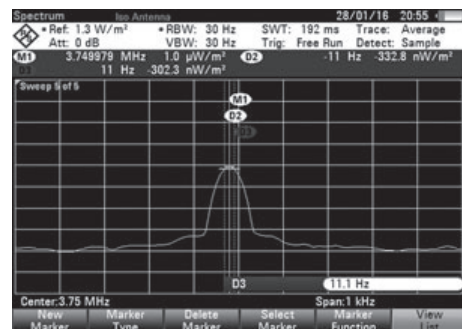
**Рисунок 10.**  
*Блок-схема стенда для изучения влияния электромагнитных наводок на плату АЦП*



**Рисунок 7.**  
*Спектральная диаграмма шумов наведённых платой*

**Таблица 1.**  
*Значения частот и амплитуд максимумов электромагнитного поля платы в выключенном состоянии*

№	Частота, МГц	Удельная мощность, нВт/м <sup>2</sup>
1	0,504	456

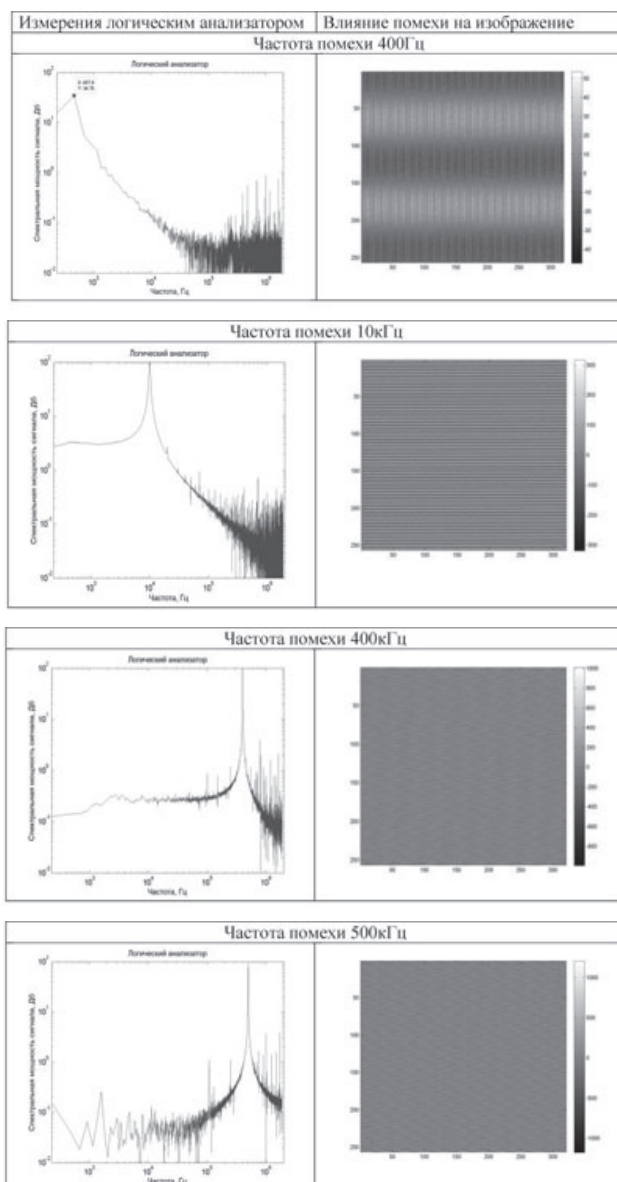


**Рисунок 8.**  
*Максимум 3,75 МГц*

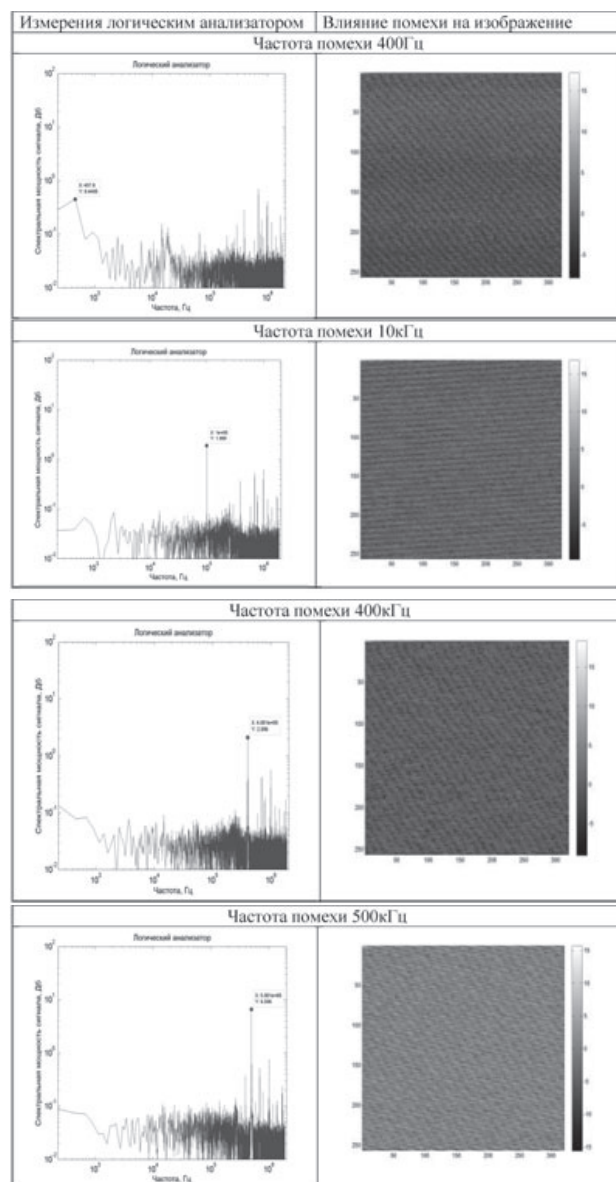
**Таблица 2.**  
*Значения частот и амплитуд максимумов электромагнитного поля платы во включенном состоянии*

№	Частота, МГц	Удельная мощность, нВт/м <sup>2</sup>	Спектральная полуширина, Гц
1	0,504	645	10
2	0,712	411	10
3	1,4	38	10
4	3,75	992	11
5	7,5	98	11

**Таблица 3.**  
**Результат наводки помехи на сигнал**



**Таблица 4.**  
**Результат наводки помехи по питанию**



римента измерения проводились для двух случаев:

- измерение фоновых шумов
- измерение шумов, наведённых платой.

Для точного проведения эксперимента сначала был измерен общий фон шумов с выключенной платой, представленный на рис. 6.

На рис. 7 изображена измеренная спектральная диаграмма электромагнитного поля, наведённого платой АЦП. По горизонтальной оси отложены частоты в диапазоне от 100 кГц до 10 МГц, а по вертикальной оси отложена поверхностная спектральная

плотность электромагнитного потока, измеренная в нВт/. Из рис. 7 видно, что при включении платы АЦП появляются пять максимумов. Метки на рис. 8 и 9 точно отражают значения частот и амплитуд максимумов.

Максимумы на частотах 3,75 и 7,5 МГц приведены в увеличенном масштабе на рисунках 8 и 9 соответственно. Для всех частотных составляющих спектральной картины была определена полоса сигнала по уровню – 3dB. Результаты измерений частотных составляющих в спектре наведён-

ного на калиброванную антенную систему фоновых шумов и шумов в диапазоне от 100 кГц до 10 МГц в виде значений частот и спектральных мощностей для соответствующих максимумов приведены в табл. 1 и 2, соответственно.

Поле, излучаемое платой, при электромагнитном моделировании составило 2.3 мкВт/, а при эксперименте 992 нВт/ на частоте 3,75 МГц, что свидетельствует о том, что электромагнитное моделирование печатной платы методом моментов показывает достаточно хорошее соответствие с экспериментом.

Также удалось проверить плату АЦП на предмет наводок по питанию и по входному сигналу.

Для этого была собрана следующая схема (рис. 10). В первой части эксперимента помеха различной частоты наводилась на входной сигнал с генератора. Результаты измерений представлены в табл. 3.

Слева: измерения логическим анализатором, которые регистрируют частоту помехи, а справа: конечный видеосигнал. Картинка должна представлять равномерный серый фон, т.к. генератором сигналов подается сигнал постоянного уровня (белый шум).

Аналогичным образом исследовано влияние помехи по питанию (табл.4).

В результате данной работы апробирована методика конвертации схем и топологии печатных плат в САПР ADS. Проведено моделирование печатных плат и результаты моделирования сопоставлены с экспериментальными данными.

Данный результат может быть использован при настройке серийных приборов. Оператор сможет определить по видеозображению частоту помехи, что позволит снизить время на поиск и устранение проблемы.



# ВЛИЯНИЕ КРИОГЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР НА СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МНОГОСЛОЙНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ PbTe-ZnSe

КОЛЬЦОВ А.Ю. ХАСАНОВ А.М.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: almazgnap@yandex.ru, King44@yandex.ru

*Представлены расчетные результаты изменения спектральных характеристик 4-х типов фильтрующих покрытий на основе пары материалов PbTe-ZnSe при криогенных температурах, также показана возможность компенсации смещения спектральных характеристик узкополосного фильтра путем подбора резонансного слоя.*

**Ключевые слова:** оптические покрытия, интерференционные оптические фильтры, криогенные температуры, свойства пленок PbTe-ZnSe.

В современных оптоэлектронных приборах для выделения заданных областей спектра широко применяются фильтрующие оптические элементы с многослойными интерференционными покрытиями. Для повышения чувствительности аппаратуры, фотоприемные устройства (входное окно с фильтрующим покрытием и фотоприемник) необходимо охлаждать до температуры жидкого азота ( $T = -196^\circ\text{C}$ ). Охлаждение входного окна приводит к изменению спектральной характеристики фильтрующего покрытия. Это связано с тем, что при низких температурах показатели преломления и толщины слоев интерференционных покрытий изменяются, что должно учитываться при расчете конструкции покрытий [2].

При расчете спектральных характеристик многослойных интерференционных систем задаются показатели преломления слоев  $n_i$  и их оптические толщины  $g_i$ . Зависимость показателя преломления  $n$ , а также толщины слоев  $h$  от температуры в линейном приближении можно определить как:

$$\begin{aligned}n(T) &= n_0 + \alpha_n \Delta T, \\h(T) &= h_0 + \alpha_h \Delta T,\end{aligned}$$

где  $\alpha_n$  - температурный коэффициент изменения показателя преломления;

$\alpha_h$  - температурный коэффициент расширения;

$n_0$  - показатель преломления при температуре  $25^\circ\text{C}$ ;

$h_0$  - первоначальная геометрическая толщина;

$\Delta T$  - изменение температуры.

Так как  $\alpha_n$ ,  $\alpha_h$  в данном диапазоне температур от  $25^\circ\text{C}$  до минус

$196^\circ\text{C}$  малы, оптическая толщина слоя  $g(T) = n(T) \cdot h(T)$ , в приближении первого порядка будет определена выражением:

$$g = g_0 \left( 1 + \frac{\alpha_h}{h_0} \Delta T + \frac{\alpha_n}{n_0} \Delta T \right),$$

где  $g_0$  - первоначальная оптическая толщина.

Нами были экспериментально определены изменения показателя преломления и оптических толщин слоев пленкообразующих материалов ZnSe, PbTe при изменении температуры от  $25^\circ\text{C}$  до минус  $196^\circ\text{C}$  [1].

Для пленок ZnSe показатель преломления составил  $n=2.35$  при  $25^\circ\text{C}$  и  $n=2.25$  при минус  $196^\circ\text{C}$ . Оптическая толщина  $g$  (выраженная в долях  $\lambda/4$ ) составила  $g=1$  при  $25^\circ\text{C}$  и  $g=0.97$  при минус  $196^\circ\text{C}$ .

Для пленок PbTe показатель преломления составил  $n=5.3$  при  $25^\circ\text{C}$  и  $n=5.6$  при минус  $196^\circ\text{C}$ . Оптическая толщина (выраженная в долях  $\lambda/4$ ) составила  $g=1$  при  $25^\circ\text{C}$  и  $g=1.055$  при минус  $196^\circ\text{C}$ .

Измерения проводились для диапазона 5-12 мкм.

Отметим разнонаправленное изменение оптической толщины пленок ZnSe и PbTe, что может приводить к значительным изменениям в спектральных характеристиках многослойных интерференционных покрытий, особенно для узкополосных фильтров.

На рис. 1, 2 приведены спектральные характеристики блокирующих фильтров на основе 13 слоев PbTe-ZnSe, измеренные при  $T = 25^\circ\text{C}$  и  $T = \text{минус } 196^\circ\text{C}$ .

Изменение отношения показателя преломления

$$\frac{n_{\text{PbTe}}}{n_{\text{ZnSe}}}$$

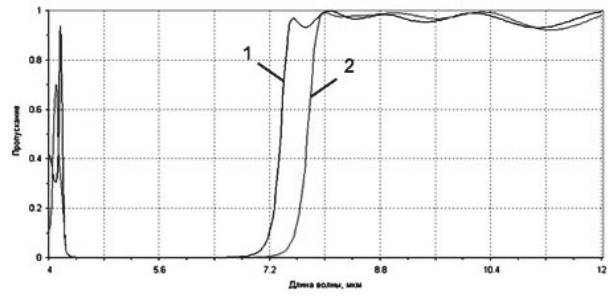
с 2.255 до 2.488 приводит к уширению полосы блокировки отрезающих фильтров и к сдвигу полосы отрезания по уровню  $0,5\tau_{\text{max}}$  для коротковолнового блокирующего фильтра (рис. 1)

$\Delta\lambda_{0,5} = 0,0543 \cdot \lambda_{\text{н}}^{0,5}$ , по уровню  $0,1\tau_{\text{max}}$  -  $\Delta\lambda_{0,1} = 0,05 \cdot \lambda_{\text{н}}^{0,1}$  в длинноволновую сторону.

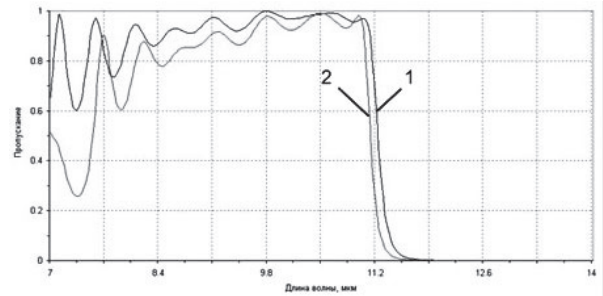
Для длинноволнового блокирующего фильтра (рис.2) значение сдвига меньше  $\Delta\lambda_{0,5} = 0,01 \cdot \lambda_{\text{н}}^{0,5}$ ;  $\Delta\lambda_{0,1} = 0,0098 \cdot \lambda_{\text{н}}^{0,1}$ , где  $\lambda_{\text{н}}$  - длина волны при  $25^\circ\text{C}$ .

Это связано с тем, что вместе с уширением полосы блокировки из-за увеличения отношения показателей преломления происходит небольшой сдвиг всей полосы в длинноволновую область спектра, связанный с появлением неравнотолщинности слоев, для PbTe с  $g=1$  до  $g=1,055$ , а для слоев ZnSe с  $g=1$  до  $g=0,97$ , в результате происходит небольшая компенсация коротковолнового фронта. Полученные результаты совпадают с расчетными.

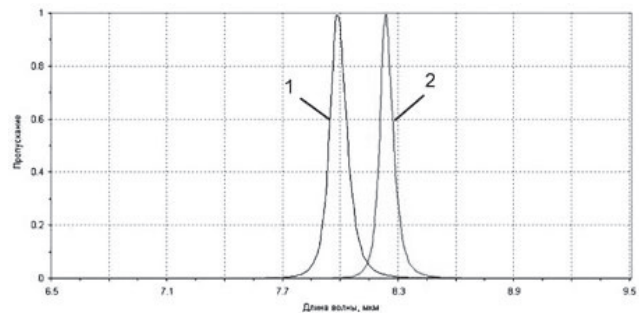
На рис. 3 приведено теоретическое изменение спектральной характеристики двойного узкополосного фильтра конструкции НВН2ВНВН В НВН2ВНВНН (Н-слой с низким показателем преломления ZnSe, В-слой с высоким показателем преломления PbTe), где в качестве резонансных слоев выбран PbTe. Положение максимума пропускания данного фильтра определяется, главным



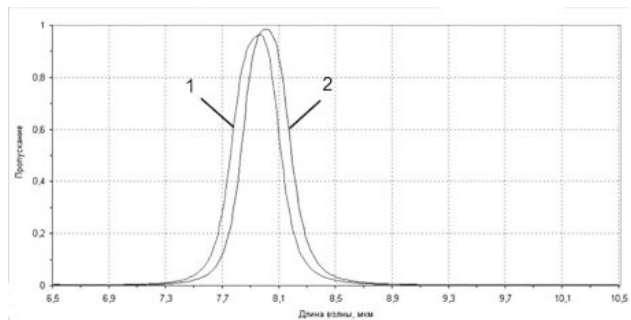
**Рисунок 1.**  
**Фильтр блокирующий коротковолновый:**  
1 - при  $25^\circ\text{C}$   
2 - при минус  $196^\circ\text{C}$



**Рисунок 2.**  
**Фильтр блокирующий длинноволновый:**  
1 - при  $25^\circ\text{C}$   
2 - при минус  $196^\circ\text{C}$



**Рисунок 3.**  
**Фильтр узкополосный:**  
1 - при  $25^\circ\text{C}$   
2 - при минус  $196^\circ\text{C}$



**Рисунок 4.**  
**Фильтр узкополосный:**  
1 - при  $25^\circ\text{C}$   
2 - при минус  $196^\circ\text{C}$



образом, оптической толщиной резонансных слоев. Так как для слоев PbTe оптическая толщина изменяется с  $g=2$  (при 25°C) до  $g=2,11$  (при минус 196°C) сдвиг полосы оказывается больше, чем ширина области пропускания, что не позволяет использовать данный фильтр одновременно при 25°C и минус 196°C.

На рис. 4 приведена теоретическая спектральная характеристика двойного узкополосного фильтра НВ2НВН В НВ2НВНН (Н-слой с низким показателем преломления ZnSe, В-слой с высоким показателем преломления PbTe).

В качестве резонансных слоев выбран ZnSe. Несмотря на то, что оптическая толщина резонансных слоев изменяется с  $g=2$  (при 25°C) до  $g=1,94$  (при минус 196°C), сдвиг центра полосы пропускания составил не более 0,04 мкм в коротковолновую область спектра при  $\lambda_{\text{центр}}=8$  мкм, что позволяет использовать

данный фильтр как при 25°C так и при минус 196°C.

Из приведенных результатов расчетов следует, что криогенные температуры оказывают значительное влияние на положение границ области блокировки отрезающих фильтров, центра пропускания узкополосных фильтров, что необходимо учитывать при разработке конструкций фильтров и условиях их эксплуатации.

*Список литературы:*

1. Кольцов А.Ю., Хасанов А.М., Гайнутдинов И.С., Гусев А.Г., Потанов Р.И. Оптические свойства пленок PbTe - ZnSe при криогенных температурах // Контенант. – 2015. – Т. 14, № 2. - С. 46.
2. Гайнутдинов И. С., Несмелов Е. А., Михайлов А. В., Иванов В. П., Абзалова Г. И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. – Казань: издательство «Фэн», 2003 – С. 14-33.

# ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ «СОЛНЕЧНО-СЛЕПОГО» УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ФИЛЬТРА НА ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКЕ «ORTUS 700»

МАЛАФЕЕВ И.Д., МУРАВЬЕВ Е.А.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

В статье приведены особенности изготовления покрытий для «солнечно-слепого» ультрафиолетового (УФ)-фильтра, изготавливаемого на вакуумной установке «ORTUS 700». Сформулированы задачи и проблемы изготовления УФ-фильтров и пути их решения. В результате разработанного процесса получен фильтр с параметрами, превосходящими требуемые значительно.

**Ключевые слова:** изготовление фильтров, ультрафиолетовый фильтр, оптические покрытия, ORTUS 700.

## ВВЕДЕНИЕ

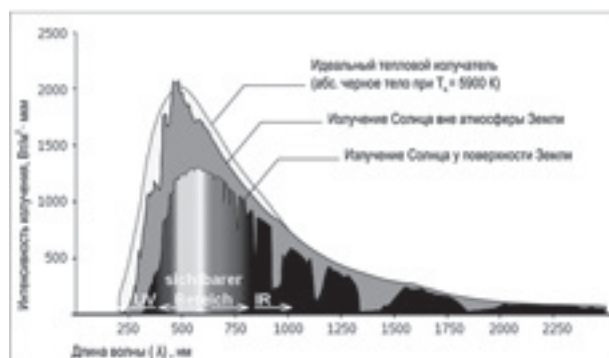
В АО «НПО ГИПО» разработаны ультрафиолетовые (УФ) пеленгаторы для систем обороны летательных аппаратов. В отделе оптических покрытий разрабатываются и изготавливаются «солнечно-слепые» УФ-фильтры. По техническому заданию требуется обеспечить пропускание не менее 20% в области спектра менее 285 нм и подавить фоновое излучение в диапазоне 290-800 нм до уровня менее  $10^{-7}$  % и в диапазоне 800-1000 нм до  $10^{-2}$  %.

Интерес к УФ области спектра обусловлен тем, что в атмосфере и на поверхности Земли практически отсутствуют естественные источники излучения с длиной волны менее

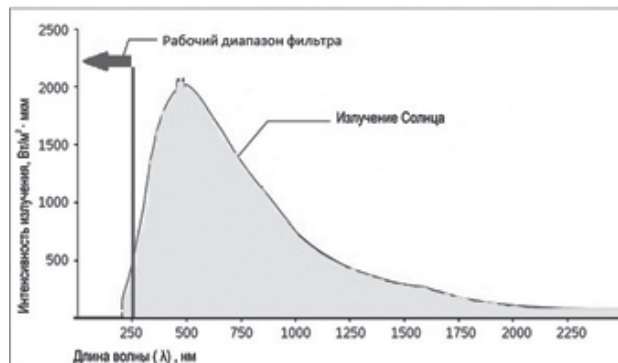
285 нм. Солнечное излучение УФ диапазона не проникает ниже 10 км, так как полностью поглощается озоновым слоем атмосферы. Поэтому, если выделить из всего спектра только часть УФ области, то излучающие в данном диапазоне объекты будут хорошо обнаруживаться прибором, что значительно сократит количество ложных срабатываний.

## РЕШЕНИЕ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ

Подавление остаточного излучения (фон) в такой широкой области как 290-1000 нм достаточно сложная задача, а получение требуемого значения фонового пропускания за границами выделяемой полосы, равного  $10^{-7}$  % усложняет задачу многократно. Тем более, что пленкообразующих материалов, высоко-



**Рисунок 1.**  
**Интенсивность**  
**солнечного излучения**



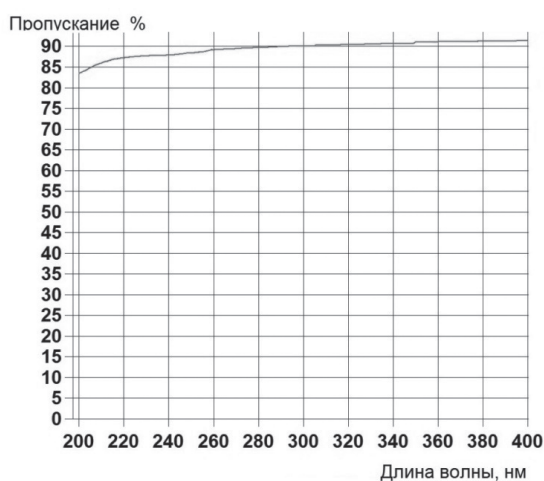
**Рисунок 2.**  
**Рабочий диапазон фильтра**  
**(отмечен стрелкой)**

прозрачных в УФ области короче 290, нм не так много. К таким материалам можно отнести оксид гафния II ( $\text{HfO}_2$ ) и оксид кремния II ( $\text{SiO}_2$ ). Они прозрачны в УФ диапазоне, имеют внутренние напряжения разных знаков ( $\text{SiO}_2 = +1000 - +2000 \text{ кг/см}^2$ ;  $\text{HfO}_2 = -2500 - -3500 \text{ кг/см}^2$ ), что необходимо для предотвращения отслаивания покрытия, а также широко используются в оптической промышленности. В качестве подложки для обеспечения максимального пропускания в области спектра короче 285 нм использовано кварцевое оптическое стекло марки КУ-1 с показателем преломления ( $n$ ) равным 1,45. [1,2].

Подавление фонового излучения осуществляется с помощью интерференционных зеркал.

Ширина интерференционных зеркал из  $\text{HfO}_2$  и  $\text{SiO}_2$  по уровню пропускания  $T=0,04\%$  от левой до правой границы их спектральной характеристики составляет в коротковолновой части заданной области подавления фона  $\sim 50 \text{ нм}$ , а в длинноволновой  $\sim 100-110 \text{ нм}$ . Для подавления интерференционными зеркалами фонового излучения в области спектра 290-1000 нм понадобилось бы нанесение покрытия, состоящего минимум из 9 интерференционных зеркал, а с учетом требования по уровню фона в  $10^{-7} \%$  это число необходимо удвоить и даже утроить.

Чтобы исключить нанесение такого большого количества интерференционных зеркал



**Рисунок 3.**  
*Спектр пропускания оптического стекла марки КУ-1*

необходимо использовать цветные оптические стекла. По спектральным характеристикам подходят только УФС1, УФС2 и УФС5 с  $n=1,52$ .

Наиболее подходящим по областям пропускания и подавления фона является цветное стекло марки УФС2.

В случае применения цветного стекла задача значительно упрощается и необходимо подавить фоновое излучение в области 300-400 нм и 650-800 нм, что выполняется тремя зеркалами на диапазоны: 300-350 нм, 350-400 нм, 650-780 нм [3, 4].

Основой конструкции интерференционных зеркал является чередование равнотолщинных слоев пленкообразующих материалов с высоким и низким показателями преломления ( $n = 1,98$  у  $\text{HfO}_2$  и  $n = 1,45$  у  $\text{SiO}_2$ ).

Интерференционное зеркало  $(\text{ВН})^n$ , где  $n$  — число групп повторяющихся периодов слоев зеркала.

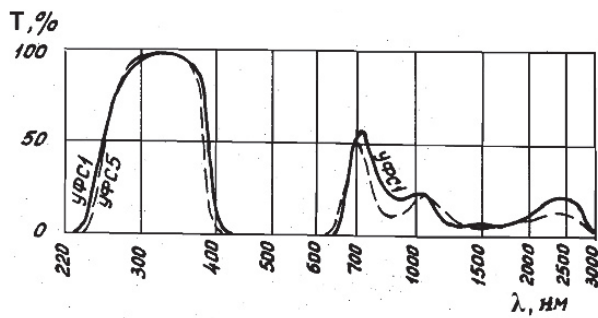
С увеличением  $n$  в конструкции покрытия уменьшается фоновое пропускание в заданной области спектра, а также увеличивается количество провалов по краям спектральной области зеркала.

Для обеспечения максимального пропускания в рабочем спектральном диапазоне фильтра области зеркала оптимизируются, т.е. добавляется несколько слоев в начале и в конце конструкции покрытия иной толщины, чем образующие слои зеркала. Это позволяет выровнять спектральную характеристику в области пропускания [5]. Но такая конструкция покрытия очень чувствительна к ошибкам в оптических толщинах слоев.

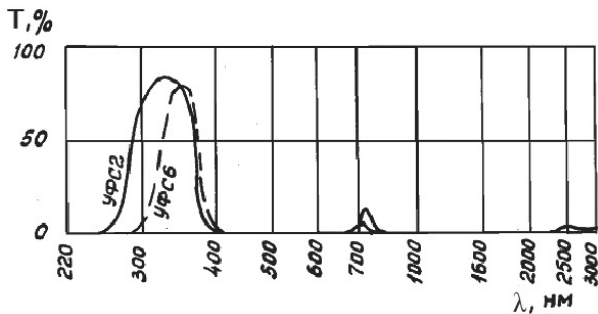
На вакуумной установке «ORTUS 700» изготавливаются зеркала для областей 350-400 нм и 650-780 нм.

Особенности этой установки и технология изготовления покрытий на ней позволили значительно повысить характеристики зеркал и соответственно выход готовой продукции:

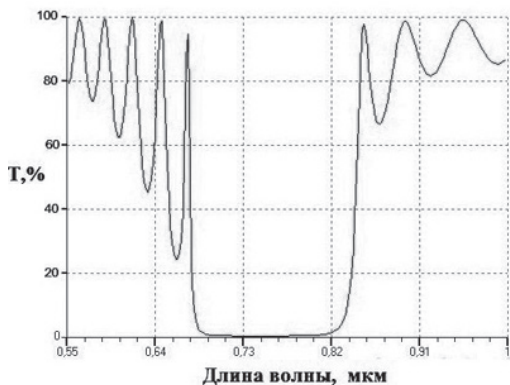
- безмасляная откачка остаточных газов из вакуумной камеры с помощью турбомолекулярного насоса. Достоинством данного насоса является соединение вращающихся элементов посредством магнитной подушки,



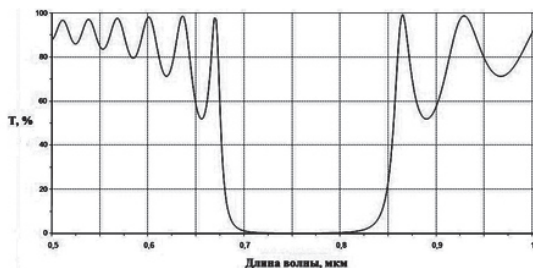
**Рисунок 4.**  
График пропускания оптического стекла марки УФС1 и УФС5



**Рисунок 5.**  
График пропускания оптического стекла марки УФС2 и УФС6



**Рисунок 6.**  
Спектральная характеристика интерференционного зеркала



**Рисунок 7.**  
Спектральная характеристика интерференционного зеркала с  $n' = 7$

а в случае отключения электропитания внутренние части страхуются подшипниковым механизмом. Нестандартное расположение насоса в перевернутом виде предотвращает попадание (скатывание) внутрь крупных частиц рабочего мусора, что продлевает срок его службы;

- независимая система охлаждения оборудования за счет автономного чиллера с программной регулировкой температуры воды, что способствует более стабильному напылению пленкообразующих материалов. Параллельное подключение узлов установки к общей системе водоохлаждения чиллера предотвращает дальнейшее непоступление воды по контуру в случае засора одного из них;

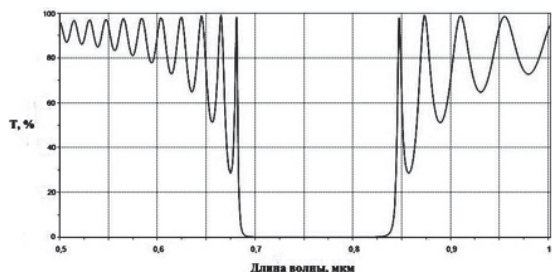
- практически полная автоматизация помогает исключить ошибки оператора в процессе напыления. Своевременное сигнализирование о появившихся неисправностях с последующей остановкой процессов позволяет избежать поломок. Автоматическое ведение журналов испарения и нештатных ситуаций с необходимым перечнем данных облегчает анализ полученных результатов;

- ввиду конструкционных особенностей электронно-лучевых испарителей нанесение некоторых материалов, в нашем случае оксида кремния II, возможно только в гранулированном виде, что позволяет перерабатывать использованный материал и применять его неоднократно;

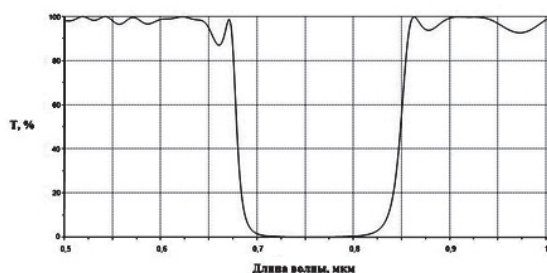
- прямая подача реактивного газа (кислорода) к тигелю испарителя в процессе нанесения оксидов повышает пропускание в УФ и видимой областях спектра в среднем на 2- 4 %.

Итоговая конструкция УФ-фильтра представлена на рис. 10. Она представляет собой систему из 5 плоских подложек 1–5, на обе стороны каждой подложки нанесены 40 чередующихся слоев из  $HfO_2$  и  $SiO_2$ . Подложки 1, 3, 5 выполнены из кварцевого стекла марки КУ-1, подложки 2 и 4 из цветного оптического стекла УФС-2. Подложки с нанесенными на них интерференционными покрытиями разделены воздушными промежутками с помощью кольцевых прокладок толщиной 0,1–0,2 мм.

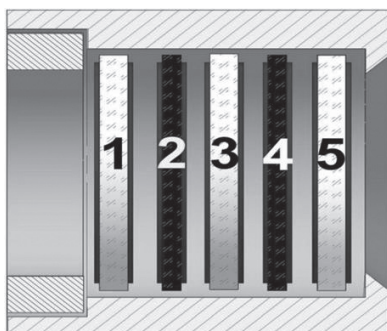




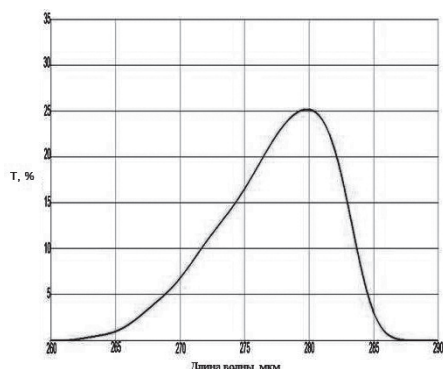
**Рисунок 8.**  
**Спектральная характеристика**  
**интерференционного зеркала с  $n' = 16$**



**Рисунок 9.**  
**Спектральная характеристика**  
**интерференционного зеркала с оптимизиро-**  
**ванными краями спектральной области**



**Рисунок 10.**  
**Конструкция Уф-фильтра**



**Рисунок 11.**  
**Спектральная характеристика УФ-фильтра**

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Результатом работы является УФ-фильтр, спектральная характеристика которого представлена на рис. 11.

Возможности вакуумной установки «ORTUS 700» позволили увеличить количество чередующихся интерференционных слоев зеркал, что сделало саму систему более устойчивой.

Было подобрано оптимальное количество реактивного газа (кислорода), подаваемого непосредственно к тигелю испарителя для дополнительного окисления пленок прямо в вакуумной камере. Также были подобраны температура и оптимальная скорость испарения пленкообразующих материалов.

Все это позволило получить пропускание фильтра  $T \geq 20\%$  в области спектра менее 285 нм, а фоновое пропускание в области спектра 290-800 нм составило менее 10-9 %. Также, вследствие высокой повторяемости результатов, увеличено количество собираемых комплектов фильтров.

В настоящее время ведутся работы по усовершенствованию процессов изготовления фильтров, а также по повышению их характеристик по пропусканию и поглощению остаточного излучения.

*Список литературы:*

1. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Хайбуллин И.Б. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения. Казань: изд. «Фэн», 2002.- 592 с.

2. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Михайлов А.В., Иванов В.П., Абзалова Г.И. Свойства и методы получения интерференционных покрытий для оптического приборостроения. Казань: изд. «Фэн», 2003.- 423 с.

3. Гайнутдинов И.С., Несмелов Е.А., Азаматов М.Х., Каримов Р.Т., Сафин Р.Г. Абзалова Г.И. Достижение предельных характеристик просветляющих интерференционных покрытий. // Оптический журнал. - 2007. Т. 74, №3.- С75-78.

4. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973. – 224 с.

5. Гайнутдинов И.С., Сафин Р.Г., Сабиров Р.С., Азаматов М.Х. «Солнечно-слепой» фильтр для УФ области спектра. // Оптический журнал. - 2007. Т.74, №3. - С.72-74.

# ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ С ВЫСОКОЙ ЛУЧЕВОЙ СТОЙКОСТЬЮ ДЛЯ КОМПРЕССИИ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

АХМЕТОВ А.Р., АХМЕТОВ М.М., БЕЛОКОПЫТОВ А.А., ЛЮБИМОВ А.И., СКОЧИЛОВ А.Ф.

АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

E-mail: gipo@telebit.ru

*В статье рассмотрены вопросы разработки диэлектрических дифракционных решеток с высокой лучевой стойкостью для компрессии лазерных импульсов, в том числе возможности получения крупноформатных диэлектрических дифракционных решеток.*

**Ключевые слова:** голографические дифракционные решетки, многослойные диэлектрические дифракционные решетки, лазерная техника, лучевая стойкость.

В последние годы наблюдается значительный прогресс в разработке твердотельных лазерных систем петаваттного уровня мощности с импульсами сверхкороткой (пико- и фемтосекундной) длительности [1].

Такие лазерные установки создаются и работают по принципу CPA (Chirped Pulse Amplification), который заключается в усилении широкополосных чирпированных импульсов в неодимовых стёклах, формировании требуемой формы спектра усиленного импульса и конструировании компрессора на основе дифракционных решёток [2,3].

Ограничивающим фактором по выходной мощности таких лазерных систем, построенных по принципу CPA, является лучевая стойкость оптических элементов, входящих в состав лазерной системы, в том числе дифракционных решеток лазерного компрессора.

Лучевая стойкость отражательных дифракционных решеток в настоящее время очень низкая, по сравнению с другими оптическими элементами. На сегодняшний день дифракционные решетки с металлизированным золотым покрытием имеют лучевую стойкость около 0.5 – 0.7 Дж/см<sup>2</sup> [4] и не удовлетворяют современным повышенным требованиям к этим элементам.

Поэтому разработчикам лазерных систем приходится либо использовать в конструкции компрессора составные дифракционные решетки, либо идти на значительное увеличение их размеров (до 1 метра).

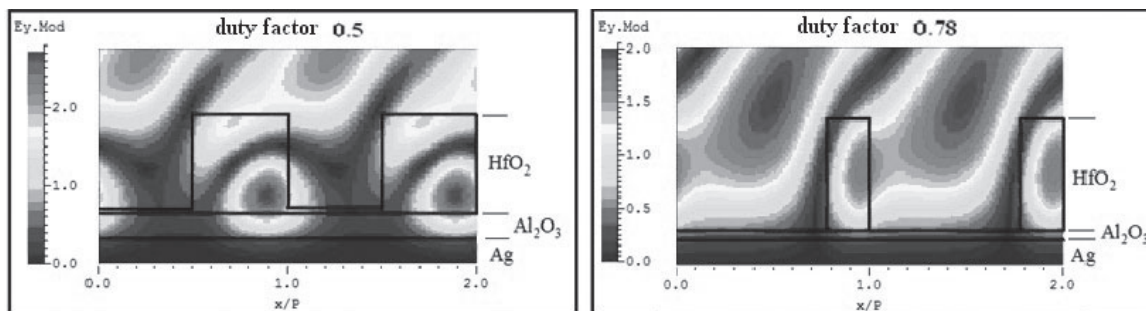
Моделирование распределения электрического поля вблизи металл-диэлектрических дифракционных решёток с высокой дифракционной эффективностью при освещении когерентной плоской волной показывает, что в результате взаимодействия между падающей и дифрагированной волнами образуется интерференционная картина «стоячих» волн (рис. 1).

Интенсивное электрическое поле проникает в материал, образующий решётку, до подложки. Усиление поля в этих «горячих» зонах за счет интерференции будет всегда больше единицы, нормированной к напряжённости поля падающей волны.

Результаты по исследованию лучевой прочности показывают, что разрушения происходят на кромках штрихов решётки [5], что согласуется с результатами модели.

При коэффициенте заполнения, равном 0.5, электрическое поле значительно проникает в штрих, и амплитуда электрического поля ( $E_y$ ) имеет значение около 2, а при коэффициенте заполнения, равном 0.78, значение  $E_y$  приближается к 1.7 - 1.8, что





**Рисунок 1.**  
*Распределение амплитуды электрического поля для металл-диэлектрических решеток с различным коэффициентом заполнения (duty factor) штриха*

указывает на недостаточную стойкость таких решеток к оптическому пробую.

Ограниченное применение дифракционных решеток с металлическим покрытием (золото, серебро) для средней и большой пиковой мощности потребовало разработки технологии многослойных диэлектрических дифракционных решёток (ДДР).

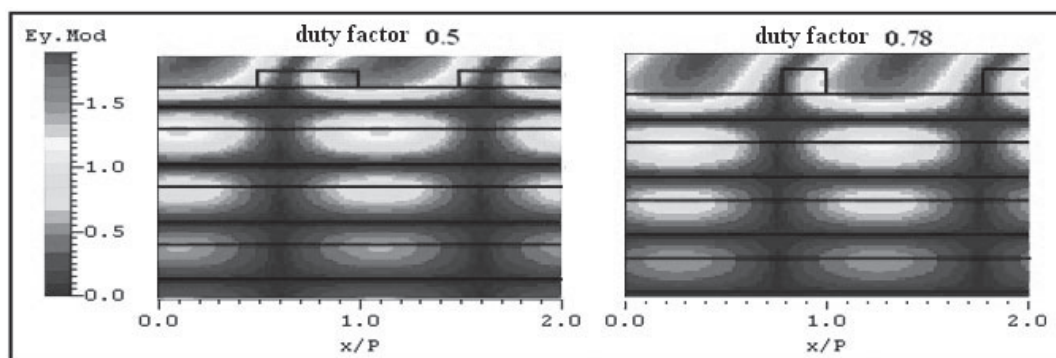
Наши расчеты ДДР были направлены на минимизацию амплитуды электрического поля, существующего в объеме штриха и материалах низлежащих интерференционных слоев.

В качестве примера на рис. 2. представлен расчет многослойной ДДР на подложке из кварца ( $\text{SiO}_2$ ), состоящей из многослойного зеркала (19 четвертьволновых слоев  $\text{HfO}_2$  и  $\text{SiO}_2$ ), промежуточного слоя кварца и верхнего слоя двуокиси гафния, имеющего гофрированную границу с воздухом прямоугольного профиля.

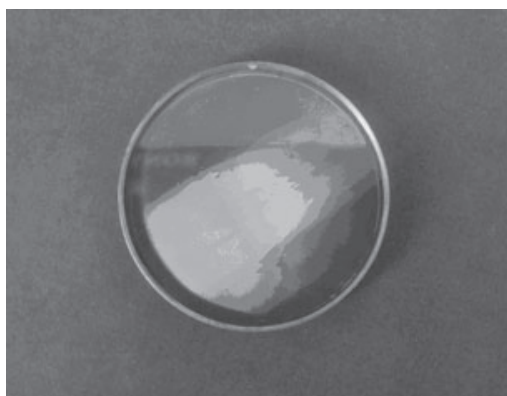
Распределения амплитуды электрического поля вблизи гофрированных границ ДДР имеют одно важное отличие (рис. 2) от распределения электрического поля металл-диэлектрических решеток при одинаковых факторах заполнения штриха. Для металл-диэлектрических решеток характерно, что высокая величина амплитуды электрического поля всегда находится внутри штриха, в то время как при изменении коэффициента заполнения штриха ДДР электрическое поле концентрируется в большей мере между штрихами.

При коэффициенте заполнения 0.5 электрическое поле значительно проникает в штрих, и  $E_y$  имеет значение  $\sim 1.8$ , в то время как при коэффициенте заполнения 0.78 значение  $E_y$  приближается к 1.2 - 1.3. В последнем случае лучевая прочность второй конструкции ДДР будет в 1.5 раза выше [6].

В АО «НПО ГИПО» в период с 2015 по



**Рисунок 2.**  
*Распределения амплитуды электрического поля для металл-диэлектрических решеток с различным фактором заполнения (duty factor) штриха*



**Рисунок 3.**  
**Фото диэлектрической**  
**дифракционной решетки**

2016 годы проводилась работа по отработке технологии получения ДДР.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных работ в АО «НПО ГИПО», впервые получены отечественные образцы голограммных диэлектрических дифракционных решеток (рис. 3.) со следующими параметрами: частота штрихов ДДР  $1740 \text{ мм}^{-1}$ , дифракционная эффективность в минус 1 порядке дифракции 0.93, при угле падения лазерного излучения  $70^\circ$  с длиной волны 1053 нм. Лучевая прочность ДДР составила  $2.8 \text{ Дж/см}^2$ .

Выбраны и реализованы конструкции голограммных диэлектрических дифракционных решеток, обеспечивающие: дифракционную эффективность 0.93 (ТЕ – поляризация) и лучевую прочность до  $2.8 \text{ Дж/см}^2$  при длительности лазерного импульса 1 - 3 нс.

Разработка технологии производства такого класса ДДР позволит решить проблему импортозамещения для отечественных разработчиков мощных лазерных систем.

*Список литературы:*

1. Коржيمانов А.В., Гносков А.А., Хазанов Е.А., Сергеев А.М. Горизонты петаваттных лазерных комплексов // УФН. – 2011 - Т.181. - №1. - С.9-32.

2. Miller G.H. The National Ignition Facility / G.H. Miller, E.I. Moses, C.R. Wuest. // Optical Engineering. - 2004 - Vol.43, № 12.- P. 2841-2853.

3. Andre M.L. Status of the LMJ project // Proceedings 2-d Annual Conference SolidLaser for Application to ICF, October 1996 - Paris, France, edt M.L. Andre SPIE, 1997 - Vol. 3047 - P. 38.

4. Neauport J. Effect of electric field on laser induced damage threshold of multilayer dielectric gratings / J. Neauport, E. Lavastre, G. Razé, et al. // Optics express – 2007. Vol., 15, № 19 - P.12508-12522.

5. Stuart B.C. Ultrashort-Pulse Optical Laser-Induced Damage in Optical Materials. P. 2714/ B.C. Stuart, M.D. Feit, S.M. Herman, A.M. Rubenchik, B.W. Shore, M.D. Perry.// 27th Boulder Damage Symposium, H.E. Bennett et al., eds, - Proc. SPIE, 1995, P. 616-627.

6. Laser pulse compression gratings. Proc. of 11 Int. conf. HoloExpo. Moscow, 2014. Skochilov A.F., Lyubimov A.I., Belokopytov A.A., Korennoy K.S. (September 2014, Sochi) - Sochi, 2014. - P. 172 -177.

# АСФЕРИЗАЦИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ВЫСОКОАСФЕРИЧНЫХ ВНЕОСЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ ВНЕШНИМ КОНТУРОМ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., СЕМЕНОВ А.П., ПАТРИКЕЕВ В.Е., ПАПАЕВ А.Ю., ПЫШНОВ В.Н.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: lastro@lzos.ru

*Описан метод изготовления матрицы из Астроситалла, представляющей собой блок с выпуклой внеосевой асферической поверхностью с размерами около 1400 мм и асферичностью 1.2 мм с трапецевидным внешним контуром. Представлен математический анализ для описания формы поверхности, обработки результатов контроля на координатно-измерительной машине и описаны способы контроля формы на 3D комплексах, описан метод формообразования с использованием программно-управляемых комплексов.*

**Ключевые слова:** телескопы, астрономические зеркала, контроль асферической шлифованной поверхности зеркала.

## ВВЕДЕНИЕ

ОАО «ЛЗОС» по заказу Астрокосмического центра ФИАН (Физический институт академии наук) изготовил первую экспериментальную матрицу из Астроситалла в виде сегмента размером около 1400 мм. Характерная особенность - высокая асферичность (1,2 мм) и отклонение от требуемой параболической формы менее 10 мкм. Эта матрица служит для прессования элемента главного зеркала из углепластика космического телескопа «Миллиметрон» (<http://radioastron.ru/>). Впервые достигнута такая точность при высокой асферичности на крупногабаритном зеркале. Для финишного формообразования использовался программно-управляемый комплекс для финишной доводки.

Допускаемые отклонения для всего главного зеркала обсерватории «Миллиметрон» диаметром 10 м составляют менее 100 микрон при асферичности 140 мм, при этом главное зеркало состоит из отдельных прецизионных панелей, которые устанавливаются на подвижных опорах – актуаторах.

Как отмечают специалисты Астрокосмического центра: «Решение поставленной задачи состоит в том, чтобы использовать сильные

стороны Астроситалла и углепластика и нивелировать их недостатки. Это достигается тем, что углепластиковые конструкции будут формироваться на прецизионных матрицах из астроситалла, при этом отклонение поверхности матрицы от теоретической поверхности должно составлять менее 10 микрон, что вполне достижимо для ЛЗОС. Таким образом, дорогостоящая ситалловая матрица будет порождать сравнительно дешевые углепластиковые прецизионные поверхности, которые имеют ключевые конкурентные преимущества по стоимости, интегральной деформативности, массе, жесткости и трудоемкости изготовления как по сравнению с астроситаллом, так и тем более по сравнению с карбидом кремния и бериллием. Эти преимущества должны обеспечить наилучшее соотношение цена/качество и успех на рынке космических антенн инфракрасного миллиметрового диапазона».

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОВЕРХНОСТИ МАТРИЦЫ С ОПТИЧЕСКОЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Целью настоящей работы было изготовление матрицы с внеосевой выпуклой параболической поверхностью асферичностью 1.2 мм.

Основные габаритные размеры детали приведены на рис. 1. Видно, что контур матрицы является трапецией, малое основание которого составляет 88.6 мм, большое – 405.2 мм, длина достигает 1223.6 мм. Фокусное расстояние параболоида  $F = 2400.0$  мм. Центр параболоида смещен относительно левого края детали на 295.0 мм, а ось параболоида наклонена относительно детали на угол  $\varphi = 10^\circ 43' 35'' = 10.726388888888...^\circ = 0.187210803$  радиан.

В системе координат параболы (СКП) параболоид описывается каноническим уравнением

$$Z = (X^2 + Z^2) / 4F$$

где,  $X$  и  $Z$  – координаты в плоскости  $XZ$ ,  $F$  – фокусное расстояние параболоида.

Система координат детали (СКД) смещена и наклонена относительно СКП. Надо учитывать, что в наклонной системе координат детали поверхность параболоида будет описываться не каноническим уравнением, а квадратичной формой.

Преобразование от СКД к СКП имеет вид:

$$X_{\text{пар}} = X_o + X_{\text{дет}} \cos \varphi - Z_{\text{дет}} \sin \varphi;$$

$$Y_{\text{пар}} = Y_{\text{дет}};$$

$$Z_{\text{пар}} = Z_o + X_{\text{дет}} \sin \varphi + Z_{\text{дет}} \cos \varphi;$$

где  $X_o = 906.704$  мм, а  $Z_o = (X_o)^2 / (4F) = -85,637$  мм.

Подстановка преобразования в каноническое уравнение и последующая группировка членов приводит уравнение к виду:

$$AZ^2 + 2BZ + C = 0.$$

Значения коэффициентов:

$$A = \sin^2 \varphi$$

$$B = -X_o \sin \varphi - X \sin \varphi \cos \varphi - 2F \cos \varphi$$

$$C = (X_o)^2 + (X \cos \varphi)^2 + 2X_o X \cos \varphi - 4FX \sin \varphi - 4FZ_o + Y^2$$

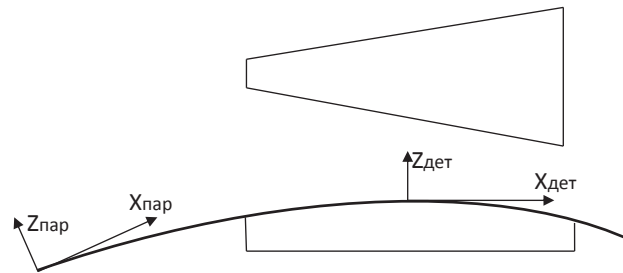
Решение уравнения в СКД имеет вид:

$$Z = \frac{-B + \sqrt{B^2 - A \cdot C}}{A}$$

Здесь берется верхняя ветвь решения.

Ближайшая базовая сфера для внеосевого параболоида вычисляется в СКП.

Радиус ближайшей базовой сферы для заданных параметров внеосевого параболоида и габаритов детали составляет 4923.799 мм. Центр сферы находится на оси параболоида.



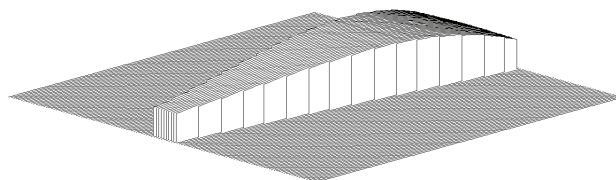
**Рисунок 1.**  
**Контур изделия**  
**и схема ориентации параболоида**

Координаты центра сферы с СКП  $\{0.0, 0.0, -4923.0245\}$ .

Припуск на асферизацию оценивается как отклонение поверхности параболоида от ближайшей базовой сферы. Распределение припуска носит стандартный характер, максимальное значение припуска располагается на расстоянии 1095.045 от оси параболоида (в СКП) и составляет 1337.75 мкм.

Для вычисления припуска в СКД нужно перевести в СКД ближайшую базовую сферу. Радиус сферы в СКД останется без изменений, а координаты центра приобретут вид  $\{9.655, 0.0, -4922.603\}$ .

Как следует из приведенных данных, в СКД центр ближайшей базовой сферы не совпадает с центром детали. Это значит, что сегмент ближайшей базовой сферы в соответствии с техническими требованиями должен быть незначительно наклонен относительно нижней плоскости. Из оценочных данных видно, что левый край ниже правого примерно на 1.8 мм. На рис. 2. приведена топографическая карта припуска от ближайшей базовой сферы в СКД. Размах припуска 1337 мкм, СКО припуска 388 мкм.



**Рисунок 2.**  
**Топографическая карта припуска в СКД**



## **ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ФОРМООБРАЗОВАНИЕ**

Стандартная технология асферизации предполагает формирование на поверхности детали ближайшей базовой сферы с последующим снятием припуска на асферизацию. Как правило, устранение припуска ведется шлифованием детали малым инструментом по программируемой траектории. Процедура носит итерационный характер, каждая итерация сопровождается системой контроля промежуточных поверхностей, анализом оставшегося припуска и назначением сеанса для следующего приближения.

Однако оценки показали, что устранение шлифованием припуска величиной более одного миллиметра на протяженной детали крайне непроизводительно и займет несколько месяцев. Поэтому для ускорения работы была выбрана другая технология, когда на поверхности детали сразу формировалась асферическая поверхность. Работа выполнялась путем фрезерования кольцевым алмазным инструментом под управлением ЧПУ.

Фрезерование проводилось в два этапа – грубый съем, когда инструмент снимал до 5 мм за проход, и тонкая обработка, когда съем не превышал 0.5 мм. Такой подход позволил также снизить глубину нарушенного слоя.

Как показали дальнейшие измерения, была получена асферическая поверхность, отличающаяся от номинальной не более, чем на 100 микрон. Общее время фрезерования асферической поверхности детали составило 2 недели.

### **КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ НА СТАДИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ**

Известны различные способы контроля оптики контактными методами [1,2,3]. В данном случае контроль формы поверхности после стадии фрезерования и на этапе шлифования выполнялся на координатно-измерительной машине КИМ-1400 («Лапик», Саратов, <http://www.lapic.ru/>). Машина имеет гексаподовый

механизм перемещения каретки, на которой крепится контактный щуп. Тяги гексапода оснащены лазерными измерителями перемещений, что гарантирует высокую точность позиционирования. Точность измерения координат КИМ-1400 составляет 0.5 мкм. Поле измерений – 1400 мм, что обеспечивает измерения детали.

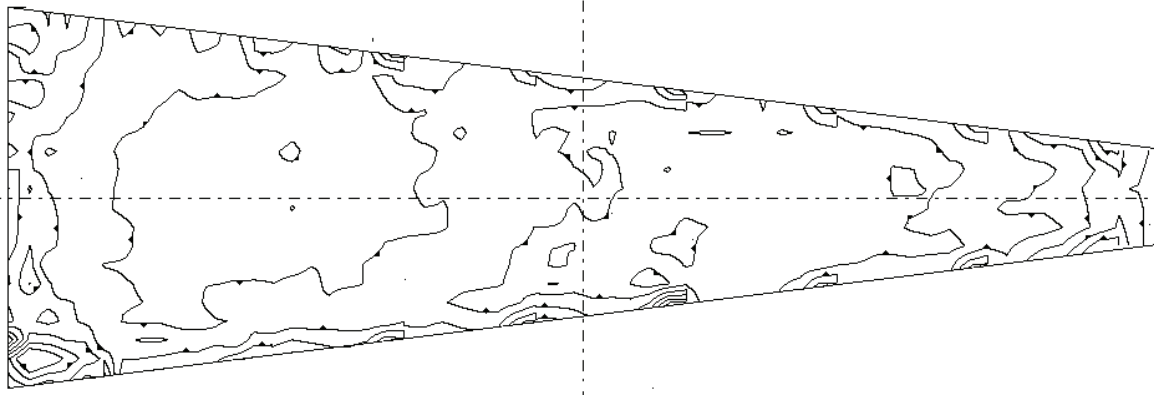
КИМ-1400 оснащен компьютерной системой управления SamISO, позволяющей реализовывать измерения в автоматическом режиме. В состав библиотеки системы входит большое количество стандартных подпрограмм для измерения простых поверхностей типа плоскости, сферы, цилиндра, конуса и др.

Для измерения асферической поверхности детали была разработана оригинальная управляющая программа. Измерения проводились непосредственно в узловых точках сетки, соответствующих требованиям программно-управляемого комплекса. Шаг сетки задавался в качестве параметра программы, система вычисляла координаты с учетом геометрии и габаритов детали и проводила измерения.

Результаты измерений система записывала в виде унифицированного файла топографии. Это позволило практически напрямую включить результаты измерений в технологическую систему.

При измерении формы асферической поверхности шариком контактного щупа, необходимо было учитывать, что КИМ-1400 фактически измеряет координату центра шарика. Для получения реальных результатов необходимо вводить компенсацию на радиус шарика. Это нетрудно сделать для простых поверхностей, где компенсация линейна, и значительно труднее для асферической поверхности, где компенсация зависит от координаты измеряемой поверхности. По оценкам, величина компенсации достигает 19 мкм.

Учет компенсации проводился двумя путями. Во-первых, распределение компен-



**Рисунок 3.**

**Результат расчета и топографическая карта припуска (градация изолиний 5 мкм).  
Размах топографии 48 мкм, СКО – 5.3 мкм**

сационной поправки по поверхности было аппроксимировано полиномом, по которому вычислялись значения смещения центра шарика в процессе измерения на КИМ-1400 в каждом узле сетки. Измеренные значения с поправкой записывались в файл топографической карты отклонений фактической поверхности от модели. Точность аппроксимации полиномом составляла 2 мкм.

Для реализации второго пути была разработана специальная программа. Исходными данными для нее была топографическая карта поверхности детали, полученная по измерениям на КИМ-1400. Фактически файл содержал значения координат центра шарика от плоскости измерительной машины, полученные при касании в узлах сетки. Программа вычисляла такую точку (точку касания) на поверхности модели, нормаль к которой на расстоянии радиуса шарика щупа попадала на координату измеряемого узла сетки. Отсюда вычисление поправки на смещение центра шарика по Z не составляло труда.

Основным результатом программы было получение топографической карты припуска для дальнейшей обработки поверхности.

Дополнительно в программе был заложен вариационный механизм, позволяющий менять некоторые параметры поверхности модели. Составлялся функционал по фактическим и модельным данным, и дальше производился поиск его минимума. Можно было установить, какому значению фокуса, или какому значению внеосевого параметра

параболической поверхности лучше отвечает фактическая поверхность. Можно было также проанализировать варианты пространственной ориентации параболоида относительно осей детали.

На рис. 3 приведен результат расчета после пятого сеанса шлифования малым инструментом и топография оставшегося припуска.

Как видно из результатов расчета, практически нет смещения параболоида по Y и нарушения ориентации по C – сказывается тщательная установка детали при измерении на КИМ-1400. Отмечается несколько больший угол B и вершинный радиус. Вершинный радиус варьировался исключительно для получения оценки величины – фиксирование значения вершинного радиуса при расчете приводят к топографии припуска с присутствием расфокусировки. Устранение такого припуска сопровождается коррекцией вершинного радиуса поверхности детали.

### **ШЛИФОВАНИЕ И ПОЛИРОВАНИЕ**

Шлифование поверхности детали решало две задачи: устранение следов обработки и трещиноватого слоя после фрезерования, и доводка формы поверхности до требований спецификации – среднеквадратичное отклонение (СКО) должно быть меньше 1 мкм.

Устранение следов обработки фрезой и дальнейшее шлифование выполнялось с использованием набора малых гибких инструментов на резиновой подложке с латунными пятками на станке с программным управле-



нием [4,5]. Диаметры инструментов не более 80 мм. Специально разработанная конструкция инструмента позволяет осуществлять постоянный контакт всей его поверхности с поверхностью обрабатываемой детали при перемещении инструмента по поверхности детали. Инструмент в любой части детали обладает необходимой эластичностью и принимает форму поверхности, соответствующей форме обрабатываемой поверхности в данной области и создает максимально возможное давление на деталь для осуществления съема материала, в том числе и краевыми областями инструмента. При этом будет сохраняться постоянный вид профиля съема под инструментом. Кроме того, возможен выход такого инструмента за край детали для обработки краевых зон. Профиль съема под инструментом определяется экспериментально. Этот профиль съема вводится в программу для расчета сеанса обработки асферической поверхности.

На первоначальной стадии обработка велась в режиме заглаживания по траекториям так, что инструменты с одинаковой скоростью проходили по всей поверхности детали, реализуя равномерный съем. Для устранения остаточного рельефа после фрезерования применялась более крупная фракция абразива, а затем все более мелкая для устранения остаточных ошибок и получения требуемой для полировки шероховатости.



**Рисунок 4.**  
**Финишная доводка матрицы**

Всего было проведено 10 сеансов обработки на станке АД-2000 под управлением ЧПУ (рис. 4). Когда была достигнута асферическая поверхность требуемого качества, она была отполирована для устранения мата после шлифования. Полировка также проводилась набором малых инструментов.

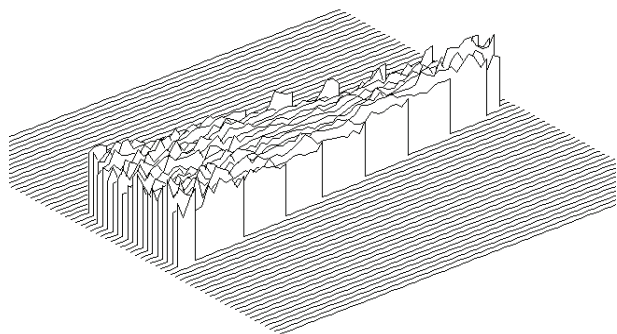
#### **АТТЕСТАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ**

После завершения формообразования поверхности аттестационный контроль формы поверхности также проводился на территории заказчика в г. Пущино (Астрокосмический центр Учреждения Российской академии наук Физического института им. П.Н.Лебедева РАН- АКЦ ФИАН). Для измерений использовался измерительный комплекс ATOS III. Система основана на проецировании на измеряемое изделие (измеряемую поверхность) линейных растровых картин. На неплоской поверхности линейные полосы становятся нелинейными. Оптико-электронная система оцифровывает наблюдаемую картину и, используя встроенное программное обеспечение, позволяет восстановить форму измеряемой поверхности.

Система является достаточно универсальной, применимой для самых разнообразных деталей. Не предъявляется специальных требований к предварительной ориентации детали для измерений.

Допустимо измерение протяженных деталей – система, используя набор реперных точек на измеряемой поверхности, в автоматическом режиме выбирает нужную комбинацию и состыковывает друг с другом фрагменты независимых измерений.

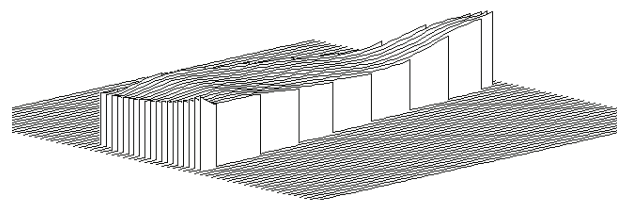
Особенностью системы является очень большой объем измеряемых точек: на поверхности детали выборка достигала 2,5 миллионов. Для обработки такого объема данных система оснащена специализированным сервером с распараллеливанием вычислений, а также высокопроизводительной графической подсистемой. Поверхность строится как результат триангуляции измеренных



**Рисунок 5.**  
**Результаты вариационного расчета данных ATOS и полученная карта отклонений**

точек. Недостатком системы является невысокая точность – по паспортным данным точность определения координаты составляет 10-15 мкм. Система позволяет сопоставлять полученные результаты измерений с заданной моделью, вычисляя значения отклонений фактической поверхности от модели. При этом выполняется оптимизация по поиску лучшего пространственного соответствия модели и реальных данных. Информация о величине рассогласования осей поверхности и осей детали не выводится. Невозможно также провести вариации вершинного радиуса параболоида и внеосевого расстояния. Тем не менее, необходимо отметить, что процесс изменения на ATOS III является достаточно оперативным и на порядок превышает время измерения на КИМ-1400.

Полученные данные были конвертированы и обработаны по специальной программе для выполнения поворота данных относительно центра детали, а затем выправлены наклоны



**Рисунок 6.**  
**Топографическая карта отклонений поверхности за вычетом мелкоструктурной ошибки**

**Таблица 1.**  
**Требуемые параметры детали и полученные результаты.**

Параметр	Чертеж	Измерения
Вершинный радиус	4800±50 мм	4812.55 мм
Внеосевой параметр	906.704 мм	906.704 мм
Смещение вершины по Z	-85.637 мм	-85.344 мм
Смещение вершины по Y	0 мм	17.0 мм
Угол наклона по B	10.726°	10.674°
Угол наклона по C	0°	0.017°

так, чтобы величины отклонений угловых точек соответствовали техническим требованиям. На рис. 5 приведены результаты расчета и полученная карта отклонений.

Как следует из рисунка, поиск проводился по величине вершинного радиуса, положению вершины параболоида в пространстве, и углам наклона (поворота) относительно системы координат детали. Внеосевой параметр не варьировался. Для лучшей сравнимости приведены требуемые параметры детали и полученные результаты.

После устранения выбросов, связанных с погрешностью измерений ATOS III, была проведена аппроксимация полиномами. Полученная топографическая карта приведена на рис. 6. Размах отклонений составляет 5.73 мкм, СКО – 1.07 мкм. Полученные значения совпадают с измеренными на приборе КИМ-1400 в ОАО «ЛЗСОС». На рис 7 показана панель из углепластика на матрице.



**Рисунок 7.**  
**Панель из углепластика на матрице**

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана технология изготовления крупногабаритных высокоасферических выпуклых внеосевых поверхностей оптических деталей (более 1 мм) с произвольной конфигурацией внешних границ, со средствами контроля на стадии изготовления контактными методами, позволяющими достичь отклонений формы поверхности от заданной менее 10 мкм и после прополирования поверхности получить интерференционную картину в видимой области.

Измерения формы поверхности контактными и бесконтактными методами показали, что получена поверхность высокого качества, СКО отклонений которой не превышает 1 мкм.

В заключении авторы выражают благодарность Павлу Маслову (ООО «Лапик» г. Саратов) за ценные консультации при разработке управляющей программы контактных измерений формы поверхности на КИМ-1400.

## Список литературы:

1. *Burge J.H.* Measurement of large convex aspheres// *Proceedings of SPIE*. 1996. V. 2871. P.362-373 (1996).
2. *Smith B.K., Burge J.H. and Martin H.M.* Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes// *Proceedings of SPIE*. 1997. V.3134. P. 51-61.
3. *Burge J. H., Su P., Zhao C.* Optical metrology for very large convex aspheres// *Proceedings of SPIE*. 2008. V.7018. P.701818-1 - 701818-12.
4. *Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Патрикеев А.П., Патрикеев В.Е., Шаров Ю.А.* Технологические особенности изготовления главных зеркал телескопов // *Оптический журнал*. - 2013. - том 80, № 4. - С. 8-17.
5. *Лямин Ю.Б.* Автоматизированные станки с компьютерным управлением по 5-ть координатам для формообразования высокоапертурных поверхностей крупногабаритных зеркал// *Оптический журнал*. - 2011. – том 78, № 4. - С. 21-24.

# РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

ПОНИН О.В., ГАЛЯВОВ И.Р., ШАРОВ А.А., ДОМНИН А.В., СИМОНОВ П.В.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: galyavov@lzos.ru

*Описано применение композитных материалов и система контроля положения оптических элементов как методы обеспечения геометрической стабильности крупногабаритных оптических систем.*

**Ключевые слова:** взаимное расположение оптических элементов, температурные деформации, системы стабилизации, схема контроля зеркал.

В крупногабаритных оптических системах (диаметром свыше 1 метра), используемых в современных комплексах слежения наземного базирования, становится критичной проблема обеспечения взаимного расположения оптических элементов системы при относительно быстром изменении положения системы в пространстве, так же, как и проблема температурной стабильности.

Первым направлением решения этой проблемы является использование конструкционных материалов, позволяющих обеспечить минимальные весовые и температурные деформации системы.

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики «классического» конструкционного материала для подобных систем

– титана – и кандидатов на его замену – карбида кремния и углепластиковых композитных материалов. Справочно приведены характеристики ситалла как материала зеркал, используемых в таких системах.

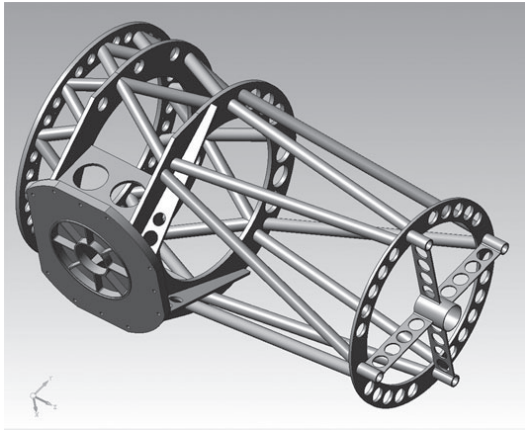
Одна из конструкций несущего корпуса двухзеркальной оптической системы приведена на рис.1. С учетом возможностей изготовления элементов из разных вышеприведенных материалов конструктив этих элементов отличается от показанных. Также элементы конструкции оптимизируются с учетом разных свойств этих материалов.

Результаты расчета оптимизированных конструкций с различными материалами, приведенные в табл. 2, показывают, что новые конструкционные материалы позволяют частично решить проблему геометри-

**Таблица 1.**  
**Характеристики конструкционных материалов**

Характеристика	Материал					
	Ситалл СО-115М (для справки)	Титан ВТ1-0 ГОСТ 19807-91	Карбид кремния (SiC) ГП	Углепластик		
				ЛУ- П/0.1+ЭН ФБ	КУЛОН- 500/0,07+ЭНФ Б	М55J/НИИ КАМ-РС
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	2460	4500	3200	1500	1700	1620
ТКЛР, 10 <sup>-6</sup> С <sup>-1</sup>	0,15	8,2	4,6	1		
Модуль Юнга, ГПа	92	112	425	60		
Коэффициент Пуассона	0,28	0,365	0,18	0,251	0,302	0,28
Теплопроводность, Вт/(м×К)	1,99	22,3	~16			





**Рисунок 1.**  
**Несущий корпус телескопа**

ческой стабильности. В частности, любой из вариантов с этими материалами решает проблему температурных деформаций в диапазоне температур 10К (оцениваемое как изменение температуры в течение сеанса работы).

Также два последних варианта решают проблему взаимного продольного смещения зеркал оптической системы и несколько снижают общий вес конструкции.

К сожалению, полностью проблема геометрической стабильности не может быть решена за счет использования конструкционных материалов. Также недостатком новых материалов являются технологические

сложности изготовления из них элементов конструкции.

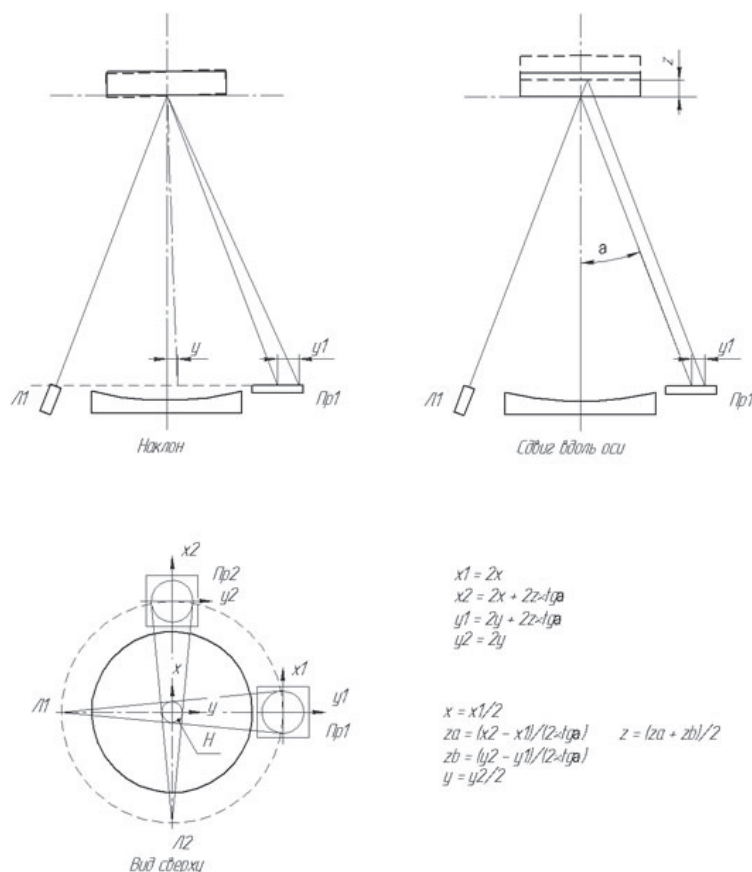
Вследствие этого, вторым направлением является использование активной системы стабилизации, позволяющей в реальном времени контролировать и корректировать положение компонентов основной оптической системы.

Типовая оптическая система является двухзеркальной, состоящей из крупногабаритного главного зеркала и вторичного зеркала меньших размеров. Исходя из этого, вторичное зеркало устанавливается на подвижном управляемом механизме, производится контроль положения вторичного зеркала относительно главного и, при необходимости, положение вторичного зеркала корректируется вышеупомянутым механизмом.

В классической схеме системы стабилизации [1] применяется отдельный контроль трех составляющих взаимного расположения главного и вторичного зеркал – наклона, поперечного смещения, продольного смещения – с использованием трех систем разного типа (автоколлимационный метод контроля наклона с использованием плоского отражающего элемента, распо-

**Таблица 2.**  
**Результаты расчета деформаций вариантов корпуса**

Вариант	Поперечное смещение зеркал, мм		Продольное смещение зеркал, мм				Вес, кг
	Требование	Максимальные весовые деформации	Требование	Максимальные весовые деформации	Деформации при $\Delta T=60K$	Деформации при $\Delta T=10K$	
Титановый корпус	0,05	0,49	0,02	0,07	1,4	0,11	700
Титановый корпус с углепластиковыми штангами		0,48		0,07	0,49	0,04	670
Углепластиковый корпус		0,41		менее 0,02	0,15	0,01	410
Корпус из карбида кремния		0,11		менее 0,02	0,65	0,05	600



$$\begin{aligned}
 x_1 &= 2x \\
 x_2 &= 2x + 2z \cdot \tan \alpha \\
 y_1 &= 2y + 2z \cdot \tan \alpha \\
 y_2 &= 2y \\
 x &= x_1 / 2 \\
 z a &= (x_2 - x_1) / (2 \cdot \tan \alpha) & z = (z a + z b) / 2 \\
 z b &= (y_2 - y_1) / (2 \cdot \tan \alpha) \\
 y &= y_2 / 2
 \end{aligned}$$

**Рисунок 2.**  
**Схема контроля взаимного положения зеркал**

ложенного на оправе вторичного зеркала; визирного метода контроля поперечного смещения положения контрольной точки на оправе вторичного зеркала; контроль качества изображения для определения продольного смещения вторичного зеркала), работающих последовательно.

В разработанной схеме, представленной на рис. 2, использовано то свойство, что вторичное зеркало само является отражающим компонентом. Луч от излучателя Л1, расположенного на главном зеркале, отражается от вторичного зеркала и попадает на приемник Пр1, расположенный также на главном зеркале. Используется комбинация из нескольких пар «излучатель-приемник».

Для большинства оптических систем контроль положения луча на приемниках с использованием соответствующего математического аппарата и программного обеспечения позволяет одновременно определить все три составляющих взаимного расположения зеркал и одновременно провести их коррекцию.

В разработанной схеме по сравнению с классической схемой может быть или уменьшено общее время коррекции взаимного расположения зеркал, или увеличена точность этой коррекции, за счет усреднения больших результатов за то же время.

*Список литературы:*

1. Бронштейн Ю.Л. «Крупногабаритные зеркальные системы», 2015, «ДПК Пресс».



# ИННОВАЦИОННЫЕ РЕШЕНИЯ АО ЛЗОС ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ЗЕРКАЛ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., ВЛАДИМИРОВ Н.М., ДОБРИКОВ Н.С., ПАТРИКЕЕВ В.Е., СЕМЕНОВ А.П.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: lastro@lzos.ru

*Инновационные технологические решения АО ЛЗОС при изготовлении облегченных крупногабаритных зеркал из карбида кремния позволили добиться высокого качества изделий, не уступающего мировым аналогам и минимизировать отставание России в производстве изделий из данного перспективного материала с уникальными физико-механическими свойствами.*

**Ключевые слова:** зеркала из карбида кремния, поколения зеркал, преимущества карбида кремния, этапы производства зеркал, сравнение результатов.

Основная цель любой оптической системы – получение высококачественного изображения. Для достижения этой цели необходимо использовать материалы, обладающие высокой удельной прочностью, высокой удельной жесткостью, низким коэффициентом теплового расширения и высоким коэффициентом теплопроводности. Используя традиционные материалы такие как плавленый кварц, стеклокерамика, бериллий было изготовлено множество уникальных оптических систем. Однако возможности этих материалов ограничены. Требуются новые перспективные материалы и идеи, которые позволят вывести на качественно новый уровень производство высокоточных зеркальных объективов.

Масштабные исследования и поиск новых материалов ведутся в Германии, Франции, Японии, США и Китае. Например, в Соединенных Штатах Америки по программе Министерства обороны США AMSD (Advanced Mirror System Demonstrator) проведены работы по выбору материала и созданию базовых технологий для изготовления силовых и крупногабаритных охлаждаемых облегченных зеркал.

По результатам этих исследований большинство специалистов пришло к выводу, что наиболее перспективным материалом для изготовления облегченных зеркал является

карбид кремния. Данный материал имеет неоспоримое преимущество по своим физико-механическим свойствам перед традиционными материалами. Он позволяет получать очень жесткие и при этом легкие изделия, а это основные ключевые факторы при выборе материала для зеркал, используемых в космосе [1-6].

К большому сожалению, на протяжении последних десятилетий Россия отстала от ведущих стран в разработке технологии изготовления зеркал из карбида кремния. В связи с этим в АО ЛЗОС был проведен тщательный анализ существующих в России и мире технологий по изготовлению зеркал из карбида кремния.

Можно выделить 3 поколения развития технологии изготовления крупногабаритных облегченных оптических элементов из карбида кремния.

- первое поколение – технология изготовления зеркал из реакционносвязанного карбида кремния с использованием шликерного литья (LPSiC): формование заготовки без давления, температура изготовления около 1800°C;

- второе поколение - технология изготовления зеркал из реакционносвязанного карбида кремния с использованием гидростатического прессования заготовок (SiSiC): формова-

ние заготовки с давлением около 200 МПа, температура спекания около 1800°C;

- третье поколение - технология изготовления зеркал из спеченного карбида кремния с использованием гидростатического прессования заготовок (SSiC): формование заготовки с давлением около 200 МПа, температура спекания около 2100°C.

Карбид кремния третьего поколения (SSiC-спеченный карбид кремния) имеет ряд существенных преимуществ перед карбидами 1-го и 2-го поколения, а именно: высокая однородность, трещиностойкость, отсутствие остаточных внутренних напряжений, хорошая обрабатываемость, небольшая величина остаточной микрошероховатости, позволяющая использовать зеркала, изготовленные из этого материала не только в инфракрасном, но и в видимом диапазоне длин волн.

Материалы на основе карбида кремния обладают уникальным сочетанием физико-механических характеристик, позволяющих создавать принципиально новые конструкции крупногабаритной оптики, включая не только оптические зеркала, но и элементы конструкции аппаратуры [7-8].

Основными особенностями и преимуществами карбида кремния являются:

- высокая удельная жесткость и прочность (в 4-5 раз выше чем у стеклокерамики), позволяющая создавать сверхоблегченные самонесущие тонкостенные конструкции. Вышеуказанное свойство обеспечивает высокую размерную стабильность всего изделия при динамических нагрузках (вибрационных, ударных и т.д.) в реальных условиях эксплуатации;

- высокая теплопроводность (в 100 раз выше чем у астроситалла), позволяющая мгновенно перераспределяться температуре по всему объему элементов из карбида кремния, что позволяет избежать ухудшения качества изображения, связанного с термическими деформациями исполнительных поверхностей. Эта особенность позволяет создавать термостабилизированные системы, работающие в условиях криогенных и контрастных температур.

В России на данный момент имеется только технология шликерного литья (LPSiC) – технология 1-го поколения, появившаяся около тридцати лет назад. За последние годы технология не совершенствовалась и, более того, есть все предпосылки, что она будет утеряна, т.к. за последние 10 лет в России не было сделано ни одного крупногабаритного зеркала, пригодного к применению в оптико-электронных комплексах.

Для устранения технологического отставания от зарубежных стран в области изготовления зеркал из карбида кремния в АО ЛЗОС были поставлены работы в рамках которых были применены инновационные технологические решения, позволившие добиться качества изделий, не уступающего импортным аналогам.

Основными этапами производства крупногабаритных облегченных зеркал из карбида кремния являются:

Подготовка исходного сырья

Холодное изостатическое прессование

Предварительная механическая обработка

Спечение

Шлифовка/полировка

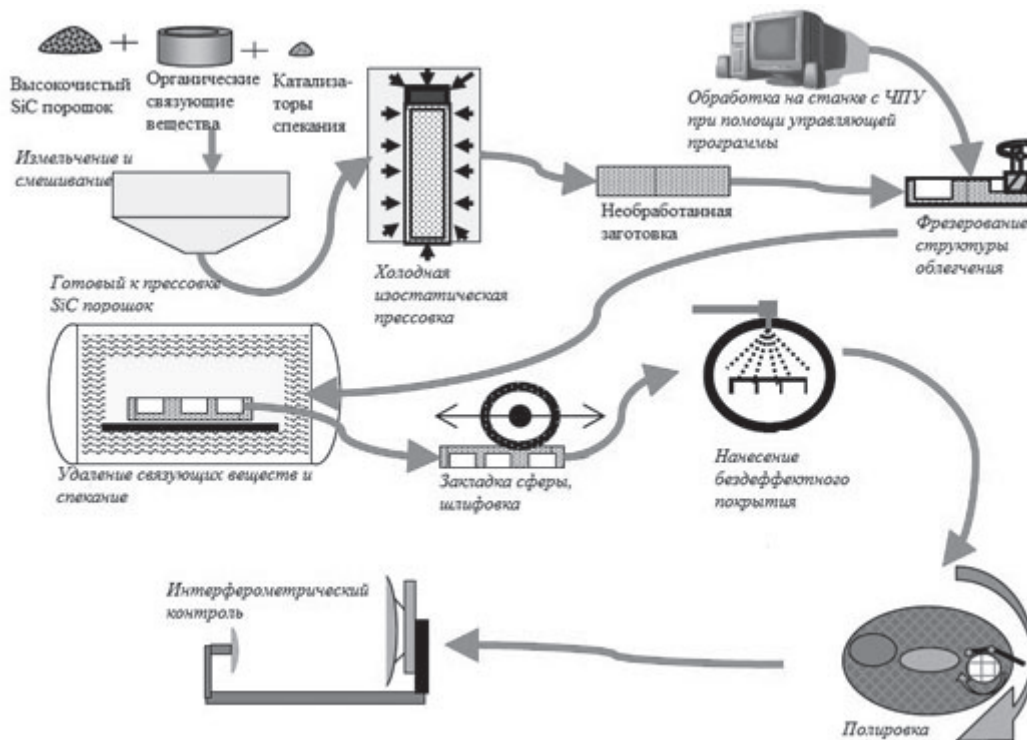
Нанесение покрытия

Упрощенно эти этапы изображены на рис. 1.

При изготовлении зеркал из карбида кремния АО ЛЗОС разработало следующие инновационные решения:

- Использование высокочистого сырья, органических добавок и катализаторов спекания. Эта стадия является основой во всей технологической цепочке по изготовлению крупногабаритных облегченных зеркал из карбида кремния. От состава исходного сырья зависят физико-механические свойства, достигаемая шероховатость на рабочей поверхности и в целом качество изделия.

- Применение в качестве метода формования холодного изостатического прессования с давлением до 150 МПа. Процесс холодного изостатического прессования также очень важный этап в технологической цепочке изготовления крупногабаритных облегченных зеркал из карбида кремния. Если давление будет недостаточным и не будет достигну-



**Рисунок 1.**  
**Этапы производства крупногабаритных облегченных зеркал из карбида кремния**

та необходимая плотность и однородность прессовки, то это крайне негативно отразится на процессе спекания и приведет к разрушению заготовки. Напротив повышенное давление приводит к разрушению самой прессовки. При холодном изостатическом прессовании изготавливается цельная заготовка, из которой в дальнейшем выфрезеруются излишки материала (до 80%) до получения необходимых размеров по чертежу. К плюсам такого подхода можно отнести: высокую однородность материала после стадии спекания, малое время изготовления структуры облегчения (обработка в 20-30 раз быстрее чем, если бы она проводилась после спекания, т.к. после прессовки материал хорошо поддается обработке; изготовление структуры облегчения для крупногабаритного зеркала из стекла занимает от нескольких месяцев до полугода, для аналогичного зеркала из карбида кремния от нескольких дней до 1-2 недель).

- Использование специального твердосплавного инструмента с алмазным покрытием, позволившее улучшить качество и ско-

рость обработки прессованных заготовок.

- Разработку технологических процессов спекания для получения максимально беспористых образцов. Одним из недостатков спеченного карбида кремния является остаточная пористость, которая негативно сказывается на оптических характеристиках зеркал из карбида кремния, однако соблюдение необходимых технологических режимов при процессе спекания позволяют снизить ее до минимальных значений <1%.

Используя свой богатый опыт в нанесении отражающих покрытий на оптические детали АО ЛЗОС было проведено сравнение коэффициентов отражения от покрытия 1И41ИЭ, нанесенного на полочки из карбида кремния и ситалла СО-115М. В среднем отражение от образца из карбида кремния на 3% хуже, чем у ситалла рис. 2.

Разница уменьшается от 4,5% в видимой области до 1,5% в ИК области спектра рис. 3. Это незначительно сказывается на отражающих способностях зеркал и уже сейчас данный материал можно использовать для работы ВД спектра.

Отражение в области спектра от 400 до 2500нм

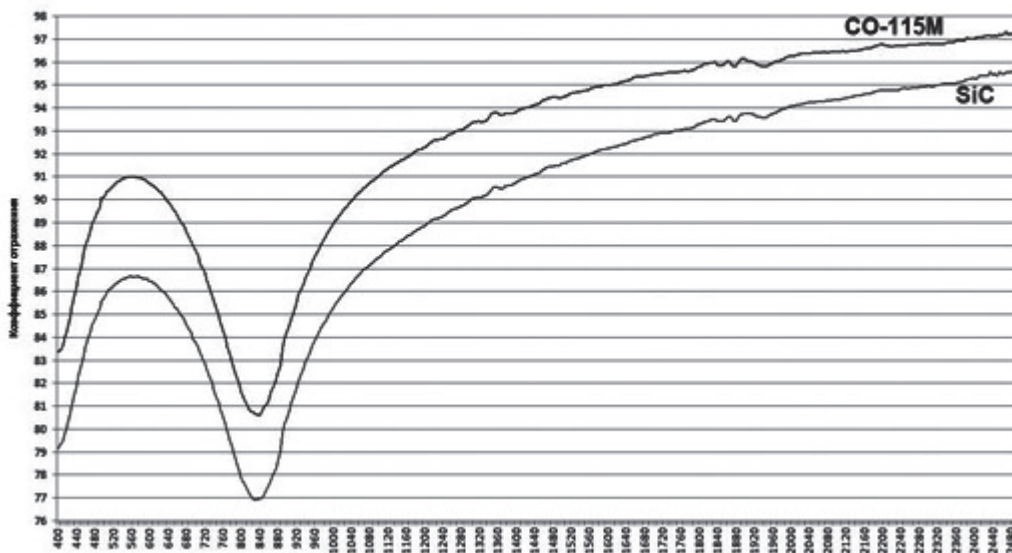


Рисунок 2.

*Коэффициенты отражения на образцах из карбида кремния и ситалла CO-115M с нанесенным ИИ4ИЭ покрытием*

В дальнейших работах АО ЛЗОС предполагается:

- разработать методы нанесения промежуточных покрытий на поверхность SiC зеркал (с возможностью последующей обработки), позволяющих исключить влияние микропор на отражающую способность зеркал.

- разработать инновационные методы обработки исполнительных поверхностей с получением шероховатости до 1 нм (Ra). Данная шероховатость позволяет изготовить крупногабаритные зеркала с оптическим качеством, которые могут работать не только в

ИК, но и в видимом диапазоне длин волн. На рис. 4. приведены результаты измерения шероховатости поверхности зеркала из карбида кремния.

Образцы зеркал, полученные в АО ЛЗОС с использованием новой технологии и автоматизированного формообразования [9] представлены на рис. 5.

Основные характеристики зеркал:

Диаметр – до 1500 мм;

Облегчение – до 80% ;

Достижимое среднеквадратическое отклонение отраженного (СКО) волнового фронта

Разница коэффициентов отражения SiC и CO-115M для области спектра от 400 до 2500нм

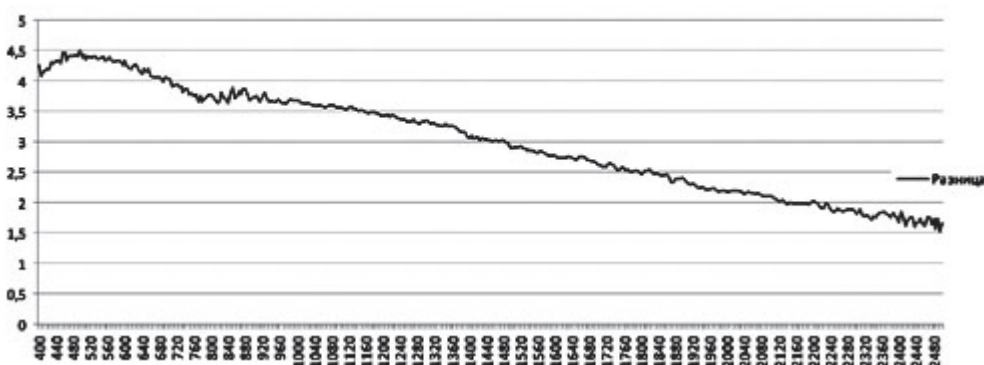
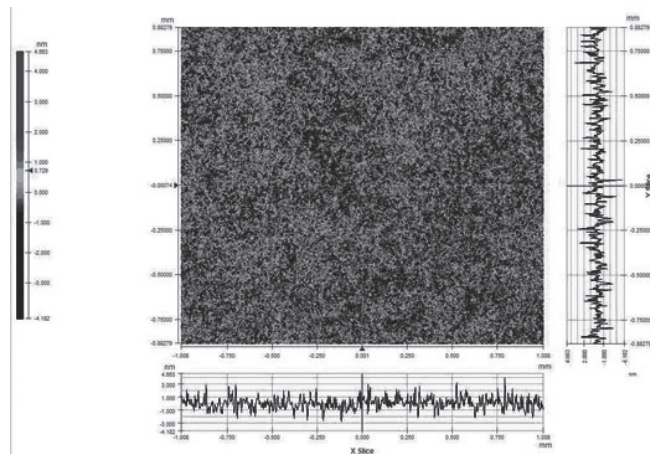


Рисунок 3.

*Разница коэффициентов отражения SiC и CO-115M для области спектра от 400 до 2500 нм*





**Рисунок 4.**  
**Результаты измерения шероховатости поверхности зеркала из карбида кремния**

от рабочей поверхности –  $0,015 \lambda$ ,  $\lambda=633$  нм

Жесткость материала позволила добиться на опытных образцах точности изготовления поверхности в 2 раза превышающей аналогии из стекла

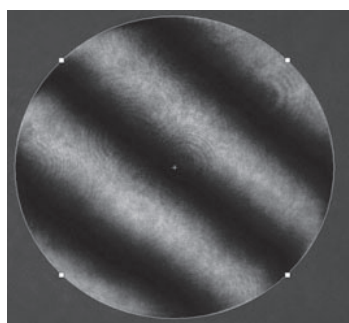
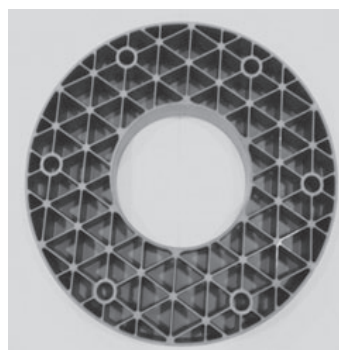
Зеркала и структуры из карбидокремниевой (SiC) керамики становятся все более важными для облегченных оптико-механических систем, которые должны работать при неблагоприятных условиях окружающей среды. Основными преимуществами таких

зеркал являются следующие:

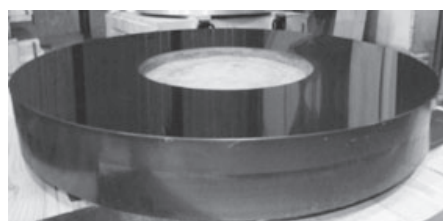
- очень широкий диапазон рабочей температуры (от 4 до 1570 К);
- низкая удельная плотность (2.6-3.1 г/см<sup>3</sup>);
- высокая жесткость (240-400 ГПа) и прочность (300-450 МПа);
- низкий коэффициент теплового расширения (КТР:  $2.1-2.8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ );
- высокая теплопроводность ( $\sim 125-200 \text{ Вт/мК}$ );
- изотропные характеристики КТР, тепло-



**а)**



**в)**



**б)**

**Рисунок 5.**  
**а) – опытный образец зеркала Ø300 мм;**  
**б) – 2 вида опытного образца зеркала Ø775 мм;**  
**в) – интерферограмма опытного образца зеркала Ø775 мм**

проводности, механические свойств и т. д.;

- очень высокая устойчивость к химическому воздействию и коррозии, отсутствие износа или деформации ползучести при нагрузке;

- быстрая и дешевая обработка, короткие сроки производства, значительная гибкость в форме изделия;

- возможность ультра-облегчения (малая толщина стенки и комплексные элементы жесткости).

В ближайшей перспективе зеркала и элементы аппаратуры из карбида кремния существенно потеснят аналоги из классических материалов, что обеспечит получение высоких эксплуатационных характеристик, разрабатываемых образцов ВВСТ и гражданской техники наземного и космического базирования.

*Список литературы:*

1. Маламед Е.Р., Петров Ю.Н., Соколов И.М. Конструкции главных зеркал космических телескопов // Оптический журнал. 2002. № 9. С. 26–30.

2. Любарский С.В., Химич Ю.П. Оптические зеркала из нетрадиционных материалов // Оптический журнал. 1994. № 1. С. 76–83.

3. Мирошников М.М., Любарский С.В., Химич Ю.П. Зеркала оптических телескопов // Оптический журнал. 1990. № 9. С. 3–18.

4. Маламед Е.Р., Петров Ю.Н., Соколов И.М. Конструкции главных зеркал космических телескопов // Оптический журнал. 2002. № 9. С. 26–30.

5. Савицкий А.М., Соколов И.М. Вопросы конструирования облегченных главных зеркал космических телескопов // Оптический журнал. 2010. № 10. С. 94–98.

6. «Проектирование крупногабаритных высокоточных облегченных зеркал» Аналитический обзор под редакцией С.А. Архипова. НТЦ «ИНФОРМТЕХНИКА». 2004 г.

7. Богинский Л.С., Поташники Е.Е., Реут О.П. 50 лет порошковой металлургии Беларуси. История, достижения, перспективы./ ред.кол.: А.Ф.Ильющенко и др. - Глава 10: Теория и практика сухого изостатического (радиального) прессования порошковых и волоконных уплотняемых материалов. - Минск, 2010.- 632 с.

8. Агеев О.А., Беляев А.Е., Болтовец Н.С. и др. Карбид кремния: технология, свойства, применение. Харьков: «ИСМА». 2010. - 532 с.

9. Абдулкадыров М.А., Семенов А.П., Шаров Ю.А., Патрикеев В.Е. Автоматизированная система для формообразования и доводки асферических поверхностей крупногабаритных оптических деталей произвольной конфигурации // Оптический журнал. - 1997. - том 64, № 2. - С. 107-110.

# ИННОВАЦИОННЫЕ ВАКУУМНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОИЗВОДСТВЕ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ НА АО ЛЗОС

АЗЕРБАЕВ А.А., МУХАММЕДЗЯНОВ Т.Р., СЕМЕНОВ А.П., АБДУЛКАДЫРОВ М.А.

АО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: lktb-2@lzos.ru

*Рассмотрена реализация и применение вакуумных технологий – ионно-лучевой полировки и магнетронного нанесения покрытий, на крупнейшем в России предприятии по выпуску крупногабаритной оптики – АО «Лыткаринский завод оптического стекла».*

**Ключевые слова:** ионно-лучевая полировка, магнетронное нанесение покрытий, крупногабаритные оптические детали.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наиболее сложными в производстве крупногабаритной оптики являются внеосевые высокоасферичные оптические элементы и внеосевые сегменты составных зеркал. Такими, например, являются сегменты составных зеркал созданных (телескопы Keck I, Keck II, LAMOST) и разрабатываемых (телескопы E-ELT, TMT). Производство такой сложной крупногабаритной оптики требует совершенствования технологий изготовления, т.к. получение вышеуказанных оптических элементов (особенно сегментов составных зеркал телескопов) традиционным методом механической полировки весьма затруднительно. Для решения данной задачи в АО ЛЗОС были реализованы следующие вакуумные технологии: ионно-лучевая полировка, позволяющая получать оптические детали диаметром до 2,5 м с произвольной формой внешнего периметра и качеством рабочей поверхности по среднеквадратичному отклонению (СКО) до  $\lambda/60$  и магнетронное нанесение на оптические детали диаметром до 4 м отражающих покрытий с защитным слоем со сроком эксплуатации до 30 лет.

## ИОННО-ЛУЧЕВАЯ ПОЛИРОВКА

Во время ионно-лучевой полировки (обработки) материал обрабатываемой поверхности удаляется посредством воздействия на нее направленного пучка ионов с энергией

значительно превышающей энергию связи между частицами материала поверхности. Метод ионно-лучевой обработки (ИЛО) является по сути бесконтактным способом съема материала и отличается высокой стабильностью получаемых результатов вне зависимости от формы рабочей поверхности или внешнего периметра обрабатываемой детали. Это выгодно отличает метод ИЛО от механической полировки, обладающей невысокой предсказуемостью съема и ограничением вида «срыв края» при работе с деталями некруглой формы.

В АО ЛЗОС для ионно-лучевой полировки была создана и апробирована вакуумная установка, представленная на рис. 1.

Технические характеристики вакуумной установки для ионно-лучевой полировки крупногабаритных оптических деталей:

диаметр обрабатываемой детали - до 2,5 м;

вес обрабатываемой детали - до 5,5 т;

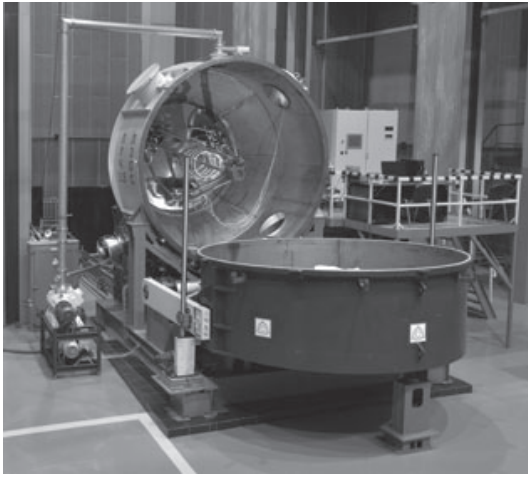
форма обрабатываемой поверхности - плоская, выпуклая или вогнутая, сферическая или асферическая;

конфигурация внешнего периметра детали – произвольная;

достигаемая точность формы поверхности по СКО - до  $\lambda/60$ ;

система перемещения ионного источника - 6-ти координатный гексапод;

ионный источник - 2 источника с анодным слоем с диаметрами пучка ионов 50 и 100 мм.



**Рисунок 1.**  
**Вакуумная установка**  
**для ионно-лучевой полировки**

По сравнению с имеющимися аналогами (оборудование для проведения ИЛО компаний Eastman Kodak (США) и Sagem (Франция)) наша установка отличается следующим:

- использованы в качестве генераторов ионного пучка ионные источники с анодным слоем, имеющие меньшие массогабаритные параметры по сравнению с сеточными источниками Кауфмана. Это позволяет использовать в одном сеансе обработки два ионных источника с разными диаметрами пучков;

- в качестве системы перемещения использован 6-ти координатный гексапод, обладающий большей гибкостью в ис-

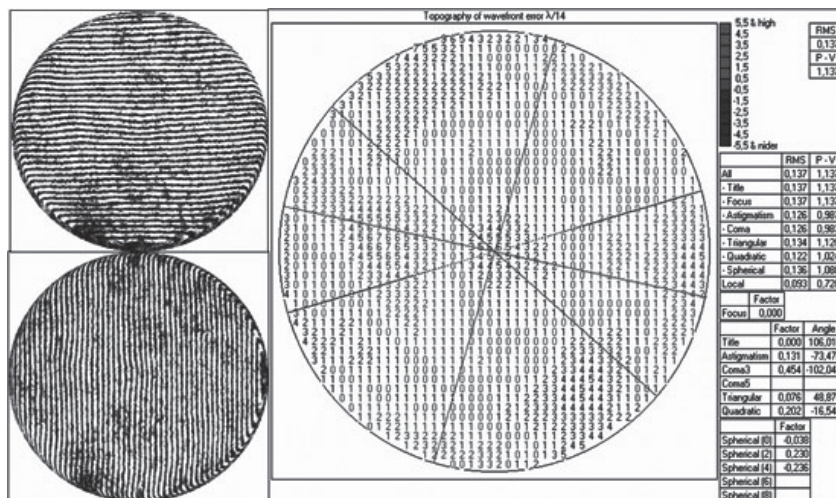
пользовании, чем порталные системы;

применено вертикальное расположение детали в вакуумной камере, что с одной стороны позволяет уменьшить риск попадания загрязнений на обрабатываемую поверхность, с другой стороны упрощает систему крепления детали по сравнению с креплением обрабатываемой поверхностью вниз.

В рамках обработки технологии производилась доводка поверхности зеркала из астроситалла диаметром 1000 мм, толщиной 62 мм, с радиусом сферы 4000 мм. После 11 сеансов обработки при помощи ионного пучка поверхность детали улучшилась по RMS: с ошибки  $RMS(W) = 0.137\lambda$  до ошибки  $RMS(W) = 0.019\lambda$  и по размаху ошибки: с  $P-V = 1.137\lambda$  до  $P-V = 0.121\lambda$  (рис. 2 и рис. 3). Также получены следующие данные: профиль съема ионных источников повторяет профиль ионного пучка, т.е. подобен Гауссовому, скорость съема составляет до 90 нм/мин.

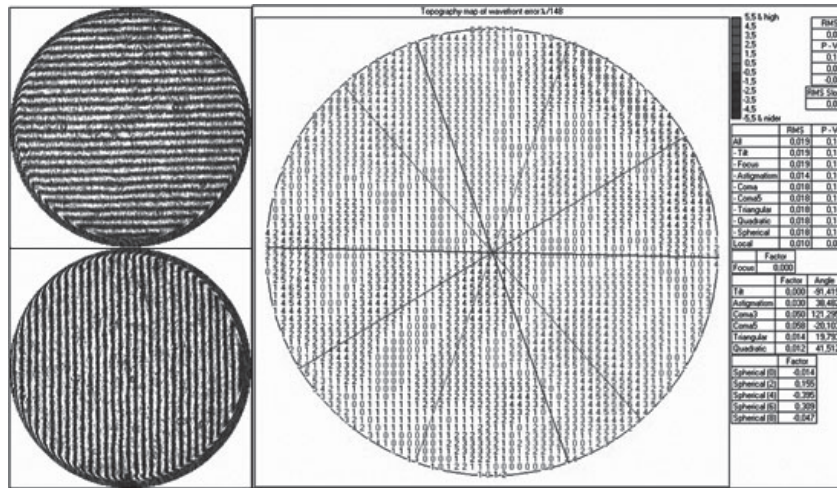
### МАГНЕТРОННОЕ НАНЕСЕНИЕ ОТРАЖАЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

Как правило, нанесение отражающего покрытия для зеркал больших телескопов осуществляется рядом с обсерваторией, где расположен телескоп. Это связано с большими финансовыми затратами и рисками при транспортировке зеркала. Однако, для средних и малых телескопов создание спе-



**Рисунок 2.**  
**Интерферограмма и карта волнового фронта детали до обработки**



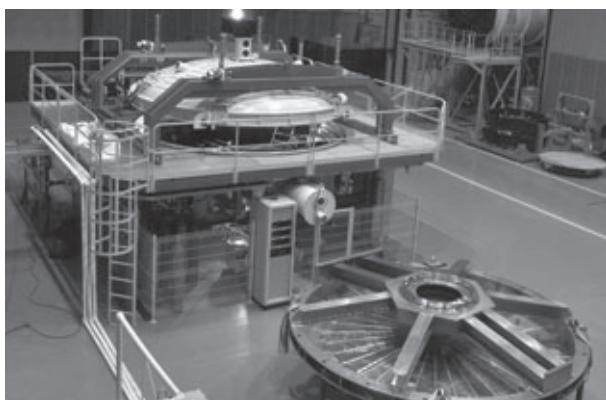


**Рисунок 3.**  
**Интерферограмма и карта волнового фронта детали после 11 сеансов обработки**

циальной вакуумной напылительной установки, инфраструктуры для ее размещения, затраты на персонал может оказаться финансово обременительным, а для зеркал зеркальных и зеркально-линзовых систем космического и воздушного базирования просто невозможно. В таком случае оптимальным является нанесение отражающего покрытия на предприятии – изготовителе оптического элемента.

С учетом вышесказанного на нашем предприятии была создана и внедрена в производство вакуумная установка для нанесения отражающих покрытий с защитным слоем на крупногабаритные оптические детали диаметром до 4 м (рис. 4).

Технические характеристики вакуумной



**Рисунок 4.**  
**Вакуумная установка для нанесения отражающего покрытия с защитным слоем**

установки для нанесения отражающего покрытия с защитным слоем:

- диаметр детали – до 4 метров
- максимальная масса детали – до 7 тонн
- метод нанесения покрытия – магнетронное распыление
- материалы покрытия - Al, Ag, SiO<sub>2</sub>, SiO, SiN<sub>x</sub>, NiCrN<sub>x</sub>, и др.
- равномерность толщины покрытия – ± 5%
- контроль процесса напыления – при помощи кварцевых датчиков.

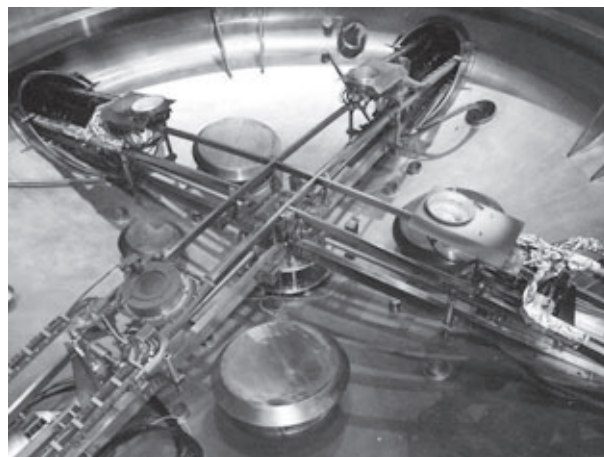
С точки зрения качества получаемого покрытия нанесение отражающих покрытий при помощи магнетронных распылителей является более предпочтительным по сравнению с получением покрытия методом термического испарения. Также вследствие особенностей технологии магнетронного нанесения покрытий расстояние между магнетроном и подложкой (зеркалом) значительно меньше, чем то же расстояние в случае нанесения покрытия методом термического испарения, что позволяет сделать вакуумную камеру значительно компактнее и, следовательно, дешевле. В связи с этим в нашей установке применены именно магнетронные распылители. Особенностью созданной на нашем предприятии установки является использование циркулярных магнетронов с круглой мишенью по сравнению с аналогичными зарубежными установками,

имеющими планарные магнетроны с протяженными мишенями. В нашей установке имеется три циркулярных магнетрона (можно наносить до трех разных материалов в одной загрузке) и один ионный источник Кауфмана. Магнетроны и источник двигаются по рельсам, которые обладают определенной формой, повторяющей профиль поверхности зеркала (рис. 5). Нанесение покрытия происходит снизу вверх, т.е. оптический элемент во время нанесения покрытия находится рабочей поверхностью вниз.

Применение циркулярных магнетронов обладает рядом преимуществ по сравнению с планарными:

- они дешевле и проще в эксплуатации;
- не требуют применения специальных масок, выравнивающих толщину наносимого покрытия (равномерность покрытия достигается за счет параметров самого магнетрона, закона его движения и формы рельсов);
- нанесение покрытия на зеркало с другим профилем достигается путем смены рельсов без необходимости замены всего магнетрона.

Кроме того такая компоновка установки позволяет использовать ионный источник для очистки и активирования поверхности зеркала перед нанесением покрытия, а не



**Рисунок 5.**  
**Магнетронные распылители**  
**и ионный источник на рельсах**

просто электрод-разрядник для создания тлеющего разряда. За счет применения ионного источника достигается лучшая очистка и активирование поверхности зеркала, кроме того есть возможно коррекции покрытия путем его травления направленным ионным пучком.

На момент создания установки в качестве базового покрытия, на котором происходила обработка технологии нанесения отражающих покрытий, было выбрано покрытие, состоящее из отражающего слоя алюминия Al (120 нм) и защитного слоя кварца SiO<sub>2</sub> (180 нм).

**Таблица 1.**  
**Требования и полученные результаты для покрытия Al+SiO<sub>2</sub>**

Параметр	Требование	Результат	Метод измерения
Ср. для 250-1200 нм	≥85%	86%	Спектрофотометр Lambda 950 с приставкой URA
Равномерность	≤ ±5%	соответствует	Равномерность Al покрытия измерялась на приборе NanoCam (динамический оптический профилометр). Равномерность защитного слоя SiO <sub>2</sub> – на основе коэффициента отражения.
Адгезия	без отрыва слоев покрытия	соответствует	Адгезия покрытия проверялась методом приклеивания специальных полосок с последующим резким отрывом.
Механическая прочность	I группа (2000 оборотов)	0 группа (3000 оборотов)	Механическая прочность проверялась на истирание на приборе типа CM-55.
Срок эксплуатации	10 лет	30 лет	Срок эксплуатации определен с помощью климатических испытаний для УХЛЗ.

Достигнутые результаты для базового покрытия представлены в табл. 1.

В рамках отработки технологии базовое покрытие  $Al+SiO_2$  было нанесено на два зеркала  $\varnothing 1150$  мм: плоское зеркало и сферическое зеркало с радиусом сферы 34000 мм, на асферическое зеркало  $\varnothing 1120$  мм и на два зеркала  $\varnothing 1050$  мм.

На всех зеркалах параметры покрытия соответствовали значениям, указанным в табл. 1.

В ближайшем будущем планируется нанесение отражающего покрытия на ряд зеркал с диаметрами от 1,9 м до 4 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время благодаря реализации технологий ионно-лучевой полировки и магнетронного нанесения покрытия АО ЛЗЭС является единственным предприятием в России, обладающим полным – от варки стекла до нанесения покрытия - производственным циклом изготовления крупногабаритных оптических деталей диаметром до 4 метров. Это, возможно, позволит участвовать нашему предприятию в создании крупногабаритных оптических элементов для ряда международных проектов, например, по созданию сегментов для главного составного зеркала диаметром 39 м телескопа E-ELT.

# МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ШЛИФОВАННОЙ АСФЕРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

АБДУЛКАДЫРОВ М.А., ПАТРИКЕЕВ В.Е., СЕМЕНОВ А.П.

ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла»

E-mail: lastro@lzos.ru ; lastro-am@lzos.ru

Описан метод определения абсолютного профиля шлифованной асферической поверхности крупногабаритных астрономических зеркал с использованием линейного трехточечного сферометра, последовательного перемещаемого перпендикулярно направлению от центра до края детали. Описан способ определения вершинного радиуса. Приведены примеры успешного использования метода при изготовлении зеркал телескопов VST (VLT Survey Telescope), TNT (Thai National Telescope), VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy), DOTARIES (Devasthal Optical Telescope for Aryabhata Research Institute of Observational Sciences) и др.

**Ключевые слова:** телескопы, астрономические зеркала, контроль асферической шлифованной поверхности зеркала, линейный сферометр.

## ВВЕДЕНИЕ

При шлифовании рабочей поверхности и асферизации шлифованием используются как классические методы обработки, так и асферизация малым инструментом на станках с компьютерным управлением. Для создания управляющей программы обработки необходима информация о форме поверхности, т.е. топографическая карта. Ее можно получить различными способами.

1. С помощью 3-D машины, позволяющей непосредственно измерять форму рабочей поверхности в трехмерном измерении, сравнивать эту форму с требуемой и находить отклонения, т.е. строить карту отклонений от требуемой формы. Например, в ОАО ЛЗОС для деталей диаметром до 1400 мм с успехом используется 6-координатная измерительная машина КИМ-1400, российского производства (Саратов), дающая точность отклонений от требуемой асферической поверхности в 2-3 мкм. Она построена по принципу гексапода с измерительной головкой [1]. Использование такой машины для измерений и построение карты поверхности весьма эффективно для процесса шлифования и особенно для асферизации внеосевых оптических деталей. Такая технология опробована и оправдала себя

в конкретном производстве. Данным методом достигаются отклонения от требуемой формы поверхности менее 5-8 мкм.

2. Известны способы определения формы оптической поверхности с измерением отклонений от сферической с использованием механических измерений [2, 3, 4]. В профилометре (*the swing arm profilometer*) измерительную головку, закрепленную на поворотной наклонной штанге, последовательно перемещают механически по большим дугам по контролируемой поверхности и с помощью самописца снимают показания индикатора измерительной головки (рис. 1).

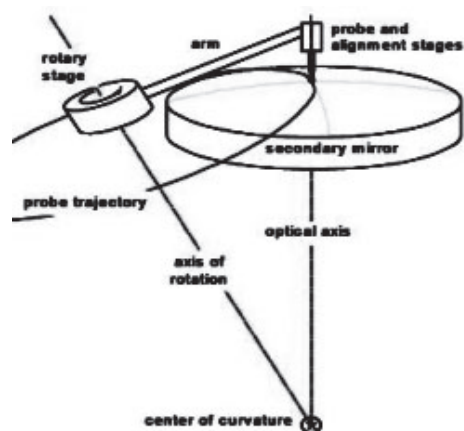


Рисунок 1.  
Профилометр для измерения профиля асферической поверхности



Профилометр с поворачивающейся рукой измеряет отклонения вдоль дуги на поверхности детали с центром окружности, расположенной на оси, проходящей через центр кривизны ближайшей сферы контролируемой поверхности. Измерения выполняются по нормали к поверхности, и, тем самым, измеряются отклонения асферической поверхности от сферы по дугам, проходящим через вершину асферической поверхности. Однако из соображений жесткости штанги и необходимой точности измерений способ применим для контроля зеркал относительно небольшого диаметра (не более 1 м).

3. Для деталей любых размеров, выпуклых и вогнутых, но осесимметричных, применим метод трехточечного линейного сферометра [1]. В основе методики использовано свойство асферических поверхностей: изменение радиуса на различных зонах поверхности. При установке линейного сферометра на асферическую поверхность между краевыми и центральной ножками измеряется стрелка прогиба, величина которой изменяется при перемещении сферометра.

4. Для деталей произвольной формы на стадии шлифования может быть использован ИК-интерферометр в сочетании с зеркальным корректором волнового фронта [1]. Зеркальный корректор для ИК-диапазона ( $\lambda=10.6$  мкм), например, использовался для автоматизированной асферизации главных зеркал проектов VST (*VLT Survey Telescope*) [6] и VISTA (*Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy*) [5, 7].

5. Также для измерения поверхностей любой формы деталей диаметром до 500 мм разработан специальный прибор бесконтактного измерения NANOMEFOS (Nanometer Accuracy Non-contact Measurement of Freeform Optical Surfaces) [8].

Есть и еще ряд новых методов.

Процесс обработки оптики является эффективным, когда используются оптимальные из перечисленных методов для каждого конкретного случая.

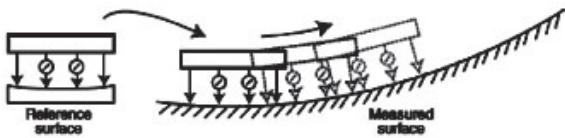
Задача поиска эффективного способа получения профиля асферической поверхности

для высокоасферических поверхностей, когда ИК-интерферометр еще не представляется возможным использовать, а требуется получить как можно более подробный профиль асферической поверхности для использования программно-управляемой обработки, привели к необходимости модифицировать способ измерения профиля сферометром для крупногабаритных оптических деталей диаметром как до 1 м, так и для деталей диаметром до 6 м.

## ТЕОРИЯ МЕТОДА

Для измерения профиля высокоточных асферических поверхностей крупногабаритных оптических деталей, в частности, зеркал телескопов, используется линейный трехточечный сферометр. С помощью трехточечного сферометра с двумя агатовыми ножками на концах и индикаторной головкой с ценой деления 0.1 мкм, установленной посередине, с базой сферометра, равной «а» (расстоянию между двумя крайними агатовыми ножками сферометра), измеряют стрелки прогиба вдоль диаметрального направления или по хорде, касательной к центральному отверстию на детали (для деталей с центральным отверстием). Сферометр последовательно смещают на величину  $a/2$  таким образом, чтобы одна крайняя ножка сферометра перемещалась в положение центральной ножки, центральная в положение второй крайней ножки, а вторая крайняя ножка в новое положение. Таким образом, проходят весь диаметральный отрезок или хорду с шагом в половину базы сферометра. При этом радиус детали (диаметр, хорду) разбивают на отдельные промежутки «а», укладываемые на полном радиусе детали. Сравнивают результаты с расчетными величинами стрелок прогиба для каждого положения сферометра и по данным измерения строят относительный профиль отклонений от ближайшей асферической поверхности для выполнения процесса шлифования.

Дискретность построенного профиля составляет половину базы сферометра, уменьшение базы сферометра приводит к увеличению погрешности определения профиля. Для



**Рисунок 2.**  
**Сферометр для контроля профиля асферической поверхности**

более точного построения профиля поверхности можно использовать сферометр с двумя, тремя и более индикаторными головками [9] (рис. 2). Точность измерений сферометра может достигать величины 0.2 мкм при базе сферометра до 1 м с определением профиля в 5-10 мкм (среднеквадратичное) и измерением радиуса кривизны крупногабаритного зеркала с точностью в 10 мм для радиуса в 30 м.

Практическое использование данного метода в реальных измерениях показало, что с увеличением базы сферометра существенно возрастают его собственные деформации, меняющиеся из-за изменения его наклона к горизонтальному положению при перемещении его вдоль диаметрального направления, что приводит к существенным погрешностям в измерениях и, соответственно, к существенным ошибкам в построении профиля.

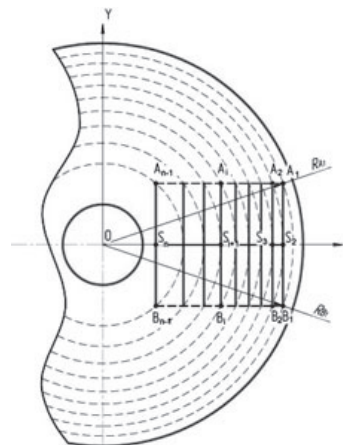
В предлагаемом способе определения профиля шлифованной асферической поверхности также используется линейный трехточечный сферометр с базой «а» с индикатором посередине. Сферометр помещается в заранее рассчитанные точки. Обычно для устойчивости сферометра на вогнутой или выпуклой поверхности его снабжают хотя бы одной вспомогательной боковой регулируемой ножкой-упором. Эта боковая ножка позволяет регулировать наклон сферометра и устанавливать его по нормали к контролируемой поверхности. Сферометр обнуляется на эталонной поверхности с известным радиусом, близким к интервалу радиусов асферической поверхности. Устанавливают сферометр крайними ножками перпендикулярно диаметральному сечению в краевую зону детали с радиусом  $R_i$  (рис. 3), затем перемещают сферометр крайними ножками в зону

с радиусом  $R_{i+1} = \sqrt{R_i^2 - (a/2)^2}$ , в которой до этого располагалась центральная ножка

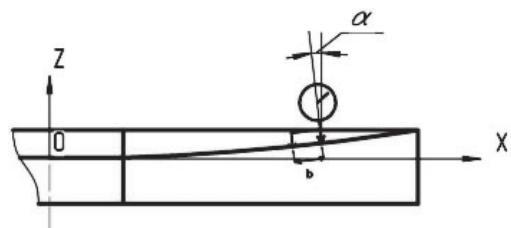
с индикатором. Затем на основании геометрических соотношений строят абсолютный профиль отклонений поверхности от заданного (теоретического) профиля с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом и необходимым допуском на них.

При таком методе измерений существенно увеличивается количество измеренных точек, т.е. мы получаем более подробную информацию о профиле поверхности, чем при продольных измерениях профиля, что важно для анализа профиля поверхности и выполнения процесса асферизации.

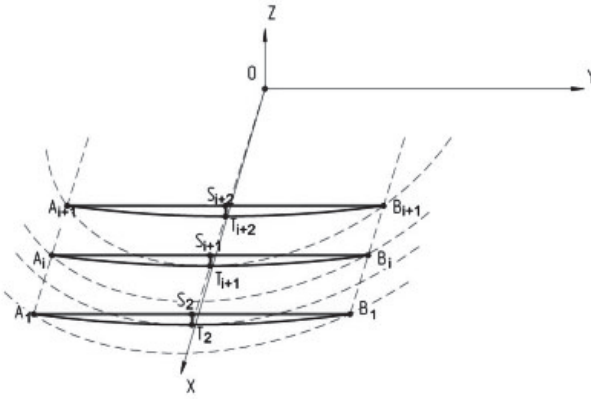
Сферометр с базой «а» ( $A_1 - B_1$  на рис. 3), расстоянием «b» до 4-й боковой ножки от центральной (рис. 4), обеспечивающей нормальное к поверхности положение сферометра, помещают на эталонную поверхность, обнуляют, устанавливают крайними ножками на контролируемую деталь перпендикулярно диаметральному сечению и по нормали к поверхности (рис. 4) в первую краевую



**Рисунок 3.**  
**Схема установки ножек сферометра на поверхности и схема для расчета установочных точек**



**Рисунок 4.**  
**Схема расположения индикатора**



**Рисунок 5.**  
**Схема опорных точек и отрезков**

зону детали (в точки  $A_1, B_1$  рис. 3, рис. 5) с радиусом  $RA_1$  в плоскости  $XY$ , в которой отклонение профиля принимается равным  $P_1 = 0$ . Снимают показания сферометра  $\Delta s_1$  измер относительно эталонной поверхности в точке  $T_2$  на зоне с расстоянием от центра  $R_{A2} = \sqrt{R_{A1}^2 - (a/2)^2}$ , в которой теоретическое значение должно быть  $\Delta s_{2, \text{теор}}$ . Определяется добавка к профилю  $\Delta p_2 = \Delta s_{2, \text{измер}} - \Delta s_{2, \text{теор}}$  и отклонение профиля в точке  $P_2 = P_1 + \Delta p_2$ . Сферометр перемещают крайними ножками на зону, в которой располагалась центральная ножка. Снова выполняют измерения стрелки прогиба и определяют отклонения профиля в точке  $P_{i+1} = P_i + \Delta p_i$  и процесс измерений продолжают до центра детали или до центрального отверстия  $P_n = P_{n-1} + \Delta p_{n-1}$  и строят абсолютный профиль с отклонениями от поверхности с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом.

$\Delta s_{i, \text{теор}}$  определяется из уравнения асферической поверхности, которое в общем виде записывается следующим образом:

$$z = \frac{cS^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + K)c^2S^2}} + A_1S^4 + A_2S^6 + A_3S^8 + A_4S^{10},$$

где  $S^2 = x^2 + y^2$ ;

$c = 1/R_0$  – величина, обратная вершинному радиусу;

$K = -e^2$ , где  $e$  – эксцентриситет поверхности;

$A_1, A_2, A_3, A_4$  – коэффициенты асферики для поверхностей более высокого порядка (выше 2-го).

Определяем значения  $z_{A1}, z_{A2}, z_{T2}$ , опреде-

ляем стрелку с вычетом стрелки эталонной поверхности  $\text{arow}_{\text{сферы}}$ :

$$\Delta s_{i, \text{теор}} = (z_{A1} - z_{T2} - \text{arow}_{\text{сферы}}) \cdot \cos(\alpha),$$

где угол  $\alpha$  – угол между вертикалью и нормалью к поверхности в измеряемой точке.

### ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Реализация способа представлена на примере асферизации шлифованием и измерениях сферометром главного зеркала диаметром 3700 мм Devasthal Optical Telescope (DOT) for Aryabhata Research Institute of Observational Sciences (ARIES) [10] со световым измеряемым диаметром 3670 мм, вершинным радиусом кривизны асферической поверхности, равным 14639,0 мм, конической константой  $K = 1,03296$ , диаметром отверстия 720 мм. Для измерений использовали линейный трехточечный сферометр с индикаторной головкой посредине с ценой деления 0.1 мкм, с базой «а» (расстояние между крайними ножками сферометра), равной 622 мм и боковой регулируемой по высоте вспомогательной ножкой, закрепленной сбоку индикатора на расстоянии 62 мм. Для обнуления индикатора было изготовлено контрольное эталонное зеркало с радиусом 14727,0 мм, учитывая что радиус ближайшей к асферической поверхности сферы равен 14700,2 мм. Асферичность профиля составляет 106 мкм.

Как уже отмечалось, при измерении сферометром вдоль диаметрального направления или вдоль хорды, с увеличением базы сферометра существенно возрастают его собственные деформации, меняющиеся из-за изменения его наклона к горизонтальному положению, что приводит к существенным погрешностям в измерениях и, соответственно, к существенным ошибкам в построении профиля. В этом способе трудно учесть такие погрешности наклона в двух плоскостях. В описываемом способе при измерениях сферометр устанавливается перпендикулярно радиальному направлению и имеет наклон только в одной плоскости. Изменения показаний сферометра от деформаций при наклоне определялись экспериментально и данная поправка вводилась в расчет. Например, в

описываемом случае поправка при наклоне сферометра к вертикальному положению на  $10^\circ$  составляет 5 мкм.

На рис. 6 приведены результаты расчета отклонений профиля по описанной методике, причем не от ближайшей поверхности, а от поверхности с требуемым вершинным радиусом и эксцентриситетом.  $Y_{тр.ноги}$ ,  $Z_{тр.ноги}$  – координаты третьей, вспомогательной ножки на поверхности детали в мм (начало координат в точке вершины детали, координата  $Y$  перпендикулярна оптической оси  $Z$ ).  $PC_{теор.}$  и  $PC_{факт.}$  – теоретические и фактически измеренные отклонения стрелки прогиба от эталонной сферической поверхности в мкм,  $Y$  – расстояние от центра детали в мм,  $Z_{теор.}$  и  $Z_{факт.}$  – теоретическое и фактическое значение координаты  $Z$ .  $Асф. Теор.$  и  $Асф. факт.$  – теоретическое и полученное фактическое значение асферичности от ближайшей сферы (мкм).  $Дельта асф.$  – искомые нормальные отклонения асферической поверхности от теоретической (мкм). В последней графе  $Попр. деф.$  – поправка в показаниях сферометра (мкм), учитывающая деформации сферометра при наклонном его положении относительно рабочей поверхности. Данная поправка определяется экспериментально

для различных углов наклона сферометра а (рис. 4) относительно вертикального положения. Учет данной деформационной поправки значительно повышает точность измерений.

Для снижения погрешности измерений:

- измерения выполняются от эталонной сферической поверхности с измеренным радиусом кривизны;
- измерения повторяются несколько раз в каждом положении и усредняются;
- измерения выполняются в нескольких диаметральных сечениях на поверхности детали;
- измерения выполняются набором сферометров с разной базой;
- все измерения выполняются с учетом поправки за счет деформаций сферометра при наклонном расположении на поверхности измеряемой детали. Без учета данной погрешности ошибка в описываемом случае может достигать 50 мкм (!)

Суммарная погрешность определения профиля определяется суммой погрешностей каждого измерения. Если каждое измерение выполнено с точностью 1 мкм, то в рассматриваемом случае (18 стоянок) суммарная максимальная и наименее вероятная погрешность будет составлять 18 мкм, если

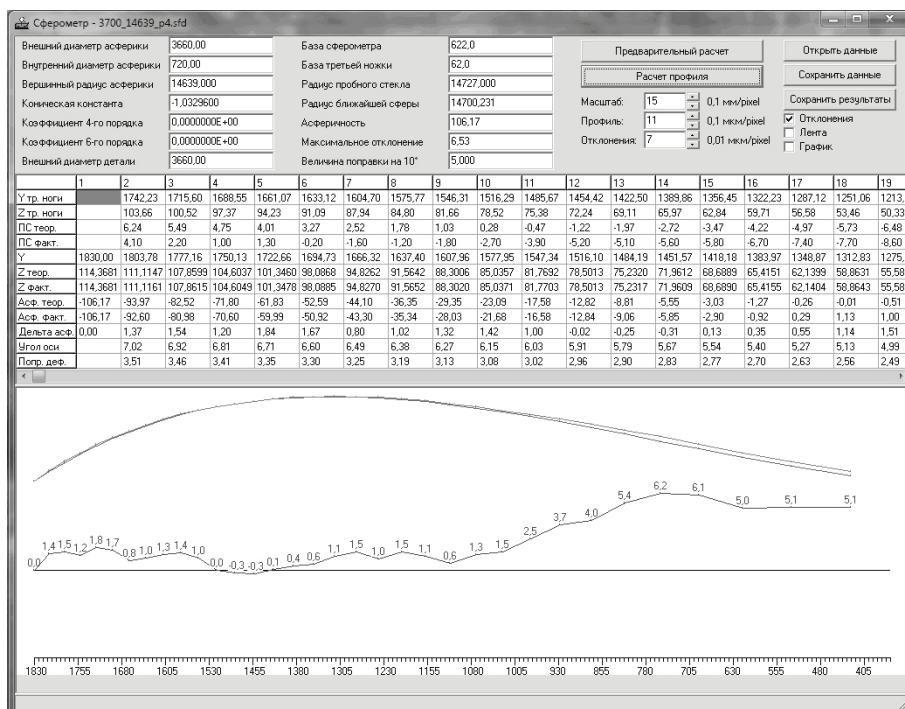


Рисунок 6. Результат расчета профиля асферической поверхности



погрешность измерений 0.2 мкм, то суммарная погрешность определения профиля меньше 4 мкм.

На рис. 6 приведен усредненный профиль и отклонения составляют около 6 мкм. Отклонения фактические включают астигматизм, асимметрию и другие остаточные ошибки. Поэтому после предварительной полировки поверхности был выполнен интерферометрический контроль с CGH – корректором и получены подтверждающие результаты.

Фактические измерения вершинного радиуса поверхности дали величину  $R_0 = 14639 \pm 5$  мм (требуемое значение  $\pm 7$  мм), что составляет величину отклонения от заданного значения 0,03 %. Ошибка формы поверхности составила 16 мкм. Интерферограмма волнового фронта после предварительной полировки поверхности зеркала представлена на рис. 7.

Следует особо отметить, что после контроля сферометром и предварительной полировки контроль осуществлен и ИК-интерферометром с корректором и CGH-корректором в видимом диапазоне [11]. И ИК-корректор, фактически, не понадобился. Таким же образом выполнялась асферизация зеркала проекта TNT (Thai National telescope, Australia – Thailand) диаметром 2400 мм с ас-



**Рисунок 7.**  
**Интерферограмма волнового фронта**  
**после предварительной полировки**  
**поверхности зеркала**

феричностью в 160 мкм, а также ряд других крупных проектов изготовления главных и вторичных зеркал.

Результаты, приведенные на рис. 6 и 7, показывают высокую эффективность и надежность предложенного метода измерения профиля шлифованной асферической поверхности и практически подтверждают достижение технического результата: построение абсолютного профиля отклонений формы асферической поверхности оптической детали от требуемой теоретической с необходимой точностью (отклонение вершинного радиуса от заданного менее 0,03-0,05 %) и достижение данного значения вершинного радиуса в процессе формообразования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предложенном методе измерения профиля асферической поверхности при перпендикулярном его расположении диаметральному сечению и последовательном перемещении его от центра к краю удается получить подробный профиль абсолютных отклонений асферической поверхности от требуемой с точностью в 5-10 мкм и получить требуемый вершинный радиус с точностью менее 0.03-0.05 % от заданного. Успешная реализация метода была показана при асферизации зеркал по проектам VST, TNT, VISTA, DOT ARIES и др.

#### Список литературы:

1. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V.* Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects)// Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8450. P. 84504T.
2. *Burge J.H.* Measurement of large convex aspheres// Proceedings of SPIE. 1996. V. 2871. P.362-373 (1996).
3. *Smith B.K., Burge J.H. and Martin H.M.* Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes// Proceedings of SPIE. 1997. V.3134. P. 51-61.
4. *Burge J. H., Su P., Zhao C.* Optical metrology for very large convex aspheres// Proceedings of SPIE. 2008. V.7018. P.701818-1 - 701818-12.

5. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V.* M1 and M2 mirror manufacturing for ARIES project: current status// Proceedings of SPIE. 2010. V.7739. P.773907.
6. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A.* Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST// Proceedings of SPIE. 2001. V.4451. P.131-137.
7. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A.* Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST// Proceedings of SPIE. 2001. V.4451. P.138-144.
8. *Henselmans R., Rosielle, P.C.J.N., Steinbuch, M., Saunders, I.J.* Nanometer Accuracy Noncontact Measurement of Freeform Optical Surfaces// 2005. Philips Precision Technology Conference. P.117 – 121.
9. *Bely P. Y.* The Design and Construction of Large Optical Telescopes// 2002. Springer. P.167 .
10. *Semenov A.P.* Accomplished the task of production of the primary and secondary mirrors of Devasthal Optical Telescope under the project ARIES (India, Belgium, Russia): fabrication features// Proceedings of SPIE. 2012. V.8450. P.84504R.
11. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Semenov A.P.* Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors// Proceedings of SPIE. 2010. V.7739. P.77390P.

# ФОТОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗАТОР БИОЛОГИЧЕСКИХ МИКРОЧИПОВ

СОРОКИН А.В., КИРИКОВА Т.Н., ВЫСОКАНОВ А.А., КОНДРАШОВ М.В., СТАРОДУБЦЕВА Л.Ф.

ОАО «Швабе-Фотосистемы», г. Москва

E-mail: sorokinavshvabe@mail.ru

*Инновационный медицинский прибор для проведения анализов с помощью биологических микрочипов.*

**Ключевые слова:** биологические микрочипы, состав прибора, подготовка к работе, анализ.

Наиболее острой проблемой в современном здравоохранении, имеющей огромную социальную значимость, является быстрая идентификация возбудителей бактериальных инфекционных заболеваний и определение профиля их антибиотикорезистентности. Постоянное возникновение новых штаммов бактерий, устойчивых к антибиотикам, затрудняет лечение инфекций. В последние годы обнаруживается все большее количество случаев лекарственной устойчивости бактерий одновременно к нескольким группам антибиотиков. Традиционные методы исследований перестают справляться с этой задачей. Требуется одновременно осуществлять анализ на большое количество признаков. Традиционно используемые планшетные анализаторы и анализаторы с использованием микропробирок уже подходят к пределам своих возможностей. Возникают новые методы исследований, одно из которых – использование биологических микрочипов, обеспечивающих одновременное проведение анализов сразу на несколько десятков признаков или позволяющие сравнивать геном бактерии с несколькими десятками образцов цепочек.

Биологические микрочипы [1] представляют собой стеклянную (либо полимерную, встречаются и кремниевые) пластину типичным размером, как у предметного стекла микроскопа (25x75 мм и толщиной 1 мм). Предметные стекла чаще всего и служат

основой. На стекле в определенном порядке нанесены маленькие капельки реагентов, диаметром 0,1-0,5 мм, «срабатывающие» на определенные белки либо последовательности нуклеотидных цепочек, имеющиеся в определяемых бактериях. Используются распространенные реагенты и флуоресцентные красители, применяемые в лабораторной практике, например Су3, Су5. Эти красители флуоресцируют при облучении зеленым (для Су5 – красным) светом, если реагент сработал, т.е. если нужный белок или последовательность обнаружены. Флуоресцентных меток можно нанести очень много, несколько сотен штук, и определять весьма большое количество признаков, причем для повышения надежности распознавания делать несколько повторов точек. Малый объем реагентов обеспечивают и высокую скорость проведения реакций. Считывание интенсивности свечения меток производится за один прием, в течение секунд. Благодаря этим особенностям биологические микрочипы имеют все шансы стать в ближайшем будущем значительным направлением в медицинской диагностике.

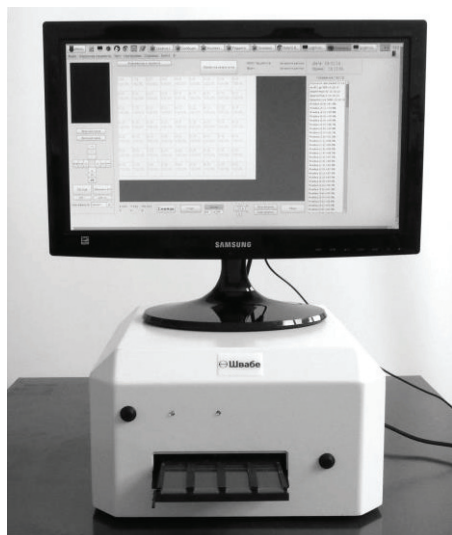
Такие биологические микрочипы уже выпускаются многими производителями у нас и за рубежом. Приборы, использующие их, также начинают появляться на российском рынке. Было решено выпустить собственный прибор для анализа биологических микрочипов, используя наработки по иммуноферментным фотометрам серии «Эфос».

В отличие от аналогичных приборов, разрабатываемый имеет возможность обрабатывать сразу четыре биологических микрочипа с красителями Су3 и Су5, а также не требует отдельного компьютера для управления. Компьютер встроен в сам прибор.

Опытный образец фотоанализатора показан на рис. 1. Этот образец демонстрировался на выставке «Иннопром-2016» в Екатеринбурге. Прибор содержит в своем составе:

- держатель биологических микрочипов, предназначенный для размещения 4 штук;
- оптический блок с видеокамерой, считывающей интенсивность флуоресценции точек, сменными светофильтрами на колесе и полупроводниковыми лазерами с длинами волн 532 нм для красителя Су3 и 655 нм для красителя Су5;
- механизм перемещения, осуществляющий загрузку и выгрузку образцов, перемещение видеокамеры, смену светофильтров;
- управляющий компьютер, в качестве которого применена плата Raspberry Pi 2B;
- также в комплект поставки может быть включен термошейкер ШТ-5 для подготовки проб.

Управление осуществляется с помощью обычных компьютерных клавиатуры и «мыши», через экранное меню.

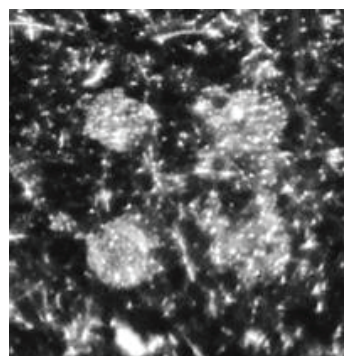


**Рисунок 1.**  
**Фотометрический анализатор ФАБ-01**

Порядок работы с прибором следующий:

- подготовить биологический микрочип, нанести пробу и проявить в соответствии с инструкцией к используемому тест-набору;
- загрузить биологические микрочипы в прибор;
- выбрать нужные источники излучения, светофильтры и считать яркость точек каждого из четырех биологических микрочипов;
- провести расшифровку измерений с помощью программы прибора по инструкции к тест-набору;
- сохранить результаты, выдать их лечащему врачу или больному, либо передать по больничной локальной сети. Можно также распечатать результаты на принтере, подключенном по USB.

Для увеличения точности измерений и повышения отношения сигнал-шум используется усреднение нескольких изображений, а также усреднение всех пикселей, входящих в изображение флуоресцентной метки. Так как капли реактивов наносятся строго в определенных положениях, с помощью специального приспособления, то положение каждой флуоресцентной метки в пространстве известно. Разбиение изображения биологического микрочипа на области, соответствующие отдельным флуоресцентным меткам, осуществляется наложением заранее составленной маски. Положение маски (ее центра) определяется с использованием известного алгоритма нахождения «центра тяжести»



**Рисунок 2.**  
**Изображение флуоресцентных меток,**  
**полученное камерой фотоанализатора.**  
**Размер метки – 300 мкм**



изображения [2], который сопоставляется с заранее определенным «центром тяжести» маски. Затем находится среднее арифметическое яркости всех пикселей, попадающие внутрь маски для каждой флуоресцентной метки, и записываются в массив обработанных результатов. При области поля зрения камеры 13x10 мм флуоресцентная метка размером 300 мкм занимает 20 пикселей. На рис. 2 показано пробное изображение флуоресцентных меток биологического микрочипа с видеокамеры.

С целью обеспечения самоконтроля процесса измерения среди флуоресцентных меток есть специальные метки, которые флуоресцируют вне зависимости от наличия или отсутствия определяемых бактерий, их положение заранее известно для каждого определяемого типа биологического микрочипа. Если свечение контрольной метки отсутствует, значит, подготовка биологического микрочипа к измерениям проведена неправильно. Измеренная яркость флуоресценции контрольной метки принимается за 100%, в дальнейшем она является пороговой для определения наличия определяемых бактерий. В программу заложено условие, что если свечение флуоресцентной метки более 50% от свечения контрольной метки, то вы-

водится сообщение о присутствии в пробе связанное с этой меткой наименование бактерии. Таблица, в которой записано соответствие наименование биологического микрочипа, номер флуоресцентной метки и наименование определяемой бактерии, поставляется вместе с биологическими микрочипами. Также пользователь может составить свои собственные таблицы для нестандартных биологических микрочипов, для этого предусмотрено соответствующее меню программы управления.

Фотоанализатор сейчас находится на стадии опытного образца. Серийный выпуск намечен на вторую половину 2017 года. На оптическую схему прибора получен патент на полезную модель [3]. Работа выполняется по контракту с Минпромторгом.

*Список литературы:*

1. U.R. Muller, D.V. Nicolau. Microarray Technology and Its Applications, Berlin: Springer, 379 p, (2005).
2. П. Егоров. Центр тяжести. //Алгоритмы, методы, исходники [http://algotlist.manual.ru/math/geom/polygon/center\\_mass.php](http://algotlist.manual.ru/math/geom/polygon/center_mass.php), (2002).
3. Сорокин А.В., Стародубцева Л.Ф., Высоканов А.А., Айзеништат С.Д. Устройство оптическое для анализа биологических микрочипов, Патент России № RU162184U1, Бюл. №15 (2016).

# ГРАЖДАНСКАЯ ПРОДУКЦИЯ ОАО «ШВАБЕ-ФОТОСИСТЕМЫ»

ГИНДИН П.Д., КАРПОВ В.В., АЙЗЕНШТАТ С.Д., СОРОКИН А.В.

ОАО «Швабе-Фотосистемы», г. Москва

**E-mail:** sorokinavshvabe@mail.ru

*Гражданская продукция ОАО «Швабе-Фотосистемы» представлена несколькими различными направлениями, разрабатываемая силами трех отделов. Это медицинская техника, установки резки методом лазерного управляемого термораскалывания и выращивание искусственного сапфира.*

**Ключевые слова:** лазерная резка материалов, диагностика инфекций, фотоанализатор ФАБ-1, биологические микрочипы, фотоанализатор.

Установки лазерной резки хрупких материалов реализуют метод лазерного управляемого термораскалывания, изобретенный В.С.Кондратенко в середине 70-х годов. Основными преимуществами метода являются: практически нулевая ширина реза, так как луч лазера раскалывает материал, а не проплавляет, высокая скорость резки, повышенная прочность получаемых деталей, так как рез содержит меньшее количество концентраторов напряжений. Установки резки стекла лазерным управляемым термораскалыванием наиболее полно реализуют свои возможности при резке тонких силикатных и боросиликатных стекол толщиной от 0,1 мм до 1,5 мм. Такие стекла широко используются как окна фотоприемников, ПЗС-матриц, составные части жидкокристаллических экранов часов, сотовых телефонов, смартфонов, планшетных компьютеров, компьютерных мониторов, защитные стекла солнечных батарей. Вырезание деталей из столь тонких стекол традиционными способами, в том числе роликовой резкой и алмазными кругами, затруднено. Изготовленная деталь становится более прочной, нежели при вырезании традиционными методами, так как на кромке детали не образуется микродефектов, от которых развивается трещина при нагружении детали. Обеспечивается гладкий ровный полированный край стекла, не требующий дополнительной обработки.

Метод пригоден для резки хрупких материалов. Для пластичных материалов, в том числе металлов, не пригоден. На сегодняшний момент опробована резка и подобраны режимы для различных видов стекол, в том числе для кварцевого, кристаллического кварца, искусственного сапфира, кремния, германия, антимонида индия.

Созданные установки резки методом лазерного управляемого термо-раскалывания (рис. 1) работают на различных предприятиях оптической и электронной промышленности.

Выращивание искусственного сапфира производится методом Киропулоса в инновационных установках, спроектированных и построенных на предприятии. Серийно выпускаются сапфировые булы массой 60-65 кг. Производится наладивание оборудования и



**Рисунок 1.**  
**Установка резки тонкого листового стекла**  
**PT-500**

подбор режимов для выращивания сапфировых буль массой до 400 кг.

Медицинская техника представлена несколькими приборами:

- иммуноферментный планшетный фотометр Эфос, выпускаемый серийно;
- термошейкер ШТ-5, ведется освоение серийного производства;
- дистанционный электромагнитный ударно-волновой литотриптер ЛТ-1, находящийся на стадии опытного образца;
- фотоанализатор биологических микрочипов ФАБ-1, находящийся на стадии опытного образца.

Иммуноферментный фотометр выпускается серийно с начала 2000-х годов, прошел модернизацию в 2008 и 2015 годах. Фотометр предназначен для качественной и количественной оценки результатов иммуноферментного анализа проб в стандартном планшете по выявлению иммуноглобулинов или антигенов в медицине, биологии, фармакологии, пищевой промышленности, сельском хозяйстве и ветеринарии. Управляющий компьютер встроен непосредственно в сам прибор. Управление осуществляется с использованием клавиатуры на корпусе. К прибору может быть подключен принтер. Использование прибора позволяет быстро и с высоким качеством проводить:

- диагностику бактериальных, вирусных и протозойных инфекций (гепатитов А,В,С,Д, ВИЧ-инфекции, герпеса, токсоплазмоза, кори, дифтерии, сифилиса, стафилококковой инфекции и т.д.), диагностику аутоиммунных, аллергических и наследственных заболеваний (системной красной волчанки, склеродермии, ревматоидного артрита, рассеянного склероза и т.д.);
- выявление патологии эндокринной системы и иммунного статуса организма (определение гормонов, и т.д.), диагностику онкологических заболеваний (выявление онкомаркеров), биохимическое исследование сыворотки крови (липопротеида, эритропоэтина и др.);
- оценку качества и безопасности продуктов питания, продовольственного сырья в

пищевой промышленности и ГЦСЭН (определение в пробах афлотоксинов В, М, зеараленона и т.д.).

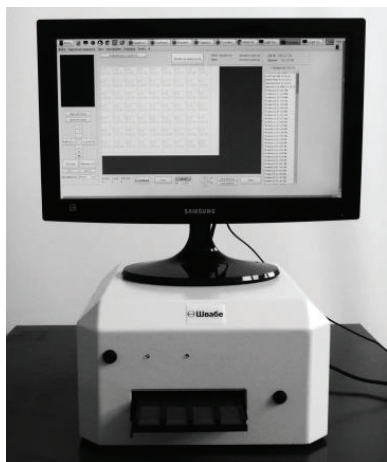
Термошейкер ШТ-5 предназначен для подготовки проб лабораторных анализов в пробирках типа Эппендорф и ПЦР – планшетах. Реализуется термостатирование и интенсивное перемешивание биологических проб в различных режимах. Основным достоинством прибора является более точное поддержание температуры пробы, а также развитый интерфейс пользователя.

Фотоанализатор ФАБ-1 предназначен для обработки наиболее современных видов проб – биологических микрочипов. Биологические микрочипы<sup>1</sup> представляют собой стеклянную (либо полимерную, встречаются и кремниевые) пластину типичным размером, как у предметного стекла микроскопа (25x75 мм и толщиной 1 мм). Предметные стекла чаще всего и служат основой. На стекле в определенном порядке нанесены маленькие капельки реагентов, диаметром 0,1-0,5 мм, «срабатывающие» на определенные белки либо последовательности нуклеотидных цепочек, имеющиеся в определяемых бактериях. Флуоресцентных меток можно нанести очень много, несколько сотен штук, и определять весьма большое количество признаков, причем для повышения надежности распознавания делать несколько повторов точек. Малый объем реагентов обеспечивают и высокую скорость проведения реакций. Считывание интенсивности свечения меток производится за один прием, в течение секунд. Благодаря этим особенностям биологические микрочипы имеют все шансы стать в ближайшем будущем значительным направлением в медицинской диагностике.

Такие биологические микрочипы уже выпускаются многими производителями у нас и за рубежом. Приборы, использующие их, также начинают появляться на российском рынке.

---

1. U.R. Muller, D.V. Nicolau. *Microarray Technology and Its Applications*, Berlin: Springer, 379 p, (2005).



**Рисунок 2.**  
**Фотометрический анализатор ФАБ-01**

Было решено выпустить собственный прибор для анализа биологических микрочипов, используя наработки по иммуноферментным фотометрам серии «Эфос». В отличие от аналогичных приборов, разрабатываемый имеет возможность обрабатывать сразу четыре биологических микрочипа с красителями Су3 и Су5, а также не требует отдельного компьютера для управления. Компьютер встроен в сам прибор.

Опытный образец фотоанализатора показан на рис. 2. Этот образец демонстрировался на выставке «Иннопром-2016» в Екатеринбурге. Прибор содержит в своем составе:

- держатель биологических микрочипов, предназначенный для размещения 4 штук;
- оптический блок с видеокамерой, считывающей интенсивность флуоресценции точек, сменными светофильтрами на колесе

и полупроводниковыми лазерами с длинами волн 532 нм для красителя Су3 и 655 нм для красителя Су5;

- механизм перемещения, осуществляющий загрузку и выгрузку образцов, перемещение видеокамеры, смену светофильтров;
- управляющий компьютер, в качестве которого применена плата Raspberry Pi 2В;
- также в комплект поставки может быть включен термошейкер ШТ-5 для подготовки проб.

Управление осуществляется с помощью обычных компьютерных клавиатуры и «мыши», через экранное меню.

Литотриптер ЛТ-1 предназначен для лечения мочекаменной и желчекаменной болезни. Он относится к группе ударно-волновых экстракорпоральных дистанционных электромагнитных литотриптеров, т. е. разрушение камня происходит под действием энергии акустического излучения, подводимого снаружи тела человека через кожу. Этот способ не требует введения рабочего органа в тело пациента. Отечественные и зарубежные приборы, реализующие этот принцип, уже используются в медицинской практике. Особенностью прибора, отличающего его от аналогов, является инновационная конструкция ударно-волнового генератора, обеспечивающая лучшее дробление камней за счет меньшей длительности ударного импульса, а также меньшую травматичность для больного. Работа выполняется совместно с разработчиками первого в СССР ударно-волнового литотриптера.



# ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ РАЗНОСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПЛЕКСАХ МОНИТОРИНГА ТЕХНОСФЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

КОРОТАЕВ В.В., ВАСИЛЬЕВ А.С.

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

*В работе рассмотрены вопросы применения методов комплексирования изображений для многоспектральных оптико-электронных комплексов мониторинга техносферной безопасности. Внедрение методов комплексирования изображений в комплексы мониторинга позволит расширить характеристики существующих систем безопасности и обеспечить выполнение задач по охране критических и общегражданских объектов.*

**Ключевые слова:** элементы комплексов мониторинга, многоспектральная ОЭС, пространственное преобразование и преобразования яркости, показатели качества.

## ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг и наблюдение являются важнейшими элементами оценки опасности технологических процессов и природных систем – безопасности жизнедеятельности человека в техносфере. Современные элементы комплексов мониторинга, используемые для наблюдения за состоянием окружающей среды и объектами, обладают достаточно широким набором функций и характеристик. Разработанные «ночные», «противотуманные», «высокого разрешения» телевизионные камеры и приемники излучения широкого спектрального диапазона активно используются для наблюдения и мониторинга. Однако, как показывают эксперименты<sup>1,2</sup>, вероятность обнаружения и точность дешифровки могут быть существенно увеличены за счет синхронного совместного использования набора разноспектральных каналов методом комплексирования изображений для обеспечения задач круглосуточного наблюдения и мониторинга.

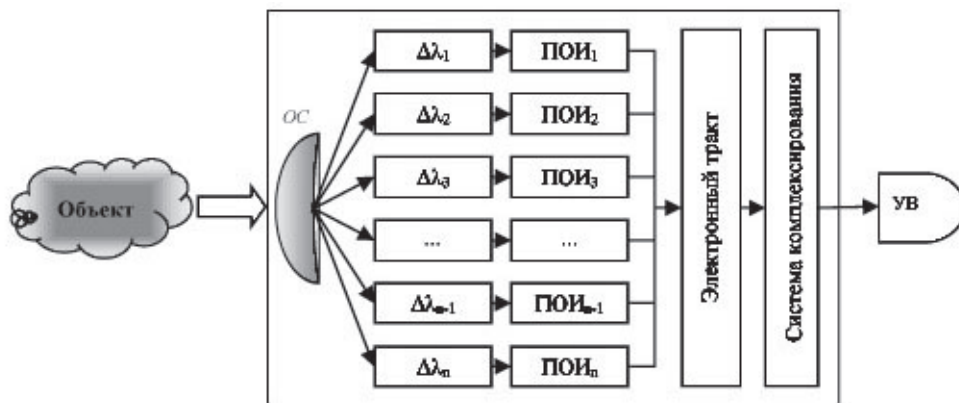
## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

Под комплексированием изображений понимается такое совмещение нескольких изображений, которое приводит к повышению

информативности по сравнению с анализируемыми отдельными исходными изображениями. Рассмотрим структуру комплексирования изображений на примере многоспектральной ОЭС (рис. 1).

Приемная оптическая система (ОС) собирает поток излучения и формирует изображение пространства объекта. Излучение объекта в широком спектральном диапазоне. Система разделения всего спектрального диапазона работы системы делит на  $n$  отдельных каналов ( $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \dots, \Delta\lambda_n$ ) весь спектр излучения объекта, который попадает на узкодиапазонный приемник излучения (ПОИ<sub>1</sub>, ПОИ<sub>2</sub>, ..., ПОИ<sub>n</sub>), преобразующий оптический сигнал в электрический. В электронном блоке происходит обработка сигналов, затем система комплексирования объединяет изображения, соответствующие разным спектральным диапазонам, в единое изображение. Устройство вывода передает комплексированное изображение на дисплей или другие устройства дешифрования.

На выходе электронного блока формируются цифровые изображения  $F_1, F_2, \dots, F_n$ , представляющие двумерную функцию распределения освещенности.



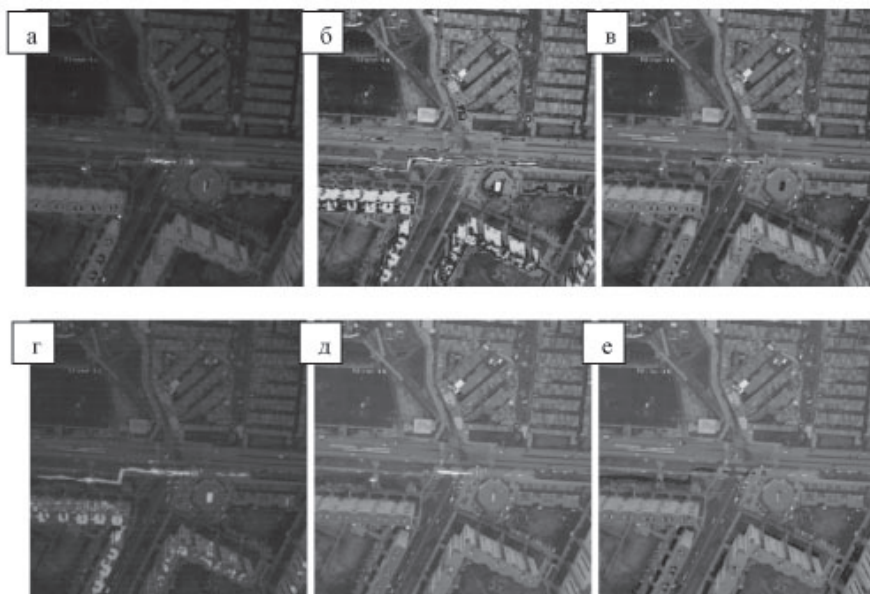
**Рисунок 1.**  
*Структурная схема многоспектральной ОЭС комплексирования изображений*

Результатом комплексирования изображений является изображение  $Z$ , представляющее объединенное множество:

$$F_1, F_2, \dots, F_n \subset Z^r, \quad (1)$$

где  $r$  - размерность комплексированного изображения, для большинства случаев равная двум, однако в некоторых задачах (например, в задачах с применением объемных изображений) может быть больше двух [3,4]. В общем случае задача комплексирования сводится к нахождению функций простран-

ственного преобразования и преобразования яркости. Пространственное преобразование заключается в устранении геометрических искажений между парой изображений, полученных в одно и то же время для одного участка местности. Необходимость учета преобразования яркости возникает из-за возможного изменения освещения, сезонных и суточных изменений. Потребность применения как пространственного, так и яркостного преобразования обусловлена также и тем, что совмещаемые изображения получены при помощи различного вида приемников.



**Рисунок 2.**  
*Результаты комплексирования изображений:*  
*а) – метод весовой функции, б) – метод усреднения, в) – метод степенного преобразования, г) – метод чересстрочного комплексирования, д) – метод маски*

## ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА

Выбор метода комплексирования для многоспектральной системы мониторинга является проблемноориентированным решением и зависит от конкретной задачи. На рис. 2 представлены результаты комплексирования пар изображений, полученных в инфракрасном и видимом спектральных диапазонах при мониторинге тепловых сетей г. Санкт-Петербурга.

Как видно на результатах методов *б* и *г* присутствует много лишних деталей, для методов *е* и *д* произошла существенная потеря информации. Методы *а* и *в* показали лучшие результаты, сохранив необходимые информативные признаки двух изображений. Для объективной оценки качества методов комплексирования необходимо применение критериев оценки определения эффективности преобразований, включающих оценку информационной составляющей на результирующем изображении и качественную оценку его восприятия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод комплексирования разномногоспектральных изображений позволяет повысить увеличить обнаружительную эффективность многоспектральных ОЭС, упростить процесс восприятия и анализа получаемого изображения. Результаты исследования применимы при решении широкого круга задач:

– мониторинга и анализа риска аварий на опасных производственных объектах, территорий населенных мест и городских агломераций, районов АЭС;

– наблюдение и контроль за объектами горно-металлургической и химической отраслей (контроль промышленных сточных вод, нефтяных загрязнений акваторий, локальных загрязнений почвы),

– контроль техногенного воздействия гидротехнических сооружений, прогноз и предупреждение опасных геодинамических процессов.

Результаты исследования применимы также и в смежных областях, таких как военная техника и техника МЧС: в качестве портативных многоспектральных наблюдательных систем солдат для расширения человеческих возможностей на поле боя; систем наблюдения стационарных командных пунктов с противодиверсионной целью; каналов наблюдения роботизированных систем разведки и противодействия терроризму, поиска людей при завалах и техногенных катастрофах.

*Список литературы:*

1. Овсянников В.А., Овсянников Я.В., Филиппов В.Л. Оценка эффективности комплексирования разномногоспектральных изображений, Оборонная техника, №6-7, 2010
2. Смирнов В.П. Эффективность комплексирования разноканальных изображений при опознавании объектов, Оптический журнал, №2, 1992
3. Аксенов О.Ю. Совмещение изображений, Цифровая обработка сигналов. № 3, стр. 51-55, 2005
4. F. Al-Wassai, N. Kalyankar, A. Alzuky. The IHS Transformations Based Image Fusion, Journal of Global Research in Computer Science, Vol. 2, №5, 2011

# РАЗРАБОТКА ЦИФРОВОГО ПАНОРАМНОГО ФОТОАППАРАТА

КОРОТАЕВ В.В., ВАСИЛЬЕВ А.С., ПАНТЮШИН А.В.

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

*В работе рассмотрены вопросы разработки, реализации и применения панорамного цифрового фотоаппарата с 3-мя независимыми оптическими каналами.*

**Ключевые слова:** панорамная фотосъемка, структурная схема фотоаппарата, показатели качества, уникальность камеры.

## ВВЕДЕНИЕ

Панорамная фотосъемка – это разновидность съемки с увеличенным углом обзора (обычно по горизонтали), которая позволяет регистрировать на фотоснимке больше пространства, чем при использовании обычных фотоаппаратов. Панорамная фотосъемка существовала даже тогда, когда еще не было специальных панорамных фотокамер. Чтобы создать панораму, делали серию снимков, печатали, обрабатывали стыки и склеивали части изображения в единое панорамное изображение [1]. Позже появились панорамные фотоаппараты. Одними из самых известных стали камеры «Горизонт», выпускаемые на Красногорском заводе им. С.А. Зверева [2]. При существующей потребности в получении высококачественных панорамных снимков, на сегодняшний день альтернативы цифровым методам обработки для получения панорамы отсутствуют. Поэтому предлагается разработать и реализовать цифровой панорамный фотоаппарат, предназначенный для фото-профессионалов, решающий задачи получения качественных художественных панорамных снимков.

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

Цифровой панорамный фотоаппарат строится на базе 3-х матричных сенсоров высокого разрешения, позволяющих получать три синхронных изображения (рис. 1).

Предварительная обработка изображений осуществляется в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС), которая решает задачи по настройке сенсоров, управлению/коррекцией экспозицией, настройке баланса белого, расчету коэффициентов для реализации алгоритма сшивки 3 изображений в единый панорамный снимок.

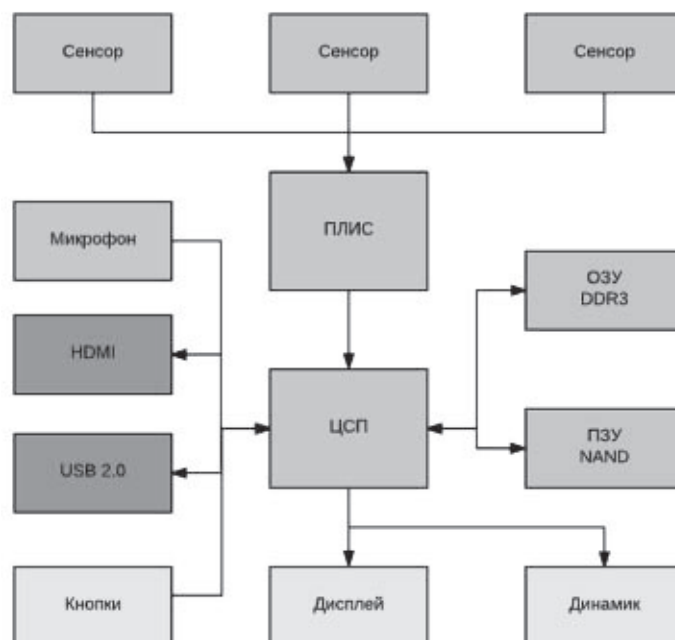
Обработанные изображения по высокоскоростному интерфейсу PCIe передаются на цифровой сигнальный процессор (ЦСП), который реализует алгоритм панорамной сшивки изображений, а также отвечает за программно-аппаратную реализацию алгоритмов сжатия (jpeg, h.264) и поддержку периферии электронных компонентов фотоаппарата.

Результирующая информация может быть выведена по интерфейсам USB 2.0 для передачи на персональный компьютер или HDMI для вывода на широкоэкранный монитор. Звук, записанный через встроенный микрофон, выводится через внутренние динамики. Информация также может быть записана на внешнем носителе информации типа SD memory card (SD).

Управление панорамным фотоаппаратом осуществляется с использованием кнопок и информации, выводимой в виде меню, на экран дисплея.

Память программы фотоаппарата хранится на внутреннем постоянном запоминающем



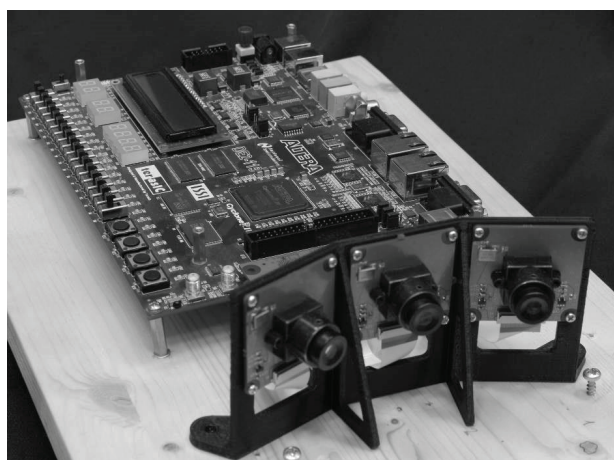


**Рисунок 1.**  
*Структурная схема цифрового панорамного фотоаппарата*

устройстве (ПЗУ) типа NAND. Промежуточные значения вычислений хранятся в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) типа DDR3. На рис. 2 представлен реализованный макет цифрового панорамного фотоаппарата на базе 3-х КМОП сенсоров фирмы Artina и отладочной платы Terrasic DE2-115.

#### ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА

Предлагаемая схема построения на основе трех независимых оптических каналов обладает такими преимуществами как улучшенное разрешение панорамного снимка за счет применения 3 высококачественных матрич-



**Рисунок 2.**  
*Макет цифрового панорамного фотоаппарата*

ных приемников с минимальной зоной перекрытия.

Независимость оптических каналов также позволяет получать синхронные по времени изображения, что позволяет производить панорамную съемку динамических событий (например, спортивных соревнований или потока автотранспорта).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На сегодняшний день панорамная фотография становится все более популярной, в том числе благодаря цифровым технологиям обработки с применением метода «сшивки» изображений, однако такой подход обладает целым рядом недостатков, поэтому получение качественной художественной фотографии возможно только с применением специальной панорамной камеры. Предлагаемая схема цифрового панорамного фотоаппарат с 3-мя независимыми каналами позволяет получить качественный панорамный снимок высокого разрешения в режиме реального времени.

Реализация предлагаемого проекта может быть осуществлена в виде модернизации уже существующего опытного образца камеры подобного класса Horizon D-L3, производства Красногорского завода им. С.А. Зверева.

ва. На выходе ожидается результат в виде уникальной профессиональной фотокамеры, предназначенной для узкого рынка фото-профессионалов, занимающихся художественной съемкой интерьеров, архитектурных объектов, спортивных событий, также возможно применение продукта в смежных отраслях, например, в криминалистике и военной сфере.

*Список литературы:*

1. Акимов А. Панорамное удовольствие, Foto&Video №1, 2005
2. О фотоаппаратах семейства «Горизонт» на сайте Научно-технического центра Красногорского завода, электронный ресурс <http://www.zenitcamera.com/archive/horizon/index.html>
3. Яблоков Н.П. КРИМИНАЛИСТИКА, 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Юристъ, 2005

## СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧАЮЩИХ ДИОДОВ

КОРОТАЕВ В.В., ПЕРЕТЯГИН В.С., ГОРБУНОВА Е.В., ЧЕРТОВ А.Н.

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

*Настоящая работа посвящена описанию системы, предназначенной для одновременного анализа гониометрических, радиометрических, спектральных (колориметрических) параметров и характеристик излучающих диодов. Также в работе представлены результаты экспериментальных исследований нескольких типов излучающих диодов.*

**Ключевые слова:** комплексный анализ характеристик диодов, выполнения одновременного анализа параметров, создание комплексов промышленного контроля.

Развитие светодиодных технологий в последние годы существенно улучшило качество освещения, тем самым расширив области применения излучающих диодов. На сегодняшний день излучающие диоды активно используются для уличного, промышленного (декоративного и акцентного) и бытового освещения [1-2]. Такое разнообразие в использовании стало возможным благодаря достаточно быстрому росту энергетических показателей, разнообразию пространственных, спектральных (колориметрических) и электрических характеристик, а также надежности и долговечности данных источников излучения.

Однако для каждого конкретного применения излучающие диоды должны обладать

определенными (заданными) гониометрическими, радиометрическими и спектральными (колориметрическими) характеристиками. Исходя из этого, производители постоянно совершенствуют технологии их производства, тем самым расширяя модельный ряд выпускаемой продукции [3]. При этом совершенствование технологий производства излучающих диодов приводит и к необходимости обеспечения более точного и комплексного анализа их характеристик. Комплексный анализ необходим как на стадии создания чипов (излучающих кристаллов), так и на стадии создания готовой продукции (например, светодиодов и устройств освещения на их основе). Поэтому исследование параметров и характеристик излучающих

диодов является важным этапом производственной цепочки.

Существует множество способов и устройств анализа параметров излучающих диодов. При этом большинство способов предназначено для определения одного параметра (например, светового потока) или одной характеристики (например, углового распределения энергии или спектральной характеристики), а устройства, использующие данные способы, способны производить измерения параметров и характеристик только в одной точке или плоскости освещаемого пространства (за исключением интегрирующих сфер) [4].

Настоящая работа посвящена описанию системы, предназначенной для комплексного анализа и оценки ключевых параметров и характеристик излучающих диодов. Главной особенностью данной системы является возможность выполнения одновременного анализа гониометрических, радиометрических и спектральных (колориметрических) параметров и характеристик излучающих диодов по всей верхней полусфере их изучения. При этом одновременность анализа достигается за счет использования спектральных характеристик, измеренных с помощью спектрометра, в конкретных точках пространства. Способность производить анализ по всей верхней полусфере излучения обусловлена наличием в конструкции комплекса нескольких моторизованных поворотных платформ, предназначенных как для вращения анализируемого излучающего диода вокруг его оптической оси, так и наклона входного окна волоконно-оптического кабеля относительно оптической оси излучающего диода. Такая конструкция (см. рис. 1) позволяет производить пошаговую регистрацию спектральных характеристик излучающего диода при его повороте на известный угол на каждом шаге.

Измеренные (по всей верхней полусфере) спектральные характеристики излучения можно использовать для определения значений энергии, координат цвета и коррелированной цветовой температуры (при необходимости) излучения в каждой точке



**Рисунок 1.**  
*Система комплексного анализа параметров и характеристик излучающих диодов*

верхней полусферы. Кроме того, значения, полученные к конкретной координатой пространства, можно использовать для построения трехмерных моделей углового распределения энергии или представления цветовых параметров в виде диаграммы цвета.

Используя данную систему, были исследованы излучающие диоды разных конструкций и цветов свечения. Ниже, в качестве примера, представлены результаты исследования светодиода марки BL-L314VC от Betlux.

Светодиод марки BL-L314VC является узконаправленным излучателем ( $\Theta \approx 11^\circ$ ). Из диаграммы направленности (см. рис. 2 а) видно, что светодиод имеет энергетический провал в центральной части излучения. Было проведено сравнение диаграммы направленности, измеренной с помощью системы, с диаграммой, представленной производителем. Из рис. 2 б видно, что в измеренной характеристике присутствует энергетический провал, величина которого составляет 31%. Появление данного эффекта может быть связано с нарушением технологии при сборке светодиода или при создании линзы, покрывающей излучающий кристалл.

Для наилучшего понимания результатов спектральные характеристики светодиода представлены в произвольно выбранных точках измеренного пространства. При этом каждая характеристика соответствует конкретному положению входного окна волоконно-оптического кабеля относительно исследуемого светодиода. Максимум спектральной

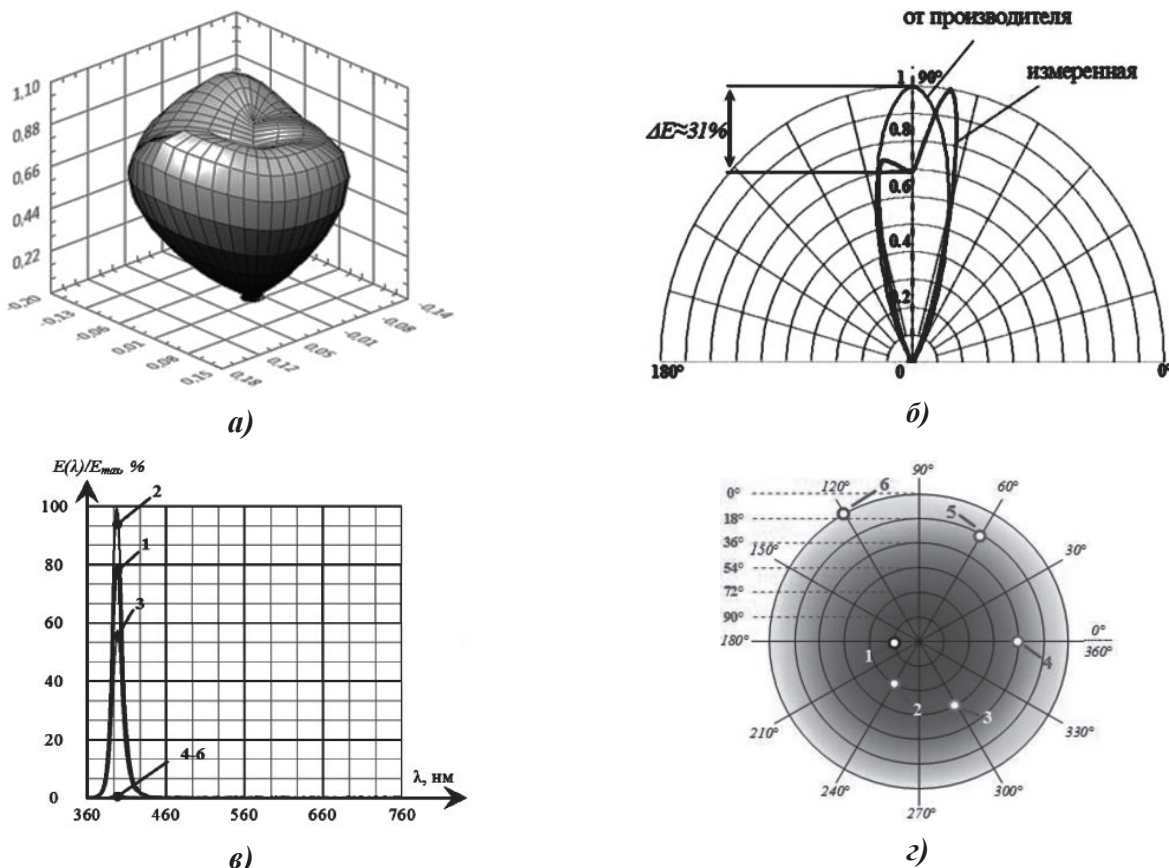


Рисунок 2.

*Измеренные характеристики светодиода BL-L314VC:*

*а) – трехмерная модель диаграммы направленности, б) – результаты сравнения диаграмм направленности, в) – спектральные характеристики в произвольно выбранных точках пространства и г) – диаграмма цвета*

характеристики светодиода марки BL-L314VC находится на длине волны 405 нм. Из рис. 2 в видно, что в разных точках пространства максимум первого пика соответствует данной длине волны. Однако разница между спектральной характеристикой 1 и 2 составляет 21%. Так как светодиод излучает в видимой области, для него была построена диаграмма цвета (см. рис. 2 г). Из диаграммы видно, что цвет свечения данного СИД является фиолетово-синим.

В данной работе представлено описание системы комплексного анализа параметров и характеристик излучающих диодов. Данная система способна исследовать излучающие диоды различной конструкции и в широком спектральном диапазоне. Проведенный комплекс экспериментальных исследований данной системы подтверждает ее эффективность и высокий потенциал использования для оценки качества светодиодной продукции на различных стадиях ее производства.

Настоящая работа является продолжением работ коллектива кафедры оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО по созданию специализированных устройств подсветки для оптико-электронных систем, приборов и комплексов промышленного контроля с целью обеспечения оптимальных условий наблюдения и анализа.

*Список литературы:*

1. А.В.Карев. Применение светодиодных светильников: прошлое, настоящее, будущее, Полупроводниковая светотехника, №6, с.42-43, (2011).
2. M. Liu, B. Rong, H. Salemink. Evaluation of LED application in general lighting, Optical engineering, 46 (7), pp.1-6, (2007).
3. С.Г. Никифоров. Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества, Компоненты и технологии, № 5, с.205-215, (2005).
4. О.В.Круглов, В.Н. Кузьмин, К.А. Томский. Измерение светового потока светодиодов, Светотехника, №3, с.34-36, (2009)



# ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ ЦВЕТОВОГО АНАЛИЗА ПРОДУКТОВ И МАТЕРИАЛОВ

КОРОТАЕВ В.В., ЧЕРТОВ А.Н., ГОРБУНОВА Е.В., АЛЁХИН А.А., ПЕРЕТЯГИН В.С., ПАВЛЕНКО Н.А.

Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург

E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

*В докладе описывается опыт коллектива авторов кафедры оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО по исследованию, разработке и применению оптико-электронных систем цветового анализа различного назначения.*

**Ключевые слова:** анализ информации о цвете объекта исследования, недостатки спектрофотометрического метода, цветовой анализ объектов различной природы.

Оптико-электронные системы цветового анализа – класс систем, реализующих регистрацию, обработку и анализ информации о цвете объекта исследования или контроля. Подобная информация актуальна для решения широкого круга прикладных задач и используется, например, в пищевой промышленности – при сортировке плодоовощных и ряда зерновых культур и качественной оценке продуктов питания в пищевых лабораториях; в перерабатывающей промышленности – при сортировке твердых бытовых и промышленных отходов; в горнодобывающей промышленности – при обогащении твердых полезных ископаемых оптическим методом и качественной сортировке драгоценных камней, и т.д.

При этом в ряде практических приложений цвет оценивается визуально, что влечет за собой субъективность анализа и отсутствие измеряемых критериев оценки.

Также для решения задач цветового анализа широко используются спектрофотометрический метод с последующим расчетом цветовых характеристик и метод технического зрения.

Основной недостаток спектрофотометрического метода заключается в том, что он либо позволяет получить только интегральную характеристику для всего объекта исследования, либо требует поточечного сканирования его поверхности, что для большинства производственно-технологических процессов неприемлемо вследствие сложной реализации и длительности указанного процесса.

Основным недостатком большинства систем технического зрения (СТЗ), используемых в

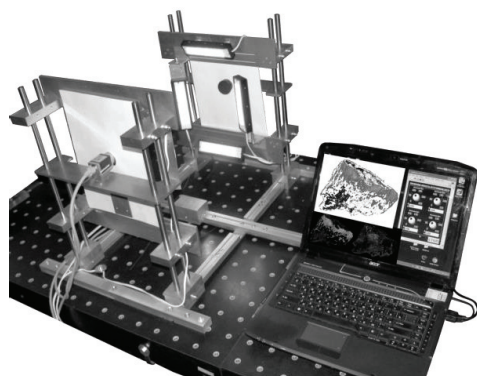
настоящее время для решения задач цветового анализа, является то, что они осуществляют не собственно анализ цвета объектов исследования как присущих им комплексных характеристик, определяемых свойствами материала, поверхности объекта, его формой, положением в пространстве, особенностями освещения, а измерение некоторых «цветовых параметров» объектов в выбранной цветовой системе координат.

Отдельно стоит отметить то обстоятельство, что цветокоррекция собственно СТЗ в этих случаях или не производится вовсе, или осуществляется с помощью механизма встроенных производителем настроек, не пригодных для обеспечения работы СТЗ в режиме «измерения цвета». Как следствие, полученные с помощью подобных СТЗ результаты часто не отличаются не только точностью, но и адекватностью с точки зрения анализируемого цвета.

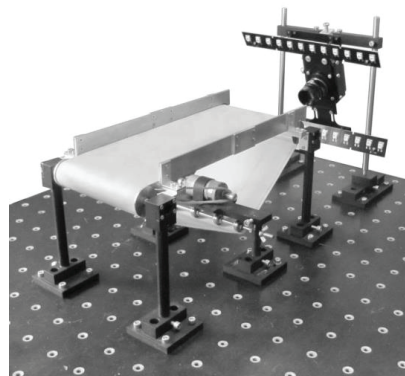
В рамках настоящей работы коллективом авторов проводится широкий круг исследований по разработке и реализации научно-обоснованного подхода к цветовому анализу объектов различной природы.

Так, для обеспечения оптимальной с точки зрения решаемой задачи подсветки зоны анализа разработаны подходы к проектированию управляемых многокомпонентных источников света на основе светодиодов [1-2], а также предложены методы экспресс-контроля параметров и характеристик как отдельных светодиодов, так и протяженных источников, в целом [3-5].

Предложен ряд алгоритмических подходов, реализующих цветокоррекцию цвет-



а)



б)

**Рисунок 1.**

**Макеты оптико-электронных систем цветового анализа:**  
**а) – для углубленного анализа минеральных образцов в статике,**  
**б) – для движущихся минеральных образцов**

ных изображений, полученных с помощью СТЗ [6-8], и их анализ [9-10].

Разработанные подходы и алгоритмы использованы при проведении исследований представительных проб золотосодержащих руд (совместно с НПП «ГеоТестСервис», г. Москва) [11], кварц-полевошпатового сырья [12] и шунгитовых пород [13] (совместно с Институтом геологии КарНЦ РАН).

Исследования проводились на экспериментальных установках, внешний вид которых приведен на рис. 1.

Также на кафедре оптико-электронных приборов и систем Университета ИТМО проводятся исследования возможностей контроля качества продуктов питания по цвету: мясного сырья и мясопродуктов, продуктов растительного происхождения (совместно с Институтом холода и биотехнологий Университета ИТМО); куриного и перепелиного яйца (совместно с Санкт-Петербургским государственным аграрным университетом).

Результаты работы в рамках данного направления исследований предполагается использовать для создания:

- оптико-электронного аппаратно-программного комплекса для оценки обогатимости руд твердых полезных ископаемых оптическим методом в лабораторной и полевой модификациях;
- оптического сепаратора минерального сырья повышенной селективности;
- оптико-электронных приборов экспресс-анализа и контроля качества пищевого сырья и продуктов питания животного и растительного происхождения.

*Список литературы:*

1. *Е.В. Горбунова, В.В. Коротаев, В.С. Перетягин, М.Г. Серикова, А.Н. Чертов.* Патент № 2494495, (2013).
2. *В.С. Перетягин, А.Н. Чертов.* Свидетельство № 2015617103, (2015).
3. *В.С. Перетягин, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, Е.Н. Пантюшина, В.В. Коротаев.* Патент № 2547163, (2015).
4. *Е.В. Горбунова, В.В. Коротаев, Е.Н. Кулешова, О.Ю. Лашманов, А.Н. Тимофеев, А.Н. Чертов.* Патент № 2509988, (2014).
5. *В.С. Перетягин, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, В.В. Коротаев.* Устройство для контроля источников излучения. Патент на полезную модель № 138629, (2014).
6. *Д.Д. Шитов, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов.* Свидетельство № 2013615782, (2013).
7. *Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов.* Свидетельство № 2012616390, (2012).
8. *Д.Б. Петухова, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов.* Свидетельство № 2013616760, (2013).
9. *Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов, В.В. Коротаев, А.Н. Тимофеев.* Свидетельство № 2012613938, (2012).
10. *Е.Н. Кулешова, В.В. Коротаев, А.Н. Чертов, Е.В. Горбунова, А.В. Пантюшин.* Свидетельство № 2011613482, (2011).
11. *Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов А.Н., А.М. Ольховский.* Обогащение руд, №3, с.35-40, (2015).
12. *А.Н. Чертов, Е.В. Горбунова, Л.С. Скамницкая, Т.П. Бубнова.* Обогащение руд, №4, с.54-59, (2015).
13. *Р.В. Садовничий, Н.Н. Рожкова, Е.В. Горбунова, А.Н. Чертов.* Обогащение руд, №1, с.10-15, (2016).

# МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ НЕЛИНЕЙНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ (АРУ) В МАТРИЧНЫХ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРАХ

КОБЫЛИН А.В.

ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Циклон», г. Москва

E-mail: alexey.kobylin@yandex.ru

*Автор статьи анализирует распространенные алгоритмы линейной АРУ, применяемые в тепловизионных приборах. В ходе анализа выявляются и обосновываются недостатки таких алгоритмов. Выясняется, что качество изображения после применения линейной АРУ не всегда удовлетворяет требованиям поставленной задачи. В связи с этим автор предлагает один из методов реализации нелинейной АРУ. Качество изображения после применения предложенного алгоритма улучшилось. Полученные результаты могут быть применены в освоении данного метода и дальнейшей реализации его в технике.*

**Ключевые слова:** тепловизионные приборы (thermal imaging devices), матричные тепловизионные приборы (thermal imaging matrix devices), матричные тепловизоры (thermal imaging matrix cameras), автоматическая регулировка усиления (automatic gain control, AGC), АРУ (AGC, automatic gain control), нелинейная АРУ (nonlinear AGC, nonlinear automatic gain control).

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в технике активно применяются тепловизионные приборы на основе матричных фотоприемных устройств (ФПУ). Сам по себе сигнал, идущий от ФПУ, несет в себе много полезной информации о наблюдаемой через прибор сцене. Для использования этой информации оператором, сигнал необходимо отобразить на экране устройства отображения. Для этого сигнал необходимо преобразовать определенным образом, с целью, во-первых, совмещения его динамического диапазона с диапазоном яркостей отображающего устройства, а во-вторых, улучшения видимости и контрастности. Проблема заключается в формировании такой функции преобразования выходного сигнала ФПУ в выходной видеосигнал. Зачастую эта функция имеет линейный вид, что упрощает реализацию процесса преобразования сигналов в приборе, однако, как будет показано далее, линейное преобразование не всегда оказывается достаточным для наблюдения всех деталей изображения.

## 1. ЛИНЕЙНЫЙ АЛГОРИТМ АРУ

Любой сенсор тепловизионного прибора реагирует на падающее на него внешнее тепловое излучение неким откликом, вырабатывая напряжение  $U_p$ , где  $p = (row, col)$  – координаты пикселя, соответствующие рассматриваемому сенсору. Значения таких откликов  $U_p$  представляются в виде целых чисел от 0 до  $(2^N - 1)$ , где  $N$  обычно равно 12 или 14. Совокупность всех  $U_p$  можно рассматривать как изображение, значения яркости которого лежат в диапазоне  $[0, 2^N - 1]$ .

Как правило, такой сигнал  $U_p$  преобразуется некоторым алгоритмом, называемым *автоматической регулировкой усиления (АРУ)*, в некий другой целочисленный сигнал  $\bar{U}_p$ , чаще всего лежащий в диапазоне  $[0, 255]$ . Именно этот преобразованный сигнал  $\bar{U}_p$  и подается на вход устройства отображения.

Самым простейшим из таких преобразований является так называемая линейная АРУ. Рассмотрим его в качестве примера.

Пусть значения откликов  $U_p$  лежат в диапазоне  $[U_p^{min}, U_p^{max}] \in [0, 2^N - 1]$ .

Тогда алгоритм линейной АРУ дается формулой:

$$\tilde{U}_p = \frac{255}{U_p^{max} - U_p^{min}} \cdot U_p - \frac{255}{U_p^{max} - U_p^{min}} \cdot U_p^{min} = 255 \cdot \frac{U_p - U_p^{min}}{U_p^{max} - U_p^{min}}$$

Эта формула получена из допущения, что значение  $\tilde{U}_p$  есть результат линейного преобразования  $U_p$ , то есть

$$\tilde{U}_p = a \cdot U_p + b,$$

причем справедливы очевидные равенства:

$$\begin{cases} a \cdot U_p^{min} + b = 0 \\ a \cdot U_p^{max} + b = 255 \end{cases}$$

Заметим, что для тепловизионных приборов линейная АРУ осуществляется с помощью выпрямляющего отображения:

$$\tilde{U}_p = 255 \cdot \frac{U_p - U_p^{min}(T_M)}{U_p^{max}(T_M) - U_p^{min}(T_M)},$$

где  $T_M$  – температура матрицы, а  $U_p^{min}(T_M)$  ( $U_p^{max}(T_M)$ ) – отклик, измеряемый при температуре матрицы  $T_M$  и при внешнем тепловом излучении, задаваемым температурой «черного тела»  $T_E^{min}$  ( $T_E^{max}$ ).

К сожалению далеко не всегда легко реализуемый алгоритм линейной АРУ дает удовлетворительный результат. Поэтому часто прибегают к преобразованию яркости исходного изображения, основанного на преобразовании информации, извлекаемой из гистограммы яркости исходного изображения. Такие преобразования называют гистограммными.

## 2. НЕЛИНЕЙНЫЙ АЛГОРИТМ АРУ

Напомним, что гистограммой цифрового изображения, число возможных уровней яркости которого равно  $N$ , лежащих в диапазоне  $[0, N-1]$ , называется дискретная функция [1]:

$$hist(j) = n_j$$

где  $j$  – это уровень яркости из диапазона  $[0, N-1]$ , а  $n_j$  – число пикселей изображения, уровень яркости которых равен  $j$ .

Определим теперь плотность распределения частот  $n_j$  по значениям яркости  $j$ :

$$\rho_j = \frac{hist(j)}{\sum_{j=0}^{N-1} n_j} = \frac{n_j}{\sum_{j=0}^{N-1} n_j}.$$

Значения этой плотности можно рассматривать как веса яркостей  $j$ . Чем больше вес  $j$ , т. е.  $\rho_j$ , тем больше целочисленных отсчетов надо выделить для преобразованного значения  $\tilde{U}_p = \tilde{j}$ .

Вычислим сначала кумулятивную функцию по формуле:

$$Cum(j) = \sum_{k=0}^j \rho_k = \sum_{k=0}^j \frac{n_k}{\sum_{i=0}^{N-1} n_i},$$

а затем окончательно получим искомую функцию преобразования яркостей

$$H(j) : [0, N-1] \rightarrow [0, 255]:$$

$$\tilde{j} = H(j) = 255 \cdot Cum(j).$$

Наглядно процесс преобразования яркости показан на рис. 1.

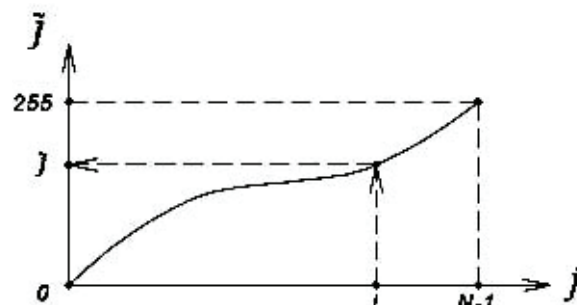


Рисунок 1.

Процесс преобразования яркости изображения

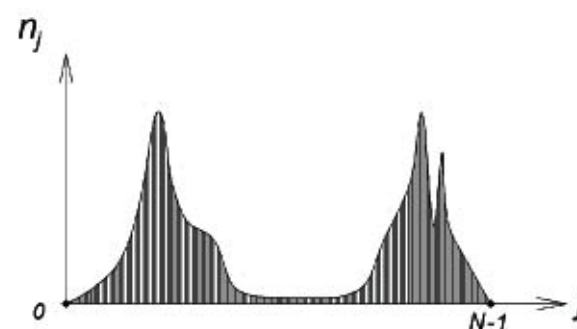


Рисунок 2.

Типичный график гистограммы тепловизионного изображения



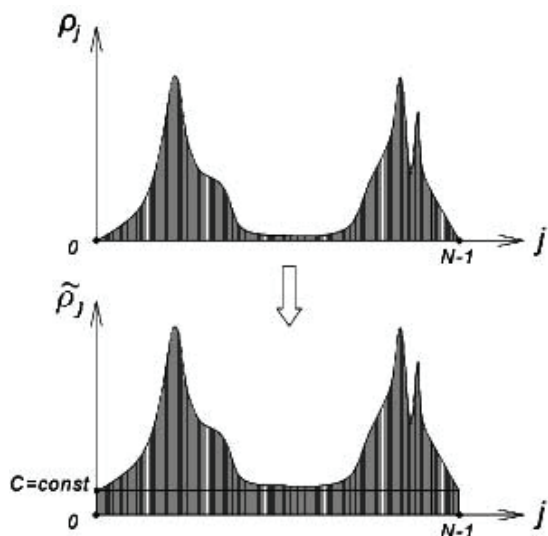


Рисунок 3.

Добавление к функции  $\rho_j$  константы  $C$

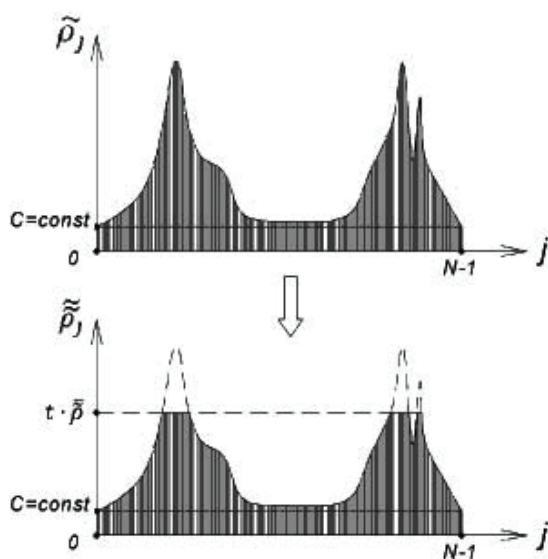


Рисунок 4.

Усечение функции  $\tilde{\rho}_k$

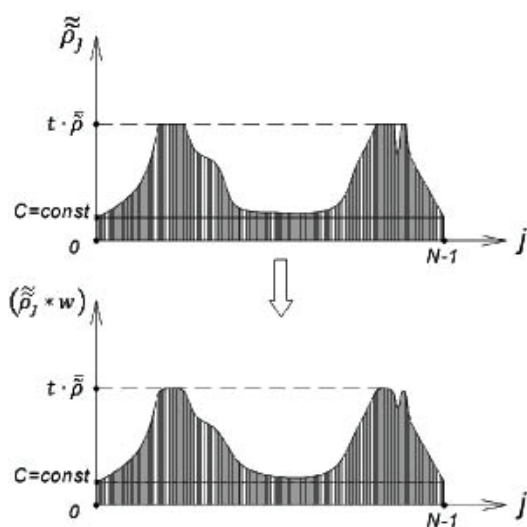


Рисунок 5.

Размытие функции  $\tilde{\rho}_j$  при помощи свертки  $(\tilde{\rho}_j * w)$

Для тепловизионных изображений, значениями яркостей которых являются отклики  $U_p$ , график гистограммы часто имеет несколько высоких узких пиков, а с другой стороны зачастую имеются целые интервалы с малыми значениями  $n_j$  (рис. 2).

Высокие пики в графике гистограммы ведут к тому, что небольшое количество отсчетов в окрестности пика преобразуется функцией  $H(j)$  в интервал с большим числом целочисленных отсчетов. Это приводит к тому, что на преобразованном изображении проступят случайные шумы, что заметно ухудшает визуальное восприятие наблюдаемой сцены. С другой стороны довольно протяженные интервалы с малыми значениями  $n_j$  преобразуются функцией  $H(j)$  в уже узкие интервалы, а это может привести к ухудшению видимости малоcontrastных объектов на преобразованном функцией  $H(j)$  изображении.

Предлагается ряд мер, улучшающих описанную ситуацию.

Во-первых, чтобы у графика функции  $H(j)$  не было почти горизонтальных участков, добавим к функции плотности распределения яркостей небольшую константу (рис. 3):

$$\tilde{\rho}_j = \frac{n_j}{\sum_{k=0}^{N-1} n_k} + C,$$

где  $C = const$  – параметр алгоритма.

Во-вторых, для устранения одиночных пиков произведем усечение значений функции  $\tilde{\rho}_k$ .

Для этого сначала вычислим среднее значение:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{k=0}^{N-1} \tilde{\rho}_k}{N},$$

а затем определим новую усеченную функцию  $\tilde{\rho}$  (рис. 4):

$$\tilde{\rho}_j = \begin{cases} t \cdot \bar{\rho}, & \text{если } \tilde{\rho}_j > t \cdot \bar{\rho} \\ \tilde{\rho}_j, & \text{если } \tilde{\rho}_j \leq t \cdot \bar{\rho} \end{cases},$$

где  $t$  – параметр алгоритма, например,  $t = 2$ .

В-третьих, чтобы избежать резких переходов в графике гистограммы, необходимо размыть функцию  $\tilde{\rho}_j$  (т. е. свернуть с дискретным сигналом  $\tilde{\rho}_j$ ) маской равномерно-

го размытия небольшого размера, например,  $w = \frac{1}{8} \cdot [1, 1, 1, 1, 1]$  (рис. 5).

Тогда функция преобразования яркостей  $H(j)$  для размытой функции  $\tilde{\rho}_j$  будет выглядеть следующим образом:

$$H(j) = 255 \cdot \sum_{k=0}^j (\tilde{\rho}_k * w) ,$$

где «\*» - символ операции свертки.

Полученное таким образом преобразование яркостей  $H(j)$  и включает в себе алгоритм нелинейной АРУ.

Далее представлены тепловизионные изображения, показывающие результат применения линейной АРУ (рис. 7), нелинейной АРУ (рис. 8), а также изображение без обработки каким-либо алгоритмом АРУ (рис. 6).

В заключении отметим, что еще более хорошие результаты дает несколько другой нелинейный алгоритм АРУ, у которого функция весов формируется не только по значениям яркостей исходного изображения, но и по значениям яркостей изображения границ исходного изображения.

На рис. 9 тепловизионное изображение после применения нелинейного алгоритма АРУ с учетом значений яркостей изображения границ исходного изображения

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

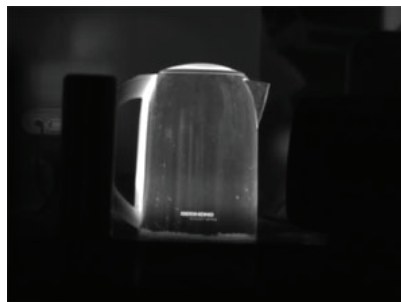
Применение линейного алгоритма АРУ дало несомненно хороший результат — изображение стало более контрастным, проявились детали, которых не было видно на необработанном изображении. Однако после применения нелинейного алгоритма АРУ, становится понятно, что линейный алгоритм все же не дал достаточного контрастирования изображения для рассмотрения более мелких перепадов яркостей, что делает нелинейный алгоритм более привлекательным для реализации в тепловизионных приборах.

#### Список литературы

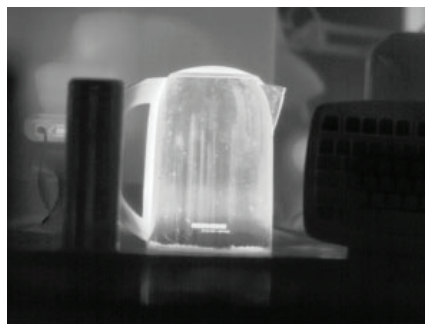
1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений – М: Техносфера, 2012 –1004с.



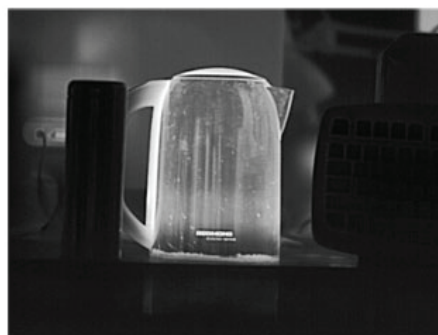
**Рисунок 6.**  
*Тепловизионное изображение без применения АРУ*



**Рисунок 7.**  
*Тепловизионное изображение после применения линейной АРУ*



**Рисунок 8.**  
*Тепловизионное изображение после применения нелинейной АРУ*



**Рисунок 9.**  
*Тепловизионное изображение после применения нелинейного алгоритма АРУ с учетом значений яркостей изображения границ исходного изображения*

# О КОНТРОЛЕ ФОРМЫ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕРКАЛ РАДИОТЕЛЕСКОПА КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «МИЛЛИМЕТРОН»

КАПУСТИН А.В., ЛАЗАРЕВА Н.Л., ПУРЯЕВ Д.Т.

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана , г. Москва

E-mail: kapustin\_sasha@inbox.ru, av72399@mail.ru

*Предложены схемы аттестационного контроля поверхностей зеркал радиотелескопа «Миллиметронтрон» интерференционным методом.*

**Ключевые слова:** аттестационный контроль, радиотелескоп, сегментированное главное зеркало, вторичное зеркало.

## ВВЕДЕНИЕ

В рамках федеральной космической программы ведутся работы по созданию космической обсерватории субмиллиметровых длин волн, проект носит название «Миллиметронтрон» [1].

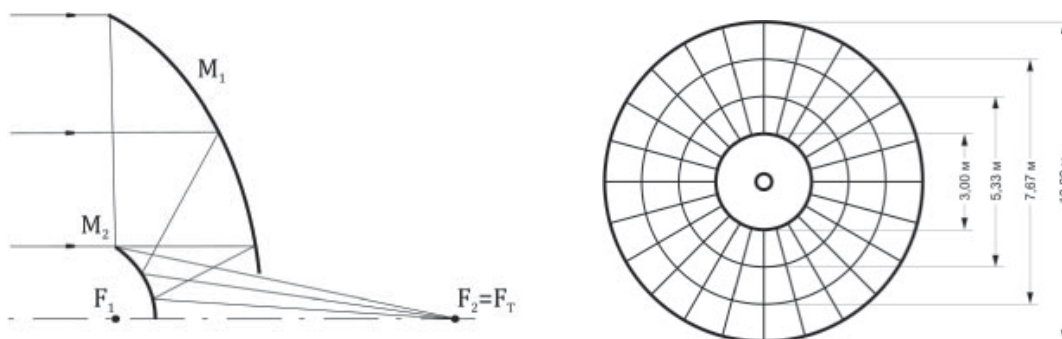
Оптическая система телескопа построена по классической схеме Кассегрена и состоит из 10-метрового составного вогнутого параболического главного зеркала и вторичного выпуклого гиперболического зеркала диаметром 542 мм (рис. 1). Особенностью конструктивного решения оптической системы телескопа (рис. 1 а) является расположение вторичного зеркала М2 внутри стрелки прогиба главного зеркала М1. Таким образом исключается прямое попадание солнечных лучей на отражающую поверхность гиперболического зеркала. По этой причине лучи,

приходящие на край главного зеркала, отражаются под прямым углом к оптической оси телескопа.

Рабочий диапазон длин волн радиотелескопа от 20 мкм до 20 мм. Основная длина волны 300 мкм. Главное зеркало телескопа является составным. Оно состоит (рис. 1 б) из центрального монолитного параболического зеркала диаметром 3 м и 72-х сегментов. Сегменты главного зеркала образуют 3 кольцевые зоны, в каждой из которых по 24 внеосевых элемента.

## КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ЦЕНТРАЛЬНОГО ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ЗЕРКАЛА

Для контроля формы поверхности центрального элемента параболического зеркала предлагается использовать компенсационный метод, преимуществами которого являются: небольшой размер оптической систе-



**Рисунок 1.**  
**Оптическая схема телескопа «Миллиметронтрон»:**  
**а - ход лучей осевого пучка;**  
**б - схема конструктивного решения главного зеркала**

мы компенсатора, возможность проведения интерференционных измерений, одновременный и полный охват контролируемой поверхности рабочим пучком лучей. На рисунке 2 показана схема лазерного интерферометра Тваймана – Грина, который наиболее часто используют в промышленности для контроля формы оптических поверхностей. Элементы оптической системы интерферометра перечислены в подрисуночной надписи.

Важной отличительной особенностью интерферометра является двухлинзовый компенсатор 6, действующий в параллельном пучке лучей. Разработанный нами компенсатор состоит из двух менисковых линз со сферическими поверхностями. Световые диаметры линз менее 180 мм. Конструктивные параметры компенсационной системы приведены в табл. 1, остаточная волновая aberrация измерительной ветви интерферометра, определяющая точность контроля формы, не превышает десятой части длины волны He-Ne лазера ( $\lambda = 0,6328$  мкм).

#### КОНТРОЛЬ ФОРМЫ ВТОРИЧНОГО ЗЕРКАЛА

Наиболее сложным для контроля является вторичное гиперболическое зеркало, которое имеет экстремальные параметры: радиус кривизны при вершине  $r_0 = 255$  мм, коническая константа  $k = -1.147$ , диаметр 542 мм.

Контроль поверхности вторичного зеркала классическим методом анаберрационных точек практически неосуществим, так как рас-

четный диаметр необходимой сферы Хиндла составит 6 м, а радиус кривизны 3 м. Такую сферу невозможно изготовить и использовать. Поэтому нами предложено выполнять контроль поверхности вторичного зеркала в два этапа [2], используя анаберрационные точки гиперboloида нетрадиционным способом. На первом этапе предлагается контролировать по частям периферийную область вторичного зеркала с помощью сферы Хиндла диаметром 600 мм и радиусом кривизны 500 мм. На рис. 3 а показано взаимное расположение вторичного зеркала  $M_2$  и сферы Хиндла  $M_H$ , а также ход лучей. Здесь лучи идут через анаберрационные точки  $F_1$  и  $F_2$  гиперboloида. Очевидно, что сфера Хиндла малого диаметра позволяет охватить пучком лучей лишь часть поверхности вторичного зеркала. Поэтому для охвата всей периферий-

Таблица 1.

Конструктивные параметры оптической системы измерительной ветви интерферометра

Радиус кривизны, мм	Осевое расстояние, мм	Световой диаметр, мм	Оптическая среда
-1558.210	35.057	178.00	ЛКЗ
-147.040	349.090	178.28	Воздух
-1821.500	43.146	158.72	СТК19
-491.880	4625.262	178.00	Воздух
-4666.667*	-4625.262	3009.96	Воздух

\* коническая константа  $k = -1$

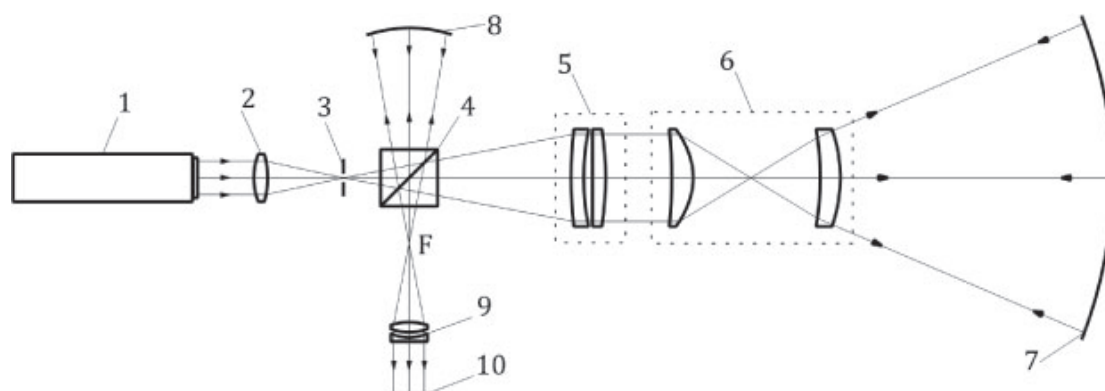


Рисунок 2.

Схема контроля центрального элемента главного параболического зеркала: 1 - лазер, 2 - объектив, 3 - диафрагма, 4 - светоделительный куб, 5 - объектив коллиматора, 6 - компенсатор, 7 - контролируемое зеркало, 8 - эталонное сферическое зеркало, 9 - объектив сопряжения, 10 - фотоприемное устройство



ной части вторичного зеркала сферу Хиндла необходимо последовательно «накладывать» на различные участки периферийной зоны вторичного зеркала. Интерферограммы, полученные от каждого участка периферийной зоны, впоследствии должны быть объединены с целью получения единой интерферограммы периферийной зоны.

Контроль центральной зоны нами предлагается выполнять с помощью того же сферического зеркала (сферы Хиндла) и зеркально-линзового компенсатора диаметром до 16 мм в схеме, представленной на рис. 3 б.

Здесь выходящий из интерферометра 1 параллельный пучок лучей диаметром 16 мм с помощью наклонного зеркала 2 и зеркально-линзового компенсатора 3 направляется на вогнутое сферическое зеркало 5, центр кривизны которого совмещен с мнимым фокусом контролируемого вторичного зеркала 4. После отражения от зеркала 4 лучи по нормальям падают на вогнутое зеркало 5 и повторяют свой путь в обратном направлении. В результате в интерферометре формируется интерферограмма, которая содержит в себе информацию о форме поверхности в центральной зоне вторичного зеркала. Информация, полученная с этой интерферограммы, должна быть объединена с информацией, полученной от периферийной зоны.

При раздельном контроле центральной и периферийных зон вторичного зеркала вспомогательное сферическое зеркало является технологичным и имеет диаметр сравнимый

с диаметром контролируемого гиперболического зеркала.

При контроле центральной части вторичного гиперболического зеркала остаточные волновые aberrации оптической системы измерительной ветви при автоколлимационном ходе лучей составляет  $0,2\lambda$  ( $\lambda = 0,6328$  мкм – длина волны He-Ne лазера). При контроле периферийной части гиперболического зеркала остаточные aberrации отсутствуют, поэтому погрешность контроля гиперболоида во многом определяется погрешностями поверхности вспомогательного сферического зеркала, которое надлежит тщательно аттестовать. Требования к соблюдению формы вспомогательного зеркала следует назначать на пределе технологических возможностей.

Недостатком раздельного метода контроля формы поверхности является невозможность его использования в процессе формообразования поверхности, однако существует возможность контроля поверхности и в процессе формообразования компенсационным методом с использованием синтезированной голограммы [3].

Данный метод подразумевает использование плоско-выпуклой подложки из церудура диаметром около 1 метра с нанесенной на поверхность дифракционной структурой; нанесение дифракционной структуры на таком большом диаметре требует нестандартной делительной машины, однако по мнению авторов работы [3] она может быть изготовлена в ближайшем будущем.

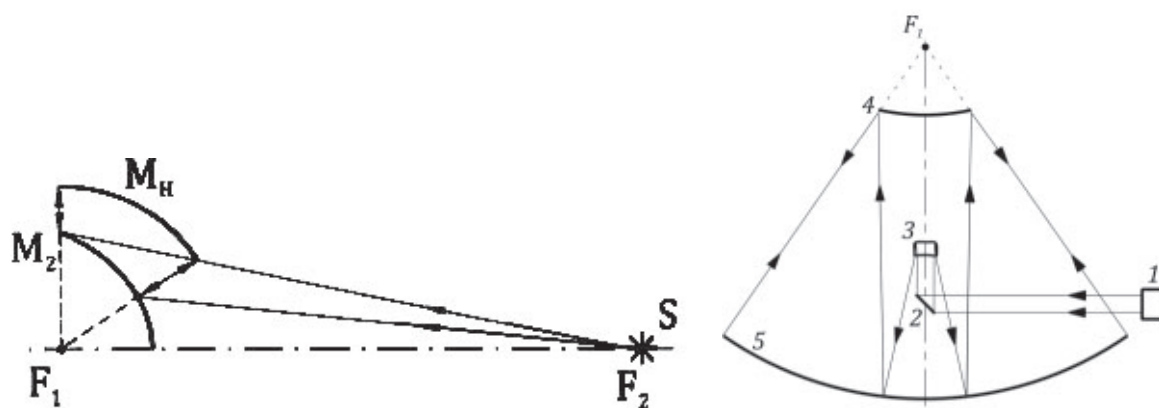


Рисунок 3.

Схемы раздельного контроля поверхности вторичного зеркала:  
а) контроль периферийной части; б) контроль центральной части

## КОНТРОЛЬ ФОРМЫ СЕГМЕНТОВ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА

Как указывалось выше, сегменты главного зеркала являются внеосевыми параболическими зеркалами с одинаковыми фокусными расстояниями, но различными поперечными размерами, габаритные размеры сегментов главного зеркала приведены в табл. 2.

Для контроля формы поверхностей параболических сегментов необходимо организовать ход лучей через их анаберрационные точки, а оценку качества поверхности проводить по результатам полученных интерференционных картин. В измерительной ветви интерферометра необходимо организовать анаберрационный ход лучей, как показано на рис. 4. С этой целью два контролируемых сегмента устанавливаются навстречу друг другу, таким образом, что лучи, вышедшие из фокуса одного сегмента собираются в фокусе другого сегмента, который совмещен с центром кривизны эталонного вогнутого сферического зеркала СЗ, обеспечивающего автоколлимационный ход лучей.

Для контроля формы поверхностей параболических сегментов главного зеркала предлагается использовать попарный контроль

*Таблица 2.  
Габаритные размеры  
сегментов главного зеркала*

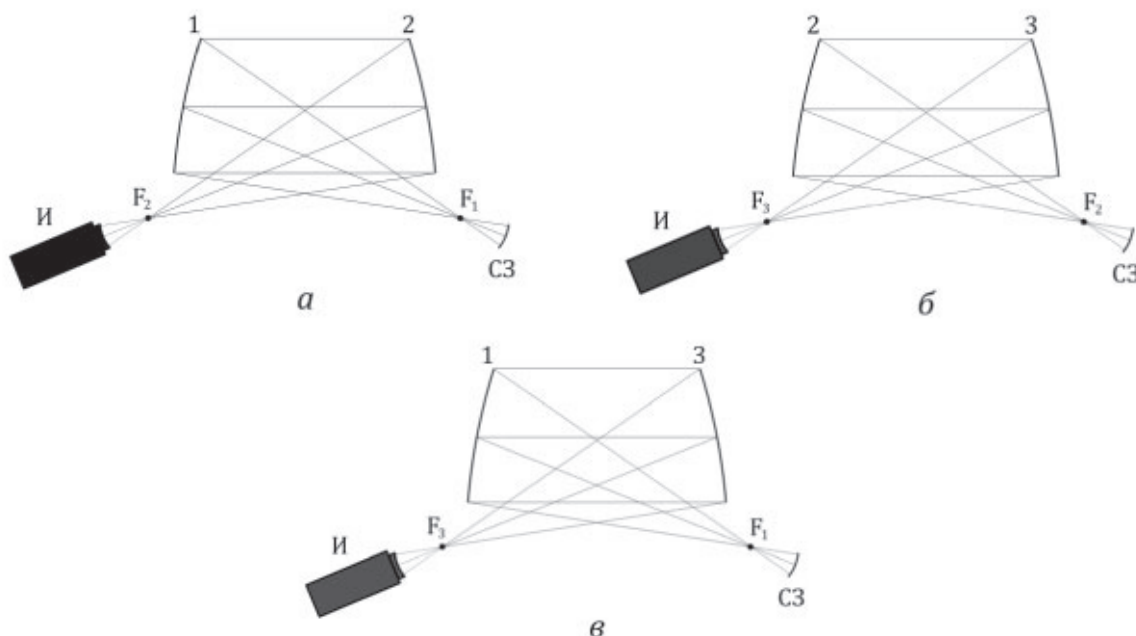
Тип сегмента	Ширина, мм	Высота, мм
Верхний ярус	1316.52	1166.67
Средний ярус	1009.33	1166.67
Нижний ярус	702.15	1166.67

трех сегментов одного типоразмера (на рис. 4 они обозначены 1, 2 и 3). В основе данного метода лежит известный метод абсолютного контроля трех пробных стекол [4].

После получения интерферограмм от трех пар сегментов в отношении каждой точки на каждой интерферограмме необходимо составить и решить систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} h_a = 4\cos\varepsilon(\Delta_1 + \Delta_2); \\ h_b = 4\cos\varepsilon(\Delta_2 + \Delta_3); \\ h_v = 4\cos\varepsilon(\Delta_1 + \Delta_3), \end{cases}$$

где  $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$  – отклонения формы поверхностей сегментов в точке, на которую луч падает под углом  $\varepsilon$  (угол падения луча должен быть заранее вычислен для каждой точки сегмента);  $h_a, h_b, h_v$  – деформации рабочего волнового фронта, в точках падения лучей при реализации схем *а*, *б* и *в*.



**Рисунок 4.**

*Схемы попарного контроля сегментов главного зеркала:  
а, б и в – три варианта взаимной установки сегментов 1, 2 и 3;  
И – интерферометр; СЗ – эталонное сферическое зеркало*

Данный метод контроля позволяет определить отклонение формы сегмента от параболической, при этом допуск на позиционирование сегментов друг относительно друга достаточно широк и имеет порядок нескольких миллиметров, что объясняется симметрией оптической системы контроля и, как следствие, отсутствием аберрации кома.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные схемы контроля центрального элемента и сегментов главного параболического зеркала, а также вторичного выпуклого гиперболического зеркала телескопа космической обсерватории «Миллиметрон» позволят решить задачу аттестации этих зеркал перед их установкой в радиотелескоп. Схемы ориентированы на использование интерферометрического метода контроля фор-

мы поверхностей, что отвечает современному уровню и обеспечит надежный и оперативный контроль элементов уникального изделия, необходимого для освоения космического пространства.

#### *Список литературы:*

1. Электронный ресурс <http://millimetron.ru>
2. Капустин А.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Контроль формы поверхности вторичного зеркала радиотелескопа «Миллиметрон», Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. - 2015г. - № 05. - С. 297-308.
3. Лукин А., Мельников А., Скоцилов А. Контроль зеркала контррефлектора телескопа «Миллиметрон» на основе использования синтезированной голограммы, Фотоника – 2016г. - № 5. – С. 44-48.
4. Захарьевский А.Н. Интерферометры, с.161-162, (1952).

# МОДУЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ПРОГРАММНЫМИ КОМПЛЕКСАМИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

САЛЬНИКОВА М.А.

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева», г. Красногорск

E-mail: m.salnikova@zenit-kmz.ru

Для создания цифровой модели оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ разработан модуль взаимодействия между программным комплексом конечно-элементного моделирования и программой расчета оптических систем. Данный модуль войдет в общую цифровую модель изделия и позволит оценивать качество оптической системы и его изменение в различных режимах работы.

**Ключевые слова:** конечно-элементное моделирование, расчет оптических систем, автоматизация проектирования.

## ВВЕДЕНИЕ

Создание оптико-электронных комплексов космического базирования является перспективным направлением современного приборостроения. В общем случае разработка объектов таких комплексов (в особенности крупногабаритных) – это сложная научно-техническая задача.

В настоящее время, в условиях быстрого развития технологий, сроки разработки оптико-электронных комплексов необходимо сокращать, поэтому ускорение процесса синтеза и анализа конструкции объективов оптико-электронных комплексов является чрезвычайно актуальной задачей космического приборостроения.

Одной из возможностей сокращения затрат времени на проектирование оптико-электронных комплексов является разработка ал-

горитмов взаимодействия между программными комплексами ANSYS и Zemax. Данные алгоритмы позволят проводить оценки изменения качества изображения оптических систем с учетом их конструктивных особенностей и внешних воздействий на оптико-электронные комплексы.

## СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

Разработанный модуль состоит из указанных на рис. 1 блоков и работает в следующей последовательности. Первоначально производится расчет детали в комплексе конечно-элементного моделирования, в нашем случае это CAE ANSYS. Текстовый файл, в котором записана экспортированная из CAE ANSYS конечно-элементная сетка [1], является входным файлом для разработанного модуля. Первый блок – блок чтения считывает и преобразует ее.

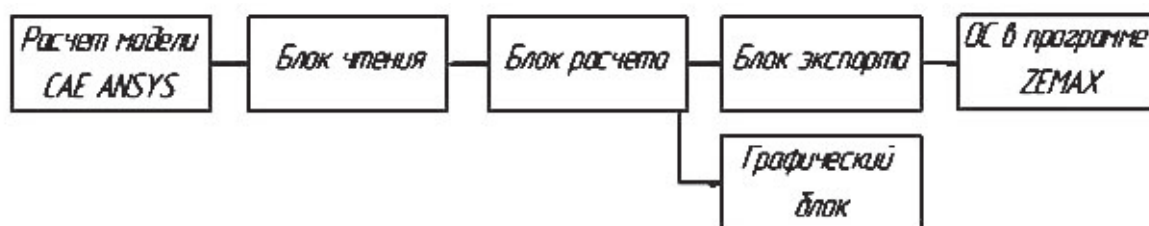


Рисунок 1.  
Структурная схема



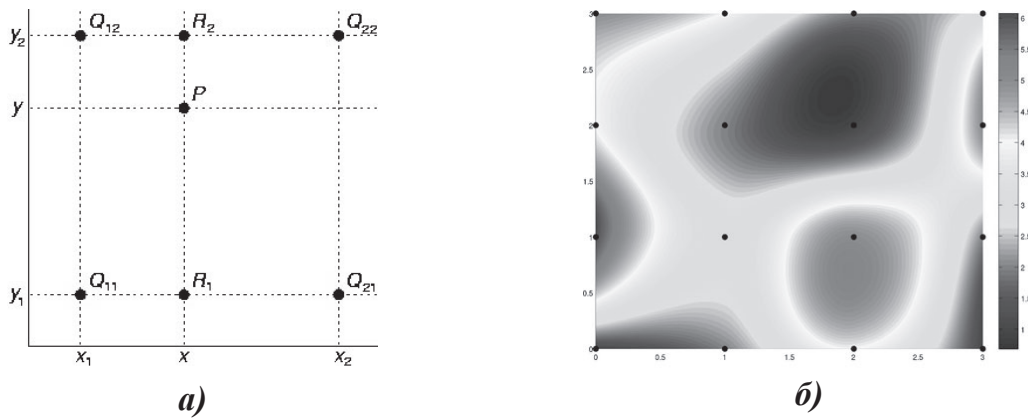


Рисунок 2.

**Варианты интерполяции применительно к поверхности Grid Sag:**  
**а) – четыре красные точки ( $Q_{11}$ ,  $Q_{12}$ ,  $Q_{21}$ ,  $Q_{22}$  – известные значения. Значение в зеленой точке ( $P$ ) должно быть интерполировано**  
**б) – Бикубическая интерполяция. Данную сетку можно рассматривать как состоящую из 9 единичных квадратов. Черные точки - известные значения функции до интерполяции. Цветом обозначены интерполированные значения в каждой точке полученного изображения**

Второй блок – блок расчета производит аппроксимацию поверхности. Как известно в программном комплексе Zemax есть несколько типов поверхностей, позволяющих задать произвольную поверхность. Выделим из них две: Grid Sag и Zernike Standard Sag. Первая из них задает поверхность по прогибам в точках на прямоугольной сетке, вторая – задает поверхность по прогибам полиномами Цернике.

Применительно к поверхности Grid Sag, в общем случае, необходимо рассчитать координаты точки поверхности по имеющемуся набору заданных точек конечно-элементной сетки. Для этого можно использовать, билинейную интерполяцию, строящую плоскость через три соседние известные точки, или еще более подходящую бикубическую интерпо-

ляцию (рис. 2), строящую поверхность через шестнадцать ближайших точек, однако, для случая неравномерной непрямоугольной сетки ее применение затруднительно.

Поверхность Zernike Standard Sag [2], используемая в программе Zemax, – это поверхность, которая описывается уравнением четной асферики и дополнительными асферическими членами, записанными через коэффициенты Цернике стандартного полиномиального ряда. Через нее могут быть заданы так же плоские, сферические и асферические поверхности второго порядка. Для описания поверхности рассчитывается 231 коэффициент при полиномах (рис. 3).

Формула задания поверхности Zernike Standard Sag в программе Zemax производится по следующей формуле:

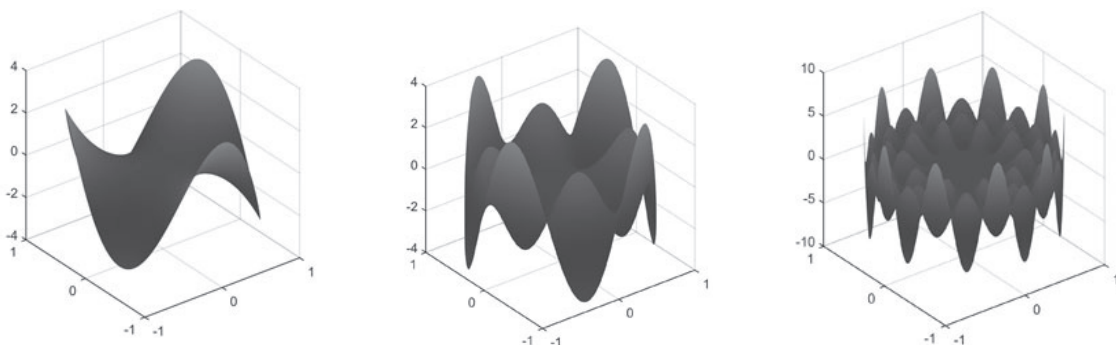


Рисунок 3.

Пример изображения 9, 25 и 182 полинома

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 \alpha_i r^{2i} + \sum_{i=1}^N A_i Z_i(\rho, \varphi),$$

где  $z$  – координата вдоль оптической оси,  
 $c$  – величина, обратная радиусу кривизны  
при вершине поверхности,

$k$  – коническая константа поверхности,

$\alpha_i$  – коэффициенты четной асферической  
поверхности высшего порядка,

$r$  – радиальная координата луча в линейных  
единицах схемы,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,

$x, y$  – координаты в плоскости перпендику-  
лярной оптической оси,

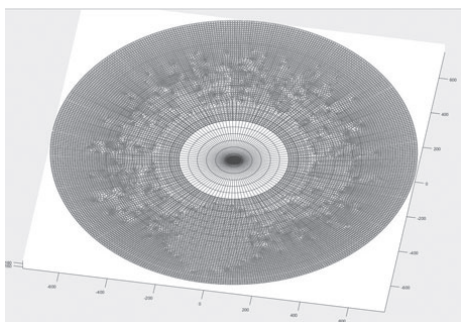
$N$  – число коэффициентов Цернике в ряду,

$A_i$  – коэффициент  $i$ -го полинома Цернике,

$\rho$  – нормированная радиальная координата  
луча,

$\varphi$  – угловая координата луча.

Третий блок – блок экспорта формирует  
выходной файл и записывает его в формате  
пригодном для загрузки в программу Zemax.  
Четвертый блок – графический, предназна-  
чен для отображения аппроксимированной  
поверхности и точек входного файла, импор-  
тированного из ANSYS (рис. 4).



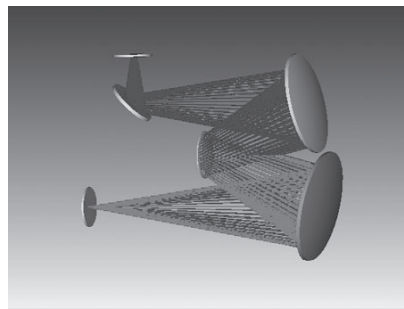
**Рисунок 4.**

**Пример интерполированной поверхности  
по экспортированной сетке**

Основная задача данного блока: дать пред-  
ставление о форме загруженной поверхности  
и информацию о том, что приближение ве-  
лось правильно или оно провалилось из-за  
неверных начальных данных.

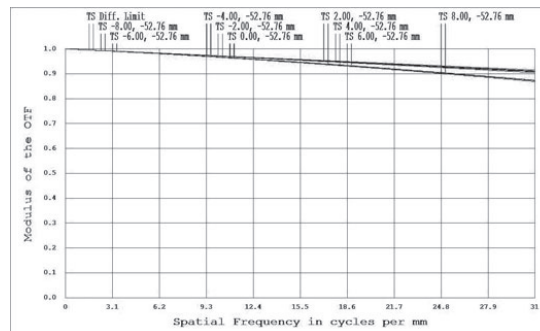
**ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА**

В настоящее время в мире наиболее рас-  
пространенными программами, осущест-  
вляющими подобное взаимодействие между  
комплексами САЕ и оптическими програм-  
мами, являются SigFit и OOFELIE. Однако



**Рисунок 5.**

**Трехмерная модель тестовой системы**

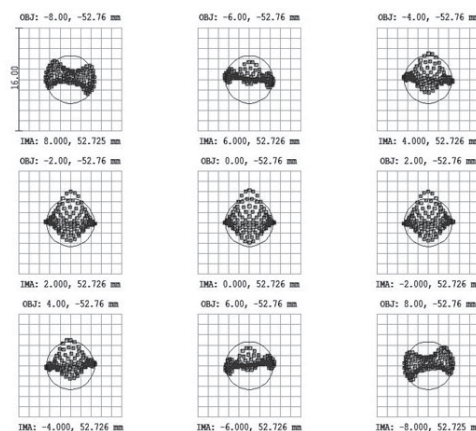


**Рисунок 6.**

**МПФ исходной системы**

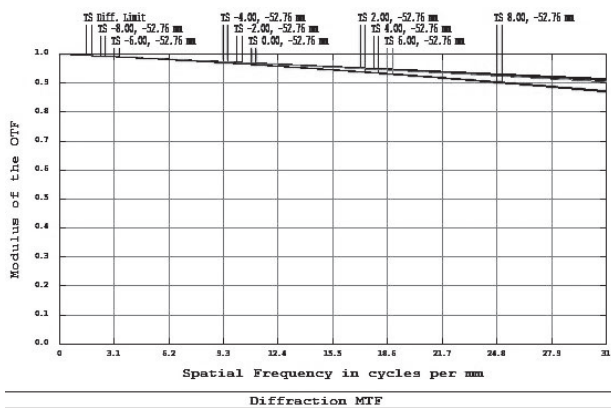
данные программы являются импортными,  
имеют большую стоимость, поэтому их ис-  
пользование в создаваемой общей цифровой  
модели комплекса существенно затруднено.

Результаты работы модуля предлагается  
оценить на примере решения тестовой за-  
дачи. На рис. 5 – представлена трехмерная  
модель оптической системы. Для примера  
заменяется ее первое зеркало. На рис. 6 при-  
ведена МПФ исходной системы. Рис. 7 отра-  
жает пятна рассеяния в исходной оптической  
системе.



**Рисунок 7.**

**Пятна рассеяния исходной  
оптической системы**

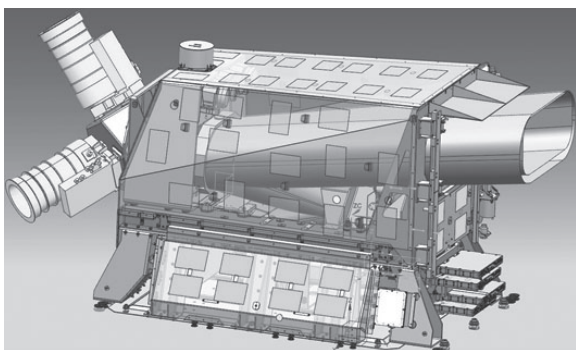


**Рисунок 8.**  
*МПФ оптической системы с замененной поверхностью*

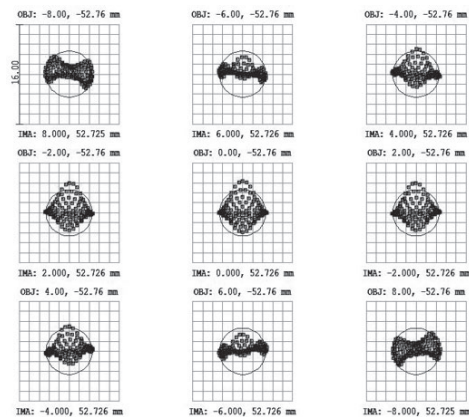
После замены первой зеркальной поверхности на Zernike Standard Sag получаем следующие результаты по МПФ (рис. 8) и пятнам рассеяния (рис. 9) соответственно.

Продемонстрируем на следующем примере возможность применения разрабатываемого модуля для оценки качества оптической системы в составе сборочных единиц с учетом их конструктивных особенностей.

На рис. 10 и 11 представлены исходная трехмерная модель рассматриваемой сборки и ее упрощенный вариант для проведения расчетов НДС. Для простоты оценки полученных результатов передаваемые в Zemax оптические поверхности будут аппроксимироваться по набору пространственных узлов без учета перемещений, которые они получают при внешних воздействиях в виде ударных нагрузок, вибраций и т.д.



**Рисунок 10.**  
*3D модель комплекса ДЗЗ*



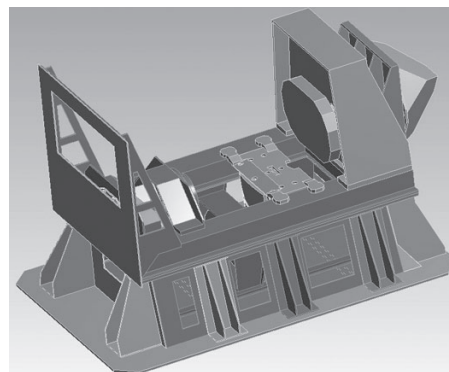
**Рисунок 9.**  
*Пятна рассеяния оптической системы с замененной поверхностью*

Далее необходимо оценить МПФ исходной оптической системы и МПФ, полученную в результате замены части поверхностей типа Standard на поверхности типа Zernike Standard Sag. В примере заменены внеосевое зеркало и поверхность линзового компенсатора.

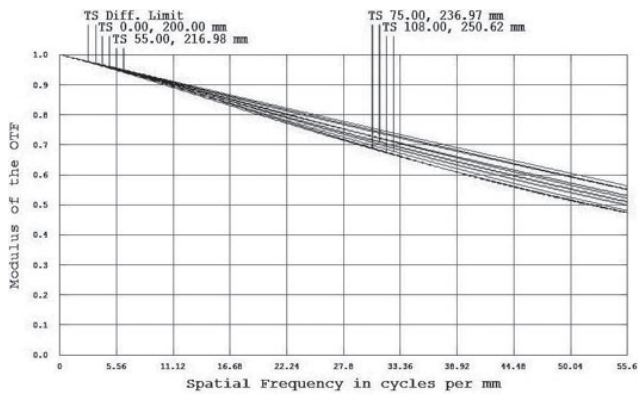
На рис. 12 представлена МПФ исходной оптической системы, а на рисунке 13 – МПФ системы с замененными поверхностями. Графики имеют схожий характер, отличия которые имеются обусловлены неточностями, допущенными при сборке модели.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

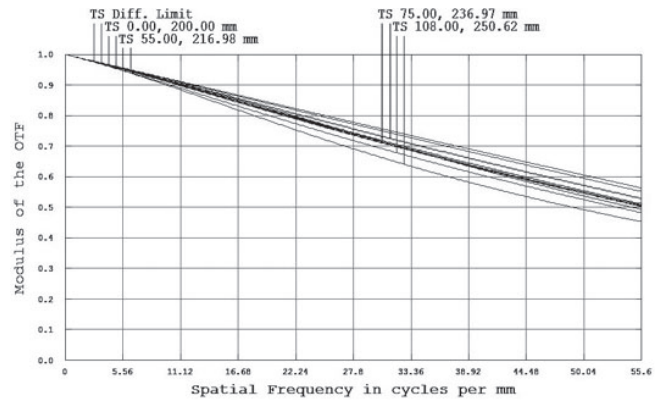
Предложенная функциональная структура взаимодействия между программными комплексами ANSYS и Zemax позволит на этапах проектирования и создания оптико-электронного комплекса проводить оценку



**Рисунок 11.**  
*Упрощенная 3D модель*



**Рисунок 12.**  
**МПФ исходной системы**



**Рисунок 13.**  
**МПФ оптической системы  
с замененными поверхностями**

изменения качества изображения оптической системы под действием внешних факторов. В результате упростится и ускорится принятие конструкторских и технологических решений, определяющих, в конечном итоге, сложность и реализуемость космической оптико-электронной аппаратуры.

*Список литературы:*

1. ANSYS 15.0 User's Guide.
2. Zemax Optical Design Program 2011 User's Manual.



# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В РАЗРАБОТКАХ И ТЕХНОЛОГИЯХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБЪЕКТИВОВ ДЛЯ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

ВОЛКОВ В.Г., МОИСЕЕВ Е.А.\*, СЕНИК Б.Н.\*

Московский Государственный Технический Университет им. Н.Э. Баумана

\*ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»

E-mail: volkvik2009@yandex.ru, eugen.moiseev@gmail.com, bogdan\_senik@mail.ru

*Высокие качественные параметры фотоприемных устройств (ФПУ) в последние годы резко повысили планку в достижении предельных выходных оптических параметров ИК объективов. Это в свою очередь предъявляет повышенные требования к расчетам оптического тракта, конструированию и всем этапам сборки и юстировки данных систем.*

**Ключевые слова:** современные объективы, спектральные диапазоны, способы крепления оптических деталей.

В настоящее время активно проводятся комплексные фундаментальные и прикладные исследования и разработки в области создания тепловизионных оптических систем. Прежде всего, это связано с повышенной актуальностью решения целого ряда технических задач в интересах военных ведомств различных стран, в том числе и Российской Федерации, а также крупными достижениями в области создания фотоприемных устройств с повышенными выходными характеристиками.

На сегодняшний день целый ряд отечественных и зарубежных фирм занимаются разработкой и промышленным изготовлением вышеуказанных приборов. В Российской Федерации – АО «НПО «ГИПО», НИИ «Циклон», «Пергам», ПАО КМЗ, Astrohn, и др. В мире данными разработками активно занимаются компании FLIR, Fluke, SAT Infrared Technology и др.

Одним из основных компонентов тепловизионных приборов являются объективы, работающие в различных спектральных инфракрасных диапазонах. Высокие качественные параметры ФПУ в последние годы резко повысили требования к предельным выходным оптическим параметрам объективов. Это в свою очередь предъявляет повышенные требования к расчетам оптического тракта, точности изготовления оптических деталей

и всем этапам сборки и юстировки данных систем.

Современные тепловизионные приборы функционируют в двух спектральных диапазонах, а именно 3 – 5 и 8 – 14 мкм, некоторые из типов приборов являются комбинированными и работают в двух вышеуказанных диапазонах одновременно. Каждый из диапазонов обладает определенными достоинствами. Преимуществами объективов для области спектра 3 – 5 мкм по сравнению с объективами для области 8 – 14 мкм являются:

- более высокое качество изображения за счет меньшего дифракционного кружка рассеяния (по формуле  $d = \frac{\lambda}{1,22}$ );
- увеличенный номенклатурный ряд оптических материалов, прозрачных в диапазоне 3 – 5 мкм, что в свою очередь расширяет возможность коррекции выходных параметров объектива на этапе расчета;
- повышенные светотехнические параметры просветляющих покрытий и соответственно более высокое светопропускание оптической системы
- более эффективная работа в условиях повышенной влажности и по воздушным целям.

В таблице 1 представлены современные ИК объективы крупнейших отечественных и иностранных фирм.

Не менее важной задачей в области разработки тепловизионных систем являются требования минимизации массогабаритных

**Таблица 1.**  
**Основные параметры ИК объективов для ТПВ приборов**

№ п/п	Страна, фирма	Δλ, мкм	Фокусное расстояние, мм	Относительное отверстие	Угол поля зрения, град.	Пропускание	Масса
1	РФ, ФГУП НИИКИ ОЭП	8–14	18	1:0,8	50	0,88	
2	-«-	-«-	50	1:0,7	18	0,91	
3	-«-	-«-	100	1:0,7	9	0,88	
4	-«-	3–5	132	1:1,5	5	0,81	
5	РФ, Макро Оптика	8–14	70	1:1,4	11,2	>0,9	0,45
6	РФ, ФГУП НПО ГИПО	8–13	22	1:1	40×30	0,8–0,9	1,16
7	-«-	-«-	50	1:1	17×13	-«-	0,54
8	-«-	3–5	50	1:1	17×13	-«-	0,54
9	-«-	8–13	150	1:1,3	5,9×4,3	-«-	1,4
10	-«-	-«-	300	1:2,2	3×2	-«-	3,85
11	-«-	-«-	60–360	1:2	11,8/2,0	-«-	25
12	-«-	3–5	50–500	1:1,8	9,3/1,1	-«-	46,5
13	США, Agiltron Inc.	0,5–2 3–5 8–14	7	1:1,5	360		
14	-«-	8–14	35	1:0,75	20		
15	Франция, CEDIP Inerarad Systems	0,8– 2,5 3–5,2 8–9,3	12	1:1,1	38		
16	-«-	-«-	25	-«-	32		
17	-«-	-«-	50	-«-	14		
18	-«-	-«-	75	-«-	11		
19	-«-	-«-	100	1:1,3	8		
20	-«-	-«-	250	1:2	4		

параметров, что в свою очередь предъявляет к разработчикам оптических систем особые требования по использованию в оптических трактах нетрадиционных оптических элементов (асферических, киноформных и комбинированных, с целью уменьшения количества оптических деталей и aberrаций в оптическом тракте), а также использование зеркал и призм для получения возможности изменения направления хода оптических лучей в оптической схеме.

Для достижения более высоких выходных параметров объективов на этапе расчета оптических систем закладываются максимально жесткие допуски на различные геометрические параметры, которые труднодостижимы на этапе изготовления отдельных оптических и механических компонентов, а также на этапе сборки и юстировки.

Для решения вышеуказанных задач тре-

буется использовать принципиально новые технологии изготовления оптических деталей и метрологические приборы с повышенными точностными параметрами проводимых измерений. В частности, на этапе сборки для контроля децентрирования линз и их положения в пространстве относительно посадочных баз оправ и корпусов объективов, а также оптимизация методов крепления, с целью повышения надежности конструкций и исключения возможности внутренних напряжения на всем этапе жизненного цикла прибора.

В настоящее время в качестве материалов для оправ объективов используются в основном металлы и их сплавы. В связи с требованием минимизировать массу объектива, а также для контроля изменения размеров под воздействием резкого перепада температур требуется более тщательно подходить к вы-

бору материалов для механических деталей. Необходимо рассмотреть различные сплавы, композитные и другие размерно-стабильные материалы.

Соединение оптических деталей с механическими оправами можно производить различными способами: завальцовкой, креплением резьбовым кольцом, постановкой на клей или герметик. У каждого из представленных способов есть свои достоинства и недостатки. Однако, в мире на данный момент постановка на герметик является наиболее распространенным способом крепления. Требуется подобрать такой специальный герметик, который будет обеспечивать надежное крепление, а также будет исключать деформации в оптическом элементе. Главной особенностью данного герметика будет устойчивость к большому диапазону температур от  $-60$  до  $+80^{\circ}\text{C}$ .

Деформации в оптических элементах ухудшают волновой фронт в пределах 20-30 нм, что недопустимо для данного класса объективов. При необходимости операция термощипования оптических сборок (линза в оправе) позволяет уменьшить внутренние напряжения в оптических компонентах до приемлемого уровня.

Также требуется проводить обязательный промежуточный контроль линз и зеркал на пережатие после постановки их на клей или герметик, так как даже небольшое отклонение от требований конструкторской документации может привести к значительной потере качества получаемого изображения. Данные проверки необходимо проводить на специализированных интерферометрах.

Ужесточение требований по децентрировке оптических компонентов и их отклонению от вертикальной оси, т.е. наклон приводят к улучшению выходных точностных параметров оптической системы. Децентрировка линзы должна составлять не более 3–5 мкм. Методы центрирования линз в оправе, такие как автоколлимационная вточка с использованием плавающего патрона или ее усовершенствованная разновидность – двусторонняя автоколлимационная вточка в полной мере не позволяют добиться требуемых значений децентрирования линз. Для решения вышеуказанных задач требуется разработка нового метода, а для его реализа-

ции нового прибора, использующего лазерное излучение, обеспечивающего требуемые параметры.

Во время финишной сборки объектива для достижения требуемых параметров требуется максимально точно выдерживать воздушных промежутков между оптическими элементами. Для контроля полученных воздушных промежутков с точностью 0,01 мм требуется сверхточное оборудование. Именно таким оборудованием является лабораторная скамья OptiCentric IR немецкой фирмы TRIOPTICS, разработанная специально для работы в инфракрасном диапазоне электромагнитных волн.

При сборке объективов с ломанными оптическими осями требуются особые способы юстировки и выставления линз в оправе и зеркал в корпусе объектива. Соосность оптических компонентов друг относительно друга не должна превышать 0,02 мм в системах без подвижных компонентов и 0,05 мм в системах с подвижным оптическим компонентом. Также необходимо выставление зеркал с наклоном не более 20 угл. с. относительно требуемого угла с одновременным выдерживанием воздушных промежутков с точностью не более 10 мкм. Для этого требуются специальное оборудование, такое как оптический цифровой автоматизированный измеритель отклонений от прямолинейности и соосности (ОПТРО-ППС-31 фирмы ОПТРО-ТЕХ), а также различные автоколлимационные юстировочные приборы. Использование метода выставления по сеткам с использованием данного оборудования позволяет добиться требуемых децентрировок и соосности оптических компонентов и позволяет добиться точного позиционирования зеркал по двум координатам.

*Список литературы:*

1. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Видение и безопасность, 840 с, (2009).
2. Латыев С.М. Конструирование точных (оптических) приборов, 560 с (2015)
3. Волков В.Г. Малогабаритные ночные прицелы. Специальная техника, 2004 г., №1, с. 12-23
4. Дж. Ллойд. Системы тепловидения. М., Мир, 1987 г., 414 с.
5. Ж. Госсорг. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М., Мир, 1988 г., 416 с.

# УСТАНОВКА ДЛЯ ФЛУОРЕСЦЕНТНОЙ ДИАГНОСТИКИ И ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ ТКАНЕЙ ГЛАЗНОГО ДНА

МОДЕЛЬ С.С., САВЕЛЬЕВА Т.А.\*, ЛИНЬКОВ К.Г.\*, ЛОЩЕНОВ В.Б.

Публичное акционерное общество «Красногорский завод им. С.А. Зверева», г. Красногорск

\*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва

E-mail: s.model@zenit-kmz.ru

*Разработана многофункциональная лазерная установка для проведения флуоресцентной диагностики (ФД) тканей глазного дна, а также фотодинамической терапии (ФДТ), позволяющая значительно ускорить процесс лечения сенильной макулодистрофии с неоваскуляризацией. Интраоперационный мониторинг концентрации фотосенсибилизатора в процессе ФДТ позволяет повысить эффективность лечения и избежать повреждения здоровых тканей.*

**Ключевые слова:** фотодинамическая терапия, флуоресцентная диагностика, офтальмология, спектроскопическая диагностика.

## ВВЕДЕНИЕ

Заболевания сетчатки и сосудистого тракта глаз являются одной из основных причин слабовидения или слепоты. Например, появление субретинальной неоваскулярной мембраны (СНМ) в центральной зоне глазного дна вследствие врастания новообразованных сосудов из хориокапиллярного слоя под пигментный эпителий или сетчатку осложняет течение различных воспалительных и дистрофических процессов, приводя к стойкому снижению остроты зрения.

Значительную офтальмологическую проблему представляет также глаукома - большая группа заболеваний глаза, характеризующихся постоянным или периодическим повышением внутриглазного давления (ВГД), вызванным нарушением оттока водянистой влаги из глаза, продуцируемой цилиарным телом. Следствием повышения ВГД является постепенное развитие характерных для глаукомы нарушений зрительных функций и атрофии зрительного нерва. В настоящее время единственным методом лечения далеко зашедшей глаукомы является подавление функций цилиарного тела.

При нарушении строения стромы рогови-

цы, связанном с несовершенной регенерацией собственного вещества, в роговичную ткань проникает обычная соединительная ткань, а в более тяжелых случаях - кровеносные сосуды. Эти изменения являются осложнением кератитов и дистрофий роговицы или травм роговицы различного генеза. Для лечения неоваскуляризации роговицы применяют различные виды кератопластик, однако в ряде случаев (от 10 до 30%) после операции происходит врастание новообразованных сосудов в роговичный трансплантат с последующим его помутнением.

Для лечения субретинальной неоваскулярной мембраны (СНМ) используют лазерную коагуляцию или хирургическое вмешательство. Однако данные методы не всегда эффективны и сопряжены с опасностью развития осложнений при их проведении. В связи с этим наиболее перспективным считается метод терапии субретинальной неоваскулярной мембраны, основанный на фотодинамическом эффекте. В его основе лежит фотодинамическая окклюзия новообразованных сосудов с сохранением окружающих тканей. Данный метод позволяет воздействовать с определенной избирательностью только на



патологические участки, не влияя на окружающую их здоровую ткань, что повышает эффективность лечения, и значительно улучшает прогноз для зрительных функций [1, 2].

Фотодинамическую терапию (ФДТ) используют также при лечении далеко зашедшей глаукомы. Фотодинамическое воздействие на сосуды цилиарного тела уменьшает его кровоснабжение и, как следствие, подавляет продукцию внутриглазной жидкости [3].

ФДТ применяется также для лечения неоваскуляризации роговичного трансплантата [4], где путем фотодинамического воздействия удалось достигнуть полного запустевания неоваскулярной сети в трансплантате.

Основным преимуществом ФДТ в сравнении с другими энергетическими методами лечения является целенаправленное воздействие непосредственно на область патологического процесса. Это обеспечивается несколькими компонентами: наличием фотохимического агента (фотосенсибилизатора (ФС)), избирательно накапливающегося в патологически измененных тканях, взаимодействующего с ним лазерного излучения с длиной волны, соответствующей пику поглощения конкретного ФС, и кислорода, содержащегося в биоткани [5].

Используемые для ФДТ фотосенсибилизаторы обладают свойством накапливаться в патологических тканях, кроме того некоторые из них также обладают флуоресцентными свойствами. Это позволяет проводить флуоресцентную диагностику и точно локализовать пораженные области.

Патологии сетчатки могут возникать при различных общих и системных заболеваниях (гипертонической болезни, сахарном диабете, заболеваниях почек, черепно-мозговых травмах). На начальных стадиях развития заболевания могут проходить бессимптомно, поэтому нужны быстрые неинвазивные методы, дающие врачу объективную информацию о состоянии сетчатки. Таким образом, разработка аппаратуры для ранней диагностики заболеваний глазного дна, а также ФД и ФДТ является актуальным направлением современной медицинской инженерии.

До настоящего времени диагностика сосудистых заболеваний глаз, в частности СНМ, осуществлялась посредством флуоресцентной ангиографии с флуоресцеином натрия либо телевизионно-оптической ангиографии глазного дна с индоцианином зеленым. Известно устройство для флуоресцентной ангиографии глазного дна с флуоресцеином натрия и телевизионно-оптической ангиографии глазного дна с индоцианином зеленым. Это устройство включает щелевую лампу (или фундус-камеру), содержащую осветитель и микроскоп, снабженный видеоканалом, включающим видеокамеру, систему оптического переноса изображения глазного дна на видеокамеру и систему отображения видеоинформации, вход которой соединен с выходом видеокамеры.

Для реализации способа диагностики патологических изменений глаз, в частности СНМ, пациенту вводят флуоресцеин натрия (при флуоресцентной ангиографии) или индоцианин зеленый (при телевизионно-оптической ангиографии), облучают излучением осветителя в спектральном диапазоне соответственно 455-490 нм (при флуоресцентной ангиографии) либо 805 нм (при телевизионно-оптической ангиографии), и, наблюдая изображение исследуемого объекта, полученное видеокамерой видеоканала в спектральном диапазоне 520-530 нм (при флуоресцентной ангиографии) или 835 нм (при телевизионно-оптической ангиографии), делают вывод о наличии и распространении патологических изменений.

Известны устройства для фотодинамической терапии патологий сетчатки глазного дна на базе щелевых ламп «Coherent Opal Photoactivator» с адаптером «LaserLink» фирмы «Coherent» (США) и «Visulas Zeiss 690s» с адаптером «Visulink-PDT» фирмы «Carl Zeiss Meditec» (Германия).

Эти установки включают в себя щелевую лампу (или фундус-камеру), содержащую осветитель и микроскоп, лазер и адаптер, фокусирующий излучение лазера на сетчатке, причем длина волны излучения лазе-

ра лежит в пределах спектральной полосы поглощения фотосенсибилизатора.

Используя эти устройства, врач вынужден проводить процедуры диагностики и фотодинамической терапии в два разнесенных во времени этапа, а саму терапевтическую процедуру он вынужден осуществлять, ориентируясь только по внешним визуальным признакам патологических изменений (их виду), используя только микроскоп и цветную видеокамеру. Невозможность проведения диагностики и фотодинамической терапии одновременно (в рамках одной процедуры) усложняет метод, затрудняя точное наведение на нужный участок, что может привести к повреждению здоровых тканей и отсутствию воздействия на патологические очаги.

Эти недостатки частично устранены в устройстве для флуоресцентной диагностики и фотодинамической терапии патологических изменений глаз [6], включающем офтальмологический прибор (в частности, фундус-камеру), содержащий осветитель, лазер, адаптер, фокусирующий излучение лазера на патологических изменениях глаза, микроскоп, снабженный видеоканалом, включающим цветную видеокамеру и систему оптического переноса изображения исследуемого участка глаза на эту видеокамеру, высокочувствительную видеокамеру и систему оптического переноса изображения исследуемого участка глаза на эту видеокамеру, систему отображения видеoinформации, один из входов которой соединен с выходом цветной видеокамеры, а другой - с выходом высокочувствительной видеокамеры. Система оптического переноса изображения исследуемого участка глаза на высокочувствительную видеокамеру содержит отрезающий светофильтр, не пропускающий оптическое излучение с длинами волн, равными и меньшими длины волны излучения лазера, и пропускающий только оптическое излучение с длинами волн, превышающими длину волны излучения лазера. Для фотодинамической терапии выбран флуоресцирующий фотосенсибилизатор, флуоресценция которого может быть использована для контроля и диа-

гностики новообразованных сосудов. Длина волны излучения лазера лежит в пределах спектральной полосы поглощения фотосенсибилизатора и совпадает со спектральным максимумом этой полосы поглощения.

Однако это устройство также обладает рядом существенных недостатков, приводящих к невозможности одновременной (в рамках одной процедуры) диагностики и фотодинамической терапии заболеваний глаз. Прежде всего, это связано с «засветкой» высокочувствительной видеокамеры длинноволновой компонентой светового излучения от осветителя и системы освещения офтальмологического кабинета. Эта компонента, близкая по интенсивности к интенсивности флуоресценции фотосенсибилизатора в патологических участках глаза, существенно снижает контраст флуоресцентной картины и затрудняет как диагностику, так и выработку терапевтической тактики. Кроме того, рассеянное от поверхностей глаза лазерное излучение с высокой пространственной и спектральной плотностью, попадая на цветную видеокамеру видеоканала устройства, приводит к существенным искажениям изображения по яркости и цветопередаче (так называемое ослепление или заплывание камеры). В свою очередь вышеперечисленные недостатки устройства привели к недостаткам способа диагностики и фотодинамической терапии заболеваний глаз, который осуществляется в рамках двух процедур с использованием двух устройств (ангиография - на одном устройстве, а фотодинамическая терапия - на другом).

Недостатки известных устройств для диагностики и фотодинамической терапии заболеваний глаза приводят к снижению эффективности диагностики и фотодинамической терапии, так как невозможно в рамках одной процедуры четко и достоверно определить границы патологического участка и провести его фотодинамическую терапию.

Все вышеперечисленные комплексы предназначены только для проведения ФД и ФДТ. С их помощью нельзя проводить раннюю диагностику заболеваний глазного дна, что является их общим недостатком.

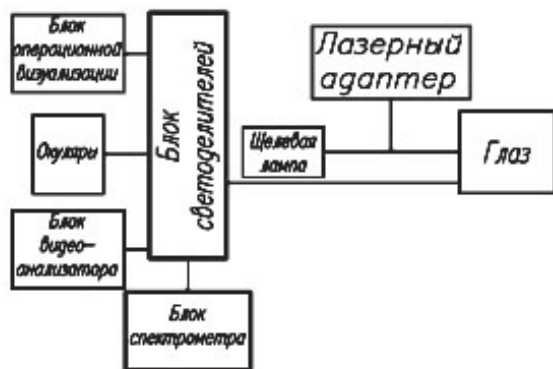


Рисунок 1.  
Структурная схема установки

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

Разработанная офтальмологическая установка [7] предназначена для проведения ФД и ФДТ с отечественным ФС «Фотосенс», обладающим флуоресцентными свойствами. Структурная схема установки представлена на рис. 1.

Установка построена на базе щелевой лампы – интраоперационного офтальмологического микроскопа и содержит адаптер, формирующий на глазном дне лазерное пятно. Оптическая система адаптера строится на основе системы Келлера и формирует на глазном дне изображение полевой диафрагмы (ПД), расположенной вблизи первого компонента. Изменение диаметра ПД позволяет изменять размер лазерного пятна, при этом освещенность его не изменяется. Это выгодно отличает систему от существующих аналогов, так как большинство систем строит на глазном дне изображение торца оптического волокна, а значит, проецирует на него все его неоднородности. В итоге равномерность освещенности для этих систем наблюдается лишь для малых пучков. Такое решение сопряжено с трудностями в регистрации флуоресцентного сигнала. Дело в том, что на высокочувствительной флуоресцентной камере флуктуации освещенности могут восприниматься как фантомные области накопления сенсibilизатора. Это в свою очередь означает, что врач-оператор получит не достоверную информацию и может провести ФДТ по здоровым тканям, что недопустимо. При-

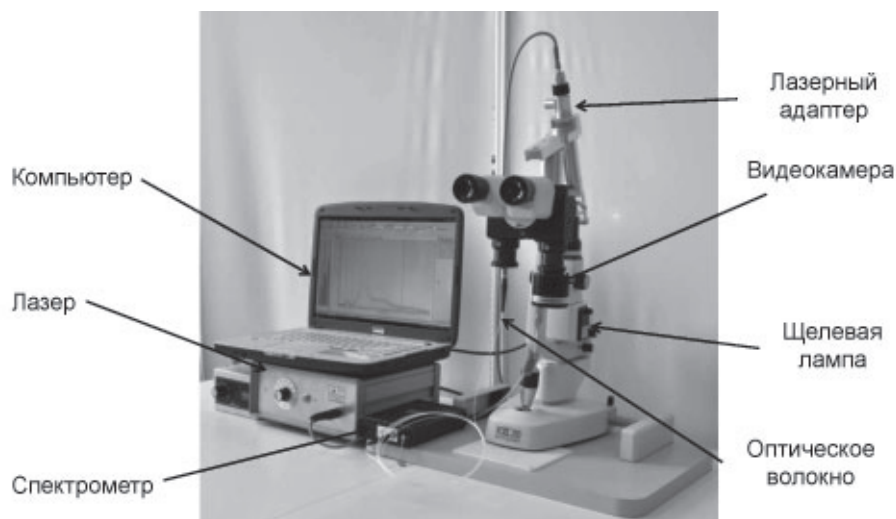
менение адаптера, построенного по схеме Келлера, позволяет выполнять количественные измерения концентрации ФС в тканях глазного дна, в том числе интраоперационно [8, 9]. Адаптер имеет два режима функционирования: диагностический, с размером рабочего пятна  $d=4..12$  мм и терапевтический, с  $d=100..300$  мкм. В адаптер интегрирован канал устройства автоматизированного контроля дозы излучения. Следует отметить, что для каждого фотосенсibilизатора необходимо использовать лазерный источник излучения с определенной длиной волны, соответствующей пику его поглощения, для ФС «Фотосенс» применен непрерывный лазер Nd:YVO4 (SGG,  $\lambda=671$ нм).

В состав установки входит блок визуализации и спектроскопической диагностики, содержащий призмный светоделиитель и две камеры – цветную и высокочувствительную черно-белую. Цветная камера служит для регистрации качественного полноцветного изображения глазного дна. Перед высокочувствительной камерой установлен светофильтр, позволяющий выделить флуоресцентный сигнал. Изображения камер комбинируются и выводятся на дисплей компьютера.

В установке предусмотрена возможность установки канала волоконного спектрометра, позволяющего получать спектры флуоресценции или диффузного отражения от локальных зон глазного дна.

Такой подход позволяет расширить функциональность установки и выполнять с ее помощью спектроскопические исследования биотканей с различными типами источников излучения. Внешний вид установки представлен на рис. 2.

Спектроскопическая диагностика является важным инструментом в современной офтальмологии. Например, с помощью спектроскопии диффузного отражения можно определить концентрацию гемоглобина, как в оксигенированной, так и в свободной форме, а также концентрации других гемопротенинов. По этой информации косвенно можно определить внутриглазное давление. Уро-



**Рисунок 2.**  
**Внешний вид системы**

вень нейроглобина, наряду с оксигенацией гемоглобина, позволяет оценить жизнеспособность тканей. Так как на ранних стадиях многие заболевания глазного дна проходят бессимптомно, объективная оценка состояния биотканей крайне важна для создания методов ранней диагностики.

#### ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА

В таблице 1 приведен сравнительный анализ показателей качества разработанной установки и конкурирующих аналогов.

Таблица 1. Показатели качества офтальмологических установок для ФДТ.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная установка представляет интерес для широкого круга офтальмологов. Преимуществом установки является возможность оперативного определения пространственного распределения фотосенсибилизатора в тканях глазного дна. Имея такую информацию, врач имеет объективные критерии для выбора правильного режима терапии. Кроме того, обеспечивается возможность проведения ФД и ФДТ в рамках одной процедуры, что ускоряет терапию. Возможность проведения детальных исследований

**Таблица 1.**  
**Показатели качества офтальмологических установок для ФДТ**

№	Показатель качества	Coherent Opal Photoactivator	Zeiss Visulas 690 s Visulink - PDT	Akira Obana's et. al. system	Разработанная установка
1	Тип ФС	Visudyne	Visudyne	ATX-S10(Na)	Фотосенс
2	Количество каналов видеосистемы	1	1	2	2
3	Количественный контроль концентрации ФС	-	-	+	+
4	Возможность подключения спектрометра	-	-	-	+
5	Страна	США	Германия	Япония	Россия



состава биотканей делает систему привлекательной и для научно-исследовательских и учебных медицинских учреждений. Установка построена по модульному принципу и может быть интегрирована в имеющееся в наличии оборудование, что позволяет снизить затраты на ее внедрение.

*Список литературы:*

1. *J.W.Miller, W.G.Stinson, W.A.Gregory, H.E.El-Koumi, C.A.Poliafito.* «Phthalocyanine Photodynamic Therapy of Experimental his Neovascularization». *Ophthalmology*, 1991, Vol. 98, No 11, pp.1711-1719.
2. *S.E. Avetisov, M.V. Budzinskaja, T.N. Kiseleva, N.V. Balatskaya, I.V. Gurova, V.B. Loschenov, S.A. Shevchik, S.G. Kuzmin, G.N. Vorozhtsov,* Proc. SPIE, 6632, 663212 (2007).
3. *M.K.Tsilimbaris, I.I.Naoumidi, L.P.Naoumidis, E.Papageorgiou, I.G.Pallikaris.* «Transscleral Ciliary Body Photodynamic Therapy Using Phthalocyanine and Diode Laser: Functional and Morphologic Implications in Albino Rabbits». *Ophthalmic Surgery and Lasers*, 1997, Vol. 28, No 6, pp.483-494.
4. *В.Г.Копеева, Ю.В.Андреев, Г.В.Пономарев, Е.Ф.Странадо.* «Первый опыт лечения неоваскуляризации роговичного трансплантата методом фотохимической деструкции сосудов». *Актуальные проблемы офтальмологии. Сборник научных трудов, Уфа, 1996 г., с.40-43*
5. *Pass H.I.* Photodynamic therapy in oncology: mechanisms and clinical use // *J. nat. Cancer Inst.* - 1993 - Vol. 85. – No. 6. - P. 443-456.
6. *Akira Obana, Yuko Gobto, Kenji Keneda, Susumu Nakajima, Tokubiko Miki.* “PDT to Monkey CNV with ATX-S10(Na): Inappropriateness of Early Laser Irradiation for Selective Occlusion”. *Ophthalmology & Visual Science*, 2001, Vol. 42, No11, pp.2639-2645.
7. *S.S. Model, T.A. Savelieva, K.G. Linkov,* Proc. SPIE, 8699, 86990E (2013).
8. *A.A. Stratonnikov, N.E. Edinac, D.V. Klimov et al.,* Proc. SPIE, 2924, с 49-60 (1996).
9. *A.A. Stratonnikov, N.V. Ermishova, G.A. Meerovich, B.V. Kudashev, E.G. Vakoulovskaya, V.B. Loschenov,* Proc. SPIE, 4613, 162 (2002).

# ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ КООРДИНАТ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ И НАВЕДЕНИЯ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ

МИХЕД А.Д.

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева», г. Красногорск

E-mail: anton11588@yandex.ru

*Получен алгоритм преобразования углов поворота рамок двухосной системы стабилизации с наклонным кардановым подвесом по заданным углам наведения линии визирования, и преобразователь координат, позволяющий реализовать предложенный алгоритм преобразования.*

**Ключевые слова:** стабилизация, наведение, ориентация, карданов подвес, преобразователь координат.

## ВВЕДЕНИЕ

При реализации наведения систем стабилизации линии визирования (ЛВ) возникают задачи, связанные с преобразованиями угловых координат из одной системы координат (СК) в другую. Одной из таких задач является преобразование координат из СК связанной с основанием, на котором устанавливается система стабилизации и наведения (ССиН), в СК связанную с направлением на цель [1].

При решении задачи ориентации ЛВ углы поворота двухосного карданова подвеса не обеспечивают обзор в полной полусфере. Ограничение применения такого подвеса при больших углах наведения связано с тем, что скорость по оси наружной рамки подвеса, а также ускорения по обеим осям при углах наведения внутренней рамки, близких к 90 градусам, стремятся к бесконечности [2]. Таким образом, при вертикальном, расположении наружной рамки подвеса ССиН имеет в верхней полусфере ЛВ “мертвую зону”, представляющую собой конус с центром перпендикулярным основанию. Обеспечить наведение ЛВ по оси высоты на углы более 90 градусов, с высокой точностью, можно введением в карданов подвес ССиН дополнительной рамки, удерживающей наружную рамку в наклонном положении [3].

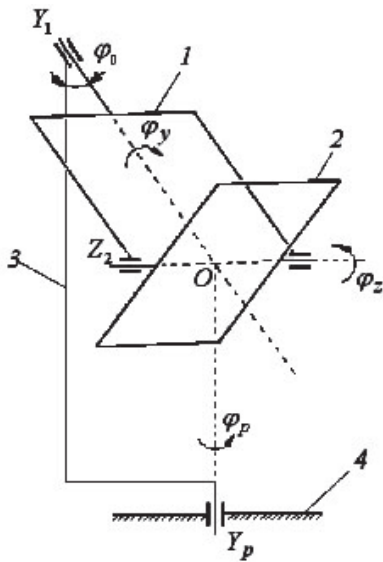
Несмотря на значительное число работ,

посвященных преобразованиям координат ССиН, в них, в основном рассматривались системы стабилизации с наружной рамкой карданова подвеса установленной перпендикулярно основанию и обеспечивающей полный разворот вокруг своей оси вращения. При введении в карданов подвес ССиН дополнительной рамки, требуется преобразовать угловые координаты ССиН с учетом движения последней и наклона наружной рамки.

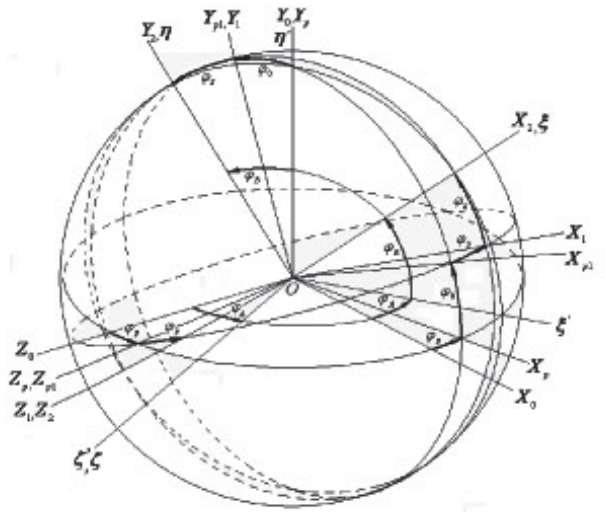
## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 показана схема наклонного карданова подвеса. Здесь внутренняя рамка 2, вращающаяся относительно оси  $OZ_2$  на угол  $\varphi_z$ , расположена в наружной рамке 1 с возможностью вращения последней относительно оси  $OY_1$  на угол  $\varphi_y$ . Наружная рамка 1 наклонена на постоянный угол  $\varphi_0$  и установлена в дополнительной рамке 3, способной поворачиваться относительно основания 4 по оси  $OY_p$  на угол  $\varphi_p$ .

Для определения углового положения элементов карданова подвеса ССиН были введены следующие СК (рис. 2):  $OX_0Y_0Z_0$  – СК, оси которой связаны с основанием; начало  $O$  находится на пересечении осей вращения элементов ССиН;  $OX_pY_pZ_p$  – СК, связанная с дополнительной рамкой;  $OX_1Y_1Z_1$  – СК, оси которой связаны с наружной рамкой 1;



**Рисунок 1.**  
Схема рамок наклонного двухосного карданова подвеса ССнН



**Рисунок 2.**  
Системы координат для определения ориентации ССнН

$OX_2Y_2Z_2$  – СК, оси которой связаны с внутренней рамкой 2 (платформой или зеркалом) и соответственно с ЛВ;  $O\xi\eta\zeta$  – СК, связанная с ЗЛВ и направлением на цель (ось  $O\xi$ ).

Направление на цель определено в системе координат  $OX_0Y_0Z_0$  углом азимутального пеленга  $\varphi_A$  в плоскости  $OX_0Z_0$  и пеленга по высоте  $\varphi_B$  в плоскости  $O\xi'\eta'$ , перпендикулярной плоскости  $OX_0Z_0$ . СК  $OX_2Y_2Z_2$  совпадает с СК  $O\xi\eta\zeta$ .

Векторно-аналитический метод решения задач преобразования координат базируется на преобразовании координат единичного вектора заданного направления из одной СК в другую, которое выполняется с помощью вращающихся трансформаторов (ВТ). Подобные ПК получили достаточно широкое распространение в ССнН.

При использовании векторно-аналитического метода решения задач преобразования координат все математические операции выполняются с помощью ВТ, которые позволяют: 1) находить составляющие вектора на плоскости по заданному его модулю и углу между направлением вектора и одной из координатных осей; 2) преобразовывать составляющие вектора из одной СК в другую; 3) построить вектор по его составляющим в прямоугольной СК.

Таким образом, ПК, в котором реализуется векторно-аналитический метод, представляет собой совокупность ВТ, связь между которыми определяется последовательностью линейных преобразований координат. Подобный преобразователь координат называют электрическим [1].

Обозначим единичный вектор направления на цель  $O\xi$  через  $\lambda$  (рис. 2).

Проекции вектора  $\lambda$  на оси  $OX_{p1}Y_{p1}Z_{p1}$  будем искать через углы  $\varphi_y$  и  $\varphi_z$ , а на оси  $OX_pY_pZ_p$  через углы  $\varphi_g = \varphi_A - \varphi_p$  и  $\varphi_B$ .

Таким образом, проекции вектора  $\lambda$  на оси  $OX_{p1}Y_{p1}Z_{p1}$  и  $OX_pY_pZ_p$  будут:

$$\lambda_{x_{p1}} = \cos\varphi_g \cos\varphi_B, \lambda_{y_{p1}} = \sin\varphi_B, \lambda_{z_{p1}} = \cos\varphi_B \sin\varphi_g \quad (1)$$

$$\lambda_{x_p} = \cos\varphi_y \cos\varphi_z, \lambda_{y_p} = \sin\varphi_z, \lambda_{z_p} = \cos\varphi_z \sin\varphi_y \quad (2)$$

Запишем матричное преобразование вектора  $\lambda$  от осей  $OX_pY_pZ_p$  к осям  $OX_{p1}Y_{p1}Z_{p1}$ :

$$\begin{bmatrix} \lambda_{x_{p1}} \\ \lambda_{y_{p1}} \\ \lambda_{z_{p1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi_0 & \sin\varphi_0 & 0 \\ -\sin\varphi_0 & \cos\varphi_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_{x_p} \\ \lambda_{y_p} \\ \lambda_{z_p} \end{bmatrix} \quad (3)$$

или

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{x_{p1}} &= \lambda_{x_p} \cos\varphi_0 + \lambda_{y_p} \sin\varphi_0, \\ \lambda_{y_{p1}} &= -\lambda_{x_p} \sin\varphi_0 + \lambda_{y_p} \cos\varphi_0, \\ \lambda_{z_{p1}} &= \lambda_{z_p}. \end{aligned} \right\}$$

Находим проекции  $\lambda_{\xi}, \lambda_{y_p}$  на оси  $O\xi', OY_p$  и проекции  $\lambda_{x_p}, \lambda_{z_p}$  на оси  $OX_p, OZ_p$  (рис. 2):

$$\lambda_{\xi} = \cos\varphi_B, \lambda_{y_p} = \sin\varphi_B \quad (5)$$

$$\lambda_{x_p} = \lambda_{\xi} \cos\varphi_g, \lambda_{z_p} = \lambda_{\xi} \sin\varphi_g \quad (6)$$

Преобразования (5) и (6) осуществляются двумя ВТ, которые на принципиальной схеме ПК (рис. 4) обозначены ВТ -  $\varphi_B$  и ВТ -  $\varphi_g$ .

С помощью проекций  $\lambda_{x_p}$  и  $\lambda_{z_p}$ , учитывая выражения (2), определяем угол  $\varphi_y$  и проекцию  $\lambda_{x_l}$  на ось  $OX_l$ :

$$\lambda_{x_{p1}} \sin\varphi_y - \lambda_{z_{p1}} \cos\varphi_y = 0 \quad (7)$$

при этом

$$\lambda_{x_l} = \sqrt{\lambda_{x_{p1}}^2 + \lambda_{z_{p1}}^2} \quad (8)$$

Операции (7) и (8) осуществляются с помощью ВТ, путем построения вектора  $\lambda_{x_l}$  по его составляющим  $\lambda_{x_{p1}}$  и  $\lambda_{z_{p1}}$ .

На основании проекций  $\lambda_{y_{p1}}$  и  $\lambda_{x_l}$ , определяем угол  $\varphi_z$ :

$$\lambda_{y_{p1}} \cos\varphi_z - \lambda_{x_l} \sin\varphi_z = 0 \quad (9)$$

При этом модуль вектора  $\lambda$  будет

$$\sqrt{\lambda_{x_l}^2 + \lambda_{y_{p1}}^2} = |\lambda| = 1 \quad (10)$$

Операции (9) и (10) осуществляются путем построения вектора  $\lambda$  по его составляющим  $\lambda_{y_{p1}}$  и  $\lambda_{x_l}$ .

Алгоритм преобразования координат ССиН показан на рис. 3.

В соответствии с полученным алгоритмом на рис. 4 дана принципиальная схема электрического ПК. Преобразование, переводящее углы  $\varphi_A, \varphi_B$  в углы  $\varphi_y, \varphi_z$ , представлено в виде четырех линейных преобразований на плоскости, каждое из которых осуществляется своим ВТ. Для уравнивания масштабов напряжений, вводимых в один и тот же ВТ, в схеме установлены масштабные вращающиеся трансформаторы (МВТ). ВТ-  $\varphi_y$  и ВТ-  $\varphi_z$  работают в режиме следящей системы. Они являются датчиками углов  $\varphi_y, \varphi_z$  и через соответствующие усилители У управляют исполнительными двигателями ИД-  $\varphi_y$  и ИД-  $\varphi_z$ , которые механически связаны с ВТ-  $\varphi_y$  и ВТ-  $\varphi_z$ . При этом осуществляется построение вектора  $\lambda$  по его составляющим в СК  $OX_{p1} Y_{p1} Z_{p1}$ . Вычислительный блок (ВБ) реализует расчет векторов  $\lambda_{x_{p1}}$  и  $\lambda_{y_{p1}}$  согласно уравнениям (4).

Достоинства электрических ПК состоят в простоте устройства, отсутствии сложных сферических строителей, простоте изготовления и сборки, высокой точности по сравнению с механическими ПК и плавности вырабатываемых данных. Эти и другие обстоятельства способствовали применению подобных ПК в системах стабилизации [4].

ПК представляет собой следящую систему, обладающей устойчивостью и необходимым качеством.

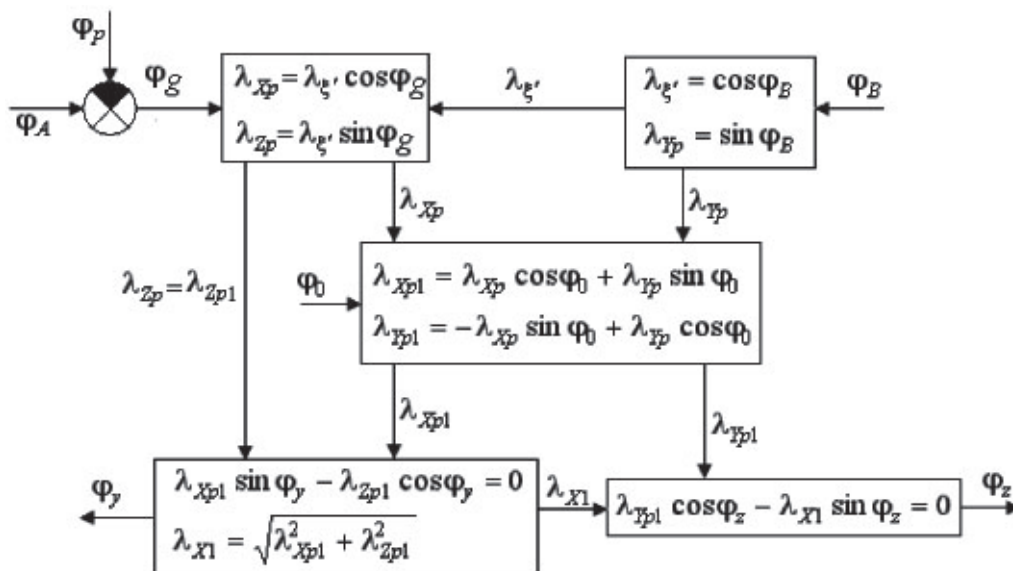
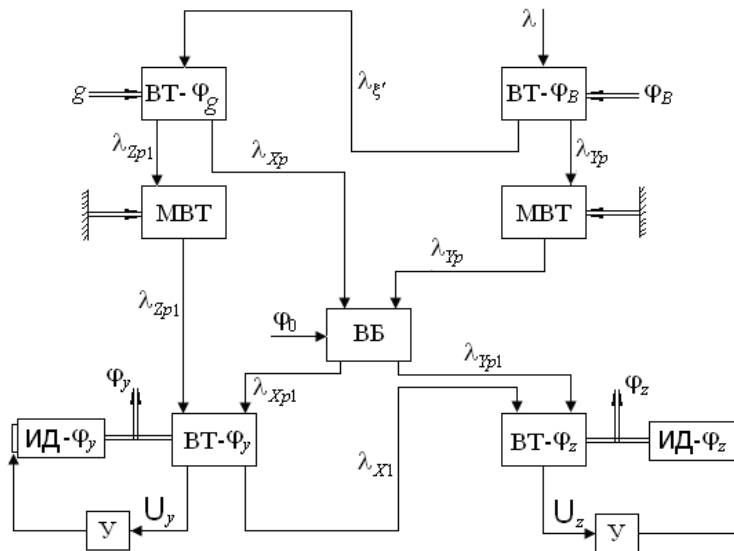


Рисунок 3.  
Алгоритм преобразования координат ССиН





**Рисунок 4.**  
**Принципиальная схема ПК**

Крутизна сигнальных напряжений  $U_y$  и  $U_z$  на входе усилителей следящей системы, на всем диапазоне изменения выходных данных ПК (т.е. углов  $\varphi_y$  и  $\varphi_z$ ) должна быть постоянной. Если это условие не выполняется, то коэффициент усиления будет переменным, что может снизить запас устойчивости системы. При этом иногда возникает необходимость в специальном блоке автоматического регулирования усиления (БАРУ) для уменьшения непостоянства коэффициента усиления системы. Крутизна сигнального напряжения на входе усилителя пропорциональна абсолютному значению частной производной. Для независимо работающей следящей системы ПК необходимо обеспечить следующее условие:

$$\left| \frac{\partial \Delta U}{\partial \alpha} \right| = const \quad (11)$$

где  $\Delta U$  - сигнальное напряжение,  $\alpha$  - угол поворота ротора ВТ.

Применим это условие для исследования расшифровывающей следящей системы в линиях углов  $\varphi_y$  и  $\varphi_z$ .

Расшифровка угла  $\varphi_y$  производится на основании решения уравнения (7).

В этом случае напряжение, которое поступает на вход усилителя расшифровывающей

следящей системы угла  $\varphi_y$ , будет тождественно равно

$$\Delta U \equiv \lambda_{x_{p1}} \sin \varphi_y - \lambda_{z_{p1}} \cos \varphi_y$$

Тогда

$$\left| \frac{\partial \Delta U}{\partial \varphi_y} \right| \equiv \lambda_{x_{p1}} \cos \varphi_y + \lambda_{z_{p1}} \sin \varphi_y$$

Подставляя сюда вместо  $\lambda_{x_{p1}}$  и  $\lambda_{z_{p1}}$  их выражения (2), получим

$$\left| \frac{\partial \Delta U}{\partial \varphi_y} \right| \equiv \cos \varphi_z$$

Расшифровка угла  $\varphi_z$  производится на основании решения уравнения (9). При этом сигнальное напряжение, которое поступает на вход усилителя следящей системы, будет

$$\Delta U \equiv \lambda_{y_{p1}} \cos \varphi_z - \lambda_{x_{11}} \sin \varphi_z$$

Тогда

$$\left| \frac{\partial \Delta U}{\partial \varphi_z} \right| \equiv -\lambda_{y_{p1}} \sin \varphi_z - \lambda_{x_{11}} \cos \varphi_z$$

или учитывая (8),

$$\left| \frac{\partial \Delta U}{\partial \varphi_z} \right| \equiv -\lambda_{y_{p1}} \sin \varphi_z - \sqrt{\lambda_{x_{p1}}^2 + \lambda_{z_{p1}}^2} \cos \varphi_z$$

Подставляя в последнее (2), получим

$$\left| \frac{\partial \Delta U}{\partial \varphi_z} \right| \equiv -1 = const$$

В данном случае условие (11) выполняется, расшифровывающая следящая система угла  $\varphi_z$  будет работать устойчиво и БАРУ не требуется.

### ВЫВОДЫ

Таким образом, предложенный электрический ПК, представляет собой устойчивую следящую систему и позволяет преобразовывать углы поворота рамок двухосной системы стабилизации с наклонным кардановым подвесом по заданным углам наведения линии визирования, постоянному углу наклона наружной рамки и углу поворота дополнительной рамки.

### Список литературы:

1. Ривкин С.С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. – М.: Наука, 1978. – 320 с.
2. Неусытин А.К. Гироскопические приводы. – М.: Машиностроение, 1978. – 191 с.
3. Михед А.Д. Исследование системы стабилизации и наведения с двухосным наклонным кардановым подвесом / А.Д. Михед, В.И. Родионов // Навигация и управление движением. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – С. 46-50.
4. Остромухов Я.Г. Геометрия и кинематика систем гироскопической стабилизации / Я.Г. Остромухов, С.С. Ривкин, М.Е. Темченко // Развитие механики гироскопических и инерциальных систем. – М.: Наука, 1973. – С. 232-252.

# АНАЛИЗ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В СЛУЧАЕ ОПТИЧЕСКОГО СПЕКТРОДЕЛИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ

КАЛЮГИН В.С., СЕНИК Б.Н.

ПАО «Красногорский завод им С.А. Зверева»

E-mail: bogdan\_senik@mail.ru

*Рассмотрены конструктивные решения расчёта светотехнических параметров излучения в случае прохождения через спектроделительный модуль с различными вариантами спектроделительных покрытий.*

**Ключевые слова:** светоделительная система, поляризация, интерференционная плёнка.

## ВВЕДЕНИЕ

Бурное развитие научно-технического прогресса в области оптико-электронного приборостроения различного назначения ставит перед разработчиками и производителями оптико-электронных приборов и комплексов целый ряд специфических задач.

В частности, наряду с постоянной тенденцией сокращения себестоимости и сроков изготовления изделий, с целью обеспечения конкурентоспособности на внутреннем и внешнем рынках сбыта продукции, требуется резкий переход на качественно новый технический уровень, улучшенные оптические и эксплуатационные характеристики, расширение информационных каналов, цифровая обработка оптических сигналов в различных точках рабочего спектрального диапазона и мгновенная передача информации в любую точку планеты. Решение вышеуказанных задач во многом зависит от успешного решения конструкторских и технологических задач, связанных с изготовлением высокоточных оптических спектроделительных модулей с предельными оптическими и эксплуатационными характеристиками [1].

Для обеспечения вышеуказанных характеристик, как правило, при нанесении спектроделительных покрытий наносится большое количество напыляемых слоёв, что, в свою очередь, приводит к увеличению общей толщины покрытия и уменьшению его

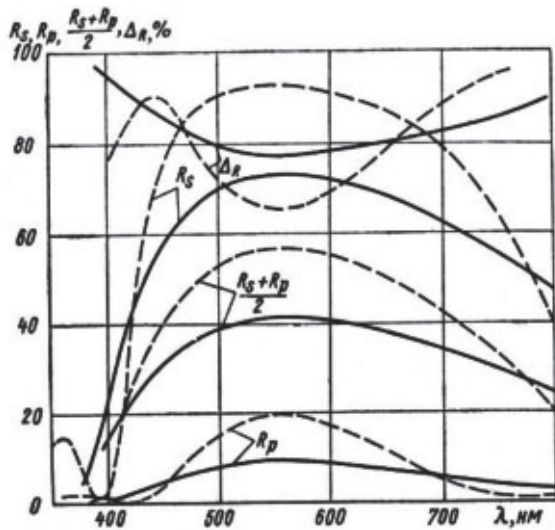
прочности, а также увеличивает вероятность разрушения клеевого соединения оптического модуля.

В процессе теоретического и экспериментального исследований спектроделительного модуля с предельно высокими светотехническими параметрами, разработчики сталкиваются с необходимостью решения двух важнейших задач: исключением возможности появления дефектов «расклейка» на границе склеивания отдельных компонентов и спектроделительного покрытия и необходимостью минимизации влияния эффекта поляризации на светотехнические характеристики изделий [2].

В качестве светоделительных систем, для разделения падающего света на отражённый и проходящий, используют светоделительные кубики, склеенные из двух прямоугольных равнобедренных призм, между гипотенузными гранями которых вклеена прозрачная интерференционная или металлическая плёнка.

Вклеенная в кубик интерференционная плёнка с двух сторон ограничена средой, показатель преломления которой выше, чем у воздуха. Вследствие этого изменяется соотношение углов, условия поляризации, значения коэффициентов отражения и их спектральная зависимость.

Стеклянные кубики, как правило, изготавливаются из обычных оптических стёкол,



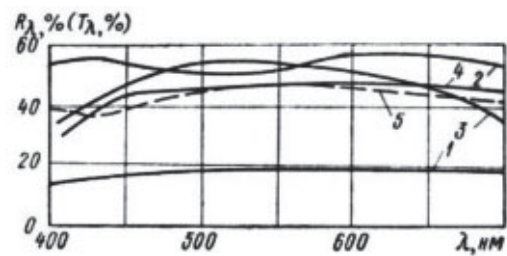
**Рисунок 1.**  
Спектральное отражение от трёхслойных (—) и пятислойных (-----) плёнок, вклеенных в стекло при угле падения  $45^\circ$

показатель преломления которых близок к выбранному  $1,52$ . Однослойная плёнка с показателем преломления  $2,20 + 2,30$ , вклеенная в стекло, отражает около  $15\%$  падающего света, осуществляя деление пучка с примерным отношением интенсивностей  $R:T$  равным  $1:6$ .

Двухслойная плёнка, вклеенная в стеклянный кубик, как показывает кривая 1 рис. 2, отражает около  $20\%$  падающего света и соответственно пропускает  $80\%$ . Такой кубик осуществляет разделение падающего пучка света с отношением интенсивностей  $R:T = 1:4$ . Поскольку двухслойная пленка, характеризуемая кривой 1 (рис. 2), вклеена в стекло, то оптические толщины слоёв должны быть равны  $\wedge$  в направлении распространения луча ( $\phi = 45^\circ$ ), что соответствует значениям  $(nh)220 = 160 \text{ нм}$  и  $(nk)145 = 208 \text{ нм}$ .

Трёхслойная плёнка из слоёв с показателями преломления  $2,20$  и  $1,45$ , вклеенная в стеклянный кубик, отражает  $35 - 40\%$  (рис. 1) в широкой части видимой области спектра. Это даёт возможность разделить световой поток с отношением интенсивностей  $R:T$  равным  $2:3$ .

Разделение падающего света на два пучка примерно равной интенсивности ( $1:1$ ) можно осуществить с помощью кубика с заклеенной пятислойной плёнкой (рис. 1).



**Рисунок 2.**  
Характеристики светodelительных кубиков:  
1 - двухслойная плёнка  $R:T$   
« - (стекло  $n = 1,52$ );  
2 - ахроматизированное покрытие (кривая  $R$ );  
3 - пятислойная плёнка  $R:T$   
« $1:1$  (стекло  $n = 1,52$ );  
4 - то же (стекло  $n = -75$ );  
5 - ахроматизированное покрытие (эксперимент, кривая  $T_x$ )

Дальнейшее увеличение числа слоёв плёнки, вклеенной в призму, при падении света под углом  $45^\circ$  не даёт существенного увеличения коэффициента отражения.

Степень поляризации света, отражённого под углом от поверхности с интерференционной плёнкой, при соблюдении определённых требований и вклейке в стеклянную призму может быть значительно увеличена.

Формулы Френеля показывают, что при возрастании угла падения света на плёнку или показателя преломления окружающей среды амплитуда параллельной составляющей  $R_p$  уменьшается и при угле полной поляризации становится равной нулю. В результате в системе с интерференционной плёнкой составляющая светового вектора, параллельная плоскости падения, пройдёт через систему без потерь на отражение. Эти условия практически осуществляются при вклейке интерференционной плёнки в стеклянную призму (рис. 1).

По мере возрастания угла падения  $R_s$  быстро растёт,  $R_p$  убывает. В пределах углов падения  $50 - 60^\circ$  значение  $R_p$  не превышает  $0,1 - 0,3\%$ . Вследствие этого степень поляризации  $A_R$  в этих условиях высока и приближается в области  $400 - 750 \text{ нм}$  к  $99\%$ .

Для угла падения света на плёнку, равного  $45^\circ$ , значение  $R_s$  составляет  $32 - 33\%$  при  $R_p$   $3 - 4\%$ . Такая однослойная плёнка, вклеенная в стекло, отражает около  $16\%$  прямолинейно поляризованного света при степени поляризации  $75 - 80\%$ .



При угле падения 60% интенсивность  $R$  составляет около 47%. Иначе говоря, до 25% падающего светового потока отражается в виде прямолинейно поляризованного. Спектральный состав отражённого света характеризуется кривой для  $R_s$  при 60%. Однослойная плёнка с высоким показателем преломления, вклеенная в стеклянную призму, обеспечивает получение степени поляризации  $A_R$  и интенсивности отражённого поляризованного света  $R_s$ , практически не зависящих от длины волны во всём интервале выбранной области спектра. Кривыми на рис. 1 показаны интенсивности спектрального отражения  $R$  и  $R_p$  для трёх- и пятислойных плёнок из тех же чередующихся слоёв с показателями преломления 2,20 и 1,45. Угол падения света на систему слоёв равен 45°. Оптическая толщина слоёв – 150 нм при падении света по нормали.

Как и на границе с воздухом, у многослойной системы, вклеенной в стеклянную призму, по мере возрастания угла падения  $R_s$  быстро растёт,  $R_p$  – уменьшается, приближаясь к нулю при угле Брюстера, определяемом соотношениями показателей преломления стекла призмы и чередующихся слоёв (табл. 1). При увеличении угла падения до 50° вклеенная в стеклянную призму пятислойная плёнка отражает уже 85 – 90% (40 – 45% общего потока) прямолинейно поляризованного света при степени поляризации, возрастающей до 90%. Вместе с тем, степень поляризации в

**Таблица 1.**  
**Углы Брюстера  $\phi_B$  для систем из чередующихся слоёв с показателями преломления  $n_2$  и  $n_3$ , вклеенных в призмы с показателями преломления  $n_1$**

$n_1$	П2 = 2,3; П3 = 1,4	П2 = 2,2; $n_3 = 1,45$	$n_2 = 2,0$ ; $n_3 = 1,45$
1,46	55°05'	56°05'	53°40'
1,52	51° 55'	52°45'	50°30'
1,57	49°45'	50°30'	48°25'
1,62	47°35'	48°20'	46°30'
1,73	43°50'	44°20'	42°50'
1,75	43° 10'	43°50'	42° 10'

отражённом свете приобретает всё более избирательный характер.

По мере увеличения числа слоёв вклеенного покрытия, как и у многослойного покрытия на границе с воздухом, все описанные выше явления усиливаются.  $R_s$  быстро растёт, охватывая широкий интервал длин волн и приближаясь к 100% по мере возрастания числа слоёв до 11 и более.

$R$  уменьшается, приближаясь к нулевому значению при углах падения света на плёнку, определяемых соотношением оптических толщин и показателей преломления слоёв и призмы (табл. 1, табл. 2, рис. 3).

При выбранном сочетании показателей преломления 2,20 и 1,45 (табл. 1) угол Брю-

**Таблица 2.**  
**Оптические толщины слоёв  $nh$  (в нм) с показателями преломления П и ПЗ для получения поляризованного света в области  $A_m \text{ max}$**

$X_{\text{max}}$ нм	$n_2 = 2,3$ ; ПЗ = 1,4		$n_2 = 2,2$ ; П = 1,45		$n_2 = 2,0$ ; П = 1,45	
	$n_2 h_2$	$n_3 h_3$	$n_2 h_2$	$n_3 h_3$	$n_2 h_2$	$n_3 h_3$
300	88	144	90	136	93	129
400	117	192	120	182	123	172
550	161	265	165	250	169	236
600	176	288	180	272	185	258
700	205	336	210	320	216	300
1000	293	480	300	455	308	480

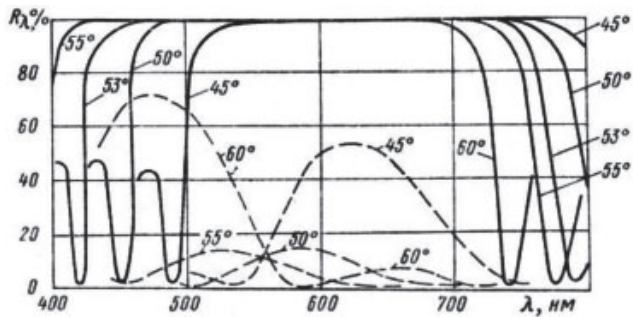


Рисунок 3.

**Спектральное отражение  $R_s$  и  $R_p$  для 11-слойной плёнки, вклеенной в стекло, вблизи угла Брюстера, равного  $52^\circ 45'$**

стера составляет около  $52^\circ 45'$ . Значения  $R_s$  и  $R_p$  на графиках приведены для углов, близких к углу Брюстера ( $45 - 55^\circ$ ). При этом оптические толщины слоёв составляют значения, равные  $\wedge$ , в направлении распространения света в плёнках (рис. 3). Здесь  $n_2 h_2 = 165$  нм;  $n_3 h_3 = 250$  нм для  $X = 550$  нм.

Спектральная кривая  $R_s$  характеризуется широким максимумом отражения, близким к 100%, который закономерно смещается в направлении коротковолновой области по мере возрастания угла падения от  $45$  до  $55^\circ$ .

Максимум отражения  $R_p$  быстро приближается к нулю и также смещается в направлении коротковолновой области. При угле падения порядка  $52^\circ 50'$  значение  $R_p$  не выходит за пределы 0,2% при  $R_s$ , близком к 100%.

Такая система даёт отражённый и проходящий пучки света, поляризованные во взаимно перпендикулярных направлениях, характеризующиеся высокой степенью поляризации.

Однако в результате сложной зависимости  $R$  от угла падения света степень поляризации

отражённого света  $A_R$  также претерпевает заметные изменения при изменении угла падения. В то же время для проходящего света эта зависимость значительно слабее. Проходящий прямолинейно поляризованный свет сохраняет высокую степень поляризации  $A_T$  в более широком диапазоне углов падения, чем отраженный [3].

Вместе с тем, существует целый ряд задач, связанных с разделением оптических сигналов в произвольном соотношении по энергетическому признаку. В данном случае использование многослойных диэлектрических покрытий, учитывая поляризационные эффекты, неизбежно приводят к резкому снижению энергетических параметров проходящего и отражённого лучей.

Нанесение однослойных металлических покрытий, прозрачных в заданных спектральных диапазонах, с учётом применения некоторых технологических приёмов, с успехом позволяет решить эту задачу.

*Список литературы:*

1. Потелов В.В. Оптические призмные спектроделительные модули для изделий с высокой пространственной ориентацией / В.В. Потелов // Оптический журнал: сдана в печать в феврале 2008.
2. Гайнутдинов И.С. Интерференционные покрытия для оптического приборостроения / И.С. Гайнутдинов, Е.А. Несмелов, И.Б. Хайбуллин - Казань: «ФЭН», 2002. - С.435-445.
3. Крылова Т.Н. Интерференционные покрытия / Т.Н. Крылова - Л., «Машиностроение», 1973. - С.113-128.

# **ИНФОРМАЦИЯ**

## **ОБЪЯВЛЕНИЕ**

**Общественная научно-техническая организация  
академия «Контенант»**

**заключила с 1 января 2017 года**

**Лицензионный договор № 727-11/2014  
с Научной Электронной Библиотекой,  
где размещена База данных РИНЦ**

**– интегрированный научно-информационный ресурс.**

**БАЗА ДАННЫХ РИНЦ НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ  
БИБЛИОТЕКИ ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ НАУЧНЫЙ  
ИНФОРМАЦИОННЫЙ РЕСУРС В СЕТИ ИНТЕРНЕТ,  
ВКЛЮЧАЮЩИЙ НАУЧНЫЙ ИНДЕКС НАУЧНОГО  
ЦИТИРОВАНИЯ.**

**ВСЕ АВТОРЫ, ЖЕЛАЮЩИЕ РАЗМЕСТИТЬ  
СВОЮ СТАТЬЮ С РЕГИСТРАЦИЕЙ В РИНЦ,  
ДОЛЖНЫ ВЫПОЛНИТЬ ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ,  
ИЗЛОЖЕННЫЕ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ  
ЖУРНАЛЕ «КОНТЕНАНТ»  
И НА САЙТЕ АКАДЕМИИ [WWW.CONTENTENANT.RU](http://WWW.CONTENTENANT.RU)  
В РАЗДЕЛЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «КОНТЕНАНТ»**

**Редакция**

# ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ, РАЗМЕЩАЮЩИХ СТАТЬИ В НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКЕ (РИНЦ)

- **Правила подачи материалов для публикации**
- **Необходимые документы**
- **Правила оформления статей**
- **Общие требования к оформлению статей**
- **Правила оформления списка литературы**

## ПРАВИЛА ПОДАЧИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ

### Необходимые сведения:

- название статьи на русском языке и на английском языке;
- аннотация статьи на русском языке (не менее 600 знаков без учета пробелов) и ее перевод на английский язык;
- номер УДК (см., например, <http://teacode.com/online/udc>);
- ключевые слова на русском языке и английском языках (3–5 словосочетаний);
- научная специальность, к которой относится статья (выбирается из списка);
- название организации, от имени которой представляется статья;
- адрес электронной почты для связи с авторским коллективом;
- список авторов с указанием для каждого автора: фамилии, имени, отчества на русском языке, фамилии и инициалов на английском языке, места работы, адреса электронной почты;
- список литературы на русском и английском языках в порядке ссылок.

К этим сведениям необходимо добавить файлы статьи в формате Microsoft Word,

На авторском заявлении подписи авторов должны быть заверены в отделе кадров соответствующего учреждения.

Работа со статьей начинается сразу после электронной регистрации заявки.

Редакция строит взаимодействие с авторами путем переписки по электронной почте (соответствующий адрес для связи авторы указывают при регистрации). Редакция ре-

комендует (особенно для иногородних авторов) давать для связи реальный, заведомо действующий и часто просматриваемый электронный адрес, поскольку задержки с ответами авторов приводят к задержке с публикацией.

## НЕОБХОДИМЫЕ ДОКУМЕНТЫ

Экспертное заключение о возможности опубликования представленных материалов в открытой печати (в бумажном виде с печатью организации).

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

1. Требования к содержанию статьи
2. Общие правила оформления
3. Оформление статей в формате Microsoft Word
4. Оформление списка литературы

### Требования к содержанию статьи

#### 1. Общие требования

- статья должна содержать сжатое и четкое изложение современного состояния вопроса, цели работы, методики исследования, результатов и обсуждения полученных данных;
- статья может представлять результаты собственных экспериментальных или теоретических исследований, обобщения производственного опыта, а также аналитический обзор информации в рассматриваемой области;
- все заимствования в тексте (в том числе из собственных публикаций) должны быть выделены в тексте и снабжены ссылками на первоисточник;
- название статьи должно полностью отражать ее содержание; в название не должны входить сокращения (кроме, быть может, общепринятых, например, ЭВМ).

#### 2. Структура

Статья должна включать в себя:

- введение;
- основная часть статьи (один или несколько разделов, содержащих используемые методы исследования, основные результаты исследования и их обсуждение);



- заключение;
- список литературы;

### *2.1. Введение*

- введение — обязательный элемент статьи, публикуемой в журнале.

- введение призвано ответить на следующие вопросы: актуальность рассматриваемой проблемы; состояние этой проблемы на момент публикации статьи, цель работы, полученные в работе результаты и их новизна. Введение должно дать достаточно полное представление о выполненном исследовании и полученных результатах, понятное широкому кругу специалистов. Следует исходить из того, что большинство читателей прочтут именно введение и, быть может, заключение;

- актуальность проблемы и ее состояние подтверждается, как правило, обзором имеющихся в данной области результатов с указанием литературных источников, включая зарубежные;

- цель работы и полученные результаты во введении формулируются в самой общей форме, на неформальном уровне с использованием минимума терминов, необходимого для понимания сути задачи, рассматриваемой в работе, широким кругом специалистов;

- в конце введения рекомендуется дать краткое описание содержания работы по разделам.

### *2.2. Основная часть*

- основная часть статьи должна начинаться со строгой и точной постановки задачи, продолжаться описанием проведенного исследования, его результатов и заканчиваться обсуждением результатов исследования и практическими рекомендациями;

- в основной части статьи авторы должны продемонстрировать умение пользоваться имеющимися средствами для проведения исследования или создавать свои, новые средства, а также способность разобраться в полученных результатах, понять, что нового и полезного дало исследование;

- в работе, посвященной экспериментальным исследованиям, авторы обязаны описать методику экспериментов, оценить точность и воспроизводимость полученных результатов;

- не следует избегать представления в ста-

тье и обсуждения отрицательных результатов. Зачастую отрицательные результаты даже более поучительны, чем положительные.

### *2.3. Заключение*

- заключение должно содержать краткую формулировку результатов, полученных в ходе работы, их осмысление, выводы, обобщения и рекомендации, вытекающие из работы, обсуждение практической значимости результатов работы, а также основных направлений дальнейших исследований;

### *2.4. Список литературы*

- список литературы должен включать перечень всех использованных в работе литературных источников (книг, журналов, статей и т.д.);

- элементы списка литературы даются в том порядке, в котором в тексте статьи приводятся ссылки на эти источники;

- список литературы должен адекватно отражать современное состояние вопроса, он должен включать современные публикации как в отечественных, так и в зарубежных журналах; количество ссылок на работы более чем 10-летней давности, а также на старые учебники и монографии должно быть незначительным; также не должны преобладать ссылки на работы авторов.

## **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ**

### *1. Общие требования*

#### *1.1. Формат*

- используемый размер бумаги А4;
- все поля (верхнее, нижнее, левое, правое) должны быть 20 мм;
- текст набирается через полтора интервала с использованием шрифта размером 12 пт;
- абзацный отступ должен составлять 6–8 мм.

#### *1.2. Заголовки разделов и подразделов*

- заголовки разделов и подразделов набираются по центру кеглем 12 пт с отступом сверху 12 пт и снизу 9 пт; точка в конце заголовка не ставится; предложения внутри заголовка разделяются обычным образом (точкой);
- разделы должны иметь порядковые номера, обозначаемые арабскими цифрами; введение и заключение могут не нумероваться;

– подразделы нумеруются в пределах раздела, номер состоит из номера раздела и порядкового номера подраздела, разделенных точкой; использование подразделов следующего уровня не рекомендуется; допускаются дополнительное деление подразделов на пункты, их заголовки набираются в подбор (включаемые в строку текста), они выделяются полужирным шрифтом, от текста отделяются точкой и не нумеруются.

### *1.3. Литературный стиль*

– ответственность за литературный стиль статьи полностью лежит на ее авторах, редакция журнала не проводит литературное редактирование представляемых статей;

– статья должна быть свободна от орфографических, пунктуационных и стилистических ошибок.

– авторы должны употреблять общепринятые в данной отрасли знаний термины и понятия;

### *1.4. Сокращения*

– допускаются только общепринятые сокращения слов, терминов и обозначений;

– дополнительно допускается использование двух-трех сокращений или аббревиатур, при первом использовании сокращения указывается полностью соответствующий термин, а за ним в скобках используемое в статье сокращение этого термина, например: электромагнитное излучение (ЭМИ);

## **2. Структурные элементы**

### *2.1. Иллюстрации*

Различают следующие виды иллюстраций: чертежи, графики, схемы, диаграммы, фотографии. Как правило, иллюстрации готовят в виде самостоятельного файла в одном из распространенных графических форматов. К иллюстрациям предъявляются следующие требования:

– надписи на иллюстрациях выполняются кеглем 10 пт;

– при подготовке иллюстраций следует ориентироваться на требования стандартов ЕСКД и СПДС;

Иллюстрации в текст вставляются с соблюдением следующих требований:

– каждая иллюстрация в тексте размещает-

ся после первой ссылки на нее;

– ссылка на каждую иллюстрацию в тексте обязательна;

– каждая иллюстрация снабжается подписью, которая также центрируется;

– подпись к иллюстрации начинается со слова «Рис.», затем идет номер арабскими цифрами (нумерация в статье сквозная одноуровневая), точка и затем текст подписи. Заголовок подписи (все, кроме текста) выделяется полужирным шрифтом. В конце подписи точка не ставится. Текст подписи может отсутствовать. В этом случае он должен отсутствовать во всех иллюстрациях статьи.

– при ссылке на рисунок указывают сокращение «рис.» с последующим номером: «На рис. 1 показано ...».

### *2.2. Таблицы*

Таблицы — важный инструмент представления результатов научных исследований. От оформления таблиц зависит степень восприятия заложенной в них информации. Различают следующие элементы таблицы:

– заголовок (заглавие, наименование) таблицы — текст, предшествующий таблице и указывающий на ее содержание;

– боковик — первая колонка, содержащая названия строк (граф);

– головка — первая строка (или несколько строк) с названиями колонок (граф);

– ячейки — отдельные клетки таблицы;

– прографка — линии, разделяющие ячейки или группы ячеек таблицы.

Таблицы должны быть оформлены в соответствии со следующими требованиями:

– таблицы должны размещаться на отдельной строке по центру;

– ширина таблицы, как правило, должна совпадать с шириной абзацев окружающего текста или быть чуть меньше этой ширины;

– допускается размещение таблицы на отдельной странице с поворотом, тогда ширина таблицы должна быть равна высоте полосы набора;

– таблица отбивается от окружающего текста пустой строкой (12 пт);

– размещение таблиц в оборку (с обтеканием текстом) не допускается;

– заголовок (наименование) таблицы начинается со слова «Таблица» с последующим номером, далее точка, за которой следует текст. Все, кроме текста выделяется полужирным шрифтом. Заголовок оформляется кеглем 10 пт. Заголовок размещается над таблицей и отбивается от таблицы полустрокой (6 пт);

– таблицы имеют сквозную нумерацию;  
– текст в таблице набирается кеглем 10 пт;  
– заголовки граф и строк таблицы следует писать с прописной буквы, а подзаголовки граф — со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение;

– заголовки и подзаголовки граф указывают в единственном числе; в конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставят. Использование кавычек для повторяющихся элементов не допускается;

– при отсутствии данных в ячейках таблицы ставится прочерк (короткое тире, не дефис!);

– текст в боковике таблицы в прижимают влево, в остальных графах, как правило, центрируют. Числовые данные в каждой графе выравнивают по десятичной запятой или (для целых чисел) по правому краю. Количество разрядов в одной графе рекомендуется выдерживать одинаковым;

– на каждую таблицу в тексте статьи должна быть ссылка. Таблица располагается после первой ссылки на нее;

### 2.3. Формулы

Формулы могут быть двух видов: текстовые (расположены в тексте какого-либо абзаца) и выключные (выносятся в отдельную строку). Выключные формулы могут быть однострочными и многострочными, нумерованными и ненумерованными. На формулы распространяются следующие требования:

– формулы набираются основным кеглем текста, т.е. кеглем 12 пт;

– в формулах следует выдерживать соответствующие пробелы между отдельными элементами. В связи с этим не рекомендуется в текстовом редакторе Word набирать фор-

мулы как обычный текст; следует использовать формульные редакторы (например, Word Equation. MathType);

– в формулах следует выдерживать правильное начертание отдельных символов; имена переменных набираются курсивом, имена математических функций — прямым светлым шрифтом, индексы при переменных, имеющие пояснительный смысл, набираются прямым светлым шрифтом (например). Допускается использование дополнительных способов выделения символов (например, полужирным шрифтом векторных переменных);

– следует избегать разрыва текста на формулах, при необходимости такой разрыв делается на знаках отношений и операций, причем знак отношения или операции повторяется на следующей строке;

– выключные формулы могут нумероваться. Нумерация сквозная одноуровневая, номер заключается в круглые скобки, располагается с правой стороны и прижимается к правому краю полосы набора;

– ссылка на формулу оформляется в виде номера, заключенного в скобки, например: «равенство (4)»;

– нумеровать следует только те формулы, на которые в тексте есть ссылки;

– если формула занимает несколько строк, то номер ставится на уровне последней строки формулы. Если нумеруются несколько подряд идущих выключных формул, то номер по высоте располагается посередине.

### 2.4. Приложения

– материал, дополняющий текст статьи, допускается помещать в приложениях;

– приложениями могут быть, например, графический материал, таблицы большого формата, расчеты, описания алгоритмов и программ для ЭВМ;

– в тексте статьи на каждое приложение должна быть дана ссылка; приложения располагают в порядке ссылок на них в тексте статьи;

– каждое приложение начинается с заголовка, в котором на первой строке указывается «Приложение» с номером, а на последующих строках дается текст этого заголовка;

– Приложения нумеруются заглавными буквами русского алфавита, начиная с А, за исключением букв Ё, З, Й, О, Ч, Ъ, Ы, Ь. Номера подразделов каждого приложения нумеруются с использованием буквенного обозначения номера приложения, например А.3.

### 2.5. Единицы физических величин

– в статье следует применять стандартные единицы физических величин, их наименования и обозначения в соответствии с ГОСТ;

– рекомендуется применение Международной системы единиц СИ, а также десятичных кратных и дольных единиц СИ. Допускается применение наравне с единицами СИ некоторых единиц, не входящих в СИ;

– установлены два вида буквенных обозначений единиц физических величин: международное (с использованием букв латинского или греческого алфавита) и русское (с использованием букв русского алфавита);

– не допускается в одной статье одновременное использование международного и русского вариантов обозначения единиц;

– обозначение единицы физической величины размещается вслед за числом или символьным обозначением физической величины через пробел. Разрыв строки между числом и обозначением единицы не допускается. Пробел не ставится, когда единица обозначается специальным знаком в верхнем индексе. Например: 100 kW; 100 кВт; 80 %; 20°C; (1/60) s<sup>-1</sup>;

– при указании предельных отклонений физической величины числовые значения с предельными отклонениями заключаются в скобки, а обозначения единиц помещают за скобками, например (100,0 ± 0,1) кг;

– не допускается использование единиц физических величин в формулах. Следует использовать буквенные обозначения физических величин, а единицы указать в пояснении к формуле.

– буквенные обозначения единиц, входящих в произведение, отделяются точками на средней линии как знаками умножения. Не допускается использовать для этой цели символ «×». Допускается буквенные обозначения единиц, входящих в произведение,

отделять пробелами, если это не вызывает недоразумения. Например, допустимы обозначения 20 Н м; 0,1 А м<sup>2</sup> и недопустимы 20 Нм; 0,1 Ам<sup>2</sup>;

– в буквенных обозначениях отношений единиц в качестве знака деления допускается использовать только одну косую или горизонтальную черту. Если для единиц, входящих в отношение, система единиц СИ допускает использование отрицательных степеней, то косую или горизонтальную черту можно не ставить.

– для обозначения количества информации используются следующие единицы: международные обозначения — bit, В (byte), КВ (Kbyte), МВ (Mbyte), GB (Gbyte) или русские — бит; Б (байт); КБ (Кбайт); МБ (Мбайт); ГБ (Гбайт).

## ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

### 1. Нормативные документы

– ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание;

– ГОСТ 7.0.5-2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления;

– ГОСТ 7.82-2001. Библиографическая запись. Библиографическое описание электронных ресурсов;

– Регламент включения научных журналов в Российский индекс научного цитирования. М., 2008.

### 2. Общие требования

– авторы несут полную ответственность за содержание списка литературы, в том числе, за все имена, названия, выходные данные в списке литературы;

– цитирование двух или более источников под одним номером, а также одного и того же источника под разными номерами не допускается;

– в каждом литературном источнике указываются фамилии и инициалы всех авторов независимо от их количества;

– ненаучные издания (газетная периодика, интернет-источники с изменчивым контентом, блоги, форумы и т.п.) рекомендуется описывать во внутритекстовых ссылках (в круглых скобках) и не включать их в список литературы;



– список литературы представляется на русском и на английском языках.

### *2.1. Библиографическое описание на русском языке*

– ссылки на книги должны содержать следующую обязательную информацию: фамилия и инициалы авторов, название книги, город, издательство, год, количество страниц;

– ссылки на статьи в журналах должны содержать следующую обязательную информацию: фамилии и инициалы всех авторов, название статьи, название журнала, год, том (если указан), номер (выпуск), страницы (первая и последняя, разделенные коротким тире);

– ссылки на сборники (конференции, симпозиумы) должны содержать следующую обязательную информацию: фамилии и инициалы всех авторов, название сборника (конференции, симпозиума), город (место проведения), год, том (если указан), номер (если указан), количество страниц;

– ссылки на статьи в сборниках (материалах конференций, симпозиумов) должны содержать следующую обязательную информацию: фамилии и инициалы всех авторов, название статьи, название сборника (конференции, симпозиума), город (место проведения), год, том (если указан), номер (если указан), страницы (первая и последняя, разделенные коротким тире);

– в списке авторов фамилия отделяется от инициалов одним пробелом, в инициалах пробелы не ставятся, авторы в списке разделяются запятыми;

– в список авторов включаются все авторы литературного источника независимо от их количества;

– для сокращения библиографического

описания разделительные дефисы между элементами описания опускаются;

– ссылки на электронные ресурсы удаленного доступа должны содержать следующую обязательную информацию: название ресурса, режим доступа, дата обращения;

– если литературный источник имеет идентификатор DOI, он в обязательном порядке указывается в конце литературного описания, а данные электронного ресурса (режим доступа и дата обращения) опускаются.

### *2.2. Библиографическое описание на английском языке*

– библиографическое описание на английском языке дается с использованием только латинского алфавита, для европейских языков допускаются диакритические знаки;

– фамилии и инициалы авторов русскоязычных литературных источников даются в латинской транскрипции;

– фамилии и инициалы авторов иностранных литературных источников приводятся только в оригинальном написании или в общепринятой латинской транскрипции;

– название русскоязычного литературного источника дается в транслитерации с последующим переводом на английский, заключенным в квадратные скобки;

– при наличии у русскоязычного литературного источника перевода на английский этот перевод указывается в конце описания в скобках в виде (English translation: ...);

– при использовании переведенных на русский язык литературных источников указывается оригинальный источник, а в конце библиографического описания в скобках указывается переводной вариант с кодированием русского текста транслитерацией.

## ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИЯМ В ЖУРНАЛЕ «КОНТЕНАНТ»

На электронный адрес редакции «Контенант» E-mail: [book@contenant.ru](mailto:book@contenant.ru) должны быть направлены: авторский оригинал статьи (на русском языке) с названием статьи, краткая аннотация, ключевые слова, сведения об авторе (авторах), с указанием названия предприятия, организации, электронный адрес автора (авторов).

Объем статьи не должен превышать двадцать страниц, в программе Word: размер шрифта 14, гарнитура - Times New Roman, межстрочный интервал 1,5, поля - 2,5 см со всех сторон.

Для выделения текста используется *курсив* и **жирный шрифт**.

**Краткая аннотация** статьи объемом 5-10 строк раскрывает поставленную задачу, основные результаты и выводы.

**Ключевые слова** приводятся в количестве от 3 до 5.

Публикуемые сведения об авторе представляются на каждого автора научной статьи:

1. Фамилия, имя, отчество (полностью).
2. Ученая степень, ученое звание.
3. Место работы, должность.
4. E-mail, телефоны (желательно «мобильный»).
5. Авторы, не члены академии «Контенант», для получения авторских экземпляров журнала по почте должны указать адреса с почтовым индексом, на которые желают получить журнал.

Пункты 4, 5 не подлежат публикации.

**Иллюстрации** (фотографии, рисунки, схемы, графики, диаграммы, карты) необходимо представлять отдельным файлом в формате TIF или JPG с разрешением не менее 300 DPI. В тексте должны присутствовать ссылки на иллюстрации. Иллюстрации нумеруются и сопровождаются подписями.

**Таблицы** набираются тем же шрифтом, что и основной текст, но меньшего размера (кегель 12, допускается снижение кегля до 9 пункта).

На каждую таблицу в тексте делается ссылка.

Слово «таблица» в тексте печатается сокращенно («табл.»), а над таблицей полностью. Таблицы сопровождаются заголовками. Название граф таблицы печатается с прописной буквы, а подчиненные со строчной. Если таблица размещена вдоль страницы, её следует разместить заголовком к левому краю. Если цифровые данные в некоторых графах таблицы не приводятся, то в графе ставится прочерк. Если таблица имеет продолжение, то её название не повторяется, а над таблицей следует писать «Продолжение таблицы» и её номер.

В тексте статьи и подрисуночных подписях не допускаются сокращения слов (кроме общепринятых, ГОСТ Т.12-77 ...).

**Формулы** должны быть набраны в редакторе формул программы Word. Перенос формул допускается на знаках «плюс» и «минус», реже на знаках «умножение». Эти знаки повторяются в начале и в конце переноса. Формулы следует нумеровать (нумерация сквозная по всей статье арабскими цифрами). Номер формулы заключать в круглые скобки у правого края страницы.

Отсканированные версии иллюстраций, таблиц и формул не допускаются.

Список литературы оформляется согласно ГОСТ Р 7.0.5-2008.

Использованная автором литература приводится после статьи в порядке упоминания. Ссылки на Internet-ресурс приводятся в общем списке литературы по автору или заглавию публикации с обязательным указанием адреса сайта, где эта публикация размещена и датой её размещения или датой последней проверки наличия ресурса.

**В тексте ссылки нумеруются** в квадратных скобках. В статье рекомендуется использовать не более 15 источников.

Редакция оставляет за собой право отказать в публикации при несоответствии статьи требованиям содержания и направленности журнала с письменным извещением автора, подписанным главным редактором.

## **РАЗДЕЛЫ ЖУРНАЛА «КОНТЕНАНТ»**

**- НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ОПТИКЕ**

**- РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**- ОПТИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ**

**- ОПТИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ**

**- ИНФОРМАЦИЯ**

---

**Руководителям предприятий и организаций,  
являющихся членами Научно-технической академии «Контенант»**

*ПРЕДЛАГАЕТСЯ РАЗМЕЩАТЬ В НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОМ ЖУРНАЛЕ «КОНТЕНАНТ»  
ЦВЕТНЫЕ РЕКЛАМНЫЕ ВСТАВКИ СВОИХ ПРЕДПРИЯТИЙ И ОРГАНИЗАЦИЙ БЕЗ ОПЛАТЫ.*

*ОБЪЕМ – 4 СТРАНИЦЫ ФОРМАТА А4.*

*СОДЕРЖАНИЕ И ДИЗАЙН РАЗРАБАТЫВАЮТ ПРЕДПРИЯТИЯ И ОРГАНИЗАЦИИ.*

*ОЧЕРЕДНОСТЬ ПУБЛИКАЦИЙ В ПОРЯДКЕ ПОСТУПЛЕНИЯ.*

*МАТЕРИАЛ ДОЛЖЕН БЫТЬ ОФОРМЛЕН В ПРОГРАММЕ CORELDRAW*

*И ВЫСЛАН НА e-mail: [book@contentant.ru](mailto:book@contentant.ru)*

---