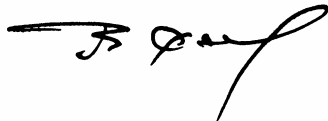


СЕНИК Богдан Николаевич

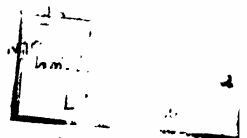
**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТОЧНЫХ
ГРАДИЕНТНЫХ И АСФЕРИЧЕСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы
и комплексы**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2002



Научные руководители: доктор технических наук, профессор

– доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: _____ еских наук, професс

Сеник Б.Н.

изготовления точных

ических наук

Й А.В.

0-00

«трофизика»

10-00 часов

в МОСКОВСКОМ

а по адресу:

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока

зренный печатью,

же Московского
на.

2 г.

Власов И.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Интенсивное развитие науки и техники в настоящее время предъявляет к оптическим системам высокие требования. При построении оптических систем на традиционной элементной базе, основу которой составляют линзы из однородного материала и зеркала со сферическими поверхностями, эти требования часто оказываются противоречивыми и невыполнимыми. Например, высокая коррекция аберраций, необходимая для высокоразрешающих систем, может быть достигнута только за счет использования большого количества элементов, а это усложняет конструкцию приборов, уменьшает коэффициент светопропускания, увеличивает весо-габаритные характеристики и себестоимость изготовления. Эти проблемы в основном решаются путем использования в оптических системах асферических элементов. Физические явления, которые могли бы быть положены в основу создания принципиально новых оптических элементов, известны давно. Одним из таких явлений является фокусировка излучения при его распространении в неоднородной (градиентной) оптической среде.

В градиентных линзах используются прозрачные среды, в которых показатель преломления является непрерывной функцией $f(x, y, z)$ координат точек изотропной среды. При этом традиционный набор конструктивных параметров (r, d, n) дополняется функцией распределения показателя преломления.

Градиентные оптические элементы, представляются наиболее универсальными и перспективными по сравнению с другими нетрадиционными элементами (например, асферическими зеркалами и линзами, дифракционными оптическими элементами), так как сочетание градиентной среды с преломляющими поверхностями позволяет получить весьма высокие оптические характеристики даже у простейших оптических элементов, например, линз.

Исходя из анализа известных технологических процессов изготовления градиентных оптических элементов, сделан вывод: единственным серийноспособным и экономически выгодным для изготовления оптических изображающих систем является метод ионного обмена.

Однако существенным недостатком этого метода являются ограничения по размерам градиентных элементов (в пределах 10 мм) и низкий перепад показателя преломления ($\Delta n \leq 0,1$).

Целью диссертационной работы является создание теоретических основ и промышленное освоение технологического процесса изготовления нового типа оптических деталей – точных градиентных и асферических элементов для применения в принципиально новых оптических приборах и комплексах.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ существующих методов изготовления градиентных оптических элементов.
2. Разработаны теоретические основы технологии формирования градиентно-асферических элементов.
3. Выполнены конструкторские работы и модернизация существующего технологического оборудования.
4. Разработан технологический процесс изготовления градиентных асферических элементов диаметром до 200 мм с оптимизацией технологических параметров их изготовления.
5. Изготовлены и исследованы экспериментальные образцы градиентно-асферического элемента.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложена конструкторско-технологическая концепция создания градиентно-асферических слоев и на ее базе выработаны принципы изготовления оптических элементов с новыми коррекционными возможностями.
2. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования с целью разработки основ промышленной технологии изготовления высокоточных оптических элементов с асферическими поверхностями и градиентностью показателя преломления оптической среды в одном технологическом процессе.
3. Определены и исследованы методы и средства технологического контроля процессов получения градиентно-асферических слоев, наносимых на рабочую поверхность оптического элемента вакуумным методом.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанный высокопроизводительный технологический процесс обеспечивает изготовление в едином технологическом цикле принципиально новых оптических элементов диаметром до 200 мм, сочетающих в себе градиентность оптической среды и асферичность формы рабочих поверхностей с высокой точностью и воспроизводимостью.

Возможности предлагаемого технологического процесса обеспечивают получение асферической поверхности, заданной уравнением произвольного порядка и необходимого осевого распределения показателя преломления.

Апробация работы. Материалы диссертации обсуждались на научных семинарах кафедры "Оптико-электронные приборы научных исследований" (РЛЗ) МГТУ им. Н.Э.Баумана и доложены на научной конференции "Современное состояние вакуумных оптических технологий", 1994 г. (г. Санкт-Петербург), конструкция градиентно-асферического элемента и технологический процесс его изготовления защищены тремя патентами на изобретения. Изготовлен экспериментальный градиентно-асферический элемент, результаты измерений которого полностью подтвердили возможности разработанного технологического процесса.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанный технологический процесс обеспечивает изготовление в едином технологическом цикле принципиально нового оптического элемента диаметром до 200 мм, сочетающего в себе градиентность оптической среды и асферичность рабочих поверхностей.

2. Технологический процесс позволяет с высокой точностью и воспроизводимостью синтезировать асферические поверхности, описываемые уравнениями произвольного порядка и необходимым осевым распределением показателя преломления.

3. Высокие точностные возможности предлагаемого технологического процесса обеспечиваются контролем технологических параметров с помощью акустооптического спектрофотометра в реальном масштабе времени.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, содержит библиографию из 48 наименований, 6 таблиц, 22 рисунка, всего 123 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность проведенных исследований, сформулирована цель работы, определена научная новизна и практическая ценность полученных результатов, изложены защищаемые положения.

В первой главе рассмотрены все известные методы изготовления градиентных оптических элементов, проведен анализ с точки зрения их применимости для изготовления прецизионных оптических компонентов. Проанализированы технологические возможности существующих методов вакуумной асферизации. Представлена информация о применении асферических и градиентных элементов в оптических системах.

К конструкторским параметрам градиентных оптических элементов, которые ограничены возможностями технологии, следует отнести: глубину Δd градиентного слоя, максимальный перепад Δn показателя преломления, а также функцию распределения показателя преломления.

Методы изготовления градиентных элементов и их технологические возможности представлены таблицей 1:

Таблица 1.

№ п/п	Метод изготовления	Δd , мм	Δn
1.	Нейтронная иррадиация	0,1	0,02
2.	Химическое осаждение из паров	0,1	0,01
3.	Ионный обмен	10	0,04
4.	Полимеризация	100	0,01
5.	Ионное наполнение	50	0,04
6.	Выращивание кристаллов	20	0,05

Технологические возможности указанных методов, с учетом небольшого перепада показателя преломления, низкой воспроизводимости функции распределения показателя преломления, других недостатков, не могут быть использованы для изготовления точных градиентных элементов в условиях серийного производства.

Оптически неоднородные слои, нанесенные на стеклянную подложку вакуумными методами, имеют высокую точность и воспроизводимость функции распределения показателя преломления, требуемые геометрические размеры и градиент показателя преломления более 0,1.

Достигнутый в ОАО “Красногорский завод” технический уровень вакуумной асферизации обеспечивает следующие технологические показатели:

- асферичность до 30 мкм;
- градиент асферичности до 10 мкм/мм;
- диаметры асферизуемых элементов до 200 мм.

Применение градиентно-асферических элементов в оптических системах позволяет повысить качественные характеристики системы, в частности. увеличить числовую апертуру, уменьшить ее габариты и массу. Одиночная положительная линза с одной асферической поверхностью второго порядка может применяться в качестве микрообъектива при числовой апертуре не более 0,25 – 0,30, а линза с одной асферической поверхностью 14-го порядка обеспечивает апертуру 0,47. Достижение апертуры 0,7 в линзе, изготовленной из градиентной среды, обеспечивается применением функции распределения показателя преломления 10-го порядка уравнения

$$n^2 = n_0^2 \left[1 - (qr)^2 + h_4 (qr)^4 + h_6 (qr)^6 + \dots \right] \quad (1)$$

При этом увеличение порядка уравнения асферической поверхности и функции распределения показателя преломления связано, как правило, с усложнением технологического процесса изготовления данных элементов.

При совместном применении асферической поверхности и градиентной сферы в одной линзе увеличение числовой апертуры возможно при меньших порядках уравнения асферической поверхности и функции распределения показателя преломления. Так, достижение числовой апертуры 0,47 возможно при втором порядке уравнения функции распределения показателя преломления:

$$n = n_0 + n_1 r^2 + n_2 r^4 + n_3 r^6 + \dots \quad (2)$$

и восьмом порядке уравнения асферической поверхности:

$$z = \frac{y^2 / r}{1 - \rho \left(\frac{y}{r} \right)^2} + Fy^4 + Gy^6 + Gy^8 + \dots \quad (3)$$

Обоснован вывод, что формирование градиентной среды и асферической поверхности в одном технологическом процессе позволяет сократить процесс изготовления нетрадиционных элементов, а также снизить себестоимость оптической системы. Наиболее перспективным решением данного вопроса является получение асферической поверхности методом вакуумного напыления с одновременным управлением изменением показателя преломления в напыляемом слое.

Вторая глава посвящена теоретическим основам технологии формирования градиентно-асферических слоев вакуумным методом.

Обеспечить технически на практике требуемое изменение показателя преломления в слое, выполняя при этом законы распределения показателя преломления, представляющие наибольший практический интерес (осевой, сферический градиенты показателя преломления) возможно посредством использования следующей схемы технологического процесса.

Потоки парообразных пленкообразующих материалов, распространяющиеся в вакуумной камере из двух или более испарителей, работающих одновременно, смешиваются по пути движения от испарителей к приемной поверхности оптического элемента (рис.1). Варьируя параметрами режимов питания испарителей S_1 и S_2 , можно регулировать концентрации испаряемых материалов в общем потоке и, следовательно, и состав конденсата, формирующего слой на приемной поверхности оптического элемента.

Эта схема технологического процесса обеспечивает конструктивное сочетание в одном оптическом элементе асферичности геометрической формы и градиента показателя преломления одновременно за счет нанесения через маску в вакууме градиентно-асферического слоя.

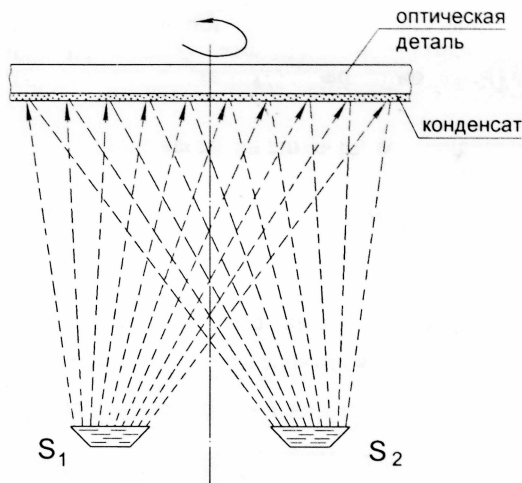


Рис.1. Схема нанесения коррекционного слоя испарением
одновременно двух разных пленкообразующих материалов из
двух испарителей.

В этом случае наносимый слой в каждый момент времени нанесения формирует асферические поверхности, которые являются поверхностями постоянных значений показателя преломления. Реализация поставленной задачи осуществляется посредством использования функциональной маски, рассчитываемой с учетом требуемого закона изменения показателя преломления, находящегося в корреляции с формируемым данным оптическим элементом волновым фронтом.

При использовании функциональной маски скорости нарастания толщины слоя в различных зонах при прочих равных условиях зависят от времени “экспозиции зоны”, т.е. от угла раскрытия маски на зоне. В то же время, концентрация компонентов в поступающем, а затем конденсирующемся на поверхности оптического элемента молекулярном потоке одна и та же для любой из зон оптического элемента. В связи с этим естественно предположить, что конденсаты, образующиеся на последующей зоне, будут “плотнее упакованы” по показателям преломления, чем конденсаты, образующиеся на предыдущей зоне.

Математическое ожидание или среднее значение показателя преломления $n_{cp.}$ можно рассматривать в данном случае как выборочное среднее $\bar{n}$ и находить его значение из выражения:

$$n_{cp.} = \bar{n} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i, \quad (4)$$

где k – количество разбиений слоя на элементы, каждый из которых ограничивается двумя соседними поверхностями урвня;

n_i – показатель преломления i -того элемента слоя (выборочное значение показателя преломления).

Представленный физический принцип формирования градиентно-асферических слоев на всех радиальных зонах оптического элемента обеспечивает равные между собой по величине значения показателя преломления.

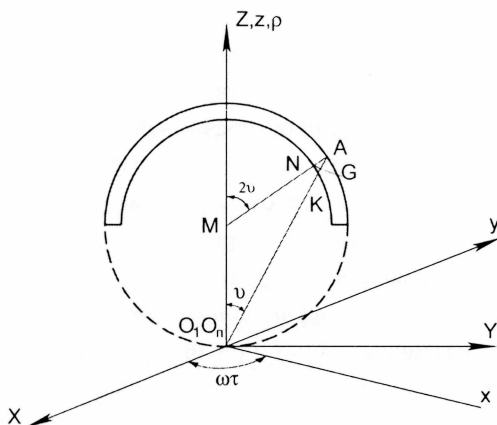


Рис.2. Схема нанесения покрытия на внутреннюю поверхность вращающейся сферы.

Автором разработана теоретическая модель формирования в вакууме покрытий, полученных из одного точечного источника на подвижной подложке (рис.2), основным результатом которой является следующее выражение:

$$h(\rho, \Theta, \tau) = \frac{V(r)}{4\pi R^2}. \quad (5)$$

Толщина слоя $h(\rho, \Theta, \tau)$ по внутренней поверхности полусферы радиуса R , вращающейся вокруг своей оси симметрии, полученной из точечного источника с косинусным законом испарения, расположенным на оси симметрии полусферы на расстоянии R от центра полусферы, постоянная во всех ее точках, пропорциональна объему испарившегося материала $V(r)$ и не зависит от частоты вращения этой полусферы.

Изложенная теоретическая модель принципиально важна как для получения высококачественных оптических покрытий, так и для создания технологического механизма образования неоднородных слоев.

Автором разработана модель формирования покрытий на подвижной подложке из нескольких источников испарения в вакууме, которая служит основой для разработки модели технологического процесса нанесения градиентных асферических слоев на стеклянную подложку. Результаты проведенных работ определили следующие направления в разработке коррекционных оптических элементов и технологии их изготовления:

Создание оптических элементов с градиентными слоями,

- в которых показатель преломления плавно изменяется по заданному закону за счет изменения технологических режимов испарения одного вещества;

- в которых показатель преломления плавно изменяется по заданному закону за счет управления одновременным испарением вещества из двух источников.

Для реализации второго конструктивного решения автором разработана методика, позволяющая получать исходные пленкообразующие материалы с необходимыми значениями показателей преломления из числа серийно выпускаемых в промышленности и широко применяемых в оптическом производстве.

Предложенная методика может быть использована и в случаях одновременного испарения веществ из двух источников, в частности SiO_2 и TiO_2 (рис.3).

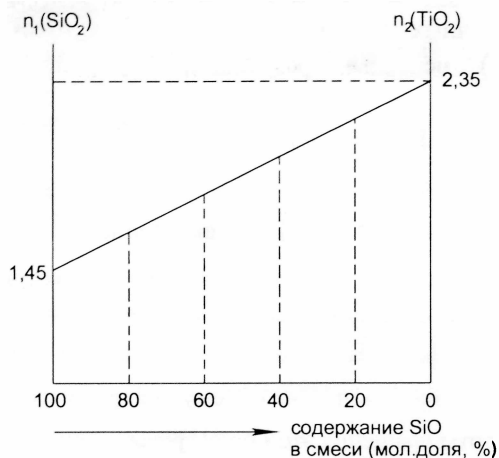


Рис.3. Диаграмма значений показателя преломления в коррекционном слое, полученным одновременным испарением оксида кремния SiO_2 и оксида титана TiO_2 из двух испарителей в вакууме.

В практике получения оптических пленок из некоторых пленкообразующих материалов возможно нанесение толстых пленок с изменяющимся значением показателя преломления, формируемых при испарении в вакууме только одного исходного материала. Из физики тонких пленок известны факторы, влияющие на величину (значение) показателя преломления в диэлектрических средах.

Один и тот же материал может иметь различные показатели преломления в зависимости от кристаллической структуры. Для TiO_2 характерна весьма заметная зависимость показателя преломления от температуры подложки, определяющей структуру пленок, т.к. в интервале температур 20 – 400°C пленки могут быть либо аморфными, либо со структурой анатаза или рутила, либо представлять собой смесь аморфной и кристаллической фаз. Следовательно, в зависимости от температуры подложки показатели преломления пленок TiO_2 изменяются от 1,9 до 2,5 ($\lambda=550$ мкм).

Показатель преломления SiO_2 в видимой области спектра равен 2,0. Если пленки частично окислены, то показатель преломления уменьшается и достигает величины 1,55 при составе Si_2O_3 . Дальнейшее окисление дает, наконец,

величину показателя преломления для SiO_2 равную 1,46. Из изложенного видно, что в некоторых случаях вполне уместным является использование одного пленкообразующего материала при его испарении в вакууме из одного испарителя для получения коррекционных слоев с градиентом показателя преломления.

В разделе экспериментальных исследований представлены практические результаты по коррекционным слоям, полученным по разработанной методике.

Анализ теплофизических процессов, происходящих при нанесении в вакууме коррекционных слоев, позволяет создать физическую концепцию, которая дает возможность практически разрабатывать исходные данные для построения оптимальных технологических процессов нанесения в вакууме градиентно-асферических слоев на оптических деталях.

Вследствие воздействия теплофизических факторов на оптическом элементе происходит рост температуры, которая существенным образом влияет на механизм конденсации и формирования структуры коррекционного слоя, что, в свою очередь, приводит к изменению во времени значения коэффициента конденсации и оптической однородности слоя. Очевидно, что эти обстоятельства играют негативную роль в процессе традиционной вакуумной асферизации, при которой неизменность показателя преломления в слое является как раз определяющим фактором, влияющим непосредственно на точностные параметры изготавливаемых поверхностей.

Указанные негативные обстоятельства можно с пользой применить в процессах изготовления градиентно-асферических коррекционных слоев, но при условии, что эти, так называемые негативные обстоятельства будут управляемыми.

Анализ температурно-временной диаграммы (рис.4) показывает, что теоретически существует возможность управления температурой оптического элемента, а, следовательно, создания требуемых условий для изменения показателя преломления в наносимом слое.

Таким образом, если обеспечить возможность управления важнейшими параметрами режимов техпроцесса (степень вакуума, температура оптического элемента, скорость нанесения слоя), то можно получить коррекционные слои с изменяющимися значениями показателя преломления в определенных пределах в соответствии с законом распределения показателя преломления.

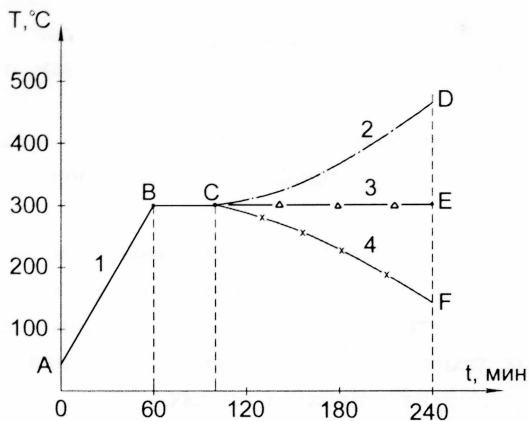


Рис.4. Временная диаграмма температурного состояния оптического элемента в процессе нанесения коррекционного слоя.

Кривая 1 – участок ABC

Кривая 2 – участок CD

Кривая 3 – участок CE

Кривая 4 – участок CF

В третьей главе представлены материалы по модернизации технологического оборудования и оснащения для градиентной асферизации точных оптических элементов. С целью подтверждения теоретических основ предлагаемого технологического процесса выполнен конструкторский расчет синглета с градиентно-асферическим слоем. Изготовлены экспериментальные образцы синглета, результаты измерений оптических параметров которого соответствуют конструкторским требованиям в полном объеме.

Технологически важным применением вакуумной асферизации является формирование оптических элементов, обладающих сложной точной геометрией рабочей поверхности, изготовление которых традиционными методами не представляется возможным.

Технологические возможности процессов градиентной вакуумной асферизации во многом определяются конструктивными особенностями устройств и инструмента, с помощью которых они реализуются.

В качестве базовых установок выбраны серийно выпускаемые промышленностью СНГ вакуумные установки ВУ-2М и ВУ-1А.

Внутрикамерное оснащение вакуумной установки для вакуумной асферизации показано на рис.5.

Наиболее сложной частью технологического процесса изготовления градиентных оптических элементов является технологический контроль качества наносимых градиентно-асферических слоев. Преодолеть специфические трудности можно с помощью акустооптического спектрофотометра АОС-3S-1, предназначенного для оптического контроля диэлектрических покрытий в процессе нанесения в реальном масштабе времени. В процессе экспериментальных исследований проведена работа по адаптации акустооптического спектрофотометра к технологическому процессу нанесения коррекционных слоев в вакууме в части управления испарителями, регулирования концентрацией компонентов пленкообразующих материалов в парах и конденсате.

Адаптированный акустооптический спектрофотометр обеспечивает прецизионное измерение двух важнейших параметров коррекционных слоев в процессе их нанесения в вакууме:

- меняющийся по расчетной зависимости показатель преломления в слое с точностью до 0,002;
- оптическую толщину коррекционного слоя с точностью до 0,3%

С целью подтверждения потенциальных возможностей предлагаемого технологического процесса выполнен расчет синглета в трех вариантах исполнения:

Вариант 1. Линза, ограниченная сферическими поверхностями.

Вариант 2. Линза с первой асферической поверхностью вида:

$$z^2 + y^2 - 157.4x - 0.132x^2 + 0.1456x^3 - 0.0528x^4 + 0.00656x^5 = 0$$

и второй – сферической .

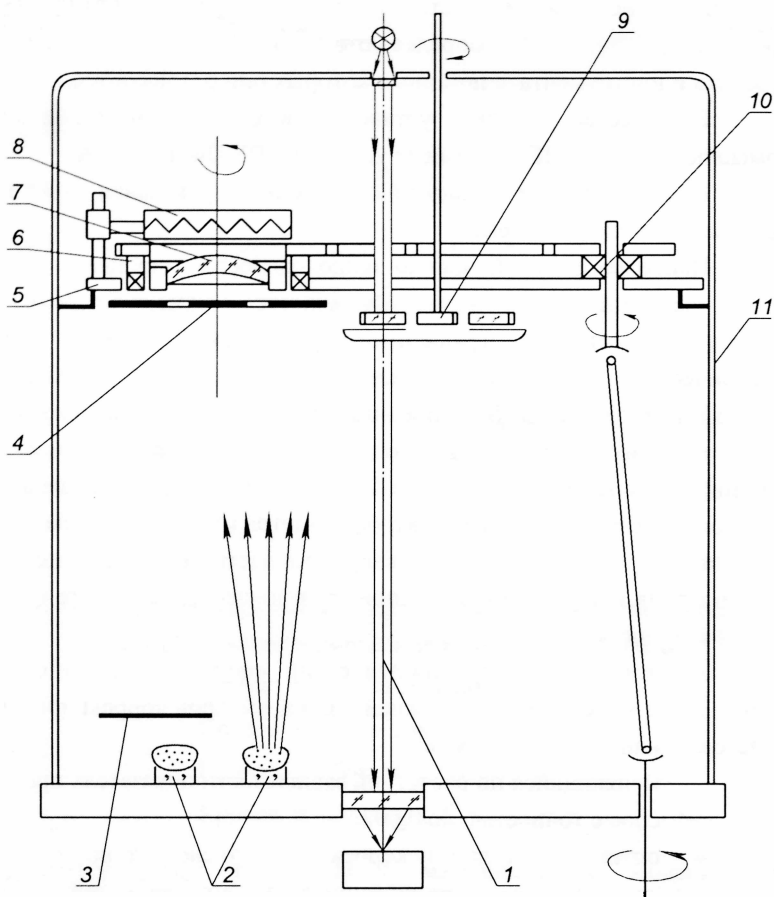


Рис.5. Схема внутрикамерного устройства.

1-система фотометрического контроля толщины слоев, 2-испарители, 3-экран-заслонка, 4-функциональная маска, 5-базовая плита, 6-держатель оптического элемента, 7-обрабатываемый оптический элемент, 8-электронагреватель оптического элемента, 9-кассета для размещения и механизм смены контрольных образцов-свидетелей, 10-механизм вращения оптического элемента, 11-стенки визуальной камеры.

Вариант 3. Линза с первой поверхностью, выполненной в виде асферического градиентного слоя с линейной функцией распределения показателя преломления вида:

$$n = 1.45 + 0.01x$$

и второй – сферической поверхностью.

Все три варианта линзы имеют одинаковые оптические характеристики:

- фокусное расстояние $f' = 120$ мм;
- угол поля зрения $2\omega = 4^\circ$;
- относительное отверстие $D/f' = 1 : 3$.

В первом варианте исполнения в данной линзе первая сумма Зейделя $S_1 = 1,574$.

Во втором варианте на первую поверхность добавляется асферический слой из SiO_2 , профиль которого соответствует уравнению:

$$z^2 + y^2 - 157.4x - 0.132x^2 + 0.1456x^3 - 0.0528x^4 + 0.00656x^5 = 0$$

Максимальное отступление асферической поверхности от ближайшей сферы составляет 0,016 мм. В данной линзе первая сумма Зейделя $S_1 = -0,204$ и кружок рассеяния для основной длины волны ($2\omega \approx 0^\circ$) составляет $2y' = 0,031$ мм.

В третьем варианте в наносимом асферическом слое вводилось изменение показателя преломления в соответствии с линейным законом функции распределения показателя преломления $n = 1.45 + 0.01x$.

Вершина градиентного слоя совпадает с вершиной асферической поверхности. В данном случае $S_1 = -0,140$, а кружок рассеяния для точки на оси $2y' = 0,008$ мм.

Измерения кружка рассеяния во всех трех вариантах проводились по стандартной методике, и соответствуют расчетным значениям.

Полученные результаты показывают, что изменение показателя преломления в асферическом слое позволяет уменьшить сферическую абберацию линзы, причем это влияние проявляется сильнее в высших порядках сферической абберации.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Предложен, теоретически обоснован, экспериментально проверен и подготовлен для промышленного освоения технологический процесс изготовления принципиально новых оптических элементов с градиентно-асферическими слоями. Новизна и полезность метода подтверждена патентами на изобретения.

2. Предложенный высокопроизводительный метод позволяет в едином технологическом цикле наносить коррекционные слои с осевым распределением показателя преломления произвольного порядка и уравниванием асферической поверхности произвольного порядка с диапазоном диаметров до 200 мм, асферичностью до 30 мкм, перепадом показателя преломления вдоль оптической оси до 0,5. Погрешность отклонения нормали асферической поверхности от номинального значения не превышает 5 угловых секунд.

3. Разработанный метод имеет большие перспективы применения не только по прямому назначению, но и в определенных областях науки и техники, в частности, для получения особо точных спектроделительных оптических покрытий. Результаты проведенных работ по созданию промышленного технологического процесса изготовления градиентно-асферических элементов могут быть использованы на всех оптических предприятиях и в научных организациях, в частности: НИИ «Полус» (г.Москва), ГИПО (г.Казань), ЛЗОС (г.Лыткарино), КОМЗ (г.Казань).

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Казаков В.И., Сеник Б.Н. Технология изготовления градиентных сред оптических элементов // Аналитический обзор за 1985-1990 гг. – М., 1991 – 65 с. (Информтехника, №5436).
2. Крючков В.Г., Сеник Б.Н. Вакуумные методы получения градиентных оптических пленок: Обзор. – М., 1992. – 30 с. (Информтехника, №5536)
3. Патент № 2065192 (РФ). Однолинзовый объектив с градиентным слоем. / В.И.Казаков, В.В.Потелов, Б.Н.Сеник, Г.А.Точкина // Открытия, изобретения, ...– 1996. – №22.
4. Патент № 2078468 (РФ). Способ коррекции оптической системы. / В.Г.Крючков, В.В.Некрасов, С.Н.Бездидько, В.Е.Ефремов, В.В.Потелов, Б.Н.Сеник // Открытия, изобретения, ...– 1997. – №27.
5. Патент № 2078467 (РФ). Способ получения коррекционных слоев на оптическом элементе. / В.Г.Крючков, С.Н.Бездидько, В.В.Потелов, Н.П.Заказнов, Б.Н.Сеник // Открытия, изобретения, ...– 1997. – №12.

Подписано в печать 19.06.02 г.
Тип. ОАО КМЗ Зак. 2002.06-1057 Тираж 100 экз.