

УДК 681.7.02

Основы технологии формирования градиентно-асферических слоев вакуумным методом

А. И. Гоев, В. Г. Крючков, В. В. Потелов, Б. Н. Сенник, А. К. Герасюк
ФНПЦ ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", г. Красногорск, Россия

Предложены, разработаны и экспериментально проверены основы технологии изготовления принципиально новых оптических элементов с градиентно-асферическими слоями, которые обеспечивают высокоточное корригирование волновых фронтов в перспективных оптических системах. Экспериментальные исследования проводились на базе модернизированной вакуумной установки ВУ-2М, укомплектованной акустооптическим спектрофотометром для контроля параметров наносимых слоев в реальном масштабе времени.

В течение длительного времени пристальное внимание оптотехников привлечено к вопросу применения нетрадиционных оптических элементов — асферических, дифракционных, киноформных. Это связано с перспективами значительного сокращения габаритов оптических систем, повышением их качества и информативности.

В предыдущей статье [1] авторов данной публикации достаточно подробно изложены достижения и результаты работ, проведенных специалистами ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева" по вакуумной асферизации оптики. В данной статье рассматриваются теоретические изыскания и экспериментальные исследования, проведенные авторами за последнее десятилетие в целях создания нетрадиционных оптических элементов, сочетающих в себе асферичность геометрической формы и градиентность показателя преломления оптической среды наносимого слоя.

Для эффективного использования оптического слоя в качестве своеобразного "инструмента", управляющего ходом лучей, необходимо обеспечить заданное расчетом распределение показателя преломления в слое. Обеспечить на практике требуемое изменение показателя преломления в слое, выполняя при этом законы распределения показателя преломления (осевой и сферической градиенты показателя преломления), можно посредством использования следующей схемы технологического процесса (рис. 1). Потоки парообразных пленкообразующих материалов, распространяющиеся в вакуумной камере из двух или более испарителей, работающих одновременно, смешиваются в процессе движения от испарителей к приемной поверхности оптического элемента. Варьируя параметры режимов электропитания испарителей S_1 и S_2 , можно регулировать концентрации испаряемых материалов в общем потоке, а следовательно, и состав конденсата, формирующего слой на приемной поверхности оптического элемента. Эта схема технологического процесса может использоваться в двух вариантах:

при нанесении собственно оптических градиентных слоев;

при нанесении коррекционных слоев, обеспечивающих конструктивное сочетание в одном оптическом элементе асферичности геометрической формы и градиента показателя преломления за счет нанесения через маску в вакууме градиентно-асферического слоя (ГАС).

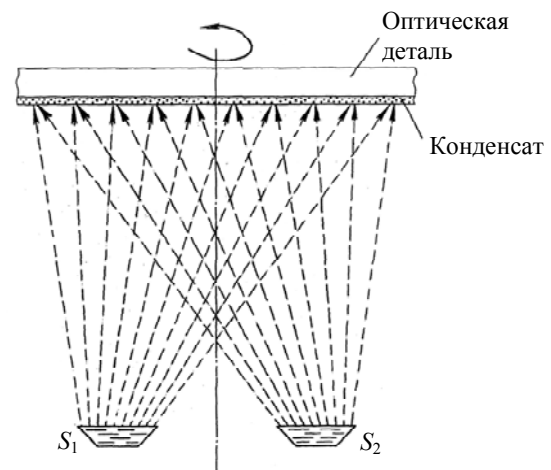


Рис. 1. Схема нанесения коррекционного слоя испарением одновременно двух разных пленкообразующих материалов из двух испарителей

Реализация второго варианта осуществляется посредством использования функциональной маски, рассчитываемой с учетом требуемого закона изменения показателя преломления, находящегося в корреляции с формируемым данным оптическим элементом волновым фронтом. В этом случае наносимый ГАС в каждый момент времени нанесения формирует асферические поверхности (АП), которые являются поверхностями постоянных значений показателя преломления (рис. 2), т. е. показателя

тели преломления на этих АП имеют одни и те же значения.

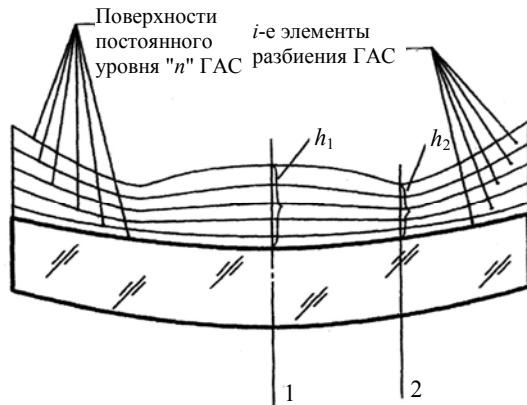


Рис. 2. Конструкция оптического элемента с коррекционным слоем с изменяющимся значением показателя преломления по оси элемента

Оптические длины путей в коррекционном ГАС:

на радиальной зоне 1 — $n_{1\text{mid}} \times h_1$;

на радиальной зоне 2 — $n_{2\text{mid}} \times h_2$.

Следует учесть, что $h_1 > h_2$, а $n_{1\text{mid}} = n_{2\text{mid}}$, так как слой на разных радиальных зонах формируется равновероятно из одного и того же потока испаряемых материалов с одинаковыми значениями показателя преломления слоя в один и тот же момент времени процесса осаждения слоя. При использовании функциональной маски скорости нарастания толщины слоя на зонах 1 и 2 при прочих равных условиях зависят от времени “экспозиции” зоны, т. е. 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 зоне 2, будут “плотнее упакованы” по показателю преломления, чем конденсаты, образующиеся на зоне 1. Математическое ожидание или среднее значение показателя преломления n_{mid} можно рассматривать в данном случае как выборочное среднее \bar{n} и находить его значение из выражения

$$n_{\text{mid}} = \bar{n} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k n_i,$$

где k — количество разбиений ГАС на элементы, каждый из которых ограничивается двумя соседними поверхностями уровня (объем выборки);

n_i — показатель преломления i -го элемента ГАС (выборочное значение показателя преломления).

Представленный физический принцип формирования коррекционных ГАС на всех радиальных зонах поверхности оптического элемента, включая зоны 1 и 2, обеспечивает равные между собой по величине значения показателя преломления.

Задачи разработки оптимальных условий и технологических режимов формирования ГАС целесообразно формулировать в терминах, традиционно используемых при описании процессов вакуумной асферизации. Однако при формировании принципов построения техпроцессов получения в асферическом слое неоднородной среды был применен подход “обратить вред в пользу” и “усилить вредные факторы до такой степени, чтобы они перестали быть вредными”.

Технологические возможности процессов градиентной вакуумной асферизации во многом определяются конструктивными особенностями оборудования, устройств и инструментов, с помощью которых они реализуются. В качестве базовой установки выбрана серийно выпускаемая вакуумная установка ВУ-2М (Завод оптического станкостроения, г. Сморгонь, Республика Беларусь). Внутрикамерное оснащение вакуумных установок для градиентной асферизации должно состоять из устройств, узлов и деталей, находящихся в вакууме. Это прежде всего технологическое устройство, обеспечивающее необходимую кинематику оптического элемента и функциональной маски друг относительно друга в условиях высокого вакуума, технологического нагрева, длительного процесса испарения и конденсации исходного материала для ГАС.

В ходе разработки устройства учитывались технические характеристики вакуумных установок ВУ-2М, технологические возможности вакуумных камер в отношении наиболее полного использования узлов, систем и механизмов, которыми оснащены установки. На рис. 3 показаны основные узлы, детали и механизмы внутрикамерного устройства с “классической” схемой взаимного расположения функциональных узлов и элементов в вакуумной камере. Над испарителями располагается обрабатываемый оптический элемент, перед приемной поверхностью которого размещена с минимальным зазором специальная функциональная маска. Последняя выполняет двойную роль в процессе изготовления ГАС, а именно формирует требуемую геометрию обрабатываемой поверхности оптического элемента и при этом является основным инструментом для получения расчетных значений распределения показателя преломления в наносимом коррекционном слое.

В начале процесса напыления оптический элемент приводится во вращательное движение вокруг его геометрической оси. Благодаря различию во времени открытия отдельных зон рабочей поверхности оптического элемента обеспечивается необходимое изменение толщины наносимого слоя и распределение “плотности” показателя преломления оптической среды в наносимом слое.

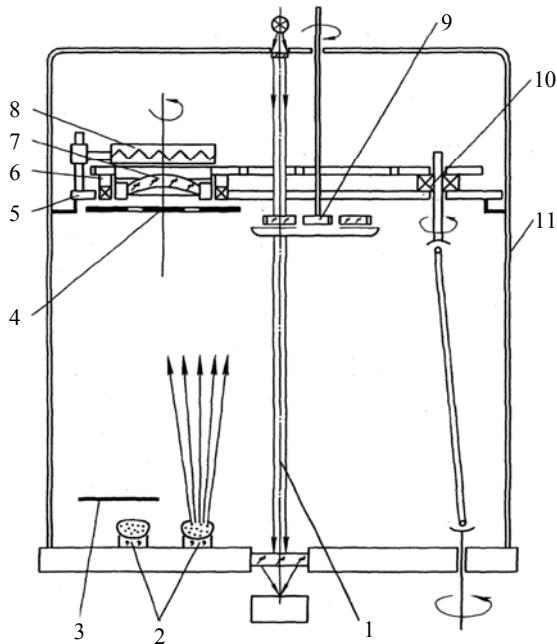


Рис. 3. Схема внутрикамерного устройства:

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 механизма смены контрольных образцов-свидетелей; 10 — механизм вращения оптического элемента; 11 — стенки вакуумной камеры

Держатель оптического элемента с механизмом вращения, функциональной маской и электронагревателем монтируются на базовой плите, закрепленной на специальных кронштейнах в вакуумной камере. Размещение и вращение обрабатываемых оптических элементов с различными диаметрами (от 30 до 220 мм) обеспечивается за счет использования переходных оправ-колец, посадочные гнезда которых имеют размеры, соответствующие требованиям конкретных оптических элементов, подлежащих обработке. Расстояние от испарителей до оптического элемента можно регулировать за счет изменения кронштейнов для крепления базовой плиты.

В этом случае необходимо изменить, соответственно, и длину стойки, на которой крепится кассета с контрольными образцами-свидетелями.

Эта несложная и непринципиальная переналадка устройства, учитывающая только технологическую специфику обрабатываемого оптического элемента, подтверждает уровень универсальности технологического внутрикамерного оснащения. Электронагреватель размещен над оптическим элементом и обеспечивает регулируемый нагрев в зоне размещения обрабатываемой оптической детали. В момент загрузки и извлечения оптического элемента электронагреватель отводится в сторону, обеспечивая удобство выполнения операций по загрузке и извлечению оптического элемента до и после обработки. Использование штатной кассеты, рассчитанной на 10 контрольных образцов-свидетелей $\varnothing 30$ мм, позволяет вести непрерывный контроль толщины наносимого слоя

штатными системами фотометрического и адаптированного акустооптического контроля параметров наносимых слоев.

Анализ температурно-временной диаграммы [1, см. рис. 2] показывает, что теоретически существует возможность управления температурой оптического элемента, и, следовательно, создания требуемых условий для изменения показателя преломления в наносимом слое.

При нагреве оптического элемента перед нанесением коррекционного слоя под воздействием излучения автоматически регулируемого электронагревателя через определенный промежуток времени от начала нагрева наступает состояние теплового равновесия. С началом же процесса испарения пленкообразующих веществ тепловой баланс предыдущего состояния нарушается, так как начинают действовать дополнительные факторы нагрева:

перенос тепла разогретыми до высоких температур молекулами испаряемого материала от испарителя к оптическому элементу;

радиационный нагрев оптического элемента от излучения разогрето испарителя.

Под воздействием указанных факторов на оптическом элементе происходит рост температуры, которая существенным образом влияет на механизм конденсации и формирование структуры коррекционного слоя, что в свою очередь приводит к изменению во времени значений 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 важнейшим фактором, влияющим непосредственно на точностные параметры изготавливаемых асферических 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.

Таким образом, если обеспечить возможность управления важнейшими параметрами режимов техпроцесса (степень вакуума, температура оптического элемента, скорость испарения исходных материалов и конденсации их паров на приемной поверхности оптического элемента), то можно получать коррекционные слои с изменяющимися значениями показателя преломления в определенных пределах и в соответствии с расчетным законом распределения показателя преломления.

Для того чтобы построить технологический процесс нанесения конкретного ГАС, необходимо иметь следующую информацию:

- 1) математическое уравнение АП, рассчитанное для оптического элемента, подлежащего изготовлению;
- 2) математическое уравнение, описывающее закон распределения показателя преломления в ГАС;
- 3) математическое уравнение, описывающее пространственную геометрию поверхности наносимого слоя на приемную сферическую (плоскую) поверхность оптического элемента, подлежащего корригированию, но при отсутствии функциональной маски.

На основании требований пункта 2 подбираются исходные пленкообразующие материалы, а также назначаются параметры технологических режимов нанесения слоя в вакууме с требуемым градиентом показателя преломления. Для получения математического уравнения по пункту 3 необходимо рассмотреть модель массопереноса материала при испарении из точечного источника в вакууме на подвижную подложку, а затем модель массопереноса материала при испарении из неточечного источника (конечное число точечных источников) на подвижную подложку. Полученное в результате рассмотрения моделей дифференциальное уравнение в частных производных служит для определения уравнения поверхности покрытия, изготовленного на подвижной подложке при одновременном действии нескольких точечных источников, т. е. фактически из источника, имеющего реальную площадь испарения. Получаемый закон распределения конденсата по поверхности подложки, который в большинстве случаев несколько отличается от эквидистантного (равнотолщинного) слоя, необходимо учитывать при расчете рабочих вырезов функциональных масок. Подробно математические модели массопереноса рассмотрены в работах [2, 3]. При расчете и компоновке рабочих вырезов функциональных масок целесообразно руководствоваться методикой, разработанной специалистами МГТУ им. Н. Э. Баумана и изложенной в работе [4].

Для оценки эффективности предлагаемого способа коррекции [5] был выполнен расчет оптической линзы с последующей практической ее реализацией в трех вариантах:

- 1) линза, ограниченная сферическими рабочими поверхностями;
- 2) линза с первой асферической поверхностью и второй — сферической;
- 3) линза с первой поверхностью, выполненной в виде градиентного асферического слоя с линейной функцией распределения показателя преломления, и второй — сферической.

Все три варианта линзы имеют одинаковые оптические характеристики:

фокусное расстояние $f' = 120$ мм;

угол поля зрения $2\omega = 4^\circ$;

относительное отверстие $D/f' = 1:3$;

материал линзы — стекло марки ТК14 с $n = 1,6155$.

Во втором варианте на первую поверхность наносится асферический слой из SiO_2 , профиль которого соответствует уравнению 5-го порядка. Максимальное отступление АП от ближайшей сферы составляет 0,016 мм. В данном случае кружок рассеяния для основной длины волны ($2W = 0^\circ$) составляет 0,031 мм, в то же время в чисто сферическом варианте кружок рассеяния составляет 0,92 мм. В третьем варианте в асферический слой вводилось осевое изменение показателя преломления в соответствии с линейным законом функции распределения показателя преломления $n = 1,45 + 0,01 x$. Вершина градиентного слоя сов-

падает с вершиной АП. В этом случае кружок рассеяния для точки на оси составил 0,008 мм. Дополнительная информация приведена в [6].

Полученные результаты расчета и их экспериментальная реализация показывают, что изменения показателя преломления в асферическом слое позволяют уменьшать сферическую абберацию линзы, причем это влияние проявляется сильнее в высших порядках сферической абберации.

Выводы и заключение

1. Предложен, разработан и экспериментально проверен технологический процесс изготовления принципиально новых оптических элементов с градиентно-асферическими слоями.

2. Экспериментально проверена и подтверждена на практике целесообразность применения и надежность в эксплуатации акустооптического метода контроля параметров наносимых в вакууме слоев.

3. Рассчитан, изготовлен и аттестован контрольный градиентно-асферический элемент, полностью подтвердивший правильность научно-исследовательского поиска высокоэффективного технологического процесса.

Подводя итоги проделанной работы и учитывая обнадеживающие предварительные результаты, считаем необходимым проведение дальнейших углубленных исследований по данной тематике в целях выявления границ применимости коррекционных градиентно-асферических элементов, разработки и совершенствования технологических процессов и доведения их до уровня использования в оптическом производстве.

Л и т е р а т у р а

1. Крючков В. Г., Потелов В. В., Сенюк Б. Н. Вакуумная асферизация высокоточных оптических элементов инфракрасной техники// Прикладная физика, 2004. № 1. С. 85—88.
2. Крючков В. Г. Вакуумная асферизация. Современные достижения. Проблемы и перспективы развития/ Аналитический обзор по отечественным и зарубежным материалам за 1980—1990 гг. — М.: НТИЦ "Информтехника", 1990.
3. Отчет по НИР ТТ10-510—87. Разработка и внедрение промышленной технологии вакуумной асферизации высокоточных $\alpha \leq 5''$ асферических поверхностей с асферичностью до 30 мкм, диаметром до 200 мм оптических элементов ИК-техники. — Красногорск, 1989.
4. Расчеты оптических систем// Сб. статей/ Под ред. проф. И. А. Турыгина, МВТУ им. Н. Э. Баумана. — М.: Оборонгиз, 1961.
5. Крючков В. Г. и др. Способ коррекции оптической системы: Патент РФ 2078468 от 27.04.1997.
6. Потелов В. В., Сенюк Б. Н. Асферизация высокоточных оптических элементов методом вакуумного напыления// Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 12. С. 14—19.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

Principles of practice for forming gradient-aspherical layers by vacuum aspherization

A. I. Goev, V. G. Kryuchkov, V. V. Potelov, B. N. Senik, A. K. Gerasyuk
JSC "Krasnogorsky Zavod im. S.A. Zvereva", Krasnogorsk, Russia

The last decade's achievements of specialists of the jsc "Krasnogorsky Zavod" are re-presented here which pertain to the research works for improving the method of vacuum aspherization. A new design-manufacturing conception has been developed which unites the works of designing optical systems using the non-traditional component basis, technological supporting the process of producing the non-traditional optical components with the gradient-aspherical layers, the complex being realized at the expense of using the acoustooptical method for control of the parameters of the layers applied by vacuum aspherization in the real time.

* * *