

УДК 681.7.02

## Вакуумная асферизация высокоточных оптических элементов инфракрасной техники

В. Г. Крючков, В. В. Потелов, Б. Н. Сеник  
ОАО "Красногорский завод им. С. А. Зверева", г. Красногорск, Россия

*Предложена физическая концепция и на ее основе разработана модель управления динамикой теплофизических явлений применительно к вакуумной асферизации, которая нашла экспериментальное подтверждение и на практике обеспечивает формирование прочных, свободных от внутренних напряжений, обладающих равновесным структурным состоянием, оптически однородных и имеющих стабильный во времени показатель преломления асферизирующих слоев.*

Для выполнения большого круга задач, связанных с созданием самых совершенных оптико-электронных приборов и систем, повышением уровня их разрешения и информативности, необходима разработка оптических систем на элементной базе, формирующей волновой фронт с погрешностями, составляющими величины  $1/30$ — $1/50$  длины волны рабочего излучения. Реализация оптической элементной базы такой точности возможна только с помощью современных прогрессивных технологий.

В 1980 г. вышел в свет реферативный обзор "Вакуумная асферизация. Современное состояние. Проблемы развития", авторы которого (А. М. Ключков, А. А. Осипова, Б. А. Шапочкин, В. Ф. Сафонов, Г. И. Голубева) дали достаточную информацию о достижениях зарубежных и отечественных ученых и исследователей в вопросах развития технологии асферизации опти-

ки в вакууме до 1979 г. Казалось, что к тому времени вакуумная асферизация, основанная на нанесении в вакууме дополнительного слоя материала, исчерпала свои возможности. В самом деле, разработаны технологические процессы, позволяющие уверенно получать асферические поверхности (АП) зеркал с точностью формы по углу отклонения нормалей  $\alpha \leq 20^\circ$  в условиях серийного производства. Причем в этом обзоре представлены отдельные результаты, полученные в лабораторных условиях, когда местные ошибки изготавливаемых АП составляли в линейной мере  $0,1$ — $0,03$  мкм. Эти результаты характеризуют высочайшие точностные возможности функциональных масок, рассчитываемых по методикам, разработанным отечественными и зарубежными специалистами уже к концу 50-х — началу 60-х гг. XX столетия.

В качестве исходных материалов для получения асферизирующих слоев широко применялись наиболее распространенные в оптической пленочной технологии того времени пленкообразующие материалы: алюминий Al, сульфид цинка ZnS, фторид магния MgF<sub>2</sub>, окислы кремния SiO и SiO<sub>2</sub>. Однако дальнейшее развитие технических средств, позволившее получать перспективные результаты в технологии напыления в вакууме слоев из новых оптических материалов и новые повышенные требования, предъявляемые к оптическим элементам сложной геометрической формы, привели к возрождению метода вакуумной асферизации.

Известно, что применение АП позволяет значительно сократить количество оптических элементов (ОЭ) в сложных оптических системах. Особенно актуальным становится применение АП в тепловизионных приборах, где используются ОЭ из чрезвычайно дорогих материалов. Стоимость некоторых оптических кристаллов колеблется в пределах 400—2000 дол./кг. Следовательно, уменьшение количества ОЭ за счет введения АП позволяет снизить цену изготавливаемого изделия. При этом удается повысить технические характеристики оптических приборов — качество изображения, пропускание, светосилу, угловое поле — и позволяет проектировать более компактные оптические системы.

Ниже представлены основные результаты разработок специалистов нашего предприятия по одному из самостоятельных направлений формообразования оптики, а именно, вакуумной асферизации высокоточных германиевых линз для инфракрасной техники.

Авторами статьи была предпринята попытка выйти на качественно новый уровень представлений о происходящих в системе "подложка—асферизирующий слой" теплофизических процессах и на их базе сформулировать физическую концепцию, которая впервые позволила бы исследователям и технологам практически определять исходные данные для построения оптимальных технологических процессов асферизации оптических элементов путем нанесения дополнительного слоя материала в вакууме.

Основой физической концепции проведенных исследований является представление о том, что для формирования слоев с равновесным структурным состоянием и стабильными оптическими и эксплуатационными параметрами необходимо соблюдать принцип адекватности условий в течение всего технологического процесса наращивания слоя в вакууме, причем корреляция составных частей этих условий должна быть оптимальной для конкретных материалов асферизирующего слоя и подложки.

Теоретические предпосылки физической концепции, указанной выше, позволяют построить модель, характеризующую термодинамику процесса вакуумной асферизации.

Суммарный теплофизический эффект складывается из следующих компонентов:

нагрев подложки в вакууме до начала нанесения слоя с помощью электронагревателя за счет его теплового излучения;

нагрев за счет теплообмена между поступающим молекулярным потоком испаряемого пленкообразующего материала и подложкой (кинетический эффект переноса тепловой энергии);

нагрев подложки за счет тепловой энергии, излучаемой источником нагрева испаряемого материала (испарителем) при его продолжительной работе, что особенно характерно для вакуумной асферизации;

охлаждение подложки в промежутки времени, когда отключается питание электронагревателя (при работе электронагревателя в режиме автоматического терморегулирования);

охлаждение подложки за счет теплопередачи в местах контакта подложки с металлической оправой, подшипниками и т. д.

Для создания адекватных квазиизотермических условий формирования асферизирующего слоя необходимо найти математические зависимости термодинамической системы "подложка—асферизирующий слой", проанализировать теплофизику процесса и выявить возможные пути управления теплофизическими явлениями.

Используя методы математической физики, конкретно метод математического моделирования для решения физических задач, оказалось возможным в рассматриваемом случае воспользоваться решением уравнения теплопроводности методом Фурье [1].

Математическую модель теплообмена в системе "подложка—асферизирующий слой" можно представить в виде дифференциального уравнения, которому удовлетворяет функция  $T(x, y, z, t)$ , позволяющая проследить, как изменяется с течением времени температура в каждой конкретной точке. Подробные математические выкладки сделаны в работе [2].

Реализация предложенной математической модели на практике подтвердила состоятельность основных принципов теоретических изысканий при создании технологии вакуумной асферизации высокоточных оптических элементов ИК-диапазона.

Было сделано предположение, что при нагреве подложки перед нанесением асферизирующего слоя под воздействием излучения автоматически регулируемого электронагревателя и с учетом теплоотдачи в местах контакта подложки с металлическими частями внутрикамерного устройства через определенный промежуток времени от начала нагрева наступает состояние теплового равновесия подложки. С началом же процесса испарения тепловой баланс предыдущего состояния нарушается, так как начинают действовать дополнительные факторы нагрева:

перенос тепла разогретого до высоких температур молекулами испаряемого материала от испарителя к подложке;

радиационный нагрев подложки от излучения нагретого до очень высоких температур испарителя с испаряемым материалом.

Вследствие воздействия указанных факторов на подложке происходит рост температуры, которая существенным образом влияет на механизм конденсации и формирование структуры асферизирующего слоя, что в свою очередь приводит к изменению во времени значений коэффициента конденсации (рис. 1) и оптической однородности слоя.

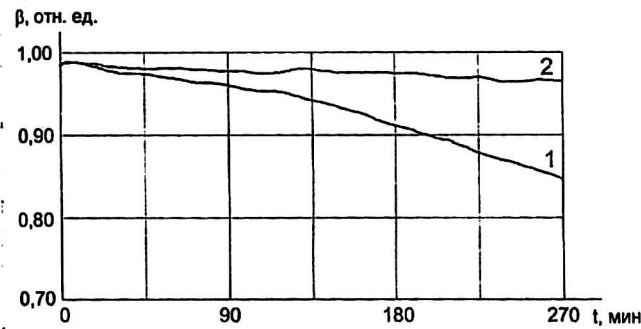


Рис. 1. Изменение коэффициента конденсации германия в процессе вакуумной асферизации:  
1 — вариант без квазиизотермических условий;  
2 — вариант квазиизотермических условий (управляемая термообработка)

Интерпретацию способа вакуумной асферизации оптических элементов с позиции динамики теплофизических процессов можно проиллюстрировать диаграммой изменения температуры подложки во время технологического процесса асферизации (рис. 2). Кривая 1 характеризует динамику температуры подложки до начала нанесения слоя; кривая 2 — температурную компоненту, обусловленную суммарным действием дополнительных факторов нагрева; кривая 3 — показывает квазиизотермическое состояние асферизируемой детали; кривая 4 — характер изменения температуры подложки, который необходимо поддерживать принудительно в процессе наращивания асферического слоя для обеспечения квазиизотермических условий его формирования.

Анализ динамики температурных характеристик показывает, что вывести состояние подложки на квазиизотермический режим можно в основном за счет управляемого снижения температуры, так как исключить или активно управлять воздействием на подложку дополнительных факторов нагрева не представляется возможным. Характер изменения температуры подложки, обеспечиваемой электронагревателем, следует функционально связать с параметрами, ответственными за дополнительный нагрев подложки в процессе наращивания асферизируемого слоя:

$$h = f(m, \Delta q, A, c, t),$$

- где  $h$  — толщина наносимого слоя;
- $m$  — масса осаждаемого на приемной поверхности подложки конденсата;
- $\Delta q, c$  — характеристики тепловой энергии конденсата;
- $A$  — плотность распределения дополнительных источников нагрева;
- $t$  — время воздействия дополнительных факторов нагрева.

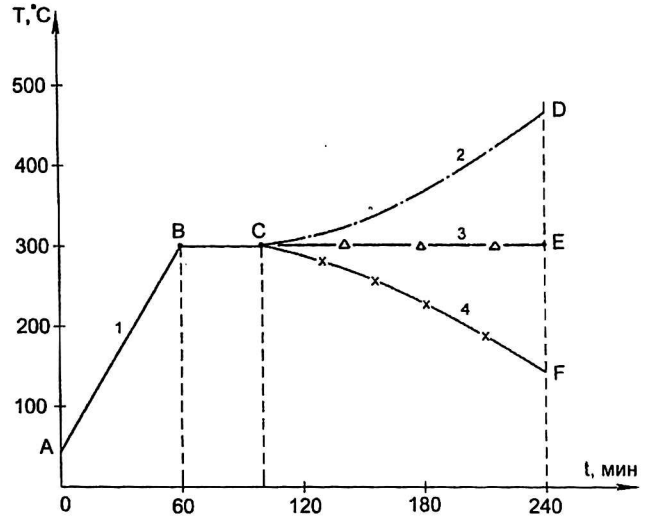


Рис. 2. Временная диаграмма температурного состояния оптического элемента в процессе нанесения коррекционного слоя:  
1 — участок ABC; 2 — участок CD;  
3 — участок CE; 4 — участок CF

При этом целесообразно заставить стабилизировать в определенных пределах скорость испарения материала, а следовательно, и температуру испарителя. В этом случае аналитическую зависимость термообработки (температуры, обеспечиваемой регулируемым электронагревателем) можно представить в виде

$$T = T_h \left( 1 - k \frac{h}{h_{\max}} \right), \quad (1)$$

- где  $T$  — температура термообработки подложки;
- $T_h$  — температура нагрева подложки перед нанесением асферизирующего слоя, °C;
- $h$  — контролируемая при нанесении толщина асферизирующего слоя, возрастающая от 0 до  $h_{\max}$ , мкм;
- $h_{\max}$  — максимальная асферичность изготавливаемой поверхности, т. е. наибольшее отступление асферической поверхности от ближайшей сферы, мкм.

Из рассмотрения аналитической зависимости (1) и диаграммы температурного состояния подложки (см. рис. 2) в процессе вакуумной асферизации следует, что чем выше скорость конденсации (скорость наращивания слоя), тем быстрее необходимо снижать температуру, зада-

ваемую подложке регулируемым электронагревателем с тем, чтобы при формировании асферирующего слоя поддерживались квазиизотермические условия.

Для каждого конкретного пленкообразующего материала существует свое оптимальное значение температуры, которое способствует формированию прочного слоя за счет достаточной поверхностной подвижности молекул осаждаемого материала, а также взаимной диффузии материалов слоя и подложки. Эту температуру целесообразно принимать как начальную  $T_h$ . Наиболее благоприятным режимом термообработки подложки с наносимым слоем является режим, сводящий к минимуму действие термических градиентов по толщине асферируемого слоя. При вакуумной асферизации основным технологическим параметром является наибольшее отступление  $h_{\max}$  асферической поверхности от ближайшей сферы, задаваемое расчетом. Техпроцесс построен таким образом, что оператор контролирует при нанесении слоя его толщину  $h$  в зоне асферируемой детали, соответствующей расчетному параметру  $h_{\max}$ . Процесс нанесения прекращается в тот момент, когда контролируемая толщина слоя достигает расчетной величины, т. е.  $h = h_{\max}$ .

Разработанная методика позволяет подбирать обоснованные условия для получения асферирующих слоев оптимального качества.

Для случая вакуумной асферизации оптических элементов из германия аналитическая зависимость (1) принимает вид:

$$T = 300 \cdot \left( 1 - \frac{2}{3} \frac{h}{h_{\max}} \right).$$

### Заключение

Достигнутый на предприятии уровень развития вакуумной асферизации дает возможность использования метода для формирования оптических преломляющих элементов ИК-диапазона спектра. При этом могут быть обеспечены следующие технологические показатели:

диаметр оптических элементов — от 30 до 200 мм;  
асферичность — до 30 мкм;  
градиент асферичности — до 10 мкм/мм;  
крутизна выпуклых поверхностей — до 20°,  
вогнутых поверхностей — до 40°;  
точность формообразования в угловой мере (по углу отклонения нормалей) —  $\alpha \leq 5''$ ;  
производительность асферизации — до 10 мкм/ч.

Технологический процесс разработан применительно к промышленному вакуумному оборудованию, широко используемому в оптической отрасли для нанесения оптических вакуумных покрытий.

Рассматривая перспективы развития метода вакуумной асферизации, необходимо указать следующие направления исследований:

поиск и исследование новых оптических материалов, методов и средств их нанесения в вакууме;

разработка принципиальных вопросов технологии управляемого нанесения в вакууме слоев с изменяющимися по заранее рассчитанному закону показателем преломления в целях создания градиентной оптики — эквивалента асферической оптики [3];

получение качественно новых характеристик, расширяющих коррекционные параметры оптических систем за счет введения оптических элементов, содержащих комбинацию асферических и градиентных слоев.

### Литература

1. 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: Отчет по НИР ТТ10-51-87. Красногорск, 1989.
2. Крючков В. Г. Вакуумная асферизация. Современные достижения. Проблемы и перспективы развития: Аналитический обзор по отечественным и зарубежным материалам за 1980—1990 гг. — М.: НТЦ "Информтехника", 1991.
3. Сенник Б. Н. Технологические процессы изготовления точных градиентных и асферических оптических элементов: Дис. — М., 2002.

## Vacuum aspherization of high-precise optical elements of IR facilities

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

*The physical conception is represented and at the base of the said conception the model of control of dynamics of the thermal and physical phenomena taking place during effecting vacuum aspherization has been developed. This model was experimentally approved, and in practice it provides forming the solid, free from inner stresses aspherizing layers possessing the equal-weights structural state. The said layers are optically homogeneous and have the coefficient of refraction stable in time.*