

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ

студент гр. 113122 Т.А. Перепёлкина¹, канд. техн. наук,
доцент Р.В. Фёдорцев¹, канд. техн. наук, директор
Н.С. Хомич², ассистент А.Ю. Луговик¹

¹ Белорусский национальный технический университет
² РУП «Полимаг»

Первое упоминание о преимуществах применения оптических деталей с прецизионными асферическими поверхностями в различных приборах относится к XVII в. Оно встречается в работах таких учёных, как Р. Декарт, И. Ньютон, Кассегрен и Грегори. В наше время исследованиями в области обработки и контроля асферических поверхностей занимались М.Н. Семибратов, М.М. Русинов, Л.С. Цесник, О.Г. Карлин и др. [1].

Асферические поверхности способствуют улучшению качества изображения и повышению оптических характеристик систем за счёт увеличения *поля зрения* и *светосилы систем* (преимущественно глубокие поверхности второго порядка, отступление от сферы которых составляет десятые доли миллиметра); *коррекции аберраций систем* (обычно одна-две поверхности высокого порядка с малым отступлением от плоскости или сферы); *сокращения числа линз, габаритных размеров и массы приборов* [2].

Различают три вида асферических поверхностей: эллипсоидные, параболоидные и гиперболоидные. Все они находят широкое применение в микроскопах, высококачественных телескопах с отражательным объективом, прецизионных оптических коллиматорах спектрорадиометров, работающих в диапазоне длин волн 0,4...15 мкм, а также ряде других приборов и систем космической и ракетной техники. Так, например, эллипсоидные поверхности используются в системах накачки оптических квантовых генераторов (ОКГ) – лазеров, параболоидные и гиперболоидные – в оптических координаторах тепловых головок самонаводящихся ракет, поверхностях высших порядков в объективах заатмосферных приборов и объективах любительских фотоаппаратов.

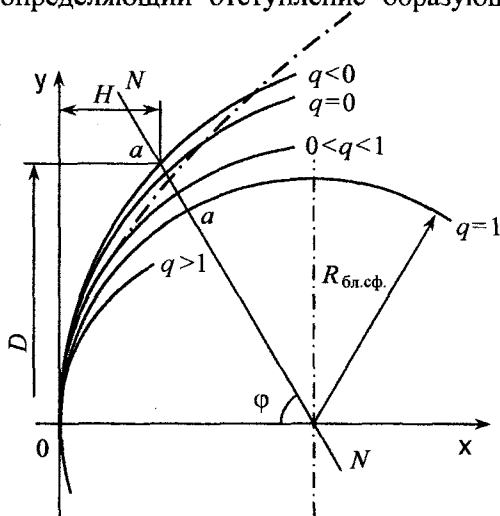
Наибольшее распространение в оптических приборах получили *параболоидные поверхности второго порядка* вследствие наличия простых методов их изготовления и контроля.

В современных оптических системах *наблюдательных и фотографических приборов* применяются асферические поверхности, расчётное значение заданной точности которых составляет $N = 2 \dots 4$ и $\Delta N = 0,2 \dots 0,5$, при этом погрешность обработки должна составлять не более десятых и сотых долей микрометров. Асферические поверхности оптических деталей *конденсаторных и сканирующих систем* должны обеспечивать сведение световой энергии в изображение точки с пятном рассеивания размеров $0,05 \dots 0,5$ мм, погрешность обработки в этом случае достигает нескольких десятков микрометров. Глубокие тонкостенные отражатели параболической и эллипсоидной формы для *прожекторов и кинопроекторных аппаратов* выпускают серийно объёмом 1,2 млн. шт. в год. Они имеют пятно рассеивания размером около 1 мм.

Семейство кривых второго порядка, отнесённое к вершине как к началу координат, определяется уравнением второй степени

$$y^2 - 2px + qx^2 = 0,$$

где p – некоторое постоянное число; q – параметр асферичности, определяющий отступление образующей кривой от окружности



ближайшей сферы радиуса $R_{\text{бл.сф.}}$, проходящей через начало координат (рис.1).

При различных значениях q образуются разные кривые:

$q = 1$ – окружность,

$0 < q < 1$ – эллипс,

$q = 0$ – парабола,

$q < 0$ – гипербола,

$q > 1$ – сплюснутый эллипс. Штрихпунктирной линией показан один из возможных профилей поверхности высокого порядка.

Рис. 1. Профильные кривые поверхностей второго порядка

Чем больше асферичность, тем больше требуется технологических переходов, тем труднее обработка и меньше вероятность получения поверхности с заданной точностью. Отражающие поверхности должны обрабатываться в 4 раза точнее аналогичных преломляющих.

Параметры поверхности определённого профиля характеризуются заданным диаметром D и соответствующей ему высотой сегмента H . При увеличении отношения H/D возрастают трудности обработки и контроля поверхности.

При отступлениях от ближней сферы менее 50 мкм обработку асферической поверхности можно ограничить только полированием [1].

Если отступления достигают 150 мкм, то необходимо многопереходное шлифование и полирование поверхности заготовки.

Если отступления от сферы более 150 мкм и отношение H/D велико, то технологически целесообразно применять асферическую заготовку.

Для измерения формы асферических поверхностей могут быть применены механические (контактные) и оптические (бесконтактные) методы контроля. К механическим методам и приборам, служащим для определения формы асферических поверхностей, относятся: скользящий кольцевой сферометр, вкладные кольца и сферы, контактный полярный компаратор, выпуклые и вогнутые шаблоны. К оптическим методам можно отнести: теневой метод Фуко и Максудова, теневого сечения Цесника, измерение углов касательных к поверхности, автоколлимационные методы А.Ш. Шахвердова и М.М. Русинова по измерению сагиттальных и меридиональных радиусов кривизны, метод Ж. Хайда, интерференционный метод Тваймана–Грина, Пуряева–Кривовяза и др. [3].

Измерение радиусов кривизны и формы асферических поверхностей на сегодняшний день представляет определённые технологические трудности. В основном это связано с необходимостью применения на финишных операциях полирования дорогостоящего контрольно-измерительного оборудования. Для большинства отечественных предприятий оптической промышленности приобретение современных интерферометров стоимостью порядка 150000... 250000 \$ это не представляется возможным. В результате на производстве освоен выпуск только оптических деталей с асферическими поверхностями второго порядка в виде конденсорных линз и

автомобильных отражателей (рефлекторов), промежуточный контроль рабочих поверхностей которых на стадии шлифования осуществляется скользящими сферометрами типа ИЗС-7, а окончательный контроль после полирования сводится к визуальной оценке состояния поверхности на предмет наличия ласин и царапин, а также посторонних включений в виде мелких камней и пузырей воздуха.

Тем не менее на сегодняшний день наиболее точным и эффективным методом контроля асферических поверхностей второго порядка считается интерференционный – с применением оптических приборов, построенных по схеме Майкельсона и усовершенствованных в дальнейшем Д.Т. Пуряевым и Л.М. Кривовязом. Измерение по данному методу позволяет наблюдать полную интерференционную картину на выпуклых и вогнутых эллиптических, гиперболических и параболических проверяемых поверхностях и позволяет проводить соответствующую их количественную и качественную оценку.

В качестве примера на рис.2 приведена автоколлимационная система для контроля выпуклой гиперболической поверхности [4]. Основными оптическими узлами и элементами интерферометра являются: монохроматический источник света 1 (He-Ne лазер), объектив коллиматора 2, светоделительная пластинка 3, плоское эталонное зеркало 4, объектив 5, вогнутое сферическое зеркало 7, телескопические лупы 8, 9, 10 и ПЗС-матрица 11, связанная посредством интерфейса с монитором РС. В отличие от схемы Тваймана здесь в рабочую ветвь интерферометра введена автоколлимационная система, составленная из сферического (или плоского) зеркала 7 с отверстием в центре и зеркала 6 с контролируемой асферической поверхностью.

В работе интерферометра использовано известное свойство поверхностей второго порядка идеальной формы, сущность которого заключается в следующем. Точечный источник света, помещенный в одном из геометрических фокусов поверхности F_1 , идеально изображается в другом фокусе F_2 , который является центром сферической волны.

Если испытуемая поверхность имеет идеальную форму, а центр кривизны C сферического зеркала 7 и задний фокус F' объектива 7 совмещены с геометрическими фокусами F_1 и F_2 , то волновой фронт, выходящий из рабочей ветви, должен быть плоским.

Волновой фронт ветви сравнения, образованный отраженными лучами от плоского эталонного зеркала 6, интерферируя с волновым фронтом рабочей ветви, создает интерференционную картину, рассматриваемую в поле зрения ПЗС-матрицы 11. По характеру интерференционной картины судят о качестве контролируемой поверхности.

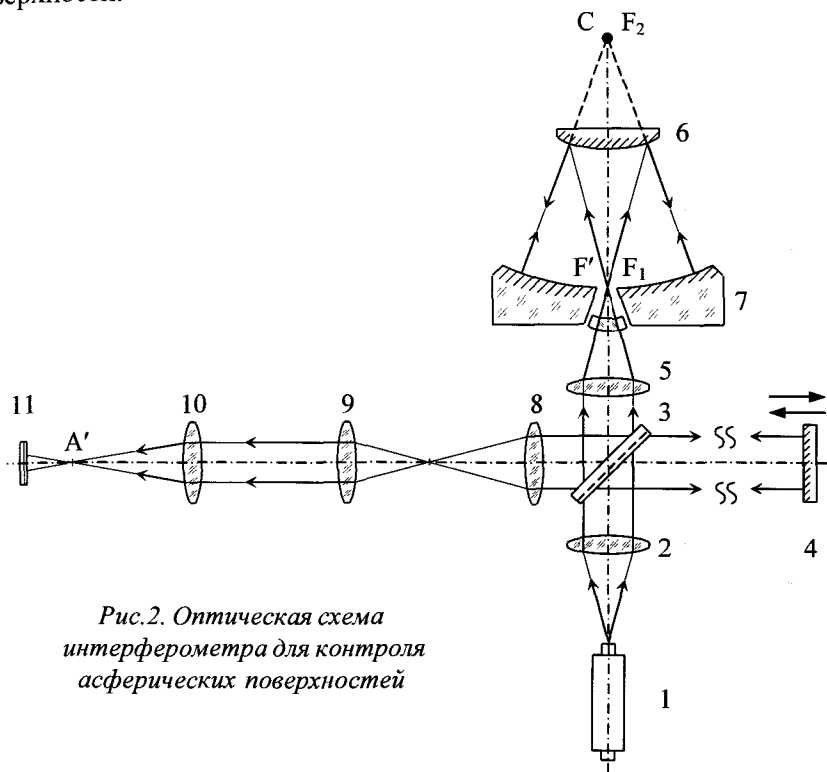


Рис.2. Оптическая схема интерферометра для контроля асферических поверхностей

Лучи дважды отражаются от контролируемой поверхности, в результате чего чувствительность интерференционного метода повышается вдвое. Вместе с тем двойное отражение может значительно уменьшить интенсивность рабочего пучка и контраст картины, поэтому на контролируемую поверхность необходимо наносить зеркальное покрытие. У объектива 7 требуется хорошее исправление сферической аберрации и выполнение условия синусов.

Интерферометр снабжен четырьмя сменными объективами с апертурой 0,5; 0,4; 0,3 и 0,2 и пультом управления для осуществле-

ния юстировочных движений: наклона, перемещений в трех взаимно перпендикулярных направлениях, вдоль оси кареток с контролируемой поверхностью и сферическим зеркалом, поступательного перемещения объектива 7 и эталонного зеркала 6 и наклона последнего. При незначительных схемных перестройках прибор позволяет контролировать выпуклые и вогнутые эллиптические, гиперболы и параболические поверхности.

На сегодняшний день данный метод контроля широко используется в Европе. Немецкие фирмы Zygo и OptoTech производят интерферометры, обеспечивающие достаточно высокую точность контроля асферических поверхностей. К наиболее распространённым моделям интерферометров относятся VeriFire AT™ и VeriFire MTS™ (рис.3) [5, 6]. Эти интерферометры появились на нашем рынке сравнительно недавно, в феврале 2003 года. Цена таких интерферометров составляет 130000 – 200000 \$.



*Рис.3. Внешний вид интерферометра VeriFire AT
фирмы Zygo (Германия)*

VeriFire AT™ имеет следующие основные характеристики:

- максимальный диаметр исследуемого образца – 152 мм;
- диаметр эталона – сканирование 102 мм;

- сканирование происходит по горизонтали и вертикали;
- диапазон измерения фокусного расстояния 6:1;
- фокусное расстояние до зрачка –800 мм /+1600 мм;
- выходной зрачок от 102 мм.

Интерферометр VeriFire MTS™ отличается от предыдущего большим разрешением.

Как правило, интерферометры такого класса устанавливают в специализированных помещениях, изолированных от воздействия различных факторов, связанных с работой технологического оборудования (случайного попадания абразивных материалов, СОЖ, вибраций и перепада температур), поскольку подобные факторы могут привести к порче интерферометра и получению неверной интерференционной картины с контролируемого образца.

Использованные источники

1. Заказов, Н.П., Горелик, В.В. Изготовление асферической оптики. М.: Машиностроение, 1978. – 248 с.
2. Технология оптических деталей: учебник для оптических специальностей технических вузов / Под ред. М.Н. Семибратова – М.: Машиностроение, 1978. – 415 с.
3. Афанасьев, В.А. Оптические измерения: учебник для студентов вузов специальности «Оптические приборы и спектроскопия». – М.: Недра, 1968. – 255 с.
4. Лабораторные оптические приборы: учебное пособие для приборостроительных и машиностроительных вузов / Г.И. Федотов [и др.]; под ред. Л.А. Новицкого. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – 448 с.
5. www.optotech.com. Opto Technology, Inc., 2004.
6. www.zygo.com. Optical Metrology & Fabrication. World-Standard Interferometric Metrology Systems. Precision Optical Design, Fabrication, Coating, and Assembly.