

## **Оптическая система двухдиапазонного интерферометра для контроля формы выпуклых сферических поверхностей диаметром до 600 мм**

© Н.Л. Лазарева, Д.Т. Пуряев, О.В. Рожков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Предложена принципиально новая оптическая система двухдиапазонного интерферометра для бесконтактного контроля формы выпуклых сферических поверхностей диаметром до 600 мм. В качестве объектива, формирующего сферический рабочий волновой фронт, используется крупногабаритная линза, одна из поверхностей которой асферическая. Для расширения диапазона контролируемых поверхностей эта линза поворачивается вокруг вертикальной оси; при этом вносимая линзой волновая aberrация не превышает 0,005 длины волны He-Ne-лазера. Эталонный сферический волновой фронт формируется лучами, отраженными от выпуклой поверхности менисковой линзы, которая совместно куб-призмой образует оптическую систему, полностью исправленную на сферическую aberrацию.*

**Ключевые слова:** интерферометр, контроль, форма оптической поверхности, выпуклая сферическая поверхность.

Одна из актуальных проблем оптического приборостроения заключается в разработке новой аппаратуры для контроля формы выпуклых поверхностей крупногабаритных оптических деталей. В частности, контроль формы выпуклых сферических поверхностей объективов, состоящих из линз диаметром до 600 мм, до сих пор выполняют по частям контактным методом переналожений малого пробного стекла [1]. Допустимые местные, зональные и астигматические погрешности форм поверхностей крупногабаритных линз составляют величины порядка 0,1...0,3 интерференционной полосы. Поэтому аттестацию формы таких поверхностей следует проводить за один прием.

Бесконтактный контроль формы выпуклых сфер диаметром до 600 мм за один прием может обеспечить двухдиапазонный интерферометр ДВИН-600, оптическая система которого описана в работе [2]. Однако его применение затруднено ввиду громоздкой центральной линзовой системы, являющейся ключевым элементом этого устройства. Поскольку общая масса четырех линз данной системы интерферометра ДВИН-600 составляет 350 кг, она подвержена значительным весовым деформациям. Эталонные поверхности интерферометра ДВИН-600 принадлежат двум крайним линзам центральной

линзовой системы, поэтому их форма также искажается. В результате эталонный волновой фронт теряет осевую симметрию, что может быть истолковано как несимметричное искажение формы контролируемой поверхности.

Цель настоящей работы состоит в разработке новой оптической системы интерферометра для бесконтактного контроля формы выпуклых сферических поверхностей линз диаметром до 600 мм с широким диапазоном значений радиусов кривизны.

Анализ достоинств и недостатков интерферометра ДВИН-600 позволил сформулировать основные требования к оптической системе нового двухдиапазонного интерферометра:

1) центральная линзовая система при диаметре не менее 600 мм должна быть однолинзовой и обеспечивать формирование строго гомоцентрического пучка лучей как в прямом, так и в обратном ходе лучей;

2) в целях расширения диапазона типоразмеров контролируемых поверхностей вершины гомоцентрических пучков лучей (входящего в центральную однолинзовую систему и выходящего из нее) должны быть удалены от ее первой и последней поверхностей на различные расстояния;

3) между контролируемой и эталонной поверхностями интерферометра должно располагаться минимально возможное количество оптических элементов, которые могут повлиять на форму волнового фронта, сформированного центральной однолинзовой системой;

4) рабочий волновой фронт, сформированный центральной однолинзовой системой, перед началом работы на интерферометре должен пройти надежную аттестацию.

Предлагаемая авторами данной работы новая оптическая система двухдиапазонного интерферометра (рис. 1) отвечает сформулированным выше требованиям.

Рассмотрим принцип работы интерферометра. Монохроматический световой пучок, выходящий из He-Ne-лазера 1 (длина волны  $\lambda = 0,6328$  мкм), фокусируется объективом 2 в плоскость точечной диафрагмы 3 (точка А — точечный источник интерферометра). Далее световой пучок проходит через куб-призму 4 и отрицательную менисковую линзу 5, конструкция которой такова, что ее вогнутая поверхность компенсирует сферическую абберацию, вносимую куб-призмой. На выпуклую поверхность этой линзы падает гомоцентрический пучок, вершина которого совмещена с центром  $C_3$  кривизны этой поверхности. Отраженные от выпуклой поверхности линзы лучи формируют эталонный сферический волновой фронт. Таким образом, выпуклая поверхность линзы выполняет роль эталонной Э поверхности в интерферометре. Лучи, прошедшие через линзу, образуют сферический

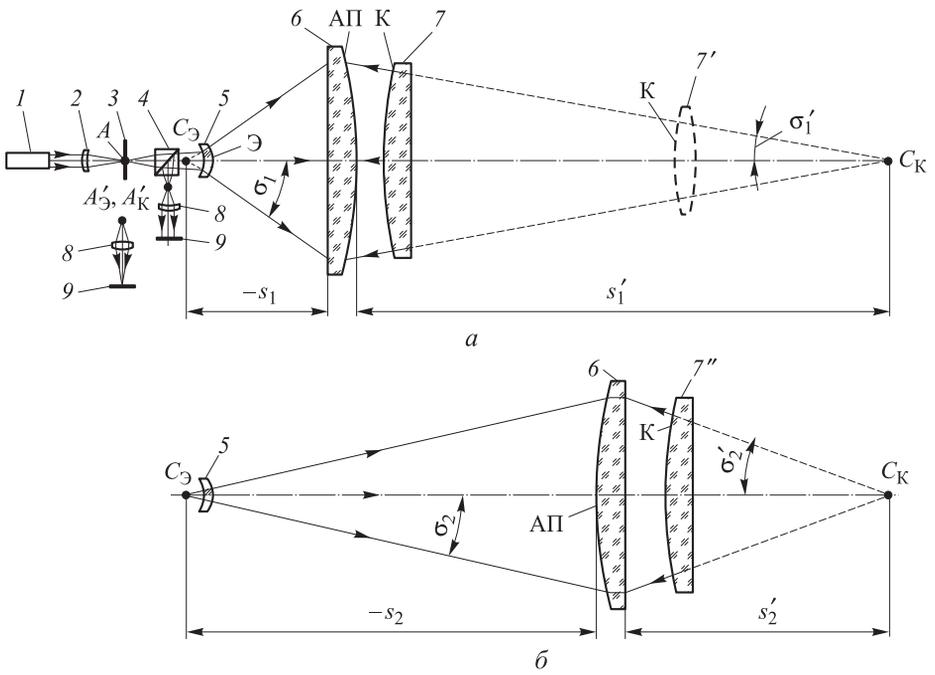


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра

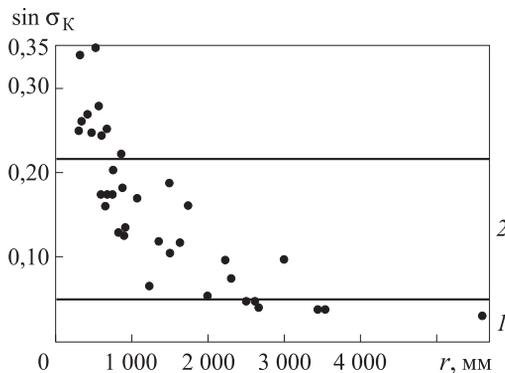
волновой фронт, который направляется к центральной однолинзовой системе б, предназначенной для формирования рабочего сферического волнового фронта. Поэтому данная система полностью исправлена на сферическую aberrацию. В результате в сторону контролируемой К поверхности детали 7 направляется сходящийся строго гомоцентрический пучок лучей. Контролируемая поверхность детали 7 установлена таким образом, что ее центр (точка  $C_K$ ) кривизны совмещен с вершиной гомоцентрического светового пучка, сформированного центральной однолинзовой системой. В таком случае лучи, отраженные от поверхности К, повторяют свой путь в обратном направлении.

На рис. 1, а и б показаны различные варианты расположения контролируемой детали относительно центральной однолинзовой системы, которая может поворачиваться вокруг вертикальной оси на  $180^\circ$ . На рис. 1, а центральная однолинзовая система установлена таким образом, что ее предметный отрезок ( $-s_1$ ) короткий, а расстояние до вершины выходящего пучка лучей ( $s'_1$ ) длинное. В таком случае контролируемые детали могут располагаться в позициях 7 или 7' (см. рис. 1, а). Если центральная однолинзовая система повернута на  $180^\circ$  (см. рис. 1, б), то предметный отрезок ( $-s_2$ ) центральной однолинзовой системы длинный, а расстояние до вершины выходящего пучка лучей ( $s'_2$ ) короткое. Тогда контролируемая деталь будет располагаться в позиции 7''.

При наличии погрешности формы поверхности К рабочий волновой фронт деформируется, что проявляется в виде искривлений полос на интерференционной картине, которая образуется в результате взаимодействия рабочего и эталонного волновых фронтов. Полученная интерференционная картина проецируется объективом  $\delta$  на координатный приемник излучения  $\theta$ .

Во время предварительной настройки интерферометра необходимо наблюдать автоколлимационные точки  $A'_\theta$  и  $A'_\kappa$ , полученные при отражении лучей от эталонной Э и контролируемой К поверхностей. Для попеременного наблюдения автоколлимационных точек и интерференционной картины здесь предусмотрена перефокусировка объектива  $\delta$  регистрирующей части интерферометра.

Разработка оптимальной конструкции центральной однолинзовой системы началась с построения точечной диаграммы (рис. 2), на которой показана связь между значениями радиусов  $r_\kappa$  кривизны и числовых апертур  $\sin \sigma_\kappa$  реально изготавливаемых в промышленности выпуклых сферических поверхностей. Из данных диаграммы следует, что числовые апертуры лежат в пределах  $0,03 < \sin \sigma_\kappa < 0,35$ , а радиусы кривизны —  $300 \text{ мм} < r_\kappa < 5650 \text{ мм}$ . Для охвата контролируемых поверхностей с различными типоразмерами было принято решение образовать два диапазона: низкоапертурный 1 и высокоапертурный 2 (на рис. 2 номера диапазонов указаны цифрами справа). В первый диапазон попадают контролируемые поверхности с числовыми апертурами  $\sin \sigma_\kappa < 0,05$ ; второй диапазон должен охватывать контролируемые поверхности, для которых  $0,05 < \sin \sigma_\kappa < 0,35$ . Как показано на рис. 2,



**Рис. 2.** Вероятность проведения контроля выпуклых сферических поверхностей, реально изготавливаемых в промышленности, с различными типоразмерами по диапазонам: 1 — низкоапертурный; 2 — высокоапертурный

низкоапертурный диапазон используется для контроля поверхностей с радиусами кривизны, значения которых превышают 2 000 мм. Реально таких поверхностей пока всего шесть. Остальные поверхности следует контролировать в высокоапертурном диапазоне.

Расчеты вариантов центральной однолинзовой системы диаметром 600 мм проведены с учетом следующих требований:

- 1) максимально возможная технологичность;

2) минимальная остаточная волновая aberrация, вносимая в рабочий волновой фронт.

Известно, что при отрицательном значении линейного увеличения одиночная линза может быть исправлена на сферическую aberrацию только в том случае, если одна из ее поверхностей будет асферической. Поэтому расчеты вариантов такой линзы выполнены с учетом минимально возможной асферичности при достижении идеальной коррекции сферической aberrации. Во внимание также принимали физико-химические свойства материалов для изготовления центральной однолинзовой системы. Были рассмотрены варианты использования кварцевого стекла и различных марок бесцветного оптического стекла.

Проведенные исследования показали, что на линзе диаметром 600 мм можно получить практически идеальную aberrационную коррекцию при минимальной асферичности, если использовать материал с большим значением показателя преломления. Важную роль здесь играет линейное увеличение, значение которого также влияет на степень aberrационной коррекции и асферичность одной из поверхностей линзы.

После анализа данных, полученных в результате исследований, разработан оптимальный вариант центральной однолинзовой системы: это двояковыпуклая линза из стекла ТФ5 со световым диаметром 620 мм. При контроле низкоапертурных сферических поверхностей (см. рис. 1, а) асферическая поверхность (АП) центральной однолинзовой системы обращена в сторону контролируемой поверхности К. Вершина создаваемого этой линзой гомоцентрического пучка лучей удалена на расстояние  $s'_1 = 6\ 010$  мм. Центр  $S_3$  кривизны эталонной поверхности интерферометра в таком случае удален от сферической поверхности линзы на расстояние  $s_1 = -1\ 500$  мм. Числовая апертура рабочего пучка лучей, направленного на контролируемую поверхность, составляет  $\sin \sigma'_1 = 0,05$ .

При контроле высокоапертурных сферических поверхностей (см. рис. 1, б) центральную однолинзовую систему устанавливают таким образом, чтобы ее АП была обращена в сторону эталонного мениска 5. Тогда расстояние  $s_2 = -6\ 010$  мм, а удаление вершины созданного линзой б гомоцентрического пучка  $s'_2 = 1\ 500$  мм. Числовая апертура рабочего пучка лучей, падающего на контролируемую поверхность,  $\sin \sigma'_2 = 0,21$ .

Разработанная центральная однолинзовая система не способна обеспечить за один прием контроль формы выпуклых сфер, числовые апертуры которых  $\sin \sigma_K > 0,21$ . Поэтому в данном случае приходится ограничивать второй диапазон значением числовой апертуры 0,21

(верхняя граница второго диапазона обозначена на рис. 2 горизонтальной линией). В этот диапазон пока попадают еще 20 реальных выпуклых сферических поверхностей, изготавливаемых в промышленности. Остальные 10 поверхностей (обозначающие их точки лежат выше горизонтальной линии, проходящей на уровне значения  $\sin \sigma_k = 0,21$ ) можно проконтролировать на предлагаемом интерферометре по частям.

Следует отметить, что в любой из позиций (см. рис. 1, а и б) центральная однолинзовая система формирует строго сферические волновые фронты (остаточная волновая aberrация не превышает  $0,005\lambda$ , где  $\lambda = 0,6328$  мкм — длина волны He-Ne-лазера).

Асферическая поверхность центральной однолинзовой системы описывается уравнением, содержащим члены высшего порядка, а максимальное отступление точек асферической поверхности от ближайшей сферы составляет 280 мкм. Масса центральной однолинзовой системы составила 93 кг, что практически в 4 раза меньше массы четырехлинзовой системы интерферометра ДВИН-600. Поэтому при горизонтальной ориентации оси центральной однолинзовой системы искажение сформированного ею рабочего волнового фронта маловероятно. Важно, что форму рабочего волнового фронта всегда можно проверить на интерферометре, используя в качестве аттестационной поверхности стандартное пробное стекло.

Очевидно, что для формирования центральной однолинзовой системой строго сферического рабочего волнового фронта необходимо исправить на сферическую aberrацию фокусирующий объектив 2 интерферометра и систему, состоящую из куб-призмы 4 и менисковой линзы 5 (см. рис. 1).

В качестве объектива, фокусирующего лазерное излучение, предлагаем использовать реверсивный объектив, схема которого с ходом лучей представлена на рис. 3. Реверсивный объектив состоит из плосковогнутой линзы 1 и двухлинзового компонента 2 и 3. При диаметре входящего пучка 0,8 мм реверсивный объектив формирует гомоцентрический пучок лучей с числовой апертурой  $\sin \sigma'_{06} = 0,165$ . Волновая aberrация фронта, выходящего из объектива, не превышает  $0,1\lambda$ . Задний фокальный отрезок объектива достигает 37 мм, что удобно для его использования в интерферометре.

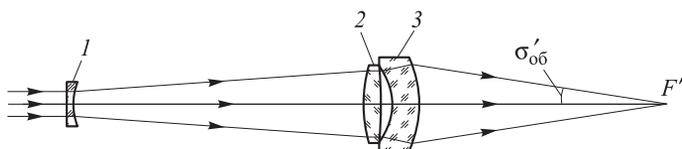


Рис. 3. Схема фокусирующего объектива

Длина ребра куб-призмы составляет 25 мм. Очевидно, что такая призма вносит значительную волновую aberrацию. Для компенсации этой aberrации используется вогнутая сферическая поверхность менисковой линзы диаметром 50 мм из стекла К8, как это описано в работе [2]. В результате aberrация волнового фронта, который направляется в сторону линзы, не превышает  $0,004\lambda$ . Числовая апертура светового пучка, выходящего из линзы, увеличивается в  $n$  раз по отношению к числовой апертуре пучка, проходящего через куб-призму ( $n$  — показатель преломления материала менисковой линзы). В данном случае менисковая линза изготовлена из стекла К8, поэтому числовая апертура пучка, направленного в сторону центральной однолинзовой системы, составляет 0,25.

Анализ достоинств и недостатков предложенной оптической системы интерферометра на базе центральной однолинзовой системы позволяет сделать следующие выводы.

1. Новая оптическая система двухдиапазонного интерферометра предназначена для бесконтактного контроля за один прием формы выпуклых сферических поверхностей диаметром до 600 мм с радиусами кривизны до 6 000 мм и числовыми апертурами до 0,21. При этом отсутствует экранирование центральной зоны контролируемой поверхности.

2. Эталонный волновой фронт формируется выпуклой поверхностью менисковой линзы диаметром 50 мм из стекла К8, что обеспечивает возможность получения идеального сферического волнового фронта.

3. Предложенный вариант центральной однолинзовой системы имеет преимущества перед четырехлинзовым вариантом благодаря значительному снижению массы, что влечет за собой уменьшение влияния ее весовой деформации на форму рабочего волнового фронта.

4. К недостаткам центральной однолинзовой системы можно отнести то, что отступление асферической поверхности от ближайшей сферы при диаметре 620 мм достигает 280 мкм. Это обстоятельство не позволяет существенно увеличивать диаметр центральной однолинзовой системы ввиду того, что увеличение диаметра повлечет за собой увеличение асферичности и, как следствие, возрастут технологические трудности в изготовлении асферической поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др. *Справочник технолога-оптика*. 2-е изд., перераб. и доп. Санкт-Петербург, Политехника, 2004, 679 с.
- [2] Пуряев Д.Т., Лазарева Н.Л., Иконина А.В. *Оптические системы двухлучевых интерферометров*. В 2 ч. Ч. 2. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005, 27 с.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т., Рожков О.В. Оптическая система двухдиапазонного интерферометра для контроля формы выпуклых сферических поверхностей диаметром до 600 мм. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/835.html>

**Лазарева Наталия Леонидовна** родилась в 1944 г., окончила МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 48 научных работ в области методов и приборов для высокоточного контроля формы оптических поверхностей. e-mail: av72399@mail.ru

**Пуряев Даниил Трофимович** родился в 1934 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1958 г. Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана, заслуженный изобретатель РСФСР, лауреат премии Совета Министров СССР. За научные достижения в области оптического приборостроения награжден медалью им. академика С.Э. Фриша. Автор 285 научных работ в области оптического приборостроения.

**Рожков Олег Владимирович** родился в 1938 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заслуженный деятель науки РФ, член оптического общества им. Д.С. Рождественского и Международного общества по оплотехнике (SPIE). Автор более 150 научных работ в области оптического приборостроения.