

КОНТРОЛЬ ВЫПУКЛЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОСЕВЫХ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ

© 2007 г. **Н. П. Ларионов**, канд. техн. наук; **А. В. Лукин**, доктор техн. наук; **А. А. Нюшкин**; **Р. Р. Ходжиев**
НПО “Государственный институт прикладной оптики”, г. Казань

Рассмотрены возможности контроля выпуклых асферических поверхностей с использованием осевых синтезированных голограмм в качестве оптических компенсаторов. Приведены различные схемы контроля, которые исследованы экспериментально и используются для технологического и аттестационного контроля асферических поверхностей линз и зеркал, изготавливаемых в опытном производстве НПО ГИПО.

Коды OCIS: 050.1970.

Поступила в редакцию 07.09.2006.

Оптические элементы с выпуклыми асферическими поверхностями находят применение в различных оптических системах. При этом параметры таких поверхностей изменяются в широких пределах по крутизне, асферичности, градиенту асферичности и световому диаметру. В ходе многолетней практики решения задачи контроля выпуклых асферических поверхностей нами был разработан и экспериментально исследован ряд схем контроля, базовые варианты которых приведены на рис. 1. Все они разработаны на основе использования осевых синтезированных голограммных оптических элементов (СГОЭ) в качестве оптических компенсаторов [1, 2]. Во всех этих схемах используются СГОЭ 2, структуры которых отображены на плоских поверхностях их подложек и обращены к точечному источнику света I .

В схеме на рис. 1а основным элементом является СГОЭ 2, у которого в качестве подложки используется плоскопараллельная пластина. При освещении СГОЭ точечным источником света I на выходе его формируется сходящийся пучок лучей, каждый луч которого распространяется вдоль соответствующего ему расчетного положения нормали к выпуклой асферической поверхности 3. После отражения от поверхности 3 лучи в автоколлимационном ходе формируют изображение I' , совпадающее с источником света I . Расстояние между СГОЭ 2 и вершиной контролируемой выпуклой поверхности 3 выбирается на стадии расчета голограммной структуры минимально возможным, чтобы свести к минимуму разницу световых диаметров выпуклой асферической поверхности и СГОЭ 2. Очевидно, что максимально возможный диаметр СГОЭ, который обеспечивает технология и имеющаяся аппаратура синтеза голограмм, является пределом максимально возможного диаметра контролируемых в данной схеме выпуклых асферических поверхностей. Максимально достижимая величина простран-

ственной частоты структуры голограммы ограничивает максимальную крутизну асферической поверхности, которая в данной схеме составляет величину порядка 7° . На рис. 2а представлена интерферограмма, полученная в интерферометре, собранном по этой схеме, при контроле на одной из конечных стадий формообразования выпуклого гиперboloида со световым диаметром 37 мм, асферичностью 21,1 мкм и крутизной $5^\circ 35'$. На этом рисунке интерферограмма, занимающая его центральную часть, соответствует апертуре испытываемой поверхности, а интерференционные полосы в наружной кольцевой части рисунка относятся к апертуре юстировочной голограммы, которая изготовлена концентрично с основным СГОЭ на одной с ним подложке. Она служит для юстировки СГОЭ как по углу, так и в продольном направлении, обеспечивая выведение точечного источника на его оптическую ось на расчетное расстояние от центра СГОЭ [3].

Интерферометр, собранный по схеме рис. 1б, обеспечивает контроль выпуклых асферических поверхностей 3 со значительно большей крутизной, чем в предыдущем случае. Это достигается за счет того, что в качестве подложки СГОЭ используется плосковыпуклая линза со сферической выпуклой поверхностью 4, которая обращена к выпуклой асферической поверхности 3 контролируемой детали. Вышедший из точечного источника света I гомоцентрический пучок лучей после дифракции на структуре голограммы 2 и преломления на сферической поверхности 4 трансформируется в сходящийся пучок лучей, каждый луч которого распространяется по соответствующей ему нормали к поверхности 3. После отражения от поверхности 3 этот пучок в автоколлимационном ходе лучей формирует изображение I' точечного источника света I . Расчет СГОЭ осуществляется при условии выбора минимально возможного расстояния между вершинами поверхностей 3 и 4. Максимально возможный

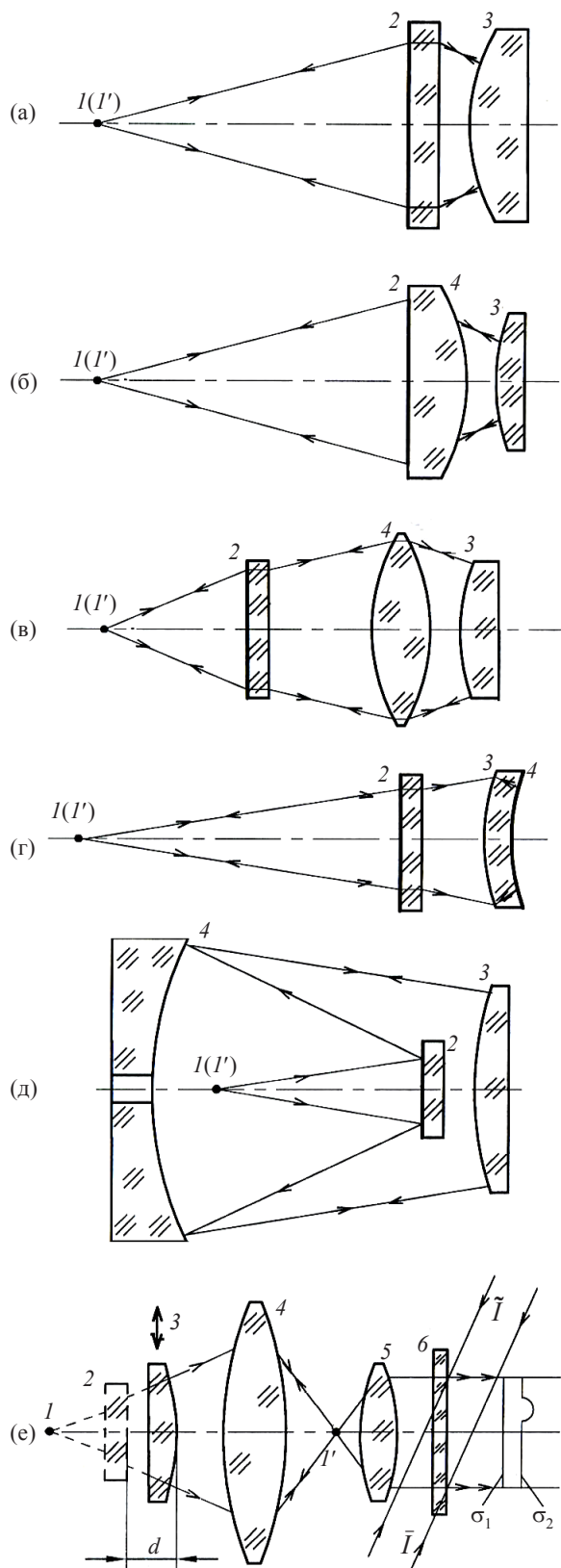


Рис. 1. Базовые варианты схем контроля выпуклых асферических поверхностей. I – точечный источник света, I' – автоколлимационное изображение источника света, 2 – СГОЭ-компенсатор, 3 – асферическая поверхность, 4 – вспомогательный оптический элемент, 5 – объектив, 6 – физическая голограмма, $\bar{I}$ и $\bar{I}'$ – параллельные пучки лучей, σ_1 – геометрический фронт волны сравнения, σ_2 – геометрический фронт объектной волны.

световой диаметр контролируемой поверхности 3 оценивается по максимально допустимому световому диаметру СГОЭ. На рис. 2б представлена интерферограмма, полученная при контроле по данной схеме выпуклого гиперboloида со световым диаметром 32 мм, асферичностью 11,7 мкм и крутизной 8°.

Интерферометр, собранный по схеме рис. 1в, обеспечивает контроль выпуклых асферических поверхностей с примерно такой же крутизной, как и схема на рис. 1б, но с гораздо большими световыми диаметрами. Это достигается за счет введения в схему одиночной положительной линзы 4, устанавливаемой между СГОЭ и контролируемой асферической поверхностью 3. Структура СГОЭ формируется на поверхности плоскопараллельной подложки. В этой схеме деталь с контролируемой выпуклой поверхностью устанавливается вблизи положительной линзы. Для этой схемы был проведен расчет СГОЭ для контроля выпуклого сплюснутого эллипсоида со световым диаметром 300 мм, асферичностью 31,7 мкм и крутизной 8°. В качестве положительной линзы была использована двояковыпуклая линза из стекла К8, радиусы кривизны сферических поверхностей которой одинаковые и равны 750 мм. При этом световой диаметр линзы равен 325 мм. У синтезированной голограммы 2 световой диаметр и максимальная пространственная частота равны соответственно 135 мм и 79 мм⁻¹. Однако применение данной схемы для контроля поверхностей с диаметром более 300 мм может вызвать затруднения из-за необходимости применения высокоточной линзы большого диаметра.

Применение рассмотренных схем (рис. 1а, 1б и 1в) для контроля выпуклых асферических поверхностей с крутизной свыше 25° ограничивается возможностью изготовления соответствующих синтезированных голограмм. Требования к ним значительно снижаются, если использовать схему, представленную на рис. 1г. Здесь вторая поверхность 4 детали с контролируемой выпуклой поверхностью 3 должна быть сферической или плоской с высоким оптическим качеством. На эту поверхность целесообразно нанести отражающее покрытие. При расчете СГОЭ закладывается требование, чтобы каждый луч пучка, вышедшего из точечного источника света I , после дифракции на СГОЭ 2 и преломления на поверхности 3 падал по нормали к поверхности 4. После отражения от поверхности 4 пучок лучей в обратном автоколлимационном ходе преломляется еще раз на поверхности 3, дифрагирует на синтезированной голограмме 2 и формирует изображение I' точечного источника света I . Данная схема обеспечивает возможность контроля выпуклой асферической поверхности с крутизной до 35° и асферичностью до 500 мкм. На рис. 2в пред-

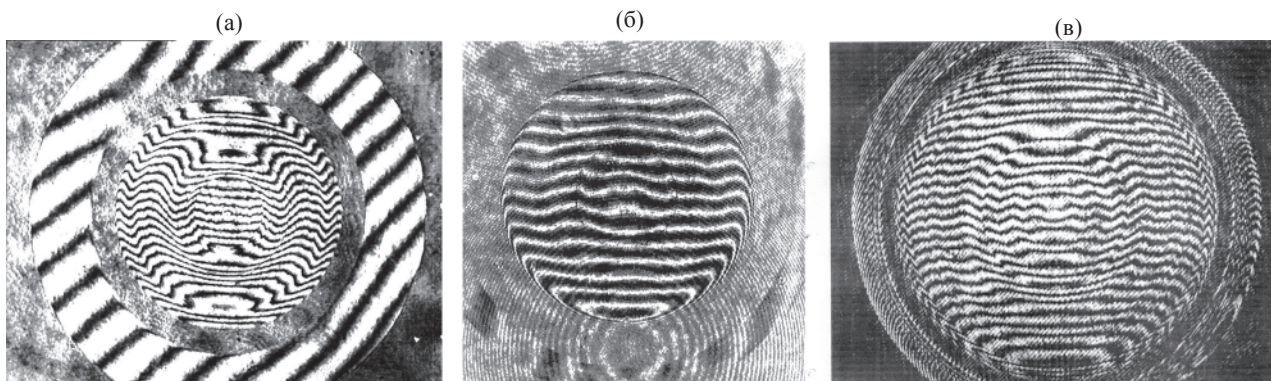


Рис. 2. Интерферограммы асферических поверхностей. а – схема рис. 1а, б – схема рис. 1б, в – схема рис. 1г.

ставлена интерферограмма, полученная на стадии доводки выпуклого парабооида диаметром 116 мм с асферичностью 230 мкм и крутизной 27° . Интерференционные полосы, занимающие центральную часть рисунка, относятся к апертуре испытуемой поверхности, на краю которой имеются два кольцевых бугорка высотой $\approx 0,5$ мкм. Устранение таких дефектов методом ретуши представляет для оптика-технолога весьма сложную задачу, требует от него особенно высокого мастерства. Интерференционные полосы в наружной кольцевой зоне рисунка соответствуют апертуре юстировочной голограммы, частота штрихов которой равна $\sim 1000 \text{ мм}^{-1}$. Она обеспечивает необходимую точность выставления точечного источника относительно центра СГОЭ на его оптической оси.

Схемы, представленные на рис. 1д и 1е, предназначены преимущественно для контроля выпуклых асферических поверхностей с большими световыми диаметрами (более 300 мм). В схеме, представленной на рис. 1д, в качестве вспомогательного элемента 4 используется вогнутое сферическое зеркало. СГОЭ работает в отраженном свете. Деталь с контролируемой асферической поверхностью 3 устанавливается вблизи СГОЭ с целью уменьшения экранирования центральной зоны контролируемой поверхности. При этом промежуток между СГОЭ и вершиной контролируемой поверхности 3 выбирается на стадии расчета СГОЭ таким, чтобы в процессе юстировки можно было обеспечить смещение контролируемой поверхности 3 в пределах допуска на ее параметр. При необходимости центральную (затененную) зону поверхности 3 можно проконтролировать по схеме, представленной на рис. 1а, применив для этого дополнительную синтезированную голограмму. Очевидно, что рассмотренная схема пригодна также для контроля деталей с отверстием в центральной зоне. В работе [4] также рассмотрена схема для контроля выпуклых гиперболических зеркал с отверстием в центральной

зоне на основе использования вспомогательного сферического зеркала и синтезированной голограммы, работающей в проходящем свете. Но в этой схеме, в отличие от схемы рис. 1д, не обеспечивается возможность контроля асферических поверхностей деталей без центрального отверстия.

В обеих схемах вспомогательное сферическое зеркало незначительно превосходит по световому диаметру испытуемую поверхность в отличие от схем контроля выпуклых асферических поверхностей второго порядка, построенных на основе использования свойств анаберрационных точек этих поверхностей [5]. Необходимость использовать вспомогательное сферическое зеркало высокого качества (это связано с двукратным отражением лучей от этого зеркала) приводит к увеличению стоимости изготовления крупногабаритных элементов с выпуклыми асферическими поверхностями. Очевидно, что его использование целесообразно в серийном производстве и экономически неэффективно при единичных заказах. С этой точки зрения альтернативой может служить схема, разработанная на основе совместного использования СГОЭ и физической голограммы, восстанавливающей обращенный волновой фронт [6, 7]. Принцип реализации этой схемы поясняет рис. 1е, где в качестве вспомогательного оптического элемента выступает положительная крупногабаритная линза 4. СГОЭ используется для изготовления физической голограммы 6. Расчет СГОЭ выполняется с учетом условия, что при освещении его точечным источником света I формируется волна, геометрический фронт которой на расстоянии d совпадает с теоретической формой выпуклой асферической поверхности 3. Очевидно, что процесс изготовления физической голограммы предшествует процессу контроля выпуклой поверхности.

Изготовление физической голограммы 6 осуществляется в отсутствие в позиции 3 контролируемой детали с выпуклой асферической поверхностью.

стью. Волна, сформированная СГОЭ, проходит линзу 4, объектив 5 и падает на фотопластинку, установленную в позицию 6. В качестве опорной волны используется плоская волна $\bar{I}$ (см. рис. 1е).

В процессе контроля деталь с выпуклой поверхностью устанавливается в позицию 3. В этом случае на голограмму 6 падают два параллельных пучка лучей $\bar{I}$ и $\bar{I}$, распространяющихся навстречу друг другу. При этом угол падения пучка $\bar{I}$ на голограмму 6 равен углу падения опорного пучка, использованного при записи голограммы 6. В результате этого голограмма 6 восстанавливает две волны, одна из которых является объектной с геометрическим волновым фронтом σ_1 , а другая – волна, обращенная по отношению к ней. Последняя из них проходит объективы 5 и 4 и падает на выпуклую поверхность 3; после отражения от этой поверхности она снова проходит объективы 4 и 5, а затем и физическую голограмму 6 в нулевом порядке. На рис. 1е этой волне соответствует геометрический волновой фронт σ_2 . Картина интерференции этих волн и служит для оценки состояния контролируемой поверхности 3. В данной схеме величина отрезка d выбирается близкой к расстоянию между СГОЭ и вершиной поверхности линзы 4, обращенной к этой голограмме. Благодаря этому необходимый световой диаметр линзы 4 незначительно превышает диаметр контролируемой поверхности 3. В связи с тем что физическая голограмма 6 осуществляет компенсацию остаточных aberrаций, вносимых объективами 4 и 5, требования к качеству этих элементов

относительно низкие, что и открывает практическую возможность контроля выпуклых асферических поверхностей с большими световыми диаметрами, так как изготовление необходимой в этом случае крупногабаритной линзы 4 сравнительно невысокого качества не вызывает серьезных технических трудностей [6, 7].

На рис. 3 представлена полная схема реализации изложенной выше методики. Она представляет собой совокупность двух интерферометров, у которых осветительная часть, состоящая из элементов 7, 8, 9 и 10 и формирующая на выходе параллельный пучок лучей, является общей; общим является также и светоделитель 11.

Один из этих интерферометров, который включает элементы 2, 4, 5, 12, 13 и 14, предназначен для изготовления физической голограммы 6, которая затем на стадии контроля выпуклой поверхности 3 входит в состав второго интерферометра, включающего элементы 3, 4, 5, 6, 14, 15, 16, 17, 18, 19 и 20. Зеркала 15 и 16 в данной схеме должны быть выставлены таким образом, чтобы между ними и светоделителем 11 осуществлялся обратнокруговой ход лучей при выведенных из схемы зеркалах 12 и 17.

На стадии изготовления физической голограммы 6 в схему вводится зеркало 12 и выводятся деталь с контролируемой выпуклой поверхностью 3 и зеркало 17, а в позицию 6 устанавливается фотопластинка. Диафрагмой 14 выделяется полезный порядок дифракции, сформированный синтезированной голограммой 2.

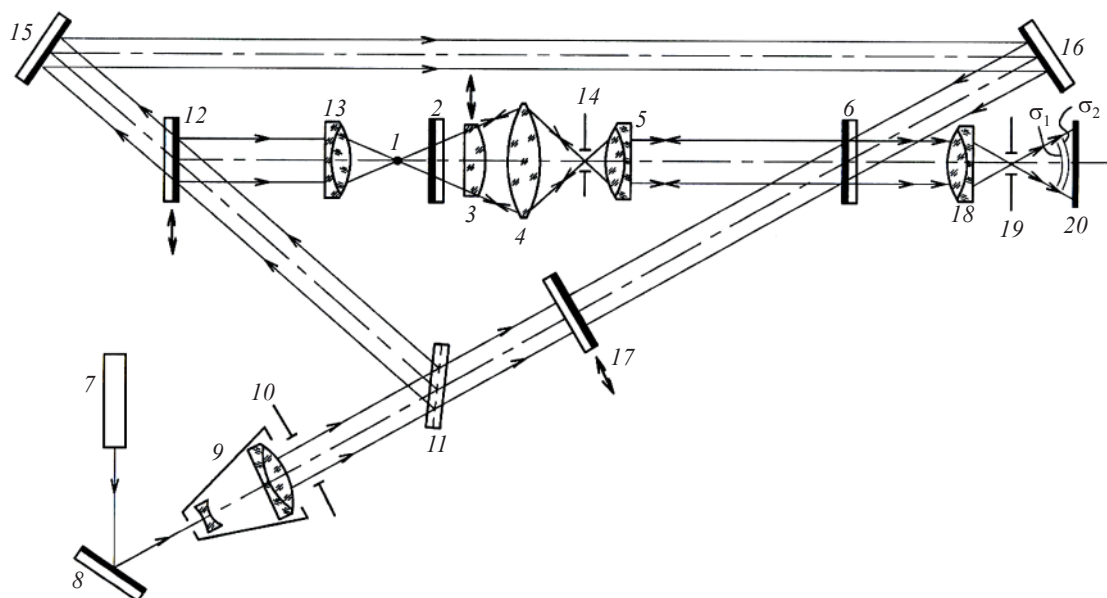


Рис. 3. Оптическая схема голографического интерферометра с СГОЭ и обращением волнового фронта. 1 – монохроматический точечный источник, 2 – СГОЭ-компенсатор, 3 – асферическая поверхность оптической детали, 4 – положительная линза, 5, 13, 18 – объективы; 7 – лазер, 8, 12, 15, 16, 17 – плоские зеркала; 11 – светоделитель, 10, 14, 19 – диафрагмы; 20 – фотоприемник, σ_1 – геометрический фронт волны сравнения, σ_2 – геометрический фронт сигнальной волны.

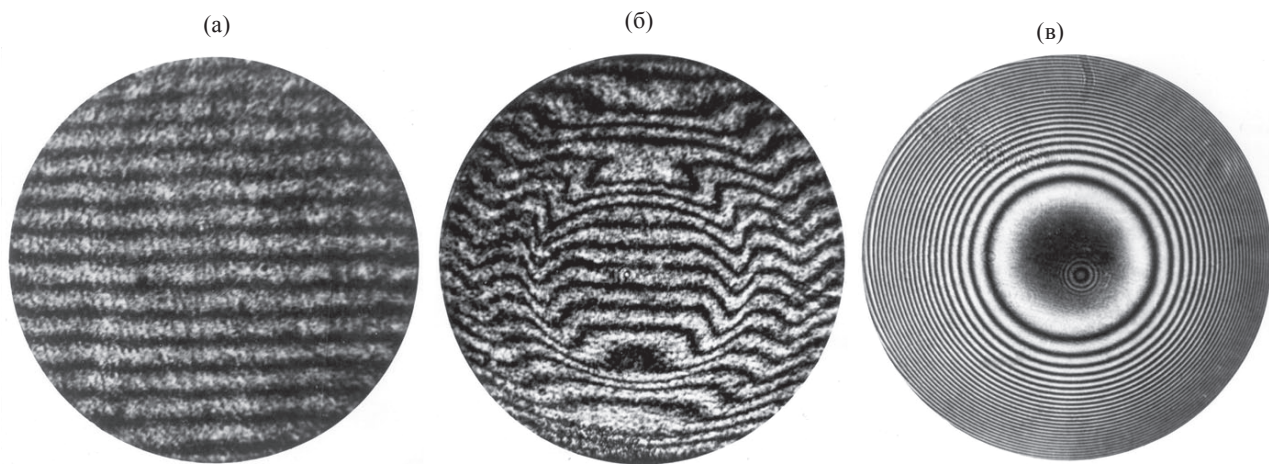


Рис. 4. Интерферограммы, полученные с помощью СГОЭ и обращения волнового фронта. а – поверхность высокого качества, б – поверхность с дефектами, в – суммарные aberrации объективов 4 и 5.

На стадии контроля физическая голограмма устанавливается в позицию 6, зеркало 12 выводится из хода пучка лучей, зеркало 17 вводится в схему и устанавливается перпендикулярно к параллельному пучку лучей, который сформировался в результате отражения параллельного пучка лучей, вышедшего из расширителя 9, от светоделителя 11, зеркал 15 и 16 и прошедшего в нулевом порядке физическую голограмму 6. Деталь с испытуемой выпуклой поверхностью устанавливается между синтезированной голограммой 2 и вспомогательной линзой 4, при этом расстояние от вершины испытуемой поверхности 3 до синтезированной голограммы 2 должно быть равно отрезку d . Состояние испытуемой поверхности оценивается по картине интерференции, образованной волной сравнения и объектной волной с геометрическими волновыми фронтами соответственно σ_1 и σ_2 . Эта интерференционная картина проецируется объективом 18 в плоскость фоточувствительной площадки 20 регистрирующего устройства. Данная схема была проверена экспериментально на примере контроля выпуклых сферических зеркал, одно из которых было высокого качества (рис. 4а), а другое имело две зональные ошибки типа “яма” (рис. 4б). На рис. 4в приведена интерферограмма, характеризующая суммарные ошибки вспомогательных объективов 4 и 5, полученная в интерферометре, собранном по схеме Маха–Цендера. Из этой интерферограммы видно, что значительная сферическая aberrация вспомогательных объективов (около 24 интерференционных полос) и астигматизм (около 6 интерференционных полос) практически полностью скомпенсированы физической голограммой.

Дополнительное исследование практической возможности контроля выпуклых поверхностей крупногабаритных деталей с использованием схе-

мы с обращением волнового фронта было проведено на примере изделий со сферическими поверхностями диаметром 1000 мм. Контроль таких поверхностей также представляет технически трудную задачу. Расчеты показали, что для этой цели можно использовать в качестве вспомогательного элемента 4 двухлинзовый объектив, состоящий из двух одинаковых двояковыпуклых линз из стекла К8 диаметром 1040 мм, радиусами кривизны 19413 и 2960 мм и толщиной по оси 150 мм. Выпуклые сферические поверхности этих линз в процессе их изготовления могут быть проконтролированы в схеме, изображенной на рис. 1д. Для этого необходимо использовать одно и то же вспомогательное сферическое зеркало диаметром 1920 мм и радиусом кривизны 3620 мм и две синтезированные голограммы со световыми диаметрами не более 120 мм и наибольшей пространственной частотой $\approx 80 \text{ мм}^{-1}$.

Данная схема позволяет контролировать выпуклые поверхности как сферические, так и асферические второго и более высоких порядков. В ней, как следует из вышеизложенного и рис. 3, в качестве источника света используется только один лазер. Этими особенностями данная схема отличается от схемы, описанной в работе [8], в которой также используется физическая голограмма, формирующая обращенный волновой фронт. Но эта схема обеспечивает контроль выпуклых поверхностей только второго порядка. Кроме того, использование в ней двух лазеров создает определенные трудности при ее юстировке.

Все представленные в настоящей статье варианты контрольных схем были разработаны исходя из практических потребностей оптического производства НПО ГИПО. Многие из них регулярно используются при формообразовании выпуклых асфери-

ческих поверхностей как для внутренних потребностей, так и по заказам внешних потребителей, в том числе на экспорт.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сборник ОСТ: “Детали оптические с асферическими поверхностями. Метод контроля с помощью синтезированных голограмм”. (ОСТ 3-4730-80 – ОСТ 3-4732-80).
2. Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Миронова Т.А., Ньюшкин А.А., Протасевич Д.В., Рафиков Р.А. Синтезированная голограммная оптика // Оптический журнал. 2002. Т. 69. № 12. С. 23–32.
3. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафиков Р.А. Способ настройки устройства для контроля качества оптических поверхностей // Патент России № 729437. 1980.
4. Грамматин А.П., Зверев В.А. Интерферометрический контроль выпуклых гиперболических зеркал // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 4. С. 76–78.
5. Пуряев Д.Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. С. 78–82.
6. Мустафин К.С., Лукин А.В., Ларионов Н.П., Ибрагимов Р.А. Интерферометр для контроля формы оптических поверхностей // А.с. № 996857. Бюл. изобр. 1983, № 6.
7. Городецкий А.А., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С. Голографический контроль выпуклых поверхностей на основе обращения волнового фронта // ОМП. 1983. № 12. С. 53–54.
8. Зензинов А.Б. Голографические интерферометры с обращением волнового фронта для контроля формы выпуклых поверхностей // ОМП. 1992. № 1. С. 53–57.