

УДК 535.4 : 621.317

**А. Е. Маточкин, В. В. Черкашин***(Новосибирск)***ДИФРАКЦИОННОЕ ПРОБНОЕ СТЕКЛО  
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

При помощи пробных стекол определяют отступления радиуса кривизны контролируемой поверхности от нормального значения и величину местных ошибок. Представлены результаты изготовления и испытания дифракционных пробных стекол (голограмм), синтезированных на круговом лазерном фотопостроителе ИАиЭ СО РАН.

Дифракционные оптические элементы, преобразующие плоский или сферический волновой фронт в асферический, получили название синтетических или дифракционных пробных стекол [1]. Новые элементы привлекают внимание по следующим соображениям:

- возможность изготовления методами групповой лазерной фототехнологии, исключая ручной труд;
- пригодность для контроля формы крупногабаритных и небольших по размеру деталей (диаметр синтетического пробного стекла не связан с диаметром контролируемой детали);
- возможность контроля по одному пробному стеклу как вогнутых, так и выпуклых поверхностей разных радиусов кривизны;
- снижение собственных aberrаций дифракционного элемента до значений в доли световой волны  $\sim \lambda/20$ ;
- включение пары из пробного стекла и испытываемой детали для контроля в рабочую ветвь традиционных интерферометров типа Физо, Тваймана – Грина, Майкельсона и др.;
- осуществление контроля асферики с большими отступлениями от сферичности;
- создание простых по конструкции интерферометров для выявления собственных aberrаций пробного стекла;
- изготовление на подложке дополнительных дифракционных структур, выполняющих при контроле роль реперов положения асферической поверхности относительно пробного стекла;
- снижение стоимости изготовления синтетических пробных стекол в несколько раз по сравнению со стоимостью традиционных пробных стекол.

Цель предлагаемой работы – показать особенности новых элементов на примере синтеза цилиндрического дифракционного пробного стекла.

Обратимся к рис. 1, где представлена в двух проекциях схема рабочей ветви интерферометра Физо, настроенного на контроль цилиндрической поверхности. Пучки света от источника, расположенного во входном зрачке 1

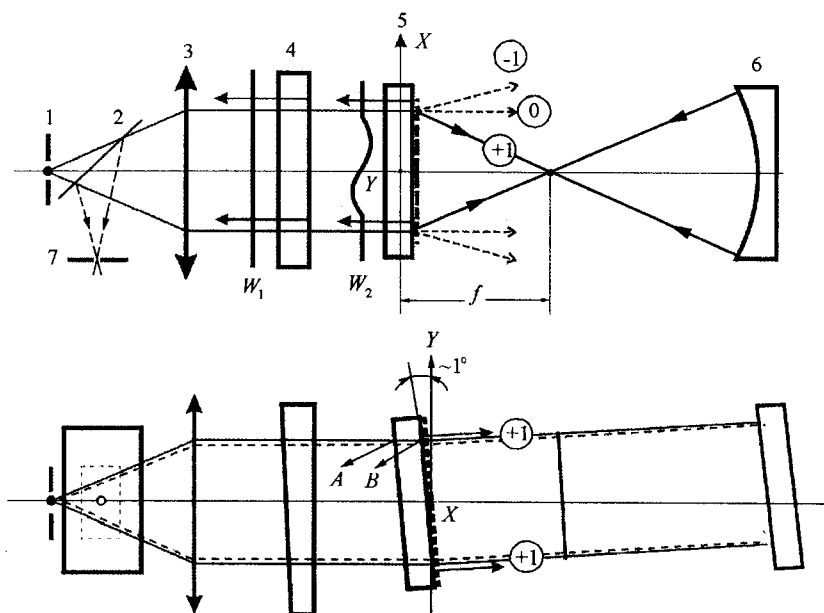


Рис. 1. Оптическая схема контроля цилиндрической поверхности

интерферометра, после прохождения светоделительной пластины 2 и объектива 3 освещают эталонную плоскую пластину 4. Световая волна  $W_1$ , отраженная от рабочей поверхности пластины 4, является референтной. Она интерферирует с волной, обозначенной как  $W_2$ . Последняя образуется в результате дифракции в +1-й порядок после прохождения голограммы 5, отражения от контролируемой детали 6 и повторной дифракции в +1-й порядок на голограмме 5. Выходные зрчки интерферометра (изображение источника 1) находятся в плоскости 7. Плоскость локализации интерференционных полос совпадает с плоскостью детали 6. Традиционная наблюдательная система, установленная за плоскостью 7 (на схеме не показана), переносит изображение плоскости детали 6 и изображение полос на матрицу фотоприемников.

Остановимся на особенностях синтеза дифракционного рисунка голограммы 5. Голограмма должна выполнять несколько функций. Главная из них – формирование эталонного цилиндрического волнового фронта, который после отражения от испытуемой детали и вторичного прохождения голограммы образует плоский волновой фронт, если контролируемая поверхность имеет идеальную форму и правильно расположена по отношению к 5 (т. е. фокальная линия цилиндра голограммы совпадает с осью контролируемой детали).

Рисунок голограммы, генерирующей цилиндрическую волну, можно получить из соотношения для разности хода пучков между плоской и цилиндрической поверхностью:

$$(x_k^2 + f^2)^{1/2} - f = k\lambda, \quad (1)$$

где  $f$  – фокус цилиндрической линзы голограммы;  $x_k$  – координата;  $\lambda$  – длина волны;  $k$  – номер полосы (порядок интерференции). Левую часть в (1) при-

ближенно можно заменить на выражение, соответствующее стрелке прогиба поверхности цилиндра, тогда

$$x_k^2/2f = k\lambda. \quad (2)$$

В этом случае рисунок голограммы представляет собой одномерную (цилиндрическую) зонную пластинку Френеля. К сожалению, такое простое решение не даст желаемого результата, так как в этом случае рабочая поверхность подложки голограммы будет отражать в поле зрения автоколлимационный блик *B* (см. рис. 1), на фоне которого невозможно наблюдать интерференционную картину.

Для исключения автоколлимационных шумов в рабочем положении голограмму наклоняют на небольшой угол ( $\sim 1^\circ$ ), чтобы блики от поверхностей *A* и *B* не попали в наблюдательную систему (см. сагиттальное сечение на рис. 1). Для компенсации наклона в рисунок голограммы по оси *Y* вводят эквивалент клина, представляющий собой дифракционную решетку с постоянным шагом. Дополнительно для установки голограммы *5* в рабочее положение на ее периферии (по кольцу) синтезируется решетка, дифрагированный пучок от которой интерферирует с референтным пучком  $W_1$  пластины *4*, создавая вспомогательную интерференционную картину, являющуюся индикатором положения голограммы *5* относительно образцовой пластины *4*. Для установки голограммы в механическую оправу вне дополнительного кольца с решеткой нанесены специальные марки (метки), указывающие направление оси цилиндра.

Суммарный дифракционный рисунок синтетического пробного стекла (цилиндр + клин) можно определить из простого соотношения

$$x_k^2/2f + y_k \operatorname{tg}(\alpha) = k\lambda. \quad (3)$$

Здесь  $\alpha$  – угол наклона оси цилиндра голограммы по отношению к плоскому стеклу *4*. Первый член в (3) представляет собой стрелку прогиба цилиндрического волнового фронта, а второй – толщину клина в точке  $y_k$ . Задавая значения  $y_k$ , можно вычислить  $x_k$  и определить положение линий равной разности хода (разности фаз), характеризующих топологию голограммы. Рис. 2 иллюстрирует расположение цилиндрической поверхности *N* под углом  $\alpha$  к плоскости *M* для случая, когда стрелки прогиба цилиндра и толщины клина

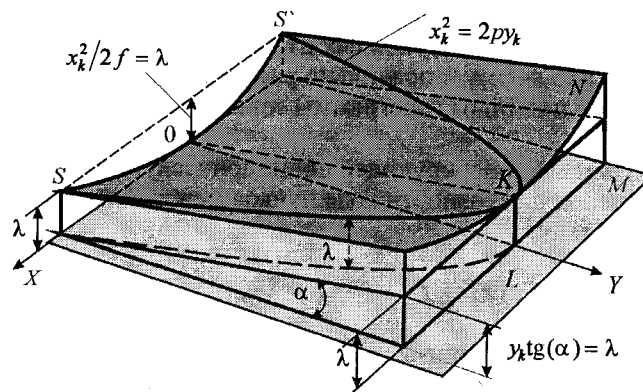


Рис. 2. Схема цилиндрической поверхности с линиями равной разности хода

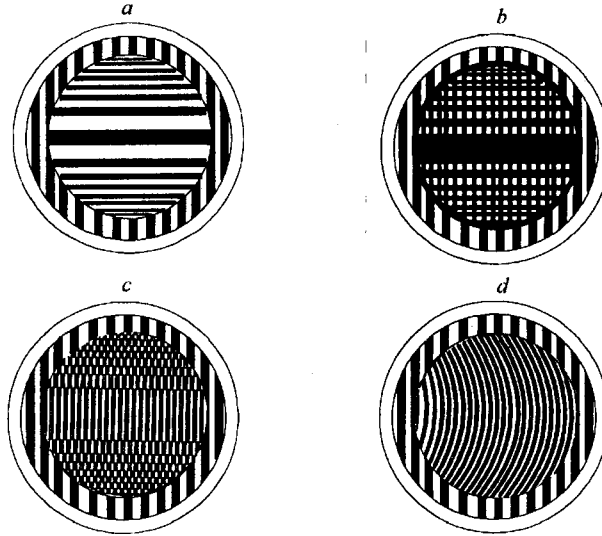


Рис. 3. Структура дифракционного пробного стекла: *a* – амплитудная зонная пластинка Френеля; *b* – дублет из пластинки Френеля и решетки с постоянным шагом (клин); *c* – бинарный вариант дублета; *d* – семейство парабол (дифракционное пробное стекло, восстанавливающее цилиндрическую световую волну под углом  $\alpha$ )

равны  $\lambda$ . Линии равной разности хода  $SKS'$  пройдут по траектории, где расстояние между цилиндрической поверхностью  $N$  и плоскостью  $M$  равно  $\lambda$ . Тогда из (1) при  $k = 0$  (без учета знака)

$$x_k^2 / 2f = y_k \operatorname{tg}(\alpha), \quad (4)$$

при  $p = f \operatorname{tg} \alpha$

$$x_k^2 = 2py_k. \quad (5)$$

Линии равной разности фаз являются семейством парабол с разным значением  $k$ . Минимальное расстояние (шаг)  $\Delta x$  и  $\Delta y$  между линиями дифракционного рисунка по осям  $X$  и  $Y$  составит, как это видно из (3),

$$\Delta x = \lambda / \sin \varphi, \quad (6)$$

где  $\sin \varphi = x_k / f$  – текущая угловая апертура цилиндрической линзы,

$$\Delta y = \lambda / \operatorname{tg} \alpha. \quad (7)$$

При освещении голограммы, выполненной в соответствии с (3), плоской волной восстанавливается цилиндрическая световая волна, распространяющаяся под заданным углом  $\alpha$ .

Вид голограммы представлен на рис. 3, *d*. Рисунок голограммы совмещен с внешним кольцом, на котором синтезирована линейная дифракционная решетка, необходимая для фиксации положения голограммы в рабочем плече интерферометра. Точность выставления углового положения голограммы  $\Delta \alpha$  по полосам равной толщины можно оценить следующим образом:

$$\Delta \alpha = \Delta k \lambda / 2D. \quad (8)$$

Здесь  $\Delta k$  – дробная доля ширины полосы, наблюдаемой в клине между голограммой и опорной пластиной интерферометра (см. рис. 1);  $D$  – диаметр кольца. Без особых усилий голограмма может быть выставлена с погрешностью в доли угловой секунды (при  $D = 40$  мм,  $\Delta k = 0,1$ ), что вполне достаточно для контроля цилиндрической поверхности по дифракционному пробному стеклу.

Помимо рассмотренной голограммы, на рис. 3 представлены другие варианты дифракционного рисунка. Фактически этот рисунок иллюстрирует синтез голограммы от простой френелевской зонной пластинки и равномерной решетки (клин) к голограмме, состоящей из семейства парабол.

Амплитудная структура френелевской одномерной зонной пластинки (см. рис. 3, *a*) позволяет восстановить цилиндрический волновой фронт, но, как указывалось выше, не решает задачи контроля, поскольку отраженный от рабочей поверхности подложки пучок внесет шумы, искажающие интерференционную картину.

В структуру голограммы на рис. 3, *b* внесена дополнительная решетка с постоянным шагом. Оси дополнительной решетки и решетки цилиндрической линзы перпендикулярны друг другу. Такой дублет из френелевской зонной пластинки и дифракционного клина дает возможность установить рабочую ветвь интерферометра с голограммой под заданным углом. Дифракционная эффективность такой структуры будет низкой, и ее практическое применение затруднено. Для повышения дифракционной эффективности можно синтезировать бинарную структуру дублета по амплитудному шаблону, показанному на рис. 3, *c*.

Дублет из цилиндрической зонной пластинки и линейной решетки можно заменить структурой из линий одинаковой разности хода (разности фаз), которые вносят клин и цилиндрическая линза. Структура голограммы, синтезированной в соответствии с соотношением (3), является наиболее оптимальной. Технологически она удобна для изготовления на круговом лазерном фотопостроителе [2], поскольку не имеет резких переходов, характерных для традиционного дублета (см. рис. 3, *b*). В предлагаемой работе это решение положено в основу синтетического пробного стекла, моделирующего цилиндрический волновой фронт.

Возможен иной подход к изготовлению голограммы. Цилиндрическую зонную пластинку можно совместить с дифракционным клином таким образом, чтобы ось цилиндра и ребро клина совпадали, а не находились под углом  $90^\circ$ , как это рассмотрено выше. В этом случае пространственная частота голограммы по оси  $X$  возрастает по сравнению с голограммой, образуемой линиями параболы. Ее изготовление на круговом лазерном фотопостроителе будет менее точным. Топологию структуры подобного типа, вероятно, эффективнее синтезировать на фотоплоттере, работающем в прямоугольной системе координат.

В предлагаемой работе голограмма изготовлена на круговом лазерном фотопостроителе по технологии, подробно изложенной в [2–4]. Приведем ее характеристики: фокус цилиндрической поверхности 460 мм, диаметр голограммы 45 мм, наименьшее расстояние между линиями рисунка 6 мкм, толщина подложки 3 мм, тип голограммы – бинарная, фазовая.

Контроль голограммы можно осуществлять с помощью образцовых пробных стекол на интерферометре "Zygo". Точность контроля в этом случае составляет  $\sim \lambda/20$  при среднеквадратической погрешности  $\sim 0,03\lambda$ . Частич-

ный контроль (выявление несимметричных aberrаций рисунка голограммы и подложки) осуществляется путем включения элемента в схему дифракционного интерферометра с общим ходом лучей. Остановимся на этом подробнее.

На рис. 4 приведена схема дифракционного интерферометра, собранного на базе синтезированной голограммы, генерирующей цилиндрическую световую волну. Собственно интерферометр (без осветительной и наблюдательной системы) состоит из двух оптических компонентов: светоделиителя 1 и плоского зеркала 2. Пластина 1 (контролируемая голограмма) служит для деления и рекомбинации пучков после отражения лучей от зеркала 2. В рассматриваемой схеме интерферируют волны типа  $[-1, +1]$ , которые после прохождения голограммы дифрагируют в  $+1$ -й порядок в прямом и обратном ходе. После отражения от зеркала эта волна инвертируется. Вторая интерферирующая волна  $[0, 0]$  идет соответственно по пути нулевого порядка в прямом и обратном ходе, ее волновой фронт не оборачивается.

Какую информацию можно получить из интерференционной картины? Прежде всего, настройку интерферометра (т. е. наклоны и положение пластин 1 и 2 относительно друг друга) легко произвести по интерференционным полосам. Не останавливаясь на этом, подробно приведем окончательный результат. На рис. 4, *b* приведено поле интерференции на выходе интерферометра. Если пластина 2 расположена не в фокусе дифракционной цилиндрической линзы 1, то наблюдаются полосы (см. рис. 4, *b* (А, Б)), ширина которых меняется в соответствии с правилом Ньютона (т. е. ширина полос пропорциональна корню квадратному из целых чисел). По мере приближения пластины к фокальной плоскости полосы уширяются, и при положении 2 в фокусе цилиндрической линзы их ширина становится равной бесконечности. Наклон зеркала 2 перпендикулярно плоскости рисунка искажает полосы, как это показано на рис. 4, *b* (В). По наблюдаемым картинам интерферометр легко настроить на бесконечные полосы (ширина полос больше поля зрения) и подготовить для выявления собственных несимметричных aberrаций голограммы.

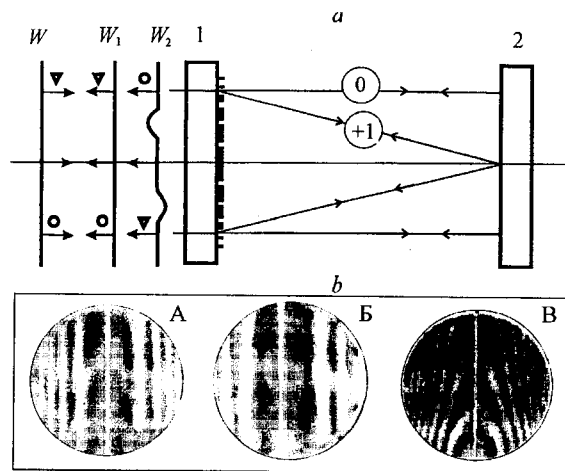


Рис. 4. Интерферометр с общим ходом пучков:  $W$  — плоская волна на входе интерферометра;  $W_1$  — опорная волна  $[0, 0]$  на выходе;  $W_2$  — инвертированная волна  $[-1, +1]$  на выходе

Рассматриваемый нами интерферометр имеет общий ход для интерферирующих пучков. Такого типа схемы детально исследованы в работах [5, 6]. Здесь мы обращаем внимание на то, что локальные (местные) ошибки синтезированной голограммы могут быть выявлены, если в дифракционном рисунке имеется сбой или другие несимметричные искажения. В данном случае линия симметрии совпадает с осью цилиндра. Если имеется местная (несимметричная) ошибка в рисунке, то она исказит форму отраженного волнового фронта  $W_2$  пучка  $[+1, +1]$ , как это показано на рис. 4. Местное искажение волны удваивается с обратным знаком симметрично оптической оси. Волна  $W_1$  не будет иметь деформаций, так как служит референтной волной. Интерференция  $W_1$  и  $W_2$  выявит местные ошибки рисунка по искривлению полос. Они могут быть идентифицированы и определены количественно в долях длины волны.

Полосы «бесконечной» ширины, заполняющие поле зрения однородным цветом, свидетельствуют об отсутствии локальных ошибок в дифракционном рисунке. На искажения волны, вызванные несимметричными аберрациями дифракционного рисунка, накладываются ошибки формы поверхности зеркала 2 (см. рис. 4) и неплоскостность подложки голограммы 1. Пучок  $[+1, +1]$  не искажается дефектами зеркала 2, поэтому погрешности формы зеркала влияют на искажение только референтной волны. Эти погрешности могут быть определены традиционным методом на интерферометре типа Физо и исключены из результата контроля.

В нашем случае неплоскостность зеркала 2 составляет менее  $\lambda/20$  (при среднеквадратической ошибке  $0,055\lambda$ ) и ее можно не принимать во внимание. Погрешности подложки (неплоскостность рабочей поверхности голограммы, клиновидность и неоднородности в стекле) влияют на результат и искажают качество интерференционной картины, если пара из голограммы 1 и зеркала 2 установлена в рабочую ветвь интерферометра Физо. Вместе с тем дефекты подложки могут быть определены отдельно и исключены из результата. Рассмотренная схема позволяет выявить несимметричные аберрации голограммы и отделить их от искажений, вызванных подложкой и вспомогательным зеркалом. На рис. 5, *a* представлено поле зрения в интерферометре с общим ходом, когда ширина полос превышает размеры поля зрения. Как видно из рисунка, в голограмме отсутствуют несимметричные аберра-

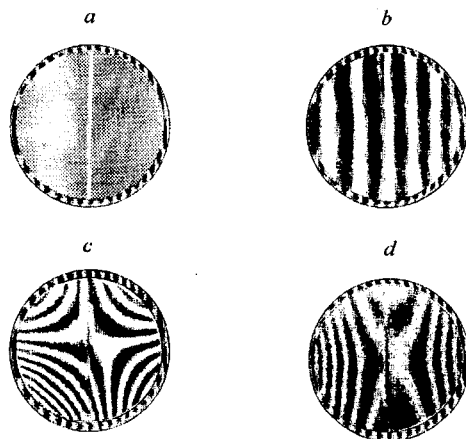


Рис. 5. Поле зрения в интерферометрах с общим ходом пучков и Физо

ции. При включении пары из голограммы 1 и зеркала 2 (см. рис. 4) в плечо интерферометра Физо интерференционная картина (рис. 5, *b*) искажается. Искривление полос порядка  $0,15\lambda$  вносит подложка голограммы, что подтверждено обычным определением качества подложки в интерферометре "Zygo". В заключение в качестве примера на рис. 5, *c, d* показано поле зрения при контроле цилиндрической поверхности невысокого качества (отступление  $>4\lambda$ ) с помощью дифракционного пробного стекла.

### ВЫВОДЫ

Современные компьютерные фототехнологии позволяют изготавливать сложные по топологии синтезированные голограммы. Точность воспроизведения дифракционного рисунка дает возможность восстанавливать асферический волновой фронт с погрешностью  $\sim\lambda/20$ , что сравнимо с точностью изготовления традиционных пробных стекол. На примере дифракционного пробного стекла для контроля цилиндрической поверхности показаны достоинства новых элементов.

Для контроля оптической поверхности пара дифракционное пробное стекло – контролируемая деталь может быть встроена в стандартные двухлучевые интерферометры.

Положение голограммы относительно детали можно контролировать с точностью до нескольких угловых секунд ( $\sim\lambda/10$ ) по специальным дифракционным маркам.

Новые элементы позволяют частично выявить собственные аберрации путем контроля в схемах интерферометров с общим ходом пучков, где не требуется наличия эталонной поверхности сравнения.

Точность контроля формы оптической поверхности по дифракционным пробным стеклам после аттестации последних может достигать значений, равных  $\lambda/20$  [2].

В заключение авторы выражают признательность А. Г. Полещуку и В. П. Коронкевичу за предложенную тему и помощь при проведении экспериментов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ichioka Y., Lohmann A. W. Interferometric testing of large optical components with circular computer holograms // Appl. Opt. 1972. 11. P. 2597.
2. Коронкевич В. П., Корольков В. П., Полещук А. Г. Лазерные технологии в дифракционной оптике // Автометрия. 1998. № 6. С. 5.
3. Koronkevich V. P., Kiryanov V. P., Korol'kov V. P. et al. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser-writing with circular scanning // Proc. SPIE. 1995. 2363. P. 290.
4. Коронкевич В. П., Полещук А. Г., Чуринов Е. Г., Юрлов Ю. И. Лазерная термохимическая технология синтеза дифракционных оптических элементов в пленках хрома // Квантовая электроника. 1985. № 4. С. 755.
5. Smartt R. N. Zone plate interferometer // Appl. Opt. 1974. 13, N 5. P. 1093.
6. Nomura T., Kamiya K., Miyashiro H. et al. Method to obtain a clear fringe pattern with a zone-plate interferometer // Appl. Opt. 1995. 34, N 13. P. 2187.