

ИНТЕРФЕРОМЕТР ТВАЙМАНА, КАЧЕСТВО ВОЛНОВОГО ФРОНТА КОТОРОГО ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ТОЛЬКО ОШИБКАМИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЕГО ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

© 2011 г. В. С. Доладугина, доктор техн. наук

Для интерферометра Тваймана, укомплектованного коллиматорным объективом очень высокого качества и изготовленной из высокооднородного по показателю преломления стекла разделительной пластиной ($\Delta n = 1 \times 10^{-6}$), выведено уравнение, позволяющее предсказывать результат интерференции и управлять им в желаемом направлении, если заранее известны величины и знаки ошибок поверхностей интерферометра. Если величины и знаки ошибок удовлетворяют полученному уравнению, волновой фронт интерферометра будет плоским.

Ключевые слова: интерферометр Тваймана, качество волнового фронта.

Коды OCIS: 120.3180.

Поступила в редакцию 23.03.2011.

Для оценки качества стекла по однородности показателя преломления широкое применение получили интерференционные методы его контроля. Как правило, это дорогие методы, требующие как специальной подготовки контролируемых объектов, так и высокой квалификации измерителей.

В СССР для основной номенклатуры оптических стекол каталога [1] были разработаны и внедрены на всех заводах дешевые **неинтерференционные** методики, обеспечивающие погрешность измерений, сопоставимую с погрешностью интерференционных методов контроля, т. е. $(1-2) \times 10^{-6}$.

Эти методики представлены в Государственном [2] и Отраслевом [3] стандартах, в заводской технической документации, опубликованы в ряде работ (см., например, [4]).

Точность неинтерференционной методики была подтверждена при использовании заготовок из оптических стекол [1] диаметром до 700 мм и толщиной до 100 мм при изготовлении крупногабаритных объективов космического назначения.

Однако кроме оптических стекол, приведенных в [1], для различных оптических систем используются и другие материалы. Например, разные марки кварцевых стекол, изготавливаемых при использовании нескольких несоответствующих технологий, разные марки оптических керамик, ситаллы, органические стекла, различные кристаллы, а также могут использо-

ваться вновь создаваемые материалы и новые марки оптических стекол с новыми эксплуатационными свойствами.

Для оценки однородности показателя преломления в перечисленных материалах без интерференционных средств контроля не обойтись. Среди интерферометров для указанных целей часто используется неавтоматизированный интерферометр Тваймана. К достоинствам этого прибора следует отнести двойной проход световой волны через испытуемый объект, что в два раза повышает точность измерений, а к недостаткам – необходимость изготавливать разделительные пластины из высокооднородного по показателю преломления стекла.

Выше уже отмечалось, что существующие в РФ технологии как варки, так и отжига оптических стекол при использовании для контроля однородности показателя преломления неинтерференционных методик обеспечивают изготовление стеклянных пластин из супероднородного стекла.

В настоящей статье рассматривается вопрос о погрешностях и способе их корректировки в интерферометре Тваймана, укомплектованном высококачественным коллиматорным объективом и разделительной пластиной из такого однородного по показателю преломления стекла. В таком интерферометре качество волнового фронта определяется в основном крупномасштабными ошибками поверхностей его оптических элементов, т. е. ошибками поверх-

ностей двух зеркал и двух поверхностей разделительной пластины.

Расчет влияния ошибок поверхностей оптических элементов интерферометра Тваймана на качество его волнового фронта предпринят с целью получения уравнения, обеспечивающего научно обоснованную организацию процесса обработки поверхностей оптических элементов интерферометра и позволяющего заранее предсказать результат интерференции.

Методика сводится к геометрическому расчету луча, идущего через интерферометр.

Для этого представим, что имеются два интерферометра: один идеальный, т. е. такой, у которого поверхности суть плоскости и интерференционная картина представляет собою систему равноотстоящих друг от друга прямых полос, и реальный интерферометр, у которого наблюдаемая интерференционная картина деформирована вследствие имеющихся отступлений поверхностей от плоскости и наличия неоднородности показателя преломления в разделительной пластине. Для простоты представим себе, что ошибки у всех поверхностей оптических деталей в реальном интерферометре имеют выпуклую форму, т. е., как их принято называть, ошибки в виде “бугра”, а неоднородности показателя преломления в стеклянных делительных пластинах у двух таких интерферометров отсутствуют.

На рис. 1 изображен ход лучей в двух таких интерферометрах. Пунктирные линии относятся к идеальному интерферометру, сплошные – к реальному. Чтобы оценить влияние ошибок поверхностей, нужно найти дополнительную разность хода, которую вносят эти ошибки. Для этого необходимо из результата интерференции реального интерферометра вычесть результат интерференции идеального.

Обратимся к рис. 2 и введем следующие обозначения:

– I_1 и I_2 – лучи реального и идеального интерферометров соответственно, идущие к зеркалу 6;

– Π_1 и Π_2 – лучи реального и идеального интерферометров соответственно, идущие к зеркалу 5;

– $\delta_{\text{инт}}$ – разность хода, которая возникает в результате ошибок поверхностей реального интерферометра;

– $a_1 = 0,5N_1$ и $a_2 = 0,5N_2$ – ошибки поверхностей делительной пластины без покрытия и с покрытием соответственно; $a_3 = 0,5N_3$ и $a_4 = 0,5N_4$ – ошибки поверхности зеркал 6 и 5

соответственно, где N_1, N_2, N_3 и N_4 – результаты определений ошибок методом пробного стекла;

– Δ_1 и Δ_2 – разности хода в некомпенсированных интерферометрах, соответственно реального и идеального.

Приняв такие обозначения, можно написать, что

$$\delta_{\text{инт}} = \Delta_1 - \Delta_2.$$

В свою очередь $\Delta_1 = L(I_1) - L(\Pi_1)$, а $\Delta_2 = L(I_2) - L(\Pi_2)$, где $L(I_1)$ – оптическая длина пути луча I_1 , $L(\Pi_1)$ – луча (Π_1) , $L(I_2)$ – луча (I_2) и $L(\Pi_2)$ – луча (Π_2) .

Тогда можно написать, что

$$\delta_{\text{инт}} = [L(I_1) - L(\Pi_1)] - [L(I_2) - L(\Pi_2)] = [L(I_1) - L(I_2)] - [L(\Pi_1) - L(\Pi_2)]. \quad (1)$$

Из уравнения следует, что для того чтобы определить влияние ошибок, нужно найти разности оптических длин путей или разности хода между лучами I и лучами II в реальном и идеальном интерферометрах и из первой разности хода вычесть вторую.

При расчете учитываются только те участки, на которых возникает разность хода. Обозначим эти участки следующим образом:

– δ_1 – разность хода, возникшая при входе лучей I_1, I_2, Π_1, Π_2 в интерферометры в результате имеющейся ошибки a_1 на первой поверхности разделительной пластины реального интерферометра;

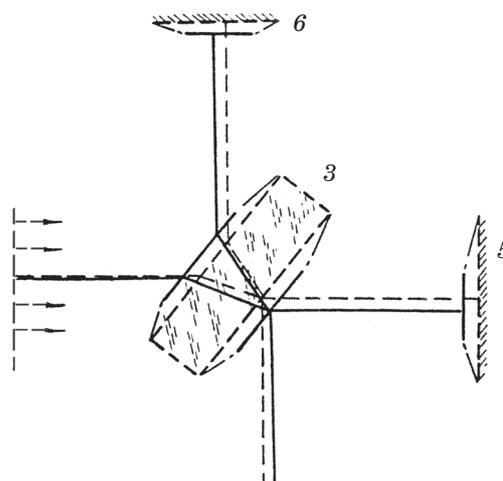


Рис. 1. Схема совмещенных интерферометров: пунктирные линии относятся к идеальному, сплошные – к реальному интерферометрам. Пояснения в тексте.

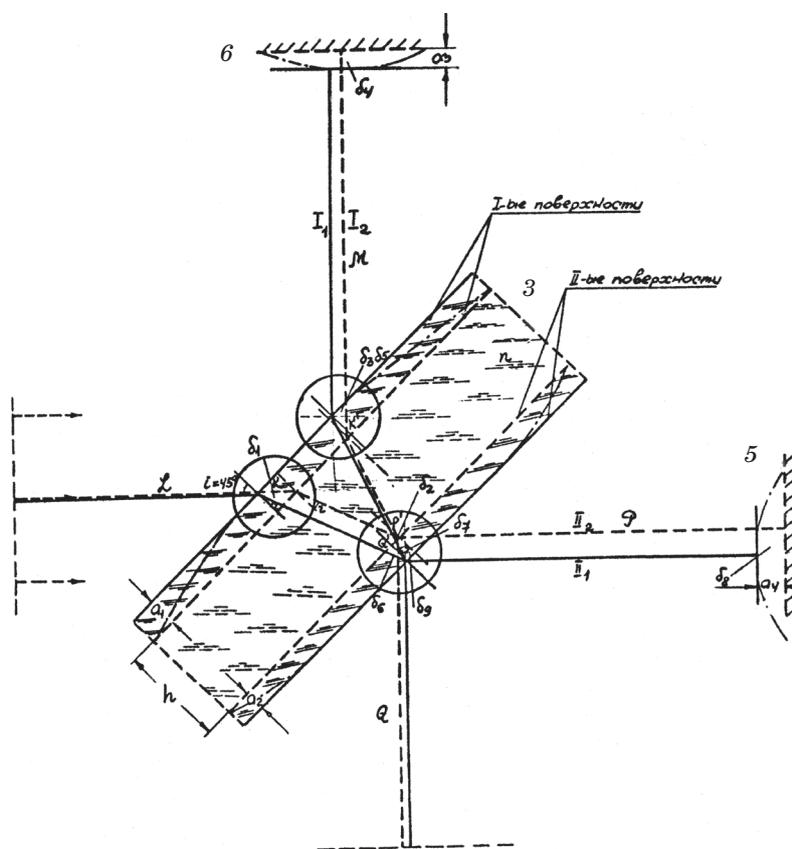


Рис. 2. Обозначения ошибок поверхностей реального интерферометра, разностей хода, которые возникают при прохождении лучей через разделительную пластину и при отражении от двух зеркал.

– δ_2 – разность хода, которая образуется при отражении лучей I_1 и I_2 от вторых поверхностей разделительных пластин реального и идеального интерферометров в результате имеющейся ошибки a_2 на 2-й поверхности пластины реального интерферометра;

– δ_3 – разность хода, возникающая от ошибки a_1 при **выходе** лучей I_1 и I_2 из делительных пластин интерферометров;

– δ_4 – разность хода из-за ошибки a_3 , которую имеет зеркало 6 реального интерферометра; ошибок δ_4 две: одна до отражения от зеркала 6 , вторая – после отражения от зеркала 6 ;

– δ_5 – разность хода от ошибки a_1 при **входе** лучей I_1 и I_2 в разделительные пластины после отражения от зеркала 6 , причем $\delta_5 = \delta_3$;

– δ_6 – разность хода, которая возникает от ошибки a_2 при **выходе** лучей I_1 и I_2 из делительных пластин после отражения от зеркала 6 .

После таких обозначений можно написать, что

$$\Delta_1 = [L(I_1) - L(I_2)] = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6,$$

но так как $\delta_3 = \delta_5$, то

$$\Delta_1 = [L(I_1) - L(I_2)] = \delta_1 + \delta_2 + 2\delta_3 + 2\delta_4 + \delta_6. \quad (2)$$

Теперь введем обозначения для разностей хода по пути, соответствующему пути лучей Π_1 и Π_2 .

– δ_1 – разность хода от ошибки a_1 при **входе** лучей Π_1 и Π_2 в разделительные пластины интерферометров;

– δ_7 – разность хода от ошибки a_2 при **выходе** лучей Π_1 и Π_2 из делительных пластин по направлению к зеркалу 5 ;

– δ_8 – разность хода от ошибки a_4 , которую имеет зеркало 5 реального интерферометра; ошибок δ_8 две: одна до отражения от зеркала 5 , вторая – после отражения от зеркала 5 ;

– δ_9 – разность хода от ошибки a_2 при **отражении** лучей Π_1 и Π_2 от разделительных пластин.

Тогда

$$\Delta_2 = [L(\Pi_1) - L(\Pi_2)] = \delta_1 + \delta_7 + 2\delta_8 + \delta_9. \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в уравнение (1), получим

$$\delta_{\text{инт}} = \Delta_1 - \Delta_2 = \delta_1 + \delta_2 + 2\delta_3 + 2\delta_4 + \delta_6 - \delta_1 - \delta_7 - 2\delta_8 - \delta_9.$$

или

$$\delta_{\text{инт}} = \delta_2 + 2\delta_3 + 2\delta_4 + \delta_6 - \delta_7 - 2\delta_8 - \delta_9. \quad (4)$$

Все разности хода в уравнении (4) были рассчитаны, в том числе и δ_1 , которая хотя в уравнение (4) не входит, но при расчетах остальных разностей хода от δ_2 до δ_9 приходилось ссылаться на некоторые уравнения из расчета δ_1 .

Расчеты для всех разностей хода вследствие их громоздкости не приводятся. Однако чтобы продемонстрировать предложенную методику расчетов, в качестве примеров ограничимся расчетами, например, разностей хода для δ_1 и δ_2 .

Для расчета разности хода δ_1 обратимся к рис. 3, где в более крупном масштабе изображен участок оптической схемы, на котором возникает разность хода δ_1 .

Из рис. 3 видно, что падающий на разделительную пластину 3 луч $M'M$ до точки M идет без разности хода. Попадая в точку M , лежащую на поверхности разделительной пластины реального интерферометра с ошибкой a_1 , луч $M'M$ преломится и пойдет по направлению MN , которое определяется уравнением $\sin i = n_{\text{ст}} \sin r$, где $i = 45^\circ$ – угол падения, а $n_{\text{ст}}$ – показатель преломления стекла (примем $n_{\text{ст}} = 1,5$). Ход луча $M'M$ для идеального интерферометра отличается тем, что его преломление начнется после того, как он достигнет точки K . Прелом-

ление будет определяться тем же уравнением $\sin i = n_{\text{ст}} \sin r$.

Разность хода δ_1 , которая возникнет в рассматриваемом случае, определится как $\delta_1 = n_{\text{ст}} MN - MK$, где

$$MN = MK \cos(i - r), \text{ а } MK = a_1 / \cos i.$$

Значит

$$\begin{aligned} \delta_1 &= n_{\text{ст}} a_1 \cos(i - r) / \cos i - a_1 / \cos i = \\ &= a_1 / \cos r (n_{\text{ст}} \cos i \cos r + n_{\text{ст}} \sin i \sin r - 1) = \\ &= a_1 / \cos i (n_{\text{ст}} \cos i \cos r + \sin^2 i - \sin^2 i - \cos^2 i) \end{aligned}$$

или

$$\delta_1 = a_1 (n_{\text{ст}} \cos r - \cos i). \quad (5)$$

Для определения разности хода δ_2 обратимся к рис. 4, на котором в более крупном масштабе изображен участок схемы с ошибкой a_2 .

Из рис. 4 видно, что $\delta_2 = n_{\text{ст}}(AB + BD)$; $BD = BM + MD$, т. е.

$$\delta_2 = n_{\text{ст}}(AB + BM + MD),$$

где

$$AB = BK - AK, \text{ а } BK = a_2 / \cos r \text{ и } AK = KC \sin r,$$

$$KC \text{ (рис. 4)} = K'K \text{ (рис. 3)}, \text{ а } K'K = PK - PK'$$

(тоже из рис. 3)

$$PK = a_1 \operatorname{tgi} \text{ и } PK' = a_1 \operatorname{tgr}, \text{ т. е. } KC = a_1 (\operatorname{tgi} - \operatorname{tgr}),$$

откуда $AB = a_2 / \cos r - a_1 (\operatorname{tgi} - \operatorname{tgr}) \sin r$.

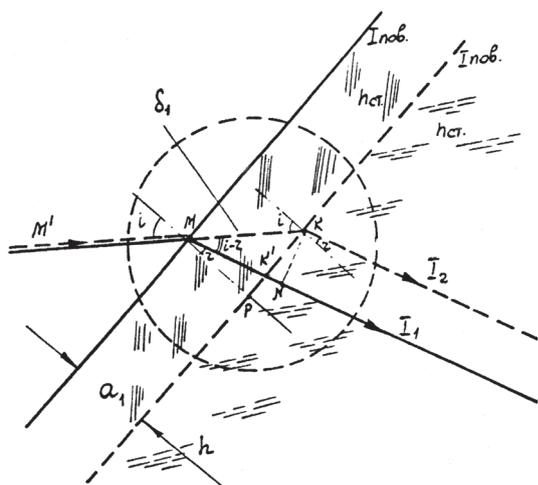


Рис. 3. Участок схемы на поверхности (без покрытия) разделительной пластины, на которой при входе лучей I_1 и I_2 в разделительную пластину из-за ошибки " a_1 " возникает разность хода " δ_1 ".

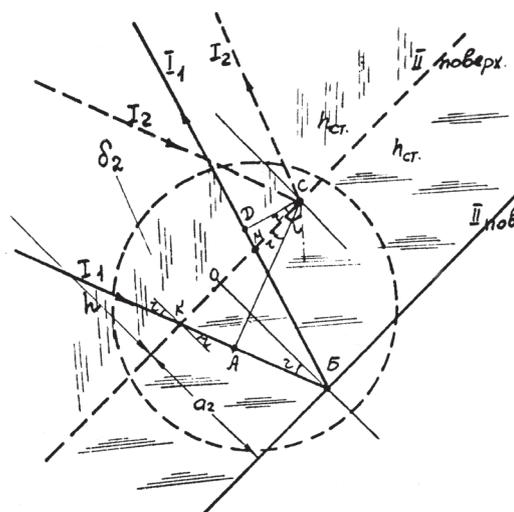


Рис. 4. Участок схемы на поверхности (с покрытием) разделительной пластины, на которой при отражении лучей I_1 и I_2 из-за ошибки " a_2 " возникает разность хода " δ_2 ".

Определим БД. $BM = KB = a_2 \cos r$, а $MD = MC \sin r$;
теперь $MC = KC - KM$,

$$KM = 2KO = 2a_2 \operatorname{tgr}.$$

Тогда

$$MD = [a_1(\operatorname{tgi} - \operatorname{tgr}) - 2a_2 \operatorname{tgr}] \sin r.$$

Теперь можно определить

$$\delta_2 = n_{\text{ст}}[a_2/\cos r - a_1(\operatorname{tgi} - \operatorname{tgr}) \sin r + a_2/\cos r + a_1(\operatorname{tgi} - \operatorname{tgr}) \sin r - 2a_2 \operatorname{tgr} \sin r] = n_{\text{ст}}(2a_2/\cos r - 2a_2 \sin^2 r/\cos r) = n_{\text{ст}} 2a_2 \cos r.$$

В результате получаем

$$\delta_2 = 2a_2 n_{\text{ст}} \cos r. \quad (6)$$

Выпишем остальные рассчитанные разности хода:

$$\delta_3 = a_1(n_{\text{ст}} \cos r - \cos i),$$

$$\delta_4 = -2a_3,$$

$$\delta_5 = a_1(n_{\text{ст}} \cos r - \cos i),$$

$$\delta_6 = a_2(n_{\text{ст}} \cos r - \cos i),$$

$$\delta_7 = a_2(n_{\text{ст}} \cos r - \cos i),$$

$$\delta_8 = -2a_4,$$

$$\delta_9 = -a_2/\cos r[\cos(i - r) + \sin(i - r)].$$

Подставив в уравнение (4) рассчитанные разности хода $\delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_6, \delta_7, \delta_8, \delta_9$, получим

$$\delta_{\text{инт}} = 2a_2 n_{\text{ст}} \cos r + 2a_1(n_{\text{ст}} \cos r - \cos i) - 2a_3 + a_2(n_{\text{ст}} \cos r - \cos i) - a_2(n_{\text{ст}} \cos r - \cos i) + 2a_4 + a_2/\cos r[\cos(i - r) + \sin(i - r)],$$

или

$$\delta_{\text{инт}} = 2a_1(n_{\text{ст}} \cos r - \cos i) + 2a_2 n_{\text{ст}} \cos r + a_2/\cos r[\cos(i - r) + \sin(i - r) - 2a_3 + 2a_4]. \quad (7)$$

Подставим в уравнение (7) численные значения известных величин

$$n_{\text{ст}} \sin r = \sin i, \quad i = 45^\circ, \quad n_{\text{ст}} = 1,5, \quad \sin r =$$

$$= 0,707/1,5 = 0,471,$$

$$r = 28,099^\circ, \quad (i - r) = 16,901^\circ,$$

$$\cos 28,099^\circ = 0,882, \quad \cos 16,901^\circ = 0,957,$$

$$\sin 16,901^\circ = 0,291, \quad \cos 45^\circ = 0,707$$

* * * * *

и приведем это уравнение к виду

$$\begin{aligned} \delta_{\text{инт}} &= 2a_1(1,5 \times 0,882 - 0,707) + 2a_2 \times 1,5 \times 0,882 + \\ &+ a_2/0,882(0,957 + 0,291) - 2a_3 + 2a_4 = \\ &= 1,232a_1 + 2,646a_2 + 1,415a_2 - 2a_3 + 2a_4 = \\ &= 1,232a_1 + 4,061a_2 - 2a_3 + 2a_4. \end{aligned}$$

В итоге получаем

$$\delta_{\text{инт}} \approx +1,2a_1 + 4,1a_2 - 2a_3 + 2a_4. \quad (8)$$

Формула (8) описывает влияние ошибок поверхностей оптических элементов интерферометра, которые имеют выпуклую форму. Если ошибки поверхностей будут вогнутой формы, знаки в (8) меняются на обратные. В обобщенном виде формула (8) может быть переписана в виде

$$\delta_{\text{инт}} \approx \pm 1,2a_1 \pm 4,1a_2 - 2a_3 \pm 2a_4, \quad (9)$$

где верхние знаки относятся к ошибкам выпуклой формы, нижние – вогнутой. Значения коэффициентов в формуле (9) уточняются, если заранее известен показатель преломления $n_{\text{ст}}$ оптического стекла разделительной пластины для линии “e” спектра ртути.

Из формулы (9) следует

1) влияние ошибки первой (без отражающего покрытия) поверхности разделительной пластины a_1 увеличивается в 1,2 раза, а второй поверхности (с отражающим покрытием) – в 4,1 раза;

2) влияние ошибок зеркал может быть сведено к нулю, если они одинаковы по величине и знаку;

3) чтобы скомпенсировать влияние ошибок поверхностей разделительной пластины, нужно, чтобы они были разного знака и чтобы ошибка a_1 была в $4,1/1,2 = 3,4$ раза больше ошибки a_2 ;

4) зная ошибки всех элементов оптической схемы, можно заранее предвидеть результат интерференции и управлять им в нужном направлении.

Разумеется, сделанные выводы можно распространить на погрешность реального интерферометра Тваймена до тех пор, пока речь идет о наблюдениях волнового фронта с точностью, не превышающей $0,1\lambda$. При более высоких точностях начнет сказываться неоднородность даже специально изготовленной разделительной пластины.

1. Бесцветное оптическое стекло СССР. Каталог / под ред. Г.Т. Петровского. М., 1990.
 2. ГОСТ 3514-76 “Стекло оптическое бесцветное. Технические условия”.
 3. ОСТ 3-1195-72 “Стекло оптическое. Методы определения волновой аберрации по двойному лучепреломлению”.
 4. *Доладугина В.С.* Методика оценки деформации волнового фронта при контроле однородности крупногабаритных заготовок оптических стекол // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 2. С. 64–68.
-