



Кремниевая оптика для ИК-объективов

Мы производим широкий диапазон кремниевой оптики для различных применений, в том числе и для высококачественных изображающих систем. В изготовлении последних важнейшим звеном является строжайший контроль качества на всех стадиях производства, от выбора материала до измерения итоговых параметров обработки и спектральных характеристик покрытия. Наш подход к изготовлению изображающей ИК-оптики описан ниже и проиллюстрирован на примере 17-элементного объектива.



Объектив был спроектирован для работы в двух спектральных диапазонах: 1.6-3.0 микрона и 3.5-5.5 микрона. Он включает в себя 14 менисковых и плосковыпуклых линз диаметром от 10 до 210 мм и 3 окна размерами до 134x198 мм. При изготовлении подобных многокомпонентных объективов необходимо уделять особое внимание интегральному пропусканию системы и искажению изображения в ней. Эти 2 параметра, в свою очередь, определяются качеством материала, точностью изготовления оптических поверхностей, качеством просветляющих покрытий и качеством сборки. Поскольку вопросы контроля качества покрытий подробно освещены в разделе "Покрытия", а сборка производилась нашим заказчиком, здесь мы остановимся на процедурах контроля качества материала и точности поверхностей.

Требования к материалу и процедуры контроля

Для изображающих систем качество материала исключительно важно. Неоднородность показателя преломления вызывает искажение изображения. Рассеяние в материале, например, на объемных дефектах, понижает контрастность картинки. С другой стороны, завышенные требования к материалу многократно повышают его стоимость и сужают диапазон доступных размеров и, не давая никакого выигрыша в итоговом качестве системы, драматически увеличивают срок поставки материала (а значит и системы). Сами оптические поверхности изображающих систем, как правило, сложны, и следовательно, дороги в производстве, а жесткие допуски нередко не оставляют возможностей для их переполировки. Следует также иметь в виду, что и в России, и за рубежом производители кремния оперируют «неоптическими» спецификациями, и связь контролируемых при производстве кремния параметров с оптическими свойствами выращенных слитков нетривиальна. Именно поэтому выбор правильной категории кремния и его входной контроль до начала производства оптики оказываются принципиально важными.

В разбираемом случае, с учётом изложенного выше, был выбран бездислокационный монокристаллический кремний, выращенный по методу Чохральского, со специальными требованиями к содержанию некоторых примесей, а также к среднему значению и радиальной однородности удельного электросопротивления. Одним из наших партнёров была проведена специальная серия ростов и изготовлены слитки диаметром 219 мм. От нижнего и верхнего торца каждого слитка были отрезаны контрольные пластины, которые прошли как рутинные тесты качества на заводе-изготовителе, так и дополнительное исследование собственно оптических свойств в нашей лаборатории. Проводилось прямое измерение общего пропускания, рассеяния (процедура подробно описана в статье про германий) и непрямая оценка однородности показателя преломления (при необходимости возможно проведение прямых измерений неоднородности показателя преломления, процедура подробно описана в той же статье). Вот типичная кривая пропускания контрольного образца:

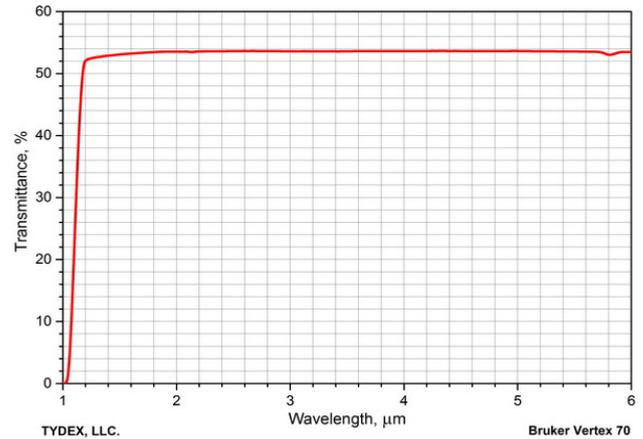


Рис. 1 Пропускание кремниевое контрольного образца №219-2-7. Толщина образца 10.0 мм.

Контроль точности поверхностей изделий

Как указано выше, следующими важными параметрами изображающих ИК-систем являются точность оптических поверхностей и аттестация их ошибок.

По-прежнему основным методом рутинного производственного контроля остаётся контроль по пробному стеклу. Однако, этот метод мало пригоден для аттестации ответственных высокоточных деталей, т.к. во-первых, он не позволяет фиксировать наблюдаемую картину, во-вторых, оценка ошибки является субъективной и адекватность этой оценки существенно зависит от опыта контролёра. В таких ответственных случаях после предварительного контроля под пробное стекло проводится окончательная аттестация на интерферометре, сопряженном с системой регистрации и обработки интерферограмм. Компьютерная обработка интерферограммы позволяет получить детальную информацию об общей ошибке поверхности и её компонентах: астигматизме, зонной ошибке, коме, местных ошибках, вычисляет размах ошибки (PtV), среднеквадратическое отклонение и проч.

Данная информация объективна и репродуктивна, не зависит от мнения контролёра и базируется на записанной и доступной для независимого анализа интерферограмме. Например, заказчик может самостоятельно провести расчет ошибок по передаваемой нами картинке или учесть взаимное влияние ошибок различных поверхностей при окончательной сборке системы. Также немаловажно, что информация отображается в чрезвычайно наглядной и удобной для восприятия форме. Удобно и то, что анализу можно подвергнуть как всю интерферограмму, так и любой её участок (см. ниже).

В приведенном примере интерферометрический контроль велся в схеме Физо на длине волны $\lambda = 632.8$ нм (HeNe лазер). Были использованы соответствующие радиусам кривизны и апертурам измерительные объективы и расширители пучка. Фиксировалось искажение волнового фронта тестового (отраженного от исследуемой поверхности) пучка в сравнении с фронтом отраженного от эталонной сферы опорного пучка. Анализ полученных интерферограмм проводился с помощью специализированного программного обеспечения, ищущего центральные линии полос и аппроксимирующего волновой фронт полиномами Цернике.

На картинках далее приведены результаты контроля двух поверхностей: вогнутой поверхности мениска диаметром 210 мм и плоской поверхности окна 198x134 мм.



Кремниевая оптика для ИК-объективов

Интерферометрический контроль ошибки поверхности менисковой линзы D210 мм

Результаты расчёта

Форма поверхности:
вогнутая сфера, $R = -206.99 \text{ mm}$
Контролируемая зона:
вся световая зона (206 мм)
Ед. измерения ошибки: микроны
Опорная поверхность: сфера

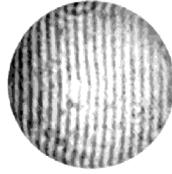


Рис. 2 Интерферограмма поверхности

Общая ошибка:

$D = .080$ $LX = 2.839$ $LY = -.013$ $C = 2.829$ $RMS(W) = .031$ $A = .050$ $FIA = .354$
 $RMS(W-A) = .023$ $FA = .442$ $B0 = -.025$ $RZ = .037$ $RMS(W-Z) = .029$ $FZ = .131$
 $B2 = .149$ $B4 = -.149$ $C = .110$ $FIC = 164.892$ $RMS(W-C) = .028$ $FC = .178$

Местная ошибка:

$R = .139$ $RMS(M) = .015$

Параметры поверхности:

RMS	MIN	MAX	R	STRL	STRH
.031	-.144	.092	.237	.964	988

X: -1.000 .000

Y: .000 -1.000

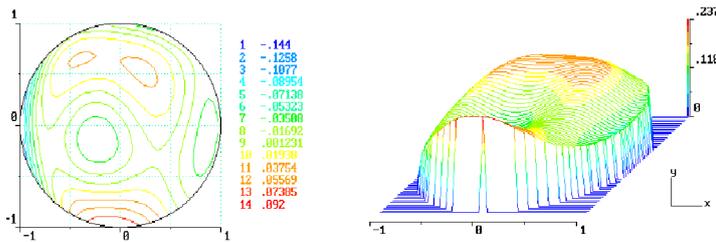


Рис. 3 Восстановленная топография искажений отраженного волнового фронта в двумерном и трёхмерном представлениях.

Интерферометрический контроль ошибки поверхности плоскопараллельного окна 198x134 мм

Заказчику требовалась аттестация данной пластины как по всей апертуре 194x130 мм, так и в центральной зоне 70x70 мм.



Рис. 4 Интерферограмма поверхности S1.

Результаты расчёта (вся апертура):

1) Контролируемая зона: вся световая зона 194x130 мм

Единицы измерения ошибки: микроны
Опорная поверхность: плоскость

Общая ошибка:

$D = .000$ $LX = 2.811$ $LY = .053$ $C = 2.045$ $RMS(W) = .024$ $A = .104$ $FIA = 81.477$
 $RMS(W-A) = .011$ $FA = .787$ $B0 = -.020$ $RZ = .083$ $RMS(W-Z) = .016$ $FZ = .561$
 $B2 = .039$ $B4 = .117$ $C = .022$ $FIC = 50.186$ $RMS(W-C) = .023$ $FC = .014$

Местная ошибка:

$R = .077$ $RMS(M) = .012$

Параметры поверхности:

RMS	MIN	MAX	R	STRL	STRH
.024	-.036	.076	.112	.978	.993

X: -.200 .680

Y: -.480 .440

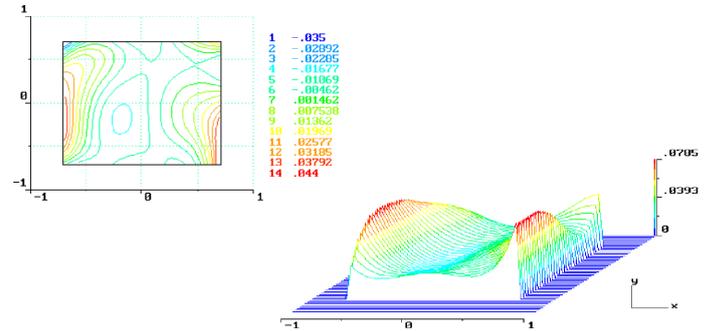


Рис. 5 Восстановленная топография искажений отраженного волнового фронта в двумерном и трёхмерном представлениях.

2) Контролируемая зона: центральная зона 70 x 70 мм

Единицы измерения ошибки: микроны
Опорная поверхность: плоскость

Общая ошибка :

$D = .000$ $LX = 1.447$ $LY = .033$ $C = .964$ $RMS(W) = .014$ $A = .045$ $FIA = 82.986$
 $RMS(W-A) = .010$ $FA = .489$ $B0 = -.014$ $RZ = .023$ $RMS(W-Z) = .012$ $FZ = .235$
 $B2 = .064$ $B4 = -.045$ $C = .012$ $FIC = 173.740$ $RMS(W-C) = .014$ $FC = .009$

Местная ошибка:

$R = .076$ $RMS(M) = .007$

Параметры поверхности:

RMS	MIN	MAX	R	STRL	STRH
.014	-.035	.044	.079	.993	.998

X: -.680 .680

Y: .680 -.680

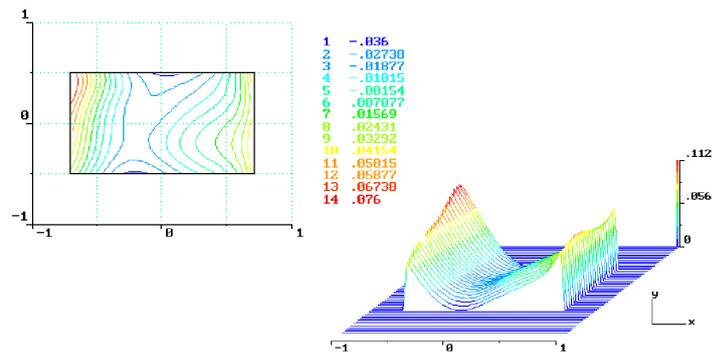


Рис. 6 Восстановленная топография искажений отраженного волнового фронта в двумерном и трёхмерном представлениях.

Наш опыт позволяет утверждать, что только такой тщательный контроль всех параметров всех компонентов на всех стадиях изготовления позволяет добиться высочайшего качества передачи изображения и адекватной работы системы в сборе.