

Д. т. н. В. Н. ИЛЬИН, А. В. ДУБЕШКО, Д. А. МИХАЕВИЧ

Республика Беларусь, г. Минск, Институт физики
E-mail: ilyin@inel.bas-net.by

Дата поступления в редакцию
06.04 2009 г.

Оппонент д. т. н. В. Н. КРЫЛОВ
(ОНПУ, г. Одесса)

МЕТОД СЧИТЫВАНИЯ И ОБРАБОТКИ СТАЦИОНАРНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН

Разработан оптоэлектронный метод считывания и определения дробной доли полосы стационарных интерференционных картин, формируемых в модернизированном двухлучевом интерферометре Кестерса при проверке концевых мер длины.

Для считывания стационарных интерференционных картин и определения дробной доли полосы применяют различные приемы, связанные, чаще всего, с преобразованием таких картин в динамические посредством изменения фазы в интерферирующих пучках или посредством механического или электронного сканирования.

При считывании доли интерференционной полосы в интерферометре Кестерса используется увеличивающая оптическая система, разрешающая способность которой, наряду со способом наведения визирной линии на полосу, определяет величину погрешности измерения. Традиционно измерение геометрических размеров (длины) при использовании явления интерференции света сводится к определению разности фаз интерферирующих пучков. Считывание может быть визуальным и автоматизированным. В большинстве интерферометров, применяемых на практике, при визуальном способе наблюдения погрешность определения изменений разности фаз составляет $2\pi/10 \dots 2\pi/20$.

Точность интерференционных измерений, в частности определения малых изменений разности фаз, в интерферометре Кестерса при визуальном считывании зависит от разрешающей способности оптической системы, контрастности картин, способа наведения индекса на полосу, индивидуальных способностей оператора. Поэтому по-прежнему актуальна разработка новых методов измерения и создание оригинальных устройств, позволяющих существенно повысить чувствительность приборов к малым изменениям разности фаз.

Известные способы модернизации интерференционного компаратора Кестерса (например [1]) направлены, в основном, на обеспечение фотоэлектрического считывания интерференционных полос, формируемых от базовой плоскости и от притертой к ней плоскопараллельной пластины. При этом обе интерференционные картины можно синхронно перемещать

относительно считывающих фотоприемников за счет референтного зеркала, установленного на пьезокерамическом модуляторе, либо электромагнитного модулятора, установленного на предметном столике интерферометра.

Оба способа, хотя и обеспечивают измерения разности фаз с погрешностью 1%, требуют существенных конструктивных доработок. Фотоэлектрическая часть достаточно громоздка и включает в себя согласующий объектив, оптические делители пучков и два фотоэлектронных умножителя.

Появление и развитие экономичных лазерных источников излучения, многоэлементных фотоприемников (линеек и матриц ПЗС) и специализированных микропроцессоров высокой интеграции позволяют решать многие задачи на новом техническом уровне, обеспечивающем более высокую точность и скорость проведения измерительных операций.

Это необходимо в микроэлектронике при измерении неплоскостности кремниевых пластин в связи с увеличением их диаметра и степени интеграции элементов. Перспективным является применение метода при считывании и обработке голографических интерференционных картин, получаемых при контроле качества изготовления лопаток турбин, корпусов летательных аппаратов и т. п.

В настоящей статье представлен оптоэлектронный метод и система автоматического считывания и обработки стационарных интерференционных картин в интерферометре Кестерса при аттестации плоскопараллельных пластин.

На рис. 1 приведена функциональная оптоэлектронная схема формирования и регистрации интерференционных полос в модернизированном интерферометре Кестерса, отличительной особенностью которого является наличие дополнительных элементов: согласованного со стационарным объективом 2 объектива 15 (Pentax) и ПЗС-матрицы 16 (ICX-255AL), на которой формируется изображение интерференционных картин. Объектив 15 и ПЗС-матрица 16, смонтированные на плате с нормирующей и микропроцессорной электроникой, образуют видеокамеру. Управление матрицей 16 осуществляется микропроцессором 17, а обработка видеопотока — компьютером 18 с отображением измерительных данных на мониторе 19.

Кроме того, разработан пакет прикладных программ с интерфейсом пользователя, реализующий

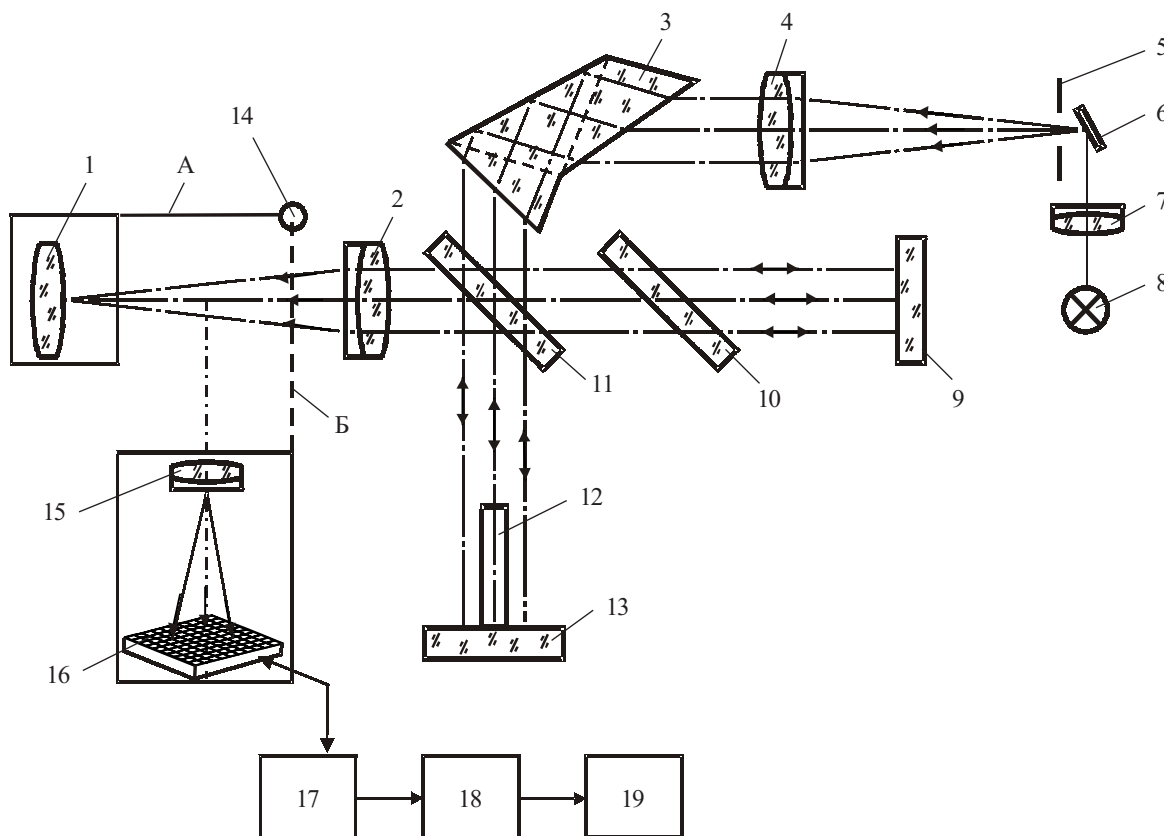


Рис. 1. Функциональная схема модернизированного интерферометра Кестерса:

1 — окуляр; 2 — формирующий объектив; 3 — дисперсионная призма; 4 — конденсор; 5 — щелевая диафрагма; 6 — зеркало; 7 — линза; 8 — источник излучения; 9 — опорное зеркало; 10 — компенсатор; 11 — полупрозрачная пластина; 12 — объект контроля; 13 — базовая пластина; 14 — кронштейн; 15 — объектив матрицы; 16 — ПЗС-матрица; 17 — микропроцессор; 18 — компьютер; 19 — монитор

алгоритм обработки видеоизображений интерференционных картин для четырех спектральных линий и методику расчета дробной части интерференционной полосы с разрешением в 0,01 полосы.

В интерферометре сохранена исходная оптическая схема для обеспечения визуального наблюдения и юстировки интерференционных полос. На рис. 2 приведен внешний вид системы, видеокамера которой находится в рабочем положении.

Камера 5 при помощи кронштейна 4 и хомута 3 крепится на тубусе 2 корпуса интерферометра 1. На торце тубуса размещена полевая диафрагма 7. Камера может находиться в двух устойчивых положениях: вертикальном (нерабочем) и горизонтальном (рабочем). В вертикальном положении камера удерживается с помощью механического фиксатора 9 и присоединяется к компьютеру посредством кабеля видеосигнала 6 через вход на видеокарте. В рабочее положение устанавливается либо окуляр 8 для визуального наблюдения, либо видеокамера 5.

Объектив камеры установлен так, что его передняя, фокальная, плоскость совмещена с плоскостью полевой диафрагмы, а задняя — с плоскостью ПЗС-матрицы. Таким образом на матрице строится контрастное изображение интерференционных картин для четырех значений длины волны.

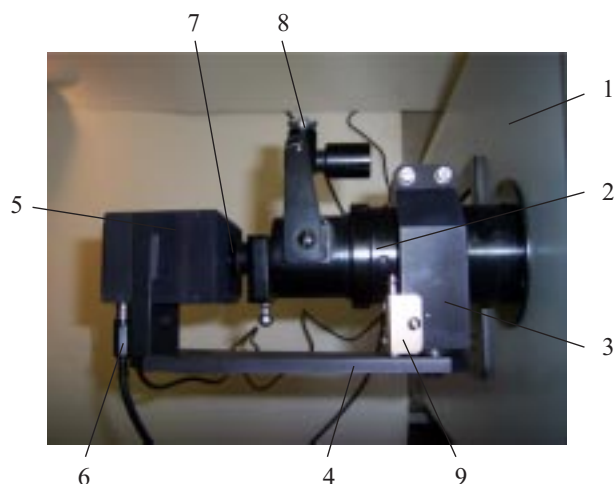


Рис. 2. Внешний вид оптоэлектронной системы считывания интерференционных картин:

1 — корпус интерферометра; 2 — тубус; 3 — хомут; 4 — кронштейн; 5 — камера; 6 — кабель видеопотока; 7 — полевая диафрагма; 8 — окуляр; 9 — механический фиксатор

Микропроцессорный блок автоматически регулирует яркость и контрастность и формирует видеосигнал. Камера имеет следующие параметры: стандарт CCIR (625 строк, 25 кадров), разложение чересстроч-

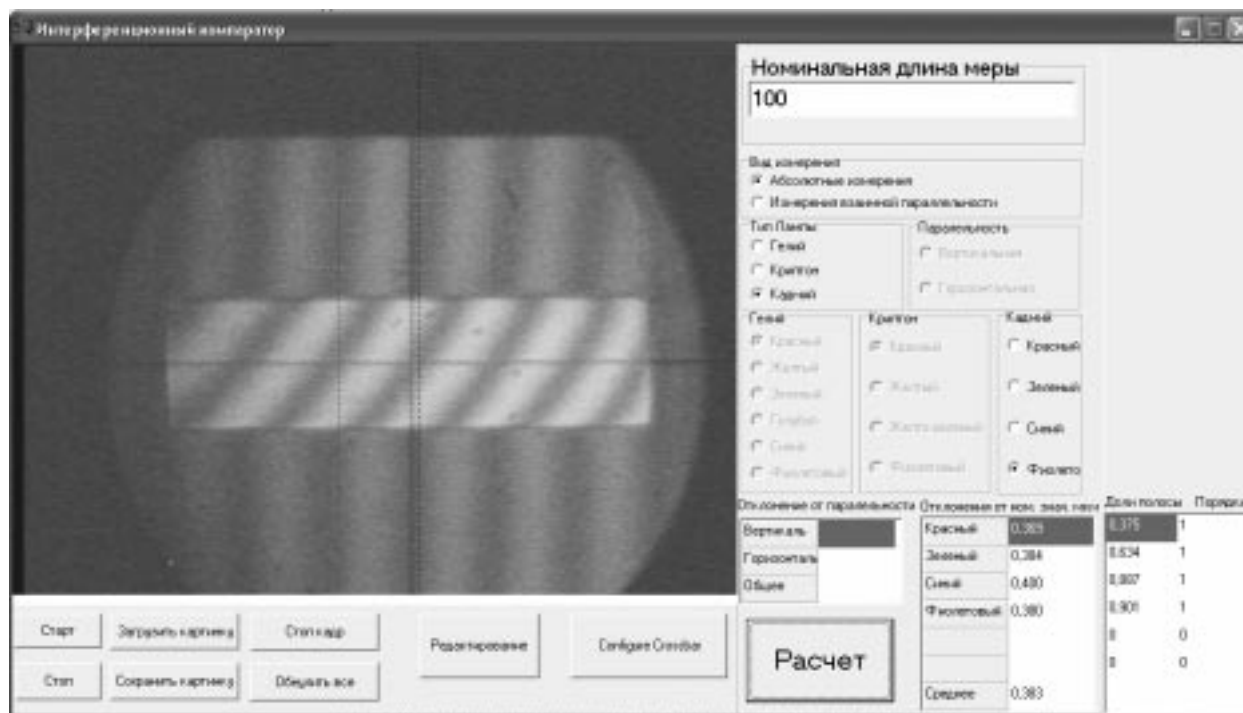


Рис. 3. Интерфейс пользователя

ное 2:1, фотоприемник — ПЗС-матрица ICX-255AL формата 1/3" (6,3×4,7 мм), число элементов 582×500. Сигнал с камеры передается на видеокарту, установленную в системном блоке компьютера.

Для обработки видеосигнала используются средства Microsoft DirectShow, с помощью которых выстраивается цепочка фильтров, и при помощи интерфейса ISampleGrabber в режиме Preview интерференционная картина отображается в приложении. Программа определяет тип устройства видеозахвата, формат поступающих данных, перераспределяет видеопоток и выводит изображение в заданной области приложения. По команде оператора интерфейс ISampleGrabber копирует в буфер кадр, а приложение сохраняет его на жесткий диск.

Диалог оператора с системой происходит через интерфейс пользователя (рис. 3). Управляющая программа — интерактивная оболочка с дружелюбным интуитивным интерфейсом, блокирующим (по возможности) некорректные действия пользователя. Если действия оператора корректны, но при этом могут привести к необратимым последствиям (например к удалению записей из таблиц), то выдается соответствующее предупреждение, требующее подтвердить действие оператора либо отменить его.

Поиск середины интерференционной полосы производится при помощи градиентного фильтра. Положение вертикальной полосы перекрестия определяется нахождением заданной величины спада интенсивности, построчно просуммированной по всей картинке в примерно известной области. Период полос определяется путем нахождения разницы в координатах середин соседних полос. Расчеты отклонений (в микрометрах), порядка и знака отклонения производятся по стандартным методикам.

Для обработки изображения слева направо и сверху вниз выделяется область вне меры (выше или ниже), содержащая хотя бы две полосы (одну справа, другую слева от вертикальной полосы перекрестия).

На изображении появляются три линии трех цветов. Красная линия совпадает с вертикальной полосой перекрестия, синяя и зеленая показывают соответственно середину ближайшей к ней справа и ближайшей к ней слева темной полосы. Синяя и зеленая линии используются для нахождения периода полосы, синяя и красная — для нахождения смещения в долях периода полос на мере относительно полос вне меры.

На модернизированном интерферометре Кестерса проведены измерения плоскостности кремниевых пластин, применяемых в микроэлектронике. На рис. 4

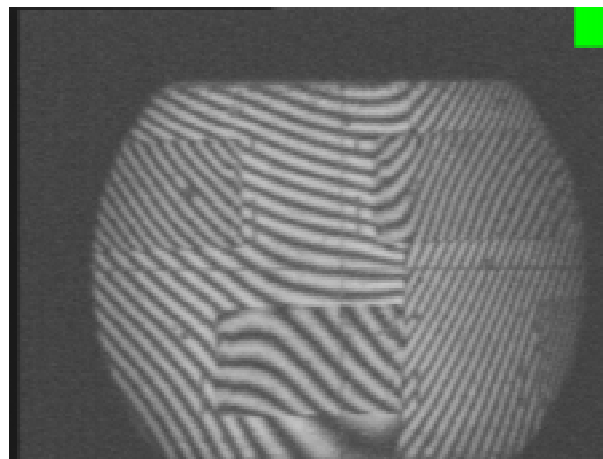


Рис. 4. Изображение поверхности кремниевой пластины в интерференционном поле

Наименование характеристики	Результаты исследований (в мкм)	
	до модернизации интерферометра	после модернизации
Среднее квадратичное отклонение результата измерений	0,003	0,001
Границы систематической погрешности	0,010	0,010
Доверительные границы суммарной погрешности при доверительной вероятности $P=0,99$	0,021	0,011
Доверительные границы суммарной погрешности при доверительной вероятности $P=0,99$ по методике измерений по ГОСТ 2060—90	0,040	—

приведена интерференционная картина, полученная с поверхности кремниевой пластины с установленными на ней матрицами ПЗС. Картина получена на волне, длина которой соответствует зеленому цвету. Хорошо видны аномалии на поверхности пластины, выраженные в изменении периода интерференционных полос. Обработка картин, полученных для четырех значений длины волны, позволяет рассчитать профиль поверхности пластины в метрических единицах.

Для экспериментальной оценки точности метода в качестве эталона использовалась кварцевая мера сравнения длиной 100 мм, имеющая оптический контакт с кварцевой пластиной.

Характеристики кварцевой меры сравнения:

- действительная длина при 20°C 99,99673 мм;
- отклонение от плоскопараллельности 0,06 мкм;
- температурный коэффициент линейного расширения $0,59 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Применение для исследований меры и пластины из кварца, имеющего достаточно низкий, по сравнению со сталью ($\alpha_{\text{ст}} = 11,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), температурный коэффициент линейного расширения, позволило исключить из расчетов поправку на разнородность материалов меры и пластины и уменьшить одну из составляющих систематической погрешности, связанную с температурным расширением меры.

В процессе исследований было выполнено 10 измерений длины кварцевой меры при помощи новой системы считывания и обработки интерференционной картины. Каждое измерение состояло из четырех замеров в четырех спектральных линиях кадмия.

Обработка результатов наблюдений производилась на ПЭВМ по методике, приведенной в паспорте на эталон.

В соответствии с правилами хранения и применения эталона, измерения проводились при температуре $20 \pm 1^\circ \text{C}$ и относительной влажности воздуха не более 80%.

Результаты сравнения метрологических характеристик эталона кварцевой меры до и после установки системы считывания и обработки интерференционной картины приведены в **таблице**.

Дискретность отсчета периода полосы определялась из пропорции

$$L/D = X/M,$$

где D — ширина (в пикселах) выводимого на экран изображения;

L — период полос на мере (в пикселах), выводимых на экран;

M — количество пикселей в одной строке на ПЗС-матрице;

X — количество пикселей в одном периоде на матрице.

При $D=640$, $L=110$ и $M=582$ получим $X=100,03$ пиксела.

Следовательно, при наличии четырех полных полос на мере дискретность отсчета составляет 1/100 долю периода интерференционной полосы.

Основные технические характеристики системы считывания и условия ее эксплуатации:

- температура окружающего воздуха $5-40^\circ \text{C}$;
- относительная влажность воздуха до 90%;
- атмосферное давление 96—104 кПа (720—780 мм рт. ст.);
- количество элементов на ПЗС-матрице 582×500 ;
- напряжение питания 12 В при максимальном токе 100 мА;
- фокусное расстояние объектива 16 мм;
- компьютер на базе процессора AMD Sempron 1,4 GHz, с ОЗУ 256 Мб и HDD объемом 80 Гб;
- уровень промышленных радиопомех, создаваемых системой, не превышает значения, установленные СТБ ГОСТ Р 51318.22.

Оптоэлектронная система считывания позволяет получать и обрабатывать изображение интерференционной картины в интерферометре Кестерса в режиме реального времени и обладает достаточной разрешающей способностью. Среднее квадратичное отклонение результата измерений составляет 0,001 мкм. Общее время, затрачиваемое на измерение и обработку результатов (на притирку пластин, снятие размеров периода интерференционных картин для четырех значений длины волн, введение значений температуры, давления, влажности, обработку данных), сократилось с двух часов до 30 минут. Система успешно эксплуатируется в Белорусском государственном институте метрологии с 2007 года.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. А. с. 1739188 СССР. Интерференционный компаратор для измерения линейных перемещений / В. В. Шестеров, Т. Ю. Ольмезова. — 1980. — Бюл. № 21.