Введение.

Интерферометры – одни из самых точных измерительных приборов, использующих принцип интерференции световых волн. Микроэлектроника, оптика, лазерная техника, телекоммуникация, астрономия, прецизионная механика, измерительная техника не могли бы существовать без применения различных типов интерферометров. Качество оптических поверхностей определяется методами их контроля. При изготовлении современных оптических систем требуется контролировать форму поверхностей (пластин, зеркал и линз) с точностью до единиц и  даже долей нанометра. При этом площадь контролируемой поверхности может составлять несколько десятков квадратных метров. Существуют много типов датчиков волнового фронта [2] и интерферометров, из которых наиболее распространены конфигурации Физо и Тваймана-Грина. Идеальный интерферометр должен формировать карту трехмерной оптической поверхности без дисторсии (ошибки), независимо от того, является  ли поверхность плоской, сферической или асферической. Идеальная система должна быть устойчива к вибрациям, перепадам температур, быть проста в использовании и работать без сбоев. Для практического применения интерферометров необходимо знать и понимать их особенности, области применения и направления их совершенствования.

Современные интерферометры типа Физо для контроля оптических поверхностей .

Интерферометры с большим полем обычно строятся по схеме Физо, которая требует минимума оптических компонентов: источник и  приемник излучения, коллимирующая линза, эталонная пластина и  контролируемый объект. Интерферометр типа Физо использует общий ход измерительного и опорных пучков света, поэтому на  качество компонентов особых требований не накладывается. Диаметр светового поля с одной стороны определяет размеры контролируемых деталей, а с другой – габариты и стоимость прибора. В настоящее время выпускаются интерферометры с  рабочим полем от 5 до 150 мм. Больший диаметр поля обеспечивается расширителями пучка. Наибольшее распространение получили приборы с полем 102 мм. В качестве источника излучения обычно используют одночастотные He-Nе – или полупроводниковые лазеры. Одной из  основных характеристик источника является длина когерентности, которая может достигать 100  м. Иногда в  интерферометрах используют одночастотные 532/1064-нм лазеры. Однако для прецизионного контроля асферических поверхностей с использованием СГ выбор остается за  He-Nе лазером, длина волны которого определена с высокой точностью. В настоящее время интерферометры типа Физо серийно производятся многими компаниями. В таблице приведены некоторые модели серийных приборов с полем 102 мм, рассчитанные на применение эталонных пластин и объективов стандарта Zygo. Современные приборы управляются от  компьютера и позволяют формировать двух- и трехмерные карты контролируемой оптической поверхности. Для обработки интерферограмм используются алгоритмы временного фазового сдвига (ВФЗ) или спектральный анализ (СА) [1]. Метод ВФЗ является наиболее точным, однако он не  применим в  условиях вибраций, так как время измерения составляет до  0,3 секунды. Метод СА использует одну интерферограмму, поэтому время измерения сокращено до  десятков микросекунд. Однако принципиальной особенностью этого метода является регистрация интерферограммы со  множеством полос, что приводит к  появлению погрешностей, вызванных нарушением принципа общего хода лучей, а также к необходимости применения высокоразрешающих видеокамер без защитного стекла [3]. При контроле асферических поверхностей, особенно большой кривизны, при наклоне возникает аберрация типа комы. Эту аберрацию нужно исключать из  результатов измерений программным путем, что не всегда удобно. В последние годы были разработаны приборы, реализующие алгоритмы одновременного фазового сдвига (ОФЗ) применительно как к  интерферометрам типа Тваймана-Грина [4], так и  Физо [5]. Эти приборы позволяют проводить измерения в условиях повышенного уровня вибраций, однако требуют тщательной калибровки, так как принцип общего хода лучей также нарушен. Часто интерферометры встраиваются в  измерительные комплексы с  вертикальным расположением прибора и  детали [6]. Одними из  самых высокотехнологичных являются комплексы компаний Zygo [7] и QED [8], позволяющие контролировать форму как сферических, так и  асферических поверхностей. Стоимость таких систем достигает миллионов долларов. Для контроля плоских и  сферических поверхностей применяются обычные коммерческие интерферометры, а  для контроля асферических поверхностей (АП) они дополняются СГ [14]. Однако применение СГ имеет ряд особенностей, таких как наличие паразитных дифракционных порядков (ДП), низкой дифракционной эффективности, требуемой высокой точности юстировки СГ и  др. [15]. Применение СГ совместно с  коммерческими интерферометрами [16] не  всегда позволяет учесть эти факторы, что приводит к снижению точности измерений, а  иногда к  получению ошибочного результата.

Особенности интерферометров типа Физо для контроля асферики.

Упрощенная оптическая схема ИФ приведена на рис. 1а. Оптическое излучение от источника (S) с помощью светоделителя (СД) и коллимирующего объектива (О1) направляется к эталонной пластине (ЭП) и  далее к  поверхности контролируемого объекта (плоскость Р1). Излучение, отраженное от этой поверхности и  от  стороны А  эталонной пластины (сторона Б имеет клин α), фокусируется объективом О1 в плоскости диафрагмы Д (точка S' ) и далее с  помощью объектива О2 направляется к  расположенной в  плоскости Р2 видеокамере ВК1. Одним из ключевых элементов ИФ является диафрагма Д, которая служит для блокировки паразитного излучения, отраженного от  элементов схемы, в  частности от  стороны Б эталонной пластины (штриховая линия и  точка S''). Диаметр d диафрагмы определяет пространственное разрешение прибора. Если эталонная пластина имеет клин α=15 угловых минут, то  при фокусном расстоянии объектива О1 f1=600  мм диаметр диафрагмы должен быть d<2f1λ/Tmax, где Tmax – максимальный период структуры СГ. При λ=633 нм и Tmax≈0,5 мм, диаметр диафрагмы должен быть d<1,5 мм. Таким образом, разумный выбор диаметра d диафрагмы позволяет минимизировать влияние паразитных ДП. Диафрагма также может быть использована для юстировки интерферометра. Если поверхность диафрагмы имеет достаточную площадь, то с помощью установленной перед ней второй видеокамеры ВК2 можно контролировать положение и перемещение автоколлимационных пятен [18]. Этот метод юстировки реализован в ИФ типа ФТИ-100.

Интерферометр с плоской ЭП (см. рис.1а) позволяет контролировать поверхность объекта только с  небольшим отклонением от  плоскости. Для контроля сферических поверхностей вместо ЭП устанавливают эталонный объектив (ЭО), состоящий из  нескольких линз, причем выходная линза имеет высококачественную апланатическую поверхность, которая формирует опорный волновой фронт на  отражение [19]. В  настоящее время такие ЭО с  полем 102  мм и  153  мм и  апертурой от f/0,65 выпускаются многими зарубежными компаниями (Zygo, MPF, Marh и др.). Для контроля АП эталонные объективы дополняются корректорами волнового фронта на основе СГ. Голограмма-корректор преобразует сферический волновой фронт W1 на  выходе ЭО в  волновой фронт W2, сопряженный с  формой АП, как показано на  рис.  2а. Эта схема широко используется для контроля АП [20], однако она имеет недостаток  – точность всегда меньше, чем точность контроля плоских или сферических поверхностей. Это обусловлено, в  частности, тем, что подложка СГ не  входит в  общий ход световых пучков ИФ и, следовательно, ее погрешность складывается с результатом измерения. Также существенную роль играет точность юстировки СГ относительно ИФ и контролируемой поверхности. Одним из  путей устранения указанных недостатков является применение так называемых "комбинированных синтезированных голограмм" [14, 21]. Такие голограммы позволяют формировать два и более независимых волновых фронта с  помощью одного элемента. В приложении к ИФ, один волновой фронт является измерительным, а  второй опорным. В  этом случае отпадает необходимость в  эталоне.

На  рис.  2b представлена схема контроля сферического или асферического объекта с  помощью комбинированной СГ, работающей в  параллельном пучке света [22]. Опорный плоский волновой фронт формируется при отражении от  стороны А  подложки. Сторона Б имеет небольшой клин и не влияет на  работу схемы. Использование параллельного пучка света позволяет существенно упростить юстировку голограммы. В  предложенной схеме подложка комбинированной СГ включена в общий ход световых пучков и  ее неоднородности не  влияют на  точность измерения. Эталонные комбинированные СГ по  техническим показателям превосходят обычные ЭО [14], а  по  стоимости они дешевле.

Пространственное разрешение ИФ.

Для контроля прецизионных крупногабаритных зеркал требуются ИФ с высоким пространственным разрешением. Этот параметр на практике обычно определяется количеством интерференционных полос, регистрируемых видеокамерой прибора. Ряд современных ИФ позволяют регистрировать свыше 1000 полос [23], что дает возможность проводить контроль формы АП с  достаточно большим отклонением от  ближайшей сферы. В  этом случае диаметр d диафрагмы (см.рис.1а) должен быть около ~8 мм. Однако работа с таким большим количеством полос нарушает принцип Физо (общий ход измерительного и  опорного пучков), что, с  одной стороны, приводит к  снижению точности измерения (до  λ/4 [24]) и  требует калибровки, а  с  другой  – увеличивает стоимость прибора из-за повышенных требований к качеству оптической системы. Разумным компромиссом является использование сменных диафрагм, переключаемых по  команде оператора. В  одном из  вариантов ИФ модели ФТИ-100 реализовано переключение сменных диафрагм от  d=1,2 до  4,8  мм. На  рис.3 приведен пример рабочего окна интерферометра ФТИ-100 при контроле пластины Ø100 мм. В левой части окна располагается зарегистрированная интерферограмма (на  рис.3а количество полос равно 110), график распределения интенсивности полос по оси Y, таблица аберраций (коэффициентов полиномов Цернике), а  в  правой  – фазовая карта (двух- или трехмерная). На рис. 3б показана увеличенная (10×) интерферограмма центральной области (Ø10 мм) контролируемой пластины. На рис.3b представлено окно вспомогательной видеокамеры (ВК2, на рис. 1) при увеличении 8×. Хорошо видны автоколлимационные пятна измерительного и  опорного пучков, которые формируют интерференционную картину. Центр сетки соответствует центру диафрагмы, а ее внешнее кольцо – угловому отклонению в 3 угловые минуты.

Управление прибором

Для обработки интерферограмм используется как универсальное (Durango [25], IntelliWave [26], Reveal [27] и др.) программное обеспечение (ПО), так и специализированное ПО (см. таблицу), интегрированное с  прибором. Последний вариант более удобен, так как позволяет реализовать проведение серии измерений, вывод фазовой карты в  реальном времени, автоматическую юстировку и  все стандартные функции калибровки и настройки прибора. Интерферометр осуществляет связь с  компьютером по  проводному или беспроводному соединению. Существует несколько вариантов. В  первом варианте блок управления размещается в компьютере на  специальной плате расширения (PCI, PCI Express), при этом видеокамеры подключаются отдельно по интерфейсам типа USB 3.0. или Camera Link. Во  втором случае соединение интерферометра и  управляющего компьютера через интерфейс USB 2.0/3.0 обладает рядом преимуществ: высокая скорость передачи данных и  возможность поддержки технологии PnP, что облегчает процедуру подключения прибора. Однако существенными недостатками USB являются ограничение на длину кабеля (это важно, если интерферометр размещается в "чистой комнате" или в недоступном месте) и  низкая стабильность. В  третьем варианте связи, который является прогрессивным, подключение интерферометра к  компьютеру осуществляет сетевой интерфейс Gigabit Ethernet (GigE) спецификации 802.3ab. Он обеспечивает требуемую скорость передачи данных и  в  то  же время лишен недостатков, связанных с  ограничением длины кабеля и  стабильности. Интерферометры, работающие по  интерфейсу GigE, можно устанавливать на  расстоянии до  100  м от  оператора. Кроме того, интерферометры с  GigE могут быть включены в корпоративную сеть, что позволяет организовать коллективный доступ. Таким образом, интерфейс GigE является наиболее универсальным и  легко применим в условиях производства. Интерферометры типа ФТИ-100 оснащены интерфейсом GigE.

Расширение функциональных возможностей

По своему назначению интерферометр предназначен для измерения отклонения формы поверхности от  эталона. Однако оптическая схема ИФ (см. рис.1а) имеет много общего с  автоколлиматором, который предназначен для измерения угла наклона контролируемой поверхности. Совмещение этих функций в одном приборе позволяет существенно расширить его функциональные возможности. В  интерферометре ФТИ-100 изображение от  вспомогательной видеокамеры (см. рис.3с) анализируется управляющим компьютером, который осуществляет поиск центров автоколлимационных пятен и вычисляет их смещение из исходного положения по  двум координатам (dx  и dy, см.  рис.3с). То  есть в  интерферометре реализована функция фотоэлектрического автоколлиматора, позволяющая проводить юстировку плоскости СГ [28]. На этапе юстировки вспомогательная видеокамера регистрирует излучение в  виде двух пятен (от  эталонной и  от  контролируемой поверхностей) в  плоскости диафрагмы (см. рис.3с). При точной настройке интерферометра они должны проецироваться точно в центр диафрагмы и формировать интерферограмму с  "бесконечной" полосой. Изображение этих световых пятен наблюдается оператором, а также передается в блок обработки изображения, где вычисляются координаты их центров и текущая погрешность наводки. Обработка интерферограмм В интерферометре ФТИ-100 для восстановления формы волнового фронта и  получения коэффициентов разложения по  базису полиномов Цернике используются (по  выбору оператора) метод ВФЗ (пять интерферограмм), метод СА на  основе преобразования Фурье и  метод прослеживания интерференционных полос [29, 30]. Причем, алгоритмы ВФЗ могут быть самокалибрующимися [31]. Для увеличения точности восстановления формы волнового фронта при наличии турбулентности воздуха и  вибраций предусмотрено автоматическое выполнение серии измерений с усреднением результатов. Точность измерений обычно ограничивается качеством ЭП или объективов или голограмм. ПО интерферометра ФТИ-100 позволяют вычитать из  результатов измерений данные калибровки, что существенно увеличивает точность измерений. При этом основным параметром, характеризующим прибор, становится воспроизводимость результатов по серии из нескольких десятков измерений. На рис.4 приведены примеры интерферограмм и  карты поверхности контролируемой пластины диаметром 100  мм, полученные программой Diopto тремя методами. Хорошо видно, что метод ВФЗ дает лучшую детализацию формы поверхности (рис. 4b), вследствие чего значение PV больше, чем полученные другими методами (см. рис.4d, e), хотя их среднеквадратичные значения (rms) совпадают с погрешностью λ/1000. Преимущество метода ВФЗ хорошо демонстрирует пример интерферограммы и карт поверхности фазовой пластинки, приведенный на рис.5. Видно, что метод ВФЗ воспроизводит прямоугольную форму рельефа фазовой пластинки, в  то  время как метод спектрального анализа ее сглаживает, как показано на графиках (см. врезки на рис.5b, c).

Заключение.

Интерферометры являются незаменимым инструментом при производстве и  контроле прецизионных оптических и лазерных систем. Для эффективного применения интерферометров необходимо знать и  понимать их особенности, области применения и  направления их совершенствования