

**ДИФРАКЦИОННЫЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ.  
АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР**

В. К. КИРИЛЛОВСКИЙ, Т. В. ТОЧИЛИНА\*

*Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*  
*\*tvtochilina@itmo.ru, tvtochilina@mail.ru*

**Аннотация.** Представлен обобщенный анализ инновационной группы методов и приборов дифракционной интерферометрии в сопоставлении с традиционными интерферометрами. Рассмотрены новые возможности для снижения погрешности и повышения чувствительности измерений, получения надежных, метрологически высоких результатов. Надежность достигается с помощью дифракции и стабильного опорного волнового фронта, не чувствительного к вибрациям, термическим и гравитационным воздействиям. Фронт формируется с пренебрежимо малыми погрешностями в результате дифракции лазерного пучка, сфокусированного на точечном отверстии в металлическом экране. Отмечена целесообразность развития методов дифракционной интерферометрии на основе новых схемных решений и современной элементной базы с использованием оценки качества изображения оптических систем с помощью компьютерной расшифровки интерферограммы и математического аппарата интерферометрической обработки информации. Предложенный подход может быть применен в условиях реального оптического производства, медицинской практики и при научных исследованиях.

**Ключевые слова:** дифракционные интерферометры, дифрагированный волновой фронт, погрешности измерений

**Ссылка для цитирования:** Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Дифракционные интерферометры. Аналитический обзор // Изв. вузов. Приборостроение. 2024. Т. 67, № 3. С. 257—267. DOI: 10.17586/0021-3454-2024-67-3-257-267.

**DIFFRACTION INTERFEROMETERS. ANALYTICAL REVIEW**

V. K. Kirillovsky, T. V. Tochilina\*

*ITMO University, St. Petersburg, Russia*  
*\*tvtochilina@itmo.ru, tvtochilina@mail.ru*

**Abstract.** A generalized analysis of an innovative group of diffraction interferometry methods and instruments is presented in comparison with traditional interferometers. New possibilities are considered for reducing the error and increasing the sensitivity of measurements, obtaining reliable results of metrologically high quality. Reliability is achieved through diffraction and a stable reference wavefront that is not sensitive to vibration, thermal and gravitational influences. The devices considered use a reference wavefront formed on an unpolished optical surface. The front is formed with negligible errors as a result of diffraction of a laser beam focused on a pinhole in a metal screen. The feasibility of developing diffraction interferometry methods based on new schematic solutions and modern element base using assessment of the image quality of optical systems with computer decoding of the interferogram and the mathematical apparatus of interferometric information processing is noted. The proposed approach can be applied in real optical production, medical practice, and scientific research.

**Keywords:** diffraction interferometers, diffracted wavefront, measurement errors

**Введение.** Решение задач оптического контроля и исследования оптических систем и приборов в процессе их разработки, а также во время испытания, изготовления и использования является важным направлением в различных областях применения. Понятие „высокоточное измерение“ определяет количественные и качественные параметры исследуемых объектов. В природе закономерности чаще всего обнаруживаются в численной форме, в результате количественных оценок наблюдаемых объектов и явлений. От развития методов и средств измерений, снижения их погрешностей и повышения чувствительности, и соответственно результатов, которые будут получены в процессе измерений, зависит достоверность описания исследуемых объектов и истинность модели окружающего мира [1].

Оптические методы измерений отличаются минимальными погрешностями. С помощью традиционных методов оптических измерений возможно получить пороговую чувствительность порядка  $0,1\lambda$  используемого излучения, которая для видимого излучения составляет 0,5 мкм [2, 3].

Анализ источников погрешностей традиционных интерферометров и поиск оптимальных способов их радикального снижения показывает, что для получения требуемых результатов необходимы разработка и применение новых решений. Одно из таких решений — интерференционные методы измерения деформаций волнового фронта. Структура изображения, построенного с использованием изготовленной оптической системы, может быть экспериментально получена прямым или косвенным путем.

К наиболее известным косвенным традиционным методам исследования качества полученного изображения относятся: теневой метод Фуко и метод Гартмана [3]. Также к таким методам относятся интерферометры Майкельсона, Тваймана и Физо, содержащие образцовую деталь, и сдвиговые, дифракционные, голографические интерферометры и интерферометр Ронки, не содержащие образцовую деталь [1—14]. Преимущества косвенных методов заключаются в возможности по известной топографии отклонений фронта волны рассчитать большинство характеристик качества изображения. Полученные результаты не зависят от особенностей приемника изображения в схеме контроля. Косвенные методы позволяют определить влияние конкретных искажений волнового фронта, вносимых системой, на качество изображения, что обуславливает возможность широкого применения этих методов на практике, например при обработке оптических поверхностей, изготовлении и юстировке оптических систем и элементов.

В настоящее время создаются интерферометры нового класса, которые применяются для достижения повышенного уровня точности оптических систем и чувствительности исследований в микроэлектронике, микроскопии, лазерных технологиях и астрономии, космической технике, а также для исследований в нефтегазовой сфере, медицине и генетике, в области продовольственной безопасности и экологии, в астрофизике, в науке о строении Вселенной и солнечной системы.

**Требования к погрешностям образцовых элементов традиционных интерферометров.** Традиционные интерферометры (например, по схеме Физо или Тваймана — Грина) характеризуются тем, что для формирования опорного волнового фронта в их конструкции необходимо применение образцового оптического элемента (плоской или сферической оптической поверхности). При изготовлении оптической поверхности неизбежна остаточная погрешность образцовой детали.

В схеме лазерного неравноплечего интерферометра (рис. 1, а) со сферической образцовой поверхностью луч лазера 1 проходит через осветительную систему 2—б, далее выполняется

оценка изображений образцовой 7 и исследуемой 8 оптических поверхностей визуально оператором или с помощью видеокамеры 9, 10. По виду интерференционной картины определяется погрешность оптической поверхности 8 как отношение максимальной стрелки прогиба  $h$  интерференционной полосы к шагу  $l$  (периоду) полосы (рис. 1, б) [1, 2].

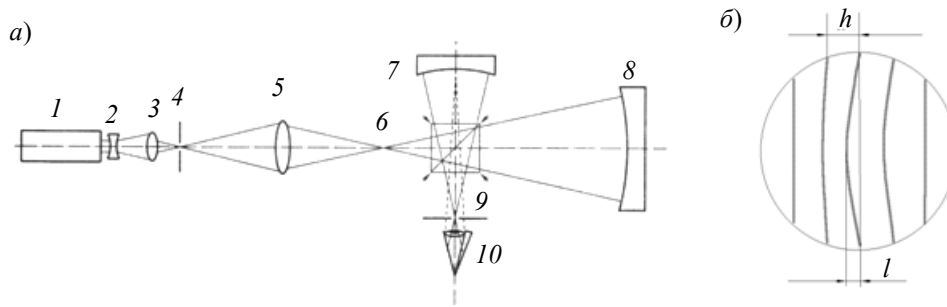


Рис. 1

На практике получаемая погрешность равна  $\lambda/20$ . Отметим, что данная погрешность зависит от влияния на оптическую поверхность вибраций, а также термических, механических и гравитационных воздействий, которые нестабильны во времени. Общий вид лазерного неравноплечего интерферометра и полученная интерферограмма оптической поверхности (очковой линзы) показаны на рис. 2, а, б.

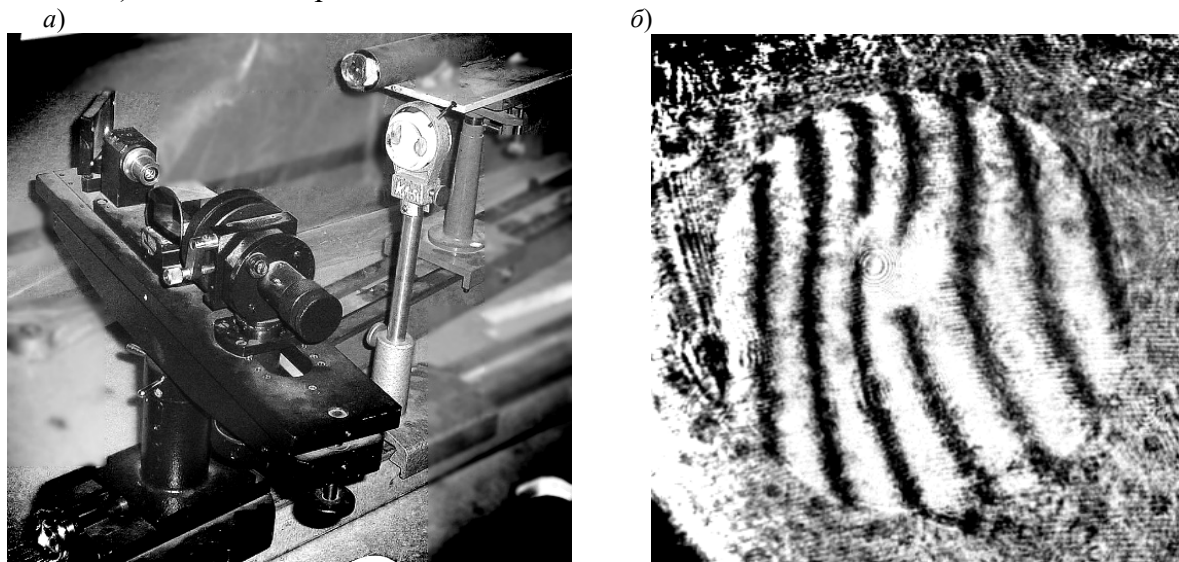


Рис. 2

При использовании оптических методов измерений следует учитывать, что погрешность средства измерения должна быть в 5—10 раз меньше погрешности исследуемого прибора. Для этого определены стандартные требования к погрешности для контроля интерферометрических эталонов  $\omega_{\text{эт}}$ , демонстрирующих качество распознавания характеристик изображения в виде aberrаций и погрешностей оптических систем различных классов (см. таблицу) [2].

Тип оптической системы	Требования к погрешности		Погрешность образцового волнового фронта $\omega_R$
	системы	прибора контроля	
Зрительная труба	$0,25\lambda$	$(0,025—0,05)\lambda$	$0,032\lambda$
Исследовательский микроскоп	$0,05\lambda$	$(0,005—0,01)\lambda$	$0,007\lambda$
Космический телескоп	$0,03\lambda$	$(0,003—0,006)\lambda$	$0,0045\lambda$

В традиционной интерферометрии значение требуемой погрешности приборов, используемых, например, в вакууме, при влиянии вибраций, гравитации и в других условиях, также относится к допустимым остаточным погрешностям образцового волнового фронта  $\omega_R$  [2].

Применение программы цифрового анализа и обработки интерферограмм позволяет обнаружить и измерить деформации волнового фронта, которые визуальным образом обнаружить невозможно. Величина деформации при этом находится на уровне  $\lambda/100$ .

На практике распределение интенсивности в интерференционной картине определяется выражением

$$I'' = \cos^2 \pi(\nu y + \omega + \omega_R + \omega_{\text{эт}}), \quad (1)$$

где  $\nu$  — пространственная частота интерференционных полос, вызванных наклоном;  $y$  — протяженность оптической поверхности по нормали к ребру клина;  $\omega$  — разность хода в волновой мере, вызванная погрешностью исследуемой оптической поверхности, если образцовая поверхность погрешности не имеет.

В работе [4] исследованы условия расширения возможностей традиционной интерферометрии и сделан вывод, что их реализация возможна в случае создания интерферометра с дифракционным опорным волновым фронтом. С целью решения данной задачи авторами настоящей статьи осуществлен поиск новых идей и технических решений для их применения в современных условиях.

**Интерферометры с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом, не требующие применения образцовых оптических элементов.** Началом для разработки дифракционного интерферометра [6] стала, предложенная акад. В. Линником (1933 г.) схема интерферометра (рис. 3) с совмещенным ходом когерентных лучей и формированием дифракционного изображения в точечном отверстии. В данной схеме поперечная расфокусировка интерферометра для получения прямых интерференционных полос ограничена диаметром пятна рассеяния. Получаемые интерференционные картины имели невысокое качество и были зашумлены, что снижало точность измерений. Кроме того, для настройки интерферометра Линника при исследовании каждого оптического элемента требовалось использование микроподвижек с чувствительностью порядка 1 мкм, что усложняло и удорожало его практическую реализацию.

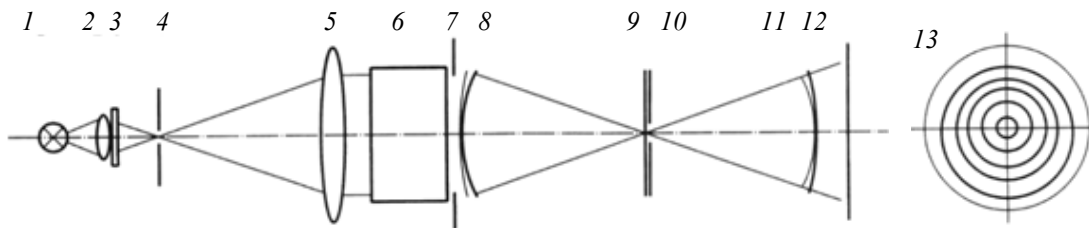


Рис. 3

При работе интерферометра Линника тест-объект „светящаяся точка“ 4 освещается системой 1—3 и фокусируется исследуемой системой (или деталью) 6 через выходной зрачок 7, формирующий волновой фронт 8, на плоскость светоделительного покрытия 10, содержащего точечную диафрагму. Часть света, прошедшего полупрозрачное покрытие 10 пластины 9, распространяется в направлении наблюдательной системы в виде рабочего сферического волнового фронта 12, искаженного аберрациями. Часть света, испытавшего дифракцию на точечной диафрагме, распространяется в виде неискаженного сферического опорного волнового фронта 11. В результате интерференции рабочих и опорных волновых фронтов формируются оптико-измерительное интерференционное изображение 13.

Удовлетворительный контраст интерферограммы достигается, когда интенсивности рабочих и опорных фронтов близки по величине, что в данной схеме зависит не только от коэффициента пропускания покрытия (для измерения которого пришлось бы выполнять опера-

цию замены пластинки и повторную настройку схемы), но и от положения пятна рассеяния (изображения точечного тест-объекта) относительно точечной диафрагмы. Кроме того, смещение пятна относительно диафрагмы более чем на 0,5 диаметра пятна приводит к гашению опорного пучка лучей в интерферометре, что влечет за собой исчезновение интерференционных полос.

Итак, принцип действия дифракционного интерферометра основан на явлении дифракции на точечном отверстии в металлическом покрытии. Конструкция данного интерферометра может быть надежно воспроизведена в любых условиях. Основное достоинство рассмотренной классической схемы заключается в отсутствии образцовой оптической поверхности, но при этом имеется источник сферической опорной волны, используемый при контроле оптических поверхностей и систем наивысшей точности. Отметим, что подобный источник может применяться и для контроля образцовых элементов традиционных интерферометров. Принцип работы дифракционного интерферометра аналогичен работе традиционных интерферометров, в том числе используются различные средства повышения точности при измерительных отсчетах. Важно, что увеличение точности отсчетов влияет на повышение точности результата измерения (тогда как в традиционных интерферометрах это лишь точность отсчитывания суммарных деформаций рабочего волнового фронта, имеющего неустранимую ошибку, связанную с нестабильной ошибкой образцовой детали) [5]. Несмотря на недостатки такого интерферометра с совмещенными ветвями — сложности настройки, отличающейся от традиционной, невысокого качества интерференционной картины и определенных сложностях ее интерпретации, данный интерферометр демонстрирует новые возможности и перспективы современной интерферометрии, так как в нем отсутствуют погрешности изготовления образцовой поверхности, а также термические, гравитационные и вибрационные воздействия на опорный волновой фронт в процессе измерительного эксперимента [1—14].

Оптимальный размер точечного дифракционного отверстия составляет

$$d = 1,22\lambda/3A, \quad (2)$$

где  $\lambda$  — длина волны применяемого в интерферометре излучения,  $A$  — апертура объектива осветительной системы прибора.

В работе [4] исследованы методы контроля качества изображения и предельные значения погрешностей оптических систем и деталей, составляющие менее  $0,1\lambda$ ; также разработаны интерферометры с дифракционным образцовым волновым фронтом. В работах [1, 8—10] приведено обоснование возможности использования опорного волнового фронта, дифрагированного на точечном отверстии, который используется в качестве образцового и обеспечивает отклонение от сферической формы не более чем на 4 нм.

**Неравноплечий дифракционный интерферометр.** Высокую эффективность при контроле высокоточных оптических поверхностей и систем показал лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом и разнесенными ветвями [7]. Авторами разработаны разновидности схем интерферометра с дифрагированным эталонным волновым фронтом. Этот прибор характеризуется традиционной методикой настройки и интерпретации интерференционной картины, обеспечивает высокое качество интерферограммы, гибкость при исследовании оптических систем и элементов с разными коэффициентами пропускания (отражения) от 98 % (зеркальные покрытия) до 0,15 % (просветляющие покрытия). Прибор может быть использован для оценки погрешностей изготовления оптических поверхностей и оценки качества объективов различного назначения, в том числе объективов микроскопов и космических телескопов.

В схеме интерферометра отсутствуют эталонные (точные) поверхности. Благодаря высокой когерентности лазерного излучения и его способности фокусироваться в пятно малых размеров в интерферометре в качестве образцового используется сферический волновой

фронт, образованный при дифракции сходящихся пучков на отверстии диаметром порядка 1—10 мкм.

Достоинство интерферограммы, полученной с помощью лазерного интерферометра с дифракционной волной сравнения, заключается в том, что все пучки лучей фильтруются при прохождении через дифрагирующее точечное отверстие, и поэтому интерференционное изображение отличается высоким качеством, чистотой и отсутствием шумов [2]. В результате получается четкая расшифровка интерферограммы при использовании программы ZEBRA MathOPTIX (или подобных программ распознавания и компьютерной обработки интерферограмм). Также обеспечивается высокая надежность распознавания интерференционных полос, стабильная повторяемость выходных числовых величин, что гарантирует правильность и точность конечных результатов контроля [2].

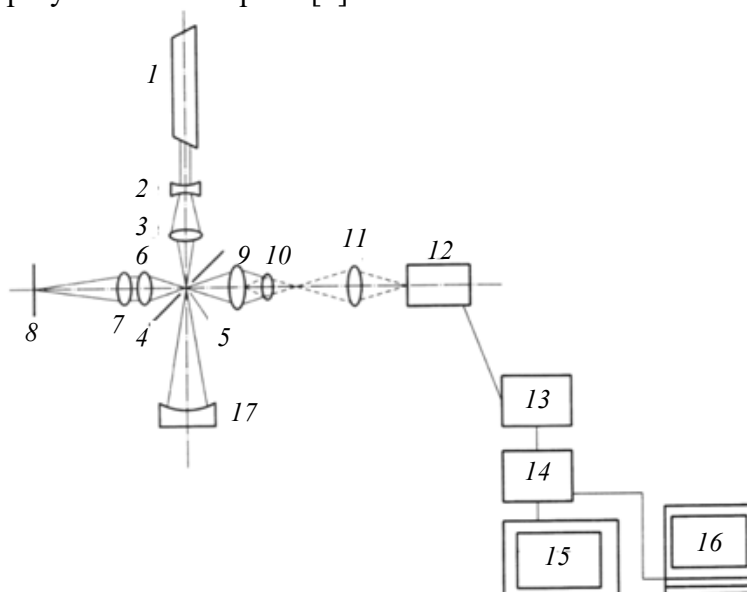


Рис. 4

Схема реализованного интерферометра с дифракционным опорным волновым фронтом показана на рис. 4. При работе интерферометра пучок лучей лазера 1 фокусируется осветительной системой 2, 3 на точечное отверстие 5 в зеркальном покрытии наклонного плоского зеркала 4 в виде пятна рассеяния (обычно дифракционного кружка) диаметром  $\sim 10$  мкм. Точечное отверстие является источником дифракционной сферической волны, которая в автоколлимации от исследуемой сферической поверхности фокусируется в виде пятна рассеяния, частично перекрывающего точечное отверстие, а чаще смещающего полученную интерференционную картину прямолинейных полос. Отразившись от зеркала, пучок через наблюдательный микроскоп 9—11 направляется на приемник изображения 12. Часть излучения лазера, сфокусированного на точечное отверстие 5, но не прошедшего через него, отражается от зеркала 4 в направлении осветительного сферического зеркала 8 и через объектив 6—7 фокусируется зеркалом на отверстии 5 в направлении плеча наблюдения 9—11 [2, 7]. При этом на отверстии формируется вторая дифракционная сферическая волна, фронт которой используется в качестве опорного. В результате сложения этой волны с рабочей волной, сформированной контролируемой поверхностью, возникает интерференционная картина в совмещенных световых пучках, распространяющихся от точечного отверстия в направлении приемника изображения. Рассмотренный вариант схемы интерферометра имеет важную особенность: данный интерферометр — полностью безэталонный, так как не содержит ни одной образцовой оптической поверхности, а также отсутствуют поверхности, погрешности изготовления которых дополняют погрешности измерения [1].

При наличии в схеме контроля значительных вибраций, а также при необходимости регулярной работы на интерферометре используется персональный компьютер 16 с видеосистемой 12—14. При этом время экспозиции  $t_e$  каждого видеокadra рассчитывается по формуле

$$t_e = 1/10F_v,$$

где  $F_v$  — частота вибрации.

Это необходимо для предотвращения размывания полос из-за вибрации.

На рис. 5, а показаны пример реализации интерферометра с дифрагированным опорным фронтом, собранного на базе узлов компании „Edmund Optics“ (США) и АО „ЛОМО“ (Россия) и полученная интерферограмма [1]. Интерферометр используется для исследования на виброизолирующем интерференционном столе прецизионного сферического зеркала на основе PDI-интерферометра.

Второй вариант интерферометра с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом показан на рис. 5, б. Основная особенность интерферометра — высокое качество полученной интерферограммы, что способствует наиболее полному использованию точностных возможностей прибора. Полученное телевизионное изображение движущейся интерференционной картины записывается в видеопамять, а затем покадрово исследуется и выполняется расшифровка изображения неподвижной интерферограммы [7]. В результате изображение, воспроизводимое с одиночного кадра, не будет зависеть от вибраций.

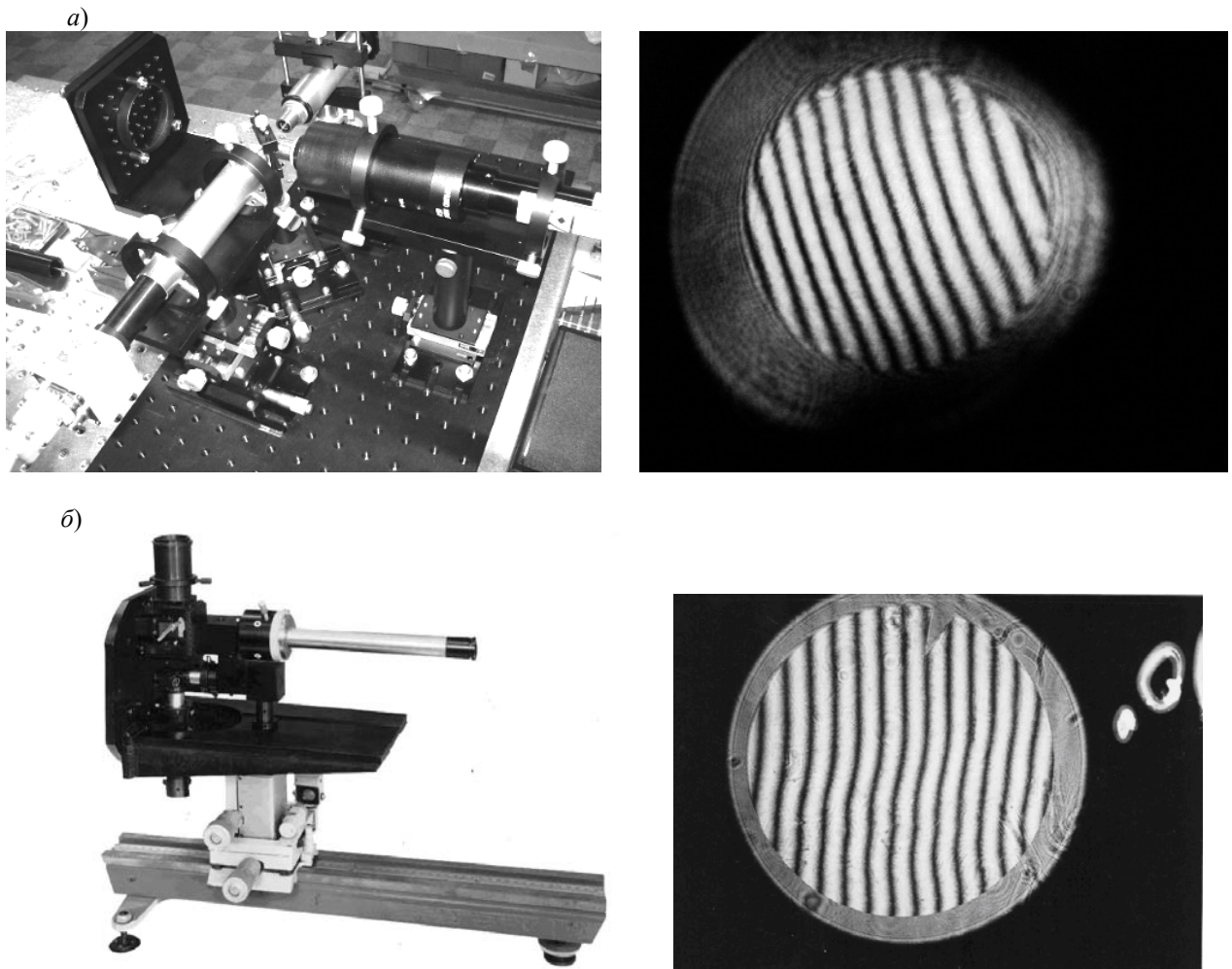


Рис. 5

**Твердотельный дифракционный интерферометр.** Для самоконтроля и автокоррекции телескопа на орбите необходим виброустойчивый твердотельный дифракционный интерферометр (рис. 6) в форме моноблока, простой и прецизионный. Данный интерферометр доступен, экономичен и может использоваться в заводской, научной и учебной лабораториях. Схема интерферометра содержит осветительную систему 2—4 с лазером 1 и компонент-полусферу 5 с зеркальным покрытием 6. Свет отражается от зеркального покрытия 7 с дифрагирующим субмикронным отверстием 10 и проецируется на исследуемую сферическую поверхность 12, изображение которой формируется в наблюдательном микроскопе и регистрируется видеокамерой 11.

Прибор имеет следующие достоинства: высокую точность измерений; нерасстраиваемость; компактность и легкость; нечувствительность к вибрации, термическим и гравитационным воздействиям; возможность применения модуля данного интерферометра при конструировании и изготовлении дифракционного интерферометра по блочно-модульному методу; возможность выполнения прибора в виде монолита, устойчивого к вибрации. Направления использования дифракционных лазерных интерферометров описаны в работе [11].

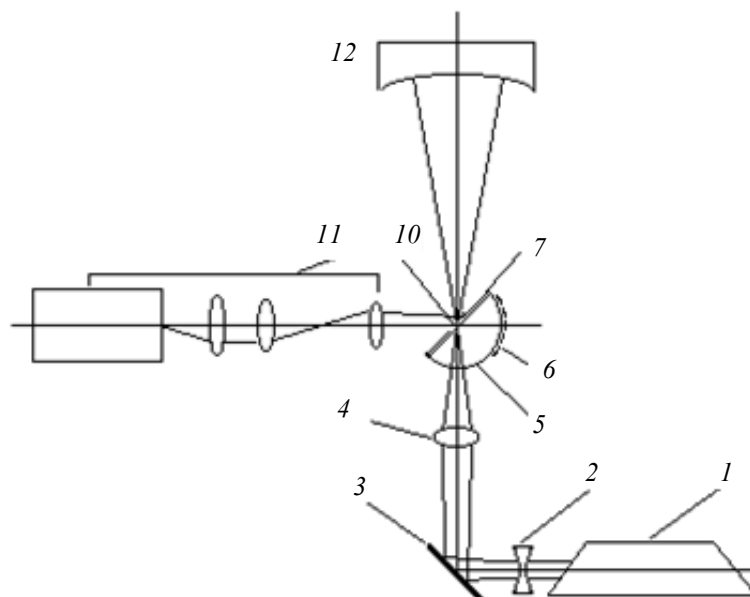


Рис. 6

**Трехплечий дифракционный интерферометр.** Авторами предлагается простой и экономичный вариант дифракционного интерферометра — трехплечий интерферометр (рис. 7). В схеме интерферометра использован полупроводниковый лазер 1, расширительная линза 2 для заполнения зрачка осветительного объектива 3 и субмикронное отверстие 4 в покрытии плоской грани для создания опорного волнового фронта 6. Центральным модулем является плоскопараллельная пластина 5 толщиной 0,14 мм (покровное стекло). Точечное отверстие 4 в непрозрачном металлическом покрытии служит источником дифракционной сферической волны 6. На схеме показаны также фрагменты опорных фронтов в рабочем плече 7 с исследуемым объектом 8 и в плече наблюдения 9. Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть результат сложения опорной волны, формируемой при дифракции на точечном отверстии, и рабочей волны, отраженной от контролируемой поверхности [12]. Диаметр отверстия, генерирующего эталонный волновой фронт, рассчитывается по формуле (2). Приемник изображения 10—13 содержит видеокамеру, подключенную к персональному компьютеру с программой обработки интерферограмм „Tiger“, расчета и статистической обработки массива результатов измерения.



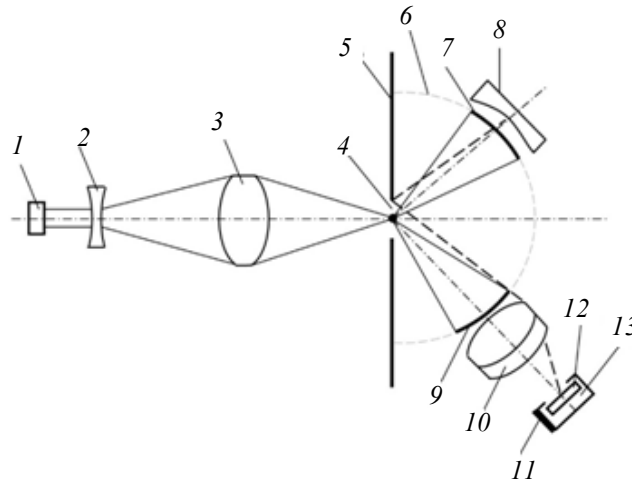


Рис. 7

Данный интерферометр имеет простую по сравнению с прототипами схему и конструкцию и прост в юстировке. Возможно его конструктивное исполнение в варианте твердотельного моноблока, включающего полупроводниковый лазер, матричную камеру и процессор.

Достижимые преимущества: виброустойчивость; нерасстраиваемость; экономичность в разработке и производстве; целесообразность серийного производства; доступная стоимость и перспектива широкого применения во множестве областей, таких как добыча нефти, газа и других ресурсов, космос, сельское хозяйство, медицина, наука, образование, промышленность, связь.

**Заключение.** Приведено краткое обоснование факторов современной прецизионной интерферометрии, указывающих на необходимость развития направления дифракционных интерферометров.

Приведен обзор схем интерферометров с дифрагированным эталонным волновым фронтом и обоснованы их достоинства. Данные приборы отличаются предельно низкими погрешностями, простотой конструкции и экономичностью в производстве. Показан комплекс дифракционных интерферометров, разработанных и исследованных с участием авторов настоящей статьи. Значительный интерес представляет твердотельный дифракционный интерферометр, его отличают высокая виброустойчивость и надежность в работе. Интерферометр обеспечивает измерение формы прецизионных оптических поверхностей с точностью на уровне  $0,02\lambda$  и выше, что важно для спектрометрии и астрономии, микроскопии, в технологиях микроэлектроники. Приведена схема дифракционного интерферометра, имеющего три плеча, который отличается, при высокой точности, пониженной виброчувствительностью, а также простой и экономичной конструкцией. Приборы данного класса используют опорный волновой фронт, который формируется с пренебрежимо малыми погрешностями в результате дифракции лазерного пучка, сфокусированного на точечном отверстии в металлическом экране диаметром менее  $0,3$  от кружка Эри.

Показана перспективность развития данного направления в сочетании с современными достижениями для радикального снижения погрешностей, повышения чувствительности и воспроизводимости измерений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилловский В. К. Современные оптические исследования и измерения. СПб—М.—Краснодар: Изд-во „Лань“, 2022. 303 с.
2. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Методы исследования и контроля качества оптических систем: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2012. 125 с.

3. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Часть 5. Аберрации и качество изображения: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2019. 94 с.
4. Иванова Т. А., Кирилловский В. К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1984. 231 с.
5. Кирилловский В. К., Вознесенский Н. Б., Ли К. Х., Гуров И. П. Сравнительный анализ интерферограмм, полученных на интерферометре с дифракционной волной сравнения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2004. № 13. С. 198—203.
6. Кирилловский В. К., Ле Зуи Туан. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для аппаратуры контроля качества изображения оптических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 7. С. 52—56.
7. Гаврилов Е. В., Кирилловский В. К. Современные кинообъективы и их контроль // Оптич. журн. 2005. Т. 72. № 10. С. 47—56.
8. Кирилловский В. К., Вознесенский Н. Б. Высокоапертурный дифракционный интерферометр с унифицированным опорным фронтом // Междунар. оптич. конгресс „Оптика-XXI век“: Сб. СПб, 2000.
9. Lee Kyeong-Hee, Voznesensky N. B., Kirillovsky V. K. Principle of certification of high precision optical parts and systems based on diffraction interferometer // Proc. SPIE 5252, Optical Fabrication, Testing, and Metrology, 26 Febr. 2004. DOI: 10.1117/12.512231.
10. Kirillovsky V. K., Voznesensky N. B., Troughine M. M. The interferometer with diffraction on dot aperture for testing of the shape errors of precise surfaces // Proc. SPIE 5399, Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies 2003. DOI: 10.1117/12.552324.
11. Кирилловский В. К., Точилина Т. В. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик: Учеб. пособие. СПб: Ун-т ИТМО, 2018. 86 с.
12. Богданов И. Ю., Гаврилов Е. В., Кирилловский В. К. Особенности контроля объектива для формирования наноструктур // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2008. № 58. С. 26—30.
13. Kirillovsky V. K. Diffraction Reference Wavefront Laser Interferometer // Proc. SPIE 1751, Miniature and Micro-Optics: Fabrication and System Applications II. 1992. Vol. 5, 1751. P. 197—200.
14. Кирилловский В. К. Изучение принципов современной прецизионной интерферометрии на примере дифракционных интерферометров // Междунар. оптич. конгресс „Оптика-XXI век“: Сб. СПб, 2000.

#### Сведения об авторах

- Владимир Константинович Кирилловский** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, Центр прикладной оптики; E-mail: vkkir@mail.ru
- Татьяна Вячеславовна Точилина** — канд. техн. наук; Университет ИТМО, Центр прикладной оптики; ст. преподаватель; E-mail: tvtochilina@itmo.ru

Поступила в редакцию 20.11.23; одобрена после рецензирования 28.11.23; принята к публикации 14.01.24.

#### REFERENCES

1. Kirillovsky V.K. *Sovremennyye opticheskiye issledovaniya i izmereniya* (Modern Optical Research and Measurements), St. Petersburg, Moscow, Krasnodar, 2022, 303 p. (in Russ.)
2. Kirillovsky V.K., Tochilina T.V. *Metody issledovaniya i kontrolya kachestva opticheskikh system* (Methods for Research and Quality Control of Optical Systems), St. Petersburg, 2012, 125 p. (in Russ.)
3. Kirillovsky V.K., Tochilina T.V. *Opticheskiye izmereniya. Chast' 5. Aberratsii i kachestvo izobrazheniya* (Optical Measurements. Part 5: Aberrations and Image Quality), St. Petersburg, 2019, 94 p. (in Russ.)
4. Ivanova T.A., Kirillovsky V.K. *Proyektirovaniye i kontrol' optiki mikroskopov* (Design and Control of Microscope Optics), Leningrad, 1984, 231 p. (in Russ.)
5. Kirillovsky V.K., Voznesensky N.B., Lee K.H., Gurov I.P. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2004, no. 13, pp. 198–203. (in Russ.)
6. Kirillovsky V.K., Le Duy Tuan. *Journal of Instrument Engineering*, 2007, no. 7(50), pp. 52–56. (in Russ.)
7. Gavrilov E.V., Kirillovskii V.K. *Journal of Optical Technology*, 2005, no. 10(72), pp. 773–780.
8. Kirillovsky V.K., Voznesensky N.B. *Optika-XXI vek* (Optics-XXI Century), Collection of the International Optical Congress, St. Petersburg, 2000. (in Russ.)
9. Lee Kyeong-Hee, Voznesensky N.B., Kirillovsky V.K. *Proc. SPIE, Optical Fabrication, Testing, and Metrology*, 26 February 2004, vol. 5252, <https://doi.org/10.1117/12.512231>.
10. Kirillovsky V.K., Voznesensky N.B., Troughine M.M. *Proc. SPIE, Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies*, 2 April 2004, vol. 5399, <https://doi.org/10.1117/12.552324>.

11. Kirillovsky V.K., Tochilina T.V. *Opticheskiye izmereniya. Chast' 4. Otsenka kachestva opticheskogo izobrazheniya i izmereniye yego kharakteristik* (Optical Measurements. Part 4. Optical Image Quality Assessment and Measurement of its Characteristics), St. Petersburg, 2018, 86 p. (in Russ.)
12. Bogdanov I.Yu., Gavrilov E.V., Kirillovsky V.K. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2008, no. 58, pp. 26–30. (in Russ.)
13. Kirillovsky V.K. *Proc. SPIE, Miniature and Micro-Optics: Fabrication and System Applications II*, 1992, vol. 1751, pp. 197–200.
14. Kirillovsky V.K. *Optika-XXI vek* (Optics-XXI Century), Collection of the International Optical Congress, St. Petersburg, 2000. (in Russ.)

**Data on authors****Vladimir K. Kirillovsky**— Dr. Sci., Professor; ITMO University, Applied Optics Center;  
E-mail: vkkir@mail.ru**Tatiana V. Tochilina**— PhD; ITMO University, Applied Optics Center; Senior Lecturer;  
E-mail: tvtochilina@itmo.ru

Received 20.11.23; approved after reviewing 28.11.23; accepted for publication 14.01.24.