



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2014154120/28, 30.12.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
30.12.2014

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.12.2014

(45) Опубликовано: 20.01.2016 Бюл. № 2

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 147271 U1, 27.10.2014. RU 2263279 C2, 27.10.2005. JP 2010243379 A, 28.10.2010.

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, для  
Барышникова Н.В., НИИРЛ

(72) Автор(ы):

Барышников Николай Васильевич (RU),  
Гладышева Яна Владимировна (RU),  
Животовский Илья Вадимович (RU),  
Денисов Дмитрий Геннадьевич (RU),  
Абдулкадыров Магомед Абдуразакович (RU),  
Патрикеев Владимир Евгеньевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана" (МГТУ  
им. Н.Э. Баумана) (RU)

**(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПЛОСКИХ ОПТИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ПОД УГЛОМ К ОПТИЧЕСКОЙ ОСИ**

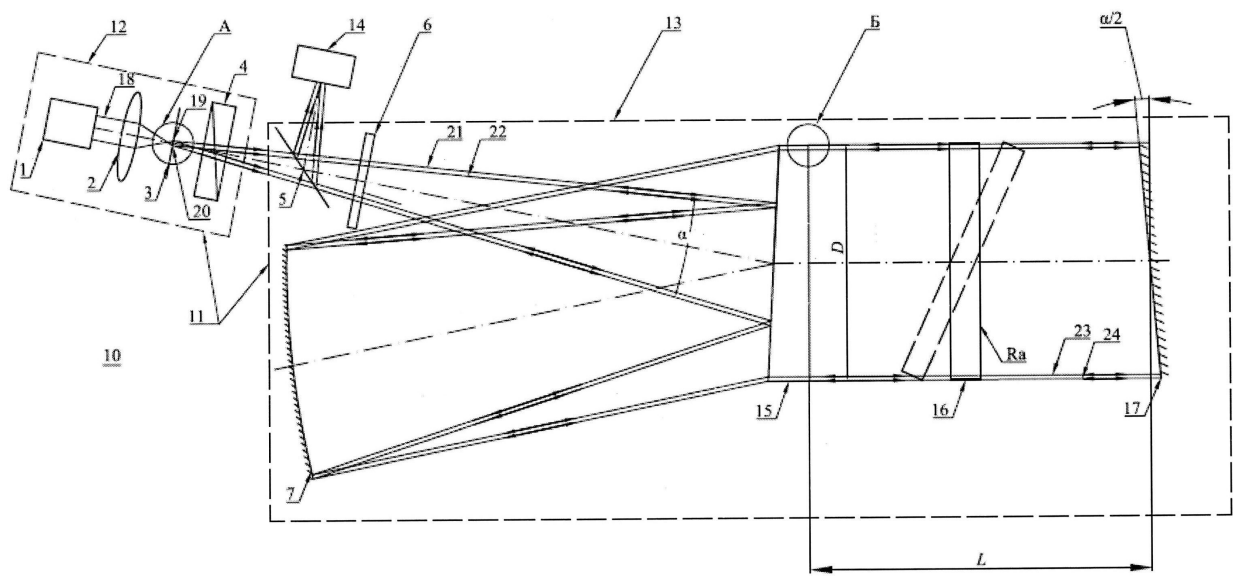
(57) Реферат:

Изобретение относится к области оптического приборостроения, а именно к интерференционным системам и методам контроля качества оптических поверхностей. Устройство для контроля качества плоских оптических деталей, расположенных под углом к оптической оси, состоит из передающего канала, включающего источник излучения, формирующий два пучка, расположенных на расстоянии друг от друга со взаимно перпендикулярными линейными состояниями поляризации, находящихся в фокальной плоскости объектива, четвертьволновую пластину, а также последовательно расположенные по ходу излучения на выходе объектива эталонную оптическую пластину, контролируемую оптическую деталь и возвратное зеркало, а также приемного канала, включающего светоделитель и после него приемник излучения, состоящий из матричного фотоприемника и линейного

анализатора, позволяющий регистрировать одновременно несколько интерферограмм, необходимых для дальнейшего анализа. Источник излучения включает два точечных источника, разнесенных на расстояние  $\Delta$  относительно друг друга перпендикулярно оптической оси. Устройство изготовлено с возможностью регулирования расстояния  $L$  между плоской эталонной поверхностью эталонной пластины и возвратным зеркалом в соответствии с граничным условием максимально допустимого

расстояния: 
$$L = \frac{4 \cdot D \cdot f' \cdot \Delta}{n \cdot (4f'^2 - \Delta^2)}$$
, где  $D$  - диаметр

контролируемой детали,  $f'$  - фокусное расстояние объектива,  $n \times n$  - количество элементов строк и столбцов матричного фотоприемника. Технический результат - минимизация погрешностей измерений. 1 з.п. ф-лы, 2 ил.



Фиг.1

RU 2573182 C1

RU 2573182 C1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2014154120/28, 30.12.2014**(24) Effective date for property rights:  
**30.12.2014**

Priority:

(22) Date of filing: **30.12.2014**(45) Date of publication: **20.01.2016** Bull. № 2

Mail address:

105005, Moskva, ul. 2-ja Baumanskaja, 5, str. 1,  
MG TU im. N.Eh. Baumana, TsZIS, dlja  
Baryshnikova N.V., NIIRL

(72) Inventor(s):

**Baryshnikov Nikolaj Vasil'evich (RU),  
Gladysheva Jana Vladimirovna (RU),  
Zhivotovskij Il'ja Vadimovich (RU),  
Denisov Dmitrij Gennad'evich (RU),  
Abdulkadyrov Magomed Abdurazakovich (RU),  
Patrikeev Vladimir Evgen'evich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe  
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego  
professional'nogo obrazovanija "Moskovskij  
gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet imeni  
N.Eh. Baumana" (MG TU im. N.Eh. Baumana)  
(RU)**

(54) **APPARATUS FOR INSPECTING QUALITY PARAMETERS OF FLAT OPTICAL COMPONENTS  
ARRANGED AT ANGLE TO OPTICAL AXIS**

(57) Abstract:

FIELD: physics.

SUBSTANCE: apparatus for inspecting the quality of flat optical components arranged at an angle to an optical axis consists of a transmitting channel, which includes a radiation source which forms two beams lying at a distance from each other with mutually perpendicular linear polarisation states, situated in the focal plane of a lens, a quarter-wave plate, as well as, arranged in series on the radiation path at the lens output, a reference optical plate, an optical component being inspected and a reversible mirror, as well as a receiving channel which includes a beam splitter, followed by a radiation detector consisting of a photodetector array and a linear analyser, which enables to record multiple interference patterns at the same time, which are required for further analysis. The radiation source includes two point sources at a distance  $\Delta$  from each other, perpendicular to the optical axis. The apparatus is adapted to adjust the distance  $L$  between the flat reference surface of the reference plate and the

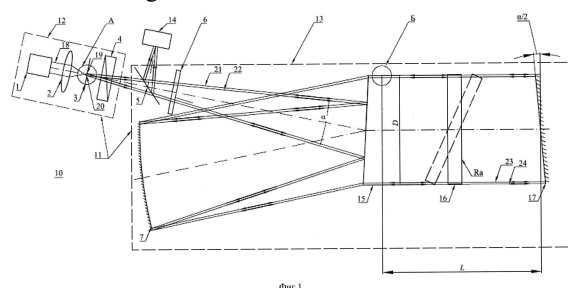
reversible mirror according to the limiting condition of the maximum allowable distance:

$$L = \frac{4 \cdot D \cdot f' \cdot \Delta}{n \cdot (4f'^2 - \Delta^2)}, \text{ where } D \text{ is the diameter of the}$$

inspected component,  $f'$  is the focal distance of the lens,  $n \times n$  is the number of row and column elements of the photodetector array.

EFFECT: minimising measurement error.

2 cl, 2 dwg



Область техники

Изобретение относится к области оптического приборостроения, точнее - к интерференционным системам и методам контроля качества оптических поверхностей.

Уровень техники

5 На сегодняшний день технологическое производство изготовления оптических поверхностей позволяет получить оптические изделия различной конфигурации с требуемыми характеристиками профиля изделия, которые необходимо контролировать в процессе производства. В настоящее время большой интерес вызывают задачи, связанные с определением и контролем параметров качества оптических поверхностей.  
10 Это связано с появлением ряда современных технических систем, в состав которых входят крупногабаритные высокоточные оптические детали: сверхкрупный астрономический телескоп с главным зеркалом, требование к уровню погрешности поверхности которого составляет 0,1 нм [1], или сверхмощный лазер с активными средами диаметром до 1 м и погрешностью профиля поверхности, составляющей  
15 десятки доли нм [2]. Такие высокие требования к точности оптических поверхностей определяют качество функционирования технической системы в целом.

Изобретение представляет собой интерферометрическую измерительную систему на основе интерферометра Физо, позволяющую проводить измерения параметров качества, учитывающих суммарное искажение волнового фронта как за счет  
20 погрешностей поверхности детали, так и неоднородностей оптического материала детали в условиях производства.

Наиболее близким техническим решением (прототипом) предлагаемого изобретения можно признать устройство для измерения волнового фронта с высоким качеством и в присутствии вибраций и помех в условиях производства (патентная заявка США  
25 2012026507, МПК G01B 9/02, опубл. 2012.02.02). Прототип состоит из:

- передающего канала, включающего источник излучения, формирующий два пучка с взаимно перпендикулярными линейными состояниями поляризации, находящихся в фокальной плоскости объектива, четвертьволновую пластину, а также последовательно расположенные по ходу излучения на выходе объектива: эталонную оптическую  
30 пластину, контролируруемую плоскую оптическую деталь и возвратное зеркало;  
- приемного канала, включающего светоделитель и приемник излучения, состоящий из матричного фотоприемника и линейного анализатора, позволяющий регистрировать одновременно несколько интерферограмм, необходимых для дальнейшего анализа.

Прототип устройства позволяет измерять оптические поверхности с погрешностью  
35 в десятки доли нм при наличии вибраций, характерных для оптического производства. Прототип устройства одновременно регистрирует три интерференционные картины с разностью фаз друг относительно друга  $\pi/2$ . Интерферограммы записываются тремя независимыми камерами (CCD-камерами). Для регистрации интерферограмм необходимо, чтобы опорный и объектные лучи были ортогонально поляризованы. Для  
40 этого в схему интерферометра Физо введено два источника излучения с перпендикулярными состояниями поляризации. Вибрационная независимость обеспечивается в прототипе за счет построения оптической схемы с дополнительными поляризационными компонентами (поляризационным светоделителем, четвертьволновой пластинкой и линейными поляризаторами, расположенными перед приемником  
45 излучения), при этом конечный результат регистрируется одновременно тремя независимыми ПЗС-матрицами, что дает возможность получить несколько интерференционных картин одновременно за одно измерение. Полученные интерференционные картины позволяют восстановить профиль измеряемой поверхности

и определить погрешности профиля (в обычных интерферометрах за одно измерение возможно получение только одной интерференционной картины, следующую интерферограмму можно зарегистрировать только через некоторый промежуток времени, в течение которого присутствующие на производстве вибрации уже вносят изменения в результаты измерения).

Прототип имеет погрешность измерения, обусловленную наклоном возвратного зеркала. Это связано с тем, что лучи, отражаясь от возвратного зеркала, проходят в обратном ходе по другому оптическому пути через другие участки поверхности эталонной пластины и при этом смещаются на величину  $t_x$ . Если значение  $t_x$  превышает эквивалентный размер разрешения элемента матричного фотоприемника интерферометра, масштабированного на плоскость установки эталонной поверхности, то появляется так называемая погрешность наклона и топография измеряемой поверхности нарушается, что в значительной степени и, возможно, недопустимо увеличивает общую погрешность измерения. В прототипе, при перпендикулярном расположении эталонной детали по отношению к оптической оси, минимальное расстояние между поверхностью эталонной пластины и возвратным зеркалом определяется толщиной контролируемой детали, и в этом случае смещение пучков вносит погрешность наклона, незначительно влияющую на общую погрешность измерения.

Однако для определенных задач возникает потребность контролировать плоские крупногабаритные исследуемые детали, находящиеся в рабочем положении под углом, не равным  $90^\circ$  (например, под углом Брюстера), к оптической оси, или контролировать одновременно нескольких расположенных друг за другом под единым углом к общей оптической оси плоских крупногабаритных исследуемых деталей, что может привести к неизбежности значительного увеличения расстояния между эталонной пластиной и возвратным зеркалом. В прототипе такое измерение нескольких исследуемых деталей или детали под углом к оптической оси также увеличивает это расстояние и может привести к значительному увеличению погрешности измерения.

Помимо этой ограничительной особенности прототипа для контроля исследуемой детали (с диаметрами апертур до 300 мм) в прототипе использованы линзовый объектив (коллиматор) и эталонная плоская пластина. Однако для контроля крупногабаритных оптических поверхностей с диаметром апертуры порядка 1000 мм и более применение линзового объектива обладает рядом существенных недостатков: изготовление объектива подобных габаритов очень сложно и является дорогостоящим; для контроля качества линзового объектива требуется разработка отдельной оснастки, так как необходимо контролировать качество не только поверхностей линзового объектива, но и самого его материала.

#### Раскрытие изобретения

Таким образом, задачей и техническим результатом предлагаемого изобретения является минимизация погрешностей измерений для контроля параметров качества крупногабаритных плоских оптических деталей (одной или нескольких расположенных друг за другом под единым углом к общей оптической оси), что достигается за счет:

- возможности регулирования расстояния между плоской эталонной поверхностью и возвратным зеркалом с учетом параметров контролируемых плоских крупногабаритных оптических деталей, расположенных под углом к оптической оси,
- а также замены совокупности линзового коллиматора и эталонной оптической пластины на совокупность сферического зеркала и эталонного оптического клина.

Технический эффект достигается в устройстве, состоящем из передающего канала,

включающего источник излучения, формирующий два пучка с взаимно перпендикулярными линейными состояниями поляризации, находящихся в фокальной плоскости объектива, четвертьволновую пластину, а также последовательно расположенные по ходу излучения на выходе объектива эталонную оптическую пластину с эталонной поверхностью, контролируруемую плоскую оптическую деталь и возвратное зеркало; и приемного канала, включающего светоделитель и после него приемник излучения, состоящий из матричного фотоприемника и линейного анализатора, позволяющий регистрировать одновременно несколько интерферограмм, необходимых для дальнейшего анализа; при этом источник излучения включает в себя два точечных источника, разнесенных на расстояние  $\Delta$  относительно друг друга перпендикулярно оптической оси, и есть возможность регулирования расстояния  $L$  между эталонной поверхностью эталонной пластины и возвратным зеркалом с учетом параметров контролируемых плоских крупногабаритных оптических деталей, расположенных под углом к оптической оси, а именно в соответствии с граничным условием максимально

допустимого расстояния:  $L \leq \frac{4 \cdot D \cdot f' \cdot \Delta}{n \cdot (4f'^2 - \Delta^2)}$ , где  $D$  - диаметр контролируемой детали,  $f'$

- фокусное расстояние объектива,  $n \times n$  - количество элементов строк и столбцов матричного фотоприемника.

Также для контроля крупногабаритных оптических поверхностей в качестве оптического коллиматора системы, расширяющего пучок до необходимого диаметра, использовано сферическое зеркало, а в качестве эталонной пластины - оптический клин, одна из граней которого, обращенная к зеркальному коллиматору, наклонна по отношению к оптической оси, а вторая грань, обращенная к контролируемой оптической детали, является перпендикулярной к оптической оси и выполняет функцию эталонной поверхности.

Перечень фигур

Фиг. 1 - схема расположения компонентов предлагаемого устройства.

Фиг. 2 - схемы в увеличенном масштабе ходов оптических лучей в местах А и Б схемы расположения компонентов устройства.

Осуществление изобретения

На фигурах использованы следующие обозначения:

1 - поляризационный источник излучения;

2 - объектив;

3 - пространственный фильтр;

4 - поляризационный светоделитель;

5 - светоделитель;

6 - четвертьволновая пластинка;

7 - зеркальный сферический коллиматор;

10 - интерферометрическая система;

11 - передающий канал;

12 - модуль источника излучения;

13 - интерференционный модуль;

14 - приемный канал;

15 - эталонный объект;

16 - контролируемый объект;

17 - возвратное зеркало;

18 - исходный волновой фронт;

19 и 20 - источники излучения, расположенные на расстоянии  $\Delta$  друг от друга;

21 и 22 - два взаимно поляризованных волновых фронта, исходящих от источников излучения 19 и 20;

23 и 24 - два взаимно поляризованных волновых фронта, отраженных от возвратного зеркала;

5  $\alpha$  - угол расходимости излучения точечного источника;

$D$  - диаметр апертуры оптического клина;

$f'$  - фокусное расстояние зеркального сферического коллиматора;

$L$  - расстояние между эталонной поверхностью оптического клина и возвратным зеркалом.

10 Интерферометрическая система (10) предлагаемого устройства представлена на фиг. 1, и на фиг. 2 - участки ходов лучей в увеличенном масштабе.

Конструкция включает в себя передающий (11) и приемный каналы (14). Передающий канал (11) состоит из интерферометрического модуля (13) и модуля источника излучения (12). Приемный канал включает фазосдвигающий модуль для генерации множественных  
15 интерферограмм с фазовым сдвигом  $\pi/2$  между ними. Модуль источника излучения (12) обладает поляризационным источником излучения (1), генерирующим пучок линейно поляризованного излучения (18), который проходит через объектив (2), фокусирующий излучение в плоскость пространственного фильтра (3) с микроотверстием. Волновой фронт (18) проходит через поляризационный светоделитель  
20 (4), который разделяет излучение на два взаимно поляризованных волновых фронта (21) и (22). Данные пучки лучей после светоделителя (4) смещаются по отношению друг к другу, как если бы они исходили от двух разных источников излучения (19) и (20) на расстоянии  $\Delta$  друг от друга. Выходя из интерферометрического модуля системы, пучки проходят светоделитель (5), четвертьволновую пластинку (6), отражаются от первой  
25 поверхности исследуемой детали (16), затем от зеркального коллиматора (7) с фокусным расстоянием  $f'$  и проходят через эталонный объект (15) диаметром апертуры  $D$ . После чего часть излучения отражается от эталонного объекта ((21) и (22)), а часть проходит через эталонный объект, исследуемый объект (16) и отражается от возвратного зеркала (17) (пучки (23) и (24)), расположенного на расстоянии  $L$  от поверхности эталона. Два  
30 пучка (21) и (22) с информацией об ошибках волнового фронта эталонного объекта отражаются от зеркального коллиматора (7), затем от первой поверхности исследуемой детали (16), проходят через четвертьволновую пластинку (6) и отражаются от светоделителя (5), и попадают в модуль приемника излучения. Содержащие информацию о волновом фронте исследуемого объекта пучки (23) и (24) отражаются от зеркального  
35 коллиматора (7), затем от первой поверхности исследуемой детали (16), проходят через четвертьволновую пластинку (6) и отражаются от светоделителя (5), и также попадают в модуль приемника излучения (14).

Используемый в устройстве источник излучения включает в себя два точечных источника, разнесенных на расстояние  $\Delta$  относительно друг друга перпендикулярно  
40 оптической оси. Для получения интерференционной картины на детекторе излучение должно сходиться на оптической оси, поэтому в системе предусмотрен поворот возвратного зеркала, позволяющий свести пучки. В обратном ходе после отражения от поверхности возвратного зеркала каждый луч рабочего пучка излучения проходит через эталонную поверхность со смещением на величину  $t_x$  относительно прямого хода  
45 лучей. Для наилучшего качества восстанавливаемой топографии поверхности контролируемой оптической детали необходимо, чтобы линейное смещение  $t_x$  в плоскости эталонной поверхности не превышало эквивалентного размера разрешения элемента матричного фотоприемника интерферометра, масштабированного на

плоскость установки эталонной поверхности. При этом максимально допустимое смещение пучка:  $t_x \leq \frac{D}{n}$ , где D - диаметр клина, а n - количество пикселей матрицы фотоприемника в плоскости анализа (матрица состоит из  $n \times n$  - элементов).

Максимально допустимое расстояние L, при котором условие допустимого смещения  $t_x$  выполняется, равно:  $L = \frac{t_x}{\operatorname{tg}(\alpha)}$ , где  $\alpha$  - угол расходимости излучения точечного источника. Угол расходимости излучения  $\alpha$  определяется через фокусное расстояние  $f'$  зеркального сферического коллиматора и смещения источника излучения  $\Delta$

относительно оптической оси:  $\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\Delta}{2 \cdot f'}$ , где  $\Delta$  - расстояние между источниками

излучения;  $f'$  - фокусное расстояние сферического зеркала. Таким образом, допустимое значение величины расстояния между эталонной поверхностью и возвратным зеркалом

должно быть не более:  $L \leq \frac{4 \cdot D \cdot f' \cdot \Delta}{n \cdot (4 f'^2 - \Delta^2)}$ . При выполнении этого условия смещение пучка

$t_x$  не будет превышать пространственного разрешения прибора и погрешность наклона не будет сказываться на качестве анализа неоднородностей оптических поверхностей.

В том случае, если это условие не выполняется, например при большом количестве расположенных друг за другом под единым углом наклона контролируемых плоских оптических деталей, измерения необходимо разбить на ряд измерений с меньшим количеством исследуемых деталей в отдельных группах и после этого проводить суммарную оценку качества групп деталей.

Для контроля плоских крупногабаритных деталей в предлагаемом устройстве вместо линзового коллиматора использован зеркальный коллиматор, выполненный в виде сферического зеркала. Изготовление сферического зеркала является менее дорогостоящим и более простым в технологическом процессе изготовления и контроля. И для реализации схемы контроля крупногабаритных оптических деталей с зеркальным коллиматором эталонная пластина в изобретении выполнена в виде оптического клина.

Одна из граней клина, обращенная к зеркальному коллиматору, расположена под углом к оптической оси системы, а вторая грань, обращенная к контролируемой оптической детали, является перпендикулярной к оптической оси и выполняет функцию эталонной поверхности.

Наклонная поверхность оптического клина позволяет ввести в оптическую схему изобретения зеркальный коллиматор, который формирует коллимационный пучок с диаметром порядка 1000 мм и более.

Пример реализации данного изобретения

Два источника излучения, разнесенных на расстояние  $\Delta=3,2$  мм, расстояние между источниками и зеркальным коллиматором составляет 8300 мм, световой диаметр коллиматора  $D=1000$  мм, фокусное расстояние коллиматора  $f'=15000$  мм, апертура коллиматора  $D/f'=1/15$ , угол оптического клина составляет  $2,64^\circ$ , радиус сферического зеркала  $3 \times 10^4$  мм, угол поворота возвратного зеркала  $\alpha=4.6 \times 10^{-6}^\circ$ .

Угол поворота возвратного зеркала и угол поворота контролируемой оптической детали не связаны, угол поворота контролируемой детали может быть равным углу Брюстера или же быть единицами или десятками градусов.

С учетом всех указанных параметров максимально допустимая величина расстояния между эталонной поверхностью и возвратным зеркалом составляет  $Z=2000$  мм.



## Источники информации

1. <http://www.eso.org/public/teles-instr/e-elt.html>
2. <https://lasers.llnl.gov/about/nif/about.php>

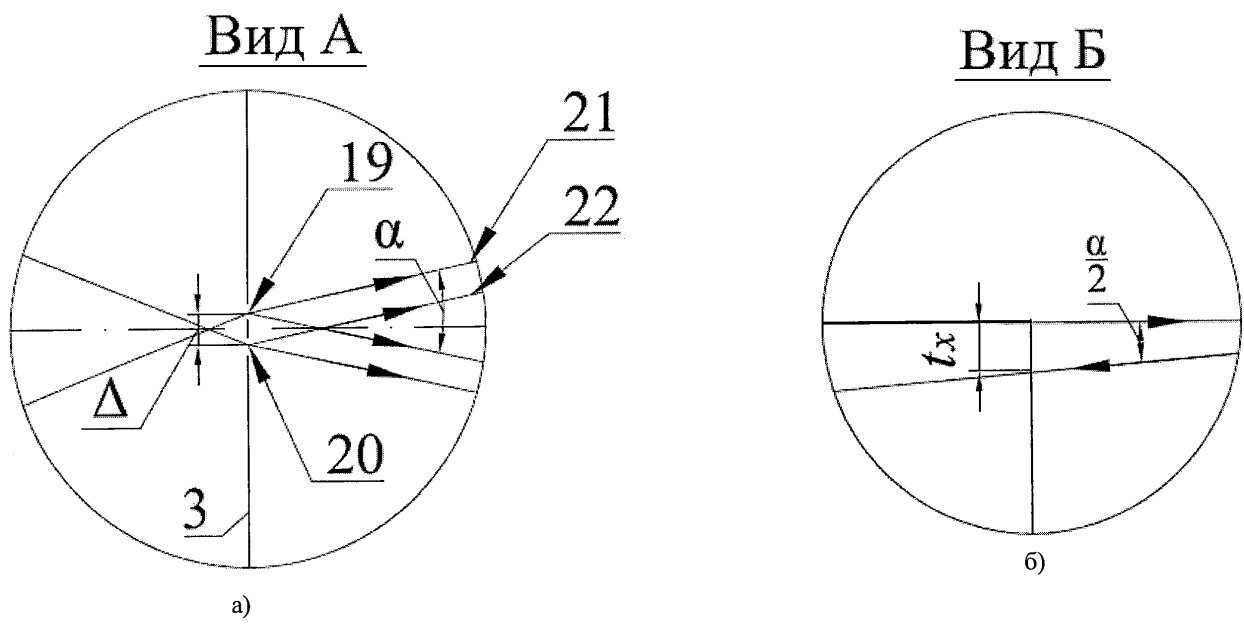
## Формула изобретения

1. Устройство для контроля качества плоских оптических деталей, расположенных под углом к оптической оси, состоящее из передающего канала, включающего источник излучения, формирующий два пучка, расположенных на расстоянии друг от друга со взаимно перпендикулярными линейными состояниями поляризации, находящихся в фокальной плоскости объектива, четвертьволновую пластину, а также последовательно расположенные по ходу излучения на выходе объектива эталонную оптическую пластину, контролируруемую оптическую деталь и возвратное зеркало, а также приемного канала, включающего светоделитель и после него приемник излучения, состоящий из матричного фотоприемника и линейного анализатора, позволяющий регистрировать одновременно несколько интерферограмм, необходимых для дальнейшего анализа, отличающееся тем, что источник излучения включает в себя два точечных источника, разнесенных на расстояние  $\Delta$  относительно друг друга перпендикулярно оптической оси, и устройство изготовлено с возможностью регулирования расстояния  $L$  между плоской эталонной поверхностью эталонной пластины и возвратным зеркалом в соответствии с граничным условием максимально допустимого расстояния:

$$L = \frac{4 \cdot D \cdot f' \cdot \Delta}{n \cdot (4f'^2 - \Delta^2)}, \text{ где } D - \text{диаметр контролируемой детали, } f' - \text{фокусное расстояние}$$

объектива,  $n \times n$  - количество элементов строк и столбцов матричного фотоприемника.

2. Устройство по п. 1, отличающееся тем, что для контроля крупногабаритных оптических поверхностей в качестве объектива системы, расширяющего пучок до необходимого диаметра, использовано сферическое зеркало, а в качестве эталонной пластины - оптический клин, одна из граней которого, обращенная к зеркальному коллиматору, наклонна по отношению к оптической оси, а вторая грань, обращенная к контролируемой оптической детали, является перпендикулярной к оптической оси и выполняет функцию эталонной поверхности.



Фиг.2