



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01B 9/02 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017141671, 29.11.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
29.11.2017

Дата регистрации:
18.09.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 29.11.2017

(45) Опубликовано: 18.09.2018 Бюл. № 26

Адрес для переписки:

630090, г. Новосибирск, пр. ак. Коптюга, 1,
ИИЭ СО РАН, Инновационный отдел,
Климина О.А.

(72) Автор(ы):

Микерин Сергей Львович (RU),
Угожаев Владимир Дмитриевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Институт автоматки и
электрометрии Сибирского отделения
Российской академии наук (ИИЭ СО РАН)
(RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2013106340 A, 20.08.2014. RU
2601530 C1, 10.11.2016. RU 132540 U1,
20.09.2013. RU 2095752 C1, 10.11.1997. EP
2963392 B1, 22.11.2017. WO 2004065894 A2,
05.08.2004.

(54) Двухлучевой интерферометр (варианты)

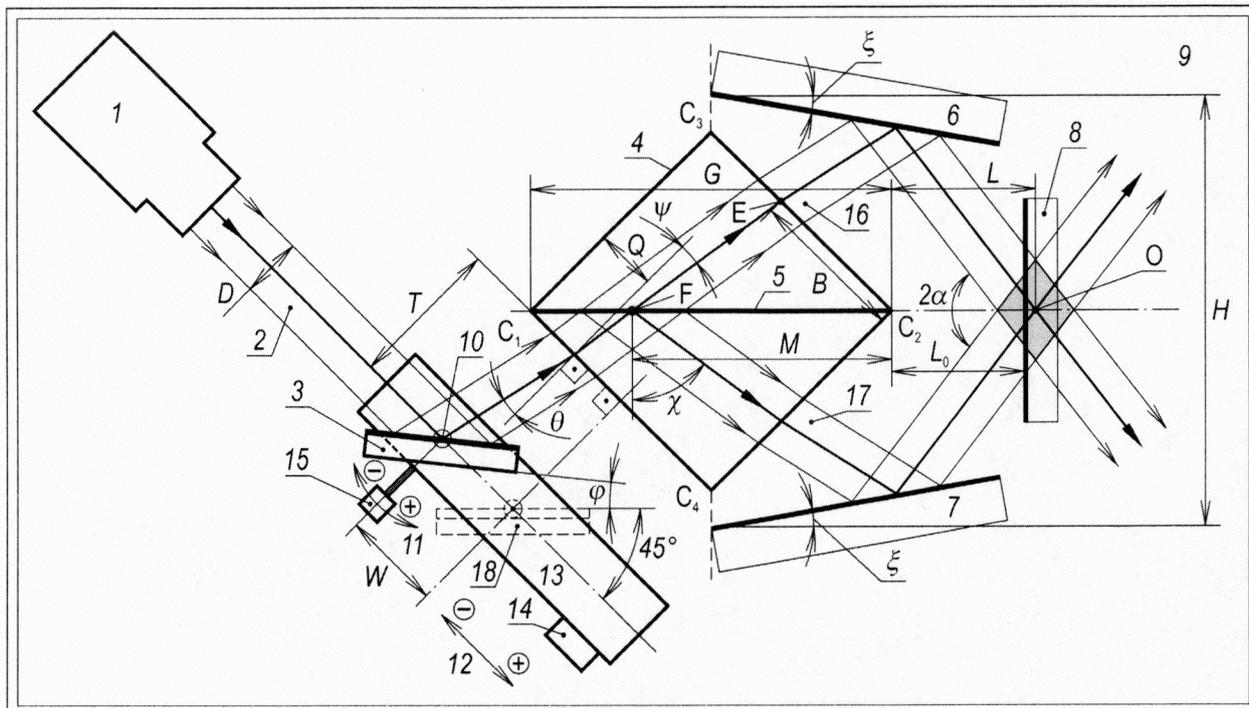
(57) Реферат:

Группа изобретений относится к оптической голографии и предназначена для формирования периодических интерференционных картин, которые применяются для записи голографических дифракционных решеток, создания периодических структур различной размерности (одно-, двух- и трехмерных) в фоточувствительных материалах. Двухлучевой интерферометр по первому варианту и второму варианту содержит последовательно расположенные по ходу луча источник коллимированного светового пучка, подвижное зеркало с осью вращения, светоделительный элемент, разделяющий исходный пучок на два парциальных световых пучка, два зеркала, направляющих эти пучки под некоторым углом схождения друг к другу, и светочувствительный элемент. В первом и втором варианте выполнения интерферометра светоделительный элемент, два зеркала и светочувствительный элемент неподвижно закреплены на основании и образуют

совместно зеркально-симметричную систему относительно плоскости светоделительного зеркала, встроенного в светоделительный элемент. Однако в первом варианте источник также закреплен неподвижно на том же основании. Подвижное зеркало направляет коллимированный световой пучок на светоделительный элемент, причем его угловое и линейное перемещения, приводящие к изменению угла схождения, взаимно согласуются таким образом, что центр области перекрытия парциальных пучков позиционируется вблизи светочувствительного элемента, перемещаясь в пределах отрезка, малого по сравнению с размером этой области вдоль плоскости светоделительного зеркала. При этом во втором варианте источник, оснащенный осью вращения, направляет коллимированный световой пучок на светоделительный элемент, причем угловое и линейное перемещения источника, приводящие к изменению угла схождения, взаимно

согласуются таким образом, что центр области перекрытия парциальных пучков позиционируется вблизи светочувствительного элемента, перемещаясь в пределах отрезка, малого по сравнению с размером этой области вдоль плоскости светоделительного зеркала. Технический результат - возможность объединить

в систему для записи дву- или трехмерных периодических структур два или три интерферометра, обеспечение высокой виброустойчивости как самого интерферометра, так и объединения нескольких интерферометров, а также расширение арсенала средств данного назначения. 2 н. и 4 з.п. ф-лы, 5 ил.



Фиг. 1

RU 2667335 C1

RU 2667335 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01B 9/02 (2006.01)

(21)(22) Application: **2017141671, 29.11.2017**

(24) Effective date for property rights:
29.11.2017

Registration date:
18.09.2018

Priority:

(22) Date of filing: **29.11.2017**

(45) Date of publication: **18.09.2018** Bull. № 26

Mail address:

**630090, g. Novosibirsk, pr. ak. Koptyuga, 1, IAiE
SO RAN, Innovatsionnyj otdel, Klimina O.A.**

(72) Inventor(s):

**Mikerin Sergej Lvovich (RU),
Ugozhaev Vladimir Dmitrievich (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe byudzhethoe
uchrezhdenie nauki Institut avtomatiki i
elektrometrii Sibirskogo otdeleniya Rossijskoj
akademii nauk (IAiE SO RAN) (RU)**

(54) **TWO-BEAM INTERFEROMETER (VARIANTS)**

(57) Abstract:

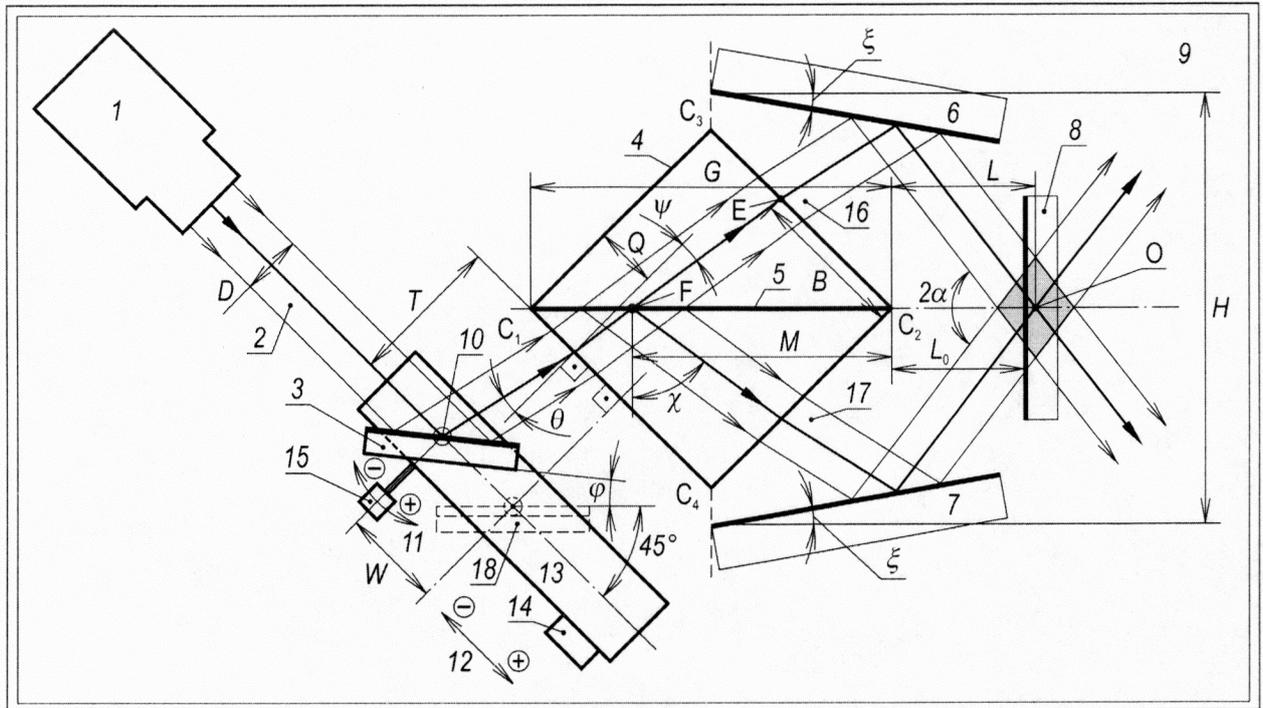
FIELD: physics.

SUBSTANCE: group of inventions refers to optical holography and is designed to form periodic interference patterns, which are used for recording holographic diffraction gratings, creating periodic structures of various dimensions (one-, two-, and three-dimensional) in photosensitive materials. Two-beam interferometer of the first variant and the second variant comprises a source of collimated light beam, a movable mirror with a rotation axis, a beamsplitter element dividing the original beam into two partial light beams sequentially located along the beam path, two mirrors that guide these beams at a certain angle of convergence to each other, and a photosensitive element. In the first and second embodiment of the interferometer the beam splitter element, the two mirrors and the photosensitive member are fixedly fixed to the base and form a jointly mirror-symmetric system with respect to the plane of the beam splitter mirror built into the beam splitter element. However, in the first embodiment, the source is also fixed immovably on the same base. Movable mirror directs the collimated light beam to the beam splitter element, and its angular and linear movements

leading to a change in the angle of convergence are mutually consistent in such a way that the center of the overlapping region of the partial beams is positioned near the photosensitive member, moving within the range small compared to the size of this region along the plane of the beam splitter. In the second variant, the source equipped with the axis of rotation directs the collimated light beam to the beam splitter element, the angular and linear displacement of the source leading to a change in the convergence angle are mutually consistent, so that the center of the overlapping region of the partial beams is positioned near the photosensitive member, moving within a segment that is small in comparison with the size of this region along the plane of the beam splitter.

EFFECT: possibility of combining two or three interferometers into a system for recording two- or three-dimensional periodic structures, ensuring high vibration resistance of both the interferometer itself and the combination of several interferometers, as well as the expansion of the arsenal of means for this purpose.

6 cl, 5 dwg



Фиг. 1

RU 2667335 C1

RU 2667335 C1

Заявляемое изобретение относится к оптической голографии и предназначено для формирования периодических интерференционных картин, которые применяются, например, для записи голографических дифракционных решеток, плоских и гофрированных, создания периодических структур различной размерности (одно-, 5 двух- и трехмерных), в том числе фотонных кристаллов различных кристаллических систем, реализации статических Фурье-спектрометров, используемых в спектральном анализе, для создания брэгговских зеркал, частотных и поляризационных фильтров в оптических волокнах и волноводах, для управления частотой генерации лазеров с распределенной обратной связью, для целей кодирования, декодирования и хранения 10 информации, в фотолитографии и в других областях.

Известно техническое решение, реализуемое в изготовлении оптической дифракционной решетки с переменной пространственной частотой (патент DE 1285763 «Verfahren zur Herstellung optischer Beugungsgitter», МПК G02B 5/18, G02B 5/32, опубликовано 19.12.1968), в котором коллимированный световой пучок направляют 15 на полупрозрачное зеркало, расщепляющее этот пучок на два парциальных световых пучка, на пути прошедшего через полупрозрачное зеркало парциального светового пучка устанавливают второе зеркало; оба зеркала ориентируют таким образом, чтобы отраженные от них парциальные световые пучки пересекались на фотопластинке и интерферировали на ней, образуя на фоточувствительном слое эквидистантные полосы. 20 Изменение пространственной частоты полос производят изменением угла схождения парциальных пучков путем поворота зеркал, причем это изменение сопровождается перемещением области взаимного перекрытия парциальных световых пучков.

Недостатками известного технического решения являются неустраняемая разность 25 длин оптических путей парциальных световых пучков, что требует высокую временную когерентность коллимированного светового пучка, необходимость перемещать фотопластинку вслед за перемещением области пересечения парциальных световых пучков, высокая чувствительность к вибрациям, обусловленная наличием двух юстируемых зеркал.

Известно техническое решение, реализуемое в изготовлении трехмерной 30 дифракционной решетки (патент US 3507564, «Method of making a tree-dimensional diffraction grating», МПК G02B 5/18, опубликовано 21.04.1970), состоящее в том, что коллимированный пучок монохроматического света направляют на наклонную светоделительную пластину, расщепляющую этот пучок на проходящий и отраженный парциальные световые пучки, на пути этих пучков устанавливают два зеркала, 35 направляющие их к блоку из фоточувствительного материала, где парциальные световые пучки взаимно перекрываются, формируя внутри этого блока эквидистантные интерференционные полосы. Интервал между полосами варьируют путем изменения угла схождения парциальных световых пучков, вращая два зеркала во взаимно противоположных направлениях вокруг осей, перпендикулярных плоскости падения. 40 При изменении угла схождения положение блока корректируют так, чтобы парциальные световые пучки вновь пересекались внутри него.

Недостатками известного технического решения являются сложность в эксплуатации, обусловленная тем, что угол схождения задают путем взаимно независимой юстировки 45 двух зеркал и дополнительно производят выравнивание длин оптических путей парциальных световых пучков, а блок из фоточувствительного материала перемещают в соответствии с изменением угла схождения, невозможность одновременной записи дифракционных решеток во всех трех измерениях, высокая чувствительность интерферометра к вибрациям из-за наличия юстируемых зеркал.

Известно техническое решение, представленное в двухлучевом интерферометре, описанное в работе [Шелковников В.В., Васильев Е.В., Герасимова Т.Н., Пен Е.Ф., Плеханов А.И. Динамика импульсной записи голографических дифракционных решеток в фотополимерном материале. Оптика и спектроскопия, т. 99, №5, с. 838-847 (2005)] и широко используемое на практике. Оно содержит последовательно расположенные по ходу луча источник коллимированного светового пучка, светоделительный элемент, разделяющий коллимированный световой пучок на два парциальных световых пучка, два зеркала, которые отражают падающие на них парциальные световые пучки по направлению друг к другу под заданным углом схождения, и светочувствительный элемент. Угол схождения изменяется путем взаимно независимой юстировки каждого из двух зеркал, причем изменение этого угла сопровождается перемещением области взаимного перекрытия парциальных световых пучков. Светочувствительный элемент совмещается с этой областью перекрытия, при переходе от одного значения угла схождения к другому светочувствительный элемент переустанавливается так, чтобы он совместился с новым положением области перекрытия парциальных световых пучков. При варьировании угла схождения происходит неконтролируемое изменение длины оптических путей этих пучков, поэтому дополнительно выполняется ряд измерительных и юстировочных операций по выравниванию упомянутых длин. В итоге каждое изменение угла схождения сопровождается юстировочными и измерительными работами, что усложняет эксплуатацию интерферометра и делает невозможной непрерывную перестройку угла схождения, вместе с тем наличие юстируемых зеркал повышает чувствительность интерферометра к вибрациям.

Недостатками известного технического решения является высокая чувствительность интерферометра к вибрациям, а также сложность в эксплуатации.

Известно техническое решение, реализуемое в дифракционной решетке с варьируемым периодом [Микерин С.Л., Угожаев В.Д. Перестраиваемый голографический интерферометр с неподвижными зеркалами, АВТОМЕТРИЯ, т. 48, №4, с. 20-32 (2012)]. Техническое решение осуществляется путем расщепления светоделительным кубиком коллимированного светового пучка на два парциальных световых пучка и последующего сведения этих пучков с помощью двух зеркал на светочувствительном элементе под изменяемым углом схождения. Два зеркала устанавливаются неподвижно и зеркально-симметрично относительно плоскости светоделительного зеркала на пути вышедших из светоделительного кубика парциальных световых пучков, благодаря чему и сами эти парциальные световые пучки, и область их взаимного перекрытия также оказываются зеркально-симметричными относительно указанной плоскости. Светочувствительный элемент помещают в указанную область перекрытия с возможностью перемещения. Угол схождения этих пучков непрерывно перестраивают изменением угла падения коллимированного светового пучка на входную поверхность светоделительного кубика, что осуществляется путем совместного вращения светоделительного кубика, двух зеркал и светочувствительного элемента вокруг оси, перпендикулярной плоскости падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало. Во всем диапазоне изменения угла схождения выполняется точное равенство оптических длин парциальных световых пучков по их осям на пути от точки их образования на светоделительном зеркале до точки взаимного перекрытия. Ось вращения располагают у входной поверхности светоделительного кубика так, чтобы поддерживать ширину входного зрачка вблизи ее возможного максимума. При таком положении этой оси перестройка угла схождения сопровождается перемещением упомянутой области перекрытия вдоль плоскости светоделительного зеркала, что

требует соответствующего перемещения светочувствительного элемента.

Недостатками известного технического решения являются изменение положения светочувствительного элемента при вращении интерферометра, что может усложнять его эксплуатацию, низкая виброустойчивость, обусловленная подвижностью светочувствительного элемента.

Известно техническое решение, реализуемое в дифракционной решетке с варьируемым периодом [Угожаев В.Д. Патент РФ на изобретение №2626062, «Двухлучевой интерферометр», МПК G02B 5/18, G02B 5/32, опубликовано 21.07.2017], выбранное в качестве прототипа. Техническое решение осуществляется в виде двухлучевого интерферометра, который устанавливается на основании с возможностью вращательного движения и содержит светоделительный элемент, первое зеркало, второе зеркало и светочувствительный элемент, закрепленные неподвижно и оптически связанные с источником коллимированного светового пучка. Как возможный вариант исполнения светоделительного элемента рассматривается светоделительный кубик, составленный из двух 90-градусных призм, плотно соединенных своими плоскими гипотенузными поверхностями. На гипотенузной поверхности одной из этих призм предварительно наносится светоделительное зеркало, которое в результате оказывается встроенным внутрь светоделительного кубика по диагонали. Благодаря его зеркальной симметрии относительно плоскости светоделительного зеркала выходные поверхности располагаются зеркально-симметрично относительно этой плоскости. Первое зеркало и второе зеркало устанавливаются также взаимно симметрично относительно указанной плоскости. В результате двухлучевой интерферометр представляет собой жесткую зеркально-симметричную конструкцию, обеспечивающую его высокую виброустойчивость.

Коллимированный световой пучок направляется на входную поверхность светоделительного кубика и, преломившись на ней, разделяется светоделительным зеркалом на первый парциальный световой пучок, который проходит через светоделительное зеркало, и второй парциальный световой пучок, который отражается от светоделительного зеркала. Первое зеркало и второе зеркало устанавливаются на пути выходящих из светоделительного кубика первого парциального светового пучка и второго парциального светового пучка соответственно. После отражения от зеркал первый парциальный световой пучок и второй парциальный световой пучок взаимно перекрываются под заданным углом схождения. Благодаря зеркальной симметричности двулучевого интерферометра оба парциальных световых пучка также взаимно симметричны. Как следствие периодическая интерференционная картина, формирующаяся в области их взаимного перекрытия, также симметрична относительно плоскости светоделительного зеркала, а оптические длины первого и второго парциальных световых пучков по их осям от точки разделения коллимированного светового пучка на светоделительном зеркале до точки взаимного пересечения равны между собой при любом угле схождения. Светочувствительный элемент помещается внутри упомянутой области перекрытия.

Вращательное движение основания сопровождается изменением угла падения коллимированного светового пучка на входную поверхность светоделительного кубика и соответствующим изменением угла схождения первого и второго парциальных световых пучков. Ось вращения ориентируется перпендикулярно плоскости падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало и располагается за светоделительным кубиком по ходу первого и второго парциальных световых пучков. Эта позиция устанавливается так, чтобы вращательное движение основания и связанное

с ним перемещение коллимированного светового пучка по светоделительному зеркалу обеспечивало перемещение интерференционной картины относительно светочувствительного элемента в пределах отрезка, малого по сравнению с ее длиной вдоль плоскости светоделительного зеркала. Вращение основания осуществляется
5 приводом вращательного движения, который управляется сигналами, формируемыми блоком управления.

Недостатками известного технического решения являются, во-первых, усложнение его эксплуатации, обусловленное вращением интерферометра и связанным с ним изменением положения светочувствительного элемента относительно
10 взаимодействующего с интерферометром оборудования, расположенного вне вращающегося основания, во-вторых, невозможность объединения таких интерферометров в систему, предназначенную для одновременной записи многомерных периодических структур на общем для всех интерферометров светочувствительном элементе.

Перед авторами ставилась задача разработать двухлучевой интерферометр с перестраиваемым углом схождения парциальных пучков при неподвижных относительно него источнике коллимированного светового пучка и светочувствительном элементе, чтобы получить возможность объединять два или три таких интерферометра в систему, предназначенную для одновременной записи соответственно дву- или трехмерных
15 периодических структур в светочувствительном материале при взаимно независимой перестройке периода данной структуры в каждом ее измерении.

Поставленная задача решается тем, что, по первому варианту двухлучевой интерферометр, включающий в себя источник коллимированного светового пучка, основание с закрепленными на нем неподвижно светоделительным элементом со
25 светоделительным зеркалом, разделяющим коллимированный световой пучок на первый парциальный световой пучок и второй парциальный световой пучок, первым зеркалом, вторым зеркалом, светочувствительным элементом, оптически связанными с источником коллимированного светового пучка, при этом первое зеркало и второе зеркало ориентированы направляющими отраженные от них первый парциальный световой
30 пучок и второй парциальный световой пучок по направлению друг к другу до их взаимного пересечения на светочувствительном элементе, датчик углового перемещения, блок управления, дополнительно оснащен подвижным зеркалом с осью вращения, выполненным направляющим коллимированный световой пучок на светоделительное зеркало светоделительного элемента, при этом ось вращения выполнена
35 обеспечивающей одновременные угловое перемещение подвижного зеркала, изменяющее угол падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало светоделительного элемента, и линейное перемещение подвижного зеркала, изменяющее позицию коллимированного светового пучка на светоделительном зеркале светоделительного элемента, узлом согласования, при этом блок управления выполнен
40 формирующим управляющие сигналы для узла согласования, осуществляющего угловое и линейное перемещения оси вращения, и согласующим их между собой, по формуле

$$W = \frac{\sqrt{2}(G - M)}{(1 + \operatorname{tg} \chi)} - \frac{G}{2\sqrt{2}} + T \operatorname{tg} 2\varphi,$$

где W - линейное перемещение оси вращения относительно начального положения, в котором $M=G/2$, G - длина светоделительного зеркала в плоскости падения на него коллимированного светового пучка, M - расстояние от позиции осевого луча

коллимированного светового пучка на светоделительном зеркале до его края, ближнего к светочувствительному элементу, χ - угол падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало, T - расстояние от оси вращения до входной поверхности светоделительного элемента, ϕ - угол поворота оси вращения относительно начального положения, в котором $\chi=45^\circ$, а источник коллимированного светового пучка выполнен закрепленным неподвижно на основании, при этом светоделительный элемент со светоделительным зеркалом выполнен с выходными гранями светоделительного элемента, симметричными относительно плоскости этого светоделительного зеркала, далее первое зеркало и второе зеркало выполнены расположенными взаимно симметрично относительно плоскости светоделительного зеркала.

По второму варианту двухлучевой интерферометр, включающий в себя источник коллимированного светового пучка, основание с закрепленными на нем неподвижно светоделительным элементом со светоделительным зеркалом, разделяющим коллимированный световой пучок на первый парциальный световой пучок и второй парциальный световой пучок, первым зеркалом, вторым зеркалом, светочувствительным элементом, оптически связанными с источником коллимированного светового пучка, при этом первое зеркало и второе зеркало ориентированы направляющими отраженные от них первый парциальный световой пучок и второй парциальный световой пучок по направлению друг к другу до их взаимного пересечения на светочувствительном элементе, датчик углового перемещения, блок управления, дополнительно оснащен осью вращения, выполненной обеспечивающей одновременные угловое перемещение источника, изменяющее угол падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало светоделительного элемента, и линейное перемещение источника, изменяющее позицию коллимированного светового пучка на светоделительном зеркале светоделительного элемента, узлом согласования, при этом блок управления выполнен формирующим управляющие сигналы для узла согласования, осуществляющего угловое и линейное перемещения оси вращения, и согласующим их между собой, по формуле

$$W = \frac{\sqrt{2}(G - M)}{(1 + \operatorname{tg} \chi)} - \frac{G}{2\sqrt{2}} + T \operatorname{tg} \phi,$$

где W - смещение оси вращения относительно начального положения, в котором $M=G/2$, G - длина светоделительного зеркала в плоскости падения на него коллимированного светового пучка, M - расстояние от позиции осевого луча коллимированного светового пучка на светоделительном зеркале до его края, ближнего к светочувствительному элементу, χ - угол падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало, T - расстояние от оси вращения до входной поверхности светоделительного элемента, ϕ - угол поворота оси вращения относительно начального положения, в котором $\chi=45^\circ$, при этом светоделительный элемент со светоделительным зеркалом выполнен с выходными гранями светоделительного элемента, симметричными относительно плоскости этого светоделительного зеркала, далее первое зеркало и второе зеркало выполнены расположенными взаимно симметрично относительно плоскости светоделительного зеркала.

Технический эффект заявляемого устройства заключается в упрощении настройки интерферометра, в повышении точности периода интерференционной картины, в повышении производительности процесса записи одно- и многомерных периодических структур в светочувствительном материале; в снижении чувствительности к вибрациям,

а также в расширении арсенала средств данного назначения.

На фиг. 1 представлена схема двухлучевого интерферометра по первому варианту, где 1 - источник, 2 - коллимированный световой пучок, 3 - подвижное зеркало, 4 - светоделительный элемент, 5 - светоделительное зеркало, 6 - первое зеркало, 7 - второе зеркало, 8 - светочувствительный элемент, 9 - основание, 10 - ось вращения, 11 - направление углового перемещения, 12 - направление линейного перемещения, 13 - узел согласования, 14 - блок управления, 15 - датчик углового перемещения, 16 - первый парциальный световой пучок, 17 - второй парциальный световой пучок, 18 - начальное положение.

На фиг. 2 представлена схема одного из возможных механизмов узла согласования углового и линейного перемещений оси вращения по первому варианту, где 2 - коллимированный световой пучок, 3 - подвижное зеркало, 10 - ось вращения, 11 - направление углового перемещения, 12 - направление линейного перемещения, 19 - корпус, 20 - платформа, 21 - оправа подвижного зеркала, 22 - рычаг, 23 - направляющая, 24 - упругий элемент, 25 - опора, 26 - смещенное положение.

На фиг. 3 представлена схема двухлучевого интерферометра по второму варианту, где 1 - источник, 2 - коллимированный световой пучок, 4 - светоделительный элемент, 5 - светоделительное зеркало, 6 - первое зеркало, 7 - второе зеркало, 8 - светочувствительный элемент, 9 - основание, 10 - ось вращения, 11 - направление углового перемещения, 12 - направление линейного перемещения, 13 - узел согласования, 14 - блок управления, 15 - датчик углового перемещения, 16 - первый парциальный световой пучок, 17 - второй парциальный световой пучок, 18 - начальное положение.

На фиг. 4 представлена схема одного из возможных механизмов узла согласования углового и линейного перемещений оси вращения по второму варианту, где 1 - источник, 2 - коллимированный световой пучок, 10 - ось вращения, 11 - направление углового перемещения, 12 - направление линейного перемещения, 19 - корпус, 20 - платформа, 22 - рычаг, 23 - направляющая, 24 - упругий элемент, 25 - опора, 26 - смещенное положение, 27 - оправа источника.

На фиг. 5 представлен график зависимости коэффициента смещения k_s центра симметрии O интерференционной картины относительно светочувствительного элемента от угла падения θ коллимированного светового пучка на входную поверхность в двухлучевом интерферометре по первому и второму вариантам при расстоянии между первым зеркалом и вторым зеркалом $H=1.03G$, угле наклона первого и второго зеркал $\xi=-15^\circ$, расстоянии от светочувствительного элемента до ближнего к нему края светоделительного зеркала $L_0 = 2\sqrt{2}G$, расстоянии от оси вращения до входной

поверхности светоделительного элемента $T = 1,75 G / \sqrt{2}$,

угле наклона направляющей в механизме узла согласования $\eta=8^\circ$, диаметре коллимированного светового пучка $D = 0,25 G / \sqrt{2}$, где 28 - коэффициент смещения, 29 - метка на низшем значении угла падения, 30 - метка на высшем значении угла падения, 31 - низший уровень коэффициента смещения, 32 - высший уровень коэффициента смещения.

Заявляемый двухлучевой интерферометр по первому варианту работает следующим образом. Двухлучевой интерферометр, схема которого показана на фиг. 1, включает в себя оптически связанные источник 1 коллимированного светового пучка 2,

светоделительный элемент 4 со светоделительным зеркалом 5, первое зеркало 6, второе зеркало 7 и светочувствительный элемент 8, а также подвижное зеркало 3, которым двухлучевой интерферометр дополнительно оснащен.

5 Источник 1, светоделительный элемент 4, первое зеркало 6, второе зеркало 7 и светочувствительный элемент 8 неподвижно закреплены на основании 9. В качестве светоделительного элемента 4 используется, для примера, светоделительный кубик, составленный из двух идентичных 90-градусных призм, плотно соединенных своими плоскими гипотенузными поверхностями, образующими его диагональную поверхность
10 C_1C_2 длиной $G = \sqrt{2}A$, где A - длина ребра кубика. На гипотенузной поверхности одной из 90-градусных призм предварительно наносится светоделительное зеркало 5, которое в результате оказывается встроенным в светоделительный кубик. Благодаря его зеркальной симметрии относительно диагональной поверхности C_1C_2 выходные поверхности C_2C_3 и C_2C_4 располагаются зеркально-симметрично относительно
15 светоделительного зеркала 5. Первое зеркало 6 и второе зеркало 7 устанавливаются также взаимно симметрично относительно светоделительного зеркала 5 на расстоянии H друг от друга и под углом наклона ξ к указанной плоскости (на фиг. 1 $\xi > 0$). Поэтому плоскость светоделительного зеркала 5 является плоскостью зеркальной симметрии (далее плоскость симметрии) собственно интерферометра, включающего в себя
20 светоделительный элемент 4 со светоделительным зеркалом 5, первое зеркало 6 и второе зеркало 7.

Подвижное зеркало 3 оснащено осью вращения 10, которая обеспечивает этому зеркалу одновременно два перемещения: угловое - (показано стрелкой направления
25 углового перемещения 11), характеризуемое углом поворота ϕ , и линейное, определяемое смещением W и направленное параллельно поверхности C_1C_4 светоделительного элемента 4, а также перпендикулярно его ребрам C_1-C_4 (показано стрелкой направления линейного перемещения 12). Ось вращения 10 расположена на расстоянии T от той же поверхности C_1C_4 и ориентирована параллельно ребрам C_1-C_4 . Оба перемещения
30 осуществляются узлом согласования 13 и взаимно координируются через него. Блок управления 14 формирует управляющие сигналы для узла согласования 13. Двухлучевой интерферометр оснащен также датчиком углового перемещения 15, предназначенным для контроля текущих характеристик двухлучевого интерферометра при его эксплуатации.

35 Источник 1 генерирует коллимированный световой пучок 2 диаметром D , который ориентируется параллельно упомянутой поверхности C_1C_4 (далее входная поверхность) вдоль направления линейного перемещения 12, и после отражения от подвижного зеркала 3 переориентируется на эту поверхность под углом падения θ в плоскости, перпендикулярной ребрам C_1-C_4 . Позиция коллимированного светового пучка 2 на
40 входной поверхности определяется расстоянием Q от следа осевого луча этого пучка на ней до края C_1 светоделительного зеркала 5, ближнего к оси вращения 10. Далее коллимированный световой пучок 2 входит в светоделительный элемент 4 под углом преломления ψ , падает на светоделительное зеркало 5 под углом χ , а его осевой луч попадает в точку F на расстоянии M от края C_2 светоделительного зеркала 5, ближнего
45 к светочувствительному элементу 8. Этот пучок разделяется светоделительным зеркалом 5 на два парциальных световых пучка 16 и 17. Первый парциальный световой пучок 16 проходит через светоделительное зеркало 5, как бы продолжая собой коллимированный

световой пучок 2, покидает светоделительный элемент 4 через выходную поверхность C_2C_3 и направляется к первому зеркалу 6, причем след E осевого луча первого парциального светового пучка 16 на этой поверхности удален от края C_2

5 светоделительного зеркала 5 на расстояние B . Второй парциальный световой пучок 17 отражается от светоделительного зеркала 5, покидает светоделительный элемент 4 через выходную поверхность C_2C_4 симметрично первому парциальному световому пучку 16 и направляется ко второму зеркалу 7. Парциальные световые пучки 16 и 17, отразившись от первого зеркала 6 и второго зеркала 7 соответственно, взаимно
10 перекрываются под углом схождения 2α . Благодаря симметричности интерферометра эти парциальные световые пучки также зеркально-симметричны между собой относительно плоскости симметрии. Поэтому область их взаимного перекрытия, выделенная на Фиг. 1 серым цветом, обладает такой же симметрией, а точка O пересечения их осевых лучей, удаленная на расстояние L (далее длина схождения) от
15 края C_2 светоделительного зеркала 5, ближнего к светочувствительному элементу 8, лежит на указанной плоскости, является центром симметрии периодической интерференционной картины, формируемой в этой области, и характеризуется нулевым порядком интерференции. Разность хода по осям первого парциального светового пучка 16 и второго парциального светового пучка 17 от точки F их образования на
20 светоделительном зеркале 5 до точки O благодаря их взаимной симметрии равна нулю при любом угле схождения. Светочувствительный элемент 8 помещается внутри вышеупомянутой области перекрытия на расстоянии L_0 от края C_2 светоделительного зеркала 5.

Период Λ интерференционной картины однозначно связан с углом схождения 2α формулой $\Lambda = \lambda / 2 \sin \alpha$, где λ - длина волны излучения, генерируемого источником 1. Следовательно, одной из возможностей управлять этим периодом является изменение
25 угла схождения. В свою очередь, в рассматриваемом двухлучевом интерферометре половинный угол схождения α определяется через угол падения θ соотношением

$$30 \quad \alpha = \theta + 2\xi + 45^\circ, \quad (1)$$

если значению θ присваивать знак в соответствии с направлением углового перемещения 11. В этом случае увеличение угла θ сопровождается ростом угла α и
35 обратно, так как согласно (1) их приращения равны: $\delta\theta = \delta\alpha$. В итоге управление периодом Λ можно осуществлять, изменяя угол падения θ .

Выходные параметры интерферометра, α и L , выражаются через входные параметры, θ и Q , основной формулой симметричного двухлучевого интерферометра с неподвижными зеркалами:

$$40 \quad L = \frac{\sqrt{2}(H \cos \xi - G \sin \xi) \cos(\alpha - \xi) - B[\sin(\alpha - 2\xi) + \cos(\alpha - 2\xi)]}{\sqrt{2} \sin \alpha}, \quad (2)$$

выведенной по правилам геометрической оптики, где

$$45 \quad B = \frac{G(1 + \operatorname{tg} \psi)}{\sqrt{2}} - Q \quad (3)$$

и

$$\operatorname{tg} \psi = \sin \theta / \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}, \quad (4)$$

поскольку угол преломления $\psi = \arcsin[(\sin \theta) / n]$, где n - показатель преломления

материала, из которого изготовлен светоделительный элемент.

Если зафиксировать длину схождения по условию $L=L_0$, то есть так, чтобы центр О интерференционной картины располагался точно на светочувствительном элементе 8, то из (2) и (3) можно получить формулу, описывающую закон согласования расстояния Q с половинным углом схождения α или согласно формуле (1) с углом падения θ :

$$Q = \sqrt{2} \left[\frac{1}{2} G (1 + \operatorname{tg} \psi) + \frac{L_0 \sin \alpha - (H \cos \xi - G \sin \xi) \cos(\alpha - \xi)}{\sin(\alpha - 2\xi) + \cos(\alpha - 2\xi)} \right]. \quad (5)$$

Зависимость $Q(\theta)$, извлеченная из (5), близка к линейной с положительным наклоном, если знак приращения значения Q соответствует знаку направления линейного перемещения 12, следовательно, увеличение угла падения θ требует почти пропорционального роста расстояния Q. Поэтому задача построения двухлучевого интерферометра с неподвижным светочувствительным элементом решается согласованными между собой поворотом коллимированного светового пучка 2 и его линейным перемещением вдоль входной поверхности по закону, близкому к линейной зависимости.

Параметры, вырабатываемые узлом согласования 13, - угол падения θ и расстояние Q_W - определяются через соответствующие параметры положения оси вращения 10 подвижного зеркала 3: угол поворота φ и линейный сдвиг W. Последние отсчитываются от оси вращения 10 в начальном положении 18 подвижного зеркала 3 (показано штриховыми линиями), в котором начальное значение угла падения $\theta_0=0^\circ$, и начальная позиция Q_0 следа осевого луча коллимированного светового пучка 2 располагается в центре симметрии входной поверхности C_1C_4 : $Q_0 = G/(2\sqrt{2})$. Следует отметить, что при повороте подвижного зеркала 3 на угол φ значение угла падения θ изменяется на величину, вдвое большую угла поворота: $\theta=\theta_0+2\varphi$. С учетом принятого значения θ_0 получается равенство:

$$\theta = 2\varphi. \quad (6)$$

Если одновременно осевой луч коллимированного светового пучка 2 пересекается с осью вращения 10, как показано на фиг. 1, то взаимозависимость геометрических параметров узла согласования 13 выражается следующей формулой:

$$W = \left(Q_W - \frac{G}{2\sqrt{2}} \right) + T \operatorname{tg} \theta \approx \left(Q_W - \frac{G}{2\sqrt{2}} \right) + T\theta, \quad (7)$$

в которой знаки θ и W соответствуют знакам направлений стрелок 11 и 12 соответственно. Из (7) следует зависимость $Q_W(\theta)$:

$$Q_W = W - T\theta + \frac{G}{2\sqrt{2}}. \quad (8)$$

В (7) и (8) принято приближение $\theta \ll 1$, при котором $\operatorname{tg} \theta \approx \theta$. Зависимость $Q_W(\theta)$, выраженная формулой (8), должна быть близка к линейной, как и зависимость $Q(\theta)$ согласно (5), обусловленная требованием $L=L_0$. Следовательно, и требуемый вид функции согласования $W(\theta)$, вырабатываемой узлом согласования 13 под действием управляющих сигналов от блока управления 14, также должна быть линейной или близкой к таковой. На этом основывается подход к построению узла согласования 13.

На фиг. 2 представлена схема одного из возможных вариантов механизма узла

согласования 13, реализующего требуемый вид согласования. Механизм размещен в корпусе 19, неподвижно закрепленном на основании 9. Механизм включает в себя платформу 20, которая может перемещаться относительно корпуса 19 и, как следствие, относительно светоделительного элемента 4 вдоль оси z-z по направлению линейного перемещения 12. Эта ось пересекается с осью вращения 10, обозначенную как Z, и совмещается с осевым лучом коллимированного светового пучка 2, падающего на подвижное зеркало 3. Оно вмонтировано в оправу подвижного зеркала 21, которая так же, как и ось вращения 10, жестко закреплена на рычаге 22. Последний установлен с возможностью совершать поворот вокруг оси вращения 10 по направлению углового перемещения 11. Он изображен в положении, соответствующем начальному положению 18 (см. фиг. 1) подвижного зеркала 3. Как показано на фиг. 2, рычаг 22 в этом положении своим краем, противоположным оси вращения 10, соприкасается без зазора в точке К, принадлежащей оси z-z, с прямолинейной направляющей 23, наклоненной к этой оси под углом η . Отрезок ZK длиной R является плечом рычага 22. Указанное соприкосновение обеспечивается прижатием, создаваемым упругим элементом 24, например, пружиной, который одним краем упирается в опору 25, жестко соединенную с платформой 20, а другим - в рычаг 22.

При перемещении платформы 20 на расстояние W рычаг 22 поворачивается на угол φ вокруг оси вращения 10 благодаря скольжению его края К вдоль наклонной направляющей 23. В результате рычаг 22 оказывается в смещенном положении 26 (показано штриховыми линиями), ось вращения позиционируется в точке Z_W , а точка соприкосновения рычага 22 с направляющей 23 - в точке K_W . Из треугольника $Z_W K_W K$ в приближении малых углов φ и η находится закон движения описываемого механизма:

$$\varphi = W\eta/R. \quad (9)$$

С учетом (6) получается требуемая линейная зависимость $W(\theta)$:

$$W = \theta \frac{R}{2\eta}, \quad (10)$$

поэтому зависимость $Q_W(\theta)$ по формуле (8) также линейна.

Формулы (8) и (10) позволяют привязать геометрические параметры T, R и η , характеризующие описываемый механизм узла согласования 13, к требуемой зависимости $Q(\theta)$ согласно (5). Для такой процедуры можно назначить две точки с координатами, (Q_1, θ_1) и (Q_2, θ_2) , которые принадлежат обеим зависимостям, (5) и (8).

Пусть эти точки определяют крайние возможные положения следа осевого луча коллимированного светового пучка 2 на входной поверхности $C_1 C_4$ светоделительного элемента 4 - $Q_1 = Q_{W1} = 0$ или $Q_2 = Q_{W2} = G/\sqrt{2}$. Соответствующие значения угла падения,

θ_1 или θ_2 , находятся из уравнений, построенных на основе формулы (5) путем подстановки в ее левую часть вместо Q принятых значений Q_1 или Q_2 , а в правую - вместо переменной α выражения $\theta_1 + 2\xi + 45^\circ$ или $\theta_2 + 2\xi + 45^\circ$ согласно (1). При этом θ_1 оказывается минимальным, а θ_2 - максимальными значениями угла падения, а соответствующие им значения половинного угла схождения α_1 и α_2 - нижним и верхним граничными значениями диапазона перестройки этого угла, который можно реализовать в рассматриваемом интерферометре с заданными геометрическими параметрами H и ξ .

Из формулы (10) рассчитываются значения $W_1=\theta_1 R/(2\eta)$ и $W_2=\theta_2 R/(2\eta)$, ограничивающие отрезок оси z-z, в пределах которого может смещаться ось вращения 10, длиной

$$W_{\Sigma} = W_2 - W_1 = \Delta\alpha \frac{R}{2\eta}, \quad (11)$$

где $\Delta\alpha=\alpha_2-\alpha_1=\theta_2-\theta_1$ - ширина диапазона перестройки половинного угла схождения согласно (1). W_{Σ} представляет собой полный ход линейного перемещения в рассматриваемом механизме согласования. Равенство (11) позволяет выразить соотношение его геометрических параметров через $\Delta\alpha$:

$$2W_{\Sigma}\eta/R = \Delta\alpha. \quad (12)$$

Расстояние T от оси вращения 10 до входной поверхности C_1C_4 находится из (8) подстановкой в нее вместо Q_W-Q_1 или Q_2 , вместо $W-W_1$ или W_2 и вместо $\theta-\theta_1$ или θ_2 соответственно:

$$T = \frac{W_{\Sigma} - G/\sqrt{2}}{\Delta\alpha}. \quad (13)$$

Если расстояние T принято в качестве базового размера, то согласно (13) оно однозначно определяет требуемый полный ход линейного перемещения:

$$W_{\Sigma} = T\Delta\alpha + G/\sqrt{2}. \quad (14)$$

В качестве примера можно представить характеристики интерферометра со следующими параметрами: длина ребра светоделительного элемента 4 $A=20$ мм, что дает длину светоделительного зеркала 5 $G=28,3$ мм, расстояние между зеркалами $H=29,1$ мм (в общем случае $H=1.0298G$), угол наклона зеркал $\xi=-15^\circ$, расстояние до светочувствительного элемента 8 $L_0=80$ мм. При начальном положении коллимированного светового пучка 2 ($\theta_0=0^\circ$, $Q_0=10$ мм) соответствующий половинный угол схождения $\alpha_0=15^\circ$. В крайних положениях осевого луча коллимированного светового пучка 2: $Q_1=0$ мм и $Q_2=20$ мм - угол падения вычисляется из (5) и составляет соответственно $\theta_1=-5,3^\circ$ и $\theta_2=5,3^\circ$. Это дает возможность, пользуясь (1), определить границы допустимого интервала изменения половинного угла схождения: $\alpha_1=9,7^\circ$ и $\alpha_2=20,3^\circ$, а также ширину данного интервала $\Delta\alpha=10,6^\circ$.

Такой допустимый интервал может обеспечить механизм узла согласования 13, в котором ось z-z удалена от входной поверхности C_1C_4 на расстояние $T=35$ мм, чем задается требуемый полный ход линейного перемещения $W_{\Sigma}=26,5$ мм согласно (14). Из (12) определяется плечо рычага 22 $R=40$ мм, если угол наклона направляющей 23 $\eta=8^\circ$.

В реальном устройстве следует учитывать диаметр D коллимированного светового пучка 2: чтобы он не выходил за пределы входной поверхности, крайние положения его осевого луча задаются условием касания этого пучка границ C_1 или C_4 :

$$Q_{D1} = \frac{D}{2\cos\theta_{D1}} \text{ или } Q_{D2} = \frac{G}{\sqrt{2}} - \frac{D}{2\cos\theta_{D2}}. \quad (15)$$

Индекс D означает, что эти крайние положения выбраны с учетом диаметра. Значения

θ_{D1} или θ_{D2} находятся из (5) при подстановке в левую часть вместо Q значения Q_{D1} или Q_{D2} , а в правую - вместо a выражения $\theta_{D1}+2\xi+45^\circ$ или $\theta_{D2}+2\xi+45^\circ$. В вышеупомянутом примере $D=5$ мм, отсюда крайние положения осевого луча $Q_{D1}=2,51$ мм и $Q_{D2}=17,49$ мм, крайние значения угла падения $\theta_{D1}=-3,96^\circ$ и $\theta_{D2}=3,96^\circ$; соответствующие значения половинного угла схождения $\alpha_{D1}=11,04^\circ$ и $\alpha_{D2}=18,96^\circ$, а $\Delta\alpha_D=7,92^\circ$. Для расчета полного хода линейного перемещения нужно заменить формулу (14) следующим равенством:

$$W_{D\Sigma} = \frac{G}{\sqrt{2}} - \frac{D}{2} \left(\frac{1}{\cos\theta_{D2}} + \frac{1}{\cos\theta_{D1}} \right) + T\Delta\alpha_D \quad (16)$$

или его сокращенным вариантом:

$$W_{D\Sigma} = \Delta Q_D + T\Delta\alpha_D, \quad (17)$$

где $\Delta Q_D=Q_{D2}-Q_{D1}$. При тех же параметрах механизма согласования: $T=35$ мм, $\eta=8^\circ$ и $R=40$ мм - требуемый ход линейного перемещения несколько сокращается: $W_{D\Sigma}=19,83$ мм.

Сопоставляемые зависимости: $Q(\theta)$, обусловленная требованием $L=L_0$ и выражаемая формулой (5), а также $Q_W(\theta)$, формируемая механизмом узла согласования 13 и описываемая формулой (8), - слегка различаются, поэтому центр симметрии O интерференционной картины (см. фиг. 1) смещается относительно светочувствительного элемента 8 на величину

$$\delta L = L - L_0, \quad (18)$$

которая равна нулю только в рассмотренных выше точках привязки. Для поддержания высокого контраста интерференционной картины смещение δL должно быть малым по сравнению с ее длиной

$$S = D_0 / \sin\alpha \quad (19)$$

вдоль плоскости симметрии. Смещение удобно оценивать соответствующим коэффициентом k_s , равным отношению δL к половине длины S :

$$k_s = 2\delta L \sin\alpha / D_0. \quad (20)$$

Геометрический смысл этого коэффициента состоит в том, что разность $1-|k_s|$ указывает, какая доля полной ширины

$$J = D_0 / \cos\alpha \quad (21)$$

интерференционной картины поперек плоскости симметрии попадает на светочувствительный элемент 8. Интерференционная картина оказывается полностью вне его, если упомянутая разность достигает нуля, поэтому необходимо, чтобы выполнялось неравенство $|k_s| \leq 1$.

Диаграмма на фиг. 5 отображает зависимость коэффициента смещения 2θ от угла падения θ коллимированного светового пучка 2 на входную поверхность - $k_s(\theta)$ - для рассмотренного выше примера заявляемого двухлучевого интерферометра. Метки на низшем значении угла падения 29 $\theta_{D1}=-3,96^\circ$ и на высшем значении угла падения 30 $\theta_{D2}=3,96^\circ$ ограничивают допустимый интервал изменения угла падения, а низший

уровень коэффициента смещения $k_1 \approx -0,0023$ и высший уровень коэффициента смещения $k_2 \approx 0,0023$ определяют отрезок, в пределах которого смещается центр симметрии O относительно светочувствительного элемента 8 в процессе изменения угла схождения смещение δL не выходит за пределы интервала от $-0,15$ до $0,15$ мм. Столь малые смещения практически не влияют на контраст интерференционной картины.

Закон согласования (5) угла падения θ коллимированного светового пучка 2 на входную поверхность и его позицией на этой поверхности, определяемой расстоянием Q , можно представить как закон согласования угла падения χ коллимированного светового пучка 2 на светоделительную поверхность 5 и его позицией на ней, определяемой расстоянием M . Из фиг. 1 следует, что

$$\chi + \psi = 45^\circ. \quad (22)$$

Соотношение (22) позволяет выразить χ как функцию θ , применяя закон преломления:

$$\chi = 45^\circ - \arcsin(\sin \theta / n). \quad (23)$$

Из (23) получается зависимость $\chi(\alpha)$, если использовать (1), либо более удобная зависимость $\theta(\chi)$, дающая привязку к входным параметрам коллимированного светового пучка 2 :

$$\theta = \arcsin \left[n (\cos \chi - \sin \chi) / \sqrt{2} \right]. \quad (24)$$

Расстояние B можно связать с переменными χ и M путем решения треугольника FEC_2 , стороны которого образованы расстояниями B , M и отрезком FE оси первого парциального светового пучка 16 от точки F на светоделительном зеркале 5 до точки E ее выхода на поверхности C_2C_3 светоделительного элемента 4 :

$$B = \sqrt{2}M / (1 + \operatorname{tg} \chi). \quad (25)$$

Формулы (2) и (25) позволяют выразить расстояние M через параметры интерферометра: расстояние H между первым зеркалом 6 и вторым зеркалом 7 , угол наклона ξ этих зеркал и расстояние L_0 от края C_2 светоделительного зеркала 5 до светочувствительного элемента 8 :

$$M = \frac{[(H \cos \xi - G \sin \xi) \cos(\alpha - \xi) - L_0 \sin \alpha](1 + \operatorname{tg} \chi)}{\sin(\alpha - 2\xi) + \cos(\alpha - 2\xi)}. \quad (26)$$

Угол α в (26) также является функцией χ , что находится путем подстановки (24) в (1). Используя еще одну подстановку (25) в (3), можно вывести зависимость расстояния Q от χ и M :

$$Q = \sqrt{2}(G - M) / (1 + \operatorname{tg} \chi). \quad (27)$$

Комбинация (7) и (27) дает искомый закон, описывающий согласование линейного и углового движений оси вращения 10 :

$$W = \frac{\sqrt{2}(G - M)}{(1 + \operatorname{tg} \chi)} - \frac{G}{2\sqrt{2}} + T \operatorname{tg} 2\varphi, \quad (28)$$

где W - смещение оси вращения 10 подвижного зеркала 3 относительно начального положения 18 , в котором $M=G/2$, G - длина светоделительного зеркала 5 вдоль плоскости падения на него коллимированного светового пучка 2 , M - расстояние от позиции F

осевого луча коллимированного светового пучка 2 на светоделительном зеркале 5 до его края C_2 , ближнего к светочувствительному элементу 9 и выражаемое формулой (26), χ - угол падения коллимированного светового пучка 2 на светоделительное зеркало 4 и выражаемый формулой (23), T - расстояние от оси вращения 10 до входной

поверхности C_1C_4 светоделительного элемента 4, $\varphi = \frac{1}{2} \arcsin \left[n(\cos \chi - \sin \chi) / \sqrt{2} \right]$ - угол поворота подвижного зеркала 3 относительно начального положения 18, в котором $\chi = 45^\circ$.

Технический эффект заявляемого устройства, заключающийся в упрощении настройки интерферометра и в возможном благодаря этому упрощению повышении точности периода интерференционной картины, в повышении производительности процесса записи одно- и многомерных периодических структур в светочувствительном материале; в снижении чувствительности к вибрациям, а также в расширении арсенала средств данного назначения, достигается за счет того, что источник коллимированного светового пучка, светоделительный элемент, первое и второе зеркала и светочувствительный элемент взаимно неподвижны, а согласование угла падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало светоделительного элемента с перемещением этого пучка вдоль этого светоделительного зеркала, необходимое для стабилизации положения области взаимного перекрытия парциальных пучков на светочувствительном элементе, обеспечивается взаимно согласованными угловым и линейным перемещениями оси вращения поворотного зеркала, направляющего коллимированный световой пучок к светоделительному элементу, по закону (28) в соответствии с управляющими сигналами для узла согласования, формируемыми блоком управления.

Заявляемый двухлучевой интерферометр по второму варианту работает следующим образом. Двухлучевой интерферометр, схема которого показана на фиг.3, включает в себя оптически связанные источник 1 коллимированного светового пучка 2, светоделительный элемент 4 со светоделительным зеркалом 5, первое зеркало 6, второе зеркало 7 и светочувствительный элемент 8.

Светоделительный элемент 4 со светоделительным зеркалом 5, первое зеркало 6, второе зеркало 7 и светочувствительный элемент 8 неподвижно закреплены на основании 9. В качестве светоделительного элемента 4 используется для примера светоделительный кубик со встроенным вдоль его диагональной поверхности C_1C_2 длиной $G = \sqrt{2} A$, где A - длина ребра кубика, светоделительным зеркалом 5. Светоделительный кубик зеркально симметричен относительно этой диагональной поверхности, поэтому выходные поверхности C_2C_3 и C_2C_4 расположены зеркально-симметрично относительно светоделительного зеркала 5. Первое зеркало 6 и второе зеркало 7 устанавливаются также взаимно симметрично относительно светоделительного зеркала 5 на расстоянии H друг от друга и под углом наклона ξ (на фиг. 3 $\xi > 0$). Поэтому плоскость светоделительного зеркала 5 является плоскостью зеркальной симметрии (далее плоскость симметрии) собственно интерферометра, составленного из светоделительного элемента 4 со светоделительным зеркалом 5, первого зеркала 6 и второго зеркала 7.

Источник 1 соединяется с осью вращения 10 так, чтобы она пересекалась с продолжением осевого луча коллимированного светового пучка 2, причем ось вращения 10 совершает одновременно два перемещения: угловое (показано стрелкой 11), характеризуемое углом поворота φ , и линейное (показано стрелкой 12), определяемое

смещением W и направленное параллельно поверхности C_1C_4 светоделительного элемента 4 (далее входная поверхность), а также перпендикулярно его ребрам C_1-C_4 . Ось вращения 10 расположена на расстоянии T от входной поверхности и ориентирована параллельно ребрам C_1-C_4 . Оба перемещения осуществляются с помощью узла согласования 13 и взаимно координируются через него. Блок управления 14 формирует управляющие сигналы на узел согласования 13. Двухлучевой интерферометр оснащен также датчиком углового перемещения 15, предназначенным для контроля текущих характеристик двухлучевого интерферометра при его эксплуатации.

Источник 1 генерирует коллимированный световой пучок 2 диаметром D , который направляется непосредственно на входную поверхность под углом падения θ в плоскости, перпендикулярной ребрам C_1-C_4 . Позиция этого пучка на входной поверхности определяется расстоянием Q от следа его осевого луча на данной поверхности до края C_1 светоделительного зеркала 5, ближнего к источнику 1. Далее коллимированный световой пучок 2 входит в светоделительный элемент 4 под углом преломления ψ , падает на светоделительное зеркало 5 под углом χ , а его осевой луч попадает в точку F на расстоянии M от края C_2 светоделительного зеркала 5, ближнего к светочувствительному элементу 8. Этот пучок разделяется светоделительным зеркалом 5 на два парциальных световых пучка: 16 и 17. Первый парциальный световой пучок 16 проходит через светоделительное зеркало 5 и покидает светоделительный элемент 4 через выходную поверхность C_2C_3 , причем след E осевого луча этого пучка на данной поверхности определяется расстоянием B от края C_2 светоделительного зеркала 5.

Второй парциальный световой пучок 17 отражается от светоделительного зеркала 5 и покидает светоделительный элемент 4 через выходную поверхность C_2C_4 симметрично первому парциальному световому пучку 16. Оба парциальных световых пучка, 16 и 17, отразившись от первого зеркала 6 и второго зеркала 7 соответственно, взаимно перекрываются под углом схождения 2α . Благодаря симметричности интерферометра и эти парциальные световые пучки также взаимно зеркально симметричны относительно плоскости симметрии. Поэтому область их взаимного перекрытия, выделенная на Фиг. 3 серым цветом, обладает такой же симметрией, а точка O пересечения их осевых лучей, удаленная на расстояние L (далее длина схождения) от края C_2 светоделительного зеркала 5, ближнего к светочувствительному элементу 8, лежит на указанной плоскости, является центром симметрии периодической интерференционной картины, формируемой в этой области, и характеризуется нулевым порядком интерференции. Разность хода по осям парциальных световых пучков 16 и 17 от точки F на светоделительном зеркале 5 до точки O пересечения их осевых лучей равна нулю при любом угле схождения. Светочувствительный элемент 8 помещается внутри вышеупомянутой области перекрытия на расстоянии L_0 от края C_2 светоделительного зеркала 5.

Период Λ интерференционной картины связан с половинным углом схождения формулой $\Lambda = \lambda / 2 \sin \alpha$, где λ - длина волны излучения, генерируемого источником 1. Следовательно, одной из возможностей управлять этим периодом является изменение угла схождения. В свою очередь, из формулы (1) следует, что управлять периодом Λ можно, изменяя угол падения θ .

Выходные параметры интерферометра: половинный угол схождения α и длина схождения L - связываются с входными параметрами: углом падения θ и расстоянием Q - через формулу (2). Если зафиксировать длину схождения так, чтобы интерференционная картина оказалась на светочувствительном элементе 8, т.е.

выполнить условие $L=L_0$, то в этом случае требуемое расстояние Q выражается формулой (5). Она дает зависимость $Q(\theta)$, близкую к линейной. Последнее является руководством для построения двухлучевого интерферометра с неподвижным светочувствительным элементом 8.

5 Параметры, вырабатываемые узлом согласования 13, - угол падения θ и расстояние Q_W - определяются через соответствующие параметры положения источника 1: угол поворота φ , равный углу падения θ , и линейный сдвиг W . Оба последних параметра отсчитываются от положения оси вращения 10, соответствующего начальному
10 положению 18 источника 1 (показано штриховыми линиями), в котором коллимированный световой пучок 2 падает нормально на входную поверхность (начальное значение угла падения $\theta_0=0^\circ$), и начальное расстояние Q_0 равно половине полной ширины входной поверхности C_1C_4 : $Q_0 = G/(2\sqrt{2})$. Взаимозависимость геометрических параметров узла согласования 13 выражается формулами (7) и (8),
15 учитывающих приближение $\operatorname{tg}\theta \approx \theta$ по условию малости $\theta \ll 1$. Из (8) следует, что приемлемое совмещение выражаемой ею зависимости $Q_W(\theta)$ с требуемой зависимостью $Q(\theta)$ согласно (5) возможно в случае, если и функция $W(\theta)$, вырабатываемая узлом согласования 13, также близка к линейной. Это условие определяет выбор механизма, закладываемого в основу конструкции данного узла.

20 На фиг. 4 представлена схема одного из возможных вариантов такого механизма. Он смонтирован в корпусе 19, неподвижно закрепленном на основании 9 и включает в себя платформу 20, которая может перемещаться относительно корпуса 19 и, как следствие, относительно светоделительного элемента 4 по направлению линейного
25 перемещения 12 вдоль оси $z-z$, параллельной входной поверхности и пересекающейся с осью вращения 10, обозначенной как Z . Источник 1 помещен в оправу источника 27, которая так же, как и ось вращения 10, жестко закреплена на рычаге 22. Последний установлен с возможностью совершать поворот вокруг оси вращения 10 по направлению
30 углового перемещения 11 и изображен в положении, соответствующем начальному положению 18 (см. фиг. 3) источника 1. На фиг. 4 сам рычаг 22 в этом положении своим краем, противоположным оси вращения 10, соприкасается без зазора в точке K , принадлежащей оси $z-z$, с прямолинейной направляющей 23, наклоненной к этой оси под углом η . Отрезок ZK длиной R является плечом рычага 22. Указанное соприкосновение обеспечивается прижатием, создаваемым упругим элементом 24,
35 например, пружиной, который одним краем упирается в опору 25, жестко соединенную с платформой 20, а другим - в рычаг 22.

При перемещении платформы 20 на расстояние W рычаг 22 поворачивается на угол φ вокруг оси вращения 10 благодаря скольжению его края K вдоль направляющей 23. В результате рычаг 22 занимает смещенное положение 26 (показано штриховыми
40 линиями), ось вращения смещается в точку Z_W , а точка соприкосновения рычага 22 с направляющей 23 - в точку K_W . Из треугольника $Z_W K_W K$ в приближении малых углов φ и η получается закон движения описываемого механизма:

$$\varphi = W\eta/R, \quad (29)$$

45 аналогичный (9), что с учетом равенства $\varphi=\theta$ дает требуемую линейную зависимость $W(\theta)$:

$$W = R\theta/\eta \quad (30)$$

и, как следствие, линейную зависимость $Q_W(\theta)$ согласно (8).

С помощью формул (8) и (30) выполняется привязка параметров T , R и η к требуемой согласно (5) зависимости $Q(\theta)$. Для этого удобно выбрать две крайние точки этой зависимости, (θ_{D1}, Q_{D1}) или (θ_{D2}, Q_{D2}) , которые определяются условием касания коллимированного светового пучка 2 диаметром D границ C_1 или C_4 входной поверхности соответственно (см. фиг. 3), причем координаты в каждой паре связаны между собой формулами (15). Индекс D означает, что данные крайние положения выбраны с учетом диаметра пучка. Через эти точки должна проходить и зависимость $Q_W(\theta)$, привязываемая к $Q(\theta)$. Значения θ_{D1} или θ_{D2} можно найти из (5), если подставить в левую часть $Q=Q_{D1}$ или Q_{D2} из (15), а в правую - $\alpha=\theta_{D1}+2\xi+45^\circ$ или $\theta_{D2}+2\xi+45^\circ$. При $D=5$ мм крайние положения $Q_{D1}=2,51$ мм и $Q_{D2}=17,49$ мм, крайние значения угла падения $\theta_{D1}=-3,96^\circ$ и $\theta_{D2}=3,96^\circ$; соответствующие значения половинного угла схождения $\alpha_{D1}=11,04^\circ$ и $\alpha_{D2}=18,96^\circ$, а $\Delta\alpha_D=7,92^\circ$.

Полный ход линейного перемещения $W_{D\Sigma}$ в рассматриваемом механизме согласования на фиг. 4 можно найти по формуле (17); в ней $W_{D\Sigma}=W_{D2}-W_{D1}$, $\Delta Q_D=Q_{D2}-Q_{D1}$ и $\Delta\alpha_D=\alpha_{D2}-\alpha_{D1}=\theta_{D2}-\theta_{D1}$. Если ось $z-z$ удалена от входной поверхности C_1C_4 (см. фиг. 3) на расстояние $T=35$ мм, то требуемый ход линейного перемещения составляет $W_{D\Sigma}=19,83$ мм. Крайние положения линейного перемещения, ограничивающие отрезок оси $z-z$, в пределах которого смещается источник 1, рассчитываются по формуле (30): $W_{D1}=\theta_{D1}R/\eta$ и $W_{D2}=\theta_{D2}R/\eta$, благодаря чему получается соотношение оставшихся двух параметров механизма согласования:

$$R/\eta = W_{D\Sigma} / \Delta\alpha_D . \quad (31)$$

В итоге при угле наклона $\eta=8^\circ$ направляющей 23, равном таковому в заявляемом двухлучевом интерферометре по первому варианту, длина плеча рычага 22 оказывается вдвое меньшей: $R=20$ мм.

Расхождение между взаимно привязываемыми зависимостями $Q_W(\theta)$ и $Q(\theta)$ определяется смещением δL центра симметрии O интерференционной картины относительно светочувствительного элемента 8 согласно (18). Очевидно, что в рассмотренных выше точках привязки $\delta L=0$. Для поддержания высокого контраста интерференционной картины это смещение должно быть малым по сравнению с ее длиной S вдоль плоскости симметрии, выражаемой формулой (19). Малость смещения δL оценивается с помощью коэффициента смещения k_s , определяемого формулой (19) и по модулю не превышающего $1:|k_s|\leq 1$.

Диаграмма на фиг. 5 отображает зависимость $k_s(\theta)$ 28 для обоих вариантов заявляемого двухлучевого интерферометра. Метки на низшем значении угла падения 29 $\theta_{D1}=-3,96^\circ$ и на высшем значении угла падения 30 $\theta_{D2}=3,96^\circ$ ограничивают допустимый интервал изменения угла падения, а низший уровень коэффициента смещения 31 $k_s\approx -0,0023$ и высший уровень коэффициента смещения 32 $k_s\approx 0,0023$ определяют отрезок, в пределах которого смещается центр симметрии O относительно светочувствительного элемента 8 в процессе перестройки угла схождения смещение δL не выходит за пределы интервала от $-0,15$ до $0,15$ мм. Столь малые смещения практически не влияют на контраст интерференционной картины.

Закон согласования (5) угла падения θ коллимированного светового пучка 2 на входную поверхность с его позицией на этой поверхности, определяемой расстоянием Q , можно преобразовать в соответствующий закон, связывающий между собой угол падения χ коллимированного светового пучка 2 на светоделительную поверхность 5 и его позицию на ней, определяемую расстоянием M . Соотношение углов χ и ψ определяется из фиг. 3 формулой (22) и с учетом закона преломления - формулой (23). Расстояние B выражается через переменные χ и M формулой (25), которая выводится путем решения треугольника FEC_2 , стороны которого образованы расстояниями b , M и отрезком FE осевого луча первого парциального светового пучка 16 от точки F до точки E его выхода на поверхности C_2C_3 светоделительного элемента 4. Формулы (2) и (25) позволяют сформировать формулу (26), отображающую расстояние M через параметры интерферометра: расстояние H между первым зеркалом 6 и вторым зеркалом 7, угол наклона ξ этих зеркал и расстояние L_0 от края C_2 светоделительного зеркала 5 до светочувствительного элемента 8, а подставляя в формулу (1) выражение для θ из (24), - ввести в (26) угол χ . Подставляя (25) в (3), можно найти зависимость расстояния Q от χ и M , описываемую формулой (27). Наконец, комбинация (7) и (27) с учетом равенства $\theta=\varphi$ дает искомый закон, описывающий согласование линейного и углового движений источника 1:

$$W = \frac{\sqrt{2}(G - M)}{(1 + \operatorname{tg} \chi)} - \frac{G}{2\sqrt{2}} + T \operatorname{tg} \varphi, \quad (32)$$

где W - смещение оси вращения 10 источника 1 относительно начального положения 18, в котором $M=G/2$, G - длина светоделительного зеркала 5 вдоль плоскости падения на него коллимированного светового пучка 2, M - расстояние от позиции F осевого луча коллимированного светового пучка 2 на светоделительном зеркале 5 до его края C_2 , ближнего к светочувствительному элементу 9 и выражаемое формулой (26), χ - угол падения коллимированного светового пучка 2 на светоделительное зеркало 4 и выражаемый формулой (23), T - расстояние от оси вращения 10 до входной поверхности светоделительного элемента 4, φ - угол поворота оси вращения 10 источника 1 относительно начального положения 18, в котором $\chi=45^\circ$.

Технический эффект заявляемого устройства, заключающийся в упрощении настройки интерферометра и в возможном благодаря этому упрощению повышении точности периода интерференционной картины, в повышении производительности процесса записи одно- и многомерных периодических структур в светочувствительном материале; в снижении чувствительности к вибрациям, а также в расширении арсенала средств данного назначения, достигается за счет того, что согласование угла падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало светоделительного элемента с перемещением этого пучка вдоль этого светоделительного зеркала, необходимое для стабилизации положения области взаимного перекрытия парциальных пучков на светочувствительном элементе, обеспечивается направлением коллимированного светового пучка к светоделительному элементу путем взаимного согласования углового и линейного перемещений оси вращения источника этого пучка по закону (29) в соответствии с управляющими сигналами для узла согласования, формируемыми блоком управления.

(57) Формула изобретения

1. Двухлучевой интерферометр, включающий в себя источник коллимированного светового пучка, основание с закрепленными на нем неподвижно светоделительным

элементом со светоделительным зеркалом, разделяющим коллимированный световой пучок на первый парциальный световой пучок и второй парциальный световой пучок, первым зеркалом, вторым зеркалом, светочувствительным элементом, оптически связанными с источником коллимированного светового пучка, при этом первое зеркало и второе зеркало ориентированы направляющими отраженные от них первый парциальный световой пучок и второй парциальный световой пучок по направлению друг к другу до их взаимного пересечения на светочувствительном элементе, датчик углового перемещения, блок управления, отличающийся тем, что он дополнительно оснащен подвижным зеркалом с осью вращения, выполненным направляющим коллимированный световой пучок на светоделительное зеркало светоделительного элемента, при этом ось вращения выполнена обеспечивающей одновременные угловое перемещение подвижного зеркала, изменяющее угол падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало светоделительного элемента, и линейное перемещение подвижного зеркала, изменяющее позицию коллимированного светового пучка на светоделительном зеркале светоделительного элемента, узлом согласования, при этом блок управления выполнен формирующим управляющие сигналы для узла согласования, осуществляющего угловое и линейное перемещения оси вращения, и согласующим их между собой, по формуле

$$W = \frac{\sqrt{2}(G - M)}{(1 + \operatorname{tg} \chi)} - \frac{G}{2\sqrt{2}} + T \operatorname{tg} 2\varphi,$$

где W - линейное перемещение оси вращения относительно начального положения, в котором $M=G/2$, G - длина светоделительного зеркала в плоскости падения на него коллимированного светового пучка, M - расстояние от позиции осевого луча коллимированного светового пучка на светоделительном зеркале до его края, ближнего к светочувствительному элементу, χ - угол падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало, T - расстояние от оси вращения до входной поверхности светоделительного элемента, φ - угол поворота оси вращения относительно начального положения, в котором $\chi=45^\circ$, а источник коллимированного светового пучка выполнен закрепленным неподвижно на основании.

2. Двухлучевой интерферометр по п. 1, отличающийся тем, что светоделительный элемент со светоделительным зеркалом выполнен с выходными гранями светоделительного элемента, симметричными относительно плоскости этого светоделительного зеркала.

3. Двухлучевой интерферометр по п. 1, отличающийся тем, что первое зеркало и второе зеркало выполнены расположенными взаимно симметрично относительно плоскости светоделительного зеркала.

4. Двухлучевой интерферометр, включающий в себя источник коллимированного светового пучка, основание с закрепленными на нем неподвижно светоделительным элементом со светоделительным зеркалом, разделяющим коллимированный световой пучок на первый парциальный световой пучок и второй парциальный световой пучок, первым зеркалом, вторым зеркалом, светочувствительным элементом, оптически связанными с источником коллимированного светового пучка, при этом первое зеркало и второе зеркало ориентированы направляющими отраженные от них первый парциальный световой пучок и второй парциальный световой пучок по направлению друг к другу до их взаимного пересечения на светочувствительном элементе, датчик углового перемещения, блок управления, отличающийся тем, что он дополнительно оснащен осью вращения, выполненной обеспечивающей одновременные угловое

перемещение источника, изменяющее угол падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало светоделительного элемента, и линейное перемещение источника, изменяющее позицию коллимированного светового пучка на светоделительном зеркале светоделительного элемента, узлом согласования, при этом блок управления выполнен формирующим управляющие сигналы для узла согласования, осуществляющего угловое и линейное перемещения оси вращения, и согласующим их между собой, по формуле

$$W = \frac{\sqrt{2}(G - M)}{(1 + \operatorname{tg} \chi)} - \frac{G}{2\sqrt{2}} + T \operatorname{tg} \varphi,$$

где W - смещение оси вращения относительно начального положения, в котором $M=G/2$, G - длина светоделительного зеркала в плоскости падения на него коллимированного светового пучка, M - расстояние от позиции осевого луча коллимированного светового пучка на светоделительном зеркале до его края, ближнего к светочувствительному элементу, χ - угол падения коллимированного светового пучка на светоделительное зеркало, T - расстояние от оси вращения до входной поверхности светоделительного элемента, φ - угол поворота оси вращения относительно начального положения, в котором $\chi=45^\circ$.

5. Двухлучевой интерферометр по п. 4, отличающийся тем, что светоделительный элемент со светоделительным зеркалом выполнен с выходными гранями светоделительного элемента, симметричными относительно плоскости этого светоделительного зеркала.

6. Двухлучевой интерферометр по п. 4, отличающийся тем, что первое зеркало и второе зеркало выполнены расположенными взаимно симметрично относительно плоскости светоделительного зеркала.

30

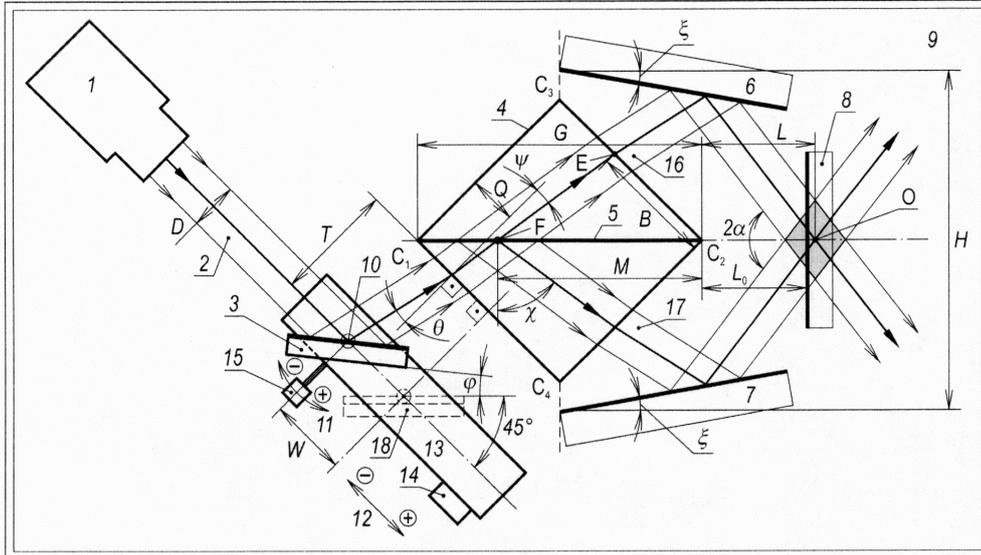
35

40

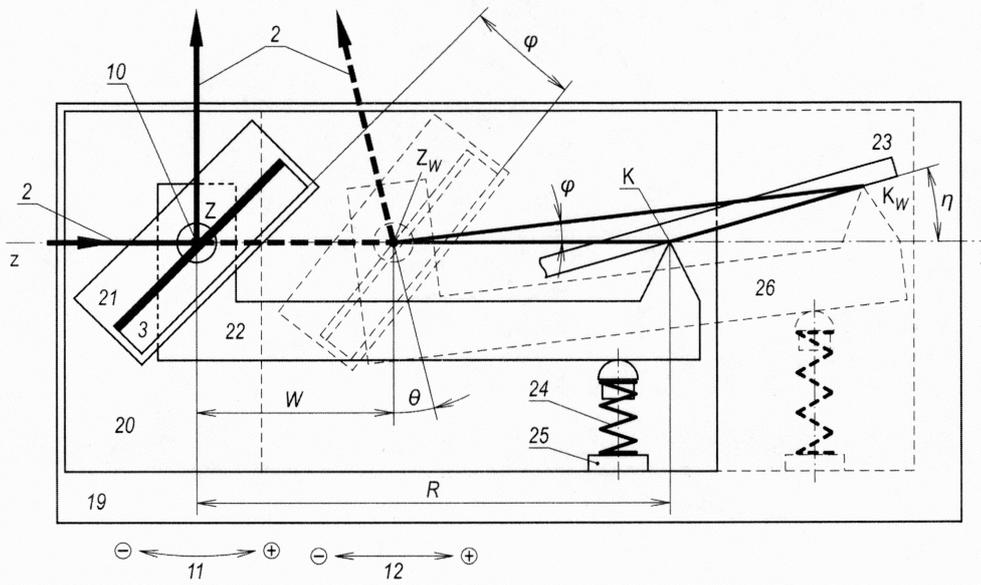
45

1

Двухлучевой интерферометр (варианты)



Фиг. 1

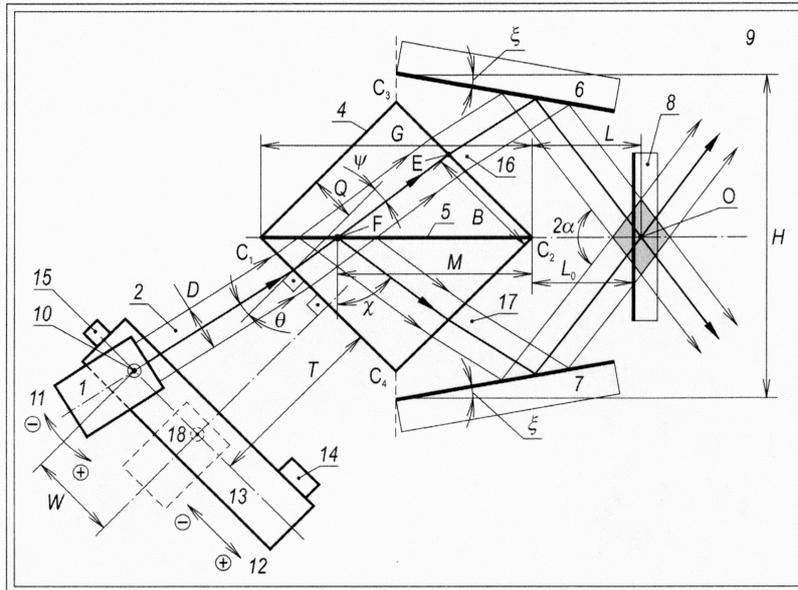


Фиг. 2

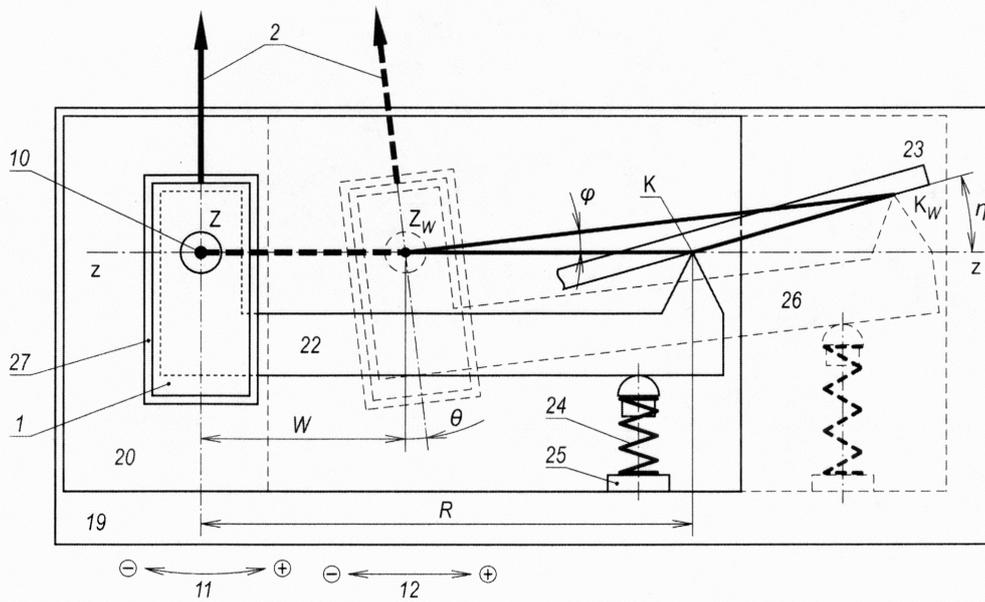
1

2

Двухлучевой интерферометр (варианты)

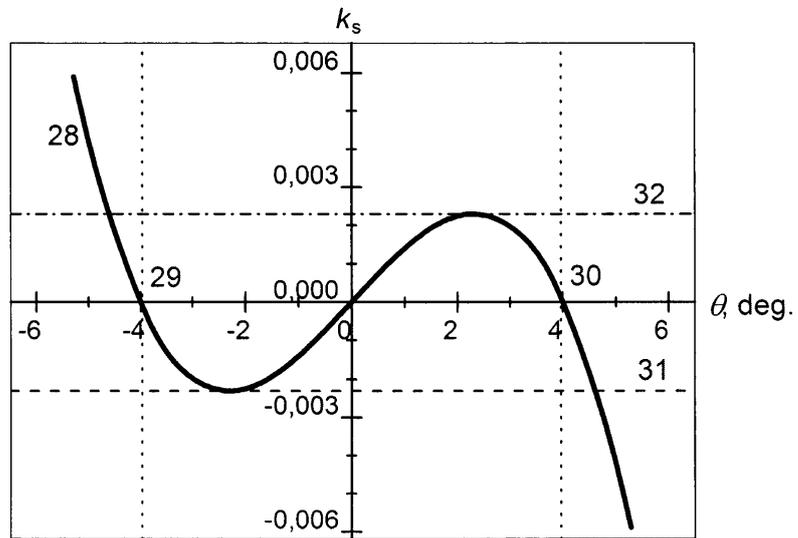


Фиг. 3



Фиг. 4

Двухлучевой интерферометр (варианты)



Фиг. 5