

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2554598

ДИФРАКЦИОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

Патентообладатель(ли): *федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013147867

Приоритет изобретения **25 октября 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **01 июня 2015 г.**

Срок действия патента истекает **25 октября 2033 г.**

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий





ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2013147867/28, 25.10.2013

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
25.10.2013

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 25.10.2013

(43) Дата публикации заявки: 27.04.2015 Бюл. № 12

(45) Опубликовано: 27.06.2015 Бюл. № 18

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: SU 1665227 A1, 23.07.1991. SU 517782
A1, 15.06.1976. US 7697127 B2, 13.04.2010. US
20050030549 A1, 10.02.2005

Адрес для переписки:

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49,
Университет ИТМО, ОИС и НТИ

(72) Автор(ы):

Иванов Александр Николаевич (RU),
Носова Марьяна Дмитриевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

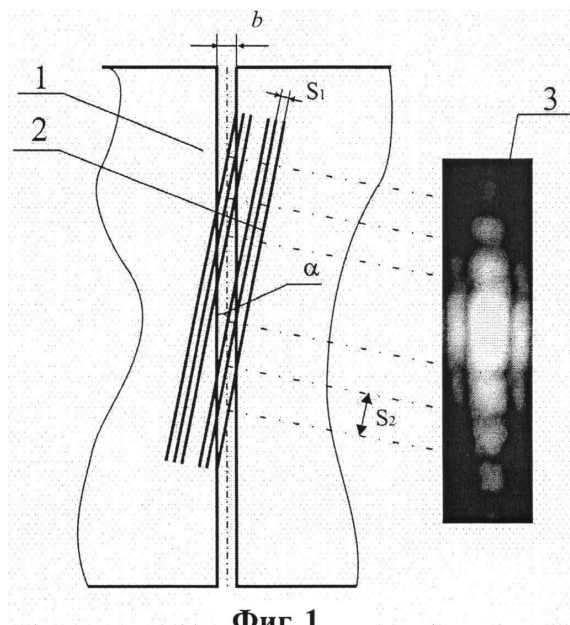
федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский
национальный исследовательский
университет информационных технологий,
механики и оптики (Университет ИТМО)
(RU)

(54) ДИФРАКЦИОННЫЙ СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И УСТРОЙСТВО
ДЛЯ ЕГО ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области измерительной техники, а именно к оптическим устройствам для измерения малых угловых перемещений объекта. Дифракционный способ измерения угловых перемещений состоит в том, что объект с установленным на нем отражателем освещают излучением лазера и направляют излучение через щель, формируя за ней дифракционную картину Фраунгофера. Выделяя из этой картины второй щелью или дифракционной решеткой фрагмент, содержащий линии инверсии фазы разных порядков, получают интерференционные полосы, по которым определяют угловое положение объекта. Устройство для контроля угловых перемещений,

реализующее предлагаемый способ, содержит оптически связанные и последовательно размещенные лазерный источник, устройство формирования пучка, вспомогательное зеркало, светоделитель, установленный на объекте измерения отражатель, две щели, развернутые на угол α относительно друг друга, и фотоприемник. При этом вторая щель выделяет фрагмент дифракционной картины с линиями инверсии фазы разных порядков. Технический результат - увеличение точности и диапазона угловых измерений, а также упрощение конструкции и юстировки устройства, их реализующего. 2 н. и 1 з.п. ф-лы, 2 ил.



Фиг. 1

RU 2554598 C2

RU 2554598 C2



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2013147867/28, 25.10.2013**(24) Effective date for property rights:
25.10.2013

Priority:

(22) Date of filing: **25.10.2013**(43) Application published: **27.04.2015** Bull. № 12(45) Date of publication: **27.06.2015** Bull. № 18

Mail address:

**197101, Sankt-Peterburg, Kronverkskij pr., 49,
Universitet ITMO, OIS i NTI**

(72) Inventor(s):

**Ivanov Aleksandr Nikolaevich (RU),
Nosova Mar'jana Dmitrievna (RU)**

(73) Proprietor(s):

**federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego
obrazovanija "Sankt-Peterburgskij natsional'nyj
issledovatel'skij universitet informacionnykh
tekhnologij, mekhaniki i optiki (Universitet
ITMO) (RU)**(54) **DIFFRACTION METHOD OF MEASUREMENT OF ANGULAR MOVEMENTS AND DEVICE FOR ITS IMPLEMENTATION**

(57) Abstract:

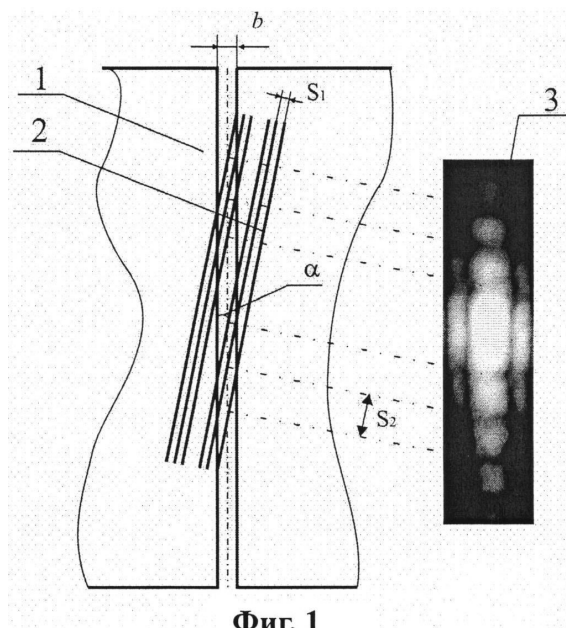
FIELD: measurement equipment.

SUBSTANCE: invention relates to the field of measuring equipment, namely to optical devices for measurement of small angular movements of object. The diffraction method of measurement of angular movements consists in that the object with the reflector installed on it is illuminated with the laser radiation and the radiation is directed through a slot, forming behind it Fraunhofer's diffraction pattern. By separating from this pattern by the second slot or by the diffraction lattice the fragment containing phase inversion lines of various orders the interferential bands are obtained using which the angular position of the object are determined. The device for monitoring of angular movements implementing the offered method contains optically connected and series placed a laser source, a beam-forming arrangement, an auxiliary mirror, a beam splitter, a reflector mounted on an object of measurement, two slots turned to the angle α with reference to each other and a photodetector. Meanwhile the second slot separated the fragment of the diffraction pattern with phase inversion lines of different orders.

EFFECT: improvement of accuracy and range of

angular measurements, and also simplification of design and adjustment of the device implementing them.

3 cl, 2 dwg

**Фиг. 1**

Изобретение относится к области измерительной техники, а именно к оптическим устройствам для измерения малых угловых перемещений объекта.

Известны способы для измерения плоских углов, реализуемые с помощью автоколлиматоров (патент RU №2353960, МПК G02B 27/30, дата приоритета 19.11.2007 г., опубликован 27.04.2009 г.), состоящие из источника излучения, конденсора, марки, светоделиителя, объектива, автоколлимационного зеркала и приемника излучения. Сущность автоколлимационного способа измерения заключается в том, что при повороте автоколлимационного зеркала, сопряженного с исследуемым объектом, происходит смещение изображения марки на приемнике, по величине которого определяется угол поворота объекта. Недостатком автоколлимационного метода является ограничение его разрешения разрешающей способностью объектива автоколлиматора. Сами автоколлиматоры имеют существенные габариты и сложную конструкцию.

Известны способы измерения малых угловых перемещений с помощью интерферометров (патент USA №4746217 от 24.05.1988; Z.T. Ge, M. Takeda. A high precision 2-D angle measurement // Proc. SPIE. Vol.4778 (2002), p.277-287), которые, как правило, состоят из лазерного источника излучения, формирователя лазерного пучка, светоделиителя, эталонного неподвижного зеркала, подвижного зеркала и блока регистрации интерференционной картины. Сущность интерференционного способа измерения угловых перемещений заключается в том, что при повороте подвижного зеркала изменяется разность хода в плечах интерферометра, в результате происходит смещение интерференционных полос. Недостатком интерференционных способов является трудность учета влияния на результат измерения ряда факторов, приводящих к изменению разности хода в ветвях интерферометра: вибрации, температурного расширения элементов конструкции интерферометра, изменения показателя преломления окружающей среды и т.д. Сами интерферометры имеют сложную конструкцию, требующую, при проведении высокоточных измерений, применения ряда дополнительных устройств для мониторинга положения узлов интерферометра и окружающей среды.

По совокупности признаков наиболее близким аналогом как по способу измерения угловых перемещений, так и по схеме измерительного устройства, принимаемым за прототип, является дифракционный способ измерения угловых перемещений и устройство, его реализующее (В.Н. Назаров, А.Е. Линьков. Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптический журнал. 2002. Т.69. №2. С.76-81). Особенностью данного способа является использование линий инверсии фазы дифракционной картины - совокупности точек, в которых амплитуда дифракционной картины меняет знак. Сущность способа заключается в том, что щель освещают пучком когерентного излучения, и за ней в области дифракции Фраунгофера формируется дифракционная картина. В плоскость формирования дифракционной картины устанавливается вторая щель, центр которой совмещается с одной из линий инверсии фазы дифракционной картины. При выполнении этого условия за второй щелью в области дифракции Френеля формируется дифракционная картина с двумя максимумами одинаковой интенсивности. Если угол падения пучка на первую щель меняется, то линия инверсии фазы первичной дифракционной картины смещается относительно центра второй щели, и во вторичной дифракционной картине происходит перераспределение интенсивности в ее главных максимумах. Определив разность интенсивностей в максимумах, можно определить смещение линии инверсии. Дифракционный измеритель угловых перемещений состоит

из лазерного источника излучения, устройства формирования пучка, светоделителя, поворотного зеркала, двух размещенных последовательно щелей, края которых параллельны друг другу, и приемника. Излучение лазера корректируется устройством формирования пучка с целью задания необходимого диаметра пучка и его расходимости и направляется на зеркало. Отразившись от него, лазерный пучок дифрагирует на щелях и формирует на секторном фотоприемнике дифракционную картину Френеля, по разности интенсивностей в максимумах которой можно определить угловые перемещения зеркала.

Данный способ позволяет проводить измерения с погрешностью до ± 0.2 угл. сек, а схема, его реализующая, является конструктивно простой и содержит минимум оптических деталей. Недостатком указанного способа является малый диапазон измерений (± 40 угл. сек) из-за нелинейности выходного сигнала при больших смещениях линии инверсии. Точность ограничивается тем, что в качестве измеряемого параметра выступает разностный сигнал, который трудно измерить с погрешностью меньшей, чем 0.1%. Недостатком измерительного устройства, реализующего данный способ, является очень жесткий допуск на расстояние между приемником и второй щелью и сложность наведения на линии инверсии фазы.

Задачей, на решение которой направлено предлагаемое изобретение, является повышение качества угловых измерений и упрощение устройства, их реализующего.

Технический результат, полученный при решении поставленной задачи, выражается в увеличении точности и диапазона угловых измерений предлагаемым дифракционным способом, а также в упрощении конструкции и юстировки устройства, его реализующего.

Указанный технический результат достигается за счет того, что в предлагаемом дифракционном способе измерения угловых перемещений объекта, заключающегося в том, что объект с установленным на нем отражателем освещают излучением лазера и направляют излучение через щель, ширина которой удовлетворяет условию формирования ею дифракционной картины Фраунгофера $a \leq \sqrt{l\lambda}$, где l - расстояние до плоскости формирования дифракционной картины, λ - длина волны излучения лазера, в результате выделения из этой дифракционной картины, установленной в месте ее формирования второй щелью, фрагмента, содержащего линию инверсии фазы, получают за этой щелью на расстоянии $z = db/\lambda$, где d - ширина пиксела ПЗС приемника, b - ширина второй щели, распределение световой интенсивности, новым является то, что выделение осуществляется второй щелью, установленной так, что выделяемый фрагмент содержит линии инверсии фазы разных порядков, в результате получают интерференционную картину в виде полос, по положению которых определяют угол поворота объекта.

Выделение фрагмента дифракционной картины, содержащего линии инверсии фазы разных порядков также может быть осуществлено с помощью синусоидальной амплитудной дифракционной решетки с шагом $t = \lambda/a$, что позволяет увеличить контраст полос интерференционной картины.

Указанный технический результат достигается за счет того, что в устройстве для контроля угловых перемещений, содержащем оптически связанные и последовательно размещенные по ходу распространения излучения лазерный источник излучения, устройство формирования пучка, светоделитель, отражатель, закрепленный на поверхности контролируемого объекта, первую щель шириной $a \leq D/2$, где D - диаметр падающего на щель лазерного пучка, формирующую дифракционную картину Фраунгофера на расстоянии $l \geq a^2/\lambda$, где λ , - длина волны излучения лазера, вторую щель, установленную на расстоянии l за первой щелью, ширина которой должна удовлетворять

условию $b < \lambda l/a$, и фотоприемник, отличающееся тем, что щели развернуты на угол $0.5 \leq \alpha \leq 2$ угл. град. относительно друг друга в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения, а вторая щель установлена так, что выделяет фрагмент дифракционной картины с линиями инверсии фазы разных порядков.

5 Сущность предлагаемого дифракционного способа измерения заключается в том, что в плоскости регистрации формируется не ассиметричная дифракционная картина, а система интерференционных полос, смещение которых связано с углом поворота объекта зависимостью, близкой к линейной. Для формирования интерференционных
10 полос нужно, чтобы ось второй щели пересекала несколько линий инверсии фазы первичной дифракционной картины, для чего требуется ее развернуть. Это возможно выполнить разворотом первой щели на угол α . Если выполняется условие $l \geq a^2/\lambda$, где l - расстояние между щелями, a - ширина первой щели, λ - длина волны излучения, то расстояние между линиями инверсии фазы S_1 первичной дифракционной картины
15 определяется из выражения $S_1 = \lambda l/a$.

При отсутствии между щелями фурье-объектива для дифракционной картины не будет выполняться теорема о трансляции сигнала, и она будет разворачиваться на тот же угол, что и щель. Для того чтобы щель могла пересечь несколько линий инверсии фазы дифракционной картины, необходимо чтобы последняя имела значительный
20 размер, что достигается увеличением диаметра освещающего пучка.

Разворот первичной дифракционной картины приводит к амплитудно-фазовой модуляции сигнала на входе второй щели, ширина которой b не должна превышать расстояние между линиями инверсии фазы S_1 , и к появлению дополнительной системы интерференционных полос во вторичной дифракционной картине с периодом,
25 определяемым из выражения $S_2 = S_1/\operatorname{tg}(\alpha)$. Координатам минимумов этих полос соответствуют координаты пересечения оси второй щели с линиями инверсии фазы первичной дифракционной картины. Распределение интенсивности в дополнительной системе полос описывается выражением $I(y'') = I_0 \sin^2(\pi y''/S_2) / (\pi y''/S_2)^2$, а их
30 ширина определяется значением угла α и периодом первичных полос S_1 и не зависит от расстояния между второй щелью и приемником.

Смещение первичной дифракционной картины на расстояние ΔS_1 приводит к смещению интерференционных полос на $\Delta S_2 = \Delta S_1/\operatorname{tg}(\alpha)$. При малых углах α коэффициент преобразования перемещения $\Gamma = l/\operatorname{tg}(\alpha)$ достигает значения $100 \div 120$.

35 Сущность изобретения поясняется рисунками, где на Фиг.1 представлена схема формирования интерференционных полос за второй щелью, а на Фиг.2 схематично изображено предлагаемое устройство для измерения угловых перемещений.

Из Фиг.1 следует, что при развороте дифракционных полос 2 шириной S_1 в плоскости щели 1 за последней формируется интерференционная картина 3, полосы которой имеют
40 ширину S_2 и ориентированы перпендикулярно полосам первичной дифракционной картины. Минимумы интерференционной картины соответствуют точкам пересечения центра щели и линии инверсии фазы n -го порядка.

Предлагаемое устройство для измерения угловых перемещений (Фиг.2) содержит
45 оптически связанные и последовательно размещенные лазерный источник 1, телескопическую систему 2, вспомогательное зеркало 3, светоделитель 4, установленный на объекте измерения отражатель 5, щели 6 и 7, ПЗС линейку 8. При этом щели 6 и 7 развернуты под углом α относительно друг друга в плоскости, перпендикулярной

направлению распространения излучения.

Устройство работает следующим образом. Лазерный пучок от источника 1 расширяется телескопической системой 2 и с помощью зеркала 3 и светоделителя 4 направляется на отражатель 5. Отраженный пучок дифрагирует на первой щели 6 и формирует дифракционную картину в плоскости второй щели 7. Пересечение второй щелью линий инверсии фазы дифракционной картины приводит к формированию в плоскости установки фотоприемника интерференционных полос. При повороте объекта на угол φ первичная дифракционная картина смещается на расстояние $\Delta S_1 = 2\lg(\varphi)l$, а интерференционные полосы во вторичной картине - на расстояние $\Delta S_2 = 2\lg(\varphi)l/\lg(\alpha) \approx 2l\varphi/\alpha$. Смещение полос регистрируется ПЗС приемником 8, установленным в области главного максимума вторичной дифракционной картины на расстоянии $z = db/\lambda$, где d - ширина пиксела ПЗС приемника, от второй щели. Так, при развороте зеркала на 1 угл. сек при $l = 150$ мм и $\alpha = 2$ град смещение интерференционной полосы составит 43 мкм, что значительно превышает размер пиксела современных ПЗС. Угол поворота отражателя связан со смещением интерференционной картины выражением $\varphi = \lambda, M/2a$, где $M = \Delta S_2/S_2$ - смещение интерференционной картины в полосах.

Достоинствами предложенного устройства по сравнению с аналогом являются:

Отсутствие необходимости перед началом измерений совмещать центр второй щели с одной из линий инверсии фазы дифракционной картины;

Отсутствует необходимость точной установки приемника относительно второй щели;

Возможность проведения абсолютных измерений благодаря наличию в интерференционной картине центральной полосы удвоенной ширины.

Предлагаемый способ позволяет уменьшить погрешность измерений до ± 0.1 угл. сек и увеличить диапазон измерений до ± 2 град. Увеличение точности обусловлено тем, что регистрируется смещение интерференционной полосы, а не разность интенсивностей в максимумах дифракционной картины. Увеличение диапазона измерения обусловлено отсутствием нелинейной зависимости между смещением линий инверсии фазы и смещением интерференционной полосы.

Результаты экспериментальной апробации подтверждают работоспособность предлагаемого способа и достижимость технического результата.

Формула изобретения

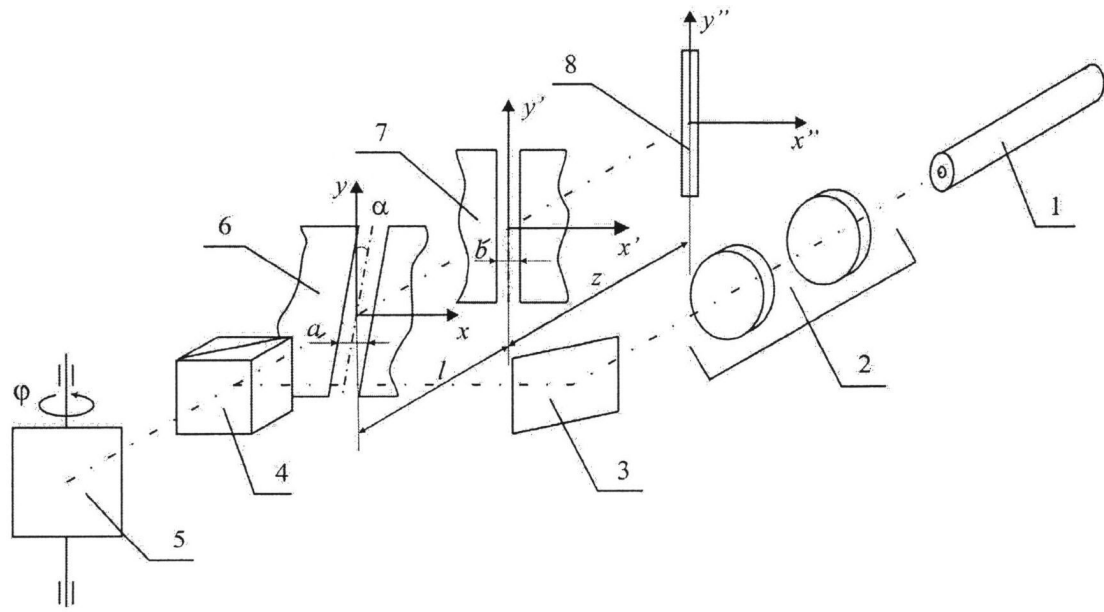
1. Дифракционный способ измерения угловых перемещений объекта, заключающийся в том, что объект с установленным на нем отражателем освещают излучением лазера и направляют излучение через щель, ширина которой удовлетворяет условию формирования дифракционной картины Фраунгофера $a \leq \sqrt{l\lambda}$, где l - расстояние до плоскости формирования дифракционной картины, λ - длина волны излучения лазера, в результате выделения из этой дифракционной картины, установленной в месте ее формирования второй щелью, фрагмента, содержащего линию инверсии фазы, получают за этой щелью на расстоянии $z = db/\lambda$, где d - ширина пиксела ПЗС приемника, b - ширина второй щели, распределение световой интенсивности, отличающееся тем, что выделение осуществляется второй щелью так, что выделяется фрагмент, содержащий линии инверсии фазы разных порядков, в результате получают интерференционную картину в виде полос, по положению которых определяют угол поворота объекта.

2. Дифракционный способ измерения угловых перемещений объекта по п.1, отличающийся тем, что выделение фрагмента дифракционной картины осуществляется

с помощью синусоидальной амплитудной дифракционной решетки.

3. Устройство для контроля угловых перемещений, содержащее оптически связанные и последовательно размещенные по ходу распространения излучения лазерный источник излучения, устройство формирования пучка, светоделитель, отражатель, закрепленный на поверхности контролируемого объекта, первую щель шириной $a \leq D/2$, где D - диаметр падающего на щель лазерного пучка, формирующую дифракционную картину

Фраунгофера на расстоянии $l \geq a^2/\lambda$, где λ - длина волны излучения лазера, вторую щель, установленную на расстоянии l за первой щелью, ширина которой должна удовлетворять условию $b < \lambda l/a$, и фотоприемник, отличающееся тем, что щели развернуты на угол $0.5 \leq \alpha \leq 2$ угл. град. относительно друг друга в плоскости, перпендикулярной направлению распространения излучения, а вторая щель установлена так, что выделяет фрагмент дифракционной картины с линиями инверсии фазы разных порядков.



Фиг. 2