



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015147014/28, 02.11.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.11.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 02.11.2015

(45) Опубликовано: 27.04.2016 Бюл. № 12

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, для Одинокова
С.Б. (каф. РЛ-2)

(72) Автор(ы):

Одинокоев Сергей Борисович (RU),
Сагатеян Гайк Рафаэлович (RU),
Ковалев Михаил Сергеевич (RU),
Дроздова Екатерина Андреевна (RU),
Ручкина Мария Антоновна (RU),
Стриженцова Мария Владимировна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

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

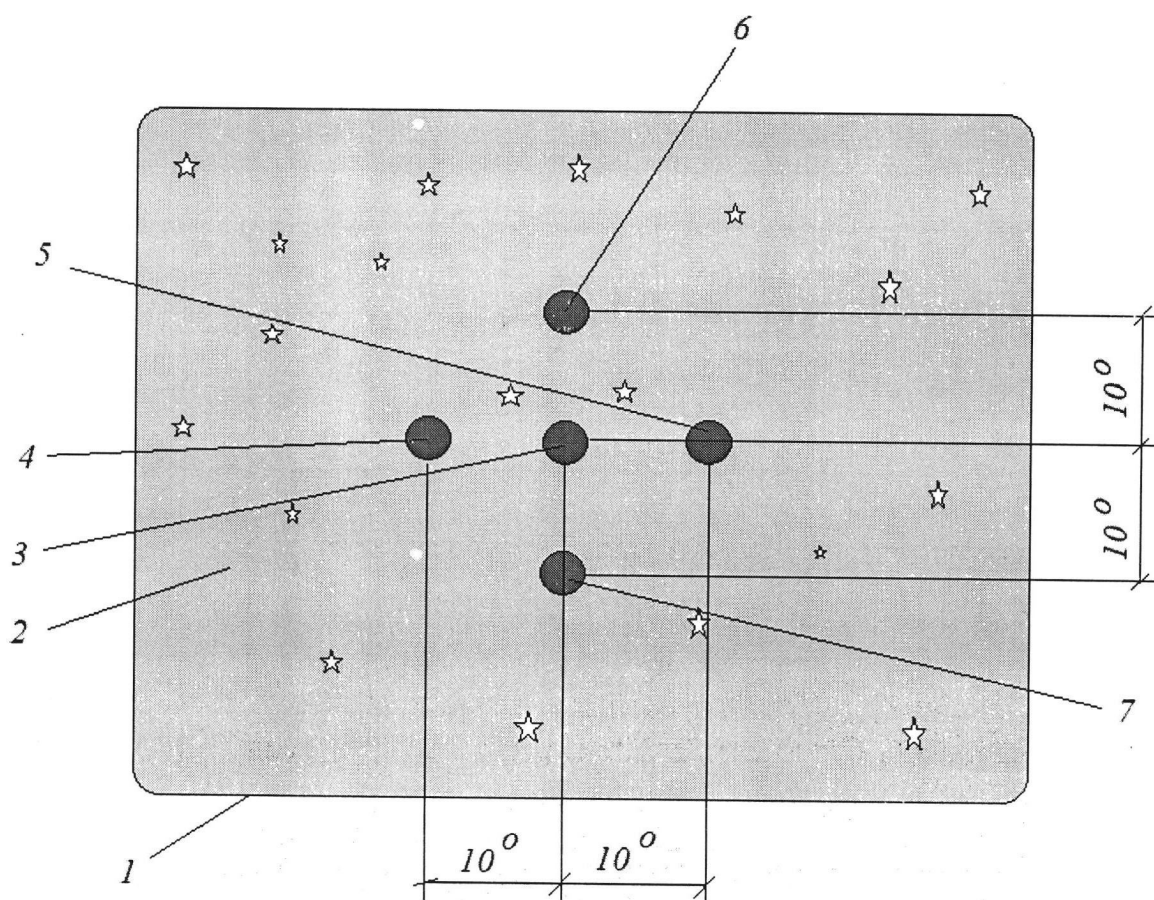
(54) КОМБИНИРОВАННЫЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ КАНАЛА
ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО ЭТАЛОНА УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Формула полезной модели

1. Комбинированный дифракционный оптический элемент для канала геометрического эталона углоизмерительного прибора, представляющий собой оптическую плоско-параллельную пластину, на выходной стороне которой расположен крестообразно набор из пяти точечных рельефно-фазовых дифракционных решеток малой площади, то есть одна решетка в центре и по две решетки по вертикали и по горизонтали по обе стороны от центральной решетки, с возможностью попадания на данные решетки световых лучей лазерного источника, падающих на входную плоскость пластины под углом наклона и проходящих через нее и через указанные решетки с дифрагированием для последующего формирования эталонной крестообразной пятиточечной структуры на экране монитора навигационного оптико-электронного прибора, отличающийся тем, что на входной стороне пластины расположен второй набор из пяти плазмонных дифракционных решеток малой площади, соответствующий по крестообразной геометрии первому набору решеток и установленный таким образом, чтобы указанные лучи лазерного источника, падающих на входную плоскость пластины, попадали на плазмонные решетки, проходили без дифрагирования сквозь них и через пластину на соответствующие решетки первого набора.

2. Комбинированный дифракционный оптический элемент по п. 1, отличающийся тем, что каждый набор из пяти дифракционных решеток имеет размеры 1×1 мм с зазорами между ними 1 мм, на выходной стороне пластины период центральной рельефно-фазовой дифракционной решетки составляет $d_{\text{ц}}=873$ нм; период верхней рельефно-фазовой дифракционной решетки $d_{\text{в}}=1,098$ мкм; период нижней рельефно-

фазовой дифракционной решетки $d_H=0,724$ мкм, боковые рельефно-фазовые дифракционные решетки имеют период $d_6=860$ нм, а линии канавок, образующих боковые рельефно-фазовые дифракционные решетки, наклонены на угол 9° навстречу друг другу, все рельефно-фазовые дифракционные решетки получены вытравливанием канавок в материале плоско-параллельной пластины на глубину $a=739$ нм; на входной стороне пластины все плазмонные дифракционные решетки одинаковы и их период составляет 400 нм, глубина канавок 40 нм; плазмонные дифракционные решетки включают в себя нанесенный на материал плоско-параллельной пластины слой серебра толщиной 40 нм, на который нанесен слой диэлектрического материала толщиной 40 нм; при этих указанных параметрах при наклонном падении с углом падения 58° на каждую из указанных плазмонных дифракционных решеток лазерных лучей с длиной волны 740 нм в центр экрана монитора навигационного оптико-электронного прибора попадают пять лучей с угловыми отклонениями по горизонтали и по вертикали 10° .



Область техники

Полезная модель относится к комбинированным дифракционным оптическим элементам (КДОЭ), предназначенным для создания точечного изображения в оптической системе космического углоизмерительного прибора, точнее в его канале геометрического эталона (КГЭ).

Уровень техники

Известны углоизмерительные приборы, запатентованные компанией «Геофизика-Космос» (патенты РФ №№85266 (опубл. 2009.07.27), 106947 (опубл. 2011.07.27), 2442109 (опубл. 2012.02.10), 2469266 (опубл. 2012.12.10), 2470258 (опубл. 2012.12.20), 2554599 (опубл. 2015.06.27), 2525652 (опубл. 2014.08.20), 98801 (опубл. 2010.10.27)). Все углоизмерительные приборы указанных патентов крутятся вокруг одной и той же схемы КГЭ, которая использует оптическую призму сложной конструкции; - разница заключается в том, что где-то это просто призма (патент 85266), где-то зеркально-призменный блок (патент 106947), где-то призматический моноблок (патенты 2442109, 2469266), где-то склеенные линзы с призмами (патенты 2470258, 2554599), призмы с тремя источниками света (патент 2525652), призмы с формированием только одной опорной точки в КГЭ (патент 98801).

Недостатками всех этих схем является сложность конструкции КГЭ, ее масса и габариты, а также расстраиваемость из-за наличия нескольких составных, механически настраиваемых оптических деталей. Также технические решения с оптическими призмами дают двоение-троение опорных точек.

Известен по патенту США US 9019509 CHIP-SCALE STAR TRACKER (МПК G01B 11/02; G01C 21/02; G01C 21/24; G01J 1/20; G01S 3/785; G01S 3/786; G02B 6/028; G02B 6/34, опубл. 2015-04-28) прибор для определения положения той или иной звезды, т.е. ее углов над «горизонтом». По мысли авторов этот прибор может заменить для этого применения всякого рода телескопы. Получается большой выигрыш в габаритах и массе. В этом приборе применяется явление дифракции в двух местах: первое - чтобы ввести свет от звезды в тонкую (толщиной 1 мм) пластину; второе - чтобы вывести из пластины паразитные, не относящиеся к целевой звезде, излучения.

Недостатком предложенного решения является, например, то, что использование дифракционного оптического элемента (ДОЭ) при вводе света (см. Fig.2,б), не сопровождается указанием на глубину канавок микрорельефа. Это и ненужно, поскольку свет от звезды идет в широком диапазоне спектра. Получается, что при конкретной глубине канавки будет дифрагировать в нужном направлении только очень малая доля приходящего от звезды света. В итоге прибор имеет очень незначительный КПД.

Известна по патенту США US 5808732 SYSTEM FOR REFERENCING A DIRECTION OF AN OUTPUT BEAM (МПК B64G 1/66; G01C 21/02; G01S 19/44; G01S 5/14; G01S 3/786; (IPC1-7): H04J 14/08, опубл. 1998-09-15) система, где применяются дифракционные решетки (ДР), но они в системе образуют оптический ромб, иными словами, они заменяют ромбическую оптическую призму. В свою очередь, ромбическая призма служит только для параллельного смещения лучей, а не для фокусировки, как в предлагаемой полезной модели. Именно в таком применении ДР в данном патенте и используются. Обеспечивается параллельное смещение пучка излучения с целью его ослабления. В принципе, в рассматриваемом патенте можно применять ДР с различающимися периодами. Это позволит, например, сместить пучок не параллельно, а под углом.

Недостатками рассматриваемой системы относительно предлагаемого технического решения являются: - невозможность фокусировки лучей (а на этом основан принцип

создания точечного изображения в предлагаемой полезной модели) при применении оптического ромба; - необходимость применения двух деталей, что усложняет конструкцию и делает возможным расстраиваемость КДОЭ. Также недостатком такого прибора неизбежно будут повышенные масса и габариты.

5 Наиболее близким аналогом (прототипом) предлагаемой полезной модели можно считать КДОЭ для КГЭ углоизмерительного прибора в авторской статье СОЗДАНИЕ ДОЭ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ЭТАЛОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ (авторы: Одинокоев С.Б., Сагатеян Г.Р., Ковалёв М.С., Соломашенко А.Б., Дроздова Е.А., МГТУ им. Н.Э. Баумана - журнал Компьютерная
10 оптика, 2013, том 37, №3, С. 341-352). Прототипный КДОЭ для КГЭ углоизмерительного прибора представляет собой оптическую плоско-параллельную пластину, на противоположных полированных сторонах которой находятся два набора ДР по пять в каждом (так называемый «крест» - одна ДР в центре «креста» (центральная) и по две ДР по горизонтали и вертикали от центральной. Каждой ДР на выходной стороне
15 плоско-параллельной пластины соответствует своя ДР на входной стороне пластины. Таким образом прибор формирует крестообразную пятиточечную структуру.

Недостатками прототипного КДОЭ можно признать:

- работа во втором порядке дифракции, что снижает дифракционную эффективность и не дает возможности повышения точности формирования опорных точек, может
20 давать дополнительные паразитные опорные точки;
- отсутствие плазмонных ДР в качестве замены просветляющего оптического покрытия на входной плоскости КДОЭ

Раскрытие полезной модели

Техническим результатом предлагаемой полезной модели является преодоление
25 недостатков прототипа, а именно: работа КДОЭ не во втором, а в первом порядке дифракции, и применение плазмонных ДР в качестве замены просветляющего оптического покрытия на входной плоскости КДОЭ.

Технический результат достигается тем, что КДОЭ для КГЭ углоизмерительного прибора представляет собой оптическую плоско-параллельную пластину, на
30 противоположных полированных сторонах которой находятся два набора ДР по пять в каждом (так называемый «крест» - одна ДР в центре «креста» (центральная) и по две ДР по горизонтали и вертикали от центральной. Каждой ДР на выходной стороне плоскопараллельной пластины соответствует своя ДР на входной стороне пластины. Таким образом прибор формирует крестообразную пятиточечную структуру. При этом
35 работа ДР в первом порядке дифракции - получена за счет того, что удалось изготовить рельефно-фазовые ДР периодом 0,6...0,8 мкм при обеспечении точности периода до 0,01 мкм, а также использовано применение плазмонных ДР на входной плоскости КДОЭ, что также дает следующие преимущества - плазмонные ДР, работая как фильтр, выделяют весьма узкую часть спектра лазерного излучения, т.е. обеспечивается наличие
40 лишь одной длины волны, что, в свою очередь, повышает точность углов дифракции для опорных точек.

Таким образом КДОЭ для КГЭ углоизмерительного прибора представляет собой оптическую плоско-параллельную пластину, на выходной стороне которой расположен крестообразно набор из пяти точечных рельефно-фазовых ДР малой площади, то есть
45 одна ДР в центре и по две ДР по вертикали и по горизонтали по обе стороны от центральной ДР, с возможностью попадания на данные ДР световых лучей лазерного источника, падающих на входную плоскость пластины под углом падения и проходящих через нее и через указанные ДР с дифрагированием для последующего формирования

эталонной крестообразной пятиточечной структуры на экране монитора навигационного оптико-электронного прибора. При этом на входной стороне пластины расположен второй набор из пяти плазмонных ДР малой площади, соответствующий по крестообразной геометрии первому набору ДР и установленный таким образом, чтобы 5 указанные оптические лучи лазерного источника, падающих на входную плоскость пластины, попадали на плазмонные ДР, проходили без дифрагирования сквозь них и через пластину на соответствующие ДР первого набора.

В качестве типового примера осуществления каждый набор из пяти ДР имеет размеры 1×1 мм с зазорами между ними 1 мм. На выходной стороне пластины период 10 центральной рельефно-фазовой ДР составляет $d_{\text{ц}}=873$ нм; период верхней рельефно-фазовой ДР $d_{\text{в}}=1,098$ мкм; период нижней рельефно-фазовой ДР $d_{\text{н}}=0,724$ мкм, боковые рельефно-фазовые ДР имеют период $d_{\text{б}}=860$ нм, а линии канавок, образующих боковые рельефно-фазовые ДР наклонены на угол 9° навстречу друг другу, все рельефно-фазовые 15 ДР получены вытравливанием канавок в материале плоско-параллельной пластины на глубину $a=739$ нм. На входной стороне пластины все плазмонные ДР одинаковы и их период составляет 400 нм, глубина канавок 40 нм; плазмонные ДР включают в себя нанесенный на материал плоско-параллельной пластины слой серебра толщиной 40 нм, на который нанесен слой диэлектрического материала толщиной 40 нм. При этих 20 указанных параметрах при наклонном падении с углом падения 58° на каждую из указанных плазмонных ДР лазерных лучей с длиной волны 740 нм в центр экрана монитора навигационного оптико-электронного прибора попадают пять лучей с угловыми отклонениями по горизонтали и по вертикали 10° .

По сравнению с прототипом имеются следующие преимущества КДОЭ:

25 - прототип разработан для работы во втором порядке дифракции - это было пределом технических возможностей на тот период. За истекший период произошло развитие науки и техники, и сейчас можно делать ДР с меньшими периодами. При этом одновременно обеспечивается повышение точности реализации оборудованием заданного (рассчитанного теоретически) периода ДР. Это позволяет разработать КДОЭ, работающий в первом порядке дифракции. А это, в свою очередь, дает 30 следующие преимущества: - дальнейшее уменьшение массы и габаритов прибора; - повышение дифракционной эффективности. А прототип работал во втором порядке дифракции, и у него были относительно большие периоды ДР. Это значит, что есть и первые порядки дифракции, и третьи порядки дифракции. Эти порядки могут попадать 35 в оптическую систему прибора и давать дополнительные - паразитные опорные точки. Предлагаемый КДОЭ работает в первом порядке, и из-за малости периодов вторые и третьи порядки дифракции отсутствуют. Соответственно исключается возможность т.н. «паразитных засветок» оптической системы прибора.

40 - в прототипе периоды средней и боковых рельефно-фазовых ДР одинаковы. Это не позволяет получить на одном уровне среднюю и боковые опорные точки на экране. Поэтому предлагается делать период боковых ДР немного меньше, что обеспечивает выравнивание уровня средней и боковых опорных точек на экране. Реализовать такую малую разность в периодах ДР можно только на самом современном оборудовании электронно-лучевой литографии, которое только недавно появилось;

45 - что касается плазмонных ДР - в прототипе на входной плоскости КДОЭ показано просветляющее оптическое покрытие, однако не раскрывается, что это за покрытие. Между тем, такое покрытие должно обладать особыми свойствами, а именно, - оно должно полностью пропускать падающий на него под углом луч лазера определенной

длины волны (сводя к нулю отражение), а также пропускать во всем диапазоне падающий ортогонально свет от звезд.

Относительно всего вышеперечисленных аналогов (кроме, прототипа) предлагаемое техническое решение позволяет снизить массу и габариты, повысить точность измерений за счет использования «креста» из пяти опорных точек, который работает на фокусирование излучения. Фокусировка происходит по-разному по горизонтали и по вертикали. Фокусировка по горизонтали происходит за счет поворота линий ДР (или наклона линий ДР навстречу друг другу). Фокусировка по вертикали происходит за счет применения ДР с различающимися периодами. При этом предлагаемая система ДР работает как линза. Также в предлагаемой конструкции есть только одна деталь - оптическая плоско-параллельная пластина, что принципиально решает проблему расстраиваемости КГЭ.

Перечень фигур

На фиг. 1 представлен «трафарет» крестообразной пятиточечной структуры на экране монитора навигационного оптико-электронного прибора.

На фиг. 2 представлено устройство предлагаемого КДОЭ.

На фиг. 3 представлены схемы хода лучей на боковых ДР.

Работа плазмонной ДР поясняется графиком на фиг. 4.

Осуществление полезной модели

На фиг. 1 обозначено: 1 - экран монитора навигационного оптико-электронного прибора; 2 - звездное небо; 3 - центральная опорная точка точечного изображения; 4, 5 - опорные точки точечного изображения, расположенные по горизонтали; 6, 7 - опорные точки точечного изображения, расположенные по вертикали.

Такое расположение точек в точечном изображении может быть полезным для применения в составе оптического угломерного прибора, предназначенного для контроля и управления вращениями вокруг своих осей космического летательного аппарата (КЛА), находящегося, например, на околоземной орбите, при его ориентации по звездам. При навигации по звездам контроль и управление вращениями космического летательного аппарата (КЛА) производят на основе наблюдения на экране монитора звездного неба через «трафарет» точечного изображения.

Опорные точки, формирующие в совокупности точечное изображение, получают применением КДОЭ, представляющего собой оптическую плоско-параллельную пластину, содержащую ДР. Комбинированность КДОЭ заключается в том, что ДР содержатся на обеих оптически полированных плоскостях плоско-параллельной пластины.

Наблюдаемая картина расположения опорных точек на экране прибора может меняться, если по каким-то причинам (например, из-за изменения температурного режима) изменился период той или иной ДР. Однако в предлагаемом устройстве вероятность такого события минимизирована. Кроме того, наблюдаемая картина может измениться вследствие изменения угла падения лазерного луча, вызванного, например, теми же тепловыми деформациями. Однако и для этого случая предусмотрено, что изменения направлений дифрагированных лучей являются малыми величинами второго порядка по сравнению с изменениями угла падения.

На фиг. 2 обозначено: 8 - подложка, представляющая собой оптическую плоскопараллельную пластину; 9 - дифракционные решетки, каждая из которых формирует по одной опорной точке на формируемом точечном изображении; 10 - падающий на КДОЭ луч света; 11 - дифрагированный на дифракционных решетках 9 луч света; 12 - недифрагированный луч света (нулевой порядок дифракции); 13 -

плазмонные дифракционные решетки; 14 - просветляющее покрытие; 15 - слой металлизации; 16 - дополнительные слои; 17 - центр входного зрачка навигационного прибора.

Каждой опорной точке формируемого изображения соответствует своя ДР на КДОЭ, причем, поскольку ДР выполнены на обеих сторонах КДОЭ, получается, что каждой опорной точке точечного изображения соответствуют по паре ДР на входной и выходной сторонах пластины подложки.

Подложка 8 (фиг. 2,а), представляющая собой оптическую плоско-параллельную пластину, изготовлена, например, из плавленного кварца. Рельефно-фазовые ДР 9 выполнены на выходной (правой) стороне подложки 8.

При рассмотрении предлагаемого КДОЭ по стрелке Б можно видеть набор рельефно-фазовых ДР, причем на каждую ДР 9 попадает свой лазерный луч 10. Попадая на ДР 9, лазерный луч претерпевает дифракцию. Работа КДОЭ основана на использовании дифрагированного луча 11. При этом недифрагированный луч 12, соответствующий нулевому порядку дифракции, является паразитным излучением, которое может привести к нежелательной засветке экрана монитора 1 в виде дополнительных (паразитных) точек. При рассмотрении предлагаемого КДОЭ по стрелке А можно видеть, что на входной (левой) стороне подложки 8 выполнены плазмонные ДР 13, обладающие свойством просветления в узкой полосе на длине волны, излучаемой применяемым лазером. Плазмонные решетки представляют собой ДР, содержащие слой металлизации 15 и дополнительные диэлектрические слои 16. Количество и расположение плазмонных дифракционных решеток 13 на входной (левой) стороне подложки 8 соответствует количеству и расположению ДР 9 на выходной (правой) стороне этой подложки. Недифрагированный луч 12 (он же - луч в нулевом порядке дифракции) минимизирован по своей интенсивности и в идеале сведен к нулю.

Каждый дифрагированный луч 11 имеет свое направление, задаваемое положением формируемой им опорной точки. В частности, центральная опорная точка 3 (см. фиг. 1) формируется горизонтально направленным лучом 11 (фиг. 2,б). Нижняя опорная точка 7 (см. фиг. 1) формируется лучом 11, направленным вниз (фиг. 2,в). Верхняя опорная точка 6 (см. фиг. 1) формируется лучом 11, направленным вверх (фиг. 2,г).

При рассмотрении Вида Б на фиг. 2,а верхняя дифракционная решетка формирует нижнюю опорную точку 7, нижняя дифракционная решетка формирует верхнюю опорную точку 6, а центральная дифракционная решетка формирует центральную опорную точку 3.

Распространение дифрагированного луча 11 в заданном направлении по вертикали обеспечивается применением дифракционных решеток 9 с различными периодами (фиг. 2,д). По горизонтали направляет дифрагированный луч центральная ДР. Верхняя ДР направляет дифрагированный луч 11 вниз относительно горизонтали, а нижняя ДР направляет дифрагированный луч 11 вверх относительно горизонтали. Это происходит потому, что у верхней ДР период меньше, чем у центральной ДР, а у нижней ДР период меньше, чем у центральной ДР. При этом дифрагированные на верхней, нижней и центральной дифракционных решетках лучи 11 пересекаются в центре 17 входного зрачка оптического прибора.

Как вариант, на входную (левую) сторону подложки 8 может быть нанесено просветляющее покрытие 14, работающее в широкой полосе длин волн видимой части спектра. Также как вариант, в позиции 14 может находиться покровное стекло толщиной 80-130 мкм, посаженное на подложку 8 на оптический контакт.

На фиг. 3 обозначено: 18 - плоскость падения луча на дифракционную решетку; 19

- плоскость дифракции луча на дифракционной решетке; 20 - плоскость, перпендикулярная линиям дифракционной решетки; 21 - точка попадания недифрагированного луча на виртуальную плоскость; 22 - виртуальная плоскость, перпендикулярная оптической оси прибора; 23 - точка падения дифрагированного луча на виртуальную плоскость при отсутствии наклона линий дифракционной решетки; 24 - точка падения дифрагированного луча на виртуальную плоскость при наклоне линий дифракционной решетки на угол γ без изменения ее периода; 25 - точка падения дифрагированного луча на виртуальную плоскость при наклоне линий дифракционной решетки на угол γ и уменьшении ее периода.

Распространение дифрагированных лучей 11 в заданном направлении по горизонтали обеспечивается тем, что линии двух боковых ДР 9 наклонены относительно горизонтали на угол γ (фиг. 3,а). Эти два луча от боковых дифракционных решеток должны также пройти через ту же точку 17, где пересеклись три указанных ранее луча (см. фиг. 2,д). В этом случае плоскость падения луча 18 не совпадает с плоскостью дифракции луча 19. Также в этом случае плоскость дифракции 19 не совпадает и с перпендикулярной направлению линий ДР плоскостью 20, содержащий вектор дифракционной решетки. Угол разворота γ боковых дифракционных решеток 9, обеспечивающий требуемый разворот плоскости дифракции 19 относительно плоскости падения 18 на угол ψ определен экспериментально.

Падающий от лазера луч 10 попадает на боковую ДР 9 (фиг. 3,б). Недифрагированный луч 12 (нулевой порядок дифракции) отображается в виде точки 21 на плоскости 22. При этом образуются дифрагированный луч 11. Если нет наклона линий ДР 9, т.е. если вектор дифракционной решетки лежит в плоскости падения луча 18, то дифрагированный луч 11 отображается на плоскости 22 в виде точки 23. При придании линиям ДР 9 наклона на угол γ плоскость дифракции поворачивается на угол ψ_1 . При этом дифрагированный луч 11 отобразится на плоскости 22 точкой 24. Можно видеть, что наряду с требуемым горизонтальным отклонением x мы получаем также и вертикальное отклонение y . Для того, чтобы боковые опорные точки на экране монитора находились бы на той же высоте, что и центральная опорная точка, дифрагированный на боковой ДР луч 11 должен на плоскости 22 отображаться в виде точки 25. А для этого в свою очередь необходимо угол дифракции β дифрагированного луча 11 увеличен, благодаря уменьшению периода боковых ДР 9.

Минимизация и в идеале сведение к нулю интенсивности недифрагированного луча 12 (нулевого порядка дифракции) достигается тем, что ДР 9 выполнены в самом теле кварцевой подложки 8 и представляют собой бинарный микрорельеф. В пределах бинарного микрорельефа часть луча в нулевом порядке дифракции проходит по воздуху, а остальная часть - по кварцу. Поскольку скорости света в воздухе и в кварце различны, то при подборе некоторой глубины a канавок, формирующих микрорельеф ДР, получается так, что две части луча в нулевом порядке, проходящие по кварцу и воздуху, покидают этот микрорельеф в противофазе. Этим обеспечивается гашение луча в нулевом порядке дифракции и перераспределение его энергии в дифрагированный луч. Интенсивность недифрагированного луча - нулевого порядка дифракции - описывается следующей формулой Кирхгофа:

$$\eta_0(\lambda) = \left(1 - 2\frac{b}{d}\right)^2 + 4\frac{b}{d}\left(1 - \frac{b}{d}\right)\cos^2\left[\pi(n-1)\frac{a}{\lambda}\right] \quad (1)$$

где: λ - длина волны лазерного излучения;

$\eta_0(\lambda)$ - интенсивность луча в нулевом порядке дифракции;

- b - ширина выступа микрорельефа ДР (см. фиг. 2,а);
- d - период дифракционной решетки;
- n - показатель преломления материала подложки;
- a - глубина канавки дифракционной решетки (см. фиг. 2,а).

Особенностью оптической схемы прибора является то, что она характеризуется большим углом падения θ . Но при больших углах падения θ катастрофически увеличивается коэффициент отражения падающего луча 3 от левой плоскости плоскопараллельной пластины 1, что приводит к уменьшению количества света, достигающего ДР 9, находящихся на правой плоскости той же плоско-параллельной пластины, и к снижению эффективности работы прибора в целом. В принципе, как раз такие задачи решает нанесение многослойных оптических покрытий. Но для этого надо наносить 30-40, а может быть и до 200-300 слоев, каждый из которых - из определенного материала и определенной толщины. Эта технология является в высшей степени сложной, требующей высочайшей квалификации исполнителей, сверхсовременного напылительного оборудования и суперсовременных методов активного контроля оптических свойств как каждого вновь наносимого слоя покрытия, так и системы уже нанесенных слоев, рассчитывая при этом в процессе нанесения требуемые характеристики совокупности всех оставшихся к нанесению слоев. Нанесение многослойных оптических покрытий - крайне затратный и нетехнологичный вариант решения указанной задачи.

Поэтому в точке попадания каждого из падающих лучей 10 на левую плоскость КДОЭ предусмотрены плазменные ДР 13. Они минимизируют в идеале до нуля коэффициент отражения, перенаправляя всю энергию падающего луча по направлению его распространения, т.е. в нулевом порядке прохождения.

Работа плазменной ДР поясняется графиком на фиг. 4. На фиг. 4 обозначено:

- длина волны лазерного излучения;
- угол падения лазерного луча на плазмонную ДР;
- ...0,9 - числа на шкале справа, представляющие собой коэффициент пропускания плазмонной ДР в нулевом порядке дифракции;

Md400w160a40-Air40+Ag40 - геометрические и физико-химические характеристики плазмонной ДР.

На фиг. 4 показана так называемая $\theta\lambda$ -диаграмма, т.е. зависимость интенсивности лазерного луча, прошедшего через плазмонную ДР и недифрагировавшего на ней. Этот луч обозначается как T0 (θ, λ), т.е. как проходящий (T) луч нулевого (0) порядка дифракции. Далее, буквы Md в обозначении геометрических и физико-химических параметров плазмонной ДР указывают на то, что сама ДР выполнена в пределах поверхностного микрорельефа левой (см. фиг. 2) плоскости заявляемого КДОЭ. Причем плазмонная ДР представляет собой фактически микрорельеф в форме меандра. Сочетание цифр и букв 400w в обозначении геометрических и физико-химических параметров плазмонной ДР означает, что период упомянутого меандра составляет 400 нм. Сочетание цифр и букв 160a40 в обозначении геометрических и физико-химических параметров плазмонной ДР означает, что ширина выступа упомянутого меандра составляет 160 нм, а его глубина составляет 40 нм. Сочетание цифр, букв и знаков Air40+Ag40 в обозначении геометрических и физико-химических параметров плазмонной ДР означает, что непосредственно под поверхностью меандра находится слой диэлектрического материала толщиной 40 нм, (этот слой фактически и образует упомянутый меандр) а под ним - слой серебра толщиной 40 нм, который также образует меандр.

На графике фиг. 4 интересует длина волны лазерного излучения $\lambda=0,74$ мкм. Можно видеть, что практически 100%-ное пропускание луча этого лазера происходит при угле падения $\theta=58^\circ$. Эту величину угла падения θ считаем исходной для определения периода рельефно-фазовой ДР, расположенной на выходной (правой) стороне заявляемого КДОЭ и обеспечивающей дифракцию лазерного луча с длиной волны $\lambda=0,74$ мкм по схеме, показанной на фиг. 2,б. Расчет по формуле $d=\lambda/\sin\theta$ при подстановке $\theta=58^\circ$ дает величину периода центральной дифракционной решетки $d_{\text{ц}}=873$ нм.

Для определения периодов верхней и нижней дифракционных решеток производили их расчет по формулам: $d_{\text{в,н}}=\lambda/(\sin\theta\pm\sin\alpha)$, что, в предположении, что отклонения углов дифрагированных в первом порядке лучей по вертикали от горизонтального направления составляет $\alpha=\pm 10^\circ$, дает периоды верхней и нижней дифракционных решеток:

- период верхней дифракционной решетки $d_{\text{в}}=1,098$ мкм;

- период нижней дифракционной решетки $d_{\text{н}}=0,724$ мкм.

Далее, на основе экспериментальных исследований установлено, что показанный на фиг. 3, а угол разворота боковых дифракционных решеток для отклонения дифрагированных на них лучей в горизонтальной плоскости на угол $\pm 10^\circ$ составляет $\gamma=9^\circ$.

Кроме того, также на основе экспериментальных исследований, установлено, что, для обеспечения расположения дифрагированных от центральной и двух боковых дифракционных решеток лучей в одной горизонтальной плоскости, необходимо уменьшить период боковых дифракционных решеток до $d_{\text{б}}=860$ нм. Тогда в соответствии с формулой (1) глубина a травления канавок (см. фиг. 2,а) составляет $a=739$ нм.

Таким образом каждый набор включает по пять ДР размерами 1×1 мм с зазорами между ними 1 мм. На выходной (правой) стороне пластины выполнены рельефно-фазовые ДР. При этом период центральной ДР составляет $d_{\text{ц}}=873$ нм; период верхней ДР составляет $d_{\text{в}}=1,098$ мкм; период нижней ДР составляет $d_{\text{н}}=0,724$ мкм. Боковые ДР имеют период $d_{\text{б}}=860$ нм, а линии канавок, образующих боковые ДР наклонены на угол 9° навстречу друг другу. Все ДР получены вытравливанием канавок в материале плоскопараллельной пластины на глубину $a=739$ нм. На входной (левой) стороне пластины выполнены плазмонные ДР. Все плазмонные ДР одинаковы. Период плазмонных ДР составляет 400 нм. Глубина канавок плазмонных ДР составляет 40 нм. Плазмонные ДР включают в себя нанесенный на материал плоско-параллельной пластины слой серебра толщиной 40 нм, на который нанесен слой диэлектрического материала, например, двуокиси кремния, толщиной 40 нм. КДОЭ работает на длине волны лазера 740 нм. При падении с углом падения $\theta=58^\circ$ на каждую из плазмонных ДР лазерных лучей в центр зрачка прибора попадают пять лучей с угловыми отклонениями по горизонтали и по вертикали 10° .

В результате весь КДОЭ для канала геометрического эталона углоизмерительного прибора, заявляемый в качестве полезной модели, описан в требуемой степени подробности и конкретности.

Угломерный прибор имеет шкалы углов, на которых углы поворота измеряются и контролируются непосредственно датчиками, но эти датчики (как правило, гироскопические) имеют дрейф. Поэтому время от времени следует проверять правильность отображения на шкалах гироскопических приборов действительных углов поворота космического летательного аппарата посредством тестового использования КГЭ.

КДОЭ в составе КГЭ работает следующим образом. На мониторе прибора (см. фиг. 1) отображаются пять опорных точек 3, 4, 5, 6, 7. Вначале совмещают одну из опорных точек, например, точку 3 с какой-то звездой звездного неба. Затем производят поворот космического летательного аппарата по горизонтали до тех пор, пока с выбранной звездой совместится, например, точка 4. Это будет соответствовать повороту космического летательного аппарата на 10° по горизонтали, так как пять лучей в приведенном примере осуществления КДОЭ имеют угловые отклонения по горизонтали 10° . Аналогично, если после совмещения с выбранной звездой точки 3 поворачивать космический летательный аппарат по вертикали до тех пор, пока выбранная звезда совместится с точкой 6, то это будет соответствовать повороту космического летательного аппарата на 10° по вертикали, так как пять лучей в приведенном примере осуществления КДОЭ имеют угловые отклонения по вертикали 10° .

(57) Реферат

Полезная модель относится к комбинированным дифракционным оптическим элементам (КДОЭ), предназначенным для создания точечного изображения в оптической системе космического углоизмерительного прибора, точнее в его канале геометрического эталона (КГЭ). Техническим результатом является работа КДОЭ не во втором, а в первом порядке дифракции и применение плазмонных дифракционных решеток (ДР) в качестве замены просветляющего оптического покрытия на входной плоскости КДОЭ. КДОЭ для КГЭ углоизмерительного прибора представляет собой оптическую плоскопараллельную пластину, на выходной стороне которой расположен крестообразно набор из пяти точечных рельефно-фазовых ДР малой площади, то есть одна ДР в центре и по две ДР по вертикали и по горизонтали по обе стороны от центральной ДР, с возможностью попадания на данные ДР световых лучей лазерного источника, падающих на входную плоскость пластины под углом падения и проходящих через нее и через указанные ДР с дифрагированием для последующего формирования эталонной крестообразной пятиточечной структуры на экране монитора навигационного оптико-электронного прибора. При этом на входной стороне пластины расположен второй набор из пяти плазмонных ДР малой площади, соответствующий по крестообразной геометрии первому набору ДР и установленный таким образом, чтобы указанные оптические лучи лазерного источника, падающих на входную плоскость пластины, попадали на плазмонные ДР, проходили без дифрагирования сквозь них и через пластину на соответствующие ДР первого набора. 1 з.п. ф-лы. 4 ил.

Реферат

Комбинированный дифракционный оптический элемент для канала геометрического эталона углоизмерительного прибора

Полезная модель относится к комбинированным дифракционным оптическим элементам (КДОЭ), предназначенным для создания точечного изображения в оптической системе космического углоизмерительного прибора, точнее в его канале геометрического эталона (КГЭ). Техническим результатом является работа КДОЭ не во втором, а в первом порядке дифракции и применение плазмонных дифракционных решеток (ДР) в качестве замены просветляющего оптического покрытия на входной плоскости КДОЭ. КДОЭ для КГЭ углоизмерительного прибора представляет собой оптическую плоско-параллельную пластину, на выходной стороне которой расположен крестообразно набор из пяти точечных рельефно-фазовых ДР малой площади, то есть одна ДР в центре и по две ДР по вертикали и по горизонтали по обе стороны от центральной ДР, с возможностью попадания на данные ДР световых лучей лазерного источника, падающих на входную плоскость пластины под углом падения и проходящих через нее и через указанные ДР с дифрагированием для последующего формирования эталонной крестообразной пятиточечной структуры на экране монитора навигационного оптико-электронного прибора. При этом на входной стороне пластины расположен второй набор из пяти плазмонных ДР малой площади, соответствующий по крестообразной геометрии первому набору ДР и установленный таким образом, чтобы указанные оптические лучи лазерного источника, падающих на входную плоскость пластины, попадали на плазмонные ДР, проходили без дифрагирования сквозь них и через пластину на соответствующие ДР первого набора. 1 з.п.ф-лы. 4 ил.

**Комбинированный дифракционный оптический элемент
для канала геометрического эталона углоизмерительного прибора**

Область техники

Полезная модель относится к комбинированным дифракционным оптическим элементам (КДОЭ), предназначенным для создания точечного изображения в оптической системе космического углоизмерительного прибора, точнее в его канале геометрического эталона (КГЭ).

Уровень техники

Известны углоизмерительные приборы, запатентованные компанией «Геофизика-Космос» (патенты РФ №№ 85266 (опубл.2009.07.27), 106947 (опубл.2011.07.27), 2442109 (опубл.2012.02.10), 2469266 (опубл.2012.12.10), 2470258 (опубл.2012.12.20), 2554599 (опубл.2015.06.27), 2525652 (опубл.2014.08.20), 98801 (опубл.2010.10.27)). Все углоизмерительные приборы указанных патентов крутятся вокруг одной и той же схемы КГЭ, которая использует оптическую призму сложной конструкции; - разница заключается в том, что где-то это просто призма (патент 85266), где-то зеркально-призменный блок (патент 106947), где-то призматический моноблок (патенты 2442109, 2469266), где-то склеенные линзы с призмами (патенты 2470258, 2554599), призмы с тремя источниками света (патент 2525652), призмы с формированием только одной опорной точки в КГЭ (патент 98801).

Недостатками всех этих схем является сложность конструкции КГЭ, ее масса и габариты, а также расстраиваемость из-за наличия нескольких составных, механически настраиваемых оптических деталей. Также технические решения с оптическими призмами дают двоение-троение опорных точек.

Известен по патенту США US9019509 CHIP-SCALE STAR TRACKER (МПК G01B11/02; G01C21/02; G01C21/24; G01J1/20; G01S3/785; G01S3/786; G02B6/028; G02B6/34, опубл. 2015-04-28) прибор для определения положения той или иной звезды, т.е. ее углов над «горизонтом». По мысли авторов этот прибор может заменить для этого применения всякого рода телескопы. Получается большой выигрыш в габаритах и массе. В этом приборе применяется явление дифракции в двух местах: первое – чтобы ввести свет от звезды в тонкую (толщиной 1 мм) пластину; второе – чтобы вывести из пластины паразитные, не относящиеся к целевой звезде, излучения.

Недостатком предложенного решения является, например, то, что использование дифракционного оптического элемента (ДОЭ) при вводе света (см. Fig.2,б), не сопровождается указанием на глубину канавок микрорельефа. Это и ненужно, поскольку свет от звезды идет в широком диапазоне спектра. Получается, что при конкретной глубине

канавки будет дифрагировать в нужном направлении только очень малая доля приходящего от звезды света. В итоге прибор имеет очень незначительный КПД.

Известна по патенту США US5808732 SYSTEM FOR REFERENCING A DIRECTION OF AN OUTPUT BEAM (МПК B64G1/66; G01C21/02; G01S19/44; G01S5/14; G01S3/786; (IPC1-7): H04J14/08, опубл. 1998-09-15) система, где применяются дифракционные решетки (ДР), но они в системе образуют оптический ромб, иными словами, они заменяют ромбическую оптическую призму. В свою очередь, ромбическая призма служит только для параллельного смещения лучей, а не для фокусировки, как в предлагаемой полезной модели. Именно в таком применении ДР в данном патенте и используются. Обеспечивается параллельное смещение пучка излучения с целью его ослабления. В принципе, в рассматриваемом патенте можно применять ДР с различающимися периодами. Это позволит, например, сместить пучок не параллельно, а под углом.

Недостатками рассматриваемой системы относительно предлагаемого технического решения являются: - невозможность фокусировки лучей (а на этом основан принцип создания точечного изображения в предлагаемой полезной модели) при применении оптического ромба; - необходимость применения двух деталей, что усложняет конструкцию и делает возможным расстраиваемость КГЭ. Также недостатком такого прибора неизбежно будут повышенные масса и габариты.

Наиболее близким аналогом (прототипом) предлагаемой полезной модели можно считать КДОЭ для КГЭ углоизмерительного прибора в авторской статье СОЗДАНИЕ ДОЭ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ЭТАЛОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ (авторы: Одинокоев С.Б., Сагателян Г.Р., Ковалёв М.С., Соломашенко А.Б., Дроздова Е.А., МГТУ им. Н.Э. Баумана - журнал Компьютерная оптика, 2013, том 37, №3, С.341-352). Прототипный КДОЭ для КГЭ углоизмерительного прибора представляет собой оптическую плоско-параллельную пластину, на противоположных полированных сторонах которой находятся два набора ДР по пять в каждом (так называемый «крест» - одна ДР в центре «креста» (центральная) и по две ДР по горизонтали и вертикали от центральной. Каждой ДР на выходной стороне плоско-параллельной пластины соответствует своя ДР на входной стороне пластины. Таким образом прибор формирует крестообразную пятиточечную структуру.

Недостатками прототипного КДОЭ можно признать:

- работа во втором порядке дифракции, что снижает дифракционную эффективность и не дает возможности повышения точности формирования опорных точек, может давать дополнительные паразитные опорные точки;

- отсутствие плазмонных ДР в качестве замены просветляющего оптического покрытия на входной плоскости КДОЭ

Раскрытие полезной модели

Техническим результатом предлагаемой полезной модели является преодоление недостатков прототипа, а именно: работа КДОЭ не во втором, а в первом порядке дифракции, и применение плазмонных ДР в качестве замены просветляющего оптического покрытия на входной плоскости КДОЭ.

Технический результат достигается тем, что КДОЭ для КГЭ углоизмерительного прибора представляет собой оптическую плоско-параллельную пластину, на противоположных полированных сторонах которой находятся два набора ДР по пять в каждом (так называемый «крест» - одна ДР в центре «креста» (центральная) и по две ДР по горизонтали и вертикали от центральной. Каждой ДР на выходной стороне плоско-параллельной пластины соответствует своя ДР на входной стороне пластины. Таким образом прибор формирует крестообразную пятиточечную структуру. При этом работа ДР в первом порядке дифракции – получена за счет того, что удалось изготовить рельефно-фазовые ДР периодом 0,6...0,8 мкм при обеспечении точности периода до 0,01 мкм, а также использовано применение плазмонных ДР на входной плоскости КДОЭ, что также дает следующие преимущества – плазмонные ДР, работая как фильтр, выделяют весьма узкую часть спектра лазерного излучения, т.е. обеспечивается наличие лишь одной длины волны, что, в свою очередь, повышает точность углов дифракции для опорных точек.

Таким образом КДОЭ для КГЭ углоизмерительного прибора представляет собой оптическую плоско-параллельную пластину, на выходной стороне которой расположен крестообразно набор из пяти точечных рельефно-фазовых ДР малой площади, то есть одна ДР в центре и по две ДР по вертикали и по горизонтали по обе стороны от центральной ДР, с возможностью попадания на данные ДР световых лучей лазерного источника, падающих на входную плоскость пластины под углом падения и проходящих через нее и через указанные ДР с дифрагированием для последующего формирования эталонной крестообразной пятиточечной структуры на экране монитора навигационного оптико-электронного прибора. При этом на входной стороне пластины расположен второй набор из пяти плазмонных ДР малой площади, соответствующий по крестообразной геометрии первому набору ДР и установленный таким образом, чтобы указанные оптические лучи лазерного источника, падающих на входную плоскость пластины, попадали на плазмонные ДР, проходили без дифрагирования сквозь них и через пластину на соответствующие ДР первого набора.

В качестве типового примера осуществления каждый набор из пяти ДР имеет размеры 1х1 мм с зазорами между ними 1 мм. На выходной стороне пластины период

центральной рельефно-фазовой ДР составляет $d_y = 873$ нм; период верхней рельефно-фазовой ДР $d_e = 1,098$ мкм; период нижней рельефно-фазовой ДР $d_n = 0,724$ мкм, боковые рельефно-фазовые ДР имеют период $d_b = 860$ нм, а линии канавок, образующих боковые рельефно-фазовые ДР наклонены на угол 9° навстречу друг другу, все рельефно-фазовые ДР получены вытравливанием канавок в материале плоско-параллельной пластины на глубину $a = 739$ нм. На входной стороне пластины все плазмонные ДР одинаковы и их период составляет 400 нм, глубина канавок 40 нм; плазмонные ДР включают в себя нанесенный на материал плоско-параллельной пластины слой серебра толщиной 40 нм, на который нанесен слой диэлектрического материала толщиной 40 нм. При этих указанных параметрах при наклонном падении с углом падения 58° на каждую из указанных плазмонных ДР лазерных лучей с длиной волны 740 нм в центр экрана монитора навигационного оптико-электронного прибора попадают пять лучей с угловыми отклонениями по горизонтали и по вертикали 10° .

По сравнению с прототипом имеются следующие преимущества КДОЭ:

– прототип разработан для работы во втором порядке дифракции – это было пределом технических возможностей на тот период. За истекший период произошло развитие науки и техники, и сейчас можно делать ДР с меньшими периодами. При этом одновременно обеспечивается повышение точности реализации оборудованием заданного (рассчитанного теоретически) периода ДР. Это позволяет разработать КДОЭ, работающий в первом порядке дифракции. А это, в свою очередь, дает следующие преимущества: - дальнейшее уменьшение массы и габаритов прибора; - повышение дифракционной эффективности. А прототип работал во втором порядке дифракции, и у него были относительно большие периоды ДР. Это значит, что есть и первые порядки дифракции, и третьи порядки дифракции. Эти порядки могут попадать в оптическую систему прибора и давать дополнительные – паразитные опорные точки. Предлагаемый КДОЭ работает в первом порядке, и из-за малости периодов вторые и третьи порядки дифракции отсутствуют. Соответственно исключается возможность т.н. «паразитных засветок» оптической системы прибора.

– в прототипе периоды средней и боковых рельефно-фазовых ДР одинаковы. Это не позволяет получить на одном уровне среднюю и боковые опорные точки на экране. Поэтому предлагается делать период боковых ДР немного меньше, что обеспечивает выравнивание уровня средней и боковых опорных точек на экране. Реализовать такую малую разность в периодах ДР можно только на самом современном оборудовании электронно-лучевой литографии, которое только недавно появилось;

- что касается плазмонных ДР – в прототипе на входной плоскости КДОЭ показано просветляющее оптическое покрытие, однако не раскрывается, что это за покрытие. Между

тем, такое покрытие должно обладать особыми свойствами, а именно, - оно должно полностью пропускать падающий на него под углом луч лазера определенной длины волны (сводя к нулю отражение), а также пропускать во всем диапазоне падающий ортогонально свет от звезд.

Относительно всего вышеперечисленных аналогов (кроме, прототипа) предлагаемое техническое решение позволяет снизить массу и габариты, повысить точность измерений за счет использования «креста» из пяти опорных точек, который работает на фокусирование излучения. Фокусировка происходит по-разному по горизонтали и по вертикали. Фокусировка по горизонтали происходит за счет поворота линий ДР (или наклона линий ДР навстречу друг другу). Фокусировка по вертикали происходит за счет применения ДР с различающимися периодами. При этом предлагаемая система ДР работает как линза. Также в предлагаемой конструкции есть только одна деталь - оптическая плоско-параллельная пластина, что принципиально решает проблему расстраиваемости КГЭ.

Перечень фигур

На фиг.1 представлен «трафарет» крестообразной пятиточечной структуры на экране монитора навигационного оптико-электронного прибора.

На фиг.2 представлено устройство предлагаемого КДОЭ.

На фиг.3 представлены схемы хода лучей на боковых ДР.

Работа плазмонной ДР поясняется графиком на фиг.4.

Осуществление полезной модели

На фиг.1 обозначено: 1 – экран монитора навигационного оптико-электронного прибора; 2 – звездное небо; 3 – центральная опорная точка точечного изображения; 4, 5 – опорные точки точечного изображения, расположенные по горизонтали; 6, 7 – опорные точки точечного изображения, расположенные по вертикали.

Такое расположение точек в точечном изображении может быть полезным для применения в составе оптического угломерного прибора, предназначенного для контроля и управления вращениями вокруг своих осей космического летательного аппарата (КЛА), находящегося, например, на околоземной орбите, при его ориентации по звездам. При навигации по звездам контроль и управление вращениями космического летательного аппарата (КЛА) производят на основе наблюдения на экране монитора звездного неба через «трафарет» точечного изображения.

Опорные точки, формирующие в совокупности точечное изображение, получают применением КДОЭ, представляющего собой оптическую плоско-параллельную пластину, содержащую ДР. Комбинированность КДОЭ заключается в том, что ДР содержатся на обеих оптически полированных плоскостях плоско-параллельной пластины.

Наблюдаемая картина расположения опорных точек на экране прибора может меняться, если по каким-то причинам (например, из-за изменения температурного режима) изменился период той или иной ДР. Однако в предлагаемом устройстве вероятность такого события минимизирована. Кроме того, наблюдаемая картина может измениться вследствие изменения угла падения лазерного луча, вызванного, например, теми же тепловыми деформациями. Однако и для этого случая предусмотрено, что изменения направлений дифрагированных лучей являются малыми величинами второго порядка по сравнению с изменениями угла падения.

На фиг.2 обозначено: 8 – подложка, представляющая собой оптическую плоско-параллельную пластину; 9 – дифракционные решетки, каждая из которых формирует по одной опорной точке на формируемом точечном изображении; 10 – падающий на КДОЭ луч света; 11 – дифрагированный на дифракционных решетках 9 луч света; 12 – недифрагированный луч света (нулевой порядок дифракции); 13 – плазмонные дифракционные решетки; 14 – просветляющее покрытие; 15 – слой металлизации; 16 – дополнительные слои; 17 – центр входного зрачка навигационного прибора.

Каждой опорной точке формируемого изображения соответствует своя ДР на КДОЭ, причем, поскольку ДР выполнены на обеих сторонах КДОЭ, получается, что каждой опорной точке точечного изображения соответствуют по паре ДР на входной и выходной сторонах пластины подложки.

Подложка 8 (фиг.2,а), представляющая собой оптическую плоско-параллельную пластину, изготовлена, например, из плавленого кварца. Рельефно-фазовые ДР 9 выполнены на выходной (правой) стороне подложки 8.

При рассмотрении предлагаемого КДОЭ по стрелке Б можно видеть набор рельефно-фазовых ДР, причем на каждую ДР 9 попадает свой лазерный луч 10. Попадая на ДР 9, лазерный луч претерпевает дифракцию. Работа КДОЭ основана на использовании дифрагированного луча 11. При этом недифрагированный луч 12, соответствующий нулевому порядку дифракции, является паразитным излучением, которое может привести к нежелательной засветке экрана монитора 1 в виде дополнительных (паразитных) точек. При рассмотрении предлагаемого КДОЭ по стрелке А можно видеть, что на входной (левой) стороне подложки 8 выполнены плазмонные ДР 13, обладающие свойством просветления в узкой полосе на длине волны, излучаемой применяемым лазером. Плазмонные решетки представляют собой ДР, содержащие слой металлизации 15 и дополнительные диэлектрические слои 16. Количество и расположение плазмонных дифракционных решеток 13 на входной (левой) стороне подложки 8 соответствует количеству и расположению ДР 9 на выходной (правой) стороне этой подложки.

Недифрагированный луч 12 (он же - луч в нулевом порядке дифракции) минимизирован по своей интенсивности и в идеале сведен к нулю.

Каждый дифрагированный луч 11 имеет свое направление, задаваемое положением формируемой им опорной точки. В частности, центральная опорная точка 3 (см. фиг.1) формируется горизонтально направленным лучом 11 (фиг.2,б). Нижняя опорная точка 7 (см. фиг.1) формируется лучом 11, направленным вниз (фиг.2,в). Верхняя опорная точка 6 (см. фиг.1) формируется лучом 11, направленным вверх (фиг.2,г).

При рассмотрении *Вида Б* на фиг.2,а верхняя дифракционная решетка формирует нижнюю опорную точку 7, нижняя дифракционная решетка формирует верхнюю опорную точку 6, а центральная дифракционная решетка формирует центральную опорную точку 3.

Распространение дифрагированного луча 11 в заданном направлении *по вертикали* обеспечивается применением дифракционных решеток 9 с различными периодами (фиг.2,д). По горизонтали направляет дифрагированный луч центральная ДР. Верхняя ДР направляет дифрагированный луч 11 вниз относительно горизонтали, а нижняя ДР направляет дифрагированный луч 11 вверх относительно горизонтали. Это происходит потому, что у верхней ДР период меньше, чем у центральной ДР, а у нижней ДР период меньше, чем у центральной ДР. При этом дифрагированные на верхней, нижней и центральной дифракционных решетках лучи 11 пересекаются в центре 17 входного зрачка оптического прибора.

Как вариант, на входную (левую) сторону подложки 8 может быть нанесено просветляющее покрытие 14, работающее в широкой полосе длин волн видимой части спектра. Также как вариант, в позиции 14 может находиться покровное стекло толщиной 80 – 130 мкм, посаженное на подложку 8 на оптический контакт.

На фиг.3 обозначено: 18 – плоскость падения луча на дифракционную решетку; 19 – плоскость дифракции луча на дифракционной решетке; 20 – плоскость, перпендикулярная линиям дифракционной решетки; 21 – точка попадания недифрагированного луча на виртуальную плоскость; 22 – виртуальная плоскость, перпендикулярная оптической оси прибора; 23 – точка падения дифрагированного луча на виртуальную плоскость при отсутствии наклона линий дифракционной решетки; 24 – точка падения дифрагированного луча на виртуальную плоскость при наклоне линий дифракционной решетки на угол γ без изменения её периода; 25 – точка падения дифрагированного луча на виртуальную плоскость при наклоне линий дифракционной решетки на угол γ и уменьшении её периода.

Распространение дифрагированных лучей 11 в заданном направлении *по горизонтали* обеспечивается тем, что линии двух боковых ДР 9 наклонены относительно горизонтали на угол γ (фиг.3,а). Эти два луча от боковых дифракционных решеток должны также пройти через ту же точку 17, где пересеклись три указанных ранее луча (см. фиг.2,д).

В этом случае плоскость падения луча 18 не совпадает с плоскостью дифракции луча 19. Также в этом случае плоскость дифракции 19 не совпадает и с перпендикулярной направлению линий ДР плоскостью 20, содержащий вектор дифракционной решетки. Угол разворота γ боковых дифракционных решеток 9, обеспечивающий требуемый разворот плоскости дифракции 19 относительно плоскости падения 18 на угол ψ определен экспериментально.

Падающий от лазера луч 10 попадает на боковую ДР 9 (фиг.3,б). Недифрагированный луч 12 (нулевой порядок дифракции) отображается в виде точки 21 на плоскости 22. При этом образуются дифрагированный луч 11. Если нет наклона линий ДР 9, т.е. если вектор дифракционной решетки лежит в плоскости падения луча 18, то дифрагированный луч 11 отображается на плоскости 22 в виде точки 23. При придании линиям ДР 9 наклона на угол γ плоскость дифракции поворачивается на угол ψ_1 . При этом дифрагированный луч 11 отобразится на плоскости 22 точкой 24. Можно видеть, что наряду с требуемым горизонтальным отклонением x мы получаем также и вертикальное отклонение y . Для того, чтобы боковые опорные точки на экране монитора находились бы на той же высоте, что и центральная опорная точка, дифрагированный на боковой ДР луч 11 должен на плоскости 22 отображаться в виде точки 25. А для этого в свою очередь необходимо угол дифракции β дифрагированного луча 11 увеличен, благодаря уменьшению периода боковых ДР 9.

Минимизация и в идеале сведение к нулю интенсивности недифрагированного луча 12 (нулевого порядка дифракции) достигается тем, что ДР 9 выполнены в самом теле кварцевой подложки 8 и представляют собой бинарный микрорельеф. В пределах бинарного микрорельефа часть луча в нулевом порядке дифракции проходит по воздуху, а остальная часть – по кварцу. Поскольку скорости света в воздухе и в кварце различны, то при подборе некоторой глубины a канавок, формирующих микрорельеф ДР, получается так, что две части луча в нулевом порядке, проходящие по кварцу и воздуху, покидают этот микрорельеф в противофазе. Этим обеспечивается гашение луча в нулевом порядке дифракции и перераспределение его энергии в дифрагированный луч. Интенсивность недифрагированного луча – нулевого порядка дифракции – описывается следующей формулой Кирхгоффа:

$$\eta_0(\lambda) = \left(1 - 2\frac{b}{d}\right)^2 + 4\frac{b}{d}\left(1 - \frac{b}{d}\right)\cos^2\left[\pi(n-1)\frac{a}{\lambda}\right] \quad (1)$$

где: λ – длина волны лазерного излучения;

$\eta_0(\lambda)$ – интенсивность луча в нулевом порядке дифракции;

b – ширина выступа микрорельефа ДР (см. фиг.2,а);

d – период дифракционной решетки;

n – показатель преломления материала подложки;

a – глубина канавки дифракционной решетки (см. фиг.2,а).

Особенностью оптической схемы прибора является то, что она характеризуется большим углом падения θ . Но при больших углах падения θ катастрофически увеличивается коэффициент отражения падающего луча 3 от левой плоскости плоско-параллельной пластины 1, что приводит к уменьшению количества света, достигающего ДР 9, находящихся на правой плоскости той же плоско-параллельной пластины, и к снижению эффективности работы прибора в целом. В принципе, как раз такие задачи решает нанесение многослойных оптических покрытий. Но для этого надо наносить 30-40, а может быть и до 200-300 слоев, каждый из которых – из определенного материала и определенной толщины. Эта технология является в высшей степени сложной, требующей высочайшей квалификации исполнителей, сверхсовременного напылительного оборудования и суперсовременных методов активного контроля оптических свойств как каждого вновь наносимого слоя покрытия, так и системы уже нанесенных слоев, рассчитывая при этом в процессе нанесения требуемые характеристики совокупности всех оставшихся к нанесению слоев. Нанесение многослойных оптических покрытий – крайне затратный и нетехнологичный вариант решения указанной задачи.

Поэтому в точке попадания каждого из падающих лучей 10 на левую плоскость КДОЭ предусмотрены плазмонные ДР 13. Они минимизируют в идеале до нуля коэффициент отражения, перенаправляя всю энергию падающего луча по направлению его распространения, т.е. в нулевом порядке прохождения.

Работа плазмонной ДР поясняется графиком на фиг.4. На фиг.4 обозначено:

λ – длина волны лазерного излучения;

θ – угол падения лазерного луча на плазмонную ДР;

0...0,9 – числа на шкале справа, представляющие собой коэффициент пропускания плазмонной ДР в нулевом порядке дифракции;

Md400w160a40-Air40+Ag40 – геометрические и физико-химические характеристики плазмонной ДР.

На фиг.4 показана так называемая $\theta\lambda$ -диаграмма, т.е. зависимость интенсивности лазерного луча, прошедшего через плазмонную ДР и недифрагировавшего на ней. Этот луч обозначается как T0 (θ, λ), т.е. как проходящий (Т) луч нулевого (0) порядка дифракции. Далее, буквы Md в обозначении геометрических и физико-химических параметров плазмонной ДР указывают на то, что сама ДР выполнена в пределах поверхностного микрорельефа левой (см. фиг.2) плоскости заявляемого КДОЭ. Причем плазмонная ДР представляет собой фактически микрорельеф в форме меандра. Сочетание цифр и букв 400w в обозначении геометрических и физико-химических параметров плазмонной ДР

означает, что период упомянутого меандра составляет 400 нм. Сочетание цифр и букв 160a40 в обозначении геометрических и физико-химических параметров плазмонной ДР означает, что ширина выступа упомянутого меандра составляет 160 нм, а его глубина составляет 40 нм. Сочетание цифр, букв и знаков Air40+Ag40 в обозначении геометрических и физико-химических параметров плазмонной ДР означает, что непосредственно под поверхностью меандра находится слой диэлектрического материала толщиной 40 нм, (этот слой фактически и образует упомянутый меандр) а под ним – слой серебра толщиной 40 нм, который также образует меандр.

На графике фиг.4 интересуют длина волны лазерного излучения $\lambda = 0,74$ мкм. Можно видеть, что практически 100%-ное пропускание луча этого лазера происходит при угле падения $\theta = 58^\circ$. Эту величину угла падения θ считаем исходной для определения периода рельефно-фазовой ДР, расположенной на выходной (правой) стороне заявляемого КДОЭ и обеспечивающей дифракцию лазерного луча с длиной волны $\lambda = 0,74$ мкм по схеме, показанной на фиг.2,б. Расчет по формуле $d = \lambda / \sin \theta$ при подстановке $\theta = 58^\circ$ дает величину периода центральной дифракционной решетки $d_u = 873$ нм.

Для определения периодов верхней и нижней дифракционных решеток производили их расчет по формулам: $d_{в,н} = \lambda / (\sin \theta \pm \sin \alpha)$, что, в предположении, что отклонения углов дифрагированных в первом порядке лучей по вертикали от горизонтального направления составляет $\alpha = \pm 10^\circ$, дает периоды верхней и нижней дифракционных решеток:

- период верхней дифракционной решетки $d_v = 1,098$ мкм;
- период нижней дифракционной решетки $d_n = 0,724$ мкм.

Далее, на основе экспериментальных исследований установлено, что показанный на фиг.3, а угол разворота боковых дифракционных решеток для отклонения дифрагированных на них лучей в горизонтальной плоскости на угол $\pm 10^\circ$ составляет $\gamma = 9^\circ$.

Кроме того, также на основе экспериментальных исследований, установлено, что, для обеспечения расположения дифрагированных от центральной и двух боковых дифракционных решеток лучей в одной горизонтальной плоскости, необходимо уменьшить период боковых дифракционных решеток до $d_b = 860$ нм. Тогда в соответствии с формулой (1) глубина a травления канавок (см. фиг.2,а) составляет $a = 739$ нм.

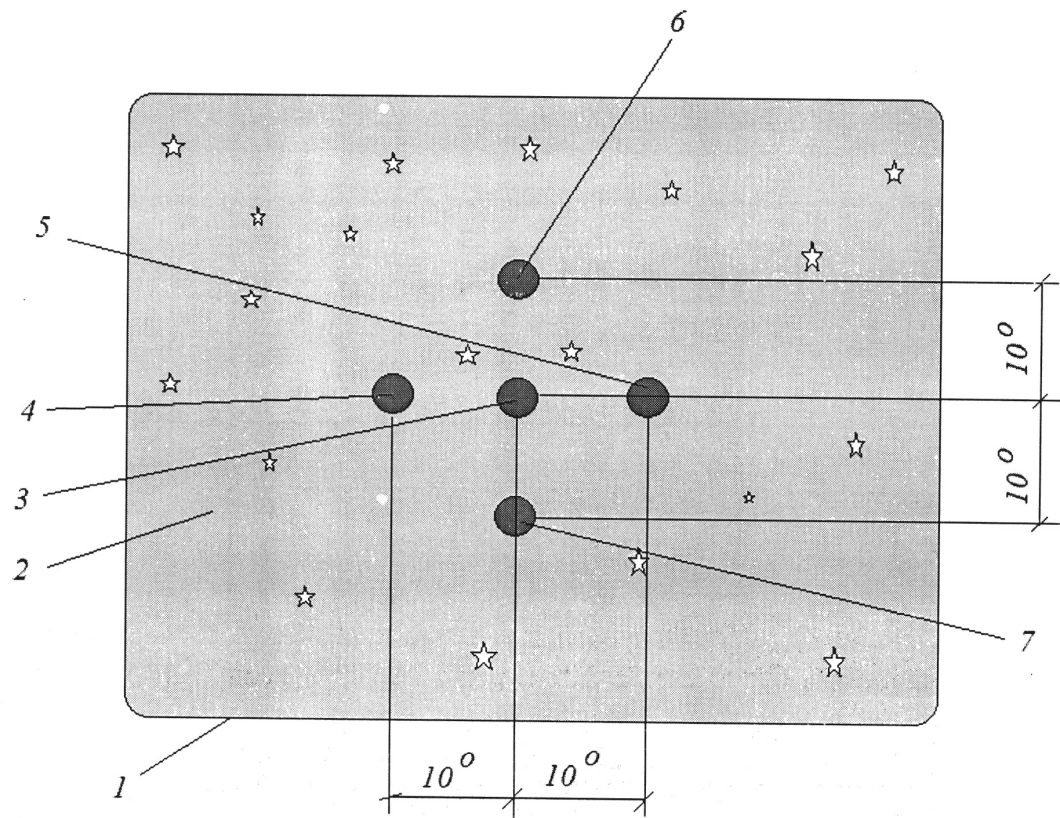
Таким образом каждый набор включает по пять ДР размерами 1x1 мм с зазорами между ними 1 мм. На выходной (правой) стороне пластины выполнены рельефно-фазовые ДР. При этом период центральной ДР составляет $d_u = 873$ нм; период верхней ДР составляет $d_v = 1,098$ мкм; период нижней ДР составляет $d_n = 0,724$ мкм. Боковые ДР имеют период $d_b = 860$ нм, а линии канавок, образующих боковые ДР наклонены на угол 9° навстречу друг другу. Все ДР получены вытравливанием канавок в материале плоско-параллельной пластины на глубину $a = 739$ нм. На входной (левой) стороне пластины

выполнены плазмонные ДР. Все плазмонные ДР одинаковы. Период плазмонных ДР составляет 400 нм. Глубина канавок плазмонных ДР составляет 40 нм. Плазмонные ДР включают в себя нанесенный на материал плоско-параллельной пластины слой серебра толщиной 40 нм, на который нанесен слой диэлектрического материала, например, двуокиси кремния, толщиной 40 нм. КДОЭ работает на длине волны лазера 740 нм. При падении с углом падения $\theta = 58^\circ$ на каждую из плазмонных ДР лазерных лучей в центр зрачка прибора попадают пять лучей с угловыми отклонениями по горизонтали и по вертикали 10° .

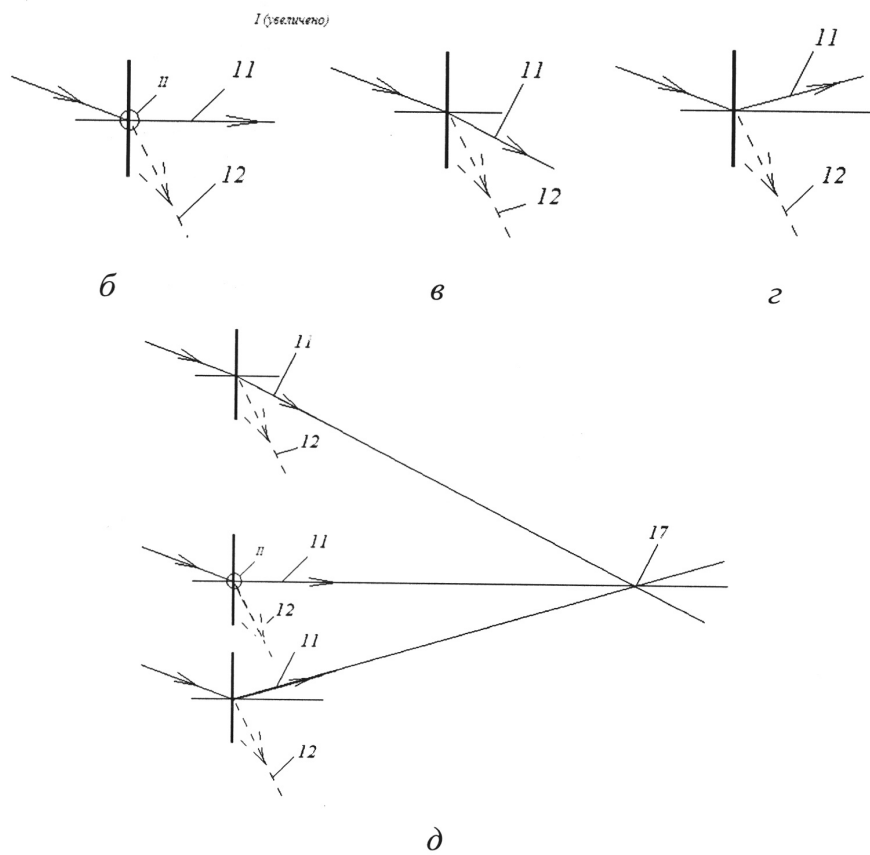
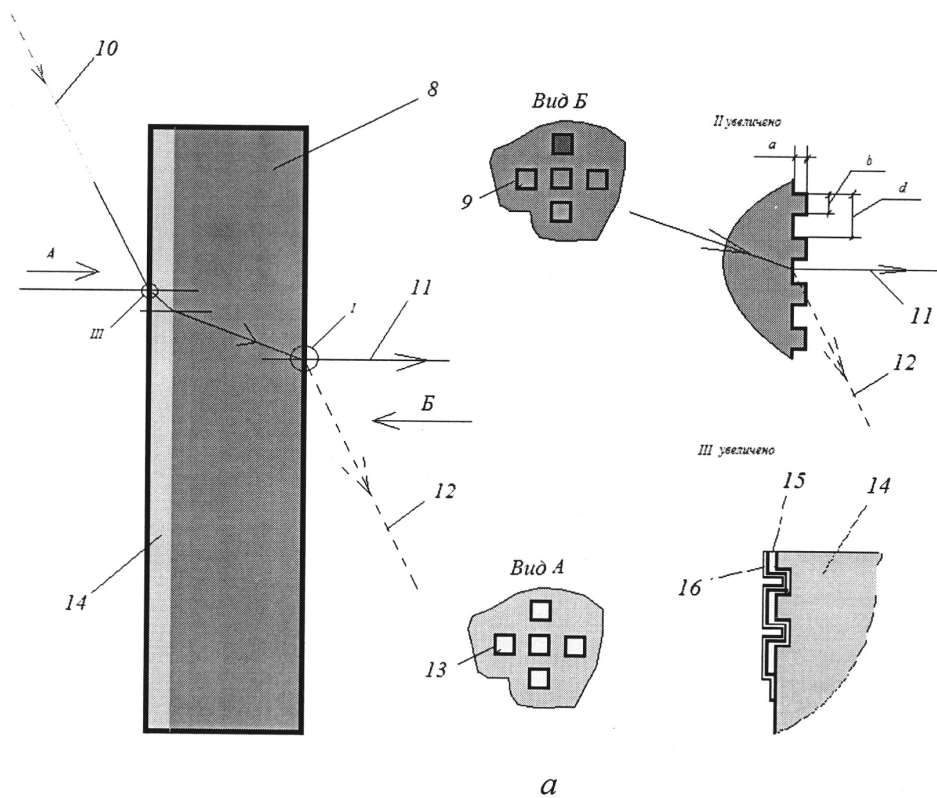
В результате весь КДОЭ для канала геометрического эталона углоизмерительного прибора, заявляемый в качестве полезной модели, описан в требуемой степени подробности и конкретности.

Угломерный прибор имеет шкалы углов, на которых углы поворота измеряются и контролируются непосредственно датчиками, но эти датчики (как правило, гироскопические) имеют дрейф. Поэтому время от времени следует проверять правильность отображения на шкалах гироскопов действительных углов поворота космического летательного аппарата посредством тестового использования КГЭ.

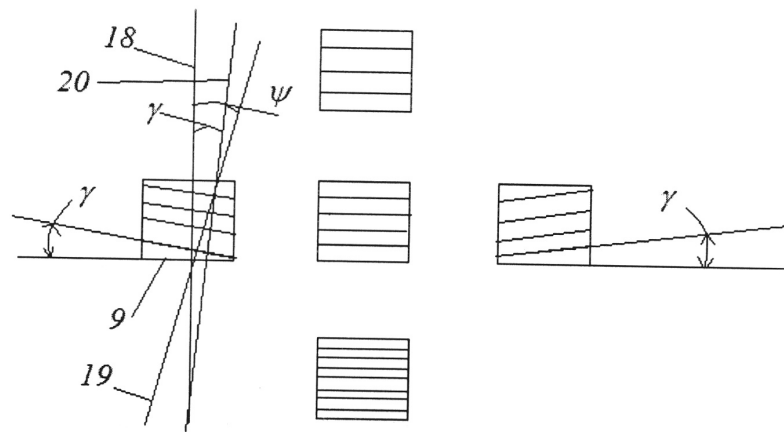
КДОЭ в составе КГЭ работает следующим образом. На мониторе прибора (см. фиг.1) отображаются пять опорных точек 3,4,5,6,7. Вначале совмещают одну из опорных точек, например, точку 3 с какой-то звездой звездного неба. Затем производят поворот космического летательного аппарата по горизонтали до тех пор, пока с выбранной звездой совместится, например, точка 4. Это будет соответствовать повороту космического летательного аппарата на 10° по горизонтали, так как пять лучей в приведенном примере осуществления КДОЭ имеют угловые отклонения по горизонтали 10° . Аналогично, если после совмещения с выбранной звездой точки 3 поворачивать космический летательный аппарат по вертикали до тех пор, пока выбранная звезда совместится с точкой 6, то это будет соответствовать повороту космического летательного аппарата на 10° по вертикали, так как пять лучей в приведенном примере осуществления КДОЭ имеют угловые отклонения по вертикали 10° .



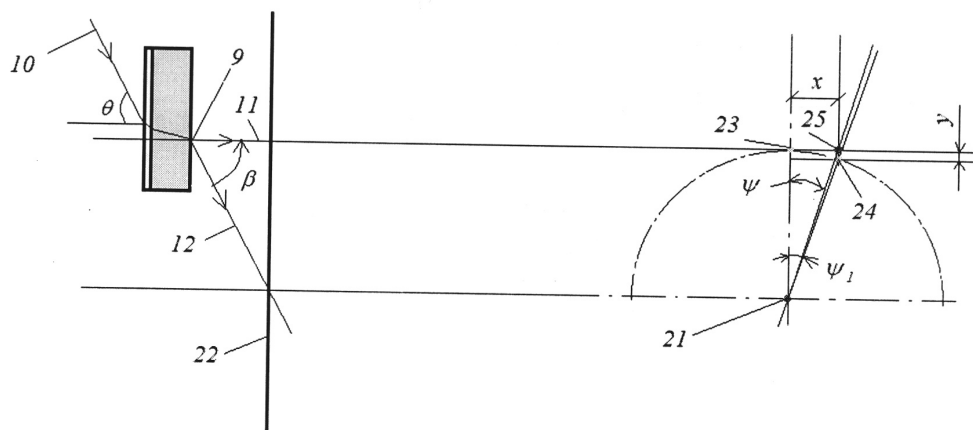
Фиг.1



Фиг.2

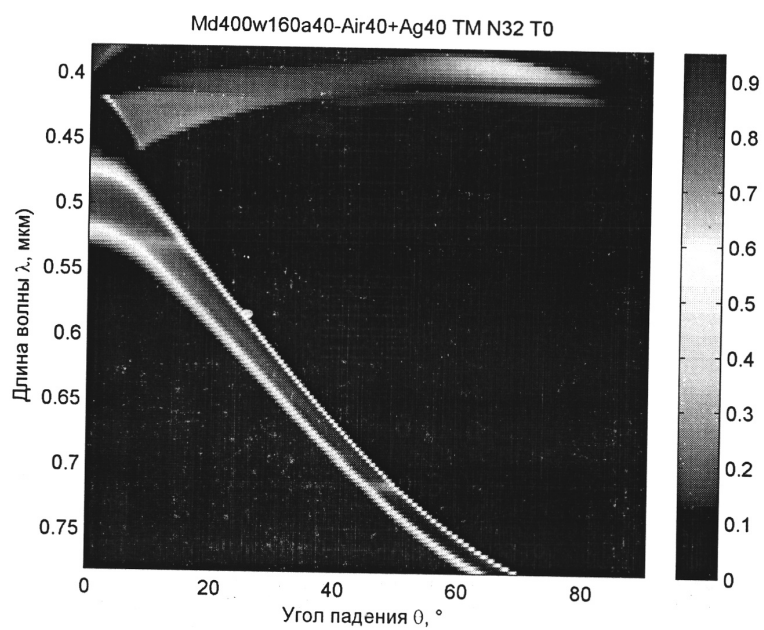


a



б

Фиг.3



Фиг.4