



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G01M 11/0242 (2006.01); G02B 5/32 (2006.01); G03H 1/08 (2006.01)

(21)(22) Заявка: 2017146786, 28.12.2017

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
28.12.2017

Дата регистрации:  
17.04.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 28.12.2017

(45) Опубликовано: 17.04.2018 Бюл. № 11

Адрес для переписки:

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

(72) Автор(ы):

Ковалев Михаил Сергеевич (RU),  
Красин Георгий Константинович (RU),  
Одиноква Сергей Борисович (RU),  
Соломашенко Артем Борисович (RU),  
Филиппов Иван Юрьевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

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

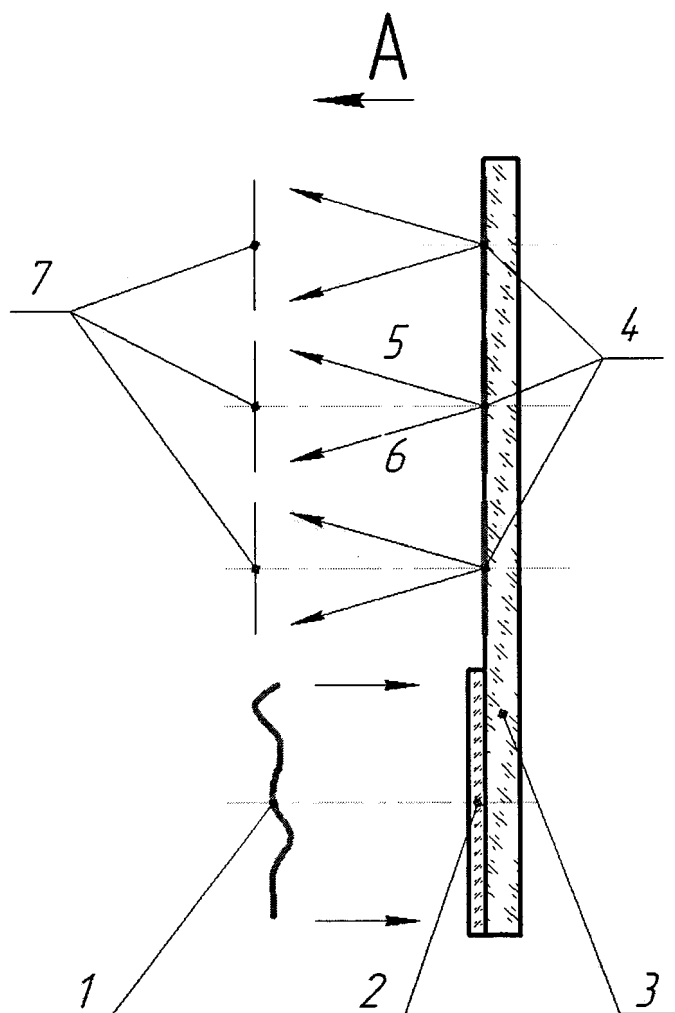
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: US 7268937 B1, 11.09.2007. CN  
103983366 A, 13.08.2014. US 6653613 B1,  
25.11.2003. US 20050122473 A1, 09.06.2005. JP  
2010061718 A, 18.03.2010.

## (54) ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА АНАЛИЗАТОРА ВОЛНОВОГО ПОЛЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДНОЙ ПЛАСТИНЫ С СИНТЕЗИРОВАННЫМИ ГОЛОГРАММАМИ

(57) Реферат:

Оптическая схема анализатора волнового поля оптического излучения для регистрации и анализа aberrаций плоского волнового фронта видимого диапазона включает компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ), «закодированные» aberrациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, последующее выделение указанных aberrаций дифрагирующих +1 и -1 порядками на КСГ волновых фронтов и регистрацию aberrаций в виде точек в соответствующих ячейках матричных фотодетекторов. Схема содержит световодную плоскопараллельную пластину и дифракционный оптический элемент, расположенный на ее

поверхности для ввода анализируемого оптического излучения в пластину с условием его полного внутреннего отражения внутри пластины. Матричные фотодетекторы расположены снаружи пластины с плоскостями приема параллельно и напротив соответствующих КСГ, записанных на поверхности пластины вдоль хода распространения оптического излучения внутри пластины. Технический результат - отсутствие максимума нулевого порядка дифракции в плоскости фотоприемников, потенциально лучшее распознавание aberrаций и сниженное энергопотребление схемы. 2 з.п. ф-лы, 3 ил.



Фиг.1

Область техники

Предлагаемое устройство относится к области измерительных оптических систем и может применяться в системах контроля качества и других областях оптической промышленности.

5 Уровень техники

Основная идея всех методов измерения аберраций/фазовых искажений оптического излучения заключается в осуществлении такого преобразования исходного волнового поля, в результате которого будет сформировано волновое поле, пространственное распределение интенсивности которого определяется фазовой функцией исходного поля.

10 На сегодняшний день для регистрации фазового фронта, как сечения волнового поля, чаще всего используются интерферометрические устройства, использующие когерентное сложение волн. Другой широко распространенный класс фазометрических устройств - датчики Гартмана, позволяющие измерять локальный наклон волнового фронта на основе принципов геометрической оптики.

15 При этом следует учесть, что большинство источников оптического излучения являются некогерентными или частично когерентными. Представляет интерес задача измерения параметров некогерентного волнового поля. Единственным из фазометрических методов, пригодным для работы с некогерентными волновыми полями, является метод Гартмана и его реализации в датчиках Шака-Гартмана и сканирующих датчиках Гартмана. Однако все эти устройства позволяют только измерять наклон фазового фронта оптического излучения. В общем случае такое измерение светового поля не является достаточно полным. Поэтому до сих пор актуальна задача разработки альтернативных методов и устройств измерения аберраций/ фазовых искажений световых волновых полей произвольного волнового поля видимого оптического диапазона.

Основная идея предлагаемой полезной модели - разработка реализации оптической схемы устройства для решения задачи анализа световых оптических полей, содержащих произвольные аберрации/фазовых искажений падающего волнового фронта, посредством их разложения по некоторому ортогональному базису. Предлагаемый вариант такого решения - это устройство, анализирующее с помощью фазовых синтезированных голограмм лазерные пучки светового поля на основе его разложения по базису ортогональных круговых полиномов Цернике (Zernike).

В ходе патентно-информационного поиска были отобраны по решаемой задаче (предназначению) несколько потенциальных аналогов предлагаемого устройства.

В патенте США US6911637 (B1) (МПК G01J 9/00; G02B 26/06; (IPC 1-7): G01J 1/20, опубликовано 2005-06-28) WAVEFRONT PHASE SENSORS USING OPTICALLY OR ELECTRICALLY CONTROLLED PHASE SPATIAL LIGHT MODULATORS представлена система для анализа и управления оптическим волновым фронтом на основе метода фазовой контрастной фурье-фильтрации с использованием оптического или электронно-управляемого фазового пространственного модулятора света. Использование таких модуляторов обеспечивает значительное улучшение производительности, включая значительно уменьшенную чувствительность к смещениям и наклонам измеряемого волнового фронта.

45 Недостатком устройства в данном изобретении является низкая дифракционная эффективность электронно-управляемых фазовых пространственных модуляторов света, что приводит к большим потерям энергии в оптической системе.

В китайском патенте CN 104111161 (B) (МПК G01M 11/02; G03F 7/20, опубликовано

2017-02-08) WAVE ABERRATION MEASURING DEVICE предлагается устройство измерения aberrаций волнового фронта проекционного фотолитографического устройства с использованием специальной тестовой маски, не содержащая нулевого порядка дифракции, увеличив тем самым интенсивность дифрагированного света в +1 и -1 порядках, что позволит уменьшить требования к фотоприемному устройству и повысит контраст интерференционных полос, тем самым повысив точность измерения волнового фронта.

Недостатком устройства в данном изобретении также является низкая энергетическая эффективность оптической системы из-за использования специальной метки, что приводит к большим потерям энергии в оптической системе, кроме того, данная система с указанной маской работает под одну длину волны оптического поля.

В российском патенте RU 2534435 (МПК G02B 27/44; G02B 5/18, опубликовано 2014-11-27) ЭТАЛОННЫЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ ОПТИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ

(ВАРИАНТЫ) используется при изготовлении высокоточных дифракционных оптических элементов (ДОЭ), таких как корректоры волнового фронта (аббераций) и дифракционные эталонные линзы для контроля качества оптических поверхностей интерферометрическим методом с использованием интерферометров Физо. ДОЭ состоит из клинообразной оптической пластины с поверхностным слоем, содержащим дифракционную структуру, выполненную в виде набора зон. ДОЭ является амплитудной и/или фазовой (рельефной) дифракционной структурой выполненной в поверхностном слое оптической подложки. Дифракционная структура ДОЭ рассчитывается с помощью компьютера (как компьютерно-синтезированная голограмма) и изготавливается методами прецизионной лазерной или электронно-лучевой литографии и реактивно-ионного травления. Недостатком ДОЭ-аналогов является отсутствие возможности формирования измерительного сферического и/или асферического волнового фронта на выходе и плоского опорного волнового фронта на отражение. Перед авторами ставилась задача разработать устройство - эталонный дифракционный оптический элемент (ДОЭ), способный формировать эталонный сферический и/или асферический измерительный волновой фронт на выходе и плоский опорный волновой фронт на отражение, а также большой световой диаметр измерительного волнового фронта, равный входному. Измерительный волновой фронт должен служить эталоном для проверки сферических и/или асферических оптических поверхностей интерферометрическим методом. Устройство должно иметь малые габариты и вес.

Недостатком устройства в данном изобретении является его относительная сложность и контроль качества оптических поверхностей интерферометрическим методом.

В китайском патенте CN 103983366 (B) (МПК G01J 9/02, опубликовано 2017-03-15) OBLIQUE INCIDENCE AND REFLECTION TYPE POINT DIFFRACTION PLATE AND INTERFERENCE MEASURING METHOD THEREOF задача возможно более близкого аналога к предлагаемой полезной модели аналогичная - измерение aberrаций/фазовых искажений падающего волнового фронта с использованием плоскопараллельной оптически прозрачной пластины, но в китайском патенте это делают с помощью наклонной пластины со сложными диэлектрическими, отражающими покрытиями и специфическим овальным отверстием для формирования интерференционной картины в плоскости фотодетектора (CCD-камеры), по которой и восстанавливается в специальной компьютерной программе волновой фронт и его фазовые искажения (абберации).

Недостатками устройства в данном патенте являются:

1. CCD-камера будет регистрировать не только интерференционную картину, но и

отражение от пластины, причем отраженный пучок может быть достаточно интенсивным, что будет мешать распознаванию интерференции на его фоне;

2. Из-за прохождения излучения через овальное (эллиптическое) отверстие контраст интерференционной картины будет минимальным;

5 3. Невысокое быстродействие работы устройства и метода из-за необходимости восстановления в специальной компьютерной программе волнового фронта с его фазовыми искажениями (абберациями).

Наиболее близким аналогом может быть признана оптическая схема голографического датчика волнового фронта (ДВФ), описанная в патенте США  
 10 US7268937 (МПК G02B 5/32, опубликовано 2007-09-11), включающая компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ), «закодированные» определенными абберациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, для последующего выделения указанных возможных аббераций дифрагирующих +1 и -1 порядками на КСГ волновых фронтов оптического излучения и регистрации наличия  
 15 этих аббераций в виде точек в соответствующих ячейках одного или нескольких регистрирующих матричных фотодетекторов.

Недостатком этого аналога является наличие в данной схеме регистрации аббераций нулевого порядка дифракции, что ухудшает распознавание аббераций из-за большой разницы по энергетике.

20 Раскрытие полезной модели

Техническим результатом предлагаемой полезной модели являются отсутствие максимума нулевого порядка дифракции в плоскости фотоприемников, потенциально лучшее распознавание аббераций и сниженное энергопотребление схемы.

Указанный технический результат достигается в разработанной оптической схеме  
 25 анализатора волнового поля оптического излучения для регистрации и анализа аббераций плоского волнового фронта видимого диапазона, включающей компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ), «закодированные» определенными абберациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, для последующего выделения указанных возможных аббераций дифрагирующих +1 и -1  
 30 порядками на КСГ волновых фронтов оптического излучения и регистрации наличия этих аббераций в виде точек в соответствующих ячейках одного или нескольких регистрирующих матричных фотодетекторов. При этом реализация оптической схемы выполнена на основе световодной плоскопараллельной пластины и дифракционного оптического элемента, расположенного на поверхности пластины и осуществляющего  
 35 функцию ввода анализируемого оптического излучения в пластину с условием его полного внутреннего отражения при распространении внутри пластины. Матричные фотодетекторы в виде матричных фотоприемников расположены снаружи пластины с плоскостями приема параллельно и напротив соответствующих КСГ, записанных на поверхности пластины вдоль хода распространения анализируемого оптического  
 40 излучения внутри указанной пластины.

Число разных типов КСГ соответствует числу анализируемых мод разложения оптического излучения по базису ортогональных круговых полиномов Цернике.

Все устройство схемы установлено в едином общем светозащищающем корпусе.

Перечень фигур

45 Фиг. 1 - конструктивная оптическая схема предлагаемого устройства;

Фиг. 2 - представления аббераций/фазовых искажений на фотоприемном устройстве;

Фиг. 3 - ход дифрагирующих на КСГ лучей волнового фронта порядков +1, -1 (абберации наружу пластины) и 0 (излучение внутри пластины).

### Осуществление полезной модели

Заявляемое решение основано на использовании усовершенствованной схемы анализатора с компьютерно-синтезированными голограммами, дифракционным оптическим элементом и фотоприемным устройством, формирующего голографическое изображение аберраций контролируемого волнового поля оптического излучения. Это происходит благодаря способности голограмм восстанавливать реальные волновые фронты, наблюдение которых не противоречит естественному наблюдению реальных объектов.

Согласно заявляемому устройству световодная пластина представляет собой оптическую среду для переноса светового излучения и выполнена в виде плоскопараллельной пластины, указанная пластина выполнена из оптически прозрачного материала с более высоким показателем преломления, чем окружающая среда, и предназначена для передачи оптического излучения на основе явления полного внутреннего отражения, кроме того в устройстве дифракционный оптический элемент предназначен для ввода в световод излучения, поступающего от источника когерентного или некогерентного излучения и без преобразования формы направляющего волновой фронт внутри световода с целью однородного освещения компьютерно-синтезированных голограмм с целью их восстановления на фотоприемнике(-ах).

На фиг. 1 и 2 обозначены номерами позиций следующие элементы предлагаемого устройства (прим.: общий светозащищающий корпус всего устройства на фигурах не показан): 1 - анализируемый волновой фронт видимого диапазона; 2 - дифракционный оптический элемент; 3 - световодная пластина; 4 - компьютерно-синтезированные голограммы; 5, 6 - восстановленные сходящиеся волны, которые характеризуют наличие той или иной аберрации волнового фронта; 7 - фотоприемник(-и); 8 - положение на фотоприемнике положительной (+1) аберрации; 9 - положение на фотоприемнике отрицательной (-1) аберрации.

На фиг. 1 представлена конструктивная оптическая схема устройства, позволяющего выявить наличие аберраций в исследуемом волновом фронте и оценить их величину. В этом устройстве исследуемый световой пучок направляют на дифракционный оптический элемент, с помощью которого этот пучок вводится в световодную пластину так, чтобы угол падения пучка на поверхность световодной пластины был больше угла полного внутреннего отражения. В результате исследуемый пучок света распространяется вдоль световодной пластины, отражаясь попеременно от двух ее поверхностей, как показано на фиг. 1. На участке поверхности пластины, на котором происходит отражение светового пучка, получена компьютерно-синтезированная голограмма, у которой в качестве опорной световой волны используется одна из мод Цернике, а в качестве объектной - сходящаяся в точку волна со сферическим волновым фронтом. Если эта мода присутствует в разложении амплитудно-фазового распределения исследуемой волны по полиномам Цернике, то в результате дифракции восстанавливается записанная на голограмму объектная волна, яркость которой пропорциональна удельному весу записанной на голограмму моды Цернике в разложении амплитудно-фазового распределения исследуемой волны. Наилучшее качество фокусировки восстановленной волны достигается, если амплитуда аберрации данного полинома Цернике в записанной голограмме равна этой же величине в разложении исследуемого волнового фронта.

На световодной пластине предварительно записан набор синтезированных голограмм, соответствующих разным типам (до 15 типов) аберраций: дефокусировки, комы, астигматизма, сферической аберрации и т.д. Отдельные типы аберраций влияют на качество изображения совершенно независимо друг от друга.

Компьютерно-синтезированная голограмма представляют собой распределение интенсивности от двух волн - опорной (искаженной -  $B(x,y)$ ) и предметной ( $O(x,y)$ ):

$$I(x,y) = |O(x,y) + B(x,y)|^2 = |B(x,y)|^2 + |O(x,y)|^2 + O(x,y)B^*(x,y) + O^*(x,y)B(x,y),$$

где  $O(x,y)$  - объектная волна,  $B(x,y)$  - опорная волна, знак \* означает комплексно-сопряженную величину,  $O(x,y) = |O(x,y)| \exp(i\varphi_0(x,y))$  - комплексная амплитуда объектной волны с вещественной амплитудой  $|O(x,y)|$  и фазой  $\varphi_0(x,y)$ ,  $B(x,y) = |B(x,y)| \exp(i\varphi_B(x,y))$  - означает аналогичным образом комплексную амплитуду опорной волны.

Объектная волна представляет собой излучение точечного источника, положение этого источника задается при кодировании. Таким образом при подсвете голограммы искаженной волной, восстановится изображение предмета - точки. По его положению можно судить о наличии аберрации в анализаторе волнового поля.

Исходная объектная волна (изображение точки на фотоприемном устройстве) восстанавливается путем освещения голограммы опорной волной  $B(x,y)$ . Для восстановления изображения умножим записанную голограмму, т.е. интенсивность интерференционной картины  $I(x,y)$  на значение поля опорной волны  $B(x,y)$ :

$$I(x,y)B(x,y) = |B(x,y)|^2 B(x,y) + |O(x,y)|^2 B(x,y) + O(x,y)|B(x,y)|^2 + B^2(x,y)O^*(x,y) \quad (1)$$

Первое слагаемое в правой части уравнения (1) пропорционально значению  $B(x,y)$  опорной волны, второе слагаемое описывает пространственно изменяющееся «облако» вокруг первого порядка дифракции. Вместе они составляют нулевой порядок дифракции или фоновую составляющую. Третье слагаемое с точностью до известного множителя  $|B(x,y)|^2$  представляет собой точную копию исходного поля  $O(x,y)$  и поэтому называется мнимым изображением (или просто изображением) объекта. Четвертое слагаемое относится к еще одному изображению объекта, изображению-двойнику, которое называется действительным изображением. Итоговая КСГ будет представлять собой сумму рассчитанных единичных голограмм:

$$КСГ(x,y) = \sum_{n=1}^N КСГ_n$$

В результате работы единичных в составе КСГ, записанных на световодной пластине, в фотоприемнике 7, как показано на фиг. 2, регистрируется в ячейках фотоприемника в виде точек геометрическое положение либо положительной (+1) аберрации 8, либо отрицательной (-1) аберрации 9.

Чтобы повысить точность и чувствительность этой регистрации, используется формирование голографического мультиплекса из пары интерферограмм, на одной из которых сложены пучок с искажением амплитуды  $A_1=A$  и сферический пучок, сходящийся в заданной точке М, а на второй - аналогичный пучок с искажением амплитуды  $A_2=-A$  и сферический пучок, сходящийся в точке N, отстоящей от точки М на некоторое расстояние в плоскости, перпендикулярной направлению распространения пучков.

Технология получения синтезированных голограмм может быть основана на использовании пространственных модуляторов света (ПМС) LC 2012 или PLUTO-2, у которых соответственно размер ячейки 36 мкм и 8 мкм, что в свою очередь и определяет размер голограммы. А в свою очередь рассчитанные голограммы определяют размер

световодной пластины и дифракционного оптического элемента, т.е.:

- при погрешности измерения волнового фронта (ВФ)  $\lambda$  и  $0,1\lambda$  целесообразно использовать наложенные/мультиплексные голограммы (до 15), т.е. размеры световодной пластины будет 10 мм (определяется расчетом, т.е. 9,2 мм) на 20 мм (к 9,2 мм добавляем 10 мм для установки дифракционного оптического элементы);

- при погрешности измерения ВФ  $0,01\lambda$ , целесообразно использовать наложенные голограммы (до 4), чтобы не снижать дифракционную эффективность, т.е. необходимо использование 4 наложенных голограмм, т.е.  $4 \times 6,1 = 24,5$  мм. Т.е. размеры световодной пластины будут 35 мм;

- в соответствии с вышеуказанным положение фотоприемного устройства будет определяться следующим:

Разрешение технологии, мкм	Границы видимого диапазона, мкм	Минимальное расстояние от плоскости световодной пластины до ФПУ, мм
<b>36</b>	<b>0,4</b>	<b>10</b>
<b>1,5</b>	<b>0,7</b>	

Расстояние в 10 мм обеспечит устойчивое считывание положения изображения aberrаций в плоскости ФПУ.

Технология получения синтезированных голограмм может быть основана на лазерной литографии, где разрешение определяется 1,5 мкм, т.е. достаточным будет использование одиночных голограмм (15 шт. ), не наложенных, чтобы обеспечить минимальные массогабаритные параметры анализатора. Размер области с синтезированными голограммами  $1,2 \text{ мм} \times 15 = 18 \text{ мм} + 10 \text{ мм}$  (размер ДОО) = 28 мм.

Экспериментальный образец устройства имеет также следующие параметры:

1) спектральный диапазон - от 400 до 700 нм;

2) погрешность измерений ВФ согласно таблице и это в основном и определяет габариты системы, а именно:

Погрешность измерений ВФ	Размер голограммы			
	в пикселях (определяется расчетом)	в мм (определяется технологией ПМС)		в мм (определяется технологией лазерной литографии)
		LC 2012, 36 мкм	PLUTO-2, 8 мкм	1,5 мкм
$\lambda$	256×256	9,2	2	0,4
$0,1\lambda$				
$0,01\lambda$	768×768	27,6	6,1	1,2

Данная полезная модель разработана в рамках выполнения темы «Разработка технологии и создание голографического микродатчика волнового фронта с функцией коррекции фазовых искажений в системах фотоники» по соглашению №14.577.21.0258 между МГТУ им. Н.Э. Баумана и Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

#### (57) Формула полезной модели

1. Оптическая схема анализатора волнового поля оптического излучения для регистрации и анализа aberrаций плоского волнового фронта видимого диапазона, включающая компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ), «закодированные» определенными aberrациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, для последующего выделения указанных возможных aberrаций

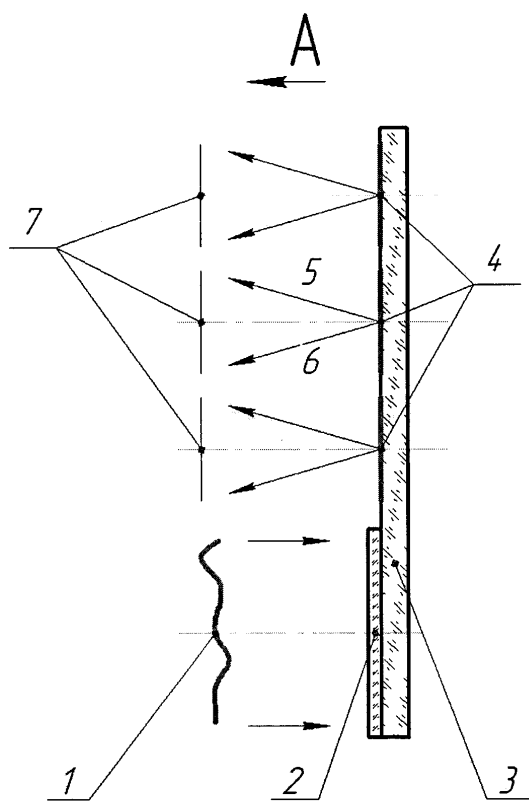


дифрагирующих +1 и -1 порядками на КСГ волновых фронтов оптического излучения и регистрации наличия этих аберраций в виде точек в соответствующих ячейках одного или нескольких регистрирующих матричных фотодетекторов, отличающаяся тем, что реализация оптической схемы выполнена на основе световодной плоскопараллельной пластины и дифракционного оптического элемента, расположенного на поверхности пластины и осуществляющего функцию ввода анализируемого оптического излучения в пластину с условием его полного внутреннего отражения при распространении внутри пластины, матричные фотодетекторы в виде матричных фотоприемников расположены снаружи пластины с плоскостями приема параллельно и напротив соответствующих КСГ, записанных на поверхности пластины вдоль хода распространения анализируемого оптического излучения внутри указанной пластины.

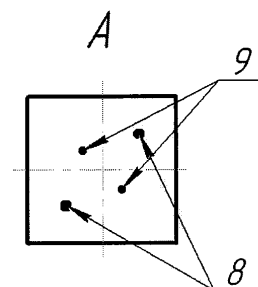
2. Оптическая схема по п. 1, отличающаяся тем, что число разных типов КСГ соответствует числу анализируемых мод разложения оптического излучения по базису ортогональных круговых полиномов Цернике.

3. Оптическая схема по п. 1, отличающаяся тем, что все устройство схемы установлено в едином общем светозащищающем корпусе.

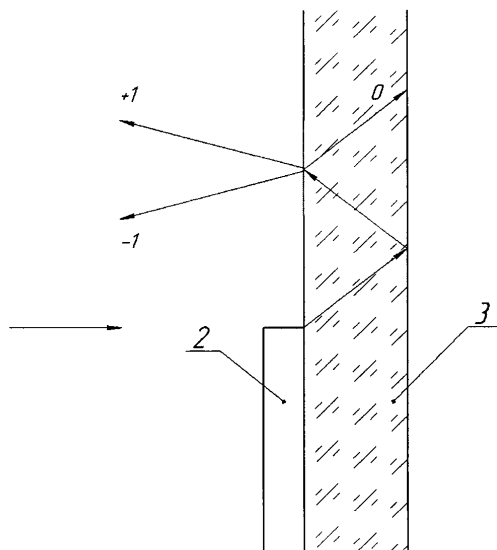
1



Фиг.1



Фиг.2



Фиг.3