



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

G03H 2001/045 (2018.08)

(21)(22) Заявка: 2018128041, 31.07.2018

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
31.07.2018

Дата регистрации:  
12.11.2018

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 31.07.2018

(45) Опубликовано: 12.11.2018 Бюл. № 32

Адрес для переписки:

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

(72) Автор(ы):

Злоказов Евгений Юрьевич (RU),  
Ковалев Михаил Сергеевич (RU),  
Красин Георгий Константинович (RU),  
Одиноква Сергей Борисович (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)

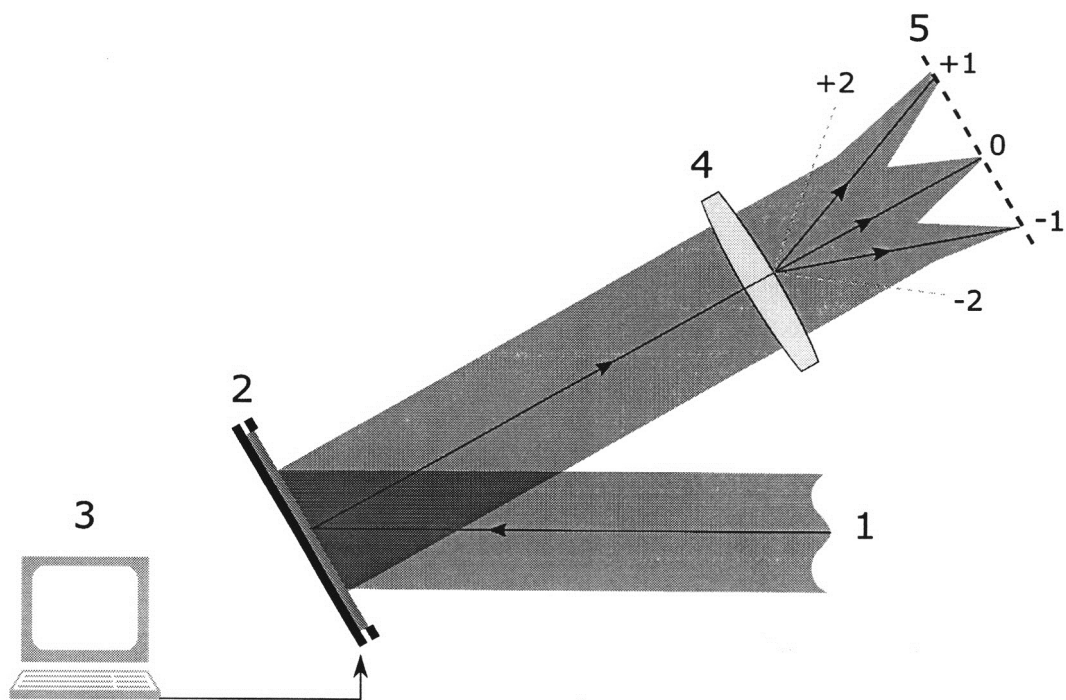
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2155982 C2, 10.09.2000. RU  
2541732 C2, 20.02.2015. EP 2048660 A1,  
15.04.2009. US 20110267663 A1, 03.11.2011.

## (54) ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ВОЛНОВОГО ФРОНТА С УПРАВЛЯЕМЫМ ФАЗОВЫМ МОДУЛЯТОРОМ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области оптической техники. Оптическая схема голографического датчика волнового фронта содержит модулятор заранее рассчитанных компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ), «закодированных» абберациями волнового фронта разных типов на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, с возможностью последующего выделения указанных аббераций, дифрагирующих ненулевыми порядками на КСГ волновых фронтов и регистрации этих аббераций в соответствующих ячейках матричного фотодетектора, соответствующих искажениям исследуемого абберационного волнового фронта.

Модулятор является пространственным модулятором отражения света фазового типа, управляемым компьютером с выводом на модулятор требуемых, заранее рассчитанных для разного типа аббераций КСГ, далее по ходу отраженных лучей модулированного излучения для детектирования аббераций установлен Фурье-объектив, после которого в задней фокальной плоскости помещен указанный матричный фотодетектор. Технический результат заключается в сочетании расширения функциональных возможностей анализатора волновых полей с произвольными абберационными волновыми фронтами оптических излучений. 1 ил.



Фиг.1

RU 184828 U1

RU 184828 U1

## Область техники

Предлагаемое устройство относится к оптической технике и может быть использовано для определения формы и фазовых искажений волновых полей с произвольными абберрационными волновыми фронтами принимаемого оптического излучения видимого

5 диапазона, например, в устройствах контроля качества оптических систем.

## Уровень техники

Известна авторская оптическая схема анализатора волнового поля оптического излучения на основе световодной пластины с синтезированными голограммами (патент РФ RU178706, опубликовано: 17.04.2018 Бюл. №11). Эта схема для регистрации и анализа

10 аббераций плоского волнового фронта видимого диапазона включает компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ), «закодированные» абберациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, последующее выделение указанных аббераций дифрагирующих +1 и -1 порядками на КСГ волновых фронтов и регистрацию аббераций в виде точек в соответствующих ячейках матричных

15 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,

20 записанных на поверхности световодной пластины вдоль хода распространения оптического излучения внутри пластины. Световодная пластина нужна для исключения 0-го порядка дифракции для лучшего распознавания аббераций волнового фронта и снижения энергопотребления.

Ограничением данной оптической схемы является использование более сложной в

25 обработке амплитудной, а не фазовой модуляции, необходимость световодной пластины и сложность использования (мультиплицирования) в устройстве требуемого множества КСГ, «закодированных» абберациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике. Также есть эффект падения дифракционной эффективности из-за мультиплицирования КСГ в одном месте световодной пластины.

## Раскрытие полезной модели

Техническим результатом предлагаемой полезной модели является сочетание расширения функциональных возможностей анализатора волновых полей с произвольными абберрационными волновыми фронтами оптических излучений, с использованием фазового отражающего (а не пропускающего, как в аналоге)

35 модулятора с фазовыми КСГ, закодированными абберациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, с одновременным упрощением схемы за счет исключения световодной пластины и дифракционных оптических элементов (ДОО) из состава устройства. Анализируемое излучение сразу попадает на фазовый модулятор и далее после преобразования функциональным Фурье-объективом регистрируются абберации (фазовые искажения) приемником.

40

Для достижения технического результата предлагается оптическая схема топографического датчика волнового фронта с управляемым фазовым модулятором, содержащая модулятор заранее рассчитанных компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ), «закодированных» абберациями волнового фронта разных типов

45 на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, с возможностью последующего выделения указанных аббераций, дифрагирующих ненулевыми порядками на КСГ волновых фронтов и регистрации этих аббераций в соответствующих ячейках матричного фотодетектора, соответствующих искажениям исследуемого абберационного

волнового фронта. При этом модулятор является пространственным модулятором отражения света фазового типа, управляемым встроенным в схему или внешним компьютером с выводом на модулятор заранее рассчитанных необходимых КСГ. Далее по ходу отраженных лучей модулированного излучения для детектирования aberrаций

установлен функциональный фурье-объектив, после которого в задней фокальной плоскости Фурье-объектива помещен матричный фотодетектор (приемник излучения). Новизна предлагаемой полезной модели заключается в сочетании управляемого фазового (а не амплитудного) модулятора с фазовыми КСГ с Цернике. Под управлением понимается вывод определенного распределения (голограммы) на модулятор из памяти компьютера. При падении и отражении анализируемого излучения от фазового модулятора с КСГ происходит детектирование aberrаций в функциональном Фурье-объективе, который установлен после модулятора на произвольном расстоянии и осуществляет Фурье-преобразование модулированного излучения, и далее в задней фокальной плоскости Фурье-объектива помещен матричный приемник для регистрации обнаруженных aberrаций.

Компьютерный синтез голограмм основан на математическом представлении фундаментальных принципов оптической голографии. Синтез начал развиваться одновременно с вычислительной техникой и такими программными инструментами, как быстрое преобразование Фурье (БПФ). В настоящее время персональный компьютер и вычислительный инструмент, установленные на нем, позволяют вычислить КСГ для конкретной задачи. Широко распространено мнение, что преимущество метода компьютерного синтеза заключается в том, что он устраняет необходимость фотохимической записи голограмм. Кроме того, метод позволяет восстановить его численно в реальном времени; улучшить качество восстановленного изображения с помощью многих методов цифровой обработки изображений; и использовать эти динамически изменяющиеся КСГ в оптических датчиках и коррекционных системах оптических средств. Возможность использования функции распределения фаз, выражаемой полиномиальным представлением Цернике, как виртуальным объектом, позволяет определить интерференционное взаимодействие волновых фронтов aberrации и плоских волн любой сложности. При работе с КСГ, записанными на светочувствительном материале, некоторые ограничения появляются из-за небольшого динамического диапазона. Для увеличения диапазона различимых aberrаций требуется введение такой динамически меняющейся прозрачности, например, как пространственного модулятора света на ЖК-дисплее.

Предлагаемый вариант - это устройство, анализирующее с помощью фазовых КСГ лазерные пучки светового поля на основе его разложения по базису ортогональных круговых полиномов Цернике (Zernike) на основе управляемого фазового модулятора света с цифровым (компьютерным) управлением и Фурье-объектива.

Одним из преимуществ предлагаемой схемы является ее простая реализация. Голограммы рассчитываются один раз для всего набора aberrаций и хранятся в памяти персонального компьютера. В дальнейшем для вывода голограмм на пространственный модулятор света. Эти голограммы не надо записывать на фоточувствительный материал, поэтому процесс изготовления сильно упрощается. Также не надо бороться за увеличение дифракционной эффективности мультиплексированных голограмм, так как голограммы выводятся последовательно по одной голограмме в один момент времени с частотой 60 Гц. Еще одним преимуществом является то, что в отличие от аналога, где можно было только обнаружить наличие той или иной aberrации в анализируемом излучении, в данной реализации оптической схемы можно измерить значение каждой из aberrаций,

присутствующих в анализируемом излучении с заданной погрешностью. Для каждой из аберраций рассчитывается определенное количество КСГ, отличающихся друг от друга амплитудой заданной аберрации. Такое разбиение позволяет обеспечить необходимую погрешность определения аберраций в анализируемом излучении.

5 На фиг. 1 представлена предлагаемая оптическая схема.

Осуществление полезной модели

На фиг. 1 номерами позиций обозначены следующие элементы: 1 - анализируемый волновой фронт, 2 - пространственный модулятор света фазового типа с фазовыми КСГ, закодированными аберрациями волнового фронта на основе мод ортогональных  
10 круговых полиномов Цернике, 3 - компьютер, управляющий пространственным модулятором света фазового типа и выходящий на него фазовые КСГ, 4 - функциональный Фурье-объектив, 5 - матричный фотоприемник, на котором формируются порядки дифракции (+1, -1, +2, -2 и т.д.), соответствующие аберрациям волнового фронта 1.

15 Аберрационный волновой фронт попадает на пространственный модулятор света фазового типа 2, куда выводятся с встроенного в схему или внешнего компьютера 3 заранее рассчитанные КСГ Фурье, как результат интерференции предметной волны, которой является сходящаяся в точку сферическая волна, и опорной волны, которая представляет собой волну, содержащую в себе заданный полином Цернике. Далее  
20 модулированный волновой фронт отражается от модулятора 2 и попадает на функциональный объектив 4, который выполняет Фурье преобразование. На матричном фотоприемнике 5 можно увидеть дифракционную картину с разными порядками дифракции. Плоская волна без аберраций имеет узкую фокусирующую точку с поперечным сечением, обусловленную дифракцией на апертуре пространственного  
25 модулятора света. Дифракционные порядки, вызванные дифракцией на структуре модулятора, выходят за пределы поля изображения. Добавление аберрации приводит к размытию точки фокусировки и пересечения.

В экспериментальной установке с опытным устройством полезной модели был использован He-Ne-лазер с длиной волны 633 нм в качестве источника оптического  
30 излучения. Телескопическая система состояла из объектива с микроскопом 20хмасштабирования, просвета 20 мкм и объектива с фокусным расстоянием 250 мм. Фазовый модулятор PLUTO VIS (420-650 нм) использовался для отображения КСГ. Размер фазового модулятора был 15,36×8,64 мм. Объектив Фурье имел фокусное расстояние 1000 мм.

35 Определение аберраций предназначено для выполнения в соответствии с широко известным принципом «грубо-точной» шкалы, в котором предварительный быстрый анализ определяет тип аберрации, а затем их размер анализируется с точным регулированием. В первую очередь было необходимо определить порядок аберрации, поэтому использовали КСГ с большим увеличением значения аберрации (большой  
40 погрешностью определения фазовых искажений, которая составляет  $1\lambda$ ), для этого использовались КСГ с низким разрешением 256×256. Их размер составлял 9.2 мм, при использовании модулятора (LC 2012, 36 мкм) и 2 мм при использовании модулятора (PLUTO-2, 8 мкм), диапазон измерения от 0 до  $10\lambda$ , а само измерение занимало 0,16 с. После предварительного определения данной аберрации в системе на модулятор из  
45 памяти персонального компьютера начинали поступать КСГ размером 512×512. Их размеры составляли 18.4 мм и 4 мм соответственно. Этот этап также занимал 0,16 с. Погрешность определения в данном случае составляла  $0,1\lambda$ . Далее шло определение аберраций с необходимой погрешностью, для этого выводились КСГ 768×768, имевшие

размеры 27,6 мм и 6,1 мм соответственно. Этот этап также занимал 0,16 с. Таким образом, сканирование анализируемого оптического излучения занимало максимум 0,48 с, но стоит отметить, что таким время будет только в том случае, если не удастся зарегистрировать точку дифракционного качества на фотоприемнике (случай отсутствия  
 5 именно этой аберрации в оптическом излучении). В случае детектирования точки дифракционного качества в начале или в середине любого из этапов можно автоматически переходить к следующему этапу, тем самым сокращая время общего измерения. Таким образом, теоретически максимальное время измерения одной из аберраций составляло 0,5 с, на практике же это время было меньше и составляло около  
 10 0,25 с.

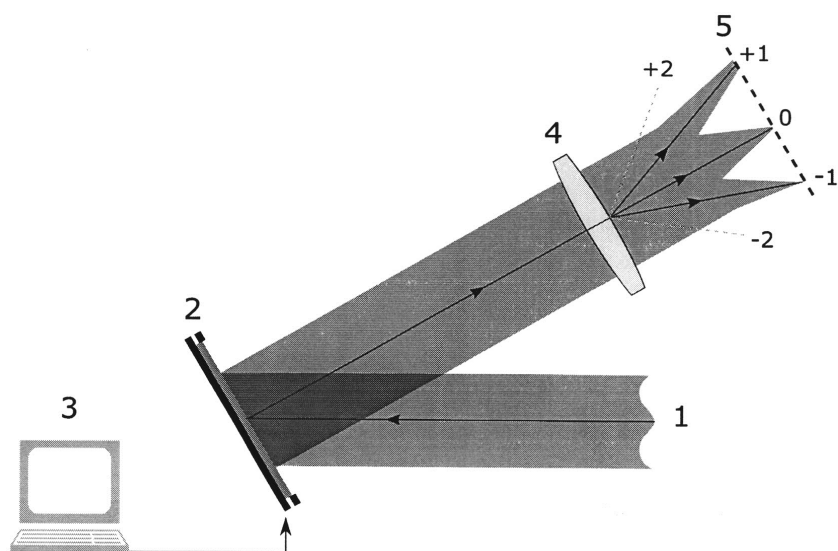
Все устройство схемы, как и в прототипе, было установлено в едином общем светозащищающем корпусе.

Данная полезная модель разработана в рамках выполнения темы «Разработка технологии и создание топографического микродатчика волнового фронта с функцией  
 15 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

Оптическая схема голографического датчика волнового фронта, содержащая модулятор заранее рассчитанных компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ), «закодированных» аберрациями волнового фронта разных типов на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, с возможностью последующего  
 25 выделения указанных аберраций, дифрагирующих ненулевыми порядками на КСГ волновых фронтов и регистрации этих аберраций в соответствующих ячейках матричного фотодетектора, соответствующих искажениям исследуемого аберрационного волнового фронта, отличающаяся тем, что модулятор является пространственным модулятором отражения света фазового типа, управляемым компьютером с выводом  
 30 на модулятор требуемых, заранее рассчитанных для разного типа аберраций КСГ, далее по ходу отраженных лучей модулированного излучения для детектирования аберраций установлен Фурье-объектив, после которого в задней фокальной плоскости помещен указанный матричный фотодетектор.

1



Фиг.1