



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: 2018128042, 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):

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)

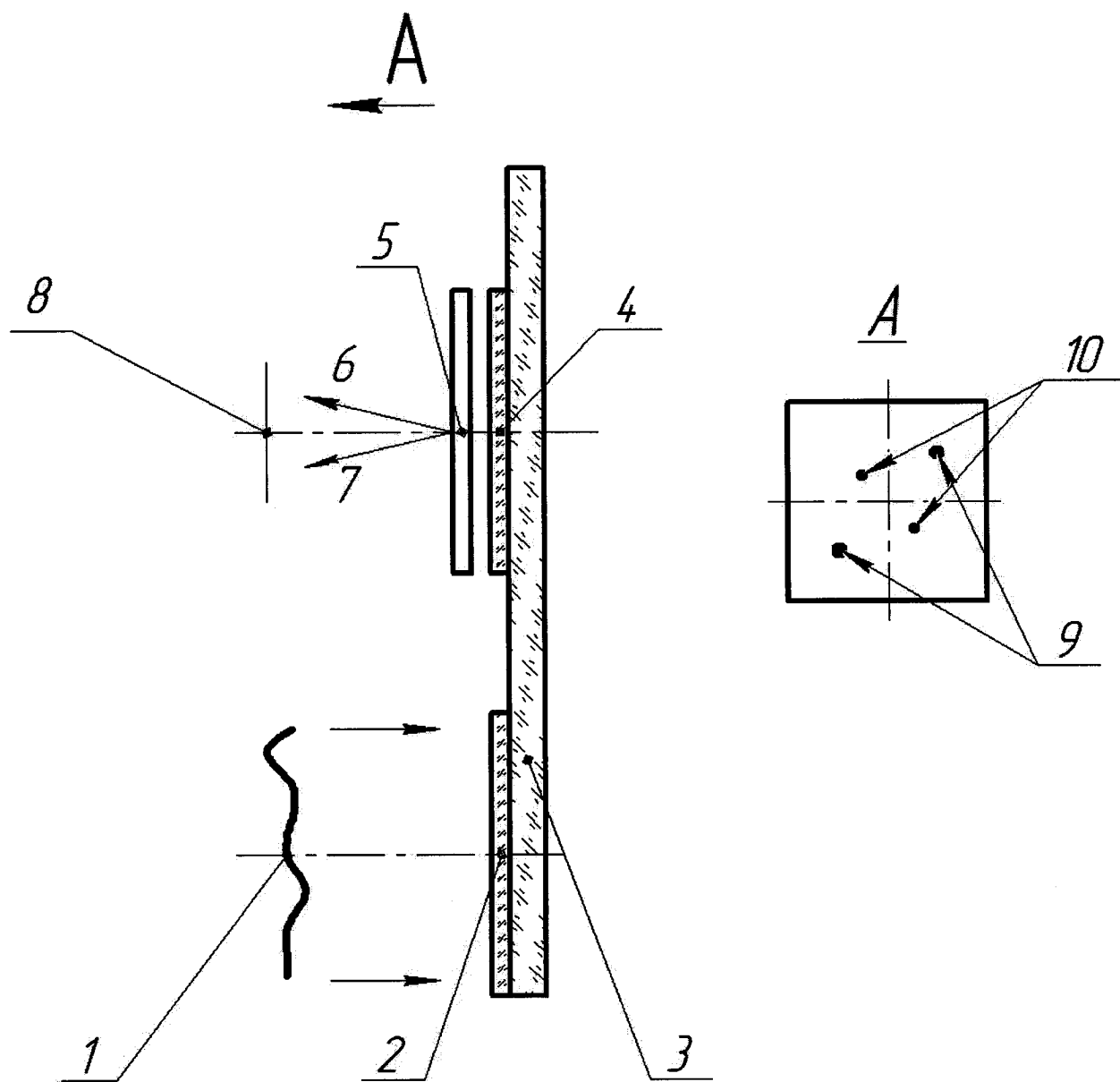
(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 178706 U1, 17.04.2018. WO  
2000075733 A1, 14.12.2000. US 2014160543 A1,  
12.06.2014. RU 2425337 C2, 27.07.2011.

(54) ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ИЗМЕРИТЕЛЯ ФАЗОВЫХ ИСКАЖЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПОЛЕЙ НА ОСНОВЕ СВЕТОВОДНОЙ ПЛАСТИНЫ И ПРОСТРАНСТВЕННОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области оптического приборостроения и касается оптической схемы анализатора волнового поля оптического излучения. Анализатор включает в себя световодную плоскопараллельную пластину, расположенные на поверхности пластины дифракционные оптические элементы, предназначенные для ввода и вывода оптического излучения, пространственный амплитудный модулятор света и матричные фотоприемники. Амплитудный модулятор света установлен между дифракционным оптическим элементом, осуществляющим вывод излучения из пластины, и матричными фотоприемниками. Устройство выполнено с возможностью динамического

вывода из управляющего компьютера требуемых компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ) на пространственный амплитудный модулятор света. КСГ «закодированы» определенными aberrациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике для выделения указанных возможных aberrаций дифрагирующих +1 и -1 порядками на КСГ волновых фронтов оптического излучения и регистрации наличия этих aberrаций в виде точек в соответствующих ячейках матричных фотоприемников. Технический результат заключается в повышении дифракционной эффективности устройства. 1 ил.



Фиг.1

## Область техники

Предлагаемое устройство относится к оптической технике и может быть использовано для определения формы и фазовых искажений волновых полей принимаемого оптического излучения видимого диапазона, например, в устройствах контроля качества оптических систем.

## Уровень техники

Предлагаемое устройство анализирует с помощью фазовых компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ) лазерные пучки светового поля на основе его разложения по базису ортогональных круговых полиномов Цернике при наличии плоскопараллельной пластины с дифракционными оптическими элементами (ДОЭ) в устройстве для нивелирования нулевого порядка дифракции в промодулированном световом поле.

В аналоге в китайском патенте CN 103983366 (B) (опубликовано 2017-03-15) OBLIQUE INCIDENCE AND REFLECTION TYPE POINT DIFFRACTION PLATE AND INTERFERENCE MEASURING METHOD THEREOF задача - измерение аберраций/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 (аберрации).

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

Аналогом предлагаемого устройства также является оптическая схема голографического датчика волнового фронта (ДВФ), описанная в патенте США US7268937 (опубликовано 2007-09-11), включающая компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ), «закодированные» определенными аберрациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, для последующего выделения указанных возможных аберраций 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.

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

Прототипом (ближайшим аналогом) предлагаемого решения является авторская оптическая схема анализатора волнового поля оптического излучения (патент РФ RU 178706 (опубликовано: 17.04.2018 Бюл. №11)). Анализатор предназначен для регистрации и анализа аберраций плоского волнового фронта видимого диапазона включает компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ), «закодированные» определенными аберрациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, для последующего выделения указанных возможных аберраций

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

В прототипе была заявлена погрешность измерений волнового фронта вплоть до  $0.01\lambda$ , но даже для того, чтобы достичь погрешности измерений в  $0.1\lambda$ , по расчетам, необходимо нанести на световодную пластину минимум по 10 голограмм на каждую из аберраций, которые хотелось бы обнаружить в оптическом излучении. Таким образом необходимо нанести на пластину 160 одиночных голограмм, и даже если мультиплексировать их по 16 голограмм в одно место, это сильно понизит дифракционную эффективность каждой из них, хотя и позволит достичь погрешности измерения аберраций ВФ в  $0.1\lambda$ . Также следствием данного действия станет увеличение конечных размеров световодной пластины в 3 раза в сравнении с заявленными в патенте. Для достижения погрешности измерения в  $0.01\lambda$  необходимо нанести еще большее количество голограмм на одну пластину - 800 голограмм. В этом случае корректному функционированию устройства будут препятствовать низкая дифракционная эффективность каждой из голограмм или размер итоговой световодной пластины. В первом случае дифракционная эффективность каждой из отдельных голограмм будет падать. Ведь для сохранения габаритов необходимо мультиплицировать 50 голограмм в одну точку. Во втором случае потери при распространении анализируемого излучения внутри пластины, и дифракция на голограммах будут уменьшать энергию, содержащуюся в этом излучении, поэтому некоторые голограммы могут быть даже не освещены, что может привести к сильным потерям при измерении аберраций ВФ.

#### Раскрытие полезной модели

Для решения данных проблем с достижением соответствующего технического результата повышения дифракционной эффективности КСГ и, как следствие, улучшения качества работы всего устройства схемы предлагается новый усовершенствованный вариант реализации оптической схемы без необходимости в записи КСГ на световодную пластину, так как все голограммы заранее рассчитываются во внешнем управляющем компьютере и затем в любое время могут динамически выводиться из него на пространственный модулятор света. Так как все КСГ могут выводиться в разное время на один модулятор, то не будет наблюдаться падения дифракционной эффективности из-за их мультиплицирования, как это было в прототипной схеме. Также проблема нехватки энергии отпадает сама собой из-за малых габаритов световодной пластины.

Для достижения технического результата предлагается оптическая схема анализатора волнового поля оптического излучения для регистрации и анализа аберраций плоского волнового фронта видимого диапазона, включающая компьютерно-синтезированные голограммы (КСГ), «закодированные» определенными аберрациями волнового фронта на основе мод ортогональных круговых полиномов Цернике, для последующего

выделения указанных возможных аберраций 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 фотоприемников. Причем 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 фотоприемники расположены снаружи пластины с плоскостями приема параллельно и напротив соответствующих КСГ вдоль хода распространения анализируемого оптического излучения внутри указанной пластины. При этом устройство дополнительно содержит пространственный амплитудный модулятор света, установленный между дифракционным оптическим элементом, осуществляющим вывод излучения из пластины, и указанными матричными фотоприемниками, с возможностью динамического вывода из управляющего компьютера требуемых КСГ на указанный пространственный амплитудный модулятор света.

Таким образом устройство состоит из плоскопараллельной световодной пластины, с нанесенными на нее двумя ДОЭ, один из которых осуществляет ввод анализируемого излучения в пластину под углом Брэгга. Второй ДОЭ осуществляет вывод анализируемого оптического излучения из пластины. Для регистрации и анализа аберраций волнового фронта в устройстве используются пространственный амплитудный модулятор света, на который динамически выводятся КСГ с частотой 60 Гц (т.е. обнаружение одной аберрации займет 0,25 сек). Причем, как и в прототипе, в каждой из таких КСГ закодирована определенная аберрация волнового фронта на основе мод ортогональных полиномов Цернике. Вывод этих КСГ осуществляется на пространственном модуляторе света, расположенном на расстоянии 3-5 мм напротив второго дифракционного оптического элемента, осуществляющего вывод излучения из пластины, по следующему алгоритму: сначала выводятся КСГ с большим шагом значения аберрации:  $1\lambda$ ,  $2\lambda$ ,  $3\lambda$  и т.д. После грубого определения величины аберрации выводятся КСГ с меньшим шагом для точного измерения величины аберрации с заданной погрешностью. Матричные фотоприемники расположены параллельно и напротив пространственного модулятора света и регистрируют дифрагирующие на КСГ +1 и -1 порядки волнового фронта оптического излучения.

На фиг. 1 представлена предлагаемая оптическая схема.

Осуществление полезной модели

На фиг. 1 номерами позиций обозначены следующие элементы: 1 - анализируемый волновой фронт, 2 и 4 - дифракционные оптические элементы, осуществляющие ввод и вывод излучения соответственно, 3 - волновод, 5 - пространственный модулятор света, 6 и 7 - +/- порядки дифракции, соответствующие своим значениям аберраций, 8 - матричный фотоприемник излучения, 9 - положение на фотоприемнике положительной (+1) аберрации; 10 - положение на фотоприемнике отрицательной (-1) аберрации.

Одним из преимуществ данной схемы является ее простая реализация. Достаточно изготовить световодную пластину и нанести на нее два дифракционных оптических элемента, остальные элементы схемы не требуют изготовления. Голограммы рассчитываются один раз для всего набора аберраций и в дальнейшем используются для вывода 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 определенному алгоритму по одной голограмме в один момент времени с частотой 60 Гц. Дифракционная эффективность определяется разрешением пространственного модулятора света, а также параметрами алгоритма расчета КСГ.

5 Еще одним преимуществом является то, что в отличие от прототипа, где можно было обнаружить только наличие той или иной аберрации в анализируемом излучении, в данной реализации оптической схемы можно уже измерить ту или иную аберрацию с необходимой погрешностью. Для этого для каждой из аберраций рассчитывается определенное количество КСГ, отличающихся друг от друга амплитудой заданной  
10 аберрации. Такое разбиение позволяет обеспечить необходимую погрешность определения аберраций в анализируемом излучении.

Как и в прототипе, в данной схеме реализовано отсутствие максимума нулевого порядка. Отличие лишь в том, что в прототипе это реализовано на принципах дифракции на КСГ. Здесь же функцию КСГ выполняет ДОЭ, который выводит излучение из  
15 пластины без максимума нулевого порядка. Излучение, распространяющееся в световодной пластине под углом Брэгга, дифрагирует на ДОЭ таким образом, что выходит перпендикулярно световодной пластине.

В первую очередь необходимо определить порядок аберрации, поэтому будут использоваться голограммы с большим увеличением амплитуды аберрации (большой  
20 погрешностью определения фазовых искажений, которая составляет  $1\lambda$ ), для этого будут использоваться голограммы с низким разрешением  $256 \times 256$ . Их размер будет составлять 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 займет 0,16 с. После предварительного определения аберраций в системе на  
25 модулятор начинают поступать голограммы размером  $512 \times 512$ . Их размеры составляет 18.4 мм и 4 мм соответственно. Этот этап также занимает 0,16 с. Погрешность определения в данном случае составляет  $0,1\lambda$ . Далее идет определение аберраций с необходимой погрешностью, для этого выводятся голограммы  $768 \times 768$ , имеющие размеры 27,6 мм и 6,1 мм соответственно. Этот этап также занимает 0,16 с. Сканирование  
30 анализируемого оптического излучения займет максимум 0.5 с, но стоит отметить, что таким время будет только в том случае, если не удастся зарегистрировать точку дифракционного качества на фотоприемнике (случай отсутствия 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  
35 этапу, тем самым сокращая время общего измерения. Таким образом теоретически максимальное время измерения одной из аберраций составляет 0.5 с, на практике же это время будет меньше и может составлять 0.25 с.

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

40 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  
45 развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы».

#### (57) Формула полезной модели

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  
5 дифрагирующих +1 и -1 порядками на КСГ волновых фронтов оптического излучения и регистрации наличия этих aberrаций в виде точек в соответствующих ячейках одного или нескольких регистрирующих матричных фотоприемников, причем реализация оптической схемы выполнена на основе световодной плоскопараллельной пластины и дифракционного оптического элемента, расположенного на поверхности пластины  
10 и осуществляющего функцию ввода анализируемого оптического излучения в пластину с условием его полного внутреннего отражения при распространении внутри пластины, матричные фотоприемники расположены снаружи пластины с плоскостями приема параллельно и напротив соответствующих КСГ вдоль хода распространения анализируемого оптического излучения внутри указанной пластины, отличающаяся  
15 тем, что дополнительно содержит пространственный амплитудный модулятор света, установленный между дифракционным оптическим элементом, осуществляющим вывод излучения из пластины, и указанными матричными фотоприемниками, с возможностью динамического вывода из управляющего компьютера требуемых КСГ на указанный пространственный амплитудный модулятор света.

20

25

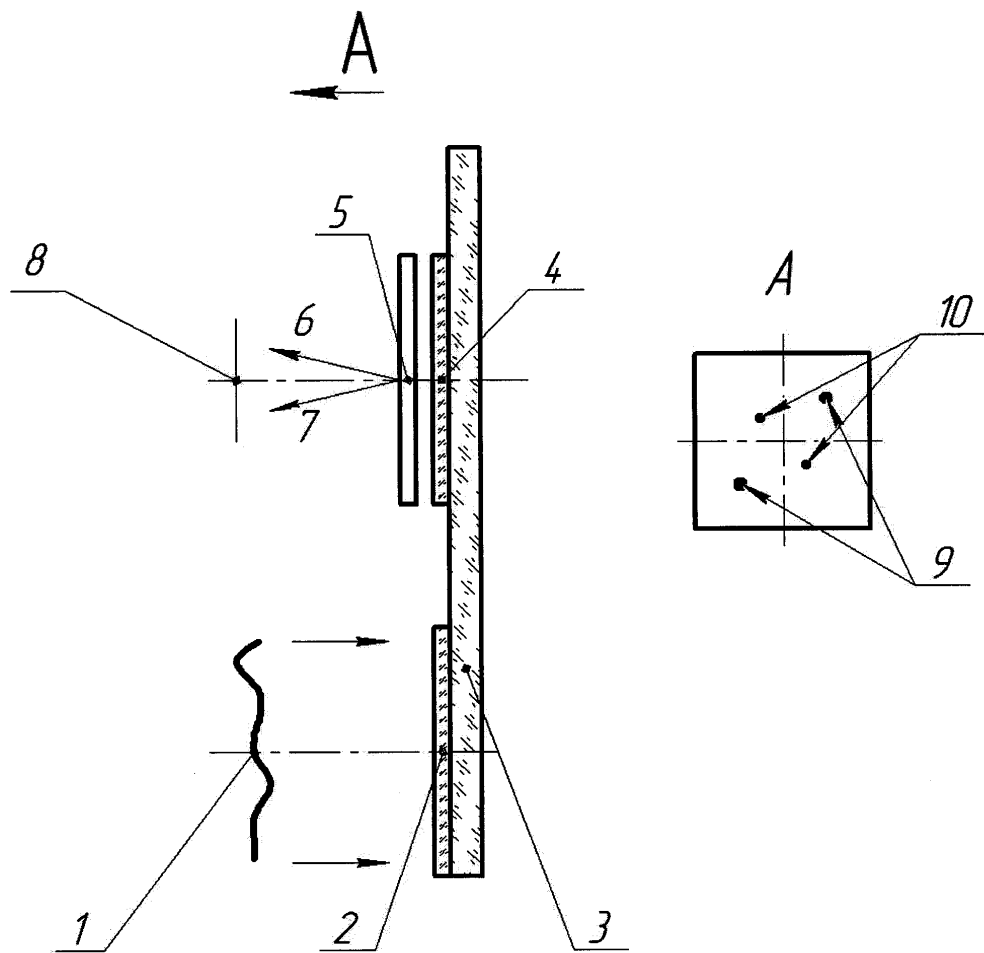
30

35

40

45

1



Фиг.1