



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
G01P 5/26 (2019.08)

(21)(22) Заявка: 2019111777, 18.04.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
18.04.2019

Дата регистрации:
02.12.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 18.04.2019

(45) Опубликовано: 02.12.2019 Бюл. № 34

Адрес для переписки:

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20,
ФГБОУ ВО "НГТУ"

(72) Автор(ы):

Дубнищев Юрий Николаевич (RU),
Нечаев Виктор Георгиевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ "НОВОСИБИРСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2638110 C1, 11.12.2017. US
5272513 A, 21.12.1993. US 4125778 A1, 14.11.1978.
US 4997272 A1, 05.03.1991.

(54) Лазерный доплеровский измеритель скорости

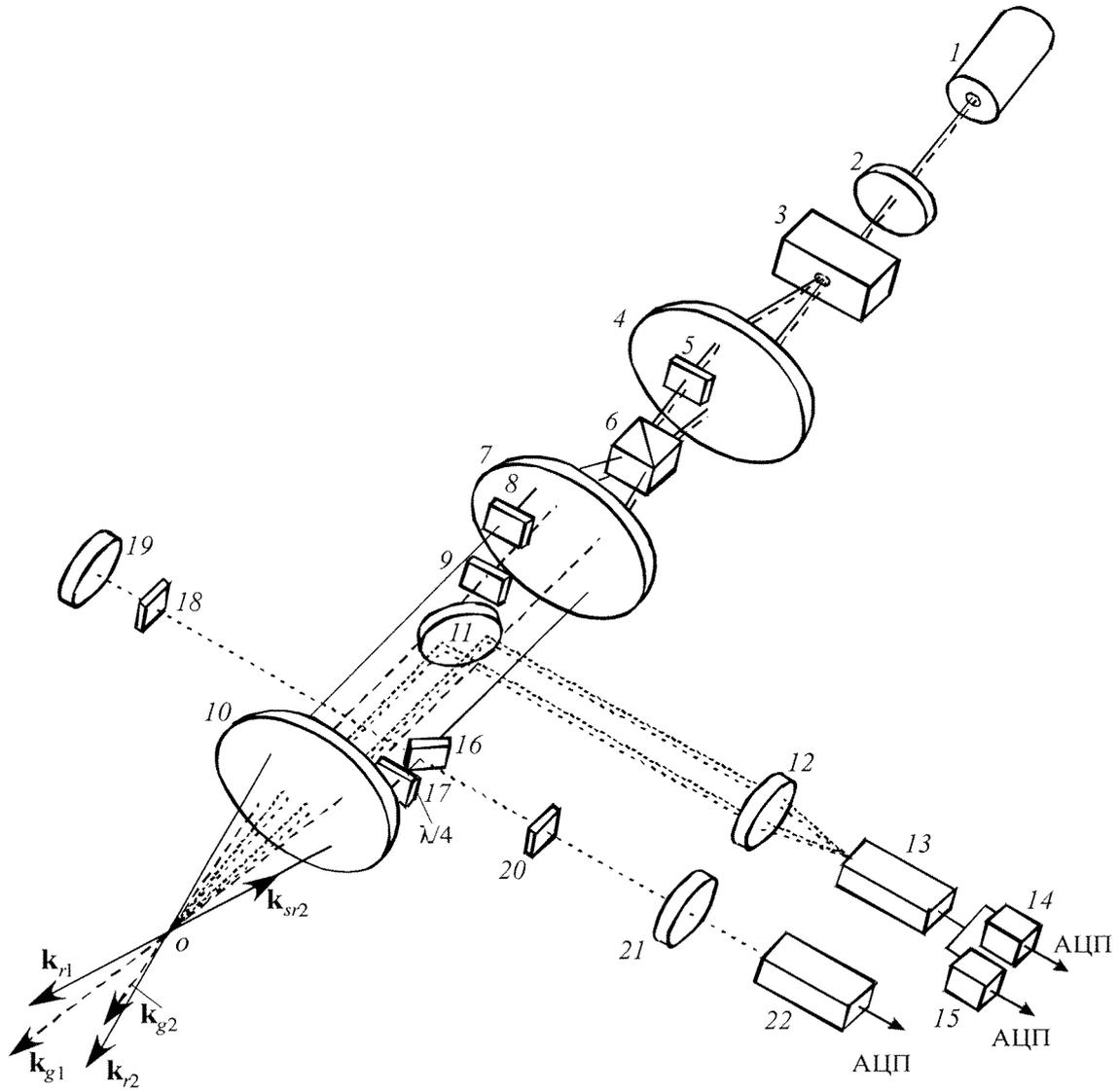
(57) Реферат:

Предлагаемое изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано в экспериментальной гидро- и аэродинамике, в промышленных технологиях, связанных с необходимостью исследования скоростей потоков газовых и конденсированных сред, а также скоростей движения поверхностей. Лазерный доплеровский измеритель скорости содержит последовательно расположенные бихроматический источник двух пространственно совмещенных ортогонально поляризованных лазерных пучков с длинами волн λ_r и λ_g , первый объектив, акустооптический брэгговский модулятор бегущей волны, второй объектив, ахроматическую полуволновую фазовую пластинку, помещенную на пути одного из дифрагированных пучков, поляризационную призму Волластона, расположенную в плоскости изображения источника дифрагированных в акустооптическом модуляторе пучков. Также измеритель скорости содержит третий объектив, передняя фокальная плоскость которого

совмещена с плоскостью расщепления пучков в поляризационной призме Волластона, полуволновые фазовые пластинки на путях двух расщепленных призмой Волластона пучков с длинами волн λ_r и λ_g , четвертый объектив - формирователь зондирующего оптического поля в исследуемой среде, установленное между третьим и четвертым объективами поворотное зеркало, установленную на пути светового пучка из монохроматической пары с длиной волны λ_g светоделительную пластинку, ориентированную под углом Брюстера, и последовательно с ней четвертьволновую пластинку, на пути отраженных светоделительной пластинкой пучков последовательно установлены четвертьволновая фазовая пластинка и зеркало, на пути светового пучка, рассеянного в направлении падающего с длиной волны λ_r и отраженного от светоделительной пластинки, установлены последовательно оптический фильтр на длину волны λ_r и фотоприемник, подключенный через АЦП к системе обработки сигналов. При этом

брэгговский акустооптический модулятор выполнен двухволновым с отношением частот Ω_r и Ω_g ультразвуковых волн, равным отношению волновых чисел k_r и k_g дифрагирующих световых пучков, а фотоприемник, установленный на пути отраженного зеркалом рассеянного исследуемой

средой светового поля, подключен к системе обработки сигналов через полосовые фильтры, центральные частоты которых равны частотам Ω_r и Ω_g ультразвуковых волн в акустооптическом модуляторе. Технический результат – повышение точности измерения скорости. 8 ил.



Фиг. 1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
G01P 5/26 (2019.08)

(21)(22) Application: **2019111777, 18.04.2019**

(24) Effective date for property rights:
18.04.2019

Registration date:
02.12.2019

Priority:
(22) Date of filing: **18.04.2019**

(45) Date of publication: **02.12.2019** Bull. № 34

Mail address:
**630073, g. Novosibirsk, pr. Karla Marksa, 20,
FGBOU VO "NGTU"**

(72) Inventor(s):
**Dubnishchev Yuriy Nikolaevich (RU),
Nechaev Viktor Georgievich (RU)**

(73) Proprietor(s):
**FEDERALNOE GOSUDARSTVENNOE
BYUDZHETNOE OBRAZOVATELNOE
UCHREZHDENIE VYSSHEGO
OBRAZOVANIYA "NOVOSIBIRSKIY
GOSUDARSTVENNYJ TEKHNICHESKIY
UNIVERSITET" (RU)**

(54) **LASER DOPPLER VELOCITY METER**

(57) Abstract:

FIELD: measuring equipment.

SUBSTANCE: present invention relates to measurement equipment and can be used in experimental hydro- and aerodynamics, in industrial technologies associated with the need to study velocities of flows of gas and condensed media, as well as speed of surfaces. Laser Doppler velocity meter comprises series-arranged bi-chromatic source of two spatially aligned orthogonally polarized laser beams with wavelengths λ_r and λ_g , first lens, acousto-optic Bragg traveling wave modulator, a second lens, an achromatic half-wave phase plate placed on the path of one of the diffracted beams, a polarization prism of Wollaston, located in the image plane of the source of the beams diffracted in the acousto-optic modulator. Speed meter also includes third lens, front focal plane of which is combined with plane of splitting of beams in polarization prism of Wollaston, half-wave phase plates on paths of two Wollaston-split beams with wavelengths λ_r and λ_g , fourth lens – probing optical field shaper in analyzed medium, rotary mirror installed between third and fourth lenses, mounted on path of light beam from

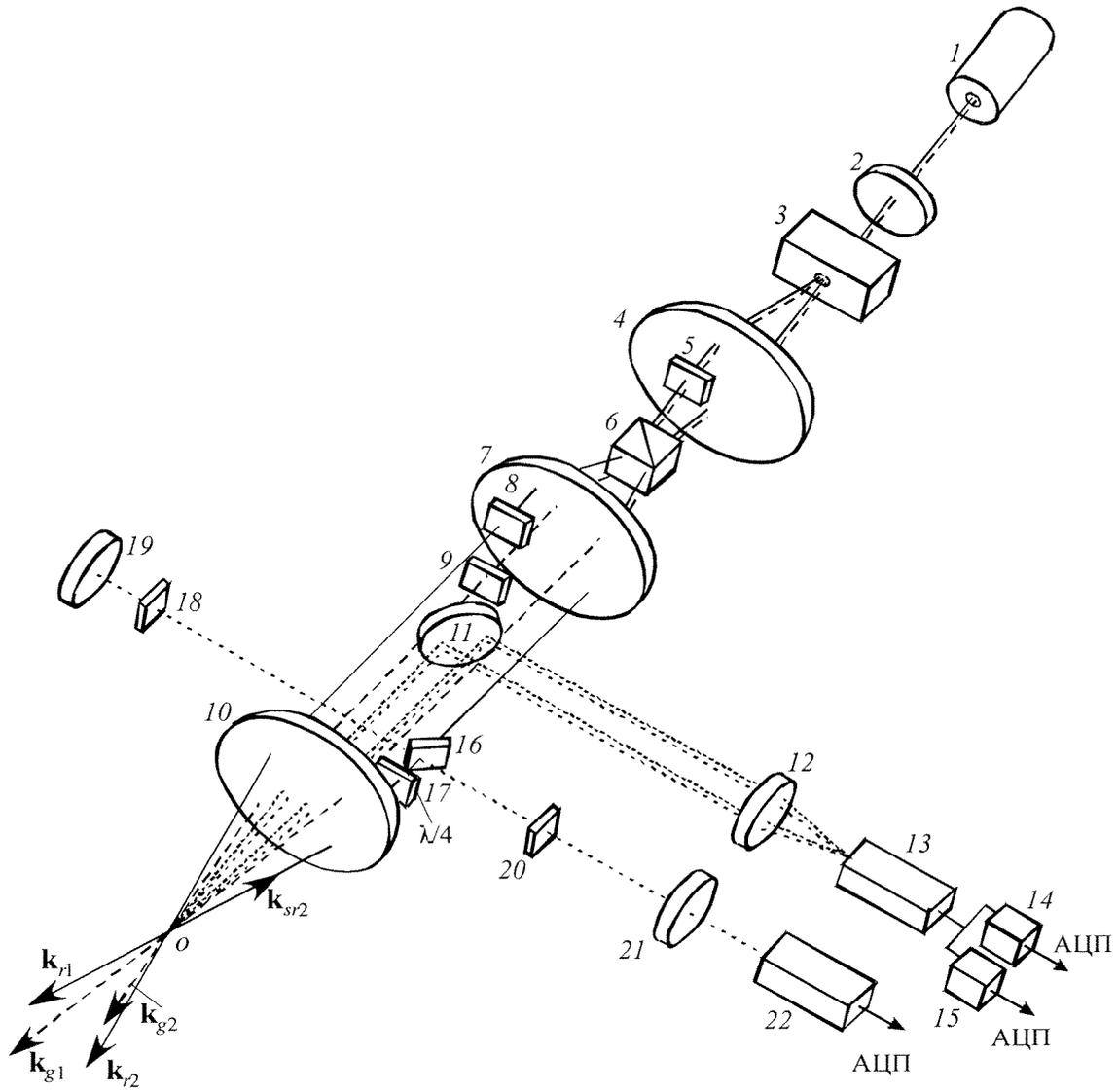
monochromatic pair with wavelength λ_g beam splitting plate oriented at Brewster angle, and in series with it quarter-wave plate, in the path reflected by the beam-splitting beam of beams, there are successively installed quarter-wave phase plate and mirror, on path of light beam scattered in direction of incident wave with wavelength λ_r and reflected from the beam splitting plate, sequentially installed optical filter at wavelength λ_r and a photodetector connected through an analogue-to-digital converter to a signal processing system. At that, Bragg acousto-optic modulator is made as two-wave modulator with frequency ratio Ω_r and Ω_g of ultrasonic waves equal to ratio of wave numbers k_r and k_g diffracting light beams, and photodetector installed on path reflected by mirror of light field scattered by investigated medium is connected to signal processing system through band-pass filters, central frequencies of which are equal to frequencies Ω_r and Ω_g ultrasound waves in acousto-optic modulator.

EFFECT: high accuracy of measuring speed.

1 cl, 8 dwg

RU 2 707 957 C1

RU 2 707 957 C1



Фиг. 1

Предлагаемое изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано в экспериментальной гидро- и аэродинамике, в промышленных технологиях, связанных с необходимостью исследования скоростей потоков газовых и конденсированных сред, а также скоростей движения поверхностей.

5 Известен лазерный доплеровский измеритель скорости, действие которого основано на использовании лазерного излучения и эффекта Доплера [патент US 4838687 А]. Для измерения вектора скорости в исследуемой среде формируется зондирующее поле, пространственная структура которого задает 3D (D - «dimension» - размерность) координатно-измерительный базис. Зондирующее поле ограничено областью
10 пересечения лазерных пучков. Частота рассеянного света изменяется из-за доплеровского сдвига частоты, пропорционального скорости движения исследуемой среды. Измерение доплеровского частотного сдвига несет информацию о скорости. Для определения вектора скорости наиболее широко используется пятилучевая система формирования ортогонального координатного базиса в зондирующем поле, реализация
15 описана в патенте US 4838687 А. Устройство содержит источник лазерного излучения, расщепители и частотные модуляторы световых пучков, оптические формирователи зондирующего поля, при этом для определения двух компонент вектора скорости формируется координатный 2D базис из трех лазерных пучков, а для измерения третьей ортогональной компоненты скорости координатный базис, образованный в области
20 пересечения двух лазерных пучков. Фактически, для измерения 3D вектора скорости используются две лазерные доплеровские измерительные системы (ЛДИС) с совмещенным зондирующим полем: одна из них измеряет две проекции скорости в ортогональном координатном базисе, другая измеряет третью проекцию. Определение направлений компонент вектора скорости осуществляется введением несущих частот
25 в лазерные пучки с помощью акустооптических модуляторов, число которых в измерительной системе равно числу компонент вектора скорости.

Однако, в указанном устройстве недостатками являются пониженная точность измерений и надежность из-за проблемы пространственного совмещения 2D и 1D составляющих координатно-измерительного базиса в зондирующем поле, поскольку
30 они образуются раздельными и независимыми трехпучковой и двухпучковой оптическими системами в пространственном угле порядка $\pi/2$. В такой структуре лазерного доплеровского измерителя скорости три и два пучка независимо проходят через различные оптические элементы в 2D и 1D измерительных системах, что приводит к дополнительному снижению точности измерений из-за влияния механической
35 нестабильности и тепловых полей. Кроме того, использование трех акустооптических модуляторов для определения направления вектора скорости усложняет структуру измерительной системы и снижает надежность ее работы.

Также известен лазерный доплеровский измеритель скорости, описанный в книге [Ю.Н. Дубнищев, В.А. Арбузов, П.П. Белоусов, П.Я. Белоусов. Оптические методы
40 исследования потоков. Новосибирск, Сибирское университетское из-во, 2003, 418 с.] на стр. 206-209 рис. 4.6, в котором зондирующее поле с 3D координатно-измерительным базисом сформировано четырьмя лазерными пучками, проходящими через одни и те же оптические элементы, в числе которых три акустооптических модулятора. Структура системы образует три измерительных канала. Эта система работает в режиме адаптивной
45 частотной селекции компонент вектора скорости с темпоральной коммутацией измерительных каналов.

Однако в указанном устройстве недостатком является пониженная точность измерений скорости, поскольку частота коммутации измерительных каналов,

определяющих последовательно во времени проекции скорости, и, соответственно, частота Найквиста, зависит от динамики исследуемого процесса и концентрации рассеивающих частиц в среде.

Кроме того, известен лазерный доплеровский измеритель вектора скорости [патент 5 RU 2638580 C1 G01P 3/36], являющийся прототипом предлагаемого изобретения. Он содержит бихроматический источник двух пространственно совмещенных ортогонально поляризованных монохроматических, отличающихся по длинам волн λ_1 и λ_2 лазерных пучков. Последовательно с ним расположены: первый объектив, акустооптический модулятор бегущей волны, ориентированный под углом Брэгга к направлению 10 падающих на модулятор пространственно совмещенных лазерных пучков, второй объектив, призма Волластона, ориентация которой согласована с поляризацией дифрагированных пучков. На пути одного из пары бихроматических пучков, дифрагированных в нулевой или минус первый порядок дифракции, между акустооптическим модулятором и второй призмой Волластона установлена 15 ахроматическая фазовая пластинка. Взаимное расположение акустооптического модулятора, второго объектива и призмы Волластона обеспечивают оптическое сопряжение источника дифрагированных пучков с его изображением в исследуемой среде. Передний фокус третьего объектива совмещен с точкой расщепления световых пучков второй поляризационной призмой. На пути двух из четырех расщепленных 20 призмой Волластона пучков помещены полуволновые фазовые пластинки. Последовательно с третьим объективом помещен четвертый объектив - формирователь зондирующего поля в исследуемой среде. На пути двух из четырех расщепленных призмой Волластона лазерных пучков помещены полуволновые фазовые пластинки, согласующие поляризации лазерных пучков, формирующих структуру зондирующего 25 поля в исследуемой среде. Между третьим и четвертым объективами установлено поворотное зеркало. На пути светового пучка, отраженного этим поворотным зеркалом, установлено дихроичное зеркало. На пути световых пучков, отраженных дихроичным зеркалом, установлены фотоприемники, выходы которых подключены к аналого-цифровым преобразователям (АЦП). Между четвертым и третьим объективом на пути 30 одного из пучков, формирующих зондирующее поле, помещена светоделительная пластинка. На пути отраженного светового пучка установлены четвертьволновая фазовая пластинка и зеркало. На пути отраженных этим зеркалом и прошедшего через светоделительную пластинку пучка последовательно помещены светофильтр и фотоприемник, выход которого подключен к аналого-цифровому преобразователю 35 (АЦП). Выходы аналого-цифровых преобразователей подсоединены к системе обработки сигналов. Действие этого устройства заключается в том, что два пространственно совмещенных ортогонально поляризованных, отличающихся длинами волн λ_1 и λ_2 пучка направляют на акустооптический брэгговский модулятор бегущей 40 волны. Дифрагированные в первый и минус первый порядки дифракции световые пучки имеют относительный частотный сдвиг Ω , равный частоте ультразвуковой волны в акустооптическом модуляторе. Вторым объективом эти пучки направляются на призму Волластона. Поляризации этих пучков ахроматической полуволновой фазовой пластинкой согласуются с ориентацией призмы Волластона. Поляризационная призма Волластона расщепляет падающие пучки. Взаимное расположение объектива, 45 акустооптического модулятора и призмы Волластона обеспечивает оптическое сопряжение источника дифрагированных пучков с его изображением при равенстве угла между пучками с длинами волн λ_1 и λ_2 , падающими на призму, углу расщепления.

Расщепленные призмой пучки, поляризации которых скорректированы полуволновыми фазовыми пластинками, третьим и четвертым объективами направляются в исследуемую среду. В области пересечения этих пучков в исследуемой среде формируется зондирующее поле, оптически сопряженное с источником световых пучков, дифрагированных в акустооптическом модуляторе. Координатно-измерительный базис задается структурой волновых векторов лазерных пучков, формирующих зондирующее поле в исследуемой среде. Хроматически селективные изображения зондирующего поля в рассеянном исследуемой средой свете с использованием зеркал, объективов, светоделительных и фазовых пластинок направляются на фотоприемники, в режиме оптического смещения преобразующие световые поля в фотоэлектрические сигналы, которые через аналого-цифровые преобразователи (АЦП) поступают в систему обработки. Несущая частота этих сигналов задается частотой акустооптического модулятора, а девиация частоты соответствует доплеровскому частотному сдвигу, пропорциональному соответствующей компоненте скорости исследуемой среды в сформированном координатно-измерительном базисе.

Однако указанный измеритель обладает недостатком в виде пониженной точности измерения скорости из-за отличия углов дифракции Брэгга в акустооптическом модуляторе для хроматических компонент дифрагирующего пучка, которая составляет $\Delta\phi = \Delta\lambda / \Lambda_a$, где $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2$ - разность длин волн дифрагирующих пучков, Λ_a - пространственный период акустической волны. Результатом является искажение координатно-измерительного базиса, которое влияет на погрешность измерений и требует компенсации. Компенсация может выполняться конструктивно, что усложняет реализацию измерительной системы, либо требует тонкого управления пространственными, поляризационными и фазовыми параметрами дифрагированных в модуляторе световых пучков путем адекватной ориентации поляризационной призмы. Кроме того, несогласованность условий брэгговской дифракции с бихроматической структурой дифрагирующего пучка ведет к дополнительным энергетическим потерям, влияющим на контрастность интерференционной структуры зондирующего поля, отношение сигнал/шум и, в конечном счете, на точность измерений.

Другим недостатком является использование для измерения каждой из трех компонент вектора скорости отдельной системы хроматической селекции рассеянных пучков и фотоприемника, что приводит к дополнительным потерям энергии светового поля и, соответственно, снижению отношения сигнал/шум при фотоэлектрическом преобразовании. Измерительная система усложняется из-за необходимости формирования в системе трех независимых оптических каналов, селективирующих хроматические компоненты рассеянного поля, несущих информацию об ортогональных проекциях вектора скорости.

Задачей (техническим результатом) предлагаемого изобретения является повышение точности измерения скорости.

Решение поставленной задачи достигается тем, что в известном измерителе, содержащем последовательно расположенные: бихроматический источник излучения двух пространственно совмещенных ортогонально поляризованных лазерных пучков с длинами волн λ_r и λ_g первый объектив; акустооптический брэгговский модулятор бегущей волны; второй объектив; ахроматическую полуволновую фазовую пластинку на пути одного из дифрагированных пучков; поляризационную призму Волластона, расположенную в плоскости изображения источника дифрагированных в акустооптическом модуляторе пучков, которая согласована с поляризацией дифрагированных в акустооптическом модуляторе бихроматических пучков; третий

объектив, передняя фокальная плоскость которого совмещена с плоскостью расщепления пучков в поляризационной призме Волластона; полуволновые фазовые пластинки на путях двух из монохроматической пары расщепленных призмой Волластона пучков с длиной волны λ_r ; четвертый объектив - формирующий зондирующего поля в исследуемой среде, установленное между третьим и четвертым объективом поворотное зеркало, установленную на пути светового пучка из другой монохроматической пары с длиной волны λ_g светоделительную пластинку, ориентированную под углом Брюстера и последовательно с ней четвертьволновую пластинку, на пути отраженного светоделительной пластинкой пучков последовательно установлены четвертьволновая фазовая пластинка и зеркало; на пути светового пучка, рассеянного в направлении падающего с длиной волны λ_r и отраженного от светоделительной пластинки установлены последовательно фильтр на длину волны λ_r и фотоприемник, подключенный через АЦП к системе обработки сигналов. При этом Брэгговский акустооптический модулятор выполнен двухволновым с отношением частот Ω_r и Ω_g ультразвуковых волн, равным отношению волновых чисел k_r и k_g дифрагирующих световых пучков, $\Omega_r/\Omega_g=k_r/k_g$. Фотоприемник на пути отраженного зеркалом рассеянного исследуемой средой светового поля подключен к системе обработки сигналов через полосовые фильтры, центральные частоты которых равны частотам Ω_r и Ω_g ультразвуковых волн в акустооптическом модуляторе.

На Фиг. 1 показана структурная схема предложенного измерителя.

На Фиг. 2 показана структура бихроматического источника двух пространственно совмещенных ортогонально поляризованных лазерных пучков с длинами волн λ_r и λ_g , использованная в прототипе.

На Фиг. 3 показана поляризационная структура дифрагированных пучков в плоскости перед полуволновой ахроматической фазовой пластинкой. Сплошной линией обозначен вектор поляризации дифрагированного пучка с длиной волны λ_r , штриховой линией - вектор поляризации дифрагированного пучка с длиной волны λ_g .

На Фиг. 4 показана поляризационная структура световых пучков в плоскости между полуволновой ахроматической фазовой пластинкой и поляризационной призмой Волластона.

На Фиг. 5 показана поляризационная структура лазерных пучков в плоскости за призмой Волластона перед полуволновыми фазовыми пластинками.

На Фиг. 6 показана поляризационная структура лазерных пучков в плоскости между полуволновыми фазовыми пластинками и объективом, формирующим зондирующее поле.

На Фиг. 7 показана поляризационная структура световых пучков, расщепленных призмой Волластона после прохождения полуволновых фазовых пластинок.

На Фиг. 8 показана структура зондирующего поля в пространстве волновых векторов.

Предлагаемый измеритель (Фиг. 1) содержит бихроматический источник излучения пространственно совмещенных монохроматических ортогонально поляризованных лазерных пучков 1. Последовательно с источником расположены: объектив 2; брэгговский акустооптический модулятор бегущей волны 3; второй объектив 4; ахроматическая полуволновая фазовая пластинка 5; поляризационная призма Волластона 6; третий объектив 7; четвертьволновые фазовые пластинки 8 и 9 на пути одного из каждой пары расщепленных поляризационной призмой 6 пучков; объектив 10, формирующий зондирующее поле в исследуемой среде. Между объективами 7 и 10

установлено поворотное зеркало 11. На пути светового пучка, отраженного зеркалом 11, установлены последовательно объектив 12 и фотоприемник 13, выход которого через полосовые фильтры 14 и 15 подключены к системе обработки сигналов. Между объективами 7 и 10 на пути одного из монохроматических пучков установлена под
 5 углом Брюстера светоделительная пластинка 16. На пути светового пучка, прошедшего через светоделительную пластинку 16 помещена четвертьволновая фазовая пластинка 17. На пути отраженного светоделительной пластинкой 16 падающего светового пучка последовательно установлены четвертьволновая фазовая пластинка 18 и зеркало 19. На пути отраженного зеркалом 19 и прошедшего через светоделительную пластинку
 10 16 последовательно помещены светофильтр 20, объектив 21 и фотоприемник 22.

Предлагаемый лазерный доплеровский измеритель скорости работает следующим образом. Бихроматический пучок, сформированный источником 1, состоящий из пространственно совмещенных и ортогонально поляризованных монохроматических компонент с длинами волн λ_r , λ_g , и, соответственно, волновыми числами k_r и k_g ,
 15 объективом 2 направляется на акустооптический модулятор 3, работающий в режиме дифракции Брэгга. Примерная структура такого бихроматического источника, использованного в прототипе предлагаемого изобретения, показана на Фиг. 2. Бихроматический источник состоит из призмы Волластона 23 и двух лазерных диодов (24 и 25), взаимно ориентированных под углом расщепления призмы. Лазерные диоды
 20 излучают, ортогонально поляризованные монохроматические пучки с длинами волн λ_r и λ_g , которые поляризационной призмой Волластона пространственно совмещаются и образуют бихроматический световой пучок. Частоты Ω_r и Ω_g бегущих ультразвуковых волн в акустооптическом модуляторе 3 удовлетворяют условию $\Omega_r/\Omega_g = k_r/k_g$. Поэтому
 25 углы Брэгга для ортогонально поляризованных монохроматических компонент бихроматического пучка равны, $\lambda_r \Lambda_r = \lambda_g \Lambda_g$, и, соответственно, равны углы между дифрагированными в нулевой и минус первый порядок пучками с длинами волн λ_r и λ_g . Разность частот дифрагированных r-компонент равна Ω_r , а разность частот
 30 дифрагированных g-компонент равна Ω_g . Поэтому пространственная и поляризационная структуры дифрагированного бихроматического пучка в нулевом и минус первом порядке одинаковы, а частоты монохроматических компонент отличаются.

Примерная структура акустооптического модулятора показана на Fig. 3. Здесь показаны волновые векторы K_r и K_g ультразвуковых волн, возбуждаемых в модуляторе
 35 электрическим напряжением $U \sin(\Omega_r t)$ и $U \sin(\Omega_g t)$, частоты которых удовлетворяют условию: $\Omega_r = K_r V_a$; $\Omega_g = K_g V_a$, где V_a - скорость ультразвуковой волны; K_r и K_g - волновые числа ультразвуковых волн. Сплошными и штриховыми линиями - направления распространения бихроматических пучков, ортогонально поляризованные
 40 пространственно-совмещенные компоненты которых: $A_r \sin(\omega_r t - k_r x)$ и $A_g \sin(\omega_g t - k_g x)$, где A_r и A_g - амплитуды; ω_r и ω_g - частоты; k_r и k_g - волновые векторы.

Поляризационная структура дифрагированных бихроматических лазерных пучков представлена на Фиг. 4 (плоскость, в которой распространяются дифрагированные пучки, для примера выбрана вертикальной). Сплошной вектор показывает поляризацию
 45 монохроматической r-компоненты дифрагированного пучка, штриховой - поляризацию монохроматической g-компоненты. Ахроматическая полуволновая пластинка 5 (Фиг. 1), установленная на пути верхней пары дифрагированных бихроматических пучков, прошедших через объектив 4, выполняет поворот плоскости поляризации на 90° .

Поляризационная структура лазерных пучков непосредственно после прохождения фазовой пластинки 5, показана на Фиг. 5. Объектив 4 направляет бихроматические пучки с поляризационную структурой (Фиг. 4) на поляризационную призму Волластона 6 (Фиг. 5) ориентированную так, что плоскость расщепления ортогонально поляризованных пучков ортогональна плоскости, в которой распространяются дифрагированные бихроматические пучки.

Поляризационная призма 6 расщепляет бихроматические пучки с поляризационной структурой, показанной на Фиг. 5, на монохроматические пучки, поляризационная структура которых представлена на Фиг. 6. Взаимное положение акустооптического модулятора 3, объектива 4 и поляризационной призмы 6 обеспечивают оптическое сопряжение источника дифрагированных пучков в модуляторе с источником расщепленных пучков. На Фиг. 7 показана поляризационная структура световых пучков, расщепленных поляризационной призмой 6 после прохождения полуволновых фазовых пластинок 8 и 9. Объективы 7 и 10 формируют в исследуемой среде зондирующее поле как изображение источника расщепленных призмой Волластона лазерных пучков. Для гауссовых пучков оно совмещается с плоскостью пересечения перетяжек.

Фиг. 8 иллюстрирует формирование структуры зондирующего поля в пространстве волновых векторов. Направления осей координатно-измерительного базиса X, Y, Z задаются разностями волновых векторов лазерных пучков, формирующих зондирующее поле:

$$\mathbf{X} = \mathbf{k}_{r2} - \mathbf{k}_{r1}; \quad (1)$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{k}_{g2} - \mathbf{k}_{g1}; \quad (2)$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{k}_{sr2} - \mathbf{k}_{g2} = -(\mathbf{k}_{r1} + \mathbf{k}_{r2}). \quad (3)$$

Здесь $\mathbf{k}_{sr2} = -\mathbf{k}_{r1}$ - волновой вектор светового поля, рассеянного исследуемой средой в направлении, обратном направлению волнового вектора \mathbf{k}_{r1} лазерного пучка, формирующего зондирующее поле.

Как известно (Ю.Н. Дубнищев, Б.С. Ринкевичюс. Методы лазерной доплеровской анемометрии. Москва. Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1982.), частотная структура света, рассеянного в зондирующем поле исследуемой средой, движущейся со скоростью v , определяется доплеровскими сдвигами частоты в r и g хроматических компонентах рассеянного света, пропорциональным проекциям вектора скорости на разности волновых векторов лазерных пучков, формирующих зондирующее поле и задающих направления осей ox , oy , oz координатно-измерительного базиса:

$$\omega_{Dx} = v(\mathbf{k}_{r2} - \mathbf{k}_{r1}); \quad (4)$$

$$\omega_{Dy} = v(\mathbf{k}_{g2} - \mathbf{k}_{g1}); \quad (5)$$

$$\omega_{Dz} = v(\mathbf{k}_{sr2} - \mathbf{k}_{r2}). \quad (6)$$

Рассеянный в зондирующем поле свет объективом 10, поворотным зеркалом 11 и объективом 12 направляется на фотоприемник 13, действующий в режиме оптического смещения. В результате оптического смещения в структуре фотозлектрического тока на выходе фотоприемника 13 появляются составляющие, частоты которых определяются разностными комбинациями частот световых полей, падающих на светочувствительную поверхность фотоприемника:

$$\omega_x = \Omega_r + \omega_{Dx} = \Omega_r + \mathbf{v}(\mathbf{k}_{r2} - \mathbf{k}_{r1}); \quad (7)$$

$$\omega_y = \Omega_g + \omega_{Dy} = \Omega_g + \mathbf{v}(\mathbf{k}_{g2} - \mathbf{k}_{g1}). \quad (8)$$

5 Компоненты фотоэлектрического тока являются частотно-модулированными сигналами. Они селективируются полосовыми фильтрами 14 и 15 с центральными частотами, соответственно, Ω_r и Ω_g , которые совпадают с частотами бегущих ультразвуковых волн в акустооптическом модуляторе 3.

10 Из структуры волновых векторов световых пучков, формирующих ортогональный координатно-измерительный базис, и выражений (7) и (8) следует:

$$\omega_x = \Omega_r + 2v_x k_r \sin \theta_r; \quad (9)$$

$$\omega_y = \Omega_g + 2v_x k_g \sin \theta_g. \quad (10)$$

15 Из этих уравнений однозначно определяются v_x и v_y -компоненты вектора скорости исследуемой среды:

$$v_x = (\omega_x - \Omega_r) / 2k_r \sin \theta_r; \quad (11)$$

$$v_y = (\omega_y - \Omega_g) / 2k_g \sin \theta_g. \quad (12)$$

20 Ширина полос фильтров определяется максимальным диапазоном измеряемых скоростей. Фильтрованные сигналы через АЦП поступают в систему обработки, измеряющую частоты и, соответственно, компоненты вектора скорости. Структура и работа оптического измерительного канала, определяющего v_x -компоненту вектора скорости, такая же, как и в прототипе. Референтный пучок формируется из падающего в
25 измерительном канале, содержащем светоделительную пластинку 16, фазовые пластинки 17-18, зеркало 19, фильтр 20, объектив 21 и фотоприемник 22.

Частота фотоэлектрического тока на выходе фотоприемника 22:

$$\omega_z = \Omega_r + \omega_{Dz} = \Omega_r + \mathbf{v}(\mathbf{k}_{sr2} - \mathbf{k}_r). \quad (13)$$

30 Отсюда, с учетом Фиг. 8:

$$v_z = (\omega_z - \Omega_r) / 2k_r \cos \theta_r. \quad (14)$$

35 Технический результат предлагаемого изобретения заключается в повышении точности измерения скорости. Повышение точности достигается за счет выполнения брэгговского акустооптического модулятора двухволновым с отношением частот бегущих ультразвуковых волн, равным отношению волновых чисел дифрагирующих световых пучков, что обеспечивает идентичность пространственной и поляризационной
40 структуры дифрагированных в нулевой и минус первый порядки дифракции бихроматических компонент и одинаковость условий их пространственных преобразований поляризационной призмой. Отсюда следует реализация другого
45 технического решения, состоящего в использовании одного фотоприемника для фотоэлектрического преобразования бихроматического светового поля, рассеянного исследуемой средой и частотной селекции фотоэлектрического тока полосовыми фильтрами с последующим параллельным измерением доплеровских частотных сдвигов, несущих информацию о величине и направлении двух ортогональных компонент вектора скорости. В прототипе возможность одноканального фотоэлектрического преобразования бихроматического рассеянного поля отсутствует из-за равенства несущих частот его хроматических компонент.

(57) Формула изобретения

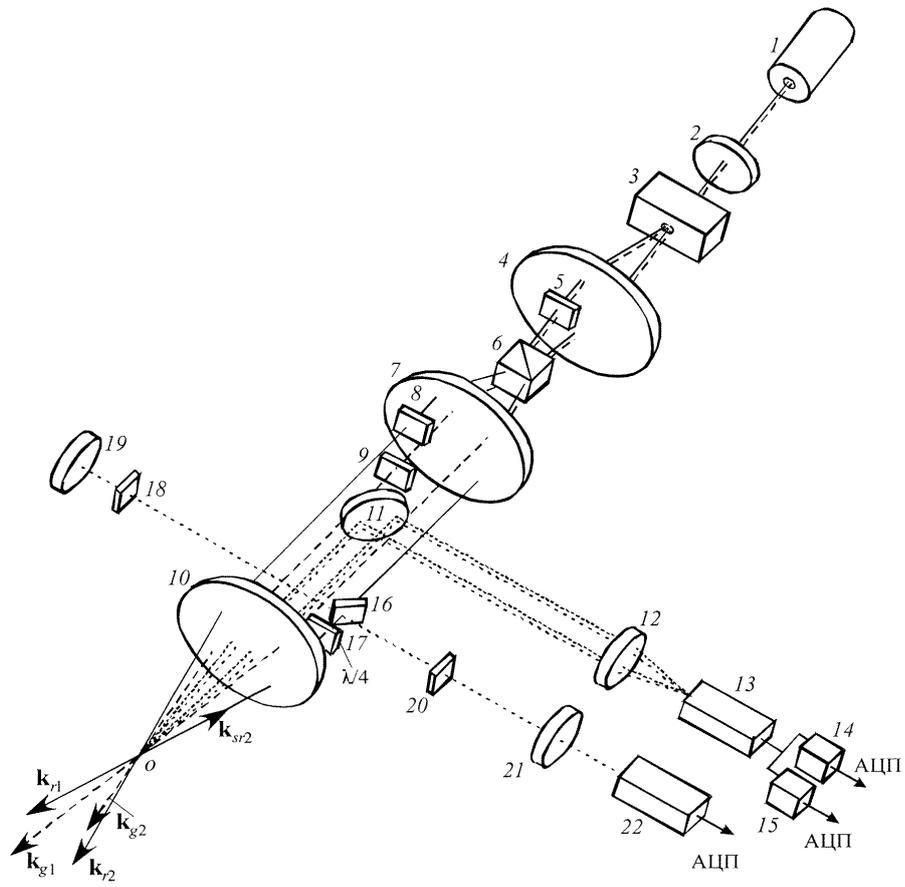
Лазерный доплеровский измеритель скорости, содержащий последовательно расположенные бихроматический источник двух пространственно совмещенных ортогонально поляризованных лазерных пучков с длинами волн λ_r и λ_g , первый объектив, акустооптический брэгговский модулятор бегущей волны, второй объектив, ахроматическую полуволновую фазовую пластинку, помещенную на пути одного из дифрагированных пучков, поляризационную призму Волластона, расположенную в плоскости изображения источника дифрагированных в акустооптическом модуляторе пучков, третий объектив, передняя фокальная плоскость которого совмещена с плоскостью расщепления пучков в поляризационной призме Волластона, полуволновые фазовые пластинки на путях двух расщепленных призмой Волластона пучков с длинами волн λ_r и λ_g , четвертый объектив - формирователь зондирующего оптического поля в исследуемой среде, установленное между третьим и четвертым объективами поворотное зеркало, установленную на пути светового пучка из монохроматической пары с длиной волны λ_g светоделительную пластинку, ориентированную под углом Брюстера, и последовательно с ней четвертьволновую пластинку, на пути отраженных светоделительной пластинкой пучков последовательно установлены четвертьволновая фазовая пластинка и зеркало, на пути светового пучка, рассеянного в направлении падающего с длиной волны λ_r и отраженного от светоделительной пластинки, установлены последовательно оптический фильтр на длину волны λ_r и фотоприемник, подключенный через АЦП к системе обработки сигналов, отличающийся тем, что брэгговский акустооптический модулятор выполнен двухволновым с отношением частот Ω_r и Ω_g ультразвуковых волн, равным отношению волновых чисел k_r и k_g дифрагирующих световых пучков, а фотоприемник, установленный на пути отраженного зеркалом рассеянного исследуемой средой светового поля, подключен к системе обработки сигналов через полосовые фильтры, центральные частоты которых равны частотам Ω_r и Ω_g ультразвуковых волн в акустооптическом модуляторе.

35

40

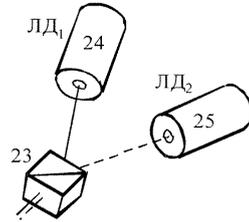
45

1

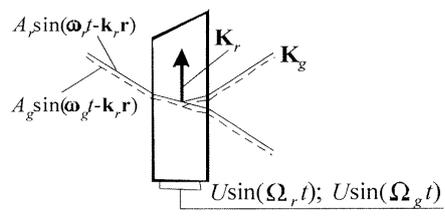


Фиг. 1

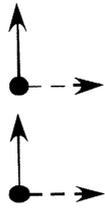
2



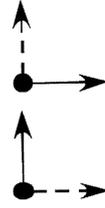
Фиг. 2



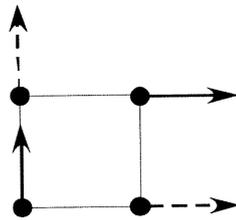
Фиг. 3



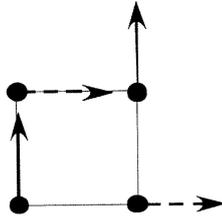
Фиг. 4



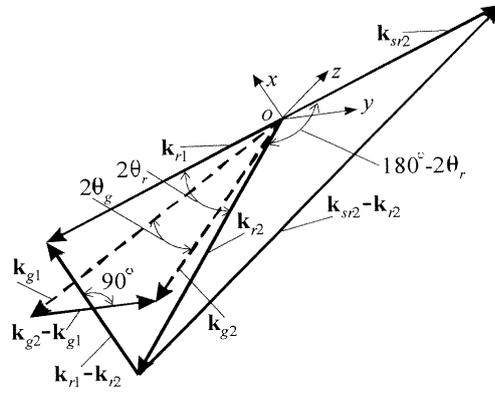
Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7



Фиг. 8