

В. А. Павлов¹, В. Г. Меледин^{1}, И. К. Кабардин¹, М. В. Кашкарова¹*

Перестраиваемая схема лазерного доплеровского анемометра без смещения частоты

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск,
Российская Федерация
* e-mail: meledin@itp.nsc.ru

Аннотация. В настоящее время лазерные доплеровские анемометры являются одним из инструментов невозмущающего измерения скорости движения жидкостей и газов. В работе предложена перестраиваемая оптическая схема лазерного доплеровского анемометра без смещения частоты излучения. Предложенная схема отличается гибкостью, простой юстировкой, небольшим количеством оптических элементов. В результате построение лазерного доплеровского анемометра, реализующего предложенную оптическую схему, позволит исследователям, конструкторам и инженерам получить необходимые для их деятельности знания и навыки в работе с лазерным доплеровским анемометром.

Ключевые слова: лазерный доплеровский анемометр, оптическая схема, смещения частоты

V. A. Pavlov¹, V. G. Meledin^{1}, I. K. Kabardin¹, M. V. Kashkarova¹*

Tunable Laser Doppler Anemometer Circuit without Frequency Shift

¹Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation
* e-mail: meledin@itp.nsc.ru

Abstract. Currently, laser Doppler anemometers are one of the tools for non-disturbing measurement of the speed of movement of liquids and gases. The work proposes a tunable optical design of a laser Doppler anemometer without shifting the radiation frequency. The proposed scheme is flexible, easy to adjust, and has a small number of optical elements. As a result, the construction of a laser Doppler anemometer that implements the proposed optical design will allow researchers, designers and engineers to obtain the knowledge and skills necessary for their activities in working with a laser Doppler anemometer.

Keywords: laser Doppler anemometer, optical design, frequency shift

Введение

Лазерная доплеровская анемометрия (ЛДА) – метод измерения скорости движения жидкостей, газов и твердых сред, основанный на эффекте Доплера [1]. История этого метода началась в середине XX века, и с тех пор он нашел широкое применение в различных областях науки и техники.

Эффект Доплера заключается в изменении частоты волны при взаимодействии с движущимся объектом. В 1950-х годах был разработан метод генерации монохроматического света, это привело к созданию лазера и открыло возможности для применения эффекта Доплера в оптических системах. Первые экспери-

менты по измерению скорости газов и жидкостей с помощью лазерной доплеровской анемометрии были проведены в 1960-х годах [2, 3]. В 1970-х годах были разработаны и внедрены первые коммерческие системы лазерной доплеровской анемометрии, что способствовало распространению этого метода в научных исследованиях и промышленности [4, 5].

В 1980-х годах были предложены новые методы обработки сигналов, позволяющие улучшить точность и чувствительность измерений. В этот период также были разработаны специальные оптические системы и датчики, которые позволили увеличить диапазон измеряемых скоростей и улучшить работу ЛДА в сложных условиях [6, 7].

В 2000-х годах с бурным развитием информационных технологий и оптико-электронной элементной базы лазерные доплеровские анемометры получили еще более широкое распространение [8, 9]. Применение современных лазерных доплеровских анемометров стало существенно более простым одновременно с улучшением метрологических и эксплуатационных характеристик измерительных систем [10, 11].

Сегодня лазерная доплеровская анемометрия широко используется в аэро- и гидродинамике, металлургии, метеорологии, медицине и других областях науки, техники и промышленности [12–15]. Она позволяет измерять скорость потоков газов, жидкостей и твердой фазы с высокой точностью и разрешением, что является важным для понимания процессов, происходящих в этих системах. Кроме того, развитие технологий позволило создать миниатюрные и компактные системы ЛДА, которые могут использоваться в условиях, недоступных для традиционных методов измерения скорости потоков.

Несмотря на бурное развитие, разнообразие специфики многих физических исследований и технологических процессов не позволило создать лазерные доплеровские устройства одного универсального типа. С другой стороны, развитие и доступность современной оптико-электронной элементной базы позволяют создать упрощенное устройство, реализующее метод лазерной доплеровской анемометрии, адаптируемый под заданные классы экспериментальных задач.

Данная работа нацелена на разработку оптической перестраиваемой схемы подобного лазерного доплеровского анемометра без смещения частоты излучения.

Оптическая схема ЛДА

Предложена универсальная схема ЛДА с относительно небольшим количеством элементов, просто юстируемая и позволяющая изменять ключевые оптические параметры схемы в широких пределах.

Оптическая схема показана на рис. 1. Схема включает следующие элементы: источник лазерного когерентного излучения 1, коллиматорная линза 2, афокальное устройство 3, светоделительный кубик 4, приемное зеркало 5, приемная фокусирующая линза 6, фотоприемник 7. В области измерения 8 формируется интерференционная картина.

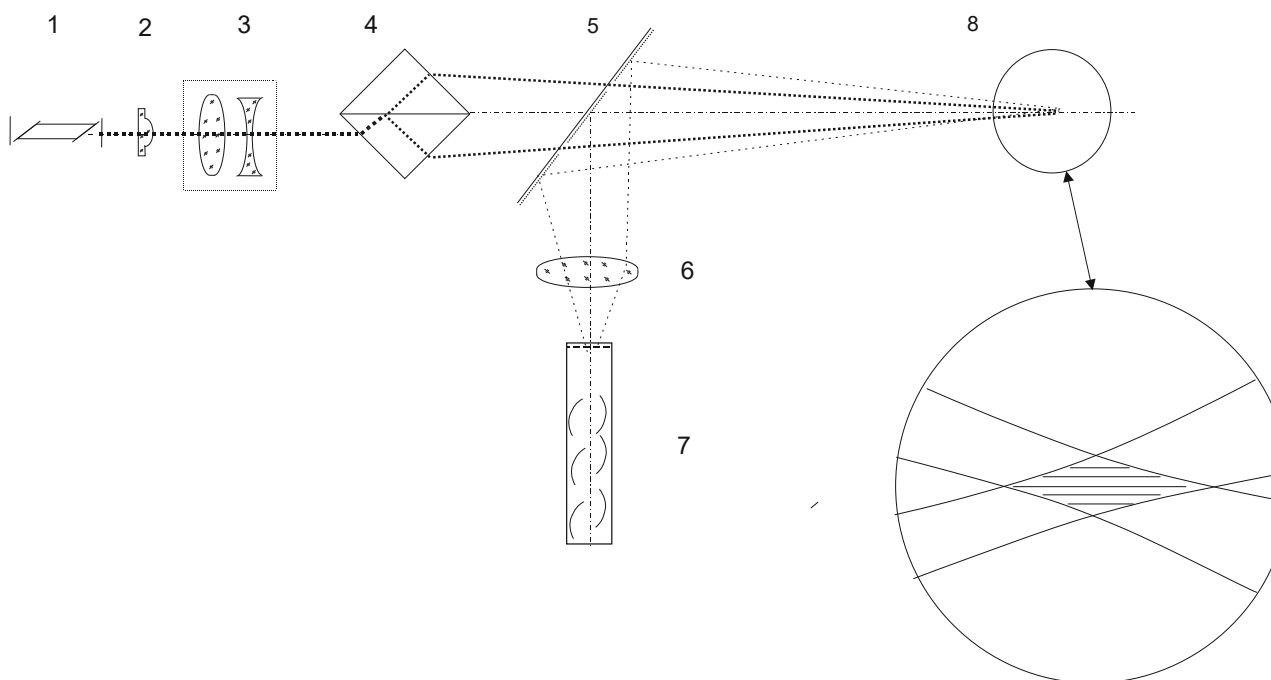


Рис 1. Перестраиваемая оптическая схема ЛДА: 1 – источник лазерного когерентного излучения, 2 – линза коллиматорная, 3 – афокальное устройство, 4 – светоделительный кубик, 5 – приемное зеркало, 6 – приемная фокусирующая линза, 7 – фотоприемник, 8 – область измерения

В качестве источника лазерного когерентного излучения 1 может быть использован гелий-неоновый лазер. Основными его достоинствами являются: высокая монохроматичность излучения (очень узкая ширина спектральной линии) и долговременная стабильность. Однако подобные лазеры обладают существенными габаритами и требуют высоковольтных источников питания. Альтернативным современным источником лазерного излучения является полупроводниковый лазерный диод. Основные его преимущества перед гелий-неоновыми лазерами – это большая мощность излучения, компактность и низковольтность схем питания.

Короткофокусная коллиматорная асферическая линза 2 позволяет преобразовывать расходящийся свет, создаваемый полупроводниковым лазерным диодом 1, в параллельный пучок с минимальными потерями энергии. Коллиматорная асферическая линза в предложенной оптической схеме используется в случае работы с полупроводниковым лазерным диодом. Кроме формирования узкого лазерного пучка, она позволяет повысить разрешение и снизить погрешность измерений скорости потока.

Лазерный луч далее попадает на согласующее устройство 3, обеспечивающее позиционирование перетяжки (наименьшее сечение лазерного пучка) оптического пучка в место пересечения лучей 8. Оно образовано одной или несколькими линзами. В качестве согласующего устройства применялась одиночная положительная линза с фиксированным фокусным расстоянием или в комбинации

с отрицательной линзой, если требовалось изменять фокусное расстояние согласующего элемента.

Делительный кубик 4 использовался в системе лазерного доплеровского анемометра для разделения лазерного пучка на два луча равной интенсивности. Делительный кубик обычно имеет форму параллелепипеда, внутри которого расположены два зеркала, образующие угол 90 градусов. Делительный кубик, размещенный делительной диагональю вдоль оптической оси, разделяет лазерный луч на два луча равной интенсивности. Поворотом вокруг оси, перпендикулярной к плоскости рисунка, совмещают пересечение лучей на нужном расстоянии в зоне измерения.

После делительного кубика два лазерных луча проходят сквозь отверстия в приемном зеркале 5 и формируют интерференционную картину в области измерения 8.

Для повышения уровня полезного сигнала и улучшения точности измерений скорости, приемное зеркало должно иметь узкополосное напыление, согласованное с длиной волны лазерного излучения. Это исключает попадание постороннего света на детектор и повышает отношение сигнал/шум за счет согласованной спектральной фильтрации. Фильтрующее внеполосные компоненты оптического излучения приемное зеркало играет важную роль в оптической схеме лазерного доплеровского анемометра и обеспечивает качественные измерения скорости.

Фокусирующая линза 6 служит для сбора рассеянного объектом лазерного излучения на светочувствительной поверхности фотоприемника. Фокусирующая линза обеспечивает концентрацию светового потока на фотоприемнике, что повышает чувствительность и точность измерений скорости потока.

В качестве фотоприемника 7 в оптической схеме лазерного доплеровского анемометра стандартно используются фотоэлектронные умножители (ФЭУ) или лавинные фотодиоды (ЛФД). ФЭУ обладают высокой чувствительностью и быстродействием, что позволяет регистрировать быстрые изменения интенсивности лазерного излучения, связанные с изменением скорости потока. Однако они имеют высокую стоимость и требуют сложных схем питания. Лавинные фотодиоды обладают меньшим усилением, но также способны регистрировать слабые световые сигналы, что позволяет использовать их в системах с высокой и средней интенсивностью лазерного излучения.

Предложенная перестраиваемая оптическая схема лазерного доплеровского анемометра без смещения частоты излучения отличается гибкостью, простотой юстировки и небольшим количеством оптических элементов. Реализация и параметрическая адаптация лазерных доплеровских анемометров на основе описанной оптической схемы позволит исследователям, конструкторам и инженерам отработать конструкции систем и получить необходимые для их деятельности знания и навыки в работе с лазерным доплеровским анемометром.

Заключение

Предложена оптическая схема лазерного доплеровского анемометра без смещения частоты излучения. Схема отличается гибкостью, простой юстиров-

кой и небольшим количеством оптических элементов. Построение и параметрическая адаптация ЛДА на основе предложенной оптической схемы позволяет обрабатывать конструкции приборов, а также получать исследователям, конструкторам и инженерам необходимые для их деятельности знания и навыки при работе с лазерными доплеровскими анемометрами.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИТ СО РАН.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Lorentz, H. A., Abhandlungen von Christian Doppler, Verlag von W. Engelmann, Leipzig, 1907.
2. Рекневичус Б. С., Толкачев А. В.– Ж. прикл. спектр., 1968, т. 9, № 5, с. 748.
3. Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П., Соболев В. С. и др.– Автометрия, 1969, № 6, с. 115.
4. Лазерные доплеровские измерители скорости [Текст] / [Отв. ред. чл.-кор. АН СССР Ю. Е. Нестерихин] ; АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т автоматики и электрометрии. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1975. – 164 с.
5. Дубнищев Ю.Н., Ринкевичус Б.С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. – М.: Наука, 1982. – 304 с.
6. TSI FLOWSIZER Data Acquisition & Analysis Software. <http://www.tsi.com/Product.aspx?Pid=162>.
7. DANTEC LDA signal processors & system software. <http://www.dantecdynamics.com/LDA/System/signal/Index.html>.
8. Меледин В.Г., Наумов И.В., Аникин Ю.А., Садбаков О.Ю. и др. Лазерная доплеровская измерительная система (ЛДИС, 3-я компонента) для диагностики газожидкостных потоков ЛАД-056 ЛМЗ. Техническое описание и инструкция по эксплуатации / Р5 134 00 00 00. – Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики СО РАН, 2004. – 51 с.
9. Аникин Ю. А., Наумов И. В., Меледин В. Г., Окулов В. Л., Садбаков О.Ю. Исследование пульсационных характеристик закрученного потока в кубическом контейнере: Теплофизика и Аэромеханика. 2004, том 11, №4, с. 571 – 576.
10. Меледин, В. Г. Лазерная доплеровская полупроводниковая анемометрия // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 2, № 5. – С. 141–150
11. Меледин, В. Г. Оптоэлектронные информационные системы для науки и промышленности // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2014. – Т. 5, № 1. – С. 3–12.
12. И. В. Наумов, И. К. Кабардин, В. Л. Окулов, Р. Ф. Микельсон Комплексная оптико-лазерная диагностика вихревой структуры течения за моделью ротора ветрогенератора // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2013. – № 1(12). – С. 289–295.
13. В. Г. Меледин, С. В. Кротов, Г. В. Бакакин и др. Лазерная доплеровская анемометрия горячего проката // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. – С. 175.
14. О. Ю. Садбаков, В. Л. Окулов, И. В. Наумов и др. Лазерная доплеровская диагностика структуры потока за рабочим колесом гидротурбины на оптимальных и форсированных нагрузках // Теплофизика и аэромеханика. – 2004. – Т. 11, № 4. – С. 577–582.
15. И. В. Наумов, В. Л. Окулов, К. Е. Майер и др. LDA-PIV-диагностика и трехмерный расчет пульсирующего закрученного потока в закрытой цилиндрической камере // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Т. 10, № 2. – С. 151–156.

© В. А. Павлов, В. Г. Меледин, И. К. Кабардин, М. В. Кашкарова, 2024