

УДК 535.8 : 621.378

Ю. Н. Дубнищев  
(Новосибирск)

**НОВЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОТОКОВ  
ГАЗОВЫХ И КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД**

В современной оптической диагностике кинематических и структурных параметров потоков выделяется ряд перспективных направлений. Среди них лазерная анемометрия с адаптивной временной и пространственно-временной селекцией вектора скорости, измерение размеров частиц методом фотосмещения прямого и инвертированного оптических сигналов, цветная визуализация в реальном времени полей оптической плотности газовых и конденсированных сред, полупроводниковая лазерная анемометрия. Они являются базой для создания нового поколения оптических измерительных систем, ориентированных на применение в научных исследованиях и в промышленности.

Известно, что древние греки не различали понятий «видеть» и «знать», тем самым выделяя особую роль оптики среди других средств постижения законов природы. Важнейшим достоинством оптических методов является бесконтактный характер измерений, исключающий внесение в среду механических возмущений, искажающих исследуемый процесс.

Среди основных направлений в развитии оптических систем диагностики потоков газовых и конденсированных сред выделяются измерения кинематических, структурных и термодинамических параметров. Измерение скорости может выполняться средствами когерентной и некогерентной оптики. К некогерентным относятся, например, трековые и растровые методы. С появлением лазеров когерентно-оптические методы стали интенсивно развиваться. В первую очередь это относится к лазерной доплеровской анемометрии, основанной на выделении и измерении доплеровского сдвига частоты в свете, рассеянном исследуемой средой [1—3]. Лазерная доплеровская анемометрия по функциональным признакам подразделяется на ЛДА с выделением доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) методами оптического смещения сигналов, спектрометрии и оптической частотной дискриминации (ОЧД). В ЛДА с выделением ДСЧ способом оптического смещения можно обозначить два направления, отличительными признаками которых являются соответственно когерентный и некогерентный режимы работы. Лазерные анемометры, действующие в некогерентном режиме, получили большее распространение и развитие [4—6]. Работа оптических дифференциальных схем ЛДА в некогерентном режиме может быть описана (с некоторыми ограничениями) простой интерференционной моделью, предложенной в [4] и указывающей лишь на формальную аналогию сигнала ЛДА с сигналом в растровой системе. Когерентные компоненты сигнала имеют интерференционную природу, связанную с рассеянием лазерного излучения на нескольких частицах, находящихся в зондирующем поле [1, 3, 7].

В [8] указывалось на возможность описания основных схем ЛДА в рамках некогерентной фурье-оптики. Такой подход оказался плодотворным для анализа оптических измерительных схем в координатном пространстве и получил развитие с учетом когерентных эффектов [3].

При измерении вектора скорости одним из ключевых является выбор способа селекции компонент. Селекция компонент вектора скорости может быть

поляризационная, пространственная, хроматическая, частотная и временная. Эти методы, за исключением последнего, связаны с делением мощности лазерного излучения по измерительным каналам, определяющим компоненты вектора скорости, и широко используются как в экспериментальных, так и в промышленных приборах [5, 10, 11]. Снижение энергетической эффективности в многоканальных системах параллельного действия особенно проявляется при измерениях скорости в режиме обратного рассеяния, когда интенсивность светового сигнала падает на три-четыре порядка в сравнении с интенсивностью света, рассеянного вперед [9]. Пространственная и частотная селекции применяются в ЛДА значительно реже. Примером таких разработок являются созданные совместно с фирмой «Карл Цейс Йена» (ГДР) лазерные анемометры ЛАДО-1 и ЛАДО-2 [3, 12]. Принудительная временная селекция вызывает коммутационные помехи, снижающие точность измерений.

Свободной от этих недостатков является лазерная доплеровская анемометрия с адаптивной временной селекцией и визуализацией вектора скорости [5, 13]. Метод заключается в коммутации измерительных каналов, определяющих компоненты вектора скорости, в темпе с дискретизацией исследуемого процесса потоком рассеивающих частиц. Повышение точности измерений достигается за счет высокой энергетической эффективности, поскольку для измерения одной компоненты скорости используется полная мощность лазерного излучения.

На рис. 1 показан лазерный анемометр с адаптивной временной селекцией и визуализацией вектора скорости (ЛДА АВС), созданный в Институте теплофизики Сибирского отделения РАН совместно с Конструкторско-технологическим институтом научного приборостроения СО РАН. Прибор установлен рядом с гидродинамическим стендом в одной из лабораторий. На рис. 2 показан визуализированный вектор скорости потока, полученный при исследовании обтекания диска. Создан оптико-волоконный функциональный аналог лазерного анемометра ЛДА АВС [14].

Метод адаптивной пространственно-временной селекции оптического сигнала позволяет многократно повысить плотность потока энергии в зондирующем поле при неизменной мощности лазерного излучения [5, 15]. Зондирующее поле формируется посредством адаптивной пространственной развертки сфокусированного луча в последовательный ряд позиций с известным

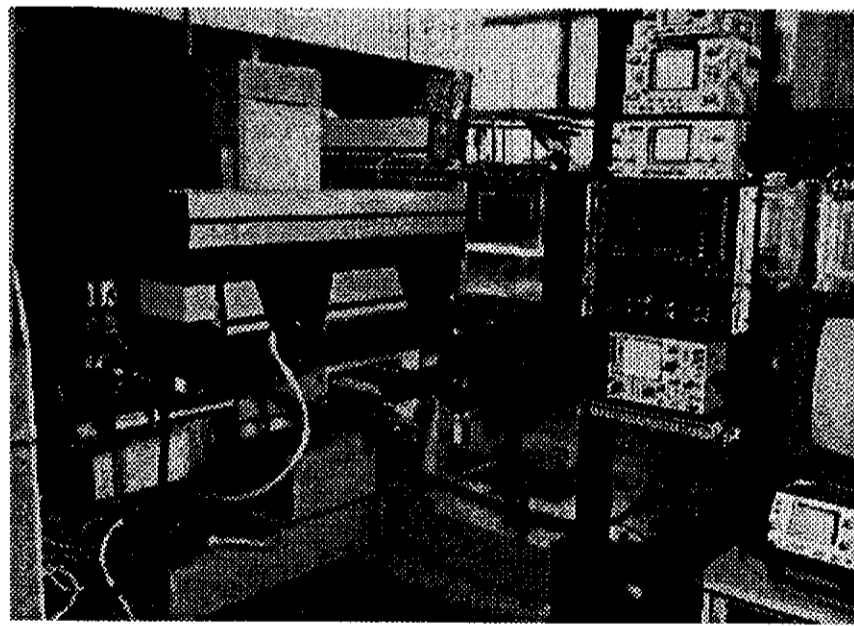


Рис. 1. Лазерный доплеровский анемометр с адаптивной временной селекцией и визуализацией вектора скорости

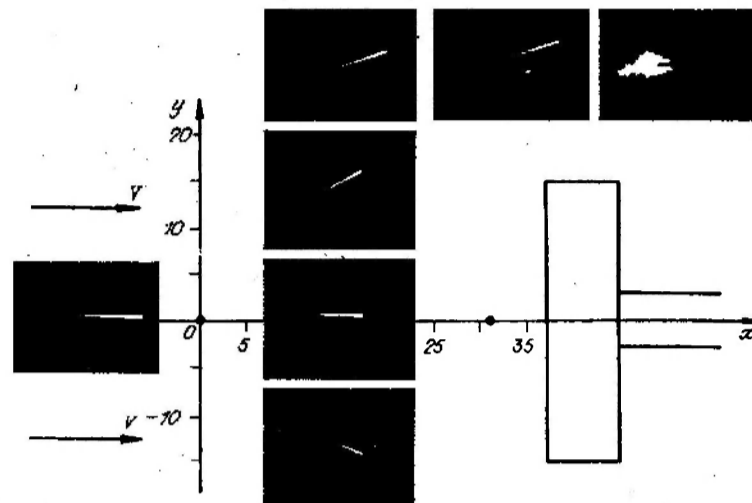
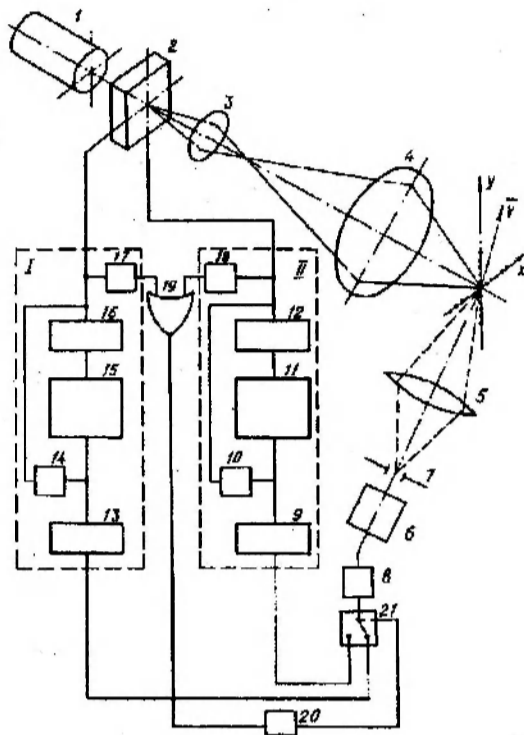


Рис. 2. Визуализация вектора скорости в потоке, обтекающем диск

расстоянием между ними. Скорость  $V$  определяется как отношение известного пространственного интервала  $\Delta$  между двумя последовательными позициями к среднему времени ( $t$ ) пересечения этого интервала движущейся частицей. Помимо энергетического выигрыша, повышается точность измерений за счет исключения фазовых шумов и приведения сигнала к одночастичному, а также устранения ограничений на приемную апертуру, связанных с размером рассеивающих частиц. Устройства, реализующие адаптивную пространственно-временную селекцию компонент вектора скорости, отличаются размерностью оптического дефлектора и введением логического коммутатора измерительных каналов, управляющего дефлектором. Определение направления измеряемой скорости достигается за счет формирования зондирующего поля со взаимно ортогональной по фазе бимодальной структурой. Функциональная схема лазерного анемометра с адаптивной пространственно-временной селекцией вектора скорости показана на рис. 3. Устройство измеряет две ортогональные проекции вектора скорости и фактически отслеживает траекторию движения частицы в пределах пространственных интервалов развертки зондирующего поля. Измерительные электронные каналы, определяющие  $x$ - и  $y$ -компоненты скорости, идентичны и содержат усилитель-формирователь 8, периодомеры 9 (13), блоки памяти 11 (15), блоки сравнения 12 (16) и индикаторы 10 (14). Сигналы с выходов схем сравнения 12 (16) управляют двухкоординатным дефлектором, выполняющим последовательно во времени адаптивную пространственную развертку зондирующего поля соответственно по осям  $x$  и  $y$ . Эти же сигналы поступают на формирователи строб-импульсов 17 и 18, длительность которых равна длительности цугов импульсов, управляющих  $x$ - или  $y$ -каналами дефлектора. Строб-импульсы подаются на логический элемент ИЛИ 19. Сигналы с выхода элемента ИЛИ поступают на счетчик по модулю  $N$ . Выходное состояние счетчика 20 изменяется после прихода  $N$ -го строб-импульса. Изменение логического уровня на выходе счетчика 20 переключает коммутатор 21, пропуская сигнал с формирователя 8 на соответствующий ( $I$  или  $II$ ) измерительный канал. Как и в системе с временной селекцией вектора скорости, число  $N$  обычно выбирается равным 2. Помимо энергетического выигрыша за счет использования полной мощности лазерного излучения в измерительном канале, измеряющем одну компоненту скорости, способ пространственно-временной селекции обеспечивает дополнительный выигрыш энергии в  $M$  раз, где  $M$  — число пространственных периодов в структуре зондирующего оптического поля.

Рис. 3. Схема лазерного анемометра с адаптивной пространственно-временной селекцией вектора скорости:

1 — лазер, 2 — дефлектор, 3—5 — объективы, 6 — фотоприемник, 7 — полевая диафрагма, 8 — усилитель-формирователь, 9, 13 — периодомеры, 10, 14 — индикаторы, 11, 15 — блоки памяти, 12, 16 — блоки сравнения, 17, 18 — формирователи стробимпульсов, 19 — логический элемент, 20 — счетчик по модулю N, 21 — коммутатор



Наряду с адаптивными временной и пространственно-временной селекциями вектора скорости, развиваются и другие нетрадиционные направления ЛДА. Одно из них — лазерная анемометрия потоков с фазовыми неоднородностями (среды с температурными градиентами, флуктуациями оптической плотности, с оптически активной структурой и т. п.). Специфические проблемы сводятся к появлению паразитной частотной модуляции доплеровского сигнала, вызванной движением оптических неоднородностей в потоке, а также вариациями пространственного положения световых пучков, ведущих к деформации структуры зондирующего оптического поля. Обычно в этих случаях в результаты измерения вводятся расчетные корректирующие поправки [16, 17], что не всегда возможно. Среди технических и схемных решений этой проблемы рассмотрены корреляционные и полихроматические системы [3, 18]. В первых результат измерений представляет собой взаимно корреляционную функцию сигналов в измерительных каналах со статистически независимыми потоками фазовых неоднородностей. В полихроматических системах результаты измерений, полученные в хроматически селектированных измерительных каналах, корректируются на соответствующие значения длины волны лазерного излучения и из окончательного результата исключается составляющая погрешности от движения фазовых неоднородностей в потоке.

Исследование динамических параметров потоков с фазовой оптической структурой возможно с использованием в разных вариантах методов ЛДА, ОЧД и теневых. На практике обычно используются тепловские приборы, получающие черно-белые тенеграммы оптического поля плотности или цветные с псевдоокрашиванием, выполняемым средствами вычислительной техники. В [18, 19] развит метод цветной визуализации фазовой структуры потоков в реальном масштабе времени, основанный на полихроматической фильтрации Фуко — Гильберта. Отличительная особенность этого метода — повышение чувствительности за счет цветового контраста и хроматическое кодирование знака пространственно-временных флуктуаций коэффициента преломления в оптически неоднородной среде.

Одно из перспективных направлений в развитии систем оптической диагностики потоков связано с использованием оптической частотной дискриминации доплеровского сдвига частоты [3, 20]. Функции оптических частотных дискриминаторов могут выполняться элементами с дисперсионной усиливающей или поглощающей средой, а также, например, оптическими процессорами с когерентной обратной связью. На базе оптического частотного дискриминатора, согласованного с лазерным источником по модовой структуре излучения, реализована возможность визуализации и измерения в реальном масштабе

времени поля скорости в потоке [21]. Отличительная особенность этих систем состоит в преобразовании временных параметров оптического излучения (частота) в пространственные (угол, пространственная частота), что, в свою очередь, позволяет применять для изучения динамических характеристик исследуемого процесса методы оптической обработки информации.

Помимо диагностики кинематических характеристик, большое практическое значение имеет расширение функциональных возможностей лазерной анемометрии на измерение структурных параметров потоков и, в частности, на измерение размеров частиц. Пространственно-временные характеристики оптического сигнала, сформированного из дифрагированного на частицах света, несут информацию о структурных и фазовых свойствах рассеивателей. Извлечение и однозначная интерпретация этой информации представляют известные трудности. Примером может служить фазовый метод [22], основанный на измерении фазовых соотношений доплеровских сигналов, получаемых при фотоэлектрическом преобразовании пучков, рассеянных в разнесенных областях углового спектра. Практикуются также измерения, основанные на анализе амплитудного спектра доплеровского сигнала [23]. Существенным недостатком, ограничивающим применение этих способов, является узкий динамический диапазон. Реализация фазового метода требует двухканальной измерительной системы. Контроль размеров, основанный на применении оптической фильтрации, в том числе адаптивной, требует априорной информации об исследуемой среде и вызывает затруднения при измерениях в реальном масштабе времени. Такие системы удобны для допускового контроля. Измерение размеров частиц в потоке в реальном времени может быть основано на рекомбинации прямого и обращенного в когерентном свете изображений частиц при оптическом смешении сигналов [14]. Отличительные особенности: расширенный динамический диапазон измерений в реальном времени, возможность контроля геометрической формы частиц, функциональная совместимость с ЛДА.

На рис. 4 показана одна из схем анемометра, реализующая этот метод. Устройство действует следующим образом. Луч лазера 1 после прохождения формирователя 2 трансформируется в зондирующее поле с известной периодической пространственно-временной структурой, локализованное в исследуемой области потока. Зондирующее поле пересекается движущимися рассеивающими частицами. Приемной оптической системой 3 выделяется рассеянный свет и направляется в двухканальный преобразователь оптического сигнала 4. Расщепителем 5 рассеянный свет пространственно разделяется на два ортогонально поляризованных пучка. Один из расщепленных пучков после прохождения оптической системы 6, оборачивающей изображение (например, призма Аббе или Дове), направляется на рекомбинационный элемент 8, на который зеркалом 7 направляется второй расщепленный пучок. Рекомбинационный элемент (призма Рошона) пространственно совмещает ортогонально поляризованные прямой и обращенный световые пучки и направляет их на балансный фотоприемник 9, в котором призма Волластона 10 развернута относительно плоскостей поляризации прямого  $E_{r1}(x - vt) + E_{r2}(x - vt)$  и

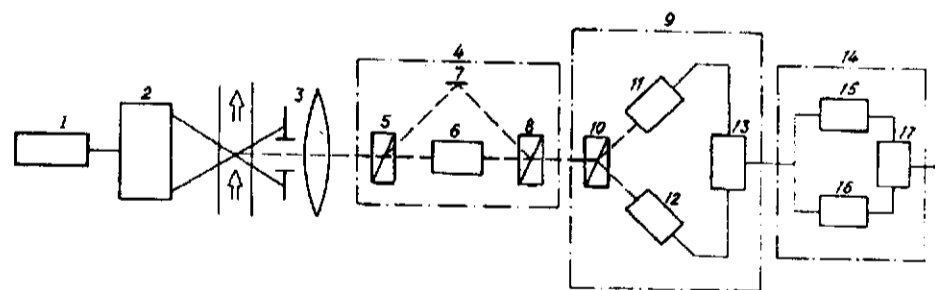


Рис. 4. Схема измерителя размера частиц

обращенного  $E_{y1}(x + vt) + E_{y2}(x + vt)$  световых пучков на  $45^\circ$ . Здесь  $x$  — координата,  $v$  — скорость движения изображения частицы в плоскости анализа. Размер изображения  $d$  линейно связан с размером частицы  $b$  через коэффициент увеличения. Изображения частицы, формируемые прямым и обращенным пучками, движутся в противоположных направлениях. Частоты  $\omega_1$  и  $\omega_2$  компонент обращенного и прямого пучков являются, как известно [3], линейными функциями от соответствующих доплеровских сдвигов в рассеянном свете, пропорциональных измеряемой скорости.

Оси  $\xi, \eta$  призмы Волластона  $10$  развернуты относительно плоскостей поляризации прямого и обращенного входных пучков на  $45^\circ$ , как это показано на рис. 5. Выходящие из призмы ортогонально поляризованные и пространственно разделенные пучки определяются проекциями входных полей соответственно на осях  $\xi$  и  $\eta$ . Расщепленные световые пучки направляются на соответствующие фотоприемники  $11$  и  $12$ , выполняющие квадратичное по полю преобразование оптического сигнала. Для выходного сигнала одного из фотоприемников получаем

$$i_1 = \rho |E_\xi|^2 = i_p + i_D + \tilde{i}_D + \tilde{i}_p, \quad (1)$$

Учитывая, что проекции векторов поля  $E_{y1}$  и  $E_{y2}$  на ось  $\eta$  противофазны, получаем для сигнала с выхода второго фотоприемника

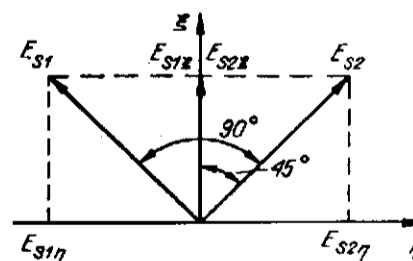
$$i_2 = \rho |E_\eta|^2 = i_p + i_D - \tilde{i}_D - \tilde{i}_p, \quad (2)$$

Здесь  $\rho$  — коэффициент, учитывающий чувствительность и усиление фотоприемника. Структура фотозлектрического сигнала (1) состоит из низкочастотного пьедестала  $i_p$ , доплеровской компоненты  $i_D$ , перекрестной доплеровской компоненты  $\tilde{i}_D$  и перекрестного пьедестала  $\tilde{i}_p$ . Доплеровская компонента образуется вследствие модуляции изображения частицы в рассеянном свете при движении ее через зондирующее периодическое оптическое поле. Эта компонента не зависит от взаимного положения прямого и обращенного изображений частицы на светочувствительной поверхности фотоприемника. Перекрестная доплеровская компонента  $\tilde{i}_D$  является результатом интерференции прямого и обращенного изображений частицы на светочувствительной поверхности фотоприемника. Перекрестный пьедестал  $\tilde{i}_p$  образуется в результате интерференции компонент, рассеянных частицей от одноименных падающих пучков. Составляющие  $\tilde{i}_D$  и  $\tilde{i}_p$  существуют только во временном интервале, соответствующем перекрытию прямого и обращенного изображений частицы. Из сравнения (1) и (2) видно, что пьедесталы и доплеровские компоненты фотозлектрических сигналов на выходах первого и второго фотоприемников синфазны, тогда как перекрестные пьедесталы и перекрестные доплеровские компоненты, несущие информацию о размере частицы, противофазны.

Выбором параметров оптической схемы и фотоприемников фотозлектрические сигналы на входе дифференциального усилителя балансного фотоприемника можно привести к одинаковым уровням. Тогда на выходе дифференциального усилителя  $13$  получаем разностный сигнал

$$i_{12} = i_1 - i_2 = 2\tilde{i}_D + 2\tilde{i}_p,$$

Рис. 5. Суперпозиция световых пучков на выходе призмы Волластона



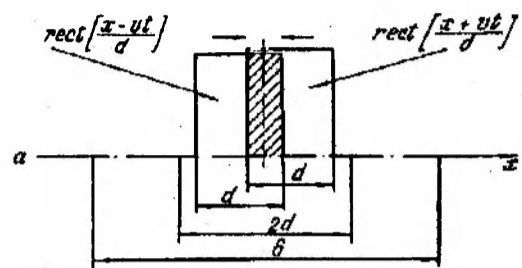


Рис. 6. Формирование результирующего сигнала

где

$$\tilde{i}_D = 2\rho \sum_{m=1}^2 E_{1k} [x + (-1)^m vt] \times \\ \times E_{2k} [x + (-1)^{m+1} vt] \cos \omega_{12} t. \quad (3)$$

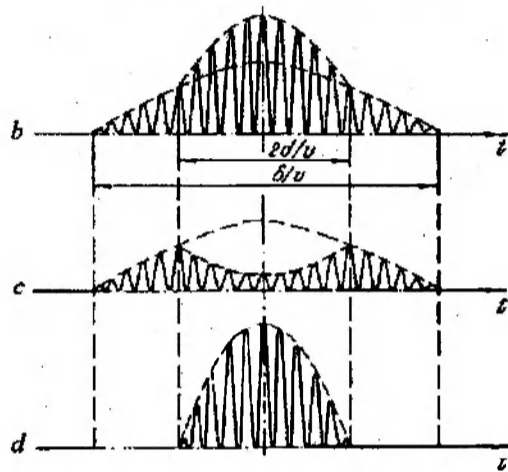


Рис. 6 иллюстрирует процесс формирования фотоэлектрических сигналов в балансном фотоприемнике и появления выходного разностного сигнала (*a* — встречное движение прямого и обращенного изображений частицы на фоточувствительной поверхности фотоприемника, *b* и *c* — фотоэлектрические сигналы в каналах балансного фотоприемника, соответствующие преобразованию проекций векторов поля на осях  $\xi$  и  $\eta$  призмы Волластона). Как видно из рис. 6, длительность разностного радиоим-

пульса (*d*), равная времени перекрытия, пропорциональна удвоенному размеру рассеивающей частицы. Разностный сигнал поступает на электронный блок обработки 14, где измерителем 15 определяется длительность радиоимпульсов, а измерителем 16 — значение скорости движения рассеивающей частицы. На выходе перемножителя 17 получаем произведение длительности радиоимпульса на половину измеренного значения скорости, равное размеру рассеивающей частицы по оси  $x$  (см. рис. 4). В ситуации, когда размер частицы превышает размер зондирующего поля  $\delta$ ,  $d > \delta$ , выделяются импульсы, соответствующие перекрытию передних и задних границ прямого и обращенного изображений, и измеряется временной интервал между этими импульсами. На рис. 7 представлены реальные сигналы, полученные для частицы, размер которой составляет 1,5 $\lambda$ . Соответствие сигналов рисунку показано *b*, *c*, *d* (фотографии получены В. А. Павловым).

Ориентация на использование в системах оптической диагностики перспективной элементной базы определяет не только технические решения, но и функциональные возможности измерительных устройств. В частности, это

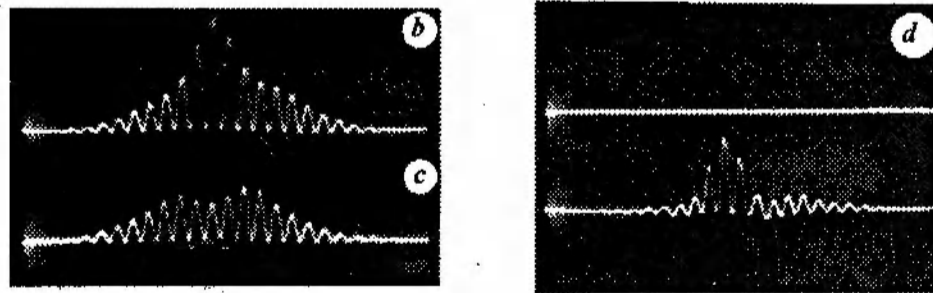


Рис. 7. Реальные фотоэлектрические сигналы

относится к полупроводниковым лазерам (ПЛ). При очевидных достоинствах для ПЛ характерны некоторые свойства, затрудняющие непосредственное применение в оптических измерительных системах (например, в лазерной доплеровской анемометрии) и требующие деликатного обращения. К ним относятся: широкая диаграмма направленности лазерного пучка, узкий рабочий диапазон токов накачки, сильная зависимость модового состава и спектральной полосы излучения от тока накачки и температуры. В описанном в [24] полупроводниковом ЛДА с парафазным принудительным стробированием измерительных каналов эта зависимость не исключена, что существенно ограничивает точностные характеристики. Еще в большей мере эти ограничения присущи другим оптическим схемам полупроводникового ЛДА (например, [25]).

Полупроводниковая лазерная анемометрия развивается в направлении поиска схемных решений, компенсирующих указанные ограничения. Снижение зависимости результатов измерений от флуктуации длины волны излучения ПЛ достигается как за счет стабилизации температуры и тока накачки лазерного диода, так и введением в измерительную систему компенсирующих дисперсионных оптических элементов, функции которых в оптических схемах может выполнять дифракционный лучевой расщепитель [26, 27].

В физической модели, на которой базируются различные реализации систем обработки (процессоров) доплеровского сигнала счетно-импульсного типа [28, 29], исходят из того, что огибающая сигнала соответствует пространственному распределению интенсивности в зондирующем поле, дискретизированному движущимися рассеивающими частицами. На сигнал наложен аддитивный шум, складывающийся из дробового шума, обусловленного квантовым характером оптических полей, шума фотоприемника, усилителя и т. д. Доплеровский сдвиг частоты оценивается по пересечениям контрольного нулевого уровня в моменты, когда огибающая сигнала превышает установленный в соответствии с уровнем шума порог. Операция оценки качества сигнала выполняется формирователем последовательностей счетных и строб-импульсов. Эти последовательности подвергаются интегрированию для получения значения средней скорости и аналоговой демодуляции с целью выделения информации о пульсациях скорости.

Критичность счетно-импульсных систем ЛДА к шумам приводит к необходимости высококачественной предварительной фильтрации доплеровского сигнала. В счетно-импульсном процессоре, описанном в [5, 13], зависимость погрешности измерений от качества фильтрации сигнала сильно уменьшена за счет дифференциального адаптивного формирования счетных и строб-импульсов [30].

В технике ЛДА интенсивное развитие получили следящие системы обработки сигнала с фазовой (ФАП, ФАПЧ) [28, 29] и с частотной (ЧАП) автоподстройкой частоты, автоматически выполняющие узкополосную фильтрацию сигнала в заданном диапазоне доплеровских частот.

Обеспечение необходимой точности измерений и хороших динамических характеристик налагает определенные требования на относительный уровень шумов в сигнале. Компромисс легче всего достигается, если следящий процессор сопряжен с оптической системой, обеспечивающей высокую эффективность использования мощности лазерного излучения (например, работающей в режиме адаптивной временной селекции компонент вектора скорости) [5, 13]. Существенное улучшение качества работы и расширение функциональных возможностей ЛДА со следящим процессором требуют поиска решений ряда проблем. К ним относятся обеспечение полностью автоматического (без участия оператора) режима работы в широком динамическом диапазоне измеряемых скоростей, что, в свою очередь, связано с выбором алгоритма поиска доплеровского спектрального пика, а также автоматической адаптацией петли слежения к характеристикам входного сигнала [31, 32]. Сюда же следует отнести реализацию возможности представления выходной



информации ЛДА в виде визуализированного в реальном времени вектора скорости [13].

Специфические проблемы возникают при разработке измерителей скорости и длины движущихся светорассеивающих поверхностей. В выпускаемых за рубежом измерителях скорости и длины (например, приборы фирм "MESSMETALLYRGI" (Германия), "THERMOSYSTEMS" (США) [5]) использованы технические решения, основанные на базовых схемах ЛДА без учета специфики задачи как в оптике (учет спекл-структуры оптического сигнала при рассеянии на движущейся поверхности), так и в электронике (обработка многочастичного сигнала с высоким уровнем фазовых шумов и низким контрастом). Разработаны технические решения измерительных схем, позволяющие повысить отношение сигнал/шум оптического сигнала [32]. Способ редукиции относительной времяпролетной ширины спектра доплеровского сигнала [33] позволяет выбирать динамический диапазон длин и скоростей, измеряемых с заданной погрешностью и быстродействием, в практических лазерных измерительных системах, предназначенных для метрологического обеспечения в производстве металлургического проката и в других отраслях промышленности, связанных с необходимостью невозмущающего контроля параметров механического движения [14, 34].

В целом ситуацию, сложившуюся в области разработки оптических методов исследования потоков, можно оценить как динамичную и плодотворную. Выделяются перспективные направления, связанные с расширением функциональных возможностей лазерных методов на измерения, наряду с кинематическими, пространственных параметров исследуемых сред, например, размеров и формы рассеивающих частиц, фазовой структуры и термодинамических характеристик, полей скорости и оптической плотности. Это, в свою очередь, позволяет привлечь мощные средства оптической обработки информации. В ряде случаев простые, надежные и сравнительно дешевые оптические процессоры могут вытеснить дорогостоящие сложные электронные системы. В сфере технической реализации лазерных измерительных систем большие резервы имеются в использовании современной оптической и электронной элементной базы, включая полупроводниковые лазеры и оптико-волоконную технику. Применение этой базы обеспечивает создание перспективных приборов, ориентированных как на научные исследования в лаборатории и природных условиях, в том числе на земле, в атмосфере, океане и космосе, так и на метрологическое обеспечение разнообразных промышленных технологий.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазерные доплеровские измерители скорости /Ю. Г. Василенко, Ю. Н. Дубнищев, В. П. Коронкевич и др.; Отв. ред. Ю. Е. Нестерихин.—Новосибирск: Наука, 1975.
2. Дюррани Т., Грейтд К. Лазерные системы в гидродинамических измерениях: Пер. с англ. /Отв. ред. А. И. Божков.—М.: Энергия, 1980.
3. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус В. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии.—М.: Наука, 1982.
4. Rudd M. J. A new theoretical model for the laser Dopplermeter // J. Scient. Instrum. Ser. 2.—1969.—2, N 1.—P. 55.
5. Дубнищев Ю. Н. Развитие функциональных возможностей когерентно-оптических методов измерения скорости // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.—1990.—Вып. 4.
6. Dubnischev Yu. N. Laser velocimeters for scientific and industrial applications.—Новосибирск, 1990.—(Препр. /ИТ СО АН СССР; 24).
7. Dubnischev Yu. N., Meledin V. G., Zhuravel F. A. et al. Laser Doppler anemometry with selection of optical signal coherent component // Opt. Applicata.—1987.—17, N 2.—P. 71.
8. Lading L. A Fourier optical model for the laser Doppler velocimeter // Opto-Electronics.—1972.—4, N 4.—P. 385.
9. Ван де Хюлст Г. Рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ.—М.: ИЛ, 1961.
10. Laser Doppler Velocimetry 2 OTSI // Catalog.—Minnesota: TSI, 1988.
11. Лазерные доплеровские анемометры: Каталог фирмы DANTEC.—Копенгаген: Electronik, 1983.

12. Dubnishchev Yu. N., Koronkevich W., Krieg W. et al. Laser-Doppler-Geschwindigkeitsmesser LADO-1 // *Jenar Rundschau*.—1978.—N 5.—P. 222.
13. Belousov P. Ya., Dubnishchev Yu. N., Meledin V. G. et al. Laser Doppler anemometer with adaptive temporal selection of the velocity vector // *Optica Applicata*.—1990.—20, N 3.—P. 187.
14. Арбузов В. А., Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н. и др. Системы оптической диагностики динамики и фазовой структуры потоков // *Сибирский физико-технический журнал*.—1992.—№ 2.
15. А. с. 1345120 СССР. Измеритель скорости /Ю. Н. Дубнищев, В. Г. Меледин, Б. И. Спектор и др.—Опубл. 1987, Бюл. № 38.
16. Kreid D. K. Laser-Doppler velocimeter measurements in nonuniform flow: error estimates // *Appl. Opt.*—1974.—13, N 8.—P. 1872.
17. Rudd M. J. The velocity measurement of phase objects // *Opto-Electronics*.—1972.—N 4.—P. 441.
18. Arбузов V. A., Belousov P. Ya., Dubnishchev Yu. N. et al. Optical systems for measuring velocity and for visualization of flow structure // *Multiphase Flows: Proc. of Intern. Conference*.—Tsukuba: University of Tsukuba, 1991.
19. Arбузов V. A., Dubnishchev Yu. N. Real-time coloured visualization of phase flows by the schlieren method // *Optics and Laser Technology*. 1.—1991.—23, N 2.—P. 118.
20. Belousov P. Ya., Dubnishchev Yu. N. The application of an optical Doppler frequency discrimination in a laser velocimeter // *Optics and Laser Technology*.—1977.—9, N 5.—P. 229.
21. Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Пальчикова И. Г. Визуализация поля скорости // *Оптика и спектроскопия*.—1982.—52, № 5.
22. Saffman. Optical particle sizing using the phase of LDA signals // *Dantec Information*.—1987.—N 5.—P. 8.
23. Adrian R. J., Orloff K. L. Laser Doppler signal: visibility characteristics and application to particle size // *Appl. Opt.*—1977.—16, N 3.—P. 677.
24. Dopheide D., Pfeifer H. J., Taux G., Faber M. Multi component laser Doppler anemometers with high-frequency pulsed diode lasers // *Proc. of the International Conference on Fluid Dynamic Measurement and its Applications*.—Beijing: Pergamon Press, 1989.
25. Jenthink H. W., de Mul F. F. M., Suichies H. E. et al. Small laser Doppler velocimeter based on the self mixing effect in a diode laser // *Appl. Opt.*—1988.—27, N 2.—P. 379.
26. Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Меледин В. Г. Оптический измеритель скорости на основе полупроводникового лазера // *Квантовая электрон.*—1988.—15, № 3.
27. Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н. Лазерное устройство для измерения скорости движения поверхностей // *Квантовая электрон.*—1986.—№ 12.
28. Дубнищев Ю. Н., Коронкевич В. П., Соболев В. С. Лазерная интерферометрия.—Новосибирск: Наука, 1983.
29. Лазерная анемометрия. Дистанционная спектроскопия и интерферометрия: Справочник /В. П. Клочков, Л. Ф. Козлов, И. В. Потыкевич и др. /Под ред. М. С. Соскина.—Киев: Наук. думка, 1985.
30. А. с. 1525579 СССР. Устройство для обработки сигнала лазерного доплеровского анемометра /Ю. Н. Дубнищев, В. Г. Меледин.—Опубл. 1989, Бюл. № 44.
31. А. с. 1569715 СССР. Лазерный доплеровский измеритель скорости /Ю. Н. Дубнищев, В. Г. Меледин.—Опубл. 1990, Бюл. № 21.
32. Belousov P. Ya., Dubnishchev Yu. N., Meledin V. G. An optical velocimeter on the basis of a semiconductor laser // *Modern Techniques and Measurements in Fluid Flows: Proc. Int. Conf.*—Beijing: Pergamon Press, 1989.—P. 503.
33. А. с. 1610438 СССР. Устройство для измерения скорости и длины объекта /Ю. Н. Дубнищев, В. Г. Меледин.—Опубл. 1990, Бюл. № 44.
34. Belousov P. Ya., Dubnishchev Yu. N., Meledin V. G. Optical velocimeters for moving surfaces using gas and semiconductor lasers // *Optics and Laser Technology*.—1990.—N 6.—P. 335.

Поступила в редакцию 28 января 1994 г.