

## ЛИТЕРАТУРА

1. Vann M. A. Self-scanned photodiode arrays — characteristics and application.— Optics and Laser Technol., 1974, vol. 17, p. 209—215.
2. Jwadata K., Oguchi O., Asaoka T., Morino A. Design and fabrication of MOS-image sensor for facsimile.— Rev. of the Electr. Comm. Labor., 1977, vol. 25, N 5-6, p. 455.
3. Weekler G. P. Operation of  $p-n$  junction photodetectors in a photon flux integrating mode.— IEEE J. of Solid-State Circuits, 1967, vol. SC-2, N 3, p. 65.
4. Казимиров А. Ю., Мочалкина О. Р. Анализ фотоэлектрических характеристик МДП-фотодиода в режиме накопления заряда.— Радиотехника и электроника, 1978, т. XXIII, № 8.
5. Ильин В. Н., Коган В. Л., Камнева Н. Ю., Котульский М. А., Попов В. З. Инструкция по использованию программы «АРОПС».— М.: МАИ, 1977.
6. Кроуфорд Р. Схемные применения МОП-резисторов.— М.: Мир, 1970.

*Поступила в редакцию 17 июля 1981 г.;  
окончательный вариант — 30 сентября 1982 г.*

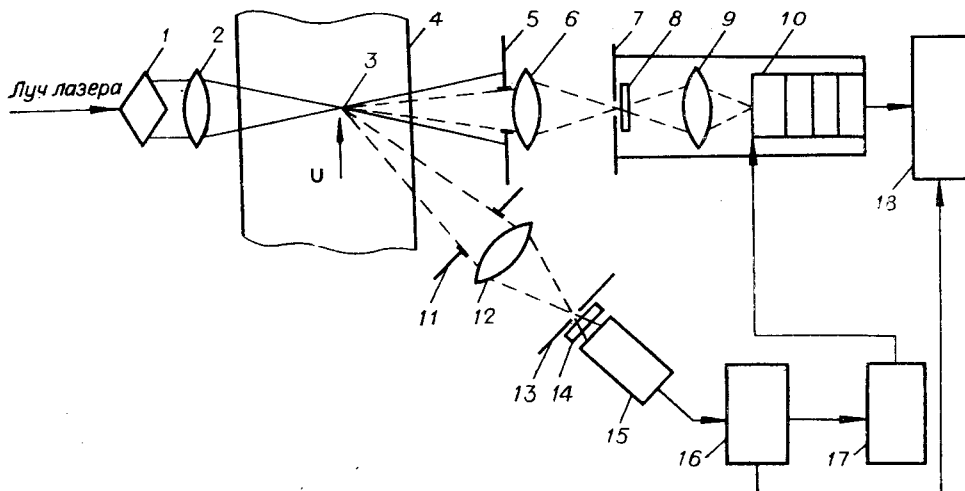
УДК 533.608

**Г. И. АПОНИН, А. А. БЕСШАПОШНИКОВ, О. Б. БРАГИНА**  
(Троицк Московской)

### НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ СКОРОСТИ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ЛАЗЕРНЫМ АНЕМОМЕТРОМ С СОВМЕСТНЫМ ПРИМЕНЕНИЕМ ЭОП И ФЭУ

Существующие лазерные доплеровские измерители скорости (ЛДИС) по способу выделения доплеровского сдвига частоты (ДСЧ) можно разделить на приборы гетеродинного и спектрального типов [1—3]. Ниже рассматриваются некоторые особенности ЛДИСа, в котором впервые выделение сигналов ДСЧ осуществляется непосредственно ЭОП, управляемым импульсами ФЭУ [4]. Такая система в значительной степени совмещает достоинства приборов обоих типов: высокую чувствительность и широкий диапазон.

Блок-схема устройства, представленная на рисунке, работает следующим образом. Излучение лазера расщепляется светоделителем 1 на два равных луча. Линза 2 фокусирует лазерные лучи, образуя измерительный объем 3 в канале 4 с исследуемым газовым потоком (ГП). Часть лазерного излучения, рассеянного на микрочастицах, пролетающих через



измерительный объем, направляется объективом 6 с апертурной диафрагмой 5 на точечную диафрагму 7, проходит через светофильтр 8 и объективом 9 фокусируется в виде точечного изображения на входном фотокатоде 10 ЭОП. Другая часть рассеянного лазерного излучения, собираемого под некоторым углом, поступает через объектив 12 с апертурной диафрагмой 11, точечную диафрагму 13 и светофильтр 14 на фотокатод 15 ФЭУ. Блок 16 формирует импульсы, передний фронт которых соответствует начальной части времени пролета микрочастицы через измерительный объем. Эти импульсы запускают затвор и горизонтальную развертку ЭОП. Кроме того, блок 16 выдает импульсы управления работой фоторегистратора 18. Блок 17 вырабатывает затворные импульсы, горизонтальную и вертикальную развертки ЭОП.

При появлении сигнала ФЭУ в начальный момент пролета микрочастицы через измерительный объем происходит срабатывание затвора и горизонтальной развертки ЭОП. Точечное оптическое изображение частицы на фотокатоде ЭОП регистрируется в растровом режиме в виде отдельных строк с яркостной модуляцией на выходном экране ЭОП.

Отметим наиболее существенные особенности работы рассматриваемого ЛДИСа.

1. В ЭОП полную информацию об оптическом сигнале, поступающем на его входной фотокатод, несет поток фотоэлектронов, использующийся непосредственно для усиления и восстановления изображения сигналов на выходном экране ЭОП. Максимально возможная частота регистрируемого сигнала однозначно определяется временем прохождения электронным пучком одного разрешаемого элемента изображения на выходном экране ЭОП:

$$t_p = td/l,$$

где  $t_p$  — временное разрешение ЭОП в выбранном режиме работы,  $t$  — длительность горизонтальной развертки ЭОП,  $d$  — диаметр разрешаемого элемента, соответствующий сфокусированному точечному изображению на выходном экране ЭОП,  $l$  — длина горизонтальной развертки на выходном экране ЭОП.

При развертке точечного изображения сигнала времена разгорания и послесвечения люминофоров промежуточных и выходного экранов многокаскадного ЭОП не влияют на временное разрешение. С помощью качественных объективов нетрудно получить оптическое изображение диаметром  $\approx (50 \div 100)$  мкм. При наносекундных и субнаносекундных длительностях горизонтальной развертки ЭОП это соответствует временному разрешению  $\approx 10^{-12} \div 10^{-13}$  с. Практически для  $d \approx 0,1$  мм,  $t \approx 30 \cdot 10^{-9}$  с и  $l \sim 30$  мм имеем временное разрешение ЭОП  $\approx 1 \cdot 10^{-10}$  с, что согласуется с частотой регистрируемых сигналов  $\approx 1 \cdot 10^{10}$  Гц. Это дает возможность измерять скорости ГП в зависимости от геометрии ЛДИСа  $\approx 1 \cdot 10^4$  м/с.

2. Нижняя граница выделяемых на ЭОП сигналов ДСЧ при  $t$  порядка нескольких секунд составляет доли герца, что соответствует измеряемым скоростям ГП величиной до десятых долей миллиметра в секунду. Практически значение  $f_d$  находится при известных  $t$ ,  $l$  и длине  $l_d$  записываемого на экране ЭОП периода сигнала ДСЧ:

$$f_d = l/l_d t.$$

3. В ФЭУ полезный сигнал наблюдается на фоне шумов, собираемых со всего фотокатода ФЭУ. В ЭОП полезный сигнал получается в виде точки в пределах разрешаемого элемента, и шумы собираются только с этого элемента. Уже при длительности регистрируемого процесса менее  $10^{-3}$  с ЭОП является практически бесшумовым прибором, а минимально регистрируемый сигнал для многокаскадного ЭОП равен отдельному фотоэлектрону, вылетевшему из входного фотокатода [5]. Поскольку отношение сигнал/шум ЭОП значительно выше, чем ФЭУ, это

равносильно повышению чувствительности регистрации сигналов ДСЧ по сравнению с ЛДИСами, в которых используются ФЭУ.

4. Длительность измерений в рассматриваемом ЛДИСе определяется выбранным способом регистрации сигналов на фото пленку; при этом:

а) имеется режим непрерывной протяжки фото пленки с помощью фоторегистратора осциллограмм ФОР-2; скорость протяжки фото пленки устанавливается с учетом длительности послесвечения ЭОП и минимально возможных интервалов времени между пролетами микро частиц через измерительный объем (так, для широко используемого ЭОП типа УМИ-93Ш с временем послесвечения  $\approx 1 \cdot 10^{-3}$  с возможна регистрация сигналов с частотой повторения между ними  $f_{\text{п}} \approx 1$  кГц);

б) при высоких концентрациях микро частиц, когда  $f_{\text{п}} \geq 1 \cdot 10^3$  Гц, целесообразно применение растровой записи сигналов с вертикальной разверткой ЭОП, длительность которой выбирается с учетом необходимости исключения взаимных наложений соседних строк для заданных параметров ГП и ЛДИСа. Частота фотосъемки отдельных кадров фоторегистратором ФОР-2 может быть  $\approx 1 \div 2$  Гц.

В обоих рассмотренных случаях регистрируются не только мгновенные скорости ГП, соответствующие временам пролета отдельных микро частиц через измерительный объем, но и временные интервалы между пролетами этих микро частиц, что позволяет с помощью известных параметров измерительного объема оценить концентрацию микро частиц.

В многочастичном режиме работы ЛДИСа, когда в измерительном объеме всегда имеется более одной микро частицы, выделение сигналов ДСЧ обеспечивается при срабатывании ЭОП от внешнего генератора запускающих импульсов с частотой повторения, которая зависит от условий эксперимента. При этом возможно применение обоих способов фоторегистрации. Отметим, что в многочастичном режиме работы ЛДИСа точные измерения скорости затруднены, поскольку выделяемые сигналы представляют собой суперпозицию независимых сигналов от каждой из одновременно находящихся в измерительном объеме микро частиц [2].

5. Параметры измеряемого объема, выбираемого при измерениях, определяются приемной оптической системой, относящейся к ФЭУ. Достоинством такой системы является возможность выбора требуемой части измерительного объема путем изменения параметров приемной оптики ФЭУ (угол наблюдения, апертура ФЭУ и др.). На ЭОП поступает рассеянный свет в угловой апертуре, симметричной относительно биссектрисы угла схождения лазерных лучей. Это обеспечивает одинаковый вклад в рассеяние от каждого зондирующего лазерного пучка для сферически симметричных частиц.

6. Запуск ЭОП осуществляется только в начальной стадии пролета микро частицы через измерительный объем, что существенно снижает требования к широкополосности усилителя сигналов ФЭУ по сравнению с обычным режимом выделения ДСЧ с помощью ФЭУ. Требуемая широкополосность тракта ФЭУ зависит от частоты  $f_{\text{п}}$  следования микро частиц через измерительный объем и находится с учетом скорости ГП, концентрации микро частиц и параметров ЛДИСа. Более широкополосный тракт требуется для высокоскоростных ГП с большими концентрациями микро частиц. Так, для скорости потока  $U \approx 1 \cdot 10^3$  м/с при пространственном периоде интерференционного поля  $\delta \approx 10$  мкм, числе полос  $N \approx 10$  и временных интервалах между отдельными сигналами ДСЧ, примерно равных времени пролета микро частиц через измерительный объем (режим работы, близкий к многочастичному), имеем  $\tau_{\text{в}} \leq \delta N / U \approx 1 \cdot 10^{-7}$  с. При известной паразитной емкости  $C_{\text{п}}$  (с учетом емкости монтажа и входа усилителя ФЭУ) сопротивление нагрузки ФЭУ определяется как  $R_{\text{н}} \leq \tau_{\text{в}} / 3C_{\text{п}}$ . Для приведенного выше случая при  $C_{\text{п}} \approx 10 \div 30$  пФ  $R_{\text{н}} \leq 1$  кОм. В то же время для сохранения формы сигнала ДСЧ необходима полоса пропускания усилителя ФЭУ  $f_{\text{д}} \approx 100$  МГц, что требует  $R_{\text{н}} \approx 50 \div 100$  Ом независимо от значения  $f_{\text{п}}$ .

Для большинства наиболее важных случаев исследований ГП с пульсациями  $\leq 100$  кГц [2] время восстановления  $\tau_v$  может достигать нескольких микросекунд. Это позволяет выбирать  $R_n$  более высокоомным, т. е. получать большее значение уровня сигнала ФЭУ при меньшей широкополосности его усилительного тракта.

Условием нормального запуска ЭОП можно считать такую задержку его срабатывания относительно начала пролета микрочастицы через измерительный объем, которая обеспечивает выделение основной части сигнала ДСЧ. Длительность переднего фронта  $\tau_{пф}$  запускающего импульса может быть порядка нескольких периодов сигнала ДСЧ, а длительность заднего фронта —  $\tau_{зф} \leq \tau_v$ .

В действующем макете ЛДИСа использованы ЭОП типа УМИ-93Ш и ФЭУ-79. При длительности горизонтальной развертки ЭОП  $0,2$  мкс  $\div$   $20$  мс обеспечивается регистрация сигналов ДСЧ, соответствующая измеряемым скоростям  $\approx 1 \cdot 10^{-2} \div 5 \cdot 10^2$  м/с при использовании гелий-неонового лазера (длина волны излучения  $0,6328$  мкм, мощность излучения  $\geq 0,05$  Вт). Применение аргонового лазера (длина волны излучения  $0,488$  или  $0,5145$  мкм, мощность излучения  $\geq 0,2$  Вт) обеспечивало измерение скорости в пределах  $\approx 1 \cdot 10^{-2} \div 2 \cdot 10^3$  м/с. Указанным ЛДИСом выполнялись измерения скорости дозвукового диапазона в ГП с естественными и калиброванными микрочастицами  $Al_2O_3$  размером  $0,5 \div 1,5$  мкм.

Погрешность измерений ЛДИСа определяется линейностью горизонтальной развертки ЭОП, погрешностью калибровки ее длительности, геометрическими искажениями ЭОП и погрешностью определения угла схождения лазерных лучей. При тщательном учете указанных параметров погрешность измерений каждого из мгновенных значений измеряемой скорости, соответствующих записи сигналов ДСЧ на отдельных строках экрана ЭОП, не превышает  $\approx 1\%$ .

Таким образом, несмотря на определенную сложность ЛДИС, работающий совместно с ЭОП и ФЭУ, является перспективным высокочувствительным прибором с чрезвычайно широким диапазоном регистрируемых сигналов ДСЧ, обладающим высоким временным и пространственным разрешениями.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ринквичюс Б. С. Лазерная анемометрия.— М.: Энергия, 1978.
2. Дюррани Т., Грейтид К. Лазерные системы в гидродинамических измерениях.— М.: Энергия, 1980.
3. Климкин В. Ф., Папырин А. Н., Солоухин Р. И. Оптические методы регистрации быстротекающих процессов.— Новосибирск: Наука, 1980.
4. Анонин Г. И., Бешапашников А. А., Брагина О. Б., Кулаков Д. М. Лазерно-доплеровский измеритель скорости. (Автор. свид-во № 701259).— БИ, 1980, № 39.
5. Электронно-оптические преобразователи, усилители лучистых потоков и диссекторы для научных исследований: Справочник/Под ред. Б. М. Степанова.— М.: Атомиздат, 1977.

Поступила в редакцию 18 декабря 1980 г.;  
окончательный вариант — 10 октября 1982 г.