

ЛИТЕРАТУРА

1. Папырин А. Н., Солоухин Р. И. Развитие методов лазер-доплеровских измерений скорости с прямым спектральным анализом.— В кн.: Методы лазерной диагностики однофазных и многофазных течений. [Материалы междунар. школы-семинара]. Минск: изд. ИТМО БССР, 1978.
2. Алхимов А. П., Бойко В. М., Папырин А. Н., Солоухин Р. И. О диагностике сверхзвуковых двухфазных потоков по рассеянному лазерному излучению.— ПМТФ, 1978, № 2.
3. Ринкевичюс Б. С., Толкачев А. В. Оптический доплеровский измеритель скорости газовых потоков.— Квант. электроника, 1974, т. 1, вып. 9.
4. Paul D. H., Jackson D. A. Measurement of Supersonic Velocity and Turbulence by Laser Anemometry.— J. of Phys. E.: Scientific Instrum., 1971, vol. 4, N 3.
5. Алхимов А. П. и др. Лазерный доплеровский измеритель скорости для исследования быстрых газодинамических потоков.— ФГВ, 1973, № 4.
6. Алхимов А. П., Папырин А. Н. Быстродействующие сканирующие устройства в схемах ЛДИС.— В кн.: Оптические методы исследований газовых потоков. [Материалы II Всесоюз. конф. по методам аэродинамических исследований. Новосибирск]. Минск: изд. ИТМО АН БССР, 1979.
7. Avidor J. H. Novel Instantaneous Laser — Doppler Velocimeter.— Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 2.
8. Белоусов П. Я., Дубнищев Ю. Н., Павлов В. А. Измеритель скорости с оптическим дискриминатором доплеровской частоты.— Опт. и спектр., 1977, т. 43, вып. 4.
9. Бойко В. М., Папырин А. Н., Поплавский С. В. Быстродействующий лазерный доплеровский измеритель скорости с прямым спектральным анализом.— Опт. и спектр., 1980, т. 48, вып. 2.
10. Алхимов А. П., Папырин А. Н., Предеин А. Л. Особенности применения оптических методов визуализации для исследования высокоскоростных двухфазных потоков.— В кн.: Методы лазерной диагностики однофазных и многофазных течений. Минск: изд. ИТМО БССР, 1978.
11. Кутателадзе С. С., Миронов Б. П., Накоряков В. Е., Хабахпашева Е. М. Экспериментальное исследование пристенных турбулентных течений.— Новосибирск: Наука, 1975.
12. Бакрунов А. О. и др. Голографический метод определения поля скоростей дисперсной фазы двухфазного потока.— В кн.: Итоги науки и техники. Сер. Механика жидкости и газов. Т. 1. М.: ВИНТИ, 1980.
13. Iwata K., Nakoshima T., Nagata R. Measurement of Flow Velocity Distribution by Means of Double-Exposure Holographic Interferometry.— JOSA, 1977, vol. 67, N 8.
14. Ewan V. C. R. Holographic Particle Velocity Measurement in the Fraunhofer Plane.— Appl. Opt., 1979, vol. 18, N 5.
15. Гудмен Дж. Введение в фурье-оптику.— М.: Мир, 1970.
16. Hecht G. T., Steel G. V., Oppenheim A. K. High-Speed Stroboscopic Photography Using a Kerr-Cell Modulated Laser Source.— ISA Trans., 1966, vol. 5, N 2.
17. Кузюкова Т. А. и др. Исследование импульсного ОКГ на неодимовом стекле в режиме периодической модуляции добротности.— ЖТФ, 1974, т. 44, № 4.
18. Бойко В. М., Клишкин В. Ф. Лазерный источник света с периодической модуляцией добротности электрооптическим затвором Керра.— В кн.: Оптические методы исследования газовых потоков. [Материалы II Всесоюз. конф. по методам аэрофизических исследований. Новосибирск]. Минск: изд. ИТМО АН БССР, 1979.
19. Яненко Н. Н., Солоухин Р. И., Папырин А. Н., Фомин В. М. Сверхзвуковые двухфазные течения в условиях скоростной неравновесности частиц.— Новосибирск: Наука, 1980.

Поступила в редакцию 26 января 1981 г.

УДК 533.6.071.08.532.57

**С. Н. АНТОНОВ, В. М. ЛИТВИНОВ, В. В. ПРОКЛОВ,
В. В. СКВОРЦОВ, А. Н. ФИЛАТОВ**

(Москва)

АКУСТООПТИЧЕСКИЕ РАСЩЕПИТЕЛИ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ СИСТЕМЕ ЛДИС

В настоящее время созданы и используются образцы лазерных доплеровских измерителей скорости (ЛДИС), применение которых обеспечивает бесконтактное измерение скорости потока в аэродинамических трубах (см., например, [1]) с высокой точностью ($\sim 0,1\%$), с большим пространственным (до 0,05 мм) и временным (до сотен тысяч измерений

в секунду) разрешением. Разрабатываются системы ЛДИС, которые могут измерять не только величину компонент скорости, но и их знак, что представляет интерес при исследовании параметров сложных вихревых течений, а также сильно турбулентных потоков, в которых пульсационные составляющие скорости могут превышать среднюю скорость потока.

Определение знака измеряемой составляющей скорости осуществляется благодаря использованию в схеме ЛДИС ячейки, создающей частотный сдвиг света в зондирующих лазерных пучках, приводящий к формированию измерительного объема с «бегущими» интерференционными полосами. Выбор величины сдвига частоты света обусловлен скоростными и пульсационными характеристиками исследуемых потоков, а также параметрами применяемых для обработки доплеровского сигнала электронных блоков. В типичных аэродинамических экспериментах требуемый частотный диапазон составляет от 1 до 40 МГц, что обеспечивает использование как электронной аппаратуры дискретного счета (частотный диапазон 0,1—10 МГц), так и аппаратуры непрерывного слежения за частотой доплеровского сигнала (5—100 МГц).

Существенным требованием к элементам ЛДИС, и в частности к ячейкам для сдвига частоты, является требование минимума потерь света, что важно для получения высокой точности измерений при ограниченной мощности лазера. В связи с этим наиболее перспективным оказываются акустооптические ячейки на основе дифракции Брэгга, причем вариант с равным делением интенсивности исходного луча между дифрагированным и недифрагированным лучами позволяет совместить в одном элементе пространственный расщепитель и частотный модулятор излучения.

При выборе акустооптического (АО) материала для звукопровода ячейки учитываются такие требования, как реализация достаточно большого угла θ отклонения дифрагированного луча для разделения лучей без использования дополнительной оптики, обеспечение термостабильности угла отклонения и частоты сдвига, зависящих от акустических и фотоупругих свойств звукопровода, низкая потребляемая электрическая мощность. Этим требованиям, как известно, удовлетворяет монокристалл парателлурида TeO_2 . Он имеет большое значение АО-качества ($M_2 \approx 10^3 \text{ с}^3/\text{г}$), определяющего величину управляющей мощности, подводимой к устройству, уникально низкое значение скорости сдвиговой акустической волны в направлении [110] ($v_s = 0,617 \cdot 10^5 \text{ см/с}$), что упрощает получение больших углов θ , умеренную величину затухания ультразвуковых волн (2,3 дБ/см на частоте 100 МГц), высокую оптическую однородность при достаточно больших размерах образцов (не менее $15 \times 15 \times 20 \text{ мм}^3$).

Проведенные исследования показали, что преимущества, которые дает использование кристалла парателлурида в качестве звукопровода АО-ячеек, могут быть реализованы только при выполнении определенных конструктивных и технологических условий. Эти условия были внедрены в ячейке, общий вид и схема которой показаны соответственно на рис. 1, а и б. В данной ячейке АО-кристалл 1 представляет собой параллелепипед, вырезанный из булы TeO_2 и ориентированный по осям [001], [110], [110]. В качестве пьезопреобразователя ультразвуковых волн (УЗВ) 2 используется кристалл LiNbO_3 ($Y + 163$)°-среза. К торцу АО-кристалла приклеен поглотитель звука 3, обеспечивающий в кристалле режим бегущей волны. Анизотропия свойств TeO_2 [2] определяет высокие требования к ориентировке и обработке кристалла. Звукопровод вырезался и обрабатывался таким образом, что отклонение направления [110] от нормали к соответствующим торцам не превышало $10''$. Низкий акустический импеданс TeO_2 затрудняет выбор материала для поглотителя. Для того чтобы в этих условиях обеспечить низкий уровень отраженных акустических волн (не более -30 дБ), поглотитель 3 был выполнен в виде призмы из TeO_2 , причем ее основание перпендикулярно

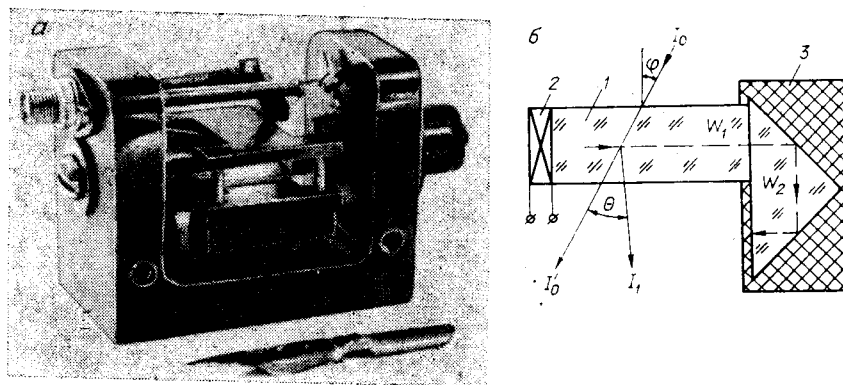


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б) АО-ячейки:

I_0 , I_1 и I_2 — падающий, прошедший и дифрагированный лучи; W_1 и W_2 — ультразвуковая волна в АО-кристалле и поглотителе; φ — угол падения; θ — угол дифракционного расщепления светового луча.

к направлению [110]. Часть основания призмы находится в акустическом контакте с АО-кристаллом, а остальные грани залиты поглощающим материалом (эпоксидная смола). Принцип работы такого поглотителя основан на том, что звуковая волна практически без отражения поступает в объем призмы, где, испытывая многократные отражения, поглощается. Поглощающее устройство имело коэффициент отражения акустической волны не более -30 дБ для призмы с длиной 15 мм, шириной 7 мм, углом при основании 45° .

Особое внимание было уделено технологии акустических контактов между пьезопреобразователем, АО-кристаллом и поглощающим устройством. В данной ячейке для контакта применялся эфир $C_2H_2O_2$, который в твердом состоянии представляет собой кристалл, что определяет малые потери на склейке. Поскольку температура плавления этого вещества $100^\circ C$, для склеивания не требовалось чрезмерного нагрева АО-кристалла и обеспечивалась работоспособность ячейки в необходимом диапазоне температур.

Для снижения коэффициента отражения света от ячейки кристалл был просветлен, причем в качестве покрытия использовался SiO_2 , показатель преломления которого равен $n = 1,47$, а величина n^2 близка к показателю преломления TeO_2 . Просветляющие покрытия наносили электронно-лучевым распылением. Это позволило снизить коэффициент отражения света при $\lambda = 0,514$ мкм до 1%.

Различные варианты разработанных ячеек перекрывают частотный диапазон от 4,5 до 40 МГц, причем в случае деления интенсивности оптического излучения пополам потребляемая электрическая мощность лежит в пределах от 0,1 до 0,3 Вт. Акустооптические ячейки, работающие в диапазоне сдвига частот 4,5—10 МГц, предпочтительнее использовать в системах ЛДИС дискретного счета при исследовании турбулентных дозвуковых течений с естественной запыленностью или малой насыщенностью течения аэрозолем. Ячейки, обеспечивающие сдвиг частоты света в диапазоне от 17 до 40 МГц, нашли применение в системах ЛДИС непрерывного слежения за чистотой для задач исследования трансзвуковых и сверхзвуковых потоков с искусственным запылением аэрозолем. Разработанные образцы АО-ячеек были использованы в системах ЛДИС для исследований в промышленных аэродинамических установках.

На рис. 2 представлена схема формирующей оптической части двухкомпонентного двухцветного ЛДИС. Схема содержит аргоновый лазер 1, многопроходной призмный цветоделитель 2, зеркало M , 3, АО-ячейку 4, питаемую от эталонного генератора через усилитель, блок регулируемых

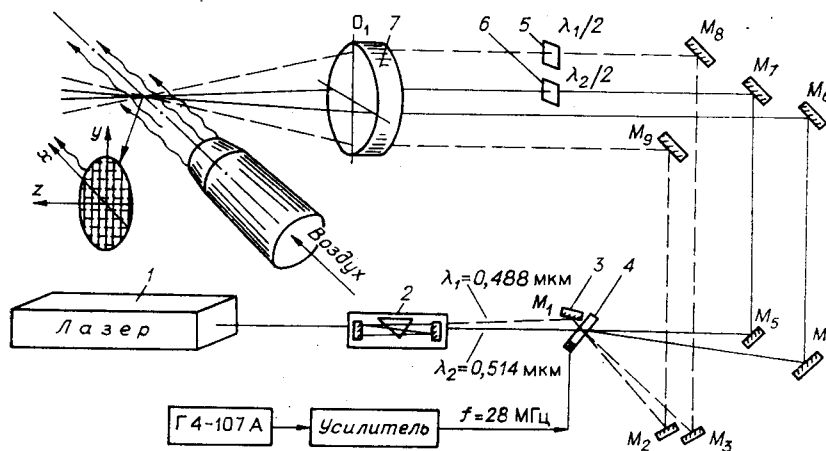


Рис. 2. Оптическая схема двухкомпонентного ЛДИС с акустооптическим расщепителем.

зеркал $M_2 - M_9$, две полуволновые пластинки 5, 6, фокусирующий объектив 7. Использовался аргоновый лазер в интегральном режиме работы. Призмный многопроходный цветоделитель позволяет получать необходимое пространственное разделение лучей с длиной волны $\lambda_1 = 0,488$ мкм и $\lambda_2 = 0,514$ мкм. После призмного цветоделителя каждый из двух лучей попадает на АО-ячейку под своим брэгговским углом, обеспечивающим 50%-ное деление мощности каждого исходного луча. Анизотропные свойства кристаллов парателлуриата в разработанных АО-ячейках (для частот УЗВ 20—30 МГц) позволяют осуществить 50%-ный режим дифракции как при $\varphi = 2 - 3^\circ$, так и при $\varphi = 17 - 20^\circ$ (см. рис. 1, б). Благодаря этому свойству АО-ячеек в данной схеме (см. рис. 2) был осуществлен такой режим 50%-ной дифракции, когда для λ_1 имели $\varphi = 2 - 3^\circ$, а для λ_2 — угол $\varphi = 17 - 20^\circ$ при одной и той же мощности УЗВ. Акустооптическое взаимодействие в кристалле парателлуриата приводит к повороту плоскости поляризации в дифрагированном луче на 90° по отношению к недифрагированному, поэтому для получения интерференционной картины применялись соответствующие полуволновые пластинки 5, 6 (см. рис. 2). На выходе из АО-ячейки образуются четыре световых луча, которые с помощью зеркал $M_2 - M_9$ и объектива O_1 формируют два взаимно перпендикулярных «бегущих» интерференционных поля разного цвета, что обеспечивает однозначное разделение каналов измерения двух компонент скорости. Измерительный объем имел диаметр (по уровню e^{-2}) ≈ 150 мкм.

Отличительной особенностью описанной схемы ЛДИС от известных [3—6] является применение одной АО-ячейки для одновременного расщепления двух световых пучков с разной длиной волны. Такое схемное и конструктивное решение позволяет наиболее эффективно использовать мощность аргонового лазера и характеризуется малыми потерями света как на АО-ячейке, так и на всех оптических элементах. Возбуждение АО-ячейки осуществлялось на частоте 28 МГц, при этом потребляемая мощность не превышала 0,2 Вт.

На рис. 3, а, б приведены результаты измерений скоростных и пульсационных параметров сверхзвукового течения, проведенных с помощью описанной системы ЛДИС. Сверхзвуковое сопло с центральным телом и с отношением площадей критического сечения и среза сопла, соответствующим $M = 1,1$, формировало затопленную струю с перасчетностью ~ 1 . Диаметр сопла на срезе d был равен 12 мм. Струйное течение насыщалось аэрозолем (конденсировавшимися парами масла) с преобладающим размером частиц 0,5 мкм. Концентрация аэрозоля поддерживалась такой, чтобы обеспечивалась частота поступления сигналов $\sim 10^5$ 1/с.

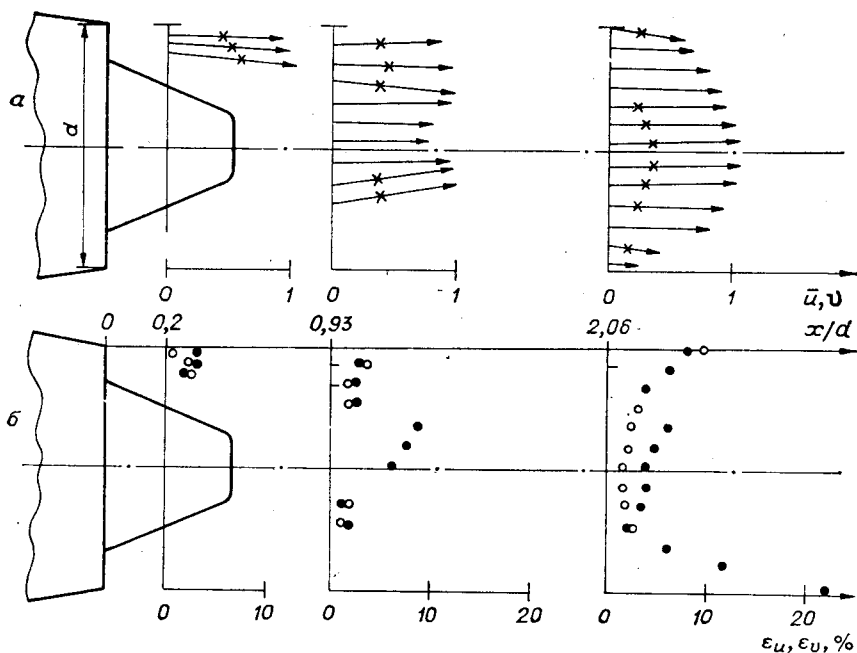


Рис. 3. Результаты измерений скоростных и пульсационных параметров сверхзвукового течения:

a — $\bar{u} = u/a_{кр}$ — приведенная средняя компонента продольной скорости (сплошные стрелки), $\bar{v} = v/a_{кр}$ — приведенная векторная величина скорости течения (стрелки, отмеченные крестиком), $a_{кр}$ — скорость звука в критическом течении при $T_0 = 278^\circ$; b — ϵ_u и ϵ_v — интенсивность пульсаций (в %) продольной и поперечной компонент скорости соответственно, черные кружки — $\epsilon_u = \sqrt{u'^2}/\bar{u}$, светлые — $\epsilon_v = \sqrt{v'^2}/\bar{v}$.

Анализ доплеровского сигнала и измерение его частоты проводились с помощью электронной аппаратуры непрерывного слежения за частотой [7]. Измерение компонент скорости выполнялось поочередно путем перемещения непрозрачного флажка, перекрывающего пару синих или пару зеленых лучей. Как видно из рис. 3, a , за центральным телом на относительном расстоянии $x/d = 0,93$ проявляется небольшая зона «проседания» профиля скорости, которое ниже по течению быстро восстанавливается и при $x/d = 2,06$ не выявляется. Исследования показали, что пульсационная составляющая поперечной компоненты скорости в 2,5 раз превосходит ее среднюю величину в периферийной зоне струи и составляет 3—10% по отношению к величине продольной компоненты скорости. Продольная компонента скорости и степень ее пульсаций изменяются характерно для струйного течения: величина пульсаций увеличивается к периферии струи от 2—3% в центре до 10—15% на границе и в зоне затенения за центральным телом (см. рис. 3, b).

В заключение авторы выражают благодарность проф. Г. Л. Гродзовскому за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брысов О. П. и др. Исследование средних и пульсационных скоростей в следе и профильного сопротивления крыльев с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости. — Ученые записки ЦАГИ, 1977, т. VIII, № 2, с. 45.
2. Loon E. G., Chan W. N. Large-Angle Acoustics Beam Steering in Acoustically Anisotropic Crystal. — Appl. Phys. Lett., 1979, vol. 35, N 2, p. 101—103.
3. Василенко Ю. Г., Дубнищев Ю. Н., Соболев В. С., Столповский А. А. Лазерные доплеровские измерители вектора скорости со смещением частоты. — Автометрия, 1974, № 4.

4. Lo C. F., Heltsley F. L., Altstatt M. C. A Study of Laser Velocimeter Measurements in a Viscous Transonic Flow.—AIAA Paper 76—333. N. Y.: Amer. Institute of Aeronautics and Astronautics, 1976.
5. Crosswy F. L., Hornkohl J. O. Signal Conditioning Electronics for Laser Vector Velocimeter.—Rev. Sci. Instrum., 1973, vol. 44, N 9, p. 1324—1332.
6. Ринкевичюс Б. С. Лазерная анемометрия.— М.: Энергия, 1978.
7. Акопян И. Г. и др. Лазерный доплеровский измеритель скорости для аэродинамических исследований.— В кн.: Тез. докл. III Всесоюз. сов. «Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности». Новосибирск: изд. ИТ СО АН СССР, 1979.

Поступила в редакцию 22 декабря 1980 г.
