

## ЛАЗЕРНЫЕ УСТРОЙСТВА ВОСПРИЯТИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ, СТАБИЛИЗИРОВАННЫЕ ЛАЗЕРЫ

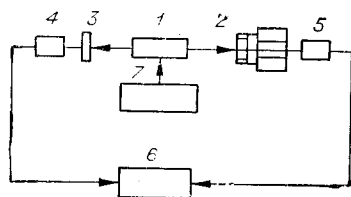
УДК 531.715 : 621.375.8

В. П. КОРОНКЕВИЧ, Г. Г. ТАРАСОВ, В. А. ХАНОВ  
 (Новосибирск)

### ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА ПОВОРОТА С ПОМОЩЬЮ ДВУХЧАСТОТНОГО ЛАЗЕРА

При прохождении линейно-поляризованного излучения с вращающейся плоскостью поляризации через поляризатор интенсивность прошедшего света, воспринимаемая фотоприемником, будет модулирована по синусоидальному закону. Фаза электрического сигнала на выходе фотоприемника будет изменяться пропорционально углу поворота поляризатора. Используя известные электрические методы измерения фазы, можно определить угол поворота поляризатора.

Такой способ измерения угла не требует материальных эталонов в виде штриховых шкал, многогранников и кодовых дисков. Его основное достоинство заключается в том, что датчик угла поворота (поляризационный элемент) не имеет механической связи с измерительным устройством и может быть расположен от него на значительном расстоянии. Для практических целей привлекательными являются малые габариты и вес датчика, а также возможность автоматизации процесса измерения.



Предлагаемая работа — краткое сообщение о результатах предварительного исследования устройства для определения углов поворота в диапазоне  $360^\circ n$  ( $n$  — число оборотов измеряемого объекта).

Оптическая схема экспериментальной установки приведена на рисунке. Здесь 1 — гелий-неоновый лазер с внутренними зеркалами, помещенный в аксиальное магнитное поле; 2 — поляризатор, укрепленный в шпинделе оптической делительной головки; 3 — неподвижный (опорный) поляризатор; 4, 5 — фотоприемники опорного и сигнального каналов; 6 — фазометр; 7 — система питания и стабилизации лазера 1.

Для пояснения работы устройства рассмотрим характер получаемого от лазера излучения и его преобразование оптическими элементами схемы, используя матричный метод Джонса [1]. Активная среда лазера с внутренними зеркалами благодаря наложению магнитного поля приобретает свойство круговой дихроичности из-за эффекта Зеемана. Поэтому выходное излучение лазера состоит из двух круговых ортогональных компонент с частотами  $\nu_1$  и  $\nu_2$ . Такое излучение можно представить в виде суммы двух векторов Джонса

$$\begin{bmatrix} A_x e^{i(\varepsilon_x + 2\pi\nu_1 t)} \\ A_x e^{i(\varepsilon_x + 2\pi\nu_1 t + \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix} \text{ и } \begin{bmatrix} A_x e^{i(\varepsilon_x + 2\pi\nu_2 t)} \\ A_x e^{i(\varepsilon_x + 2\pi\nu_2 t - \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

которая равна

$$2A_x e^{i(\epsilon_x + 2\pi \frac{v_1 + v_2}{2} t)} \begin{bmatrix} \cos 2\pi t \left( \frac{v_2 - v_1}{2} \right) \\ \sin 2\pi t \left( \frac{v_2 - v_1}{2} \right) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь  $\begin{bmatrix} A_x e^{i(\epsilon_x + 2\pi v_1 t)} \\ A_x e^{i(\epsilon_x + 2\pi v_1 t + \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix}$  — вектор, описывающий излучение с правой круговой поляризацией;

$\begin{bmatrix} A_x e^{i(\epsilon_x + 2\pi v_2 t)} \\ A_x e^{i(\epsilon_x + 2\pi v_2 t - \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix}$  — вектор, описывающий излучение с левой круговой

поляризацией, где  $\epsilon_x$  — начальная фаза компонент электрического поля;  $A_x$  — амплитуда компонент электрического поля.

Из (2) видно, что суммарный поток представляет собой линейно-поляризованную волну с частотой, равной полусумме частот двух компонент, а направление плоскости поляризации вращается с частотой, равной полуразности частот этих компонент. Варьируя величину магнитного поля лазера, можно менять частоту расщепления, а следовательно, и частоту вращения плоскости поляризации. Причем минимальная частота определяется добротностью резонатора и остаточной анизотропией активного элемента. Для удобства примем  $2\pi t \frac{v_2 - v_1}{2} = \omega t$

и, учитывая, что абсолютное значение множителя  $e^{i(\epsilon_x + 2\pi \frac{v_2 + v_1}{2} t)}$  равно единице, представим (2) в виде

$$2A_x \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Если на пути излучения поставить неподвижный поляризатор, то результат его воздействия на вектор электрического поля может быть определен произведением

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} 2A_x \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где матрица  $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  описывает действие поляризатора. Результат перемножения дает вектор

$$2A_x \begin{bmatrix} 0 \\ \sin \omega t \end{bmatrix}. \quad (5)$$

На пути прошедшего излучения установлен фотодетектор, причем интенсивность падающего на него света равна  $4A_x^2 \sin^2 \omega t = 2A_x^2 (1 - \cos 2\omega t)$ , т. е. меняется с удвоенной частотой вращения плоскости поляризации. Удвоение частоты объясняется наличием оси симметрии поляризатора. Установив на пути второго такого же пучка (взятого, например, с другого конца лазера) поляризатор, получим на его выходе излучение, описываемое произведением матриц.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} 2A_x \begin{bmatrix} \cos \omega t \\ \sin \omega t \end{bmatrix} = 2A_x \begin{bmatrix} 0 \\ \sin(\omega t - \theta) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Здесь матрица  $\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$  описывает действие поляризатора;  $\begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$  —

матрица поворота, причем  $\theta$  — угол механического поворота второго поляризатора относительно первого. Интенсивность излучения, падающего на фотоприемник, равна  $4A_x^2 \sin^2(\omega t + \theta) = 2A_x^2 \{1 - \cos 2(\omega t - \theta)\}$ . Сопоставляя (5) и (6), видим, что сигнал второго фотодетектора меняется по тому же закону, что и первого, но сдвинут по фазе на удвоенный угол поворота поляризатора. Измеряя эту разность фаз с помощью фазометра, получаем удвоенное значение угла поворота.

С целью проверки возможностей нового метода измерения углов в экспериментальной установке (см. рисунок) в качестве образцового устройства, задающего угол, была использована оптическая делительная головка с ценой деления  $10''$ , в шпинделе которой был укреплен измерительный поляризатор 2. Поляризаторами служили пленочные светофильтры типа ПС-32. Для измерения разности фаз сигналов фотоприемников 4 и 5 применяли фазометрическую приставку 6 высокого разрешения [2]. Ее разрешение по углу  $0,003^\circ$ ; линейность  $0,01^\circ$ . Это соответствует измерению фазового угла с точностью до  $36''$  или измерению механического угла поворота поляризатора с точностью до  $18''$ , так как повороту последнего на одну угловую единицу соответствует изменение фазы на две угловые единицы.

Двухчастотный гелий-неоновый лазер 1 с внутренними зеркалами имел длину резонатора 160 мм и был помещен в инваровый корпус. Частоту вращения плоскости поляризации удалось получить равной 5 кГц. Одно из зеркал лазера было жестко связано с пьезокерамикой, служащей исполнительным элементом в цепи обратной связи стабилизации разностной частоты лазера. Была введена система стабилизации, так как в процессе проведения измерений была выявлена зависимость результатов измерения от стабильности частоты вращения плоскости поляризации. Система стабилизации работала по принципу сравнения частот кварцевого генератора и разностной частоты лазера. Достигнутая стабильность  $1 \cdot 10^{-5}$ .

Первые эксперименты по определению точностных характеристик нового устройства обнаружили нелинейность показаний, которая возрастала с увеличением срока службы лазера и доходила до величины  $2^\circ$ . Для новых трубок она лежала в пределах погрешности показаний фазометра. Мы предполагаем, что нелинейность зависит от добротности резонатора лазера и вызывается ухудшением качества зеркал в процессе работы. Погрешность измерения угла поворота  $1'$ .

Анализ возможных погрешностей устройства в зависимости от добротности резонатора лазера, качества поляризаторов, точности измерения разности фаз показывает, что при улучшении характеристик элементов прибора можно уменьшить погрешность до значений порядка  $10''$ . Однако даже при худшей точности по сравнению с точностью стандартных оптических методов этот способ измерения обладает существенными достоинствами: 1) простотой оптической схемы; 2) малыми габаритами и весом датчика; 3) возможностью помещения датчика на значительное расстояние от измерительной установки; 4) отсутствием движущихся частей, что исключает ошибки, обусловленные мертвым ходом и трением; 5) отсутствием начального и крутящего моментов; 6) наличием собственного опорного нуля в виде скачка при переходе от 0 к  $360^\circ$ ; 7) полным диапазоном измерения углов ( $360^\circ n$ ); 8) независимостью показаний от предыстории устройства; 9) нечувствительностью к ускорению и гравитации; 10) нечувствительностью к радиальным и осевым биениям датчика.

Перечисленные достоинства позволяют сделать вывод, что предлагаемый метод измерения углов может служить хорошим дополнением к существующим и найдет практическое применение в измерительной технике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. У. Шерклифф. Поляризованный свет, М., «Мир», 1965.
2. С. С. Кузнецкий, М. К. Чмых, С. Б. Шестак, В. В. Кравченко, А. Е. Тетерин, А. М. Фиштейн. Фазометрическая приставка повышенной точности к цифровым частотомерам.— Труды III краевой научно-технической конференции. Красноярск, 1972.

Поступила в редакцию 5 сентября 1973 г.

УДК 532.517.681.121.8

**Ю. Г. ВАСИЛЕНКО, Ю. Н. ДУБНИЩЕВ,  
В. С. СОБОЛЕВ, Е. Н. УТКИН**  
(Новосибирск)

### ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ДОППЛЕРОВСКОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПОТОКА

Целью настоящего сообщения является иллюстрация возможности применения лазерного доплеровского измерителя скорости (ЛДИС) [1—4] для исследования пограничного слоя. Оптическая часть измерительной установки представлена на рис. 1. Линейно-поляризованный луч лазера 1, работающего в режиме основной моды, после прохождения телескопической трубки (линзы 2 и 3) поступает на расщепитель 4, где делится по волновому фронту на два одинаковых пучка. Расщепленные пучки проходят через четвертьволновые фазовые пластинки 5, 6, превращаясь соответственно в право- и левоциркулярно-поляризованные пучки, ограничиваемые одинаковыми прямоугольными щелями 7, 8 и фокусируются объективом 9 в исследуемую область потока. Свет, дифрагированный на частицах, движущихся в потоке, ограничивается апертурной диафрагмой 10 и направляется микроскопом 11, 12 через полевую диафрагму 13 на поляризационную призму 14, где расщепляется на два ортогонально-поляризованных луча одинаковой интенсивности, плоскости поляризации которых совпадают с плоскостями поляризации ортогональных компонент на выходе фазовых пластинок. Каждый из расщепленных призмой пучков направляется на соответствующий фотоприемник 15, 16, сигналы с которых поступают на дифферен-

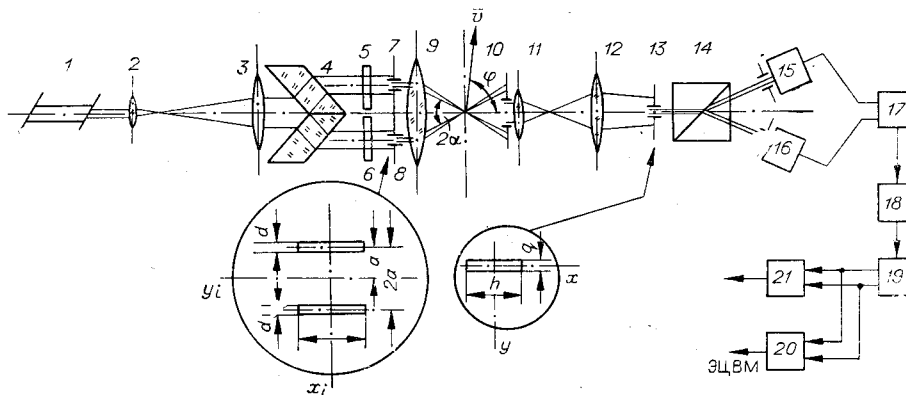


Рис. 1.