

5. Pawlewicz W. T., Hays D. D., Martin P. M. High band-gap oxide optical coatings for 0,25 and 1,06 μm fusion lasers // Thin Solid Films.—1980.—73.—P. 169.
6. Голдина Н. Д., Донин В. И., Николаев Г. Н., Тимофеев Т. Т. Зеркала мощных непрерывных аргоновых лазеров // Квантовая электрон.—1987.—14, № 3.
7. Бабин С. А., Голдина Н. Д., Донин В. И. и др. Генерационные характеристики и параметры плазмы сильноточных аргоновых лазеров // Квантовая электрон.—1989.—16, № 11.

Поступило в редакцию 21 декабря 1989 г.

УДК 53.082.4/5 : 531.71 : 531.74

В. А. Комоцкий, М. В. Котюков

(Москва)

АКУСТООПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КООРДИНАТЫ ОПТИЧЕСКОГО ПУЧКА

Описаны принцип работы и результаты испытаний макета нового прибора, позволяющего проводить измерения перемещения центра тяжести оптического пучка относительно акустооптической шкалы прибора с разрешающей способностью порядка единиц микрон. Обсуждаются возможные области применения: измерение угловых флуктуаций оптического пучка, вибраций деталей механизмов, формы объектов, рефракции световых лучей.

Схема устройства для измерения координаты оптического пучка предложена нами в [1]. На рис. 1 изображен один из ее вариантов, испытанный на практике. Основа схемы — акустооптическая шкала, которая представляет собой систему из подложки 1 с возбудителем поверхностной акустической волны (ПАВ) и опорной фазовой дифракционной решетки (ОДР) 2. Установлена ОДР вблизи подложки на расстоянии $l \ll \Lambda^2/\lambda$, период ОДР Λ_p равен длине ПАВ Λ . Оптическая волна (длина волны λ) падает на шкалу, отражается от поверхности подложки, разделяется на дифракционные порядки, а нулевой порядок выделяется и направляется на фотодетектор. Аналогичная оптическая схема описана нами в [2], где она применяется для оптического зондирования ПАВ. В такой схеме радиосигнал, введенный в звукопровод ПАВ через преобразователь, воспроизводится линейно в виде модуляции интенсивности нулевого дифракционного порядка и далее преобразуется в радиосигнал на выходе фотодетектора, причем форма выходного сигнала повторяет форму радиосигнала, введенного в звукопровод, а его групповая задержка зависит от смещения луча вдоль оси x . Такая же закономерность существует и для первых дифракционных порядков, однако уровень сигнала там ниже, чем в нулевом порядке.

В отличие от схемы зондирования ПАВ [2] в рассматриваемом устройстве в звукопровод вводится амплитудно-модулированный сигнал с несущей F_A и гармонической модулирующей частотой F_M (глубина модуляции 90—100 %). Частота модуляции F_M

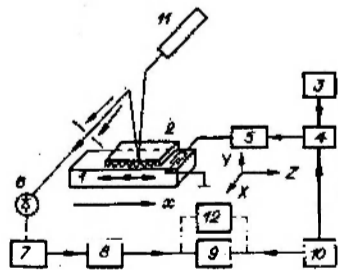


Рис. 1. Блок-схема измерителя:

1 — звукопровод, 2 — опорная решетка, 3 — генератор несущей частоты, 4 — модулятор, 5 — усилитель мощности, 6 — фотодетектор, 7 — измерительный усилитель, 8 — демодулятор, 9 — фазометр, 10 — генератор модулирующей частоты, 11 — источник оптического излучения, 12 — фазовый детектор

выбирается так, чтобы полоса сигнала $2F_M$ не превышала полосы пропускания возбуждателя ПАВ $\Delta F_{\text{ВШП}}$ и полосы частот оптического сигнала $\Delta F_{\text{опт}}$. Частота модуляции F_M , причём фаза огибающей определяется положением оптического пучка [5]. Далее сигнал детектируется синхронным детектором. В результате на выходе получается гармонический сигнал с частотой F_M . Фаза этого сигнала изменяется при перемещении оптического пучка относительно акустооптической шкалы на величину

$$\Delta\Phi = (2\pi/\Lambda_M) \Delta x \approx (2\pi F_M/V_{\text{гр}}) \Delta x. \quad (*)$$

Здесь Λ_M — период огибающей модулированного сигнала на поверхности звукопровода; $V_{\text{гр}}$ — групповая скорость ПАВ; Δx — смещение пучка вдоль шкалы. При неизменных параметрах F_M , $V_{\text{гр}}$, Λ_M величина $\Delta\Phi$ линейно зависит от перемещения оптического пучка вдоль шкалы и измерение смещения оптического пучка проводится по показаниям фазометра, сигнальный вход которого подключен к выходу оптического канала, а опорный вход — к генератору частоты F_M .

Схема позволяет не только измерять статические смещения, но и наблюдать динамику движения луча. Так, например, если оптический луч вибрирует по закону $x(t)$ в направлении оси x , то сигнал с частотой F_M получит фазовую модуляцию $\Phi(t) = (2\pi/\Lambda)x(t)$, и если этот модулированный по фазе сигнал подается на фазовый детектор, включенный вместо фазометра, то на выходе выделяется сигнал, описывающий закон колебаний оптического пучка $x(t)$ вдоль шкалы в направлении x . Таким образом, данное устройство используется для бесконтактного измерения вибраций объектов или деталей, если луч лазера, отраженный от вибрирующей поверхности, направить на акустооптическую шкалу. При этом измерения можно проводить в широкой полосе до сотен килогерц.

Для практических испытаний создан образец устройства, в котором акустооптическая шкала имеет период 100 мкм.

Фазовая решетка с периодом 100 мкм вытравлена на подложке из стекла. Звукопроводом служит подложка из ниобата лития YZ-среза. Встречно-штыревой преобразователь имеет 8 пар штырей и полосу 4 МГц. Несущая частота ПАВ составляет 34,8 МГц. Частота модуляции выбирается в районе 1 МГц и в ходе экспериментов может изменяться. Измерения проводятся в диапазоне частот F_M 0,8 ÷ 1,5 МГц. Экспериментальные зависимости фазы от перемещения акустооптической шкалы относительно оптического луча приводятся на рис. 2. Хотя они и линейны: $\Delta\Phi = S_{\Phi} \Delta x$, но имеют разную крутизну S_{Φ} при разных частотах F_M . Приведем измеренные значения S_{Φ} :

F_M , кГц	800,25	1000,71	1150,35	1303,9	1500,07
S_{Φ} , град/мм	84,5	104,8	122	136	158

Крутизна характеристики шкалы S_{Φ} возрастает при увеличении частоты модуляции F_M , что согласуется с формулой (*).

Детальные исследования показывают, что крутизна акустооптической шкалы S_{Φ} довольно сложным образом зависит от направления перемещения луча по отношению к направлению распространения ПАВ (рис. 3). Вид этой зависимости несколько меняется с изменением несущей частоты сигнала и определяется конкретными особенностями волнового

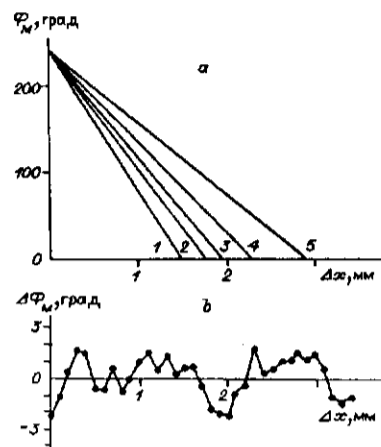
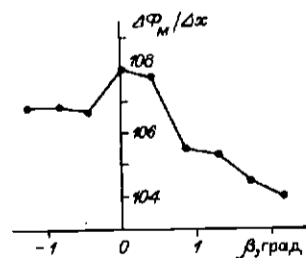


Рис. 2. Зависимости фазы сигнала от величины смещения оптического пучка при различных частотах модуляции FM (а) (МГц): 1 — FM = 1,5, 2 — 1,3, 3 — 1,15, 4 — 1, 5 — 0,8; отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой при FM = 1 МГц (б)

1 % и хорошо воспроизводится при повторных измерениях. Если погрешность при выборе направления не превышает 2° , то ошибка при определении крутизны S_Φ будет не более 5 %.

При измерениях использовался фазометр Ф-5126 с дискретностью $0,1^\circ$. Стабильность схемы во времени характеризуется цифрами, полученными в результате измерений: среднеквадратический разброс показаний фазометра не превышает $\pm 0,2^\circ$ за 5 мин, медленный дрейф фазы — 3° за 1 ч. Линейность характеристик, приведенных на рис. 2, оценивается следующим образом. По множеству экспериментальных точек с применением программы линейной регрессии рассчитываются коэффициенты уравнения аппроксимирующей прямой, затем находятся отклонения точек от прямой и вычисляется среднеквадратическое значение σ_Φ отклонений экспериментальных точек от прямой. Оно составляет $\sigma_\Phi = 1,1^\circ$, или, в пересчете на расстояние, ~ 10 мкм, что соизмеримо с дискретностью отсчета (10 мкм) линейного перемещения по микрометру при определении положения шкалы в ходе эксперимента. Характер кривой отклонения случайный. Все описанные эксперименты проведены с лазером ЛГ-52-1 мощностью 7 мВт при достаточно близком расположении лазера и акустооптической шкалы (0,2—0,3 м) для того, чтобы свести к минимуму нестабильности за счет изменения направления оси излучения лазера. Если лазер удалить от шкалы на достаточно большое расстояние (порядка 2—3 м), то можно заметить флуктуации фазы за счет изменения направления лазерного излучения. Действительно, на расстоянии 3 м флуктуация оси диаграммы направленности на 10^{-6} рад дает смещение пучка на 3 мкм и приводит к скачку фазы на $\sim 0,3^\circ$.



Для демонстрации возможности измерения угловых вибраций оптический пучок направляется от лазера на зеркало, которое приводится в движение пьезоэлектрическим либо электромагнитным вибратором. Угловое смещение зеркала приводит в движение отраженный оптический пучок вдоль оси x

Рис. 3. Зависимость крутизны фазовой характеристики от угла между направлением перемещения лазерного пучка и направлением распространения ПАВ

акустооптической шкалы. Расстояние от зеркала до шкалы 1 м. Выход оптического канала подключается к фазовому детектору, а с выхода фазового детектора снимается сигнал, линейно повторяющий закон колебаний луча по шкале. Полоса частот регистрации составляет в узкополосном режиме 10 Гц — 1 кГц, в широкополосном режиме — 10 Гц — 40 кГц и ограничивается шириной полосы фильтра после фазового детектора. Уровень шумов в полосе 10 Гц — 1 кГц позволяет регистрировать вибрации с амплитудой колебаний пучка 2 мкм, что соответствует колебанию зеркала на 10^{-6} рад. При расширении полосы до 40 кГц чувствительность снижается до 8—10 мкм. Повышение разрешающей способности данной схемы достигается за счет повышения частоты модуляции F_M при одновременном повышении несущей частоты F_A . В практической схеме предусматривается собирающая линза в отраженном пучке, установленная так, чтобы при смещении пучка по шкале нулевой порядок дифракции не уходил с площадки фотодетектора. Возможные области применения описанного устройства: измерение нестабильности диаграммы направленности лазерного излучения как в видимом, так и в ИК-диапазоне; бесконтактное исследование вибраций объектов в широком диапазоне частот (до сотен кГц); измерение деформаций и перемещений в пространстве различных объектов; измерение рефракции луча в прозрачных веществах под внешним воздействием; измерение формы отражающих тел.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 1413422 СССР. Акустооптическое устройство для измерения перемещений / А. Ф. Бессонов, В. А. Комоцкий, М. В. Котюков.—Опубл. 1988, Бюл. № 28.
2. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А., Котюков М. В. Анализ взаимодействия световой волны с системой пространственно разнесенных периодических структур при оптическом зондировании поверхностных акустических волн // Оптика и спектроскопия.—1984.—56, вып. 6.
3. Бессонов А. Ф., Дерюгин Л. Н., Комоцкий В. А., Котюков М. В. Плавная раздельная регулировка групповой задержки и фазы несущей частоты сигнала в акустической линии задержки // Радиотехника.—1982.—37, № 9.
4. Komot'skii V. A., Black T. D. Analysis and application of stationary reference grating method for optical detection of surface acoustic waves // J. Appl. Phys.—1981.—52, N 1.—P. 129.
5. Комоцкий В. А. О новой методике измерения групповой скорости ПАВ с применением метода оптического зондирования с опорной дифракционной решеткой: Тез. докл. III конф. Научно-учебного центра УДН «Применение физико-химических методов исследования в науке и технике», 20—23 февраля 1990 г.—Ч. 1.

Поступило в редакцию 7 сентября 1990 г.

УДК 535.4 : 519.28

И. Г. Пальчикова

(Новосибирск)

ФУНКЦИЯ ЗРАЧКА, ЧИСЛО ШТРЕЛЯ И ДИФРАКЦИОННАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФАЗОВОЙ ЗОННОЙ ПЛАСТИНКИ

Рассмотрено влияние ошибок совмещения фотошаблонов на число Штреля и дифракционную эффективность фазовой зонной пластинки. Проведено математическое моделирование статистического процесса совмещения. Приводятся зависимости среднего значения, дисперсии числа Штреля и дифракционной эффективности от величины среднеквадратичного отклонения нормированных ошибок совмещения при равноглубинном и неравноглубинном травлении для различного количества ступеней в фазовом профиле зоны.