

3. Блок А. А., Ванюшев Б. В., Гибин И. С. и др. Испытания голографической системы архивной памяти емкостью 1 Гбайт // Тез. докл. VI Всесоюз. школы-семинара по оптической обработке информации.— Фрунзе: ФПИ, 1986.— Ч. 1.
4. Коняев С. И. Фотоматричное ассоциативное запоминающее устройство // Электрон. пром-сть.— 1988.— № 4.
5. Грамматин А. П., Гусев В. К., Долгова Е. В. и др. Голографическое запоминающее устройство с произвольным доступом к информации // ОМП.— 1988.— № 6.

Поступила в редакцию 15 мая 1989 г.

УДК 681.7.068

Е. С. АВДОШИН

(Тула)

ОПТОВОЛОКОННЫЙ ДАТЧИК ЗВУКА

Развитие оптических методов передачи и обработки информации ускорило разработку волоконно-оптических датчиков [1, 2] физических величин, и в частности световодных акустических датчиков [3—5].

Передача акустической информации по волоконным световодам позволяет достигнуть высокой чувствительности и помехозащищенности измеряемого сигнала. Световодные датчики можно использовать при сильных электромагнитных излучениях, в условиях взрыво- и пожароопасности. Дополнительно возникают возможности передачи больших объемов информации с применением мультиплексирования.

В данной статье описан волоконно-оптический датчик звука с вибрирующим световодом [6], конструкция которого показана на рис. 1. Датчик содержит металлический корпус 5, в котором с помощью компаундного эпоксидного клея ВК-9 закреплены два световода 3 и 12. Для передачи оптического излучения использованы многомодовые кварцевые световоды КВСП-50 с диаметрами сердцевины волокна 50 мкм и оболочки 125 мкм. Показатель преломления световода $n_c = 1,5$, а числовая апертура $NA = 0,2$. Каждый световод имеет длину 0,5 м. Зеркальные торцы на световодах выполнялись с помощью твердосплавного резца ВК-8 [7]. Качество сколов контролировалось микроинтерферометром МИИ-4 с увеличением $\times 500$ и микроскопом МБС-9. На свободных концах световодов 3, 12 установлены оптические соединители 2, 13 типа ВОК — ВОК с внешним диаметром наконечника 2,5 мм для стыковки с источником света 1 и фотоприемником 15.

Световод 3 закреплен в корпусе датчика в цилиндрическом капилляре 4 из нержавеющей стали. Внешний диаметр капилляра равен 2,5 мм, а внутренний точно соответствует размеру сердцевины волокна. После закрепления эпоксидом световода 3 внутри капиллярной трубки производилась шлифовка зеркального торца наконечника. На внешней поверхности капилляра выполнялась резьба, с помощью которой производились крепление световода 3 в корпусе датчика и регулировка зазора между световодами 3 и 12.

Другой световод 12 закрепляется эпоксидом внутри датчика, образуя при этом консольную балочку 11 длиной 17 мм. Шток 10, выпол-

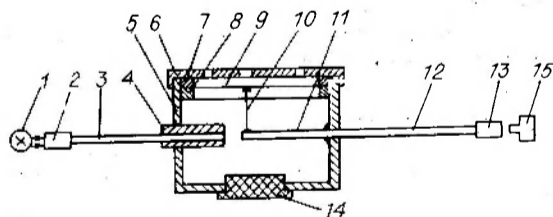


Рис. 1. Конструкция оптоволоконного акустического датчика:

1 — источник света; 2, 13 — оптические соединители; 3, 12 — световоды; 4 — капилляр; 5 — корпус датчика; 6 — крышка; 7, 8 — кольца; 9 — мембрана; 10 — шток; 11 — балочка; 14 — заглушка; 15 — фотодиод

ценный из отрезка кварцевого волокна диаметром 50 мкм и длиной 10 мм, закреплен с помощью эпоксидной смолы. Мембрана 2 имеет гофрированный профиль с куполообразной выпуклой формой в центре. Юстировка световодов в датчике проводилась с помощью микроскопа МБС-9, при этом достигнута несоосность не более 5 мкм. Между торцами световодов 3, 12 имеется зазор шириной 10 мкм.

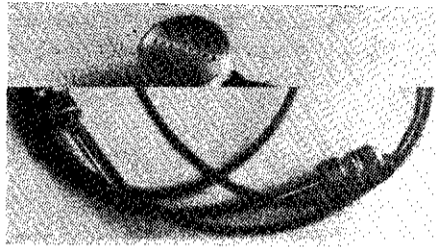


Рис. 2. Общий вид датчика

Для предохранения мембраны от повреждений в датчике установлена металлическая крышка 6 с акустическими отверстиями диаметром 1,5 мм. В корпусе датчика выполнено технологическое отверстие диаметром 12 мм, которое закрыто заглушкой 14. С помощью этой заглушки производится регулировка подмембранного объема, что оказывает влияние на чувствительность устройства. Общий вид датчика показан на рис. 2.

Основным элементом датчика является световодная балочка 11, которая одним концом закреплена на боковой стенке корпуса, а другим — присоединена к центру тонкой профилированной мембраны.

Внешний акустический сигнал возбуждает колебания мембраны, которые через шток воздействуют на световодную балочку 11. Балочка изгибается, и ее торец перемещается вверх и вниз относительно неподвижного падающего торца световода 3, что приводит к амплитудной модуляции оптического потока, идущего от источника 1. Переменный промодулированный звуком световой поток поступает через световод 12 на $p-i-n$ -фотодиод 15.

При воздействии гармонического акустического сигнала

$$p = P \sin \omega t \quad (1)$$

зависимость между прогибом круглой мембраны $y(s)$ и звуковым давлением P имеет вид

$$y(s) = 3(R^2 - s^2)^2 (1 - \mu_m^2) P / 16E_m h_m^3, \quad (2)$$

где s — радиальная координата мембраны; R — радиус мембраны; h_m — толщина мембраны; E_m — модуль упругости; μ_m — коэффициент Пуассона.

При возбуждении круглой мембраны возникают поперечные симметричные колебания, основная частота которых находится из выражения

$$f = \frac{2,405}{(4\pi R)} \sqrt{\frac{\sigma}{m}}, \quad (3)$$

где σ — растягивающее напряжение на единицу длины; m — масса мембраны на единицу площади.

Под действием силы от мембраны на шток происходит смещение свободного конца кварцевой балочки, величина которого равна

$$b = FL_c^3 / (3E_c J_c), \quad (4)$$

где L_c — длина балочки; E_c — модуль упругости балочки; $J_c = \pi r_c^4 / 4$ — момент инерции балочки радиусом r_c ; F — сила, приложенная к концу консольно закрепленной балочки.

На работу датчика оказывает воздействие не только звуковой сигнал, но и температура окружающей среды, которая вносит погрешности в измеряемый сигнал. Влияние внешней температуры изменяет модуль упругости мембраны и балочки, а также других элементов датчика. Окружающая температура дестабилизирует мощность лазерного излучения оптического источника. Допустимая температура открытых поверхностей элементов датчика является точностной характеристикой, так как в зависимости от окружающей температуры происходит неравномерный прогрев мембраны и балочки, который приводит к тому, что ее упругая линия при колебаниях будет отличаться от дуги окружности. Погрешность нелинейности, обусловленная увеличением гибкости мембраны при уменьшении ее толщины и увеличении радиуса, равна

$$\delta_n = \delta_h + \delta_R, \quad (5)$$

где δ_h — погрешность изготовления мембраны по толщине; δ_R — погрешность мембраны по радиусу.

Оценим систематическую составляющую погрешности измерений за счет деформации балочки при ее нагреве.

Обозначим: x — текущая координата длины, M_x — изгибающий момент, J_x — момент инерции сечения, E_x — модуль упругости балочки на расстоянии x от места заделки в корпусе датчика, k — прогиб свободного конца балочки.

Дифференциальное уравнение упругой линии имеет вид

$$\frac{d^2 k}{dx^2} = \frac{M(x)}{E(x)J(x)}. \quad (6)$$

Последовательное интегрирование (6) с использованием зависимости E_x от температуры [8] приводит к выражению для прогиба свободного конца балочки на участке $0 < x < L$:

$$k = C \left[\frac{1-\nu L}{\nu^2} \ln \left| 1 + \nu L \right| - \frac{1}{\nu} + L \right], \quad (7)$$

в котором $\nu = L/E_x$; C — унргооптический коэффициент, зависящий от физических свойств материала кварцевой световодной балочки:

$$C = n_c^3 (p_{11} - p_{12}) (1 + \mu_c) / 2E_c,$$

где p_{11} , p_{12} — компоненты унргооптического тензора в кварце; μ_c — коэффициент Пуассона. Для кварцевой балочки с $n_c = 1,50$, $p_{11} = 0,121$, $p_{12} = 0,270$, $\mu_c = 0,17$, $E_c = 7,3 \cdot 10^{10}$ Н/м² имеем $C = 3,7 \cdot 10^{-2}$ м²/Н.

Удельный изгиб вибрирующего световода в случае малых прогибов определяется по формуле [9]

$$A = (kd) / L^2 \Delta T. \quad (8)$$

При вычислении значения A в (8) необходимо иметь в виду, что при разогреве изменяются геометрические параметры $L = L_c(1 + \alpha \Delta T)$ и $d = d_c(1 + \alpha \Delta T)$, где α — температурный коэффициент линейного расширения материала балочки; $\Delta T = T - T_0$ — приращение температуры; L_c и d_c — соответственно длина и диаметр балочки при нормальной температуре. На основании формулы (8) проведены расчеты удельного изгиба балочки и определена ее оптимальная рабочая длина с учетом диаметра в интервале рабочей температуры 20–120 °С. Для кварцевой балочки длиной 17 мм и диаметром 50 мкм при температуре 120 °С из формулы (8) вычислено значение $A = 1002$ млн⁻¹.

При нормальной окружающей температуре, когда

$$A_0 = kd_c / L_c^2, \quad (9)$$

получим удельный изгиб, равный $A_0 = 1001$ млн⁻¹.

Таким образом, систематическая погрешность, вызванная деформацией балочки от изменения температуры, составляет величину $\delta A = A - A_0$, что соответствует $(\delta A / A) 100 \% = 0,1 \%$ от номинального значения деформации. Полученные результаты позволяют сделать вывод о

том, что изменение окружающей температуры от 20 до 120 °С вызывает незначительное изменение размеров консольной световодной балочки и практически не влияет на точность измерений.

В качестве источника света использовался полупроводниковый инжекционный лазер ИЛПН-2К, который дает непрерывное оптическое излучение в видимом диапазоне с длиной волны 0,78 мкм. Мощность излучения лазера 3 мВт при токе накачки 200 мА и напряжении питания 2 В. Для питания лазера применяется прецизионный источник тока.

Учитывая, что выходной сигнал датчика регистрируется фотодиодом, при оценке отношения сигнал/шум следует принимать во внимание только дробовые шумы фотодетектора. В случае пуассоновского распределения фотонов в принимаемом лазерном излучении фототоку присущ дробовый шум, спектральная плотность которого имеет вид

$$S^2 = 2ei_{\phi},$$

где $i_{\phi} = \frac{P_{\text{л}}}{h\nu_{\text{л}}} \eta e$, $P_{\text{л}}$ — мощность оптического излучения на фотодиоде, $\nu_{\text{л}}$ — частота излучения, h — постоянная Планка, η — квантовая эффективность фотодиода, e — заряд электрона.

Таким образом, поступающий на фотодиод световой поток несет шумовую компоненту, и, следовательно, лазерное излучение на выходе световода LZ при отсутствии внешних акустических воздействий уже имеет амплитудную модуляцию светового потока, которая накладывает ограничения на динамический диапазон датчика. Величина шумовой компоненты лазера ИЛПН-2К в полосе частот 20—2000 Гц равна 10^{-7} А, что соответствует глубине модуляции оптического излучения с шумом 10^{-8} Гц $^{-1/2}$. С увеличением мощности лазера отношение сигнал/шум повышается, так как мощность полезного сигнала на выходе фотодиода пропорциональна квадрату интенсивности света, а мощность шумов растет линейно.

Экспериментальные исследования характеристик акустического датчика проводились на установке [5], содержащей прибор «рот искусственный» РИ-3, который управлялся генератором ГЗ-56/1. Выходной сигнал фотоприемника контролировался оптическим тестером АQ-1170. При измерениях использовались селективный милливольтметр В6-3, измеритель нелинейных искажений С6-7, вольтметр постоянного тока В2-36 и акустическая испытательная система 2118.

Амплитудная характеристика датчика, полученная на частоте 1300 Гц с использованием третьоктавного фильтра, линейна в пределах 10^{-4} — $2 \cdot 10^0$ Па при вводимой оптической мощности 50 мкВт. На частоте 1000 Гц при звуковом давлении 1 Па глубина модуляции равна 40 %. Чувствительность датчика 30 мВ/Па.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) датчика, показанная на рис. 3, измерена при звуковом давлении 2 Па. Форма частотной характеристики имеет неравномерность ± 5 дБ в диапазоне 100—10 000 Гц. Эта характеристика определяется резонансными свойствами мембраны, собственная частотная характеристика которой коррелирует с АЧХ датчика.

Динамический диапазон датчика 110 дБ. Нижний предел принимаемых звуковых сигналов ограничен собственными шумами лазерного излучателя, а верхний — упругостью мембраны. Коэффициент нелинейных искажений волоконного датчика звука, измеренный прибором С6-7 на частоте 1000 Гц при звуковом давлении 1 Па, равен 2 %.

В ходе экспериментов определялось влияние изгибов световодов на работоспособность датчика. Исследования показали, что при изгибах волокна радиусом менее 1 см возникают дополнительные оптические потери до 1 дБ. Изгиб волокна изменяет структуру мод в лазерном пучке, проходящем по световоду, что создает дополнительные шумы в измерительном преобразователе. Изгибы кварцевого волокна вызывают

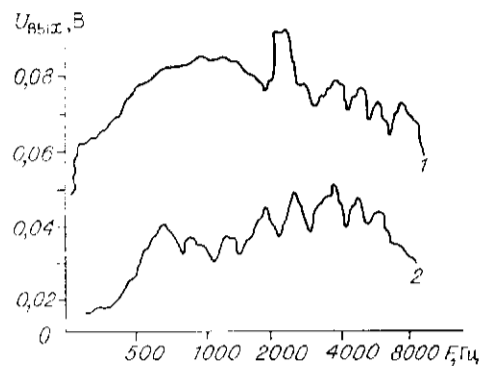


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика датчика (1) и мембраны (2)

также индуцированное двойное лучепреломление, которое при радиусе изгиба, равном 1 см, составляет менее 10 град/м. Оптические потери на стыках соединителей 2 и 13 равны 1 дБ, а общие потери в датчике — 5 дБм. Точность измерений 1%, а погрешность воспроизводимости показаний датчика 0,01%.

В заключение необходимо отметить, что применение акустической мембраны из кремния или поликарбоната толщиной менее 100 мкм позволит существенно улучшить метрологические характеристики датчика за счет повышения чувствительности и расширения динамического диапазона.

Производственные испытания датчика показали надежность его работы и повторяемость результатов измерений.

В разработанном акустическом датчике с вибрирующим световодом достигнуты характеристики, которые определяют перспективность использования этого измерительного преобразователя в оптических системах передачи информации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусурин В. П., Семенов А. С., Удалов Н. П. Оптические и волоконно-оптические датчики // Квантовая электроника.— 1985.— № 5.
2. Лямшев Л. М., Смирнов Ю. Ю. Волоконно-оптические приемники звука // Акуст. журн.— 1983.— 29, № 3.
3. Авдошин Е. С., Кузнецов Н. А. Волоконные микрофоны для световодных систем связи // Техника средств связи. Сер. ВОС.— 1984.— № 2.
4. Авдошин Е. С., Корольков О. А., Фролов С. М. Акустооптический волоконный преобразователь // ПТЭ.— 1984.— № 5.
5. Авдошин Е. С. Волоконный акустический датчик // Радиотехника.— 1987.— № 4.
6. Кузнецов Н. А., Авдошин Е. С., Фролов С. М. Волоконный акустооптический преобразователь // ПТЭ.— 1984.— № 6.
7. Авдошин Е. С., Кузнецов Н. А. Сварка волоконных световодов // ПТЭ.— 1986.— № 4.
8. Попикова С. И. Тепловое расширение твердых тел.— М.: Наука, 1974.
9. Кашпар Ф. П. Термобиметаллы в электротехнике.— М.: Госэнергоиздат, 1961.

Поступила в редакцию 4 мая 1988 г.

УДК 535.241.13 : 534

В. А. АЛЕХИН
(Москва)

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОКАНАЛЬНЫХ ФАЗОВЫХ РЕЛЬЕФОГРАФИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ СВЕТА

Введение. Фазовые методы записи находят все более широкое применение в системах оптической обработки, отображения и регистрации информации. Особое внимание уделяется разработке управляемых реверсивных транспарантов, среди которых видное место занимают фазовые транспаранты. Фазовые транспаранты осуществляют пространствен-