

3. Эйбрахам А., Ситон К. Т., Смит С. Д. Оптический компьютер // В мире науки: Пер. с англ.— М.: Мир, 1983.— № 4.
4. Фишер Р., Мюллер Р. Нелинейные оптические устройства — основные элементы будущих цифровых оптических компьютеров? // Квантовая электрон.— 1989.— 16, № 8.
5. Коцлов Э. Г., Егоров В. М. Перспективы создания оптических цифровых высокопроизводительных вычислительных устройств // Автометрия.— 1985.— № 1.
6. Егоров В. М., Коцлов Э. Г. Микроэлектронные оптические цифровые вычислительные устройства // Автометрия.— 1989.— № 3 с помощью управляемых световых транзисторов // Квантовая электрон.— 1984.— № 1.
11. Fienret I., Grevey P. Proposals for logical optical operations // Opt. Commun.— 1981.— 36, N 1.
12. Басов Н. Г., Понов Ю. М., Компанец И. Н. и др. Способы построения оптического процессора с переменными операторами // Квантовая электрон.— 1978.— № 3.
13. Lohman Adolf W. Polarization and optical logic // Appl. Opt. — 1986.— 25, N 10.— P. 1594.
14. Итиока Е., Танида Дж. Оптические параллельные логические вентили на основе теневой системы для оптических цифровых вычислителей // ТИИЭР.— 1984.— 72, № 7.
15. Imai Y., Ohtsuka Y. Optical multiple-output and multiple valued logic operation based on fringe shifting techniques using a special light modulator // Appl. Opt.— 1987.— 26, N 2.— P. 274.
16. Stucke G. Parallel architecture for a digital optical computer // Appl. Opt.— 1983.— 28, N 2.— P. 363.
17. А. с. 1112926 СССР. Оптоэлектронный преобразователь для оптического запоминающего устройства/А. А. Вербовецкий.— Опубл. 1986, Бюл. № 5.
18. А. с. 1114214 СССР. Оптоэлектронный преобразователь для оптического запоминающего устройства/А. А. Вербовецкий.— Там же.
19. Вербовецкий А. А., Федоров В. Б. Запись на фазовые голограммы двоичной информации в парафазном коде // Оптика и спектроскопия.— 1972.— XXXIII, вып. 6.
20. Вербовецкий А. А., Зимоглядова Е. А. Принципы построения многоканальных ассоциативных оптических корреляторов для вычислительных систем // Автометрия.— 1989.— № 5.
21. Tanida Y., Ichioka Y. Optical Logic array processor using shadowgrams // JOSA.— 1980.— 73, № 6.— P. 800.

Поступила в редакцию 20 ноября 1989 г.

УДК 536.521

Е. С. АВДОШИН  
(Тула)

#### СВЕТОВОДНЫЙ ИК-РАДИОМЕТР С ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПЛАНАРНОМ ВОЛНОВОДЕ

Для обнаружения и регистрации инфракрасного излучения широко применяются световодные ИК-радиометры [1]. В последние годы развитие интегральной оптики [2], связанной с исследованием распространения оптического излучения в планарных волноводах, открывает возможности создания новых функциональных ИК-приборов для оптоэлектронных световодных измерительных систем в медицинской диагностике [3], дефектоскопии и оптической связи.

В данной статье описан волоконный ИК-радиометр с интегрально-оптическим модулятором (рис. 1), в котором реализована поляризационная модуляция регистрируемого излучения под действием механического давления на планарный волновод.

Радиометр содержит волоконный световод 1, оптический соединитель 2, линзу 3, поляризатор 4, призму 5 для ввода оптического излучения в пленочный волновод 6, подложку 7, скошенный торец в оправке

13 световода 12 для вывода излучения из волновода, анализатор 11, фотоприемник 10, а также прижимное устройство, состоящее из опоры 14, стакана 15 и магнитоэлектрической пружины 16 из ферромагнетика с контактами, которые электрически соединены с приводом и усилителем 23. Элементы радиометра размещены в корпусных деталях 8 и 9. В состав волновода  $\text{TeO}_2\text{—PbO—B}_2\text{O}_3$ , что позволяет улучшить механические характеристики волокна [4, 5]. Диаметр световода равен 0,2 мм, толщина оболочки 10 мкм, длина 0,3 м. Показатель преломления сердцевины 2,7, коэффициент термического расширения  $12,8 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ; показатель преломления оболочки равен 1,8, а коэффициент термического расширения —  $12,6 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ . Минимальные оптические потери около 4 дБ/м на длине волны 10,6 мкм.

С помощью оптического соединителя 2 световод 1 стыкуется с короткофокусной линзой 3 из флюорита, имеющей максимум пропускания на длине волны 5 мкм, и поляризатором 4 из кальцита, обеспечивающими фокусировку ИК-излучения на призму 5. Германиевая призма 5 служит для ввода ИК-излучения в волновод 6, обеспечивая эффективность ввода 50 %.

Тонкопленочный оптический волновод 6 гребенчатого типа выполнен методом фотолитографии с последующим применением ионного травления на основе планарных эпитаксиальных гетероструктур типа  $\text{GaAs}_{0,1}\text{P}_{0,9}\text{—GaP}$ . Длина волновода 10 мм, толщина гетерослой  $\text{GaAs}_{0,1}\text{P}_{0,9}$  около 1,5 мкм, высота и ширина гребня 1,2 и 5 мкм соответственно. Волновод наносился на подложку из оксидного стекла  $\text{GaF}_2$  толщиной 500 мкм. Коэффициент затухания на линейном участке волновода не более 4 дБ/см.

В радиометре используется туннельный вывод излучения из волновода через скошенный торец двухслойного волоконного световода [6]

из халькогенидного стекла с диаметром сердцевины 200 мкм. Для эффективной связи и последующей передачи ИК-излучения по этому волокну его торец срезают под углом фазового синхронизма ( $21^\circ$ ). В выводном устройстве световод жестко закреплен эпокси-д-ной смолой ВК-9 в съемной стеклянной оправке, при этом скошенный торец световода отполирован зеркально по технологии, описанной в [7].

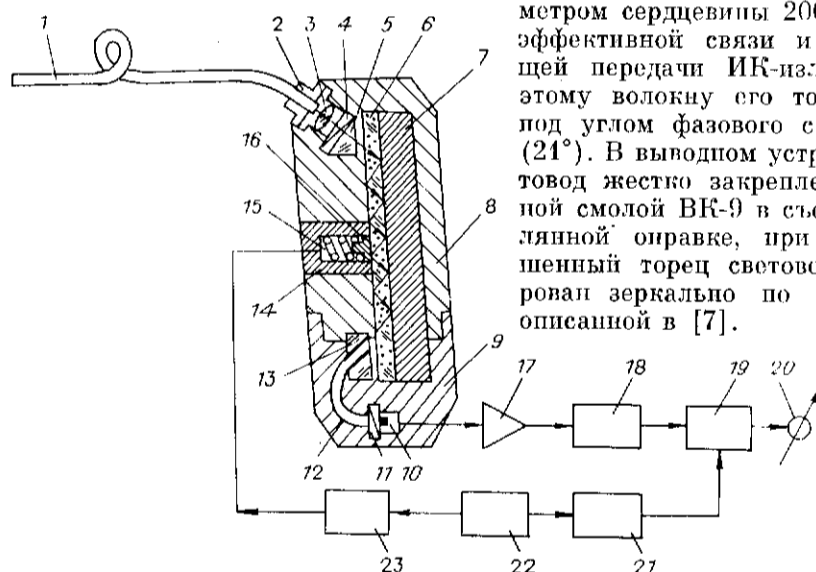


Рис. 1. Конструкция и структурная схема радиометра:

1 — входной световод, 2 — оптический соединитель, 3 — линза, 4 — поляризатор, 5 — призма, 6 — волновод, 7 — подложка, 8, 9 — корпусные детали, 10 — фотоприемник, 11 — анализатор, 12 — световод со скошенным торцом, 13 — оправка, 14 — опора, 15 — стакан, 16 — магнитоэлектрическая пружина, 17, 18 — усилители, 19 — синхронный детектор, 20 — регистрирующий прибор, 21 — усилитель-формирователь, 22 — генератор, 23 — привод с усилителем

Достигая выводного устройства, оптическая энергия из волновода тушелирует через воздушный зазор в сердцевину волокна, возбуждая в нем волновые моды. Для обеспечения оптимальной связи и последующей передачи ИК-излучения по волокну угол среза должен удовлетворять условию

$$\alpha = \arcsin \frac{n_m^*}{n_b}, \quad (1)$$

где  $n_m^*$  — эффективный показатель преломления волноводной моды с индексом  $m$  в плетке;  $n_b$  — показатель преломления сердцевины волокна. При выполнении этого условия в выходном волокне возбуждаются моды низких порядков, которые при распространении по световоду имеют наименьшее затухание. Эффективность вывода излучения через скошенный торец волокна равна 90 %. Такой съемный волоконный выходной узел связи является эффективным и компактным оптическим ответвляющим устройством в системе тонкопленочный волноводный модулятор — волокно — анализатор — фотодетектор.

Для обеспечения деформации волновода в частотном диапазоне 0,5—1 кГц используется пружинный магнитострикционный актюатор на эффекте Видемана [8]. Данный эффект состоит в возбуждении магнитострикционных деформаций сдвига в витке цилиндрической пружины из ферромагнетика. Цилиндрическая пружина с радиусом  $R$  и числом витков  $n$ , навитая из стержня ферромагнетика, обеспечивает смещение

$$x = 2\pi R^2 n \varphi, \quad (2)$$

где  $\varphi$  — погонный угол закручивания стержня при возбуждении в нем крутильных деформаций под действием аксиальной и циркулярной намагниченности:

$$\varphi = \frac{2\sqrt{2}\chi_{ij}h_{ijk}H}{Gr} F\left(\frac{r}{s}\right). \quad (3)$$

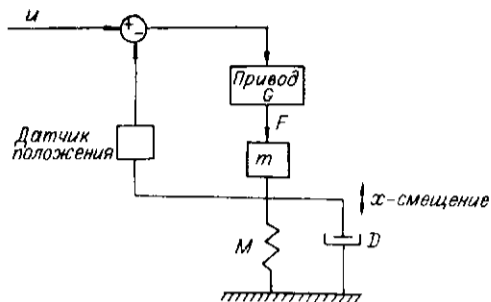
Здесь  $\chi_{ij}$ ,  $h_{ijk}$  — тензоры магнитной восприимчивости и магнитоупругой связи;  $G$  — модуль сдвига;  $r$  — радиус стержня;  $H$  — закручивающее магнитное поле;  $s = c/(4\pi\sigma\omega)^{1/2}$  — глубина скин-слоя;  $\sigma$  — проводимость ферромагнетика;  $\mu$  — магнитная проницаемость;  $\omega$  — частота магнитного поля;  $F(r/s) \rightarrow \text{const} \sim 1$  — расчетная функция при  $\omega \rightarrow 0$ .

Конструктивно актюатор выполнен в виде двухзаходной цилиндрической пружины диаметром 0,5 см и длиной 2 см из пермендюра, содержащего Fe (49 %), Co (49 %) и V (2 %). Индуктивность пружины на частоте 10 Гц равна 9 мкГ. Аксиальная намагниченность в актюаторе создавалась обмоткой на витке, а циркулярная — пропусканием тока по витку спирали. Амплитудно-частотная характеристика актюатора, измеренная с помощью емкостных датчиков смещения с точностью 0,1 мкм в диапазоне 0—10 кГц при постоянной амплитуде напряженности управляющего магнитного поля  $H = 70$  А/м, имеет резонансный характер на частоте 600 Гц с амплитудой колебаний 6 мкм. Под действием аксиального магнитного поля от импульса тока с амплитудой 2 А и длительностью 1 мс отклик актюатора равен 1 мкм.

Если в одной точке планарного волновода приложено усилие, то волновод деформируется, при этом между точками волновода возникают как статическое, так и динамическое взаимодействие.

Рассмотрим модель системы управления актюатором на основе единичного привода. При анализе будем считать, что планарный волновод является изотропным и, следовательно, имеет линейную зависимость между приложенным усилием и деформацией, а получаемые деформации малы по сравнению с размерами волновода. Усилия, прикладываемые к волноводу, расположены по нормали к поверхности, и статическое состояние волновода при этом можно описать матрицей податливости  $M$ , которая определяет смещение в каждой точке при действии единичной силы, приложенной к волноводу. Смещение  $x$  в каждой точке волновода,

Рис. 2. Модель системы управления деформацией планарного волновода:  
 $u$  — входное воздействие;  $G$  — передаточная функция привода;  $m$  — деформируемая масса;  $x$  — смещение;  $D$  — противодействующее усилие;  $M$  — матрица неопределенности;  $F$  — сила



вызванное действием системы сил  $F$ , равно  $x = MF$ . Чтобы получить систему сил, необходимую для деформации волновода на требуемую величину, матрицу необходимо обратить к виду

$$F = xM^{-1}. \quad (4)$$

Динамику волновода и системы управления можно проанализировать с использованием модели жесткого привода (рис. 2). Привод создает усилие, которое ускоряет массу волновода  $m$ , преодолевая тормозящее усилие  $D$ , и действует противоположно реакции волновода, вызывая смещение на величину  $x$ :

$$F = m\ddot{x} + D\dot{x} + \frac{1}{M}x. \quad (5)$$

Видоизменяя это уравнение, получим передаточную функцию волновода:

$$\frac{d(s)}{p(s)} = \left( ms^2 + Ds + \frac{1}{M} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $s$  — оператор Лапласа. На очень низких частотах, когда  $s$  существенно меньше  $\sqrt{1/mM}$  и  $1/DM$ , передаточная функция описывается выражением

$$\frac{d(s)}{p(s)} = M. \quad (7)$$

При таких условиях передаточная функция контура регулирования имеет вид  $x/u = GM/(1 + GM)$  ( $u$  — входное воздействие;  $G$  — передаточная функция привода). Условие устойчивости всей системы сводится к тому, чтобы кривая Найквиста для разомкнутого контура  $GM$  не охватывала точку  $(-1, 0)$  в плоскости  $S$ .

Для управления актюатором используется привод с усилителем  $Z3$ , который выполнен по схеме ШИМ-регулятора с тактовой частотой 20 кГц и обеспечивает регулирование тока, создающего аксиальную намагниченность, в диапазоне  $\pm 5$  А с временем установления 0,5 мс. При подаче на вход актюатора управляющего сигнала импульсной формы с амплитудой 5 В магнитоотрицательная система переходит в новое положение за 30 мс.

В качестве фотоприемника использовался  $p-i-n$ -фотодиод с диаметром фотоприемной площадки 60 мкм, темновым током 20 нА и абсолютной спектральной чувствительностью 0,6 А/Вт на длине волны 1,5 мкм.

При подаче электрического тока от привода с усилителем  $Z3$  на актюатор в волноводе возникают деформации, которые приводят к изменению эффективного показателя преломления  $dn_m^*$  мод оптического волновода [3]:

$$dn_m^* = \frac{dn_m^*}{dW} dW + \sum_{i=1}^3 \frac{\partial n_m^*}{\partial n_i} dn_i, \quad (8)$$

где  $dn_i = \frac{1}{2} n_i^3 P_{11}^i e_i$  для ТЕ-моды излучения;  $dn_i = \frac{1}{2} n_i^3 P_{21}^i e_i$  для ТМ-моды излучения;  $W$  — толщина волновода;  $P_{11}$ ,  $P_{12}$  — элементы упруго-оптического тензора деформации;  $e_i$  — относительная деформация;  $n_i$  ( $i =$

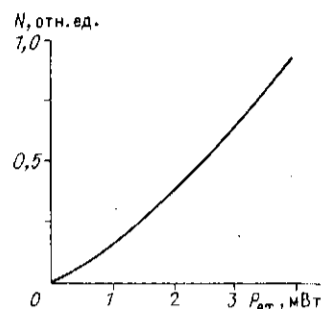


Рис. 3. Градуировочная характеристика радиометра

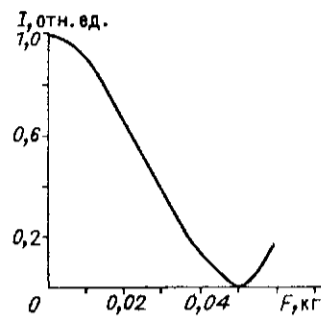


Рис. 4. Зависимость интенсивности излучения на выходе анализатора от силы давления пружины на волновод

$= 1, 2, 3$ ) — коэффициенты преломления подложки, пленки и среды, прилегающей к волноводу соответственно.

Уравнение (8) записано в предположении, что за изменение  $dn_m^*$  ответственны вариации как толщины волновода, так и коэффициентов преломления всех трех сред. При незначительном отличии коэффициентов преломления пленки, волновода и подложки изменения разности фаз между ТЕ- и ТМ-модами при малых деформациях определяются в виде

$$\Gamma = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial n_m^*}{\partial n_i} n_i^3 [P_{21}^i - P_{11}^i] e_i k l, \quad (9)$$

где  $e_i = F/(\epsilon_i l d)$  — относительная деформация, в которой  $\epsilon_i$  — модуль Юнга;  $F$  — сила нагрузки;  $l$  и  $d$  — длина и ширина нагруженной части волновода соответственно;  $k = 2\pi n_3/\lambda_0$  — постоянный коэффициент, в котором  $\lambda_0$  — длина волны излучения в вакууме. Как следует из уравнения (9) с учетом выражения  $e_i$ , величина  $\Gamma$  не зависит от  $l$  и обратно пропорциональна  $d$  при постоянной силе нагрузки, что позволяет повысить чувствительность радиометра при уменьшении ширины волновода.

Изменение интенсивности света на выходе анализатора определяется в виде

$$I = I_0 \cos^2 \left( \frac{\Gamma}{2} \right) = I_0 \cos^2 \frac{\pi}{2} \frac{F}{F_{\lambda/2}}, \quad (10)$$

где  $F_{\lambda/2}$  — полуволновая сила нагрузки;  $I_0$  — интенсивность света на входе радиометра.

Радиометр работает следующим образом. Поток ИК-излучения от объекта поступает по волоконному световоду через линзу на поляризатор и далее вводится с помощью призмы в планарный волновод. Механическая нагрузка на волновод создается актюатором, при этом направление напряжения совпадает с осью (001) монокристаллического слоя и перпендикулярно плоскости подложки. Под действием механической нагрузки, деформирующей волновод, в нем осуществляется поляризационная модуляция ИК-излучения, которое далее поступает через скошенный торец световода вывода излучения на анализатор и фотоприемник. Интенсивность излучения на выходе анализатора изменяется от силы давления актюатора на волновод. С выхода фотоприемника электрический сигнал поступает на усилители 17 и 18 (микросхемы 544УД2) и далее на синхронный детектор 19 (транзистор КТ303Б). Управляет работой синхронного детектора усилитель-формирователь 21 (микросхема 544УД2), на вход которого подается переменный сигнал от генератора 22. На выходе синхронного детектора электрический сигнал регистрируется цифровым универсальным измерительным прибором (ЦУИП).

Экспериментальные исследования радиометра проводились с использованием полупроводникового инжекционного лазера на основе InGaAsP с длиной волны излучения 1,5 мкм. Излучение от лазера вводилось в

передний торец световода с помощью полусферической микролинзы. При токе накачки 60 мА в световод поступала оптическая мощность 4 мВт, при этом потери на ввод не превышали 1 дБ.

При вводе лазерного излучения в передний световод производилась юстировка осей пучка излучения и световода с помощью юстировочного устройства, которое управляется в трех поперечных направлениях с точностью до 1 мкм и обладает двумя угловыми степенями свободы. Допуски разъюстировки осей лазерного пучка и световода, вносящие дополнительные потери (1 дБ для трех поперечных направлений), составляли  $\Delta z = \pm 5$ ,  $\Delta x = \pm 1$ ,  $\Delta y = \pm 2$  мкм.

Градуировочная характеристика радиометра при 100%-ой модуляции показана на рис. 3, а зависимость интенсивности ИК-излучения на выходе анализатора при поляризационной модуляции от силы давления — на рис. 4, где величина полуволновой силы равна 0,05 кг.

Проведенные исследования показали, что на основе тонкопленочного полоскового волновода возможно построение световодного тензооптического ИК-радиометра с достаточно высокой чувствительностью и точностью измерения и приемлемой надежностью в работе.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдошин Е. С. Светопроводные инфракрасные радиометры // ПТЭ.— 1988.— № 2.
2. Тамир Т. Интегральная оптика.— М.: Мир, 1978.
3. Авдошин Е. С. Инфракрасные интегрально-оптические радиометры // Тез. докл. IX Всесоюз. науч.-техн. конф. «Измерения в медицине и их метрологическое обеспечение».— М.: ВНИИОФИ, 1989.
4. Вечканов И. И., Гурьянов А. А., Девятых Г. Г. и др. Инфракрасные волоконные световоды из халькогенидных стекол // Квантовая электрон.— 1982.— 9, № 2.
5. Mitsunori S., Masaya T., Mitsunobu M. Infrared optical fiber with vapor-deposited cladding layer // J. Lightwave Technol.— 1989.— 7, N 1.— P. 158.
6. Караванский В. А., Молочнев В. И., Морозов В. Н. и др. Исследование условий согласования полупроводниковых излучателей с тонкопленочными планарными и полосковыми волноводами // Квантовая электрон.— 1979.— 6, № 10.
7. Авдошин Е. С. Светодиодный преобразователь звукового давления // Измер. техника.— 1988.— № 7.
8. Жаков С. В., Бородин В. И., Останин В. В. Исследование деформации кручения ферромагнитных стержней (эффект Видемана). 2. Теория // Физика металлов и металловедение.— 1984.— 57, вып. 1.

Поступила в редакцию 9 октября 1989 г.

УДК 681.31 : 535

Е. М. ДИАНОВ, А. А. КУЗНЕЦОВ, С. М. НЕФЕДОВ

(Москва)

#### МОДЕЛЬ АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТИ ДЛЯ ТРОИЧНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ

Множество экспериментальных данных указывает на то, что биологическая память основана на распределенном хранении информации [4]. Запоминание информации происходит во всей среде, т. е. при этой процедуре происходят небольшие изменения всех элементов памяти. Для считывания не требуется знания адреса того или иного образа, а в случае небольших потерь в отдельных элементах памяти или при неполной (искаженной) входной информации возможно правильное восстановление записанного образа. Таким образом, биопамять ассоциативна.

Существуют два варианта ассоциативной памяти (АП): автоассоциативная память, которая дает возможность выбрать образ из памяти по его неполной или искаженной части, и гетероассоциативная память, для которой выходной образ структурно не соответствует входному.

Модель АП, недавно предложенная Хопфилдом [2], основана на теории нейронных сетей. В его модели информация хранится в структуре