

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-

© 1990 Алехин В. А.

38

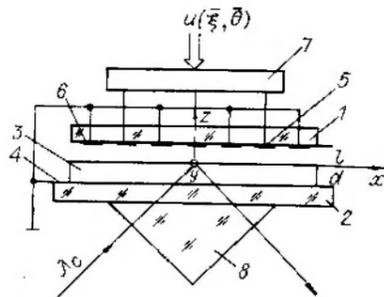


Рис. 1

но-временную модуляцию фазы света, проходящего через управляемую светомодулирующую среду. Модуляция происходит за счет изменения рельефа поверхности прозрачной светомодулирующей среды (рельефографические модуляторы света (РМС)) или за счет изменения оптических характеристик среды (например, показателя преломления в электрооптических кристаллах). Управление светомодулирующей средой бывает зарядовое и электродное. При электродном управляющим

воздействием является напряженность электрического поля, возникающего при подключении входных электрических сигналов к управляющим электродам, количество которых может достигать нескольких тысяч.

Функциональные возможности систем обработки, отображения и регистрации, использующих рельефографические модуляторы света, во многом зависят от характеристик РМС, к которым относятся, в первую очередь, модуляционные, пространственно-частотные и временные характеристики. Численные методы расчета РМС позволяют определять потенциальные возможности, проводить оптимизацию параметров и вычислять характеристики, которые трудно измерить экспериментально. Цель данной работы — разработка математической модели РМС с электродным управлением и анализ возможности применения РМС для создания управляемых оптических элементов.

Математическая модель РМС. Рельефографический модулятор света можно рассматривать как функциональный преобразователь, который осуществляет преобразование входного электрического информационного сигнала в модуляцию рельефа поверхности деформируемого слоя (эластомера). Общая теория рельефографического процесса изложена в [1]. Рассмотрим РМС с электродным управлением (рис. 1), который содержит две стеклянные пластины 1 и 2, деформируемый слой 3, прозрачный электрод 4, управляющие электроды 5, контрэлектроды 6, соединенные с прозрачным электродом 4 и имеющие нулевой потенциал, устройство управления 7, призму полного внутреннего отражения 8. В одномерных многоканальных РМС электроды в виде решетки линейных проводников выполняются на стеклянной пластине 1 методом фотолитографии. Нечетные электроды являются контрэлектродами 6 и имеют нулевой потенциал. На четные электроды поданы управляющие напряжения. Ширина четных электродов b , промежуток между электродами c , период Δx , ширина контрэлектродов $\Delta x - b - 2c$. Считается, что в промежутках между электродами потенциал меняется монотонно (приближенно линейно). Рельефографический процесс в РМС с электродным управлением можно представить в виде совокупности операторов, последовательно преобразующих входной сигнал

$$u(x, y, t) \xrightarrow{1} \sum_n \sum_m u_{nm}(t) \xrightarrow{2} \mathbf{E}(x, y, z, t) \xrightarrow{3} P(x, y, z, t) \xrightarrow{4} \\ \rightarrow A(x, y, z, t) \xrightarrow{5} \exp[j\Phi(x, y, z, t)] \xrightarrow{6} I(x, y, z, t),$$

где $u(x, y, z, t)$ — входной пространственно-временной электрический сигнал; $u_{nm}(t)$ — дискретизированный сигнал на управляющих электродах; $\mathbf{E}(x, y, z, t)$ — пространственно-временное распределение напряженности электрического поля внутри РМС; $P(x, y, z, t)$ — плотность нормальных пондеромоторных сил на границе воздух — деформируемый слой; $A(x, y, z, t)$ — пространственно-временное распределение рельефа поверхности деформируемого слоя; $\exp[j\Phi(x, y, z, t)]$ — фазовый множитель считываемого модулированного света (причем $\Phi(x, y, z, t)$ связано с $A(x, y, z, t)$); $I(x, y, z, t)$ — распределение интенсивности света

на выходе рельефографической системы. В данной статье рассмотрены с 1-го по 5-й этапы преобразования сигнала в одномерном РМС с входным сигналом $u(x) = u_0 + u_1 \cos \Omega x$.

С учетом дискретизации входного сигнала распределение управляющего потенциала в плоскости электродов можно представить в виде

$$U(x) = d_n(0)u_0 + d_n(\Omega)u_1 \cos \Omega x + \sum_{n=1}^{\infty} 2u_0 d_n(n\omega_{0x}) \cos n\omega_{0x}x + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} d_n(n\omega_{0x} + \Omega)u_1 \cos [(n\omega_{0x} + \Omega)x] + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} d_n(n\omega_{0x} - \Omega)u_1 \cos [(n\omega_{0x} - \Omega)x] = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cos \beta_k x,$$

здесь $\omega_{0x} = 2\pi/\Delta_x$; β_k — пространственные частоты гармонических составляющих; U_0 — постоянная составляющая; U_k — амплитуды гармоник после их группировки и суммирования. Масштабные множители гармоник спектра вычисляются через параметры электродов по формуле

$$d_n(n\omega_{0x}) = \frac{c+b}{\Delta_x} \frac{\sin [0,5n\omega_{0x}(c+b)] \sin 0,5n\omega_{0x}c}{0,25n\omega_{0x}(c+b)n\omega_{0x}c}.$$

Решение уравнений Лапласа дает следующие выражения для нормальных и тангенциальных составляющих электрического поля на границе раздела эластомерного слоя и воздуха:

$$E_1(x) = -\frac{U_0 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 l + \varepsilon_2 d} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_k \beta_k \varepsilon_2 \cos \beta_k x}{\varepsilon_1 \operatorname{sh} \beta_k l + \varepsilon_2 \operatorname{th} \beta_k d \operatorname{ch} \beta_k l};$$

$$E_2(x) = (\varepsilon_1/\varepsilon_2) E_1(x);$$

$$E_3(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_k \varepsilon_2 \beta_k \operatorname{th} \beta_k d \sin \beta_k x}{\varepsilon_1 \operatorname{sh} \beta_k l + \varepsilon_2 \operatorname{ch} \beta_k l \operatorname{th} \beta_k d},$$

где ε_1 и ε_2 — относительные диэлектрические проницаемости эластомерного слоя и воздуха соответственно; d — толщина слоя; l — величина зазора. На третьем этапе преобразования плотность ponderомоторных сил $P(x) = 0,5\varepsilon_0(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)[E_1(x)E_2(x) + E_3^2(x)]$. Это нелинейное преобразование дает дополнительные составляющие на кратных и комбинационных частотах. Амплитуда рельефа для каждой составляющей ponderомоторных сил в установившемся режиме записывается следующим образом [1]:

$$A_k = P_k F(\omega_k d) / [4G\omega_k + \alpha(2\omega_k)^2 F(\omega_k d)],$$

где P_k — амплитуда составляющей плотности сил с частотой ω_k ; G и α — модуль упругости при сжатии и поверхностное натяжение деформируемого слоя соответственно; $F(\omega_k d) = (\operatorname{sh} \omega_k d \operatorname{ch} \omega_k d - \omega_k d) / [\operatorname{ch}^2 \omega_k d + (\omega_k d)^2]$ — частотно-зависимая функция. В РМС с призмой полного внутреннего отражения δ (см. рис. 1) считывающий свет с длиной волны λ_c отражается от внутренней поверхности деформируемого слоя.

В этом случае оптический комплексный коэффициент пропускания РМС

$$T(x, y) = \exp [j\Phi(x, y)] = \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda_c} 2A(x, y) n_c \right],$$

здесь n_c — коэффициент преломления деформируемого слоя.

Численное моделирование. Алгоритм преобразования сигнала в рельефографическом модуляторе света реализован в виде программ для ЕС ЭВМ. Входными данными программы являются: u_0 , u_1 , $\Lambda = 2\pi/\Omega$ — постоянная составляющая, амплитуда и пространственный период переменной составляющей входного электрического сигнала соответственно; параметры электродов Δ_x , b , c ; конструктивные параметры модулятора — толщина деформируемого слоя d , величина зазора l , относительные диэлектрические проницаемости деформируемого слоя ε_1 и воздуха ε_2 ;

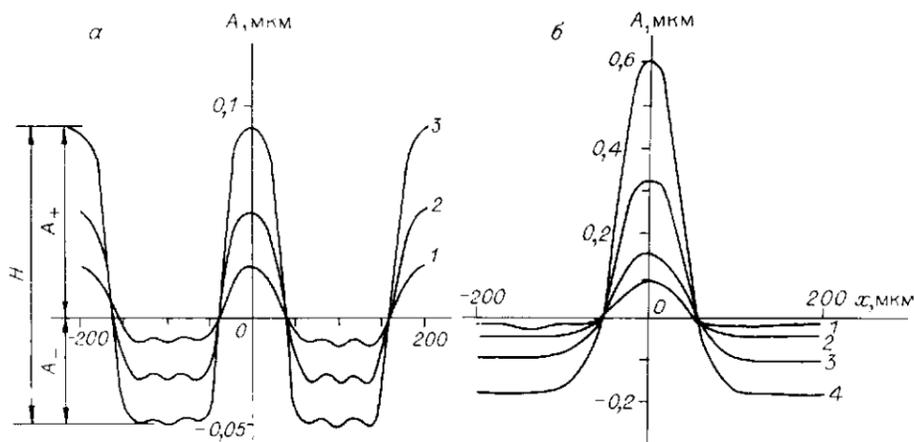


Рис. 2

механические параметры деформируемого слоя — модуль упругости при сжатии G и поверхностное натяжение α . Выходные параметры: массивы значений и графики профиля рельефа деформируемого слоя $A(x)$; значения глубины рельефа $H = A_+ - A_-$ (рис. 2, а) и модуляции фазы считывающего света. В программе учитывается 60 гармоник управляющего потенциала.

Расчеты проведены для упруговязкого деформируемого слоя со значениями $G = 5 \cdot 10^3$ Па, $\alpha = 0$, $\epsilon_1 = 2,5$, $n_c = 1,6$. Такими параметрами обладает силиконовый эластомер, представляющий собой смесь полиорганосилоксанового каучука СКТН-А, полиметилсилоксановой жидкости ПМС-5, отвердителя и ускорителя. Модуль упругости G зависит от процентного содержания СКТН-А и составляет $5 \cdot 10^3$ Па для смеси, содержащей 10% СКТН-А. На рис. 2 показаны профили рельефа в РМС с параметрами $\Lambda = 400$, $d = 100$, $l = 10$, $\Delta_x = 200$, $b = c = 50$ мкм, $G = 5 \cdot 10^3$ Па для различных входных сигналов. Постоянная составляющая u_0 входного сигнала при $u_1 = 0$ создает рельеф с периодом 200 мкм, равным периоду четных управляющих электродов Δ_x (см. рис. 2, а). Профиль 1 соответствует $u_0 = 100$, 2 — $u_0 = 150$, 3 — $u_0 = 200$ В. Высота гребня A_+ достигает 0,09 мкм при $u_0 = 200$ В (профиль 3). Дно канавки имеет плоскую площадку шириной около $\Delta_x/2$. Значение A_- для $u_0 = 200$ В составляет $-0,05$ мкм. Полное изменение фазы считывающего света $\Delta\Phi = 4\pi H n_c / \lambda_c = 1,4\pi$. На рис. 2, б построены профили рельефа для $u_0 = 50$, $u_1 = 50$ В (профиль 1), $u_0 = u_1 = 100$ В (профиль 2), $u_0 = u_1 = 150$ В (профиль 3), $u_0 = u_1 = 200$ В (профиль 4). В этом случае период рельефа соответствует периоду переменной составляющей входного сигнала $\Lambda = 400$ мкм. Примечательно, что профили 2—4 имеют канавку с плоским дном шириной $\Lambda/2$, причем глубина канавки изменяется от нуля при $u_0 = u_1 = 0$ до $-0,18$ мкм при $u_0 = u_1 = 200$ В. Для управляющего напряжения $u_0 = u_1 \geq 215$ В модуляция фазы света, отраженного от дна канавки, превышает 2π . Профили рельефов в РМС с несимметричной топологией электродов показаны на рис. 3. Профиль 1 соответствует $b = \Delta_x/6$, $c = \Delta_x/6$, профиль 2 — $b = \Delta_x/2$, $c = \Delta_x/6$. Входное напряжение одинаковое: $u_0 = 150$ В, $u_1 = 0$. Как видно, узкие управляющие электроды и широкие контрэлектроды создают более глубокий рельеф с острым гребнем и параболической формой канавки (профиль 1). Широким управляющим электродам соответствует рельеф с плоским гребнем и двугорбой канавкой (профиль 2). Модуляционные характеристики РМС в виде зависимостей глубины рельефа H и модуляции фазы $\Delta\Phi = 4\pi H n_c / \lambda_c$ от постоянной составляющей входного сигнала u_0 для $\lambda_c = 0,63$ мкм, $G = 5 \cdot 10^3$ Па, $n_c = 1,6$ построены на рис. 4. Конструктивные параметры модулятора: 1 — $d = 100$, $l = 10$; 2 — $d = 50$,

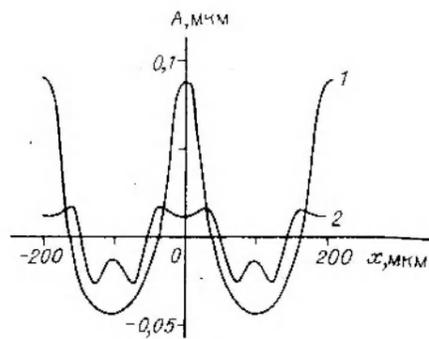


Рис. 3

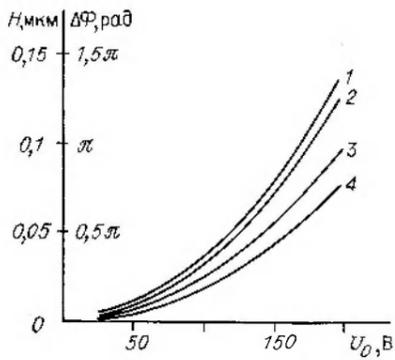


Рис. 4

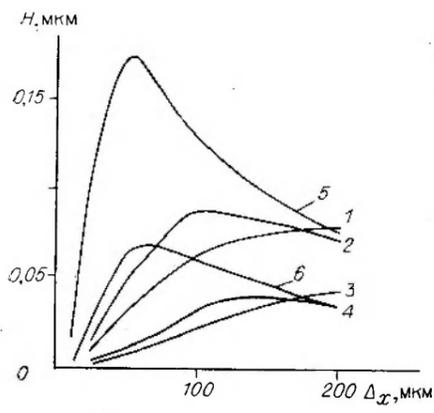


Рис. 5

$l = 10$; 3 — $d = 200$, $l = 10$; 4 — $d = 100$, $l = 20$ мкм. Электроды симметричные: $b = c = 50$ мкм, $\Delta_x = 200$ мкм.

Представленные выше профили рельефов и модуляционные характеристики справедливы и для РМС с другими значениями пространственного периода электродов Δ_x при умножении на масштабный множитель $K = \Delta_x / 200$ мкм следующих параметров РМС: u_0 , u_1 , λ , d , l , b , c , G .

Пространственно-частотные характеристики РМС (рис. 5) рассчитаны для $u_0 = 150$ В, $u_1 = 0$, $G = 5 \times 10^3$ Па и следующих конструктивных параметров: 1 — $d = 100$, $l = 10$; 2 — $d = 50$, $l = 10$; 3 — $d = 100$,

4 — $d = 50$, $l = 20$; 5 — $d = 10$, $l = 2$; 6 — $d = 10$, $l = 5$ мкм. Для проверки численных результатов была рассчитана светоотдача рельефов при визуализации записи. Оптические характеристики светоотдачи и диапазон напряжений соответствуют экспериментальным исследованиям РМС [2].

Анализ полученных результатов. Рельефографические модуляторы света с эластомерным слоем и электродным управлением в конструктивном и технологическом отношении являются более простыми по сравнению с известными рельефографическими мембранными модуляторами света [3].

Пространственно-частотные характеристики имеют максимум при $d \approx \Delta_x / 2$. В РМС с высоким разрешением и соответственно с малым Δ_x необходимо применять тонкие эластомерные слои. Предельная разрешающая способность РМС зависит от технологии изготовления электродов и составляет 50 мм^{-1} и более, полное разрешение до 2000 элементов. По данным [3] мембранные модуляторы имеют разрешающую способность 20 мм^{-1} , полное разрешение 200 элементов.

Наибольшую крутизну модуляционной характеристики имеют РМС с оптимальной толщиной $d \approx \Delta_x / 2$. Увеличение зазора или толщины слоя в 2 раза существенно уменьшает крутизну модуляционной характеристики (в 1,9 и 1,5 раза соответственно). Диапазон входных напряжений РМС 50—250 В, модуляция фазы превышает 2л. Расчетное значение минимального входного напряжения для изменения фазы света на π составляет 75 В (в РМС с параметрами $d = 10$ мкм, $l = 2$ мкм, $G = 5 \cdot 10^3$ Па, $\Delta_x = 20$ мкм, $b = c = 5$ мкм). В мембранных модуляторах линейность модуляции сохраняется до 0,4л, входные напряжения

20—40 В. Время переключения РМС 20—30 мкс (в мембранных модуляторах 0,1—1 мкс).

Выбор соответствующих конструктивных и электромеханических параметров РМС и управляющих сигналов изменяет в широких пределах профиль рельефа свободной поверхности эластомера (в расчете получены плоские площадки, параболический и синусоидальный профили и др.). Эластомерные слои при соответствующей технологии изготовления имеют высокое оптическое качество и широкий спектральный диапазон. По сравнению с мембранными модуляторами света РМС с эластомерным слоем могут найти более широкое применение для создания аналоговых управляемых фазовых корректоров, фазовых фильтров, киноформных оптических элементов. РМС можно применять для отображения телевизионной информации [4], вывода информации из ЭВМ, регистрации информации на светочувствительных носителях с высокой плотностью записи [5]. В таких рельефографических устройствах для визуализации рельефной фазовой записи используются цилиндрические шпирен-проекторы [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуцо Ю. П. Фазовая рельефография.— М.: Энергия, 1974.
2. Алехин В. А., Гаврилов В. И., Гусев В. В. и др. Сенситометрические и частотные характеристики записи сигналов на гелеобразных деформируемых слоях и способы их измерения // ЖНПФик.— 1981.— № 5.
3. Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. И., Парфенов А. В. Пространственные модуляторы света.— М.: Радио и связь, 1987.
4. Гуцо Ю. П., Алехин В. А., Левицкая Е. А. Рельефографическое проекционное устройство воспроизведения ТВ-сигналов // Техника кино и телевидения.— 1983.— № 11.
5. А. с. 959031 СССР. Рельефографическое устройство для записи информации на светочувствительном оконечном носителе/В. А. Алехин, Ю. П. Гуцо.— Оpubл. 15.09.82. Бюл. № 34.
6. Алехин В. А., Гуцо Ю. П. Расчет оптических параметров цилиндрического шпирен-проектора // Опт.-мех. пром-сть.— 1985.— № 7.

Поступила в редакцию 17 мая 1988 г.

УДК 62.50

А. А. ВОЕВОДА, В. А. ЖМУДЬ
(Новосибирск)

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ КОНТУРА ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА. РАЗВИТИЕ МЕТОДА ЛОКАЛИЗАЦИИ

Введение. Развитие оптических информационных технологий требует создания прецизионных систем автоматического регулирования таких, как устройства автофокусировки, слежения за дорожкой, управления приводами, термостатирования активной среды оптических излучателей и т. д. В ряде случаев объект описывается нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями. Например, при решении задачи термостабилизации полупроводникового лазера следует учесть нелинейность характеристики микрохолодильника и зависимость ее от температуры окружающей среды. Температура измеряется с помощью реального датчика, описываемого уравнением первого порядка, т. е. вектор состояния объекта лишь частично доступен измерению.

© 1990 Воевода А. А., Жмудь В. А.