

УДК 681.586.5 : 535

Ю. В. Есипов, И. Н. Могильченко

*(Ростов-на-Дону)***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФУНКЦИЙ СВЕТОПРОПУСКАНИЯ
ДВУХКАНАЛЬНОГО УПРУГООПТИЧЕСКОГО СВЕТОВОДА
ДЛЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ГРАНИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ
МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

Рассматривается метод дифференциального граничного преобразования механических возмущений в упругооптических двухканальных световодах с нарушением и восстановлением полного внутреннего отражения направленного неполяризованного оптического излучения. Определяются функции светопропускания каналов световода: сердцевины и подложки, выполненные из изотропных халькогенидных стекол. Анализируются расчетные графические зависимости функций светопропускания. Делается вывод о возможности дифференциального преобразования «напряжение сжатия — интенсивность оптического излучения».

Введение. Метод граничной амплитудной модуляции (ГАМ), основанный на эффекте нарушения полного внутреннего отражения (ПВО) оптического излучения (ОИ) от границы раздела оптических сред, рассматривался в ряде работ [1, 2] и получил широкое применение в измерительных преобразователях и датчиках физических величин [3—6]. При использовании некогерентного направленного ОИ можно получить квазилинейные зависимости светопропускания сердцевины световода в большом диапазоне изменения показателя преломления граничной среды [3—6]. При этом в качестве материалов граничных сред можно выбирать изотропные и анизотропные упругооптические материалы [7, 8]. Верхняя граничная частота измерения волн напряжения определяется видом упругооптического взаимодействия, свойствами материалов и оптико-конструктивными параметрами световода и может достигать десятков мегагерц [3, 6].

С точки зрения классификации измерительных преобразователей датчики давлений и механических напряжений, построенные по принципу граничной амплитудной модуляции, в настоящее время разработаны как измерительные цепи последовательного включения параметрических преобразователей. Однако если рассматривать упругооптическое взаимодействие как в подложках, так и в сердцевине световода, а сам световод выполнить с возможностью распределения, удержания и отдельного вывода оптического излучения из его слоев, то снимаемые оптические сигналы оказываются противофазно модулированными и могут быть использованы для дифференциального преобразования. При этом противофазная модуляция достигается путем распределения оптического излучения, вводимого с заданной угловой апертурой, между сердцевиной и подложками световода в пределах возможного относительного изменения под действием механического напряжения их показателей преломления. Разность амплитуд оптических сигналов пропорциональна амплитуде упругой волны напряжения.

Кроме того, противофазную модуляцию амплитуды интенсивности ОИ механическим напряжением можно выполнить, используя комбинацию из двух упругооптических световодов, первый из которых работает при сжатии по принципу нарушения ПВО, второй — по принципу его восстановления, а оптические сигналы можно снимать из сердцевины световодов.

Датчики механических возмущений на основе двух и более канальных световодов с возможностью создания противофазно модулированных по амплитуде оптических сигналов можно назвать датчиками с дифференциальной граничной амплитудной модуляцией. Преимуществами дифференциального преобразования являются линейность функции преобразования, независимость измеряемой величины от амплитуды входного сигнала, повышенная устойчивость к воздействию сопутствующих помех [9].

В настоящей работе с целью повышения точности и устойчивости измерений механических возмущений и напряжений в твердых телах, например статических напряжений или поверхностных акустических волн, в условиях возможных сопутствующих помех рассматриваются метод и устройство дифференциального граничного преобразования волн сжатия в упругооптических двухканальных световодах с нарушением и восстановлением полного внутреннего отражения направленного неполяризованного оптического излучения. Для этого вводятся необходимые условия преобразования и требования к акустооптическим характеристикам материалов. Определяются функции светопропускания каналов световода, которыми являются сердцевина и подложка, выполненные из пар изотропных халькогенидных стекол. Проводится анализ полученных расчетным путем графических зависимостей указанных функций и исследуются возможности дифференциального преобразования «напряжение сжатия σ — интенсивность неполяризованного направленного оптического излучения I ». При этом используются математические соотношения геометрической оптики [1] и линейного упругооптического эффекта в изотропных средах [8, 10], а само преобразование рассматривается при выполнении условий квазиоднородности и квазистационарности применительно как к продольным к световоду волнам напряжения (p -волнам), так и к поперечным (s -волнам).

Основные условия и соотношения. В плоскости xOz рассматривается двухслойный световод (рис. 1), состоящий из подложки с показателем преломления n_0 и сердцевины с показателем преломления n_1 . На наружные грани световода нанесено отражающее покрытие с коэффициентом отражения, равным 1. В сердцевину световода вводится неполяризованное (циркулярно поляризованное) оптическое излучение с угловой диаграммой направленности (ДН) в виде $I(\Omega) = I_0$ при $\Omega \in \Omega_1$. Пусть граничные лучи излучения падают на подложку соответственно под углами $\Theta_{i_1}, \Theta_{i_1} + \Omega_1$, а углы падения «внутренних» лучей находятся в пределах $\Theta_{i_1} < \Theta_i < \Theta_{i_1} + \Omega_1$.

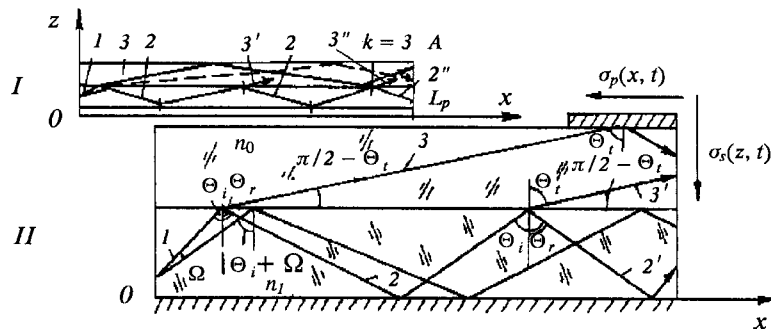


Рис. 1. Оптическая схема управляемого двухканального световода в режиме нарушения ПВО: I — схема рабочего участка, II — схема отражений и преломлений лучей на рабочем участке

В невозмущенном состоянии световода критический угол $\Theta_{\text{кр}}$ полного внутреннего отражения на основании закона Снеллиуса определяется как

$$\Theta_{\text{кр}} = \arcsin\left(\frac{n_0}{n_1}\right). \quad (1)$$

При падении луча на подложку под углом $\Theta_i < \Theta_{\text{кр}}$ угол его преломления равен

$$\Theta_t = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_0} \sin\Theta_i\right). \quad (2)$$

Пусть ОИ направлено таким образом, что

$$\Theta_{i_1} < \Theta_{\text{кр}} < \Theta_{i_1} + \Omega_1. \quad (3)$$

Тогда от луча 1 (см. рис. 1), падающего под углом Θ_{i_1} , образуются отраженный 2 и преломленный 3 лучи, распространяющиеся соответственно в сердцевине и подложке под углами Θ_r и Θ_t . Причем луч 3 отражается от наружного покрытия подложки под углом Θ_{t_1} и возвращается в сердцевину. Пусть угол Θ_{i_1} выбран таким, что на участке хода преломленного луча, обозначенного OA , происходит несколько отражений $2', 2''$ луча 2 с образованием дополнительных преломленных лучей $3', 3''$. Пусть за точкой A на внутренней границе «сердцевина—подложка» нанесено отражающее покрытие, способствующее прохождению лучей $3, 3', 3''$ и $2, 2', 2''$ без ослабления вплоть до выхода из световода. Участок OA назовем рабочим участком световода.

Рассмотрим два крайних случая воздействия. Пусть по осям Ox и Oz вдоль или поперек световода со скоростью $v_{\text{зв}}$ распространяется механическое возмущение в виде продольной p -волны сжатия $\sigma_p(x, t)$ или поперечной s -волны $\sigma_s(z, t)$ (рис. 2), причем переменные координаты x, z и время t связаны соотношениями $x = v_{\text{зв}}t, z = v_{\text{зв}}t$. На основании упругооптического эффекта под действием волны сжатия считаем, что происходит линейное изменение показателей преломления материала световода, описываемое известными зависимостями [8, 10]

$$n(\sigma) = n_0 + \Delta n(\sigma) = n_0 + n_0^3 p_{\text{эф}} \frac{\sigma}{E} = n_0 + \sqrt{M\rho v_{\text{зв}}^3} \sigma', \quad (4)$$

где n_0 — начальное (невозмущенное) значение показателя преломления материала; $p_{\text{эф}}$ — упругооптическая постоянная изотропного материала; M — акустооптическое качество, $\text{с} \cdot \text{кг}^{-1}$; $\rho, v_{\text{зв}}$ — плотность материала и скорость звука в нем; E — модуль Юнга; σ' — безразмерное напряжение в материале: $\sigma' = \sigma/E$.

Тогда с учетом соотношений (4) критический угол падения в функции от безразмерного напряжения можно представить в виде

$$\Theta_{\text{кр}}(\sigma') = \arcsin\left(\frac{n_{00} + \sqrt{M_0\rho_0 v_{\text{зв}0}^3} \sigma'}{n_{01} + \sqrt{M_1\rho_1 v_{\text{зв}1}^3} \sigma'}\right), \quad (5)$$

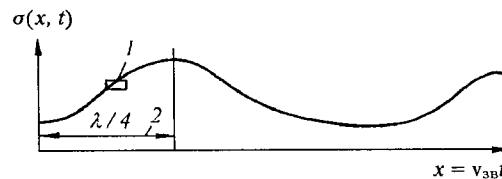


Рис. 2. Распространение волны сжатия вдоль оси Ox световода: 1 — рабочий участок световода, 2 — четверть наименьшей длины волны сжатия

где n_{00} , n_{01} — соответственно невозмущенные значения показателей преломления подложки и сердцевины, а индексами 0, 1 обозначаются их акустооптические характеристики.

Очевидно, что под действием волн сжатия функция $\Theta_{i_{кр}}(\sigma')$ может возрастать или убывать.

Если от волны сжатия показатель преломления подложки $n_0(\sigma')$ растет быстрее показателя преломления сердцевины $n_1(\sigma')$, то значение $\Theta_{i_{кр}}(\sigma')$ возрастает. Это приводит для ряда лучей ОИ к нарушению правой части условия (3), т. е. к нарушению ПВО, и в подложке возникают дополнительные преломленные волны. С учетом соотношения (5) условие нарушения ПВО, выраженное через акустооптические характеристики материала подложки и сердцевины световода, можно записать:

Это приводит к уменьшению $\Theta_{i_{кр}}(\sigma')$ и нарушению левой части условия (3). Этот случай можно назвать восстановлением ПВО, например, для луча Θ_{i_1} , в результате чего преломленные лучи 3 , $3'$, $3''$ исчезнут и вся световая энергия останется в сердцевине. Условие восстановления ПВО через акустооптические характеристики материала обратно условию (6) и имеет вид

$$M_0 \rho_0 v_{зв0}^3 < M_1 \rho_1 v_{зв1}^3. \quad (7)$$

Таким образом, условия (6), (7) являются условиями выбора акустооптического материала подложки и сердцевины световода для осуществления граничного преобразования механического возмущения в амплитуду интенсивности непрерывно распределенного в телесном угле Ω_1 оптического излучения.

Заметим, что если $M_0 \rho_0 v_{зв0}^3 = M_1 \rho_1 v_{зв1}^3$, то граничное преобразование отсутствует.

Длина рабочего участка определяется как

$$L_p = L_{OA} = 2\Delta_0 \text{tg}(\Theta_i(\sigma'_1)), \quad (8)$$

где σ'_1 выбирается как верхнее значение напряжения при нарушении ПВО, равное верхней границе диапазона измерений, или $\sigma'_1 = 0$ — при восстановлении ПВО; $\Theta_i(\sigma'_1)$ — минимальное значение преломленного угла при изменении угла падения в интервале $[\Theta_i, \Theta_i + \Omega_1]$, определяемое по формуле (3) с учетом подстановки (4); Δ_0 — толщина подложки световода.

Время распространения возмущения (волн сжатия) по длине рабочего участка можно определить из соотношения

$$\tau_p = \frac{L_p}{v_{звм}}, \quad (9)$$

где $v_{звм}$ — минимальная из двух скоростей $v_{зв0}$, $v_{зв1}$.

Поскольку практически $v_{зв0}$ и $v_{зв1}$ отличаются незначительно, несинфазностью волн напряжения в подложке и сердцевине пренебрегаем.

Наименьшая эффективная длина волны сжатия

$$\lambda_{эф} = 2\pi \frac{v_{звм}}{f_{BC}}, \quad (10)$$

где f_{BC} — верхняя граничная частота спектрального разложения волны сжатия.

Тогда можно считать, что распределение волны сжатия (p -волны) по длине и толщине рабочего участка световода является однородным, если выполняется условие (см. рис. 2)

$$L_p \leq 0,2 \frac{\lambda_{\text{эф}}}{4} = 0,05\lambda_{\text{эф}}. \quad (11.1)$$

Для поперечной к световоду волны (s -волны) условие квазиоднородности имеет вид

$$\Delta_1 \leq 0,05\lambda_{\text{эф}}. \quad (11.2)$$

Условия (11) есть условия квазиоднородности амплитуды волны возмущения по длине и толщине рабочего участка световода. Таким образом, при их соблюдении можно в первом приближении пренебречь несинфазностью волн сжатия, распространяющихся в разных слоях световода, а также акустооптической дифракцией в материале световода [4].

Условие квазистационарности преобразования, при котором время прохождения ОИ по длине рабочего участка световода меньше времени пребывания в нем возмущения, можно представить как

$$\tau_{\text{ОИ}} < \tau_p, \quad (12)$$

где $\tau_{\text{ОИ}}$ — время прохождения лучей в сердцевине световода:

$$\tau_{\text{ОИ}} = kn_1 L_p / (c \cdot \sin \Theta_i), \quad (13)$$

k — число отражений лучей от подложки; c — скорость света в вакууме.

С учетом формул (9), (12), (13) условие квазистационарности преобразования можно представить в виде

$$v_{\text{зв}} < \frac{c \cdot \sin \Theta_i}{kn_1}. \quad (14)$$

Поскольку в акустооптических материалах скорость звука $v_{\text{зв}} \leq 10^4$ м/с, то неравенство выполняется при углах падения $\Theta_i \geq 10^0$ до значений $k \leq 10^3$.

Таким образом, для рассматриваемого вида преобразования волну механического возмущения можно считать «замороженной» относительно фронта оптического излучения.

Представим диаграмму направленности оптического излучения в виде суперпозиции R неперекрывающихся элементарных лучей с интенсивностью i_l , где l — текущий номер луча: $l = \overline{1, R}$, причем угол падения луча i_l на подложку составляет (см. рис. 1 и 3):

$$\Theta_{i_l} = \Theta_{i_1} + \Omega_1 \left(1 - \frac{l}{R}\right). \quad (15)$$

Для такого представления условие нормировки оптического излучения по суммарной интенсивности имеет вид:

$$I = \int_{\Omega_1} I(\Omega) d\Omega = \sum_{l=1}^R i_l, \quad (16)$$

где интенсивность элементарного луча

$$i_l = \frac{I}{R}. \quad (17)$$

Рассмотрим необходимые условия и примем допущения для дальнейшего формального описания дифференциального граничного преобразования ме-

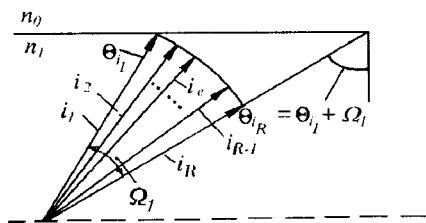


Рис. 3. Представление угловой диаграммы направленности ОИ суперпозицией элементарных лучей: i_1, i_2, i_R – элементарные лучи; θ_{i1}, θ_{iR} – углы падения граничных лучей на подложку

ханических возмущений в амплитуду интенсивности направленного неполяризованного оптического излучения.

Определим аналитические зависимости функций светопропускания световода от приложенного напряжения. Считаем, что потери от поглощения, отражения, расфокусировки и переизлучения либо отсутствуют, либо учитываются при настройке оптического тракта.

Тогда интенсивности ОИ на выходе каналов световода равны входной интенсивности ОИ:

$$I = I_0 + I_1, \quad (18)$$

где I_0, I_1 — соответственно интенсивность ОИ на выходе из подложки и сердцевин.

Определим функцию светопропускания канала световода как отношение интенсивностей ОИ на выходе каналов и на входе световода:

$$\tau_{0(1)}(\sigma') = \frac{I_{0(1)}(\sigma')}{I}, \quad (19)$$

здесь σ' — напряжение, влияющее на светопропускание подложки за счет создания преломленных волн интенсивностью $I_0(\sigma')$ и на светопропускание сердцевин за счет изменения интенсивности отраженных волн $I_1(\sigma')$.

С учетом выражений (18), (19) получим условие нормировки функций светопропускания

$$\tau_0(\sigma') + \tau_1(\sigma') = 1. \quad (20)$$

Интенсивности неполяризованных отраженного и преломленного лучей найдем через малые коэффициенты Френеля с разложением каждого оптического луча на продольную (p) и поперечную (s) составляющие [1, 2]. Из выражения (19) функции светопропускания при однократном ($k = 1$) отражении элементарного луча i_i определим в виде

$$\tau_{1i_1}(\sigma') = 0,5(r_s(\sigma') + r_p(\sigma')), \quad (21.1)$$

$$\tau_{0i_1}(\sigma') = 0,5(d_s(\sigma') + d_p(\sigma')), \quad (21.2)$$

где r, d — соответственно малые коэффициенты Френеля для отражения и преломления.

При k отражениях от подложки луча i_i , распространяющегося в сердцевине, функции светопропускания можно найти из выражений

$$\tau_{1i_k}(\sigma') = 0,5(r_s^k + r_p^k), \quad (22.1)$$

$$\begin{aligned} \tau_{0i_k}(\sigma') = & 0,5(d_s(1 + r_s + r_s^2 + \dots + r_s^{k-1}) + \\ & + d_p(1 + r_p + r_p^2 + \dots + r_p^{k-1})), \end{aligned} \quad (22.2)$$

где для краткости записи правой части аргумент опущен.

Тогда при прохождении по упругонапряженному световоду направленного ОИ функции светопропускания сердцевины и подложки определяются путем суммирования τ_{1i}, τ_{0i} по элементарным лучам i :

$$\tau_1(\sigma') = \sum_{i=1}^R \tau_{1i}(\sigma'), \quad \tau_0(\sigma') = \sum_{i=1}^R \tau_{0i}(\sigma'). \quad (23)$$

В заключение в выражениях (21), (22) распишем малые коэффициенты Френеля как функции от безразмерного напряжения:

$$r_s(\sigma') = \left(\frac{n_1(\sigma') \cos \Theta_i - A}{n_1(\sigma') \cos \Theta_i + A} \right)^2, \quad (24.1)$$

$$r_p(\sigma') = \left(\frac{n_0(\sigma') \cos \Theta_i - n_1(\sigma') A}{n_0(\sigma') \cos \Theta_i + n_1(\sigma') A} \right)^2, \quad (24.2)$$

$$d_s(\sigma') = \frac{4 \cos \Theta_i n_1(\sigma') A}{(A + n_1(\sigma') \cos \Theta_i)^2}, \quad (24.3)$$

$$d_p(\sigma') = \frac{4 n_1(\sigma') A \sin \Theta_i \cdot \cos \Theta_i}{(A + n_1(\sigma') \cos \Theta_i)(A \cos \Theta_i + n_1(\sigma') \sin^2 \Theta_i)}, \quad (24.4)$$

где

$$A = \sqrt{n_0^2(\sigma') - n_1^2(\sigma') \sin^2 \Theta_i}.$$

Таким образом, система соотношений (4), (5), (15), (21) — (24) представляет собой аналитическое выражение функции светопропускания направленного неполяризованного оптического излучения упруговозмущенным двухканальным световодом.

Численное моделирование и его анализ. Основываясь на вышеизложенных результатах, исследуем два варианта световодов, преобразующих волны сжатия по принципу нарушения и восстановления ПВО. Конструктивно световод выберем плоским, с толщиной слоев $\Delta = 0,2$ мм и длиной $L = 10$ мм. В качестве материала световода возьмем халькогенидные стекла.

С учетом условий (2), (6) для световода по принципу нарушения ПВО выберем пару Se—As₁₂Se₅₅Ge₃₃ (селен-халькогенидное стекло), образующую систему «подложка—сердцевина». На основе выражения (4) и выбранных значений акустооптических характеристик материалов [8] получены функции преобразования показателей преломления на сжатие $n_0(\sigma') = 2,497 + 5,602\sigma'$, $n_1(\sigma') = 2,700 + 3,021\sigma'$ и начальное (невозмущенное) значение критического угла световода $\Theta_{i_{кр}} = 67^\circ 48'$.

Выберем ОИ с угловой ДН в пределах углов падения $[\Theta_n = 68, \Theta_b = 71^\circ]$. При этом ОИ представим в виде суперпозиции из четырех лучей с относительной интенсивностью $i = 0,25$, падающих на подложку под углами $\Theta_{i_1} = 68; \Theta_{i_2} = 69; \Theta_{i_3} = 70; \Theta_{i_4} = 71^\circ$.

В невозмущенном состоянии световода имеет место полное внутреннее отражение этих лучей, вследствие чего $\tau_0 = 0, \tau_1 = 1$. Расчетная длина рабочего участка световода составляет $L_p = 1,2$ мм. В пределах этого участка создаются однократное возмущенное преломление и невозмущенные отражения в подложке и трехкратное возмущенное отражение-преломление ОИ в сердцевине с последующим невозмущенным отражением на нерабочем участке световода (см. рис. 1).

Определим, что условие квазиоднородности (11) соблюдается до частот $f_{вс_p} = 0,6$ МГц для продольных p -волн напряжений и частот $f_{вс_s} = 4,2$ МГц для поперечных s -волн.

Условие квазистационарности (14) соблюдается при числе отражений $k = 3 \cdot 10^5$. При переменном шаге в диапазоне относительных напряжений сжатия $\sigma' = 10^{-4} - 10^{-1}$ получены значения $n_0(\sigma')$, $n_1(\sigma')$ и проведен расчет системы выражений (21) — (24). В результате построены графические зависимости функций светопропускания для однократного возмущенного преломления-отражения в подложке и сердцевине ($k = 1$) и однократного отражения в подложке и трехкратного отражения в сердцевине $k = 3$ (рис. 4). Графическая аппроксимация проведена по методу наименьших квадратов. Из расчетных зависимостей видно, что диапазон линейного преобразования находится на отрезке $\sigma' \in [3 \cdot 10^{-3}, 4 \cdot 10^{-2}]$, что соответствует абсолютным значениям напряжений сжатия при $E = 2 \cdot 10^9 - \sigma \in [6 \cdot 10^6, 8 \cdot 10^7]$ Па, регистрируемых в диапазоне частот до 0,6 (p -волна) и 4,2 МГц (s -волна). Отметим, что диапазон квазилинейного изменения достигает $\Delta\tau = 0,9$ вследствие того, что подобрано излучение с изменением $\Theta_{i_{кр}}(\sigma')$ по всей ДН. В случае использования ламбертовского несфокусированного источника с диаграммой направленности в виде $I(\Omega) = I_m \cos \Omega$, как показано в [4], на этой области значений σ' диапазон изменения $\Delta\tau = 0,2 - 0,4$.

Из полученных зависимостей $\tau_0(\sigma')$, $\tau_1(\sigma')$ следует, что при появлении и увеличении напряжения в световоде интенсивность ОИ в сердцевине $I_1(\sigma')$ уменьшается, а интенсивность ОИ в подложке $I_0(\sigma')$ возрастает. При действии в световоде напряжений в виде волн сжатия $\sigma(t)$ интенсивности $I_0(t)$, $I_1(t)$ противофазны, причем интенсивность $I_0(t)$ синфазна с $\sigma(t)$. Такой характер поведения оптических сигналов можно использовать для дифференциального преобразования измеряемой величины $\sigma(t)$. Амплитуду волны напряжения можно определить по разности амплитуд оптических сигналов $I_1(t)$, $I_0(t)$, а временную форму $\sigma(t)$ — по временной форме $I_0(t)$.

Таким образом, в каналах световода Se—As₁₂Se₅₅Ge₃₃, построенного по принципу нарушения ПВО при действии механического напряжения (распространении волн сжатия), осуществляется противофазная модуляция направленного неполяризованного оптического излучения, что может быть использовано для дифференциальных измерений напряжений и деформаций в твердых телах в диапазоне частот до единиц мегагерц.

Аналогично исследованы характеристики световода с восстановлением ПВО, выполненного на основе пары из халькогенидных стекол As₂S₃—As₂Se₃, характеризуемых функциями преобразования на сжатие $n_0(\sigma') = 2,61 + 4,94\sigma'$, $n_1(\sigma') = 2,89 + 7,83\sigma'$ и невозмущенным значением критического угла $\Theta_{i_{кр}} = 64^\circ 36'$.

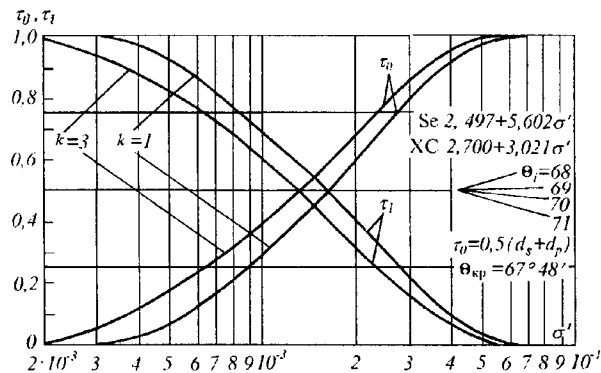


Рис. 4. Управляемый световод в режиме нарушения ПВО с подложкой Se и сердцевиной As₁₂Se₅₅Ge₃₃. Аппроксимация функций светопропускания неполяризованного ОИ в каналах световода:

τ_0 — в подложке, τ_1 — в сердцевине при $k = 1$ и $k = 3$ отражениях лучей

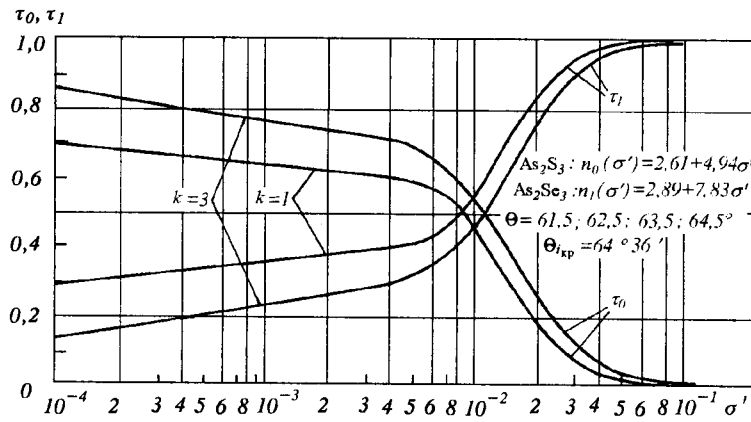


Рис. 5. Управляемый световод в режиме восстановления ПВО с подложкой As_2S_3 и сердцевиной As_2Se_3 . Аппроксимация функций светопропускания неполяризованного ОИ:

τ_0 — в подложке, τ_1 — в сердцевине при $k=1$ и $k=3$ отражениях лучей

Для преобразования выбрана угловая ДН [$\Theta_n = 61,5; \Theta_v = 64,5^\circ$] с разложением ее на четыре луча с относительной интенсивностью $i = 0,25$ и углами падения $\Theta_{i_1} = 61,5; \Theta_{i_2} = 62,5; \Theta_{i_3} = 63,5; \Theta_{i_4} = 64,5^\circ$. В невозмущенном состоянии световода для $k=3$ $\tau_0 = 0,9; \tau_1 = 0,1$.

Графические зависимости $\tau_0(\sigma')$, $\tau_1(\sigma')$ при $k=1$ и 3 представлены на рис. 5; из них следует, что функции светопропускания имеют два квазилинейных участка разной чувствительности преобразования. Первый участок в диапазоне напряжений сжатия σ' от 10^{-5} до $4 \cdot 10^{-3}$ характеризуется диапазоном изменения $\Delta\tau = 0,18$. На втором участке в диапазоне напряжений сжатия σ' от $7 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^{-2}$ $\Delta\tau = 0,6$.

Аналогично первому варианту (см. рис. 4) на основе полученных функций светопропускания также может быть осуществлено дифференциальное преобразование напряжения. При этом верхняя частота колебаний сжатия при идентичных первому варианту геометрических характеристиках световода осталась неизменной.

Полученные графические зависимости функций светопропускания (см. рис. 4, 5) указывают на возможность комбинирования двух вариантов I, II световода для дифференциального преобразования напряжений в диапазоне $\sigma' \in [7 \cdot 10^{-3}, 3 \cdot 10^{-2}]$, если попарно использовать функции τ_{0I}, τ_{0II} или τ_{1I}, τ_{1II} .

Таким образом, исследования функций светопропускания двухканального световода с подобранными упругооптическими свойствами и геометрией излучения свидетельствуют о возможности дифференциального граничного преобразования механического возмущения в амплитуду интенсивности неполяризованного оптического излучения в диапазоне частот волн сжатия до единиц мегагерц. При этом упругооптическое взаимодействие может осуществляться по принципу как нарушения, так и восстановления внутреннего отражения.

При прохождении преломленного и отраженного излучений в подложке и сердцевине световода на их выходах получают аналоговые оптические сигналы (АОС), противофазно модулированные упругими волнами.

Последующая обработка противофазных АОС может быть основана на применении как минимум двух видов устройств:

1) двухвходовой аналоговый алгебраический сумматор, выполняющий функцию $\sigma = \gamma(I_{cp} + 0,5(I_0 - I_1))$, где I_0, I_1 — противофазные АОС; I_{cp} — среднее значение, соответствующее точке пересечения функций светопропускания; γ — размерный коэффициент преобразования;

2) неравновесная мостовая схема с фотоприемниками, на которые подаются противофазные АОС.

Заключение. На основе представленных в работе математического обоснования и модельных расчетов при введенных условиях и допущениях получены функции светопропускания двух вариантов двухканальных световодов, основанных на принципе соответственно нарушения и восстановления ПВО. Анализ показывает возможность использования таких световодов как отдельно, так и в комбинации в дифференциальном преобразовании «механическое напряжение — интенсивность оптического сигнала» за счет создания и съема противофазных оптических сигналов. На основе такого преобразования могут быть построены дифференциальные измерительные датчики механических возмущений в твердых телах в диапазоне частот до единиц мегагерц. Существенно, что на основе полученных результатов имеется возможность синтеза характеристик световодов по заданному диапазону амплитуд и частот механических возмущений. Эти результаты могут быть полезными, например, при регистрации сильных детонационных волн или сигналов акустической эмиссии в корпусах объектов, контроле состояния предаварийных объектов, разработке помехоустойчивых амплитудных модуляторов оптического излучения.

Следует отметить, что здесь не рассматривались возможные оптические схемы с объединением верхней и нижней подложек и исследованием отражения и преломления ОИ по всей длине световода, что позволит значительно расширить диапазон измерений и уменьшить его нижний предел. Однако для таких схемных решений расчетный алгоритм не претерпевает значительных изменений.

Кроме того, следует отметить, что в данном рассмотрении не ставилась задача получения численных результатов в требуемом диапазоне измерений σ с высокой точностью. При желании точность расчетов может быть повышена за счет уменьшения шага квантования $\Delta\Theta$.

Также не рассматривались фазовые характеристики оптического излучения в функции от механических возмущений, в то время как эллипсометрические измерения [11] поляризационных углов квазикогерентного оптического излучения в данном виде преобразования могут дать дополнительную и, по-видимому, с большей точностью информацию об измеряемых параметрах механических и акустических воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
2. Кизель В. А. Отражение света. М.: Наука, 1973.
3. Бусурин В. И., Ларский В. Ф., Садовников В. И., Удалов Н. П. Оптоэлектронные преобразователи на основе управляемых световодных структур. М.: Радио и связь, 1984.
4. Бусурин В. И., Носов Ю. Р. Волоконно-оптические датчики. Физические основы, вопросы расчета и применения. М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. А. с. 1767370 СССР. Оптический датчик механических возмущений /Ю. В. Есипов. Опубл. 1990.
6. Есипов Ю. В., Васильченко Ю. И. Оптический преобразователь на основе эффекта противофазного упругооптического детектирования механических деформаций // СРЭ. 1993. Вып. 4, 5.
7. Акустические кристаллы: Справочник /Под ред. М. П. Шаскольской. М.: Наука, 1982.
8. Балакший В. И., Парыгин В. Н., Чирков Л. Е. Физические основы акустооптики. М.: Радио и связь, 1985.
9. Электрические измерения неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1975.
10. Ярив А., Юх П. Оптические волны в кристаллах. М.: Мир, 1987.
11. Основы эллипсометрии /Под ред. чл.-корр. АН СССР А. В. Ржанова. Новосибирск, 1979.

Поступила в редакцию 9 января 1995 г.