

- химия стекла.— 1984.— т. 10, № 5.
36. Глебов Л. Б., Ефимов О. М., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т. Оптический пробой поверхности стекла К-8, модифицированной низкотемпературным ионным обменом // Квантовая электрон.— 1985.— Т. 12, № 10.
37. Бабукова М. В., Глебов Л. Б., Никоноров Н. В. и др. Создание и исследование фотоуправляемых планарных волноводов на основе фотохромных стекол // Физика и химия стекла.— 1986.— Т. 12, № 4.
38. Глебов Л. Б., Никоноров Н. В., Петровский Г. Т., Цехомский В. А. Анизотропия поглощения центрами окраски в диффузионных волноводах на основе фотохромных стекол // Там же.— № 5.
39. Глебов Л. Б., Доценко А. В., Никоноров Н. В., Цыпляев С. А. Селекция мод в планарных фоточувствительных волноводах // Оптика и спектроскопия.— 1987.— Т. 62, вып. 4.
40. Интегральная оптика/Под ред. Т. Тамира.— М.: Мир, 1978.

Поступила в редакцию 11 января 1988 г.

УДК 535.36.004.14

СИРО Ф. ВАСКЕС СОАРЕС ДЕ ФРЕЙТАС, И. В. ЧЕРЕМИСКИН
(Москва)

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ,
РАССЕЯННОГО НА СЛУЧАЙНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ
ПОКАЗАТЕЛЯ ПРЕЛОМЛЕНИЯ
В ТОНКОПЛЕНОЧНОМ ВОЛНОВОДЕ**

В настоящей работе на основе методики, разработанной для рассеяния на нерегулярностях границ раздела тонкопленочного волновода [1, 2], исследовалась зависимость характеристик излучения, рассеянного на случайных неоднородностях показателя преломления в несущем слое тонкопленочного диэлектрического волновода, от параметров неоднородностей. Полученные формулы и графики могут быть использованы для диагностики неоднородностей волновода по найденным экспериментально параметрам рассеяния, в частности для определения вида функции корреляции неоднородностей.

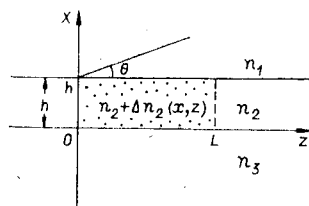


Рис. 1. Тонкопленочный диэлектрический волновод со случайными неоднородностями показателя преломления в несущем слое

В проведенных вычислениях предполагается, что тонкопленочный волновод является бесконечно протяженным в направлении оси y , вариации поля в этом направлении отсутствуют и случайные неоднородности показателя преломления сосредоточены в несущем слое (рис. 1). Распределение показателя преломления в волноводе записывается в виде

$$n^2(x, z) = \begin{cases} n_1^2 & \text{при } x > h; \\ n_2^2 + 2n_2\Delta n_2(x, z) & \text{при } 0 \leq x \leq h; \\ n_3^2 & \text{при } x < 0. \end{cases} \quad (1)$$

При этом

$$\begin{aligned} \Delta n_2(x, z) &\ll n_2, \langle \Delta n_2(x, z) \rangle = 0; \\ \langle \Delta n_2(x, z) \Delta n_2(x', z') \rangle &= (\overline{\Delta n_2})^2 F(x - x', B_x) F(z - z', B_z); \\ &\begin{cases} \exp\left(-\frac{|x-x'|}{B_x}\right) \exp\left(-\frac{|z-z'|}{B_z}\right); & (1a) \\ \exp\left(-\frac{|x-x'|^2}{B_x}\right) \exp\left(-\frac{|z-z'|^2}{B_z}\right). & (1b) \\ \frac{4\pi}{k} \delta(z-z')_z & (1r) \end{cases} \end{aligned}$$

где $\langle \rangle$ означает усреднение по ансамблю; $\sqrt{\overline{(\Delta n_2)^2}}$ — среднеквадратичное отклонение показателя преломления от среднего значения; B_z и B_x — интервалы корреляции в продольном и поперечном направлениях; $F(x - x', B_x)$ и $F(z - z', B_z)$ — коэффициенты корреляции случайной величины $\Delta n_2(x, z)$; $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число в свободном пространстве.

При указанных предположениях были получены формулы для относительных потерь мощности на излучение для пизших ТЕ- и ТМ-мод. Для ТЕ-моды

$$\left\langle \frac{\Delta P}{P} \right\rangle \frac{1}{L (\overline{\Delta n_2})^2} = A \left\{ \int_{-kn_3}^{-kn_1} |I_s(\beta)| d\beta + \int_{-kn_1}^{+kn_1} |I_c(\beta)| d\beta + \int_{+kn_1}^{+kn_3} |I_s(\beta)| d\beta \right\}, \quad (2)$$

где $A = k^4 n_2^2 / 2\pi \beta_0 h_{\text{эф}}$; $I_s(\beta) = \kappa_3 I_z J_s / N_s$; $I_c(\beta) = \kappa_1 \kappa_3 I_z (J_e / N_e + J_0 / N_0)$;

$$N_s = \kappa_3^2 + (\kappa_2^2 - \kappa_3^2) \sin^2(\varphi_1 - \kappa_2 h);$$

$$N_e = \kappa_1^2 (\kappa_3^2 \cos^2 \varphi + \kappa_2^2 \sin^2 \varphi) + \kappa_1 \kappa_3 (\kappa_1^2 \cos^2(\kappa_2 h - \varphi) + \kappa_2^2 \sin^2(\kappa_2 h - \varphi));$$

$$N_0 = \kappa_1^2 (\kappa_3^2 \sin^2 \varphi + \kappa_2^2 \cos^2 \varphi) + \kappa_1 \kappa_3 (\kappa_1^2 \sin^2(\kappa_2 h - \varphi) + \kappa_2^2 \cos^2(\kappa_2 h - \varphi));$$

$$I_z = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i(\beta_0 - \beta)u} F(u, B_z) du;$$

$$\begin{aligned} J_s = I_1 + & \left\{ 2h + \frac{\sin[2(\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \sin(2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} + \frac{\sin(2\varphi_1) + \sin[2(\kappa_2 h - \varphi_1)]}{\kappa_2} + \right. \\ & \left. + \frac{\sin[2((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) + \varphi_1)] + \sin[2(\varphi_3^0 + (\kappa_2 h - \varphi_1))]}{(\kappa_2^0 + \kappa_2)} \right\} I_2 - \\ & - \left\{ \frac{\cos[2(\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \cos(2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} + \frac{\cos(2\varphi_1) + \cos[2(\kappa_2 h - \varphi_1)]}{\kappa_2} + \right. \\ & \left. + \frac{\cos[2((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) + \varphi_1)] + \cos[2(\varphi_3^0 + (\kappa_2 h - \varphi_1))]}{(\kappa_2^0 + \kappa_2)} \right\} I_3 + \\ & + I_4 + \left\{ 2h + \frac{\sin[2(\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \sin(2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} + \frac{\sin(2\varphi_1) + \sin[2(\kappa_2 h - \varphi_1)]}{\kappa_2} + \right. \\ & \left. + \frac{\sin[2((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) - \varphi_1)] + \sin[2(\varphi_3^0 - (\kappa_2 h - \varphi_1))]}{(\kappa_2^0 - \kappa_2)} \right\} I_5 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \left\{ \frac{\cos [2 (\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \cos (2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} + \frac{\cos (2\varphi_1) + \cos [2 (\kappa_2 h - \varphi_1)]}{\kappa_2} - \right. \\
& \quad \left. - \frac{\cos [2 ((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) - \varphi_1)] + \cos [2 (\varphi_3^0 - (\kappa_2 h - \varphi_1))]}{(\kappa_2^0 - \kappa_2)} \right\} I_6; \\
J_e = I_1 + & \left\{ 2h + \frac{\sin [2 (\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \sin (2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} + \frac{\sin [2 (\kappa_2 h - \varphi)] + \sin (2\varphi)}{\kappa_2} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\sin [2 ((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) + (\kappa_2 h - \varphi))] + \sin [2 (\varphi_3^0 + \varphi)]}{(\kappa_2^0 + \kappa_2)} \right\} I_2 - \\
& - \left\{ \frac{\cos [2 (\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \cos (2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} + \frac{\cos [2 (\kappa_2 h - \varphi)] + \cos (2\varphi)}{\kappa_2} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\cos [2 ((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) + (\kappa_2 h - \varphi))] + \cos [2 (\varphi_3^0 + \varphi)]}{(\kappa_2^0 + \kappa_2)} \right\} I_3 + \\
& + I_4 + \left\{ 2h + \frac{\sin [2 (\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \sin (2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} + \frac{\sin [2 (\kappa_2 h - \varphi)] + \sin (2\varphi)}{\kappa_2} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\sin [2 ((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) - (\kappa_2 h - \varphi))] + \sin [2 (\varphi_3^0 - \varphi)]}{(\kappa_2^0 - \kappa_2)} \right\} I_5 + \\
& + \left\{ - \frac{\cos [2 (\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \cos (2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} + \frac{\cos [2 (\kappa_2 h - \varphi)] + \cos (2\varphi)}{\kappa_2} - \right. \\
& \quad \left. - \frac{\cos [2 ((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) - (\kappa_2 h - \varphi))] + \cos [2 (\varphi_3^0 - \varphi)]}{(\kappa_2^0 - \kappa_2)} \right\} I_6; \\
J_0 = I_1 + & \left\{ 2h + \frac{\sin [2 (\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \sin (2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} - \frac{\sin [2 (\kappa_2 h - \varphi)] + \sin (2\varphi)}{\kappa_2} - \right. \\
& \quad \left. - \frac{\sin [2 ((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) + (\kappa_2 h - \varphi))] + \sin [2 (\varphi_3^0 + \varphi)]}{(\kappa_2^0 + \kappa_2)} \right\} I_2 - \\
& - \left\{ \frac{\cos [2 (\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \cos (2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} - \frac{\cos [2 (\kappa_2 h - \varphi)] + \cos (2\varphi)}{\kappa_2} - \right. \\
& \quad \left. - \frac{\cos [2 ((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) + (\kappa_2 h - \varphi))] + \cos [2 (\varphi_3^0 + \varphi)]}{(\kappa_2^0 + \kappa_2)} \right\} I_3 + \\
& + I_4 + \left\{ 2h + \frac{\sin [2 (\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \sin (2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} - \frac{\sin [2 (\kappa_2 h - \varphi)] + \sin (2\varphi)}{\kappa_2} - \right. \\
& \quad \left. - \frac{\sin [2 ((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) - (\kappa_2 h - \varphi))] + \sin [2 (\varphi_3^0 - \varphi)]}{(\kappa_2^0 - \kappa_2)} \right\} I_5 + \\
& + \left\{ - \frac{\cos [2 (\kappa_2^0 h - \varphi_3^0)] + \cos (2\varphi_3^0)}{\kappa_2^0} - \frac{\cos [2 (\kappa_2 h - \varphi)] + \cos (2\varphi)}{\kappa_2} + \right. \\
& \quad \left. + \frac{\cos [2 ((\kappa_2^0 h - \varphi_3^0) - (\kappa_2 h - \varphi))] + \cos [2 (\varphi_3^0 - \varphi)]}{(\kappa_2^0 - \kappa_2)} \right\} I_6;
\end{aligned}$$

$$I_1 = -2 \int_0^h u \cos [(\kappa_2^0 + \kappa_2) u] F(u, B_x) du;$$

$$I_2 = \int_0^h \cos[(\kappa_2^0 + \kappa_2)u] F(u, B_x) du;$$

$$I_3 = \int_0^h \sin[(\kappa_2^0 + \kappa_2)u] F(u, B_x) du;$$

$$I_4 = -2 \int_0^h u \cos[(\kappa_2^0 - \kappa_2)u] F(u, B_x) du;$$

$$I_5 = \int_0^h \cos[(\kappa_2^0 - \kappa_2)u] F(u, B_x) du; \quad I_6 = \int_0^h \sin[(\kappa_2^0 - \kappa_2)u] F(u, B_x) du;$$

L — длина волновода; $\beta_0 = k\gamma_0$ — продольная составляющая постоянной распространения падающей моды; γ_0 — замедление падающей моды; $h_{эф}$ — эффективная толщина волновода; $\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3$ — поперечные постоянные распространения в различных средах волновода; $\varphi, \varphi_1, \varphi_3$ — фазовые сдвиги на различных границах волновода [3].

Для симметричного волновода формула (2) значительно упрощается. Зависимости, полученные для ТМ-моды, весьма сходны с аналогичными, приведенными ниже зависимостями для ТЕ-моды.

Значения интегралов $I_2, I_1 - I_6$ в формуле (2) зависят от выбора функции корреляции. Когда функция корреляции является экспоненциальной или δ -функцией, эти интегралы легко находятся (в [1, 2, 4] выбрана экспоненциальная функция корреляции). В случае гауссовой функции и функции вида $\sin x/x$ были использованы приближенные численные методы [5, 6]. При численном интегрировании по β в (2) применялся метод Симпсона [7]. Вычисления проводились на ЭВМ М4030. В качестве объекта для вычислений использовались: 1) несимметричный волновод, состоящий из полистироловой пленки ($n_2 = 1,5900$), кварцевой подложки ($n_3 = 1,4573$) и воздушной верхней обрамляющей среды ($n_1 = 1,0000$) (рис. 2—7); 2) симметричный волновод, состоящий из слоя с $n_2 = 1,463$ и обрамляющих сред ($n_1 = n_3 = 1,4573$) (см. рис. 8). Длина волны $\lambda = 0,6328$ мкм. Формулы для диаграмм направленности (ДН) излучения, рассеянного с неоднородного участка волновода длиной L , получались из (2) путем перехода от интегрирования по волновому числу β к интегрированию по углу рассеяния Θ .

На рис. 2 показаны зависимости относительных потерь мощности на излучение для низшей падающей ТЕ-моды от интервала корреляции B ($B_x = B_z = B$ при $B < h/2\pi$ и $B_x = h/2\pi, B_z = B$ при $B \geq h/2\pi$) для функций корреляции вида (1а) — (1в) при $\gamma_0 = 1,5000$. Из приведенных

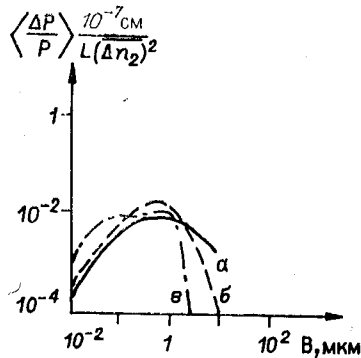


Рис. 2. Зависимость относительных потерь мощности на излучение от интервала корреляции B для функций корреляции (1а) — (1в)

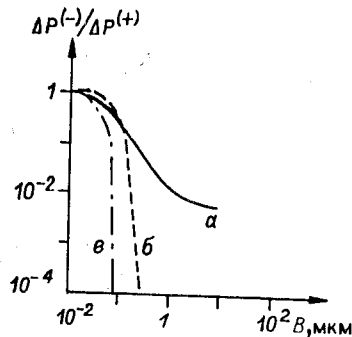


Рис. 3. Зависимость отношения мощностей, рассеянных назад-вперед, от B для функций корреляции (1а) — (1в)

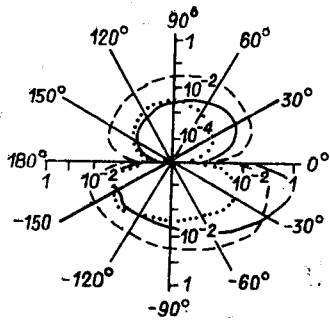


Рис. 4. Диаграммы направленности излучения, рассеянного на случайных неоднородностях показателя преломления, при экспоненциальной функции корреляции для $B = 1$ мкм (сплошная), 0,1 мкм (штриховая), 0,01 мкм (пунктирная линия) в несимметричном волноводе

зависимостей видно, что коэффициент затухания падающей волны при $\sqrt{(\Delta n_2)^2} = 0,01$ изменяется в пределах $0,1-10$ см $^{-1}$ и имеет максимум в области значений $B \sim 0,5\lambda$. Такая зависимость подобна аналогичной зависимости при рассеянии на нерегулярностях границ раздела волновода [1, 2, 4]. С увеличением $\sqrt{(\Delta n_2)^2}$ коэффициент затухания возрастает как $(\Delta n_2)^2$.

На рис. 3 показаны зависимости отношения мощностей, рассеянных назад-вперед $\Delta P^{(-)}/\Delta P^{(+)}$ от интервалов корреляции B для функций вида (1а)–(1в) при замедлении $\gamma_0 = 1,500$. Приведенные зависимости для рассеяния света в несимметричном волноводе с неоднородностями показателя преломления в несущем слое при экспоненциальной функции корреляции подобны аналогичным зависимостям для рассеяния на случайных нерегулярностях границ раздела симметричного волновода в [1]. Для всех видов функций корреляции отношение $\Delta P^{(-)}/\Delta P^{(+)}$ при малых B стремится к единице, что соответствует изотропному рассеянию при малом размере «частиц». При больших значениях B преобладает излучение вперед и вниз. Изменение γ_0 в интервале 1,480–1,520, соответствующее одномодовому режиму работы волновода, не приводит к существенным изменениям зависимостей $\Delta P^{(-)}/\Delta P^{(+)}$ от B , и они на рисунках не показаны. Исключением является лишь участок значений $B > 1$ мкм для экспоненциальной функции корреляции, где значения $\Delta P^{(-)}/\Delta P^{(+)}$ при изменении γ_0 от 1,48 до 1,52 могут различаться в 2–3 раза.

Наиболее полную информацию о размерах неоднородностей содержат диаграммы направленности излучения, рассеянного в тонкопленочном волноводе.

На рис. 4–7 показаны ДН для несимметричного волновода, содержащего случайные неоднородности показателя преломления с корреляционными функциями (1а)–(1г) соответственно.

На рис. 8 приведены ДН для симметричного волновода при экспоненциальной функции корреляции. В этом случае рассеяние симметрично относительно волновода и не имеет провалов вблизи углов, соответствующих переходу от мод подложки к покровно-подложковым модам в несимметричном волноводе.

Приведенные ДН (см. рис. 4–8) существенно различаются. Если принять во внимание также абсолютные величины рассеянной мощности и сильную зависимость угла, при котором наблюдается максимальное излучение, от вида функции корреляции, то по ДН, полученной экспериментально, можно отнести характер неоднородностей исследуемого образца к одному из основных видов функции корреляции. Далее, используя соответствующие зависимости $\Delta P^{(-)}/\Delta P^{(+)}$ и $\Delta P/P$ от B (см. рис. 2 и 3) и экспериментальные значения $\Delta P^{(-)}/\Delta P^{(+)}$, ΔP и P , можно последовательно определить значения B , $\langle \Delta P/P \rangle 10^{-7}$ см/ $L(\Delta n_2)^2$ и $\sqrt{(\Delta n_2)^2}$. Таким образом, характерные параметры неоднородностей несущего слоя: вид функции корреляции, интервал корреляции B и среднеквадратичное отклонение показателя преломления от среднего зна-

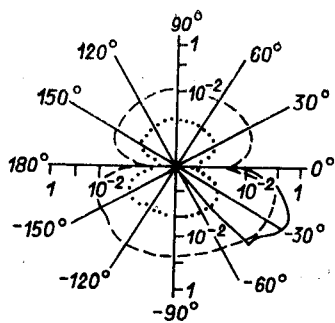


Рис. 5. То же, что на рис. 4, но при гауссовой функции корреляции

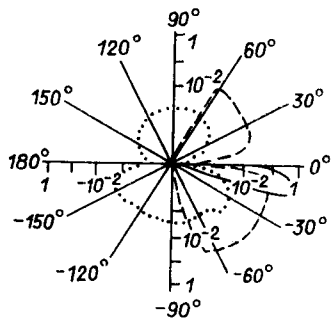


Рис. 6. То же, что на рис. 4, но при функции корреляции в виде $\sin x/x$

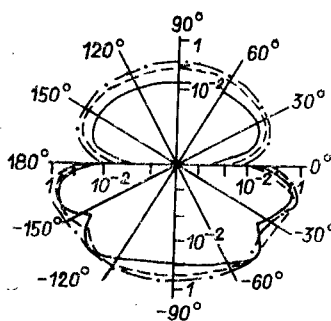


Рис. 7. То же, что на рис. 4, но для функции корреляции в виде δ -функции для замедления $\gamma_0 = 1,520$ (сплошная), 1,500 (штриховая), 1,480 (штрихпунктирная линия)

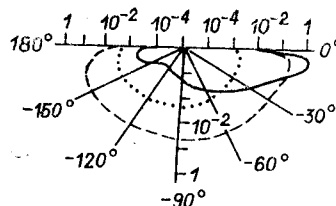


Рис. 8. То же, что на рис. 4, но для симметричного волновода

чения $\sqrt{(\Delta n_2)^2}$ — могут быть определены. При этом, как и в [2], мощность ΔP , рассеиваемая в соответствующий участок диаграммы направленности, должна измеряться в плоскости падения, т. е. плоскости, содержащей падающий луч и перпендикуляр к плоскости волновода. В этом случае ΔP относится только к той части рассеянной мощности, которая обусловлена неоднородностями, удовлетворяющими условию $\partial/\partial y = 0$ (перпендикулярны падающему лучу решетки), и для которой справедлива формула (2) и приведенные выше графики. В эксперименте условие $\partial/\partial y = 0$ соответствует измерениям ΔP в пределах дифракционного угла вблизи плоскости падения, определяемого шириной падающего луча.

Таким образом, в настоящей работе получены зависимости мощности рассеянного в тонкопленочном волноводе излучения от параметров неоднородностей несущего слоя волновода, которые позволяют на основании экспериментальных измерений параметров рассеяния определить параметры неоднородностей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркузе Д. Оптические волноводы.— М.: Мир, 1974.
2. Андлер Г., Черемискин И. В. Рассеяние в диэлектрическом волноводе со случайными искажениями стенок // Изв. вузов. Радиоэлектроника.— 1981.— Т. 24, № 9.
3. Интегральная оптика/Под ред. Т. Тамира.— М.: Мир, 1978.
4. Miyayaga S., Asakura T., Imai M. Scattering characteristics of a beam mode in dielectric-slab optical waveguides // Opt. and Quant. Electron.— 1979.— V. 11.— P. 205.
5. Hastings C. Approximations for digital computers.— Princeton, N. Y.: Princeton University Press, 1955.
6. Salzer H. E. Formulas for calculating the error function of a complex variable // Math. Tabl. and Aids to Comput.— 1951.— V. 5, N 34.— P. 67.
7. Компьютеры в оптических исследованиях/Под ред. Б. Фридена.— М.: Мир, 1983.

Поступила в редакцию 28 июня 1986 г.