

УДК 535.34+621.372.852.4+535

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПОЛЯРИЗАТОРЫ С МАЛЫМИ ПОТЕРЯМИ

*Ю. А. Мамаев **

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Рассчитаны характеристики (коэффициент экстинкции и коэффициент потерь) волоконно-оптического поляризатора с металлической плёнкой и диэлектрическим буферным слоем. Показано, что использование в таких поляризаторах металлов, у которых реальная часть комплексного показателя преломления много меньше единицы (серебро, золото, медь), позволяет существенно уменьшить потери для основной проходящей моды TE_0 по сравнению с поляризаторами с алюминиевой плёнкой. При этом сохраняется достаточно высокий коэффициент экстинкции.

Волоконно-оптические поляризаторы широко применяются в волоконных интерферометрах различного типа, в частности в волоконных гироскопах на основе эффекта Саньяка. Настоящая работа посвящена расчёту характеристик такого поляризатора (коэффициента экстинкции K и коэффициента потерь L), в котором различие коэффициентов поглощения основных мод TM_0 и TE_0 достигается за счёт возбуждения поверхностной плазменной волны в металлическом слое [1–7]. Схематически такой поляризатор изображён на рис. 1а: на одномодовое волокно с радиусом кривизны R с полированной оболочкой нанесены буферный диэлектрический слой и поверх него металлическая плёнка с толщиной больше толщины скин-слоя. В работах [2–6] сообщалось о создании поляризаторов такого типа и была показана возможность получения достаточно больших коэффициентов экстинкции. При этом в качестве металлического слоя использовался алюминий. В настоящей работе показано, что использование металлов, у которых $\text{Re}(n_m) \ll 1$, где n_m — комплексный показатель преломления металла, например серебра, золота и меди, позволяет существенно уменьшить потери для проходящей моды TE_0 (по сравнению с волоконно-оптическими поляризаторами с металлическими плёнками, для которых $\text{Re}(n_m) > 1$) с сохранением высокого коэффициента экстинкции.

Расчёт коэффициентов затухания для двух ортогонально поляризованных мод в цилиндрическом световоде с многослойной металл-диэлектрической структурой на полированном участке световода достаточно сложен. В литературе часто используется модель плоско-слоистого волновода, в котором 2-й слой представляет собой сердцевину волокна, 1-й и 3-й слои — остаточную часть оболочки волокна и диэлектрический буферный слой соответственно, а 4-й слой — плёнку металла (рис. 1б). Следует заметить, что проведённый в работе [8] более точный расчёт характеристик такого волоконно-оптического поляризатора на основе конечно-элементной модели и сравнение с результатами расчёта в приближении плоско-слоистого волновода даёт незначительные различия в этих характеристиках. Автором настоящей статьи проводился расчёт коэффициентов затухания мод TM_0 и TE_0 на основе численного решения трансцендентного комплексного уравнения [2] в модели четырёхслойного плоско-слоистого волновода:

$$\text{tg}(q_2 d_2) = \frac{\gamma_{2,1} p_1 / q_2 + \gamma_{2,m} p_m(2) / q_2}{1 - \gamma_{2,1} \gamma_{2,m} p_1 p_m(2) / q_2^2}, \quad (1)$$

где

* myua@appl.sci-nnov.ru

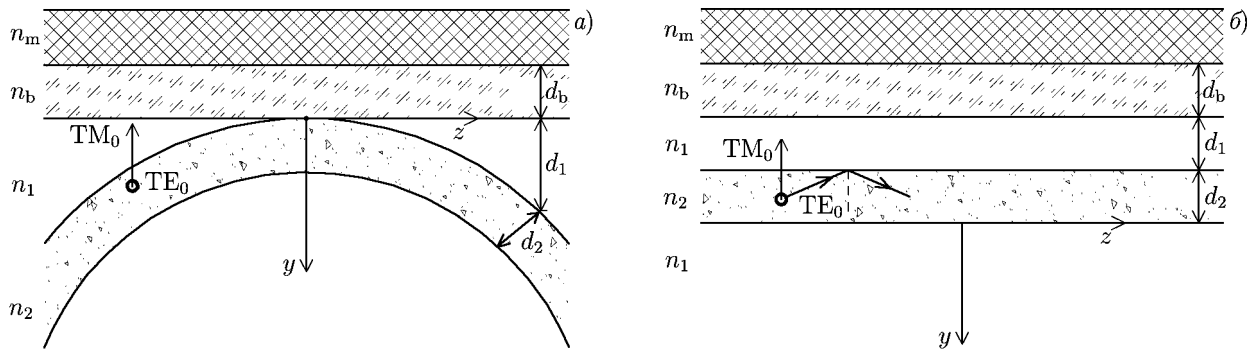


Рис. 1. Схематическое изображение волоконно-оптического поляризатора (а) и его модель в виде плоско-слоистого волновода (б)

$$p_{m(2)} = \frac{p_{m(1)} + p_1 \operatorname{th}(p_1 d_1) / \gamma_{1,m}}{1 + \gamma_{1m} p_{m(1)} \operatorname{th}(p_1 d_1) / p_1};$$

$$p_{m(1)} = \frac{p_m + p_b \operatorname{th}(p_b d_b) / \gamma_{b,m}}{1 + \gamma_{b,m} p_m \operatorname{th}(p_b d_b) / p_b}, \quad (2)$$

$\gamma_{i,j} = 1$ для волны TE_0 , $\gamma_{i,j} = n_i^2/n_j^2$ для волны TM_0 , $i = 1, 2, b$, $j = 1, m$, $i \neq j$, $p_k^2 = \beta^2 - k_0^2 n_k^2$, $k = 1, b, m$, $q_2^2 = k_0^2 n_2^2 - \beta^2$, $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, λ_0 — длина волны в вакууме, $\beta = \beta' - i\beta''$ — комплексная постоянная распространения (для волн TE_0 или TM_0), n_l — показатель преломления в слое l , $l = 1, 2, b, m$ (обозначения слоёв приведены на рис. 1), d_l — толщина слоя l .

Эффективный показатель преломления n_g и удельный коэффициент ослабления α выражаются формулами $n_g = \beta'/k_0$ и $\alpha[\text{дБ/см}] = [20/(\ln 10)]\beta''[\text{см}^{-1}]$ соответственно.

В зависимости от координаты z (при $z \neq 0$) первый диэлектрический слой, представляющий собой остаточный слой оболочки волокна, имеет разную толщину d_1 . При расчёте использовались волокна «Flexcor 1060» для длины волны 980 нм и SMF-28 для длины волны 1550 нм, буферный слой из фторида магния ($Mg F_2$) и металлический слой из серебра ($n_m = 0,13 - 6,65i$ на длине волны 980 нм и $n_m = 0,45 - 9,0i$ на длине волны 1550 нм). Была получена зависимость удельных коэффициентов затухания $\alpha_{TM,TE}$ для мод TM_0 и TE_0 от координаты z (с учётом связи этой координаты со значением d_1 : $z \approx (2Rd_1)^{0,5}$ при условии $R \gg d_1$); при этом радиус кривизны волокна был выбран равным $R = 1$ м. Коэффициент экстинкции K (с учётом того, что $\alpha_{TM} \gg \alpha_{TE}$) и коэффициент потерь L определялись графически как удвоенная площадь под кривыми $\alpha_{TM}(z)$ и $\alpha_{TE}(z)$ для $z \geq 0$ при разных значениях безразмерной толщины $h_b = d_b/\lambda_0$ буферного слоя соответственно.

На рис. 2 приведена зависимость коэффициента экстинкции волоконно-оптического поляризатора от h_b для волокон «Flexcor 1060» (кривая 1) и SMF-28 (кривая 2). Видно, что на длине волны 980 нм при $h_b = 0,2$ коэффициент экстинкции максимален и составляет величину около 67 дБ. Коэффициент потерь для такого поляризатора равен примерно $L \approx 0,015$ дБ, что примерно на порядок величины меньше, чем в поляризаторе с алюминиевой плёнкой. На длине волны 1550 нм (кривая 2) оптимальной толщине буферного слоя $h_b = 0,12$ соответствует коэффициент экстинкции $K = 58$ дБ при коэффициенте потерь $L \approx 0,05$ дБ. Несколько большие потери на этой длине волны связаны с увеличением значения $\operatorname{Re}(n_m)$ за счёт дисперсии показателя преломления металла.

Важной характеристикой является зависимость коэффициента экстинкции волоконно-оптического поляризатора, у которого в центре (при $z = 0$) остаётся определённый остаточный слой оболочки волокна, от толщины $d_{1,0}$ этого слоя. На рис. 3 приведена зависимость коэффициента

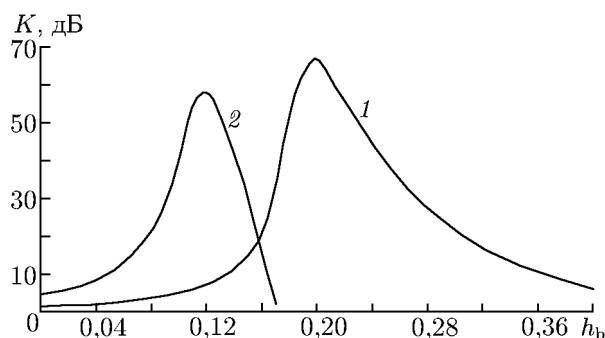


Рис. 2. Зависимость коэффициента экстинкции волоконно-оптического поляризатора от безразмерной толщины h_b буферного слоя из фторида магния для волокон «Flexcor 1060» на длине волны 980 нм (кривая 1) и SMF-28 на длине волны 1,550 нм (кривая 2)

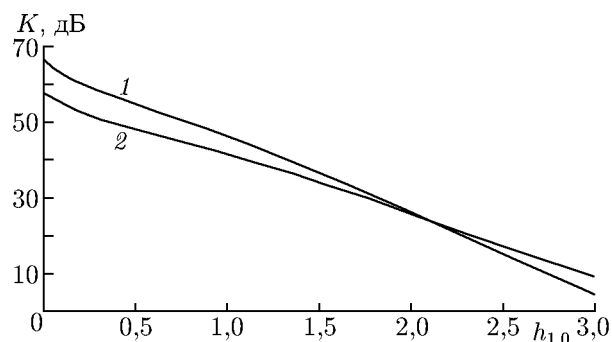


Рис. 3. Зависимость коэффициента экстинкции волоконно-оптического поляризатора от безразмерной толщины $h_{1,0}$ остаточного слоя оболочки волокна для волокон «Flexcor 1060» на длине волны 980 нм (кривая 1) и SMF-28 на длине волны 1,550 нм (кривая 2)

экстинкции K от безразмерной толщины $h_{1,0} = d_{1,0}/\lambda_0$ остаточного слоя оболочки волокна в центре поляризатора (при $z = 0$) при оптимальном значении $h_b = 0,2$. Видно, что коэффициент экстинкции убывает в два раза на обеих длинах волн примерно при $h_{1,0} = 1,5$.

Таким образом, при соответствующей оптимизации толщины и показателя преломления буферного слоя в волоконном поляризаторе с металлической плёнкой, реальная часть комплексного показателя преломления которой много меньше единицы, можно при достаточно высоком коэффициенте экстинкции (несколько десятков децибел) почти на порядок уменьшить потери для проходящей волны TE_0 . На практике при использовании в волоконно-оптических поляризаторах плёнок, например из серебра или меди, желательно защищать металлический слой со стороны воздуха, чтобы предотвратить его окисление.

Работа поддержана Советом по грантам Президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ РФ (проект НШ 2001.2014.2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zervas M. N., Giles I. P. // Electron. Lett. 1989. V. 25, No. 5. P. 321.
2. Геликонов В. М., Гусовский Д. Д., Коноплев Ю. Н. и др. // Квантовая электроника. 1990. Т. 17, № 1. С. 87.
3. Willsch R. // Electron. Lett. 1990. V. 26, No. 15. P. 1113.
4. Геликонов В. М., Коноплев Ю. Н., Кучева М. Н. и др. // Оптика и спектроскопия. 1991. Т. 71, № 4. С. 688.
5. Андреев А. Ц., Козлов В. А., Кузнецов А. В., Максимов А. В. // Квантовая электроника. 1993. Т. 20, № 7. С. 711.
6. Коноплев Ю. Н., Мамаев Ю. А., Туркин А. А. // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 105, № 1. С. 140.
7. Dong C.-H., Zou C.-L., Ren X.-F., et al. // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100, No. 4. Art. no. 041104.
8. Бровко А. В., Рожнев А. Г., Маненков А. Б. // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44, № 7. С. 615.

Поступила в редакцию 20 ноября 2014 г.; принята в печать 4 февраля 2015 г.

FIBER-OPTIC POLARIZERS WITH SMALL LOSSES*Yu. A. Mamaev*

The characteristics (the extinction and loss coefficients) of a fiber-optic polarizer with a metal film and dielectric buffer layer are calculated. It is shown that using the metals, in which the real part of the complex refractive index is much smaller than unity (e.g., silver, gold, and copper), in such polarizers, we can significantly reduce losses for the main passing mode TE_0 compared with the aluminum-film polarizers. In this case, a sufficiently high extinction coefficient is preserved.