

---

# Радиофизика

УДК 621.378.826.535.8

## Температурная зависимость эффективного показателя преломления $LE_{11}$ - и $LM_{11}$ -мод в оптических канальных золь-гель волноводах приподнятого типа вблизи критического режима

С. В. Павлов

*Кафедра прикладной физики  
Российский университет дружбы народов  
ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198*

Проведён расчёт геометрических параметров оптических канальных одномодовых золь-гель волнопроводов ( $LE_{11}$ - и  $LM_{11}$ -моды) приподнятого типа для работы вблизи критического режима при трёх значениях показателя преломления золь-гель материала плёнки. Рассчитаны и исследованы особенности температурных зависимостей эффективного показателя преломления (ЭПП)  $LE_{11}$ - и  $LM_{11}$ -мод с помощью использования метода эффективного показателя преломления (МЭПП), основанного на принципах затенения поля. В отличие от планарного золь-гель волновода экстремум ЭПП наблюдался для мод двух типов поляризации в случае канального волновода приподнятого типа. Исследовано положение экстремума температурной характеристики ЭПП от отношения ширины и толщины оптического канала на основе золь-гель материала. Получены зависимости температурного коэффициента эффективного показателя преломления от температуры и выявлен физический механизм поведения данных кривых. Проведённое сравнение температурных зависимостей ЭПП канальных волнопроводов приподнятого типа и планарных волнопроводов вблизи критического режима подтвердило конкурирующее влияние двух факторов — отрицательного термооптического коэффициента (ТОК) золь-гель материала и термического расширения геометрических параметров оптического канала (толщины и ширины канала), а также зависимость от парциальной мощности распространяющейся в золь-гель слое. Показано что на основе золь-гель плёнок возможно создание термостабильных канальных волнопроводов в диапазоне температур от 10 до 50°С.

**Ключевые слова:** ВОЛС, интегральная оптика, планарный (плоский) волновод, канальный волновод приподнятого типа, золь-гель материалы, эффективный показатель преломления, нормированный эффективный показатель преломления, температурный коэффициент эффективного показателя преломления.

## 1. Введение

Для оптических телекоммуникационных систем представляет большой интерес развитие новых технологий, одна из задач которого является исследование оптических свойств используемых материалов с целью выявления новых возможностей этих материалов и ограничений, налагаемых при их использовании, поэтому необходимо более детальное изучение свойств материалов, в частности, зависимости оптических характеристик от параметров окружающей среды и технологического режима.

В устройствах волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), таких как мультиплексоры/демультиплексоры, разветвители, интерферометры Маха–Цандера, резонаторы и др., важными элементами являются оптические канальные волноводы, для изготовления которых используются различные технологии (диффузия, травление, ионный обмен и т. д.). Внимание исследователей в последнее время обращено на волноводы на основе плёнок, изготовленных по золь-гель технологии, которая обеспечивает хорошие оптические свойства и отличается экономичностью и простотой.

Оптические золь-гель плёнки обладают рядом интересных свойств, в числе которых возможность варьирования показателя преломления в широких пределах путём изменения параметров технологического режима, относительно большой отрицательный термооптический коэффициент (ТОК), высокая фоточувствительность и т. д. [1–4].

Цель настоящей работы — исследование температурных зависимостей эффективного показателя преломления (ЭПП) канальных волноводов приподнятого типа на основе золь-гель плёнок  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  на кварцевой подложке для  $\text{LE}_{11}$ - и  $\text{LM}_{11}$ -мод, а также анализ температурного коэффициента эффективного показателя преломления (ТК ЭПП) данных мод.

## 2. МЭПП и выбор параметров канальных золь-гель волноводов вблизи критического режима

Для расчёта канальных волноводов существуют несколько методов, среди которых наибольшей простотой обладает метод эффективного показателя преломления (МЭПП), суть которого лежит в приближении канального волновода к планарному благодаря принципу затенения полей волноводных мод [5].

При расчётах МЭПП удобно использовать нормированные параметры — нормированная частота и толщина  $V$  и нормированный волноводный показатель преломления  $b$ . Связь  $V$  и  $b$  с оптическими параметрами областей и мод для планарного волновода (рис. 1):

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} h \sqrt{n_2^2 - n_3^2}, \quad b = \frac{\gamma^2 - n_3^2}{n_2^2 - n_3^2},$$

где  $\lambda$  — длина волны излучения;  $h$  — толщина волноводного слоя;  $n_1, n_2, n_3$  — показатели преломления покровного слоя, плёнки и подложки соответственно;  $\gamma$  — эффективный показатель преломления волноводной моды.

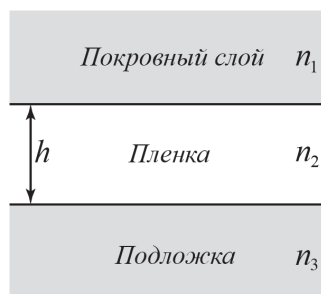


Рис. 1. Планарный оптический волновод

Дисперсионные уравнения в нормированных параметрах для планарного волновода приобретают более простой вид, например для  $\text{TE}_m$ -моды:

$$V\sqrt{1-b} = \arctg\left(\sqrt{\frac{b}{1-b}}\right) + \arctg\left(\sqrt{\frac{b+a}{1-b}}\right) + \pi(m-1),$$

$$a = \frac{n_3^2 - n_1^2}{n_2^2 - n_3^2}, \quad V_0 = \arctg(\sqrt{a}) + \pi(m-1),$$

где  $a$  — параметр асимметрии волновода,  $V_0$  — критическая нормированная частота и толщина (частота отсечки)  $\text{TE}_m$ -моды.

Для планарных золь-гель волноводов на основе  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  температурные зависимости эффективного показателя преломления низших  $\text{TE}$  и  $\text{TM}$  мод имеют убывающий характер [6]. Однако в работе [7] было показано, что для плёнок с

Таблица 1

**Значения критических толщин и нормированных толщин LE<sub>11</sub>-, LM<sub>11</sub>- и LE<sub>21</sub>-мод при двух значениях температур: 0 и 100°С**

$n_2$	$T, ^\circ\text{C}$	$h_{\text{кр}}, \text{мкм}$			$V_0$		
		LE <sub>11</sub>	LM <sub>11</sub>	LE <sub>21</sub>	LE <sub>11</sub>	LM <sub>11</sub>	LE <sub>21</sub>
1,55	0	0,2118	0,2609	0,8116	1,1092	1,3666	4,2508
	100	0,2188	0,2680	0,8333	1,1187	1,3703	4,2603
1,65	0	0,1225	0,1705	0,5315	0,9406	1,3090	4,0822
	100	0,1246	0,1727	0,5386	0,9462	1,3106	4,0878
1,8	0	0,0751	0,1213	0,3746	0,7873	1,2725	3,9289
	100	0,0759	0,1222	0,3775	0,7907	1,2731	3,9323

малой толщиной (вблизи критического режима) на зависимости для ТМ<sub>1</sub>-моды наблюдается минимум, после чего ЭПП возрастал по мере дальнейшего увеличения температуры, это явление связано с жёсткой конкуренцией двух факторов — отрицательного ТОК и термического расширения волноводной плёнки.

Расчёт зависимостей показателя преломления, толщины и ширины волноводных TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> золь-гель плёнок от температуры был проведён на основании работы [8], где экспериментально получены аппроксимирующие полиномы зависимостей  $n_2(T)$  и  $h(T)$ :

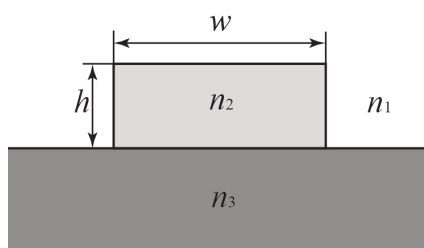
$$n_2(T) = n_2 - 2,185 \times 10^{-5}T - 2,047 \times 10^{-7}T^2,$$

$$h(T) = h_0(1 - 1,838 \times 10^{-5}T + 1,168 \times 10^{-7}T^2),$$

где  $n_2$  и  $h_0$  — показатель преломления и толщина волноводной плёнки при температуре окружающей среды 0°С.

Для плавленого кварца, используемого в качестве подложки, показатель преломления, ТОК и коэффициент линейного расширения имели значения 1,4575,  $-0,3 \times 10^{-5}(\text{°C})^{-1}$  и  $0,4 \times 10^{-6} \text{ м/°C}$  соответственно [9].

Зависимости ЭПП LE<sub>11</sub>- и LM<sub>11</sub>-мод от температуры окружающей среды рассчитывались для канального волновода приподнятого типа (рис. 2) при параметрах плёнки, которые можно реализовать в рамках системы TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> соответствующей технологией изготовления (выбор соотношения компонентов раствора TiO<sub>2</sub> и SiO<sub>2</sub>, температура отжига и т. д.).



**Рис. 2. Канальный волновод приподнятого типа**

Выбор значений толщины плёнок  $h$  осуществлялся с помощью дисперсионных уравнений в нормированных параметрах путём расчёта значений критических толщин плёнок, при которых возникает волноводное распространение соответствующих мод. Для работы в диапазоне распространения LE<sub>11</sub>- и LM<sub>11</sub>-мод рассчитывались критические толщины LE<sub>11</sub>-, LM<sub>11</sub>- и LE<sub>21</sub>-мод при фиксированном показателе преломления плёнки  $n_2$  — 1,55, 1,65, 1,8 и двух значениях температура — 0 и 100°С на длине волны He-Ne-лазера 0,6328 мкм (табл. 1).

Следует отметить, что значения  $h_{\text{кр}}$  определяются температурной зависимостью показателя преломления материала плёнки  $n_2$ . В дальнейших расчётах для

канальных золь-гель волноводов приподнятого типа с показателем преломления 1,55, 1,65 и 1,8 использовались толщины плёнок  $h_0 = 0,27, 0,18$  и  $0,15$  мкм соответственно.

### 3. Зависимость ЭПП от температуры для $LE_{11}$ - и $LM_{11}$ -мод канальных золь-гель волноводов приподнятого типа

Проведена серия расчётов зависимости ЭПП от температуры для волноводных  $LE_{11}$ - и  $LM_{11}$ -мод вблизи критического режима для канальных волноводов приподнятого типа МЭПП, при ширине плёнок  $w = 0,5 h_0, h_0$  и  $2 h_0$ .

Анализ полученных результатов показал, что для всех канальных волноводов с разными параметрами плёнки зависимость ЭПП от температуры для  $LE_{11}$ -моды, в отличие от планарных золь-гель волноводов, имеет минимум. Зависимости ЭПП от температуры для  $LM_{11}$ -моды, также имеют экстремум, который расположен в диапазоне комнатных температур, а при дальнейшем увеличении температуры зависимость имеет возрастающий характер (рис. 3).

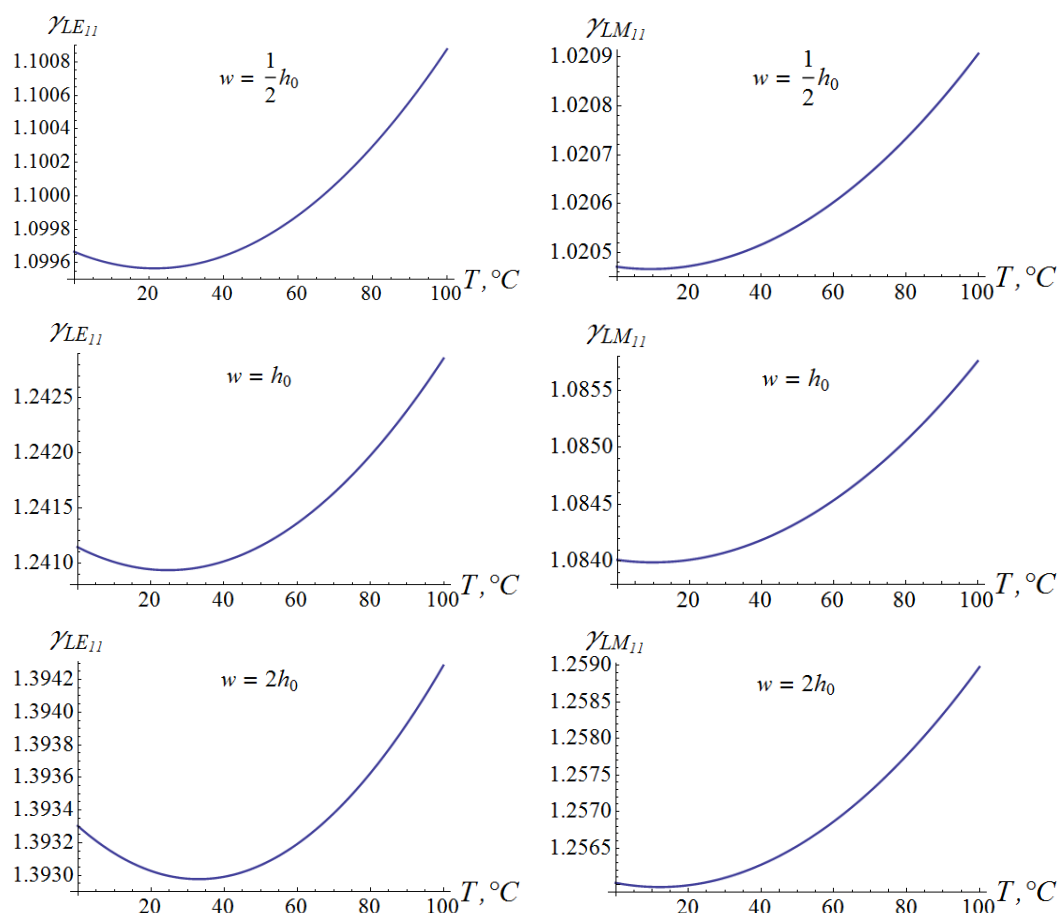


Рис. 3. Зависимость ЭПП от температуры  $LE_{11}$ - и  $LM_{11}$ -мод канального волновода приподнятого типа с параметрами  $n_2 = 1,8$  и  $h_0 = 0,15$  мкм

Уменьшение ЭПП при увеличении температуры отражает факт преобладающего фактора, связанного с отрицательным ТОК материала золь-гель плёнки.

Однако при дальнейшем изменении температуры появляется экстремум, который говорит о росте влияния положительного фактора, связанного с увеличением толщины за счёт термического расширения, и их жёсткой конкуренции, а затем превалирует положительный фактор, что приводит к росту ЭПП.

В диапазоне температур от 10 до 50°C изменения ЭПП для LE<sub>11</sub>- и LM<sub>11</sub>-мод происходят в четвёртом знаке после запятой, которые являются малыми для работы большинства устройств ВОЛС, поэтому в данном диапазоне каналные золь-гель волноводы приподнятого типа можно считать термостабильными.

Проводилась серия расчётов зависимостей  $\gamma_{LE_{11}}(T)$  при различных значениях ширины  $w$ , которые показали, что с ростом ширины диапазон изменения ЭПП сдвигается в большую сторону. При больших значениях ширины каналный золь-гель волновод приподнятого типа становится эквивалентен планарному волноводу толщиной  $h_0$ . Расчёты для LM<sub>11</sub>-моды имели аналогичный результат.

Из графиков (рис. 3) видно, что с изменением соотношения ширины и толщины  $w/h$  температура  $T_{min}$ , соответствующая минимуму температурной зависимости ЭПП, смещается в область больших температур. Далее проводился расчёт зависимости  $T_{min}$  от  $w/h$  (рис. 4). Эта зависимость имела возрастающий характер, обусловленный более жёсткой конкуренцией двух факторов, что проявляется при возрастании ширины волновода и больших температурах.

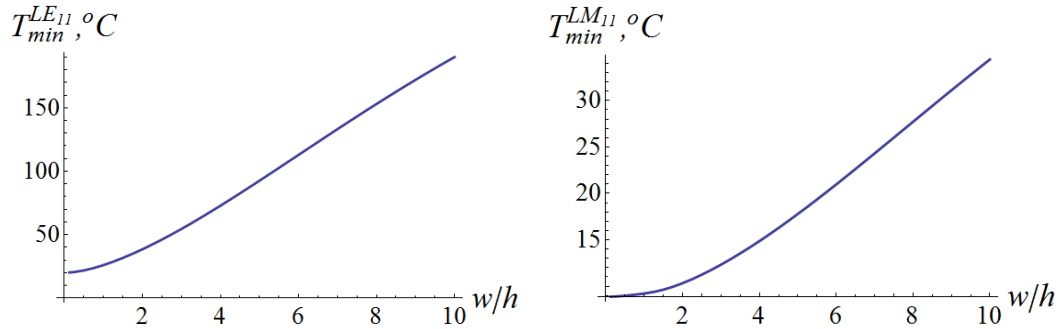


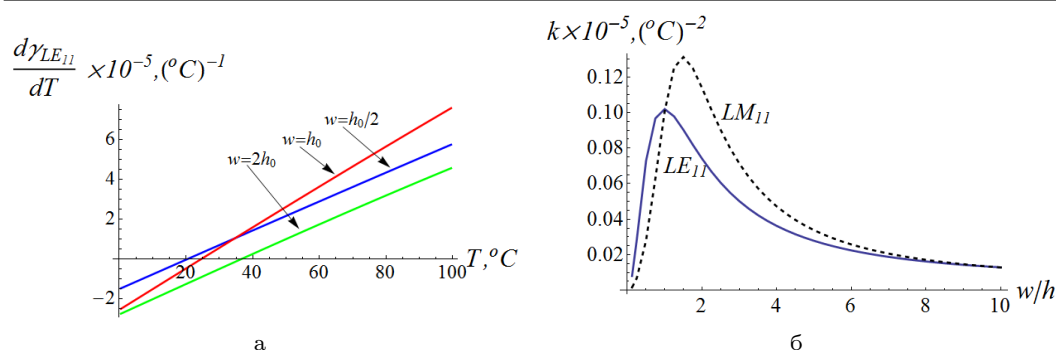
Рис. 4. Зависимость  $T_{min}$  для LE<sub>11</sub>- и LM<sub>11</sub>-мод от отношения  $w/h$  канального волновода приподнятого типа с параметрами  $n_2 = 1,65$  и  $h_0 = 0,18$  мкм

Таким образом, экстремум зависимости  $\gamma_{LE_{11}}(T)$  при больших значениях ширины  $w$ , когда приподнятый каналный золь-гель волновод соответствует планарному с толщиной  $h_0$ , выходит за рамки исследуемого диапазона температур от 0 до 100°C и зависимость ЭПП LE<sub>11</sub>-моды будет иметь в данной области температур чисто убывающий характер, а зависимость  $\gamma_{LM_{11}}(T)$  имеет экстремум при любых выбранных значениях соотношения  $w/h$  в данной области температур. Этот результат хорошо согласуется с результатом работы [7].

#### 4. Исследование зависимости ТК ЭПП от температуры для LE<sub>11</sub>- и LM<sub>11</sub>-мод канальных золь-гель волноводов приподнятого типа

Зависимость температурного коэффициента (ТК) ЭПП  $d\gamma/dT$  имеет в приближении линейный характер, причём для значений ширины канального волновода  $w = 0,5h_0$ ,  $h_0$  и  $2h_0$  проходит через ноль (который соответствует  $T_{min}$ , рассмотренной выше) и на диапазоне от 0 до 100°C при малых температурах имеет отрицательное значение, а при больших — положительное (рис. 5, а).

Из графика видно, что коэффициент наклона  $k$  зависимостей ТК ЭПП( $T$ ) имеет большее значение при ширине  $w = h_0$  чем при  $w = 0,5h_0$  и  $w = 2h_0$ . Далее проводились расчёты зависимости коэффициента наклона ТК ЭПП для LE<sub>11</sub>-



**Рис. 5.** Зависимости ТК ЭПП( $T$ )  $LE_{11}$ -моды: (а) — при значениях ширины  $w = 0,5h_0$ ,  $h_0$  и  $2h_0$ ; (б) — зависимость  $k_{LE_{11}}$  и  $k_{LM_{11}}$  от отношения  $w/h$  канального волновода приподнятого типа с параметрами  $n_2 = 1,65$  и  $h_0 = 0,18$  мкм

и  $LM_{11}$ -моды от отношения  $w/h$ , которые показали, что  $k_{LE_{11}}$  и  $k_{LM_{11}}$  имеют большую величину при значениях ширины  $w$  от  $0,5h_0$  до  $3,5h_0$ , причём в данном диапазоне отношения  $w/h - k_{LM_{11}}$  больше, чем  $k_{LE_{11}}$ .

## 5. Основные результаты

Важнейшим результатом проведённых исследований является наличие экстремума температурных характеристик канального золь-гель волновода приподнятого типа  $LE_{11}$ - и  $LM_{11}$ -мод, в отличие от планарных. Это связано с более ограниченной концентрацией мощности волн вблизи критического режима в золь-гель плёнке, что приводит к более жёсткой конкуренции факторов отрицательного ТОК-материала и изменений толщины и ширины плёнки, влияющих на ЭПП в данном температурном диапазоне. Зависимости  $\gamma(T)$  при температурах от 10 до 50°C слабо изменяются, поэтому в данном диапазоне можно считать золь-гель плёнки термостабильными.

Температура  $T_{\min}$ , при которой наблюдается экстремум, сдвигается в сторону высоких температур с ростом соотношения  $w/h$ , причём для  $LE$ -моды выше, чем для  $LM$ -моды, и при больших значениях ширины  $w$  выходит за рамки исследуемого температурного диапазона  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ , что приводит к монотонно убывающей зависимости  $\gamma_{LE_{11}}(T)$ .

Для канального золь-гель волновода приподнятого типа зависимости ТК ЭПП на низких температурах имеют отрицательное значение, а при высоких — положительное, причём для  $LE_{11}$ - и  $LM_{11}$ -мод. Это связано с более жёсткой конкуренцией факторов, в отличие от планарного волновода, связанных с ТОК и термическим расширением золь-гель плёнки, а также с долей мощности волн в материале плёнки.

## Литература

1. Fardad M. A., Mishechkin O., Fallahi M. Hybrid Sol-Gel Materials for Integration of Optoelectronic Components // J. of Lightwave Technology. — 2001. — Vol. 19, No 1. — Pp. 84–91.
2. Temperature Dependence of Pyrolysed Sol-Gel Planar Waveguide Parameters / S. Saini, R. Kurrat, J. E. Prenosil, J. J. Ramsden // J. Phys. D: Appl. Phys. — 1994. — Vol. 27, No 6. — Pp. 1134–1136.
3. Polarization-Insensitive Transition between Sol-Gel Waveguide and Electrooptic Polymer and Intensity Modulation for All-Optical Networks / Y. Enami,

- M. Kawazu, A. K.-Y. Jen et al. // *J. Lightwave Technol.* — 1994. — Vol. 21, No 9. — Pp. 2053–2060.
4. Single-Mode Operation of the External Cavity DBR Laser with Sol-Gel Waveguide Bragg Grating / Y. Beregovski, A. Fardad, H. Luo, M. Fallahi // *Opt. Commun.* — 1999. — Vol. 21, No 164. — Pp. 57–61.
  5. *Тамир Т.* Волноводная оптоэлектроника. — М.: Мир, 1991. — 575 с.
  6. *Павлов С. В., Трофимов Н. С., Чехлова Т. К.* Исследование температурного оптического коэффициента золь-гель волноводов // Вестник РУДН. Серия «Математика. Информатика. Физика». — 2011. — № 1. — С. 144–155.
  7. Исследование температурного коэффициента эффективного показателя преломления  $TE_{1-}$  и  $TM_{1-}$  мод в оптических золь-гель волноводах / Н. Э. Николаев, С. В. Павлов, Н. С. Трофимов, Т. К. Чехлова // *Радиотехника и электроника.* — 2012. — Т. 57, № 1. — С. 1–7.
  8. *Павлов С. В., Трофимов Н. С., Чехлова Т. К.* Экспериментальные исследования оптических характеристик золь-гель волноводов с помощью термоэлектрического модуля Пельтье // Научная сессия МИФИ-2011. Т. 1 Научно-техническая конференция-семинар по фотонике и информационной оптике. — М.: НИЯУ МИФИ, 2011. — С. 87–89.
  9. Таблицы физических величин: Справочник / под ред. И. К. Кикоина. — М.: Атомиздат, 1976.

UDC 621.378.826.535.8

## Temperature Dependence of the Effective Refractive Index of $LE_{11}$ - and $LM_{11}$ -Modes in Optical Channel Sol-Gel Waveguides of Elevated Type

S. V. Pavlov

*Department of Applied Physics  
Peoples' Friendship University of Russia  
6, Miklukho-Maklaya str., Moscow, Russian Federation, 117198*

The calculation of geometrical parameters of optical channel single-mode sol-gel waveguides ( $LE_{11}$ - and  $LM_{11}$ -Modes) of elevated type for operation near the critical regime is carried out at three values of refractive index of sol-gel material of the film. The features of the temperature dependences of the effective refractive index (ERI) of  $LE_{11}$ - and  $LM_{11}$ -modes by means of the method of the effective refractive index (MERI), based on the principles of shadowing field are calculated and explored. Unlike planar sol-gel waveguide, extremum of ERI was observed for modes of both types of polarization in case of channel waveguide of elevated type. The position of the extremum of temperature characteristic of ERI on the ratio of width to thickness of optical channel on the base of sol-gel material is explored. Dependences of temperature coefficient of the effective refractive index on temperature are obtained and the physical mechanism of behavior of the given curves is revealed. The comparison of temperature dependences of the ERI of channel waveguides of elevated type and planar waveguides near the critical regime confirmed the competitive influence of two factors — the negative thermo-optical coefficient (TOC) of sol-gel material and thermal expansion of geometrical parameters of the optical channel (thickness and channel width), and also the dependence on partial power in sol-gel layer. It is shown that in the temperature range from 10 to 50°C it is possible to create thermostable channel waveguides on the based of sol-gel films.

**Key words and phrases:** FOCL, integrated optics, planar optical waveguide, channel waveguide of elevated type, sol-gel materials, effective refractive index, normalized effective refractive index, temperature coefficient of the effective refractive index.

## References

1. M. A. Fardad, O. Mishechkin, M. Fallahi, Hybrid Sol-Gel Materials for Integration of Optoelectronic Components, *J. of Lightwave Technology* 19 (1) (2001) 84–91.

2. S. Saini, R. Kurrat, J. E. Prenosil, J. J. Ramsden, Temperature Dependence of Pyrolysed Sol-Gel Planar Waveguide Parameters, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 27 (6) (1994) 1134–1136.
3. Y. Enami, M. Kawazu, A. K.-Y. Jen, et al., Polarization-Insensitive Transition between Sol-Gel Waveguide and Electrooptic Polymer and Intensity Modulation for All-Optical Networks, *J. Lightwave Technol.* 21 (9) (1994) 2053–2060.
4. Y. Beregovski, A. Fardad, H. Luo, M. Fallahi, Single-Mode Operation of the External Cavity DBR Laser with Sol-Gel Waveguide Bragg Grating, *Opt. Commun.* 21 (164) (1999) 57–61.
5. T. Tamir, *Waveguide Optoelectronics*, Mir, Moscow, 1991, in Russian.
6. S. V. Pavlov, N. S. Trofimov, T. K. Chekhlova, Study of Thermo-optical Coefficient of Sol-Gel Waveguides, *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series "Mathematics. Information Sciences. Physics"* (1) (2011) 144–155, in Russian.
7. N. E. Nikolaev, S. V. Pavlov, N. S. Trofimov, T. K. Chekhlova, Analysis of the Temperature Coefficient of Effective Refractive Index of the  $TE_1$  and  $TM_1$  Modes in Optical Sol-Gel Waveguides, *Journal of Communications Technology and Electronics* 57 (1) (2012) 15–21.
8. S. V. Pavlov, N. S. Trofimov, T. K. Chekhlova, Experimental Studies of Optical Characteristics of Sol-Gel Waveguides by Thermoelectrical Module Peltie, in: *Scientific Section MEPhI-2011. V. 1. Scientific and Technical Conference-Seminar on Photonics and Information Optics*, NIYaU MEPhI, Moscow, 2011, pp. 87–89, in Russian.
9. I. K. Kikoin (Ed.), *Tables of Physical Quantities: A Handbook*, Atomizdat, Moscow, 1976, in Russian.