

Интегрально-оптические устройства на основе золь-гельных волноводов с использованием температурной зависимости эффективного показателя преломления

С.В.Павлов, Н.С.Трофимов, Т.К.Чехлова

Показана возможность создания волноводно-оптических устройств на основе золь-гельных пленок $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ с использованием температурной зависимости эффективного показателя преломления. Проанализированы зависимости характеристик устройств от параметров пленки и элементов оптической системы. Продемонстрирована работа регистратора и ограничителя температуры с разрешающей способностью $0.6^\circ\text{C}/\text{мм}$. Проведена оптимизация параметров пленки и выводной призмы.

Ключевые слова: золь-гельные пленочные волноводы, эффективный показатель преломления, регистратор температуры, ограничитель температуры.

1. Введение

Пленки $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, изготовленные по золь-гельной технологии [1, 2], обладают рядом специфических характеристик, одной из которых является большой термооптический коэффициент (ТОК), что обуславливает перспективность их применения в устройствах интегральной оптики (ИО) и волоконно-оптических линиях связи (например, для температурной подстройки интерференционных устройств ИО, таких как узкополосные фильтры, резонаторы, интерферометры Маха–Цендера, мультиплексоры/демультиплексоры и др. [3, 4]). Большой ТОК особенно важен для создания переключателей, коммутаторов и других элементов ИО с термоуправлением [5].

В настоящей работе показана возможность создания простых ИО-устройств – ограничителя и регистратора температуры, принцип действия которых основан на температурной зависимости эффективного показателя преломления (ЭПП) n_{eff} оптических волноводов на основе золь-гельных пленок. Следствием этой зависимости является изменение угла вывода излучения из волновода и состава волноводных мод при изменении температуры.

2. Зависимость температурного коэффициента ЭПП от параметров оптического волновода

Исследования, проведенные в [6], показали, что температурный коэффициент эффективного показателя преломления (ТК ЭПП) зависит от параметров оптического волновода, таких как показатель преломления, толщина пленки и тип волны, а также от параметров технологического режима, при котором формировалась пленка: от соотношения компонентов смеси, температуры и време-

ни отжига и др. Помимо этого ТК ЭПП зависит от используемого температурного диапазона.

Расчет температурных зависимостей характеристик оптических волноводов на основе пленок $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$, изготовленных по золь-гельной технологии, проводился с помощью дисперсионных уравнений с учетом двух факторов: температурной зависимости показателей преломления материалов пленки и подложки $n(T)$ и толщины пленки $h(T)$.

С использованием полиномиальных зависимостей $n(T)$ и $h(T)$, полученных в [7], был проведен расчет зависимости ЭПП от T и исследованы ТК ЭПП для TE_1 , TM_1 и TE_2 волн в диапазоне температур $20\text{--}100^\circ\text{C}$ для волноводов с различными показателем преломления n_2 и толщиной h (рис. 1).

Термооптический коэффициент пленок $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ имеет отрицательное значение, а толщина пленки в соответствии с коэффициентом расширения всегда возрастает при увеличении температуры. ТК ЭПП оптического волновода определяется обоими факторами и в зависимости от параметров пленки может иметь различные значения, в том числе и положительные. Наибольшее значение (по

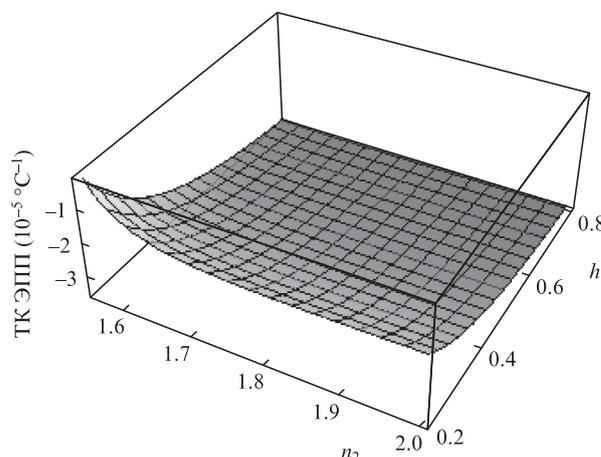


Рис. 1. Зависимость ТК ЭПП от показателя преломления и толщины пленки для TE_1 волны.

С.В.Павлов, Н.С.Трофимов, Т.К.Чехлова. Российский университет дружбы народов, Россия, 117198 Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6; e-mail: light_crusader89@mail.ru, ns_trofimov@mail.ru, tchekhlova@mail.ru

Поступила в редакцию 15 марта 2013 г., после доработки – 12 февраля 2014 г.

модулю) реализуется в диапазоне 30–70 °С и составляет примерно $-4 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ для волновода с $h = 0.8 \text{ мкм}$ и $n_2 = 1.8$ в случае TE_1 волны. Как показано в работе [6], отрицательное значение ТК ЭПП тем больше, чем больше концентрация поля волны определенной моды в пленке.

3. Регистратор температуры на основе золь-гельного волновода

Работа регистратора температуры (РТ) основана на зависимости n_{eff} волноводной моды от температуры. Условия вывода распространяющегося излучения из волновода, как известно, зависят от ЭПП и параметров выводного устройства. Поскольку n_{eff} волновода зависит от температуры, угол вывода излучения из волновода φ также зависит от температуры. Взаимосвязь этих величин для призмного устройства связи определяется выражением

$$n_{\text{eff}}(T) = n_{\text{pr}}(T) \sin\left(\alpha_{\text{pr}} - \arcsin\left(\frac{\sin\varphi(T)}{n_{\text{pr}}(T)}\right)\right), \quad (1)$$

где α_{pr} и $n_{\text{pr}}(T)$ – угол и показатель преломления призмы.

Экспериментальный волновод состоял из пленки $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ ($h = 0.3 \text{ мкм}$, $n_2 = 1.624$), нанесенной на кварцевую подложку. Показатель преломления призмы $n_{\text{pr}} = 1.7497$ на длине волны He–Ne-лазера 0.63 мкм , а угол α_{pr} между гранью, примыкающей к поверхности пленки, и выводной гранью составлял 60° .

Температурная зависимость угла, под которым излучение выводится из волновода с помощью призмного устройства вывода, приведена на рис.2. Видно, что в диапазоне 25–85 °С зависимость $\varphi(T)$ практически линейна и вариация углов $\Delta\varphi$ вывода излучения через призмное устройство составляет $\sim 4^\circ$.

Угловая разрешающая способность РТ определяется отношением $\Delta\varphi/\Delta T$ и зависит как от значения ТК ЭПП (чем выше, тем лучше), так и от n_{pr} и α_{pr} . Проведенные исследования зависимости $\Delta\varphi$ от параметров волновода показали, что при увеличении толщины пленки ТК ЭПП растет по модулю величины (рис.1), и, таким образом, растет диапазон изменения угла вывода излучения в заданном интервале температур. При этом следует выбирать TE_1 моду, обеспечивающую наибольший ТК ЭПП.

Существенное значение для характеристик РТ имеют параметры призмы – показатель преломления и угол вывода излучения. Исследования зависимости $\Delta\varphi(T)$ проводились для призм из материалов, удовлетворяющих условиям вывода излучения. К таким материалам в данном

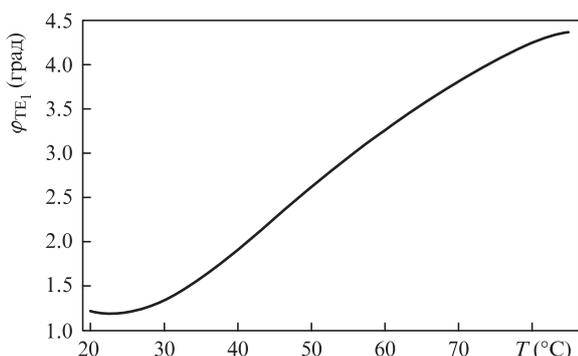


Рис.2. Зависимость угла вывода излучения из волновода от температуры для TE_1 волны.

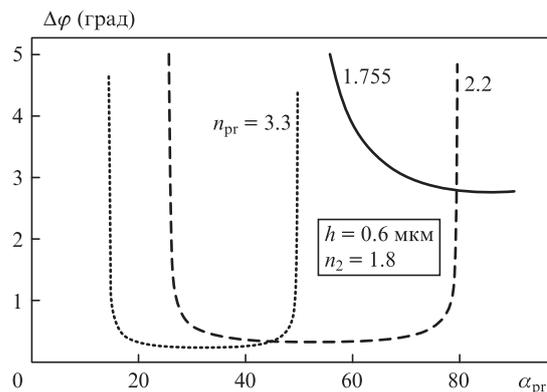


Рис.3. Зависимости $\Delta\varphi$ от угла призмы, изготовленной из стекла ТФ-5 ($n_{\text{pr}} = 1.755$), из GaP ($n_{\text{pr}} = 3.3$) и LiNbO_3 ($n_{\text{pr}} = 2.2$).

случае относятся стекло марки ТФ-5, а также GaP и LiNbO_3 . Расчеты $\Delta\varphi(T)$ для разных углов призм α_{pr} показали, что оптимальная с точки зрения как разрешающей способности, так и простоты реализации выводная призма должна быть сделана из стекла марки ТФ-5 с $n_{\text{pr}} = 1.7497$ и $\alpha_{\text{pr}} = 60^\circ$ (рис.3).

Градуировка экспериментального РТ была проведена с помощью модуля Пельтье, примыкающего к подложке. Измерительная шкала температуры РТ отстояла от выводной призмы на 50 см, при этом линейная разрешающая способность составляла $0.6^\circ\text{C}/\text{мм}$. Этот результат может быть существенно улучшен путем соответствующего выбора параметров пленки для оптимального ТК ЭПП, значение которого примерно в четыре раза больше указанного выше. Кроме того, при использовании угла выводной призмы 55° , как видно из рис.3, характеристики РТ также значительно улучшатся.

4. Ограничитель температуры

Работа ограничителя температуры (ОТ) основана на явлении отсечки волноводной моды при изменении температуры. Поскольку с увеличением температуры η_{eff} волноводных мод уменьшается, т.к. ТК ЭПП имеет отрицательное значение, при определенной температуре T_{cut} могут нарушаться условия распространения для определенной волноводной моды. В связи с этим мы исследовали зависимость критической толщины пленки от температуры.

Расчет критической толщины волновода с учетом дисперсионных соотношений был проведен по формулам

$$h_{\text{cr}}^{\text{TE}_\nu}(T) = \frac{\lambda}{2\pi[n_2^2(T) - n_3^2(T)]^{1/2}} \times \left[\arctan\left(\frac{n_3^2(T) - n_1^2}{n_2^2(T) - n_3^2(T)}\right)^{1/2} + \pi(\nu - 1) \right], \quad (2)$$

$$h_{\text{cr}}^{\text{TM}_\nu}(T) = \frac{\lambda}{2\pi[n_2^2(T) - n_3^2(T)]^{1/2}} \times \left\{ \arctan\left[\frac{n_2^2(T)}{n_1^2} \left(\frac{n_3^2(T) - n_1^2}{n_2^2(T) - n_3^2(T)} \right)^{1/2} \right] + \pi(\nu - 1) \right\},$$

где n_1 , $n_2(T)$ и $n_3(T)$ – показатели преломления воздуха, пленки и подложки соответственно; ν – номер волноводной моды; λ – длина волны.

Результаты расчета при $\lambda = 0.63$ мкм, $n_1 = 1.0$, $n_3 = 1.4575$ для $T = 20$ и 100°C , соответствующих границам рассматриваемого диапазона, и при различных значениях n_2 представлены в табл.1.

Из табл.1 видно, что с увеличением температуры критическая толщина возрастает в соответствии с отрицательным ТОК материала пленки, а с увеличением показателя преломления пленки – уменьшается. Зависимости изменения h_{cr} от показателя преломления пленки для TE_1 , TM_1 и TE_2 волн показаны на рис.4.

Значения h_{cr} резко изменяются при увеличении n_2 от 1.48 до 1.6; с дальнейшим ростом показателя преломления h_{cr} изменяется мало.

Характер изменения критической толщины с температурой для волновода, работающего на TE_1 или TM_1 волне, показан на рис.5 (форма кривых для TE_2 волны аналогична).

Температурная зависимость критической толщины пленки $h_{\text{cr}}(T)$ для соответствующей моды характеризуется температурным коэффициентом $\Delta h_{\text{cr}}/\Delta T$. Значения ТК критической толщины в диапазоне температур $20-90^\circ\text{C}$ для TE_1 и TM_1 волн почти одинаковы ($\sim 0.36 \times 10^{-3}$ мкм/ $^\circ\text{C}$), а для TE_2 волны ТК примерно в три раза больше. Следует отметить, что ТК для критической толщины положителен, т.е. при увеличении температуры критическая толщина растет. Таким образом, увеличение температуры до некоторого значения T_{cut} может привести к нарушению условия волноводного распространения волны определенного типа.

Анализ полученных результатов показал, что для термооптического ОТ предпочтительнее выбирать меньший показатель преломления пленки и максимальное значение ТК ЭПП.

Предварительные эксперименты, проведенные для волновода толщиной $h = 0.1673$ мкм с показателем пре-

Табл.1. Зависимость критической толщины волновода h_{cr} от температуры для TE_1 , TM_1 и TE_2 мод при различных значениях n_2 .

n_2	T ($^\circ\text{C}$)	h_{cr} (мкм)		
		TE_1	TM_1	TE_2
1.48	20	0.528295	0.578078	1.77050
	100	0.595548	0.645379	1.97281
1.55	20	0.211836	0.260781	0.81107
	100	0.218624	0.267615	0.831903
1.8	20	0.074859	0.120923	0.373365
	100	0.075679	0.121787	0.376129

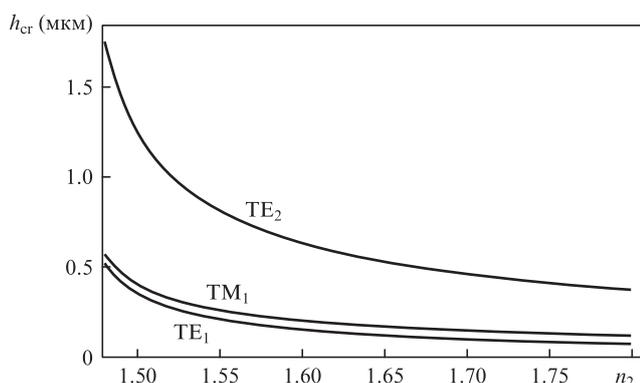


Рис.4. Зависимости критической толщины волны от показателя преломления пленки для TE_1 , TM_1 , и TE_2 волн.

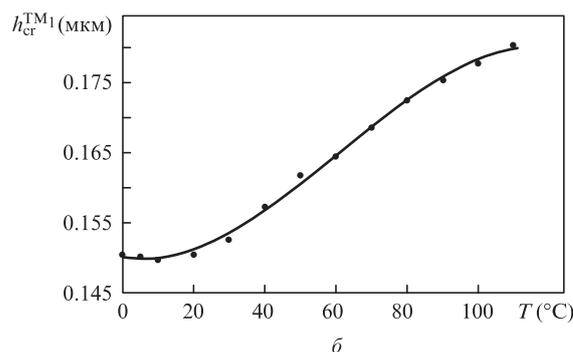
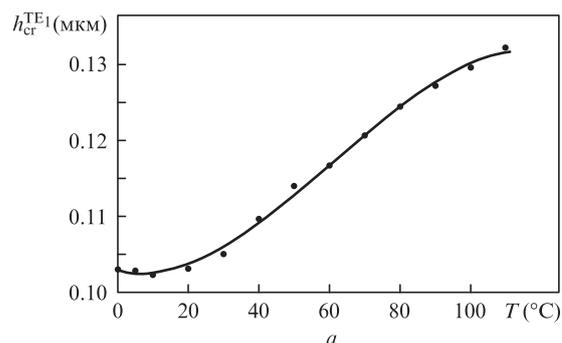


Рис.5. Температурные зависимости $h_{\text{cr}}^{\text{TE}_1}$ (а) и $h_{\text{cr}}^{\text{TM}_1}$ (б); $n_2 = 1.6977$ ($T = 0^\circ\text{C}$).

ломления пленки $n_2 = 1.5117$, продемонстрировали исчезновение TM_1 волны при нагревании волновода до 65°C , т.е. при этой температуре толщина волновода становилась меньше критической.

Для работы термооптических волноводных устройств важное значение имеет идентичность зависимости ЭПП от температуры как при нагревании, так и при остывании волновода. Эксперименты показали, что гистерезис в этом случае практически отсутствует. Наибольшая разность ЭПП ($\sim 20\%$) наблюдалась при температуре 10°C , затем, по мере ее повышения, эта разность монотонно уменьшалась и при 55°C становилась равной нулю, после чего оставалась пренебрежимо малой. Проведенные измерения показали, что в случае TM_1 волны разность ЭПП еще меньше.

5. Заключение

Итак, нами показана возможность создания волноводно-оптических устройств с термоуправлением на основе золь-гельных пленок и продемонстрирована работа моделей регистратора и ограничителя температуры, принцип действия которых основан на температурной зависимости эффективного показателя преломления таких волноводов.

Показано, что разрешающая способность температурного регистратора зависит от ТК ЭПП волновода, поскольку этот коэффициент определяет температурную угловую зависимость выходного пучка, причем модуль ТК ЭПП волновода для TE_1 моды больше, чем для TM_1 моды. Кроме того, установлено, что температурная угловая зависимость определяется в большей степени параметрами выводной призмы (ее показателем преломления и углом между выводной гранью и гранью, примыкающей к поверхности волновода). Оптимизация параметров

призмы показала, что следует использовать призму из стекла марки ТФ-5 с выводным углом 55° .

Для ограничителя температуры с отсечкой моды предпочтительнее выбирать меньший показатель преломления пленки и максимальное значение ТК ЭПП. Поэтому, как следует из табл.1, в качестве рабочей моды следует выбирать TE_2 моду и минимально возможную толщину пленки (вблизи критического режима работы волновода).

Показана работоспособность моделей рассмотренных устройств с удовлетворительными характеристиками: разрешающая способность температурного регистратора составляет $0.6^\circ\text{C}/\text{мм}$, а температурный коэффициент ограничителя температуры равен 0.36×10^{-3} мкм/ $^\circ\text{C}$.

Оптимизация параметров моделей может существенно улучшить характеристики описанных устройств.

1. Чехлова Т.К., Живцов С.В., Погосян А.С. *Вестник РУДН. Сер. Физика*, **13**, 35 (2005).
2. Innocenzi P., Martucci A., Guglielmi M., Armelao L. *J. Non-Crystall. Solids*, **259**, 182 (1999).
3. Fardad A.M., Mishechkin O.V., Fallahi M. *J. Lightwave Technol.*, **19**, 84 (2001).
4. Beregovski Y., Fardad A., Luo H., Fallahi M. *Opt. Commun.*, **164**, 57 (1999).
5. Wang X., Lei Xu, Liying Liu, Wang W. *J. Appl. Phys.*, **94**, 4228 (2003).
6. Чехлова Т.К., Живцов С.В., Грабовский Е.И. *Радиотехника и электроника*, **51**, 834 (2006).
7. Николаев Н.Э., Павлов С.В., Трофимов Н.С., Чехлова Т.К. *Радиотехника и электроника*, **57**, 1 (2012).