

## Проектирование конструкций нейтральных неполяризующих интерференционных систем, размещенных между средами с одинаковыми показателями преломления

© В.Х. Фам, Т.Ф. Нго, Л.А. Губанова

Университет ИТМО,  
197101 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: phamhoa0303@mail.ru

Поступила в редакцию 21.10.2019 г.  
В окончательной редакции 21.10.2019 г.  
Принята к публикации 28.10.2019 г.

Рассмотрено проектирование конструкций нейтральных неполяризующих интерференционных систем, сформированных на грани одной из двух призм, которые являются составляющими оптического элемента в виде куба. Проведен анализ спектральных характеристик энергетического коэффициента отражения разработанных конструкций.

**Ключевые слова:** интерференционные системы, поляризация, неполяризующие светоделители, нейтральные фильтры, стеклянные кубы.

DOI: 10.21883/OS.2020.02.48977.285-19

### Введение

В оптических системах нередко встречаются элементы, созданные соединением двух призм. Такая склейка представляет собой некий параллелепипед. Наиболее часто в оптическом приборостроении используются параллелепипеды в виде куба. Подобные кубы создаются из двух прямоугольных призм, имеющих одинаковую форму и размеры, изготовленных из материалов с одинаковыми показателями преломления. Такие кубы часто используются в оптических системах для разделения излучения на две части: отраженную и прошедшую [1]. Разделение излучения происходит на гипотенузной грани двух соединенных призм. В этом случае излучение падает на границу соединения призм под некоторым наклонным углом, обычно  $45^\circ$ . Это приводит к появлению поляризации отраженного (прошедшего) излучения, т.е. коэффициент отражения (пропускания) состоит из двух составляющих  $s$ - и  $p$ -компонент [2]. Однако в ряде случаев необходимо разделить излучение по интенсивности без деления излучения на  $s$ - и  $p$ -поляризации [3]. С этой целью на гипотенузной грани одной из двух соединенных призм формируется нейтральная неполяризующая интерференционная система (ННИС). Очевидно, что при этом оптическое покрытие размещается между средами с одинаковыми показателями преломления, равными показателю преломления материала, из которого изготавливаются призмы (рис. 1). Кубы, в которых формируется ННИС, называются неполяризующими светоделителями (НС). В последние годы НС входят в состав многих интерферометров, используемых для измерения различных величин с высокой точностью [4,5].

Спектральные характеристики ННИС должны удовлетворять двум требованиям: 1) незначительная разли-

ца между спектральными характеристиками отражения (пропускания) для  $s$ - и  $p$ -поляризаций, т.е.  $R_s \approx R_p$ ,  $T_s \approx T_p$ ; 2) постоянство отношения отражения к пропусканию, т.е.  $T/R = \text{const}$ .

Задача проектирования конструкций ННИС давно привлекает внимание разработчиков. Баумейстер (1961) и Костич (1970) первыми предложили теорию неполяризующих интерференционных систем, слои которых изготавливаются из двух пленкообразующих материалов, сформированных на плоскопараллельной пластинке [6,7]. Далее, Телен (1976) изложил метод поиска конструкций неполяризующих фильтров, основанных на использовании трех или более пленкообразующих материалов [8]. В ближайшее время применение численных методов позволяет создать различные методики поиска конструкций ННИС. Разработанные конструкции опубликованы в ряде работ [9–14]. Большинство предложенных конструкций были сформированы на плоскопараллельной пластинке, т.е. интерференционные системы размещены между средами с разными показателями преломления (воздух–стекло). Проектирование конструкций ННИС, размещенных между средами с одинаковыми показателями преломления, является более трудным для обеспечения всех указанных требований ННИС в широком диапазоне спектра [13,14]. Недостатком приведенных конструкций является то, что их спектральные характеристики не могут обеспечить малое расхождение между двумя поляризациями при постоянном отношении  $T/R$  в широком диапазоне длин волн, или их структура достаточно сложна, в состав входит большое количество слоев, что приводит к трудности в массовом производстве.

В настоящей работе рассмотрено проектирование конструкций ННИС, размещенных между средами с одина-

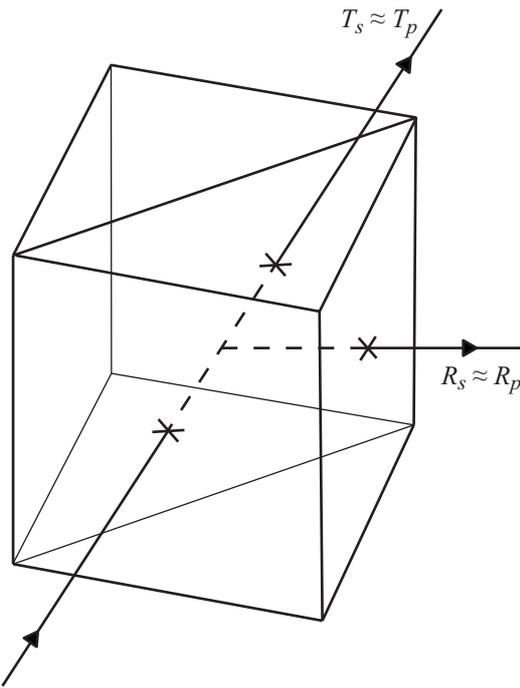


Рис. 1. Схема работы нейтрального неполяризующего интерференционного покрытия в стеклянном кубе.

ковыми показателями преломления, при этом расхождение между двумя поляризациями не превышает 2%, и отношение  $T/R$ , близкое к единице, сохраняется в интервале длин волн  $\Delta\lambda \geq 50 \text{ nm}$ .

Проектирование конструкций ННИС может быть разделено на два этапа: первый, определение показателей преломления пленкообразующих материалов, из которых формируются слои; второй, определение количества слоев и их толщин.

### Определение пленкообразующих материалов, необходимых для формирования слоев ННИС

Определение пленкообразующих материалов, из которых формируются слои, осуществляется путем установки соотношения между их показателями преломления так, чтобы расхождение между спектральными характеристиками отражения (пропускания) для  $s$ - и  $p$ -поляризаций было минимальным. Согласно [15] при ограничении на толщины слоев (четвертьволновые слои) для интерференционной системы, состоящей из  $N$  слоев, изготовленных из пленкообразующих материалов с показателями преломления  $n_1, n_2, \dots, n_N$ , размещенной между средами с показателями преломления  $n_0$  и  $n_m$ , можно представить следующие соотношения:

$$\begin{aligned} (\Delta n \Delta n_m)^{1/2} (\Delta n_2 \Delta n_4 \Delta n_6 \dots \Delta n_{2k}) &= \\ &= \Delta n_1 \Delta n_3 \Delta n_5 \dots \Delta n_{2k+1} \end{aligned} \quad (1)$$

в случае, когда количество слоев является нечетным  $N = 2k + 1$ , и

$$\begin{aligned} (\Delta n_0 / \Delta n_m)^{1/2} (\Delta n_2 \Delta n_4 \Delta n_6) \dots \Delta n_{2k} &= \\ &= \Delta n_1 \Delta n_3 \Delta n_5 \dots \Delta n_{2k-1} \end{aligned} \quad (2)$$

в случае, когда количество слоев является четным ( $N = 2k$ ), где  $\Delta n_j$  — отношение показателя преломления  $j$ -го слоя для  $s$ -поляризации к его показателю преломления для  $p$ -поляризации ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) и определяется следующим выражением:

$$\Delta n_j = n_{j,s} / n_{j,p} = 1 / (1 - (n_0 \sin \alpha_0 / n_j)^2), \quad (3)$$

где  $\alpha_0$  — угол падения излучения на систему.

В случае, когда интерференционная система размещается между средами с одинаковыми показателями преломления ( $n_0 = n_m$ ) и ее слои изготавливаются из трех пленкообразующих материалов с показателями преломления  $n_L, n_M$  и  $n_H$ , соотношения (1)–(3) имеют вид

$$\Delta n_m (\Delta n_M)^k = (\Delta n_L)^{[k/2]+1} (\Delta n_H)^{[k/2]} \quad (4)$$

в случае, когда количество слоев является нечетным, и

$$(\Delta n_M)^k = (\Delta n_L)^{[k/2+1/2]} (\Delta n_H)^{[k/2]} \quad (5)$$

в случае, когда количество слоев является четным. Обозначение  $[x]$  используется для операции выделения целой части вещественного числа  $x$ . Например,  $[4, 5] = 4$ :

$$\Delta n_j = n_{j,s} / n_{j,p} = 1 / (1 - (n_m \sin \alpha_0 / n_j)^2). \quad (6)$$

Пусть  $n_L = 1.38$  ( $\text{MgF}_2$ ),  $n_H = 2.35$  ( $\text{TiO}_2$ ) и  $n_m = 1.52$  (К8). Задача определения пленкообразующих материалов, из которых формируются слои ННИС, сводится к определению показателя преломления материала  $n_M$  с использованием выражений (4)–(6). На основе приведенных выражений можно представить связь между показателем преломления  $n_M$  и количеством слоев  $N$  в графическом виде, как показано на рис. 2. Видно, что при суммировании обоих случаев, когда количество слоев нечетное (кривая 1) и четное (2), значение показателя преломления  $n_M$  лежит в интервале 1.57–1.67. Из

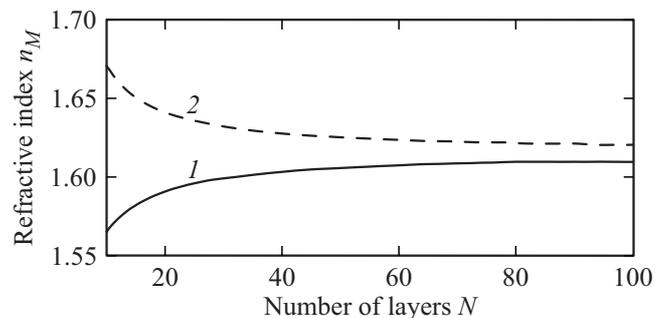


Рис. 2. Зависимость показателя преломления слоев  $M$  от количества слоев  $N$ , когда количество слоев, входящих в систему, является нечетным (1) и четным (2).

набора распространенных пленкообразующих материалов можно выбрать оксид алюминия  $Al_2O_3$  ( $n_M = 1.65$ ) в качестве пленкообразующего материала слоев, имеющего средний показатель преломления. В результате были определены следующие показатели преломления слоев ННИС:  $n_L = 1.38$  ( $MgF_2$ ),  $n_M = 1.65$  ( $Al_2O_3$ ) и  $n_H = 2.35$  ( $TiO_2$ ).

Аналогично в случае, когда слои, входящие в состав ННИС, изготавливаются из четырех пленкообразующих материалов, были определены следующие показатели преломления:  $n_L = 1.38$  ( $MgF_2$ ),  $n_{M1} = 1.45$  ( $SiO_2$ ),  $n_{M2} = 1.65$  ( $Al_2O_3$ ) и  $n_H = 2.35$  ( $TiO_2$ ).

### Определение количества слоев и их оптических толщин

Определение количества слоев и их толщин выполняется с помощью численного метода, основанного на использовании некоей целевой функции. В настоящей работе целевая функция (Merit Function, MF) имеет вид

$$MF = \frac{1}{2\mu} \sum_{i=1}^L \left[ \frac{(R_{i,s}^C - R_{i,s}^G)^2}{\varepsilon_{i,s}^2} + \frac{(R_{i,p}^C - R_{i,p}^G)^2}{\varepsilon_{i,p}^2} \right]^{1/2},$$

где  $\mu$  — количество точек в шкале длин волн,  $R_{i,s}^C$  и  $R_{i,p}^C$  — расчетное значение коэффициентов отражения,  $R_{i,s}^G$  и  $R_{i,p}^G$  — целевое значение коэффициентов отражения,  $\varepsilon_{i,s}$  и  $\varepsilon_{i,p}$  — допустимое отклонение для  $s$ - и  $p$ -поляризаций.

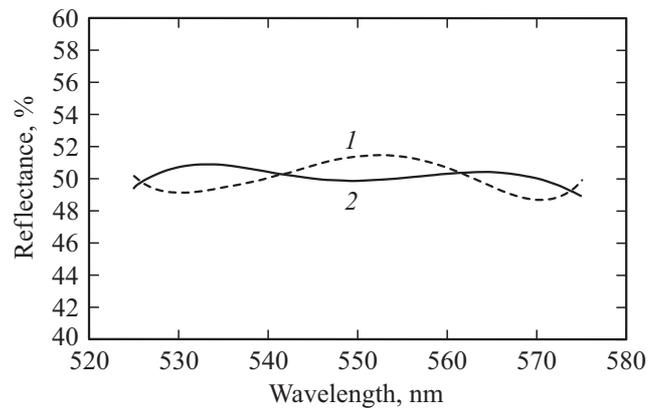
Задача определения количества слоев и их толщин сводится к минимизации приведенной целевой функции, т.е. поиск значений количества слоев и их толщин, так, чтобы значение целевой функции было минимальным. С другой стороны, спектральные характеристики энергетического коэффициента отражения полученных конструкций должны удовлетворять ряду следующих заданных условий:

$$\begin{aligned} |R_s - R_p| &< 2\%, \\ |R_s - 50\%| &< 2\%, \\ |R_p - 50\%| &< 2\%, \\ \Delta\lambda &\geq 50 \text{ nm}. \end{aligned} \tag{7}$$

В начале процесса минимизации необходимо вводить некоторую начальную ячейку. Начальная ячейка должна иметь малое расхождение между двумя поляризациями в диапазоне спектра  $\Delta\lambda \geq 50 \text{ nm}$ . В настоящей работе конструкция вида (НСВС)<sup>6</sup>Н была выбрана в качестве начальной ячейки, поскольку она имеет незначительное расхождение между двумя поляризациями в диапазоне длин волн 460–540 nm. В результате процесса минимизации была получена некая конструкция, структура которой показана в табл. 1. Все полученные оптические толщины могут быть реализованы на практике при

**Таблица 1.** 30-слойная система, изготовленная из фторида магния ( $MgF_2$ ), оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) и оксида титана ( $TiO_2$ ),  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$

№ слоя	Материал	Оптическая толщина $\lambda_0$	№ слоя	Материал	Оптическая толщина $\lambda_0$
	K8				
1	$MgF_2$	0.40	16	$TiO_2$	0.25
2	$Al_2O_3$	1.00	17	$Al_2O_3$	0.3
3	$TiO_2$	0.25	18	$TiO_2$	0.20
4	$MgF_2$	0.30	19	$MgF_2$	0.10
5	$TiO_2$	0.15	20	$Al_2O_3$	0.30
6	$Al_2O_3$	0.15	21	$MgF_2$	0.20
7	$TiO_2$	0.30	22	$TiO_2$	0.15
8	$MgF_2$	0.20	23	$Al_2O_3$	0.35
9	$Al_2O_3$	0.20	24	$TiO_2$	0.30
10	$TiO_2$	0.15	25	$Al_2O_3$	0.25
11	$MgF_2$	0.25	26	$MgF_2$	0.45
12	$Al_2O_3$	0.30	27	$Al_2O_3$	0.35
13	$MgF_2$	0.25	28	$TiO_2$	0.18
14	$TiO_2$	0.10	29	$Al_2O_3$	0.45
15	$Al_2O_3$	0.35	30	$MgF_2$	0.40
				K8	



**Рис. 3.** Спектральные характеристики энергетического коэффициента отражения 30-слойной ННИС для  $s$ - поляризации (1) и  $p$ -поляризации (2),  $\alpha_0 = 45^\circ$ ,  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ .

использовании существующих методов формирования оптических покрытий.

На рис. 3 представлены спектральные характеристики отражения разработанной интерференционной системы, состоящей из 30 слоев. Видно, что значение энергетического коэффициента отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций лежит в интервале  $(50 \pm 2)\%$  в диапазоне длин волн (525–575) nm, что соответствует условию (7). Разработанная 30-слойная система является примером ННИС с диапазоном работы  $\Delta\lambda = 50 \text{ nm}$ .

Расширение диапазона работы ННИС может быть осуществлено увеличением количества слоев, входящих в состав системы или увеличением количества пленко-

**Таблица 2.** 34-слойная система, изготовленная из фторида магния ( $\text{MgF}_2$ ), оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и оксида титана ( $\text{TiO}_2$ ),  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$

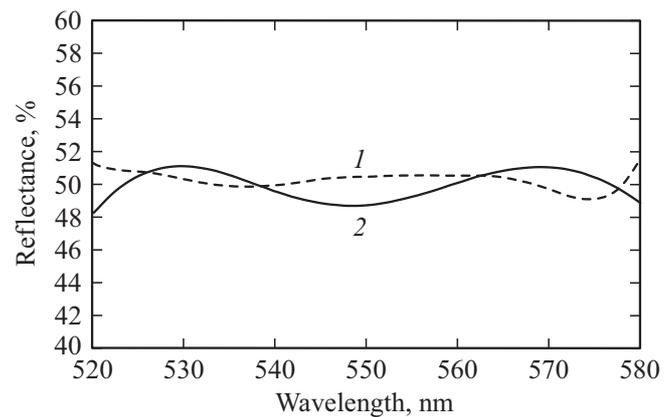
№ слоя	Материал	Оптическая толщина $\lambda_0$	№ слоя	Материал	Оптическая толщина $\lambda_0$
	K8				
1	$\text{MgF}_2$	0.2250	18	$\text{TiO}_2$	0.2750
2	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.5000	19	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.3250
3	$\text{MgF}_2$	0.4500	20	$\text{TiO}_2$	0.1875
4	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.2500	21	$\text{MgF}_2$	0.1500
5	$\text{TiO}_2$	0.2750	22	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.3000
6	$\text{MgF}_2$	0.3250	23	$\text{MgF}_2$	0.1375
7	$\text{TiO}_2$	0.1550	24	$\text{TiO}_2$	0.2000
8	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.1650	25	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.3250
9	$\text{TiO}_2$	0.2500	26	$\text{TiO}_2$	0.2750
10	$\text{MgF}_2$	0.1700	27	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.3250
11	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.2000	28	$\text{MgF}_2$	0.4000
12	$\text{TiO}_2$	0.1750	29	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.3125
13	$\text{MgF}_2$	0.2400	30	$\text{TiO}_2$	0.1375
14	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.3000	31	$\text{MgF}_2$	0.0875
15	$\text{MgF}_2$	0.2250	32	$\text{TiO}_2$	0.1000
16	$\text{TiO}_2$	0.1250	33	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.3250
17	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.3250	34	$\text{MgF}_2$	0.4000
				K8	

образующих материалов, из которых формируются слои ННИС.

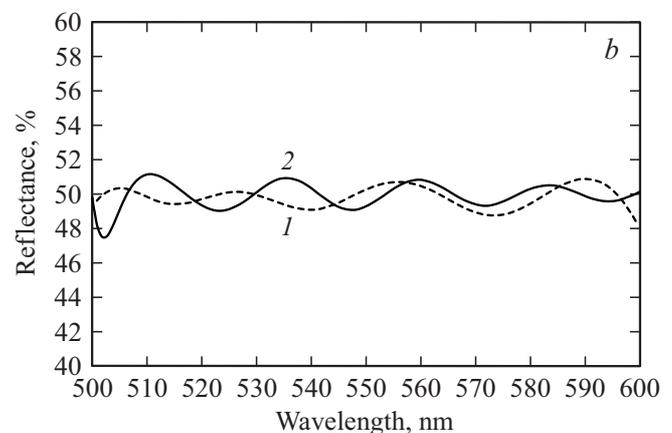
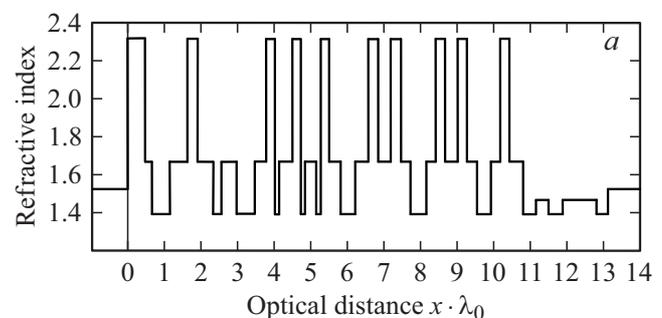
В табл. 2 представлена структура ННИС, состоящая из 34 слоев. Спектральные характеристики энергетического коэффициентов отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций показаны на рис. 4. Рассматриваемая конструкция обеспечивает условие (7) в интервале длин волн 520–580 nm, т.е.  $\Delta\lambda = 60 \text{ nm}$ . Для иллюстрации влияния увеличения количества пленкообразующих материалов рассмотрена 46-слойная конструкция ННИС, изготовленная из четырех пленкообразующих материалов  $\text{MgF}_2$  (L),  $\text{SiO}_2$  (M1),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (M2) и  $\text{TiO}_2$  (H). Структура рассматриваемой конструкции приведена на рис. 5, *a*. Спектральные характеристики энергетического коэффициентов отражения для  $s$ - и  $p$ -поляризаций показаны на рис. 5, *b*. Такая конструкция обеспечивает выполнение условия (7) в интервале длин волн 500–600 nm, т.е.  $\Delta\lambda = 100 \text{ nm}$ .

## Заключение

В работе рассмотрено проектирование конструкций нейтральных неполяризующих интерференционных систем, размещенных между средами с одинаковыми показателями преломления. Приведено соотношение между показателями преломления, которое служит основой для выбора пленкообразующих материалов, из которых формируются слои ННИС. Представлено определение количества слоев и их толщин численным методом при



**Рис. 4.** Спектральные характеристики энергетического коэффициента отражения 34-слойной ННИС для  $s$ - поляризации (1) и  $p$ -поляризации (2),  $\alpha_0 = 45^\circ$ ,  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ .



**Рис. 5.** (а) Распределение показателя преломления по оптической толщине 46-слойной ННИС из фторида магния  $\text{MgF}_2$ , диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и оксида титана  $\text{TiO}_2$ , отнесенной к длине волны  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ . (б) Спектральные характеристики энергетического коэффициента отражения 46-слойной ННИС для  $s$ - (1) и  $p$ -поляризации (2),  $\alpha_0 = 45^\circ$ ,  $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$ .

использовании целевой функции. Анализ спектральных характеристик полученных конструкций показал, что расхождение между двумя поляризациями не превышает 2% и отношение  $T/R$  близко к единице в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda \geq 50 \text{ nm}$ .

## Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Проект № 3.2506.2017/4.6).

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] *Baumeister P.W.* Optical Coating Technology. SPIE. 2004. 840 p.
- [2] *Губанова Л.А., Путилин Э.С.* Оптические покрытия. Учебник для вузов. СПб.: Лань, 2016. 286 с.
- [3] *Macleod A.H.* Thin-Film Optical Filters, 4th Edition. CRC Press, 2010. 800 p.
- [4] *Lou Y., Yan L., Chen B., Zhang S.* // Opt. Exp. 2017. V. 25. N 6. P. 6805–6821. doi 10.1364/OE.25.006805
- [5] *Niwa Y., Arai K., Ueda A., Sakagami M., Gouda N., Kobayashi Y., Yamada Y., Yano T.* // Appl. Opt. 2009. V. 48. N 32. P. 6105–6110. doi 10.1364/AO.48.006105
- [6] *Baumeister P.* // Opt. Act. 1961. V. 8. N 2. P. 105–119. doi 10.1080/713826378
- [7] *Costich V.R.* // Appl. Opt. 1970. V. 9. N 4. P. 866–870. doi 10.1364/AO.9.000866
- [8] *Thelen A.* // Appl. Opt. 1976. V. 15. N 12. P. 2983–2985. doi 10.1364/AO.15.002983
- [9] *Henderson A.R.* // Thin Solid Films. 1978. V. 51. N 3. P. 339–347. doi 10.1016/0040-6090(78)90297-3
- [10] *Wang W., Xiong S., Zhang Y.* // Appl. Opt. 2007. V. 46. N 16. P. 3185–3191. doi 10.1364/AO.46.003185
- [11] *Hongji Q., Ruijin H., Kui Y., Jianda S., Zhengxiu F.* // Appl. Opt. 2005. V. 44. N 12. P. 2343–2348. doi 10.1364/AO.44.002343
- [12] *Tikhonravov A.V., Trubetskov M.K.* // Proc. SPIE. 1994. V. 2253. P. 10–20.
- [13] *Jin H.S., Chun Y.G., Zheng P.W.* // Appl. Opt. 2009. V. 48. N 18. P. 3385–3390. doi 10.1364/AO.48.003385
- [14] *Xu X., Shao J., Fan Z.* // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 4297–4302.
- [15] *Фам В.Х., Нго Т.Ф., Губанова Л.А.* // Комп. Опт. 2019. Т. 43. № 4. С. 550–556. doi 0.18287/2412-6179-2019-43-4-550-556