

УДК 535.8, 535.4

### ПРИНЦИПЫ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ СПЕКТРОДЕЛИТЕЛЕЙ

Л.А. Губанова, Э.С. Путилин

Рассмотрена методика формирования интерференционных спектроделителей, образованных симметричными ячейками диэлектрических слоев. Приведена методика формирования интерференционных коротковолновых и длинноволновых спектроделителей. Представлен анализ влияния количества симметричных ячеек и их структуры на выходные параметры спектроделителей.

**Ключевые слова:** интерференционные покрытия, спектроделители, симметричные ячейки, диэлектрические слои, дихроические элементы.

#### Введение

Интерференционные спектроделители, типичные спектральные кривые которых представлены на рис. 1, используются в оптических приборах для выделения заданной спектральной области. В частности, в приборах с дифракционными решетками они используются для устранения нерабочих порядков спектра, в киноаппаратуре – для устранения тепловых потоков в виде холодных зеркал и теплофильтров; в цветном телевидении – для разделения цветовых потоков в качестве дихроических элементов, а также для подавления побочных полос пропускания диэлектрических узкополосных интерференционных светофильтров. Спектроделители являются диэлектрическими зеркалами в области спектра, где необходимо получить минимальное пропускание. Их можно разделить на два типа – коротковолновые и длинноволновые отрезающие интерференционные фильтры, отличающиеся тем, что в первом случае область высокого пропускания лежит в коротковолновой области спектра, а во втором – в длинноволновой.

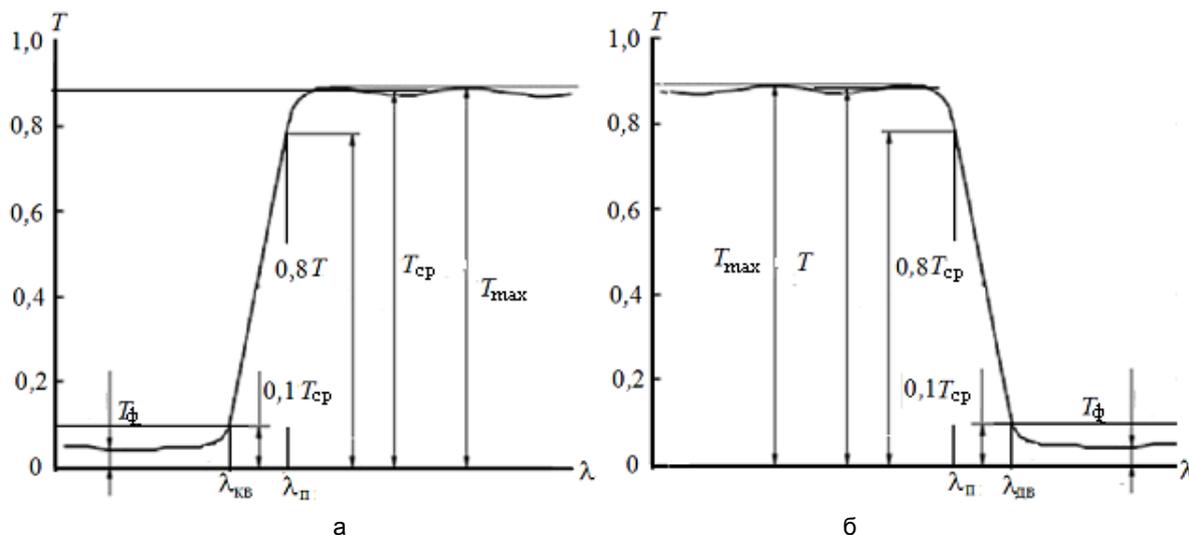


Рис. 1. Спектральная характеристика идеализированного спектроделителя: коротковолновый (а), длинноволновый (б)

Основными характеристиками спектроделителей (рис. 1) являются: средний  $T_{cp}$  и максимальный  $T_{max}$  коэффициенты пропускания, ширина полосы пропускания  $\Delta\lambda_{0,8}$  на уровне  $T \geq 0,8T_{cp}$ ; ширина зоны подавления  $\Delta\lambda_{0,1}$   $T \leq 0,1T_{cp}$ ;  $T_{\phi}$  – коэффициент пропускания в зоне подавления (области гашения); длины волн  $\lambda_{kv}$  и  $\lambda_{dv}$ , соответствующие пропусканию  $T = 0,1T_{cp}$  на коротковолновой и длинноволновой границах зоны минимального пропускания. Крутизна коротковолновой  $K_k$  или длинноволновой  $K_d$  границ пропускания спектроделителей определяется как отношение разности пропускания на уровнях  $0,8T_{cp}$  и  $0,1T_{cp}$  к разности соответствующих им длин волн, т.е.  $K_k = 0,7T_{cp}/(\lambda_{kv} - \lambda_{\pi})$ ,  $K_d = 0,7T_{cp}/(\lambda_{dv} - \lambda_{\pi})$ , где  $\lambda_{\pi}$  – длина волны, на которой коэффициент пропускания  $T = 0,8T_{cp}$ .

#### Понятие «симметричная система слоев»

Рассмотрим симметричные системы слоев диэлектриков, из которых возможно формирование диэлектрических зеркал, спектроделителей, светофильтров и т.д., т.е. системы, которые имеют плоскость симметрии. Минимальное число слоев такой системы – три. В этом случае  $\varphi_1 = \varphi_3$ , а  $n_1 = n_3$ . Особенно-

стью симметричных систем является то, что диагональные элементы матрицы интерференции, описывающей их свойства, одинаковы. Положим, что  $\varphi_1 = \varphi_3 = \varphi$ ,  $n_1 = n_3 = n_1$ , и определим элементы матрицы интерференции [1]:

$$\begin{cases} m_{11} = \cos 2\varphi_1 \cos \varphi_2 - 0,5(n_1 \cdot n_2^{-1} + n_2 \cdot n_1^{-1}) \sin 2\varphi_1 \sin \varphi_2, \\ m_{12} = n_1^{-1} \sin 2\varphi_1 \cos \varphi_2 + (n_2^{-1} \cos^2 \varphi_1 - n_2 n_1^{-2} \sin^2 \varphi_1) \sin \varphi_2, \\ m_{21} = n_1 \sin 2\varphi_1 \cos \varphi_2 + (n_2 \cos^2 \varphi_1 - n_1^2 n_2^{-1} \sin^2 \varphi_1) \sin \varphi_2, \\ m_{22} = \cos 2\varphi_1 \cos \varphi_2 - 0,5(n_1 \cdot n_2^{-1} + n_2 \cdot n_1^{-1}) \sin 2\varphi_1 \sin \varphi_2. \end{cases} \quad (1)$$

Как видно из (1),  $m_{11} = m_{22}$  и тогда в соответствии с [2] можно ввести понятие эффективных показателя преломления (ЭПП)  $N$  и фазовой толщины (ЭФТ) симметричной системы слоев  $\wp : N^2 = m_{21} \cdot (m_{12})^{-1}$ ,  $\cos \wp = m_{11} = m_{22}$ ,  $\sin^2 \wp = m_{12} \times m_{21}$ .

Матрица интерференции симметричной системы слоев будет иметь вид, совпадающий с матрицей интерференции одного слоя.

Такая формальная запись удобна при рассмотрении многослойных систем, в которых симметричные системы многократно ( $\ell$  раз) повторяются. При описании такой системы слоев матрица интерференции будет иметь вид

$$M = \begin{vmatrix} \cos \wp & iN^{-1} \sin \wp \\ iN \sin \wp & \cos \wp \end{vmatrix}^{\ell} = \begin{vmatrix} \cos \ell \wp & iN^{-1} \sin \ell \wp \\ iN \sin \ell \wp & \cos \ell \wp \end{vmatrix}.$$

Это значит, что ЭФТ интерференционной системы увеличивается в  $\ell$  раз, а ЭПП остается прежним.

Задача сводится к тому, что необходимо вычислить эквивалентный показатель преломления такой системы и ее эквивалентную фазовую толщину. ЭФТ:  $\cos \wp = m_{11} = m_{22}$ . В таком виде ее трудно анализировать, поскольку  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – не всегда кратные числа. Рассмотрим для иллюстрации наиболее простую ситуацию, когда  $\varphi_2 = 2\varphi_1$ , т.е.  $\varphi_1 = \varphi$ , а  $\varphi_2 = 2\varphi$ , тогда

$$m_{11} = \cos^2 2\varphi - 0,5(n_1^2 + n_2^2) \cdot (n_1 n_2)^{-1} \sin^2 2\varphi = \cos \wp.$$

Далее проанализируем, как ЭФТ такой системы  $\wp$  и ЭПП меняются в зависимости от фазовой толщины входящих в эту трехслойную систему слоев:

$$\begin{aligned} \cos \wp &= (2n_1 n_2)^{-1} (n_1 + n_2)^2 \left[ \cos^2 \varphi - (n_1^2 + n_2^2) (n_1 + n_2)^{-2} \right] \\ N^2 &= n_1^2 \frac{\cos 2\varphi - (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2)}{\cos 2\varphi + (n_1 - n_2) / (n_1 + n_2)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Выражения (2) целесообразнее записать в виде дроби, потому что для оценки поведения этих функций удобнее иметь дело с величиной, меньшей единицы.

Проанализируем, как ведет себя ЭПП в зависимости от фазовой толщины и от величины показателей преломления слоев, образующих симметричную систему, вернее, даже не от величины показателей преломления, а от их относительной разности. Очевидно, что в случае, если фазовая толщина слоя равна нулю, эквивалентный показатель преломления  $N^2 = n_1 n_2$ . Фазовая толщина слоя равна нулю, когда слой отсутствует или когда длина волны равна бесконечности, т.е. при достаточно больших длинах волн или при очень малых толщинах слоя.

Далее проанализируем, что будет происходить по мере увеличения фазовой толщины слоев  $\varphi$ . Изобразим зависимость  $N^2$  и  $\cos \wp$  от фазовой толщины слоев и количества симметричных ячеек многослойника.

На рис. 2 изображены зависимости  $N^2$ ,  $\cos \wp$ , определяемые формулой (2), от фазовой толщины слоев для двух случаев,  $n_1 < n_2$  и  $n_1 > n_2$  и разного числа повторения симметричных ячеек. Как видно из этого рисунка, на графических зависимостях наблюдаются зоны разрыва функции, а также зоны с отрицательным и положительным значением величины  $N^2$ , положения которых зависят от знака разности показателей преломления образующих систему слоев. Величина  $\cos \wp$  в зонах разрыва больше единицы, особенно это заметно при многократном повторении числа симметричных систем слоев. Очевидно, что в этой зоне величина  $\cos \wp$  должна быть заменена гиперболической функцией  $\text{ch } \wp$ , которая быстро растет по мере увеличения числа периодов. В этой ситуации можно легко записать и коэффициент отражения системы ячеек, осажженной на подложку, через ЭПП и ЭФТ симметричных ячеек слоев.

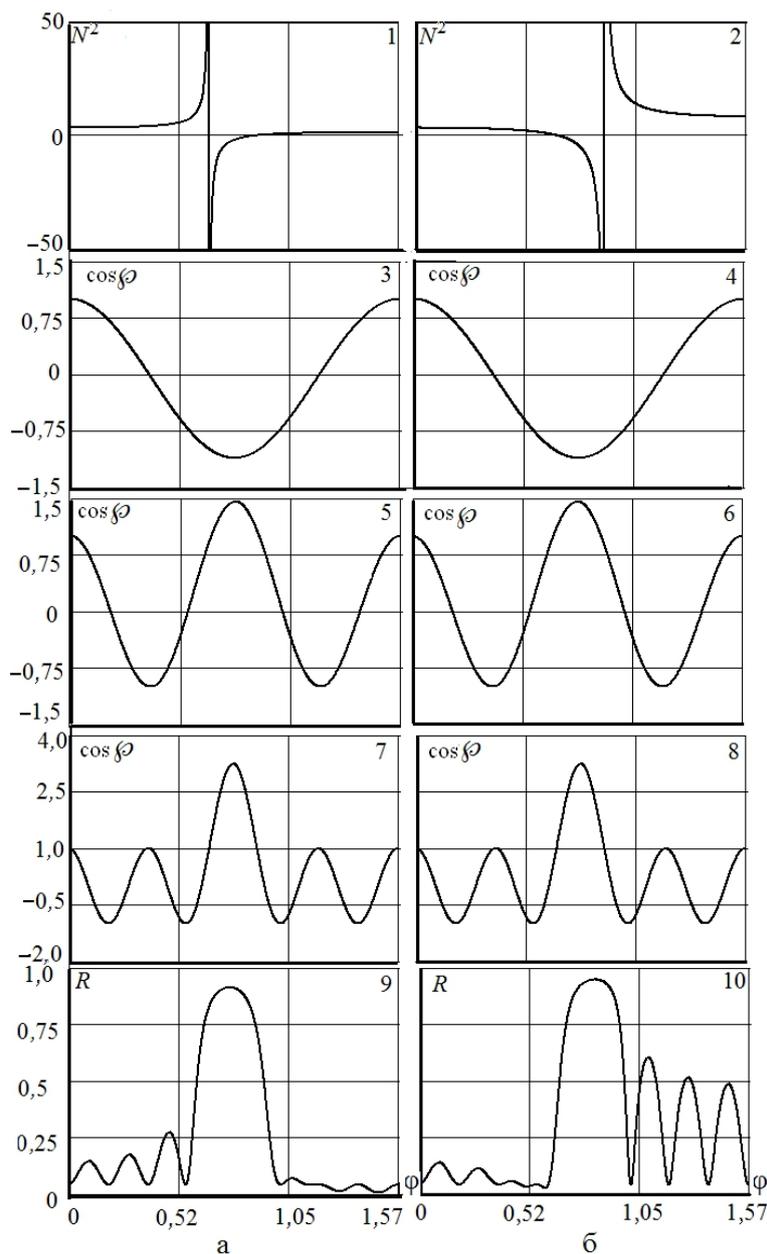


Рис. 2. Зависимости эквивалентных фазовой толщины (1, 2) и показателя преломления симметричных ячеек: (3, 4) – для одного, (5, 6) – для двух, (7, 8) – для четырех периодов, а также энергетического коэффициента отражения (9, 10) для четырех периодов от фазовой толщины слоев покрытия, состоящего из симметричной системы слоев (H2BH – фрагменты (а); В2НВ – (б)) при  $n_H=1,45$ ,  $n_B=2,30$

Для симметричной системы слоев коэффициент отражения будет иметь вид

$$R = \frac{N^2 (n_0 - n_m)^2 \cos^2 \varphi + (n_0 n_m - N^2)^2 \sin^2 \varphi}{N^2 (n_0 + n_m)^2 \cos^2 \varphi + (n_0 n_m + N^2)^2 \sin^2 \varphi}, \quad (3)$$

а при многократном ( $\ell$ ) повторении симметричных систем слоев:

$$R = \frac{N^2 (n_0 - n_m)^2 \cos^2 \ell \varphi + (n_0 n_m - N^2)^2 \sin^2 \ell \varphi}{N^2 (n_0 + n_m)^2 \cos^2 \ell \varphi + (n_0 n_m + N^2)^2 \sin^2 \ell \varphi}. \quad (4)$$

Как видно из фрагментов (9, 10) на рис. 2 в соответствии с зависимостями (3), (4), там, где  $\cos \varphi > 1$ , а  $N^2$  имеет разрыв, энергетический коэффициент отражения имеет максимальное значение и стремится к единице по мере увеличения числа симметричных систем слоев. Эти зоны в литературе получили название зон подавления (в этих областях пропускание минимально), на самом деле это зоны высокого отражения. Зоны, где величина  $N^2$  имеет малое значение, а  $|\cos \varphi| < 1$  – это зоны прозрачности

диэлектрической системы. Если выполняется условие  $N^2 = n_0 n_m$ , то такая система будет иметь минимум отражения при той фазовой толщине, которая соответствует точке пересечения.

Сравнение энергетических коэффициентов отражения диэлектрических систем, образованных повторением ячеек симметричных систем на подложке, показывает существенное различие в их спектральных характеристиках. Системы, состоящие из симметричных ячеек В2НВ, имеют малое отражение при значениях фазовых толщин слоев, меньших 0,6, т.е. в длинноволновой области спектра. Системы, образованные многократным повторением симметричных ячеек Н2ВН имеют малое отражение при фазовых толщинах больших 1,05, т.е. в коротковолновой области спектра. Иначе говоря, многократное повторение симметричных ячеек Н2ВН позволяет получать длинноволновые, а ячеек В2НВ – коротковолновые спектроделители, отличающиеся крутизной и особенностями поведения в области прозрачности в зависимости от их числа.

### Спектроделители на основе симметричных ячеек слоев

Рассмотрим два вида спектроделителей. Первым рассмотрим спектроделитель, образованный структурой  $m\Pi В2НВ \dots 2В2НВ$ , идентичной структуре  $\Pi(В2НВ)^{0,5(m-1)}$ . Здесь  $m$  – цифра перед буквой  $\Pi$  обозначает количество слоев покрытия, цифра перед В и Н – кратность данного слоя относительно четвертьволнового.

Далее проанализируем, как количество симметричных ячеек (слоев в многослойной системе) влияет на крутизну и ширину зоны подавления. На рис. 3 представлены спектральные кривые пропускания для многослойных систем, состоящих из 13, 15, 17 слоев или 6, 7, 8-ми кратным повторением симметричных ячеек В2НВ. Это длинноволновые спектроделители. Как видно из рисунка, с увеличением числа слоев незначительно увеличивается зона гашения, существенно уменьшается пропускание в минимуме и меняется крутизна спектроделителя.

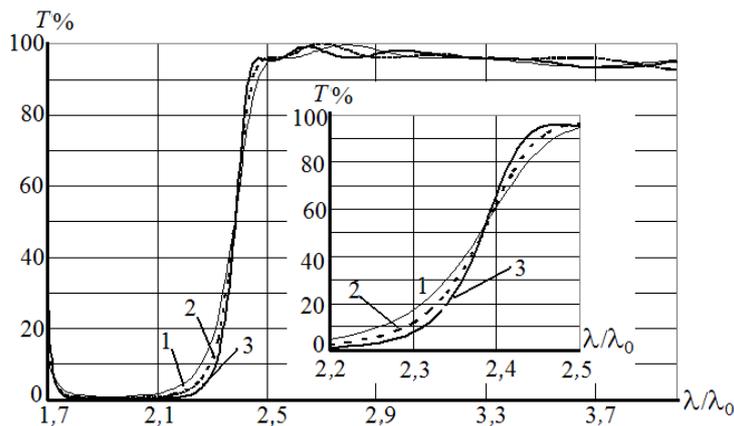


Рис. 3. Спектральные кривые пропускания спектроделителей, сформированных из симметричных ячеек (В2НВ) (количество ячеек): 6 – кривая 1; 7 – кривая 2; 8 – кривая 3, при  $n_B=2,3$ ,  $n_H=1,45$ .

Вставка на графике показывает участок спектральной характеристики, который характеризует крутизну спектроделителя, в увеличенном масштабе

Далее рассмотрим аналогичную картину для коротковолновых спектроделителей. В этом случае в основе спектроделителя лежит ячейка вида Н2ВН. Как и выше, проанализируем покрытия, состоящие из 13, 15 и 17 слоев, что идентично структуре  $\Pi(Н2ВН)^{0,5(m-1)}$ , где, как и раньше,  $m$  – число слоев многослойной системы ( $m = 13, 15, 17$ ). Спектральные характеристики таких систем представлены на рис. 4. Здесь, как и для длинноволновых спектроделителей, с увеличением числа слоев незначительно увеличивается зона гашения, существенно уменьшается пропускание в минимуме и увеличивается крутизна спектроделителя. Кроме того, по мере увеличения числа слоев величина ближайшего минимума пропускания, расположенного в коротковолновой части спектра, уменьшается, что существенно ухудшает эксплуатационные характеристики спектроделителя.

Для устранения этих недостатков, используя методы компьютерного синтеза структуры многослойных диэлектрических систем [3], можно оптимизировать спектральные характеристики спектроделителей за счет использования слоев с оптическими толщинами, не кратными  $0,25\lambda_0$ , что позволяет несколько увеличить крутизну при увеличении  $T_{cp}$  вблизи границы прозрачности. В качестве примера реализации можно рассмотреть следующие многослойные системы [3]:

- 13  $\Pi$  1,145 В 1,096 НВН... В 0,995 Н 1,234 В
- 13  $\Pi$  1,301 В 0,955 НВНВН... В 0,152 Н 0,151В.

Спектральные характеристики таких систем представлены на рис. 5.

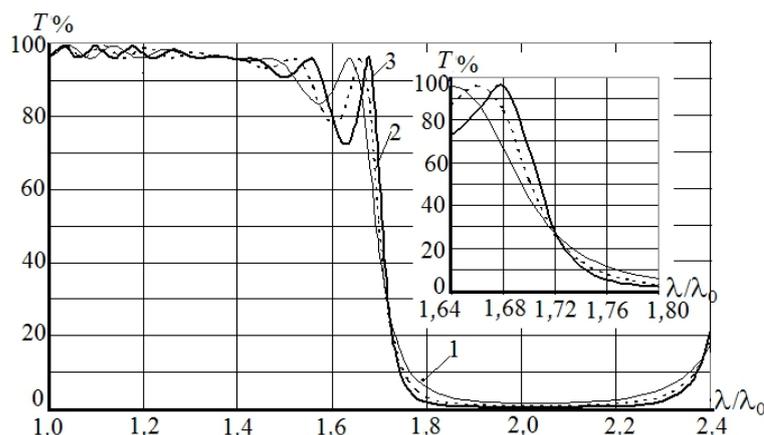


Рис. 4. Спектральные кривые пропускания коротковолновых спектроделителей, сформированных из симметричных ячеек (Н2ВН) (количество ячеек): 6 – кривая 1; 7 – кривая 2; 8 – кривая 3, при  $n_B=2,3$ ,  $n_H=1,45$ . Вставка на графике показывает участок спектральной характеристики, который характеризует крутизну спектроделителя, в увеличенном масштабе

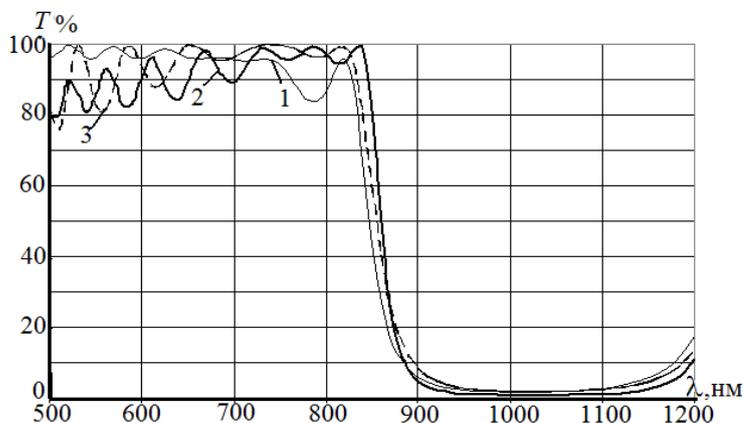


Рис. 5. Спектральные характеристики систем (Н2ВН)<sup>6</sup>  $\lambda_0=500$  нм – кривая 1; 13 П 1,145 В 1,096 НВН... В 0,995 Н 1,234 В  $\lambda_0=1000$  нм – кривая 2; 13 П 1,301 В 0,955 НВНВН... В 0,152Н 0,151В – кривая 3, при  $n_B=2,3$   $n_H=1,45$

На рис. 5 приведены спектральные характеристики диэлектрических систем, образованных шестикратным повторением симметричной ячейки (Н2ВН) и систем, состоящих из того же числа слоев, но имеющих оптические толщины слоев, прилегающих к подложке и граничащих с воздухом, отличающиеся от  $0,25\lambda_0$ . Необходимость наличия таких слоев обусловлена задачей максимального увеличения пропускания в диапазоне 700–850 нм.

Наличие в таких системах значительного числа слоев с оптической толщиной, не кратной  $\lambda_0/4$ , существенно затрудняет реализацию покрытий, а ошибки в слоях, неизбежно возникающие в процессе формирования системы, заметно ухудшают при реализации спектральную кривую. Кроме того, эти спектроделители имеют недостаточно широкую зону прозрачности. Современные методы синтеза позволяют найти конструкцию спектроделительного покрытия, лишенного вышеперечисленных недостатков, но состоящего из слоев с оптической толщиной, не равной  $\lambda_0/4$  [4].

### Заключение

В работе рассмотрены принципы конструирования спектроделителей, предназначенных для выделения участков спектра на основе симметричных ячеек. Показано, чем отличаются симметричные ячейки, формирующие коротковолновые спектроделители, от ячеек, входящих в состав длинноволновых спектроделителей. Проанализировано влияние расположения слоев в ячейке и количества ячеек на крутизну спектральной зависимости пропускания, величину зоны гашения и пропускание в минимуме. Показано, что с увеличением количества симметричных ячеек увеличивается крутизна спектральной зависимости и уменьшается пропускание в минимуме.

Литература

1. Путилин Э.С. Оптические покрытия: Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – 227 с.
2. Фурман Ш.А. Тонкослойные оптические покрытия. – Л.: Машиностроение, 1977. – 264 с.
3. Телен А. Конструирование многослойных интерференционных светофильтров // Физика тонких пленок. – М.: Мир, 1972. – Т. 5. – С. 46–83.
4. Виногоров В.М., Исаев А.Г., Симонов В.П., Учайкин А.Г. Оптический интерференционный спектроделитель. Патент G02B5/28, 2006 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bd.patent.su/2365000-2365999/pat/servlet/servlet3200.html>, св. Яз. рус. (дата обращения 01.12.2011).

*Губанова Людмила Александровна* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, La7777@mail.ru

*Путилин Эдуард Степанович* – Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой, eputilin @ yandex.ru