

УДК 681.7.068

## ОСОБЕННОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРАЛЬНО-СЕЛЕКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПОВЫШЕННЫМ ПОКАЗАТЕЛЕМ ПРЕЛОМЛЕНИЯ

**А.А. Манько**

*Государственный университет информационно-коммуникационных технологий  
ул. Соломенская, 7, Киев, 03110, Украина  
Поступила в редакцию 12 октября 2011 г.*

Проведено моделирование характеристик оптических спектрально-селективных элементов цилиндрической формы с повышенным значением показателя преломления, использующих эффект рассеяния света. Определены параметры материала оптического элемента, формирующие его спектрально-селективные свойства. Как следует из результатов расчетов, применение цилиндрических оптических элементов для угловой спектральной селекции возможно в ограниченном диапазоне значений показателя преломления. При повышении показателя преломления цилиндрического оптического элемента до определенного значения оптический элемент начинает функционировать в режиме квазиравномерного углового рассеяния света.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** оптический цилиндрический элемент, рассеяние света, метод Монте-Карло, индикатриса рассеяния, показатель преломления.

Проведене моделювання характеристик оптичних спектрально-селективних елементів циліндричної форми з підвищеним значенням показника заломлення, які використовують ефект розсіяння світла. Визначені параметри матеріалу оптичного елемента, що формують його спектрально-селективні властивості. Як впливає з результатів розрахунків, використання циліндричних оптичних елементів для кутової спектральної селекції можливе в обмеженому діапазоні значень показника заломлення. При підвищенні показника заломлення циліндричного оптичного елемента до певного рівня оптичний елемент починає функціонувати в режимі квазірівномірного кутового розсіяння світла.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** оптичний циліндричний елемент, розсіяння світла, метод Монте-Карло, індикатриса розсіяння, показник заломлення.

Modeling of characteristics of optical spectral-selective elements of the cylindrical form with the increased value of the refraction index, using effect of light scattering is organized. The parameters of the optical element materials, forming its spectral-selective characteristic are determined. As have shown results of researches, application of cylindrical optical element for spectral angular selection is possible in limited range of values of the index of refraction. At increase in value of refraction index before determined level the optical element starts to function in a mode of quasi uniform light scattering.

**KEYWORDS:** optical element of the cylindrical form, light scattering, Monte-Carlo method, indicatrix of scattering, index of refraction.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В предыдущей работе [1] были рассмотрены дисперсионные характеристики индикатрисы рассеяния оптических элементов цилиндрической формы с величиной показателя преломления не превышающей 2,25. При этом, существует ряд оптических материалов с показателями преломления, которые превышают это значение. Так, например, значение показателя преломления материала ZnTe в инфракрасном диапазоне составляет 5,3. Кроме того, успехи в развитии нанотехнологий позволяют создавать (синтезировать) так называемые гетеросреды. Гетерогенные среды состоят из матрицы – диэлектрика или полупроводника с металлическими, диэлектрическими, полупроводниковыми, ферромагнитными и ферроэлектрическими наночастицами, размеры которых намного меньше длины волны падающего электромагнитного излучения. Используя различные материалы для наночастиц можно изменять показатель преломления гетерогенной среды в широких пределах и в заданном диапазоне длин волн. Таким образом, представляют интерес особенности оптических характеристик спектрально-селективных элементов со значением показателя преломления, превышающим показатель преломления типовых оптических материалов [2]. В частности, представляет интерес исследование спектрально-селективных свойств оптических элементов цилиндрической формы с целью применения их в системах демультиплексирования оптических сигналов [3].

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ И ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе рассматривались такие же цилиндрические оптические элементы и применялись те же принципы моделирования, что и в [1]. В качестве входного светового потока рассматривался поток некогерентных параллельных световых лучей. Коэффициент отражения  $C_R$  на границе раздела оптических сред описывался выражением, полученным из [4]:

$$C_R = \frac{n_1^2 \cos 2\theta - 2n_1^2 \cos \theta \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \theta} + n_2^2}{n_1^2 \cos 2\theta + 2n_1^2 \cos \theta \sqrt{(n_2/n_1)^2 - \sin^2 \theta} + n_2^2} \quad (1)$$

Здесь  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления воздуха и стекла соответственно,  $\theta$  – угол падения.

Для моделирования рассеяния света использовались принципы, изложенные в [5]. С использованием предложенных методов был проведен расчет индикатрис рассеяния для оптических элементов со значениями показателями преломления от 2,5 и выше. Индикатриса рассеяния для оптического элемента с показателем преломления  $n_2 = 2,5$  приведена на рис. 1. Сравнительный анализ

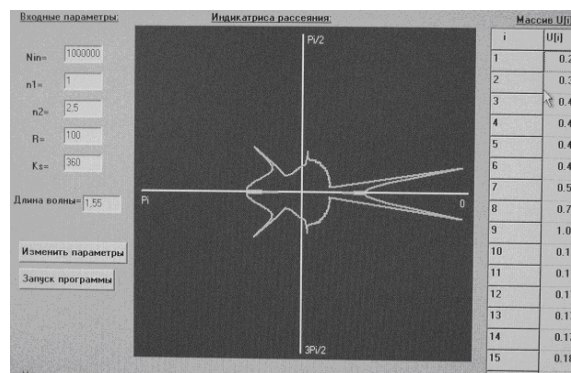


Рис. 1. Индикатриса рассеяния цилиндрического оптического элемента с показателем преломления  $n_2 = 2,5$

показывает, что она является развитием индикатрисы, полученной для  $n = 2,25$  [1], за счет увеличения показателя преломления. При этом отмечено уменьшение угла между двумя пиками в правой части от  $38^\circ$  до  $18^\circ$ . Таким образом, значение производной  $\partial\varphi/\partial n$  в этом диапазоне значений показателя преломления составляет 0,7 рад. В свою очередь показатель преломления оптического элемента зависит от длины световой волны  $\lambda$  в соответствии с формулой Селмейера:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - (L_i)^2}} \quad (2)$$

Здесь  $A_i$  и  $L_i$  – коэффициенты Селмейера. При использовании оптического элемента в качестве спектрально-селективного для разделения оптических каналов качество демультиплексирования определяется угловыми дисперсионными свойствами элемента относительно длины волны  $\partial\varphi/\partial\lambda$ . В свою очередь эту производную, как производную сложной функции можно представить в виде  $\frac{\partial\varphi}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial\lambda}$ .

При этом значение  $\partial\varphi/\partial n$  определяется конструктивными особенностями оптического элемента, а величина  $\partial n/\partial\lambda$  материалом стекла элемента:

$$\frac{dn}{d\lambda} = - \left( \frac{\lambda}{n} \right) \left[ \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \cdot L_i^2}{(\lambda^2 - L_i^2)^2} \right] \quad (3)$$

Таким образом, для выполнения операций демультиплексирования необходим выбор материала спектрально-селективного элемента не только по значению показателя преломления, но и по величине производной  $\partial n/\partial\lambda$  в рабочем диапазоне длин волн. При этом решение проблемы повышения дисперсионных свойств можно поставить в другую плоскость – за счет выбора рабочего диапазона длин

волн, в котором производная  $\partial n / \partial \lambda$  принимает экстремальные по абсолютной величине значения. С этой целью необходимо исследовать поведение второй производной  $\partial^2 n / \partial \lambda^2$ :

$$\partial^2 n / \partial \lambda^2 = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^3 \frac{A_i l_i^2 (3 \lambda^2 + L_i^2)}{(\lambda^2 - L_i^2)^3} - \left( \frac{dn}{d\lambda} \right)^2 \right], \quad (4)$$

для определения длин волн, на которых она принимает нулевые значения.

Как показывают результаты исследований, постановка и решение задач по оптимизации дисперсионных характеристик спектрально-селективных оптических элементов имеют смысл при наличии в индикатрисе рассеяния достаточно острых и значительных пиков с заметной угловой дисперсией. Для определения верхней границы рабочего диапазона показателя преломления в работе были проведены расчеты индикатрисы рассеяния при повышенных значениях показателя. Так, при повышении значения показателя преломления до 2,8 оба пика (рис.1) объединяются в один (рис.2).

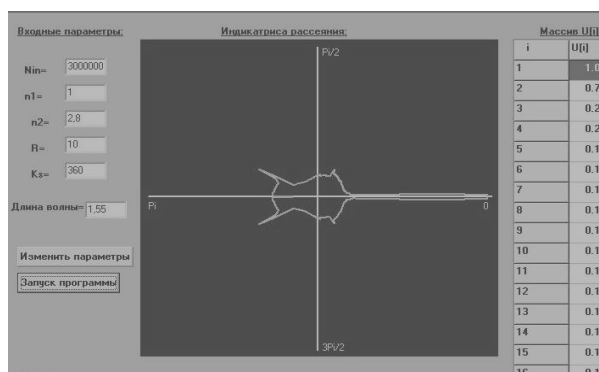


Рис. 2. Индикатриса рассеяния цилиндрического оптического элемента с показателем преломления  $n_2 = 2,8$

При последующем увеличении происходит изменение характера трансформации индикатрисы рассеяния. При этом рост показателя преломления не сопровождается угловым перемещением пиков в пределах от 0 до  $\pi$  рад, как это было при меньших значениях  $n_2$ . При увеличении показателя преломления до значения  $n_2 = 3,8$  происходит перераспределение интенсивности пиков в противоположном направлении (рис.3). И это делает невозможным использование оптических элементов в качестве спектрально-селективных устройств в данном диапазоне значений показателей преломления.

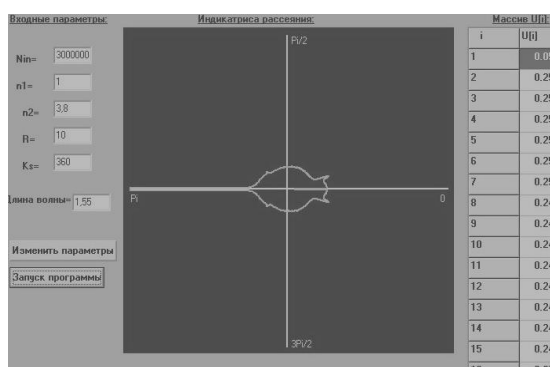


Рис. 3. Индикатриса рассеяния цилиндрического оптического элемента с показателем преломления  $n_2 = 3,8$

Дальнейший рост показателя преломления до 5,0 также приводит к перераспределению энергии пиков в обратном направлении рис. 4. Однако при этом относительная величина пиков меньше по сравнению со средним уровнем интенсивности рассеяния.

Увеличение показателя преломления до значений 5,6-6,5 приводит к такому перераспределению интенсивности рассеянного излучения, что пики исчезают, а сама индикатриса имеет вид, представленный на рис.5 ( $n_2 = 6,5$ ).

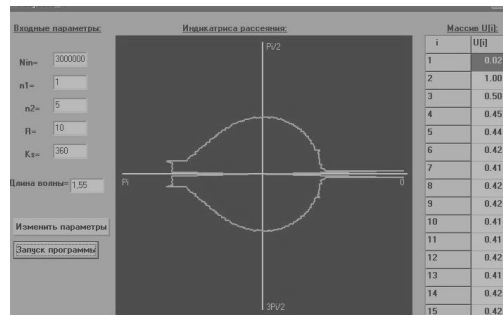


Рис. 4. Индикатриса рассеяния цилиндрического оптического элемента с показателем преломления  $n_2 = 5,0$

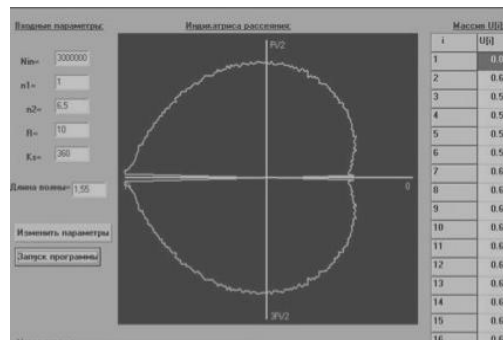


Рис. 5. Индикатриса рассеяния цилиндрического оптического элемента с показателем преломления  $n_2 = 6,5$

При этом относительная интенсивность рассеянного сигнала меняется в угловых пределах достаточно незначительно. И лишь в узких пределах  $\pm 1^\circ$  в направлении падения светового пучка и  $\pm 1^\circ$  в обратном направлении она падает до 0,07 и 0,02 соответственно. Таким образом, цилиндрический оптический элемент при больших значениях показателя преломления ( $n_2 \geq 5,6$ ) с хорошей степенью равномерности и при отсутствии пиков функционирует в режиме квазиравномерного рассеяния света. Дальнейшее повышение показателя преломления подтверждает этот результат. Практическое использование элементов с квазиравномерными индикатрисами представляется целесообразным для локальных систем атмосферной оптической связи со многими объектами, расположенными в разных направлениях. При этом данные элементы могут быть применены как для передающих, так и для приемных устройств. Аналогом применения подобных элементов в радиотехнике является использование антенн с круговой диаграммой направленности.

## ВЫВОДЫ

Как показали результаты исследований, применение цилиндрического оптического элемента для спектральной угловой селекции ограничивается областью значений показателя преломления приблизительно до  $n_2 = 2,8$ . При увеличении величины показателя преломления до 5,6 и выше оптический элемент начинает функционировать в режиме углового рассеяния света с достаточно хорошей степенью равномерности. Таким образом, в этом режиме элементы могут быть использованы для многоточечных систем локальной лазерной атмосферной связи в передающих и приемных устройствах. При использовании оптических элементов в качестве устройств спектральной угловой селекции следует выбирать стекло с повышенными дисперсионными свойствами. С этой целью необходимо проведение анализа первой и второй производной показателя преломления по длине волны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V.A. Manko, A.A. Manko Optical spectral-selective elements, using effect of the light scattering / Laser and Fiber-Optical Networks Modeling ["LFNM'2010"]: 10<sup>th</sup> international conf., 12-14 September 2010, Proceedings. – Sevastopol, Crimea, (Ukraine), 2010. – P. 170-171.
2. Справочник технолога-оптика: Справочник / И. Я. Бубис, В. А. Вейденбах, И. И. Духопел и др.; Под общ. ред. С. М. Кузнецова. – Л.: Машиностроение. – 1983 . – 414 с.
3. Слепов Н.Н. Оптические мультиплексоры и демultipлексоры систем WDM // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – №8. – С.42–47.
4. М. Борн, Э. Вольф. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 856 с.
5. Sukach G.A., Manko V.A., Manko A.A. "Method of calculation of multilayer optical filters using thin films" / Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Laser and Fiber-Optical Networks Modelling LFNM 2006, Kharkiv, Ukraine, 29 June–01 July, 2006. P. 452–454.