

УДК 05.11.14:05.13.19

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ И КОРРЕКЦИИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

**Е. Н. Котликов,**

доктор физ.-мат. наук, профессор

**Ю. А. Новикова,**

аспирант

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Описывается программа, созданная для исследований устойчивости синтезированных покрытий по трансформации спектров пропускания и для коррекции изготавливаемых покрытий. Программное обеспечение позволяет рассчитывать спектры пропускания и отражения покрытий, строить 3D-графики для них, находить значения критериев устойчивости синтезированных покрытий по разным методикам, создавать функции и гистограммы устойчивости для всех слоев покрытия при введении ошибок. На основе разработанной программы предлагаются методы коррекции структур в процессе их изготовления.

**Ключевые слова** — программное обеспечение, интерференционные покрытия, устойчивость, спектры, функция качества, функция устойчивости.

### Введение

Физическая оптика решает ряд задач, одна из которых — синтез и анализ устойчивости интерференционных покрытий [1–5]. В основе современных методов синтеза интерференционных покрытий лежит минимизация функции качества  $F(\mathbf{X})$ , определенная на дискретном множестве, содержащая  $L$  точек, в виде

$$F(\mathbf{X}) = \left\{ \sum_{i=1}^L w(\lambda_i) |T(\mathbf{X}, \lambda_i) - T_0(\lambda_i)|^q \right\}^{\frac{1}{q}}, \quad (1)$$

где  $w(\lambda_i)$  — весовая функция (при расчете мы принимали  $w(\lambda_i) = 1$ );  $T(\mathbf{X}, \lambda_i)$  — текущее спектральное значение коэффициента пропускания, которое определяется длиной волны  $\lambda_i$  и параметрами всех пленок  $\mathbf{X}$ ;  $T_0(\lambda_i)$  — заданное значение коэффициента пропускания;  $q$  — целое положительное число (обычно  $q = 2$ ). Здесь и в дальнейшем параметры слоя будем обозначать через  $j$ , а длину волны — через  $i$ .

При оптимизации структуры покрытия предполагается, что функция качества находится в одном из локальных минимумов. Многоэкстремальность задачи синтеза определяет множества

локальных минимумов — «долин», на дне которых находятся искомые решения [1, 6, 7]. Отсюда следует, что нахождение конкретного решения не обязательно является оптимальным и требует анализа пригодности синтезированного покрытия на предмет его устойчивости к ошибкам при изготовлении.

В большинстве работ по синтезу интерференционных покрытий вопросы исследования устойчивости многослойных структур затрагиваются недостаточно. Это связано в первую очередь с некорректностью самой задачи и отсутствием критериев отбора наиболее пригодного из полученных решений. Анализ влияния ошибок в толщинах пленок на спектры некоторых структур, возможность корректировки изготовленных структур и способы снижения искажения полученных спектров приведены в работах [6–8]. Основным недостатком этих методов является использование производных от функции устойчивости и спектров пропускания. Тем самым они справедливы только для бесконечно малых вариаций толщин слоев.

В настоящей работе описано программное обеспечение (ПО) для исследования устойчивости и коррекции интерференционных покрытий, базирующееся на новом методе анализа устойчиво-

сти по трансформации спектров пропускания для бесконечно малых и конечных ошибок в толщинах слоев [9].

### Анализ устойчивости интерференционных покрытий

Рассмотрим предложенный метод анализа устойчивости и коррекции синтезированных покрытий [9]. Этот метод, разработанный для различных типов интерференционных покрытий, позволяет прогнозировать критичные к ошибкам слои и корректировать их в процессе изготовления.

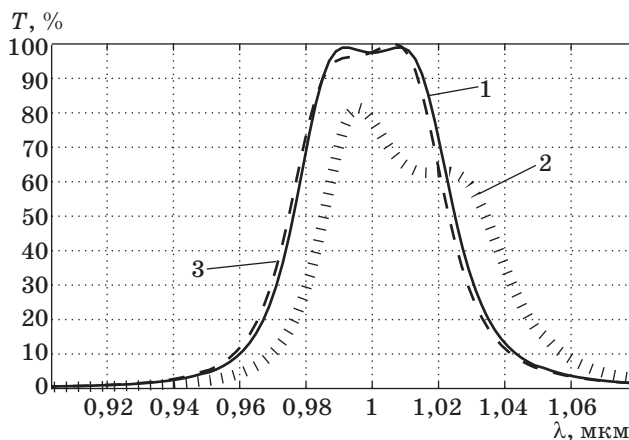
Для иллюстрации рассмотрим полосовой 15-слойный интерференционный фильтр (рис. 1). Расстояние между точками в шкале длин волн  $\Delta\lambda = (\lambda_N - \lambda_1)/N$ , где  $N$  — число точек в спектре.

В качестве критерия устойчивости  $\Delta F_k$  в работе [9] предлагается использовать модуль разности площадей кривых 1 и 2. Аналитически его величина выражается как

$$\Delta F_k = \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left( \sum_{\lambda_i} \left| \frac{T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k)}{\Delta D_k} \right| \right) |\Delta D_k| = \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left( \sum_{\lambda_i} |T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k)| \right). \quad (2)$$

Предложенная функция устойчивости  $\Delta F_k$  характеризует трансформацию спектра пропускания (отражения) при произвольных значениях  $\Delta D_k$ .

Введенный нами критерий может быть использован как для анализа устойчивости синтезированной структуры, так и для коррекции спектральных характеристик в процессе изготовления покрытия. Как будет показано ниже, для



■ **Рис. 1.** Спектры пропускания 15-слойного полосового интерференционного фильтра: 1 — спектр исходной структуры; 2 — спектр структуры с ошибкой в 12-м слое; 3 — спектр структуры с ошибкой в 12-м слое и коррекцией в 13-м слое

этого удобно использовать гистограммы устойчивости всей структуры.

Программой проводится анализ функции устойчивости  $\Delta F_k$  по трансформации спектра при произвольных значениях  $\Delta D_k$ , а также анализ  $\Delta P_k$  аналогично тому, как это описано в работе [9] для бесконечно малых значений  $\Delta D_k$ . В программе можно выполнять расчеты как для бесконечно малых, так и для конечных значений  $\Delta D_k$ :

$$\Delta P_k = \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \left( \sum_{\lambda_i} \left| \frac{T(\lambda_i, D_k) - T(\lambda_i, D_k + \Delta D_k)}{\Delta D_k} \right| \right) = \frac{\lambda_N - \lambda_1}{N} \sum_{\Delta D \rightarrow 0} \left( \frac{\partial T}{\partial D_k} \right) \delta \Delta D_k > 0. \quad (3)$$

Эта формула позволяет рассчитывать устойчивость по введенному в работе [9] критерию.

### Метод расчета оптических спектров и устойчивости интерференционных покрытий

В основе расчетов спектров лежит матричный метод с использованием характеристических матриц отдельных слоев. В дальнейшем для вычисления спектров пропускания и отражения мы будем употреблять следующие обозначения. Количество слоев интерференционного покрытия равно  $N$ , слои пронумерованы как 1, ...,  $N$ , начиная от слоя, граничащего со средой, и заканчивая слоем, граничащим с подложкой. Будем обозначать среду 0-м слоем, а подложку —  $(N + 1)$ -м. Расчет спектров пропускания и отражения проводится матричным методом с использованием характеристической матрицы пленки [10]

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^m \mathbf{M}_j, \quad (4)$$

где

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_j) & -\frac{i}{p_j} \sin \alpha_j \\ -ip_j \sin(\alpha_j) & \cos(\alpha_j) \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Здесь  $\mathbf{M}_j$  — матрица слоя  $j$ ;  $\alpha_j = k_0 n(\cos \Theta) d$ ,  $k_0 = 2\pi/\lambda$ ,  $d_j$  — геометрическая толщина слоя;  $n$  — коэффициент преломления слоя;  $\Theta$  — угол, под которым свет распространяется в данном слое.

Для каждого слоя, а также среды и подложки вычисляется вспомогательная величина  $p_j$  [10]:

$$\begin{aligned} \delta_j &= \sqrt{\varepsilon/\mu} \cos \Theta \text{ для } TE\text{-волны} \\ \text{и } p_j &= \sqrt{\mu/\varepsilon} \cos \Theta \text{ для } TM\text{-волны.} \end{aligned} \quad (6)$$

Амплитудные коэффициенты пропускания  $t$  и отражения  $r$  выражаются через элементы характеристической матрицы следующим образом:

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} \rho_{N+1}) \rho_0 - (m_{21} + m_{22} \rho_{N+1})}{(m_{11} + m_{12} \rho_{N+1}) \rho_0 + (m_{21} + m_{22} \rho_{N+1})};$$

$$t = \frac{2 \rho_0}{(m_{11} + m_{12} \rho_{N+1}) \rho_0 + (m_{21} + m_{22} \rho_{N+1})}. \quad (7)$$

Связь между амплитудными и энергетическими коэффициентами пропускания  $T$  и отражения  $R$ :

$$R = |r|^2; \quad T = \frac{\rho_{N+1}}{\rho_0} |t|^2. \quad (8)$$

Зависимости (4)–(8) были использованы в ходе разработки ПО.

### Описание программного обеспечения

Рассмотрим возможности разработанной программы для исследований устойчивости синтезированных покрытий по трансформации спектров пропускания и коррекции изготавливаемых покрытий. В основе ПО лежит предложенная методика анализа устойчивости синтезированных покрытий [9]. ПО позволяет рассчитывать спектры пропускания и отражения покрытий, строить 3D-графики для спектров пропускания, находить значения критериев устойчивости синтезированных покрытий по разным методикам, находить функции  $\Delta F_k$  и  $\Delta P_k$ , а также строить гistogramмы устойчивости  $\Delta F_k$  для всех слоев покрытия при введении произвольных ошибок  $\Delta D_k$ . На этой основе предлагаются методы коррекции изготавливаемых структур.

При создании ПО, написанного на языке Wolfram Mathematica-8 [11], в качестве вспомогательной использовалась универсальная программа FilmMgr, которая позволяет синтезировать покрытия с заданным спектром. Конечный результат синтезированных оптических покрытий и материалы сохраняются в «\*.dan» файлах.

Рассмотрим работу ПО. Методика расчетов была описана в предыдущем разделе. Вся программа разбита на несколько шагов. Алгоритм программы представлен на рис. 2.

**Шаг 1: загрузка материалов.** Программа загружает базу данных из FilmMgr. Программа может строить графики спектров для любого из имеющихся материалов.

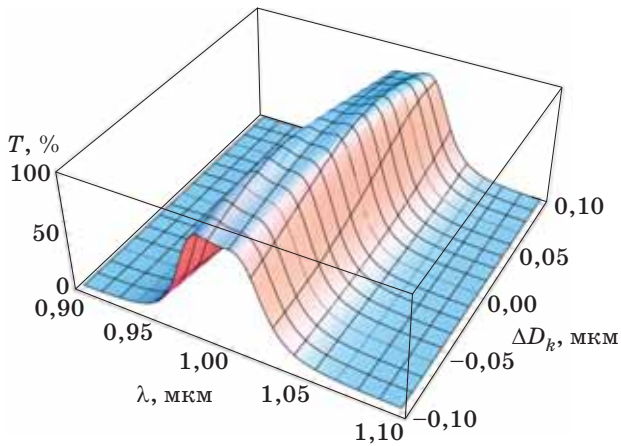
**Шаг 2: отображение спектров пропускания  $T$ , отражения  $R$ .** На этом шаге осуществляется загрузка исследуемой оптической структуры из «\*.dan» файла. Затем происходит вывод таблицы материалов, в которой отображены слои оптической структуры. Программа позволяет строить графики  $T, R$  от длины волны  $\lambda$  с сохранением их в файле. Если необходимо, то в исследуемой



■ Рис. 2. Алгоритм программы

структуре можно изменить толщины слоев оптической структуры и просмотреть информацию, полученную из «\*.dan» файла. В программе имеется функция вывода 3D (рис. 3), показывающего зависимость спектра  $T$  оптической структуры от отклонения толщины одного из слоев с возможностью изменить номер слоя и интервал, в котором допускаются отклонения.

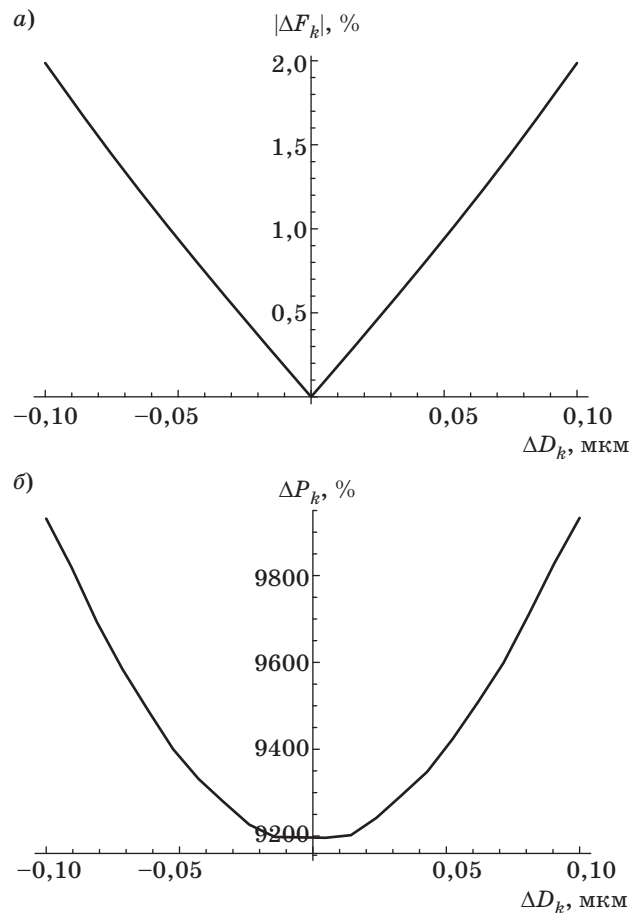
**Шаг 3: анализ формул.** На этом шаге программа позволяет наглядно проиллюстрировать вывод



■ Рис. 3. 3D-график спектра пропускания полосового 15-слойного фильтра

графика зависимости  $\Delta F_k$  и  $\Delta P_k$  от отклонения  $\Delta D_k$  толщины одного из слоев с возможностью изменить номер  $k$  рассматриваемого слоя и диапазон рассматриваемых отклонений (рис. 4, а, б).

Шаг 4: построение значений функции устойчивости по новому критерию. На этом этапе поль-



■ Рис. 4. График зависимости  $\Delta F_k$  (а) и  $\Delta P_k$  (б) от  $\Delta D_k$  для 8-го слоя

зователь может вывести гистограммы, показывающие зависимость величины  $\Delta F_k$  и  $\Delta P_k$  от  $\Delta D_k$  для заданного номера слоя при фиксированном значении  $\Delta D_k$ , и изменить эти значения. Гистограммы позволяют анализировать устойчивость к ошибкам и корректировать ошибки в предыдущих слоях путем изменения толщины одного из последующих слоев.

Таким образом, ПО позволяет не только определить устойчивость по отношению к отдельному слою, но и дать количественную оценку всей системы в целом.

### Иллюстрация возможностей программного обеспечения

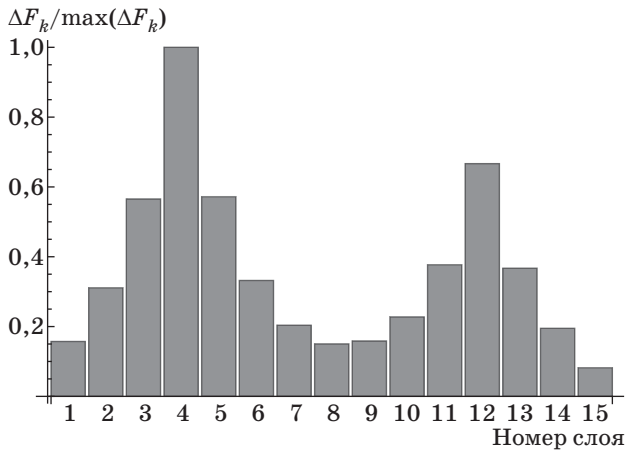
Для иллюстрации программы рассмотрим анализ спектров (см. рис. 1, кривая 1) и устойчивости полосового интерференционного фильтра.

В таблице приведены значения структуры фильтра, используемого в качестве примера, смещение  $\Delta \lambda_{\max}$  спектра пропускания при ошибке в заданном слое и нормированные значения  $\Delta F_k / \Delta F_{k\max}$ , а также результаты расчета устойчивости по дру-

■ Нормированное на максимальное значение смещение длины волны центра тяжести спектра с введенными ошибками в зависимости от разных слоев и устойчивости по разным критериям

№ слоя	Структура (подложка — кварц, среда — воздух)		$\Delta \lambda_{\max}$ ( $\Delta D_k = 0,025$ мкм)	Устойчивость, нормированная на максимальное значение				
	Вещество	Оптическая толщина, мкм		$\frac{\partial F(x)}{\partial x_j}$	$\left( \frac{\partial^2 F(x)}{\partial D_j^2} \right)$	$\left( \frac{\partial T}{\partial D_k} \right)_{\Delta D=0}$	$\frac{\Delta F_k / \Delta F_{k\max}}{\text{при } \Delta D_k}$	
							0,001	0,025
1	ZnSe	0,25	0,160	0,045	0,258	0,158	0,161	0,159
2	BaF <sub>2</sub>	То же	0,326	0,006	0,300	0,315	0,323	0,326
3	ZnSe	“	0,585	0,171	0,983	0,566	0,578	0,586
4	BaF <sub>2</sub>	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
5	ZnSe	0,25	0,596	0,155	0,994	0,575	0,589	0,596
6	BaF <sub>2</sub>	То же	0,342	0,024	0,324	0,336	0,344	0,342
7	ZnSe	“	0,207	0,090	0,345	0,208	0,209	0,207
8	BaF <sub>2</sub>	“	0,154	0,115	0,129	0,153	0,155	0,154
9	ZnSe	“	0,157	0,309	0,244	0,161	0,158	0,157
10	BaF <sub>2</sub>	“	0,238	0,311	0,189	0,235	0,239	0,238
11	ZnSe	“	0,407	0,938	0,579	0,383	0,407	0,408
12	BaF <sub>2</sub>	0,5	0,728	0,986	0,578	0,666	0,723	0,728
13	ZnSe	0,25	0,397	0,931	0,564	0,373	0,396	0,398
14	BaF <sub>2</sub>	То же	0,198	0,287	0,153	0,200	0,197	0,198
15	ZnSe	“	0,085	0,202	0,097	0,08	0,086	0,085





■ **Рис. 5.** Гистограмма устойчивости по слоям для ошибки  $\Delta D_k = 0,01$  мкм

гим критериям: по первой производной функции качества  $\frac{\partial F(x)}{\partial x_j}$  [4], по второй производной функции качества  $\sum_{\Delta D \rightarrow 0} \left( \frac{\partial T}{\partial D_k} \right)$  [6] и по первой производной спектра пропускания  $\sum_{\Delta D \rightarrow 0} \left( \frac{\partial T}{\partial D_k} \right)$  [9]. В программе также предусмотрен расчет  $\Delta P_k$  при произвольных значениях ошибки  $\Delta D_k$ . При  $\Delta D_k > 0$  критерий (3) совпадал с критерием, рассматриваемым в работе [9].

Структура, в которой варьируется ошибка в 8-м слое, представлена 3D-графиком на рис. 3. Показано изменение формы полосового фильтра и смещение длины волны максимума пропускания  $T$  в зависимости от ошибки в толщине слоя.

Графики зависимостей  $\Delta F_k$  и  $\Delta P_k$  от  $\Delta D_k$  (см. рис. 4) позволяют анализировать поведение устойчивости при разных знаках и величинах ошибок, а также сравнивать результаты устойчивости по разным методикам [8, 9].

Гистограмма исследуемой структуры с заданной ошибкой в слоях с оптической толщиной 0,01 мкм представлена на рис. 5.

Сравнение разных методов анализа устойчивости (см. таблицу) показывает, что введенный критерий (2) наилучшим образом описывает реальное искажение спектров.

Гистограмма и значения, представленные в таблице, позволяют анализировать устойчивость к ошибкам в отдельных слоях и корректировать ошибки в предыдущих слоях путем изменения толщины одного из последующих слоев.

### Коррекция структуры интерференционного покрытия

Проведем анализ критерия устойчивости и возможности вносить коррекцию в толщины пленок

в процессе изготовления с целью получить заданный спектр по описанной программе. В качестве примера рассмотрим 15-слойный полосовой интерференционный фильтр (см. рис. 1 и таблицу). В таблице также приведено нормированное на максимальное значение смещение длины волны центра тяжести спектра  $\Delta \lambda_{\max}$  с введенными ошибками  $\Delta D_k$  в зависимости от разных слоев. Величина ошибки  $\Delta D_k = 0,01 \lambda_0$  для каждого  $k$ -слоя.

Одним из основных условий использования фильтров является точность попадания длины волны на максимум пропускания в заданный диапазон и возможность коррекции фильтра в процессе изготовления. Смещение центра тяжести спектра  $\Delta \lambda_{\max}$  определяется как

$$\Delta \lambda_i = \bar{\lambda} - \lambda_i = \frac{1}{\sum_i T(\lambda)} \sum_i \lambda_i T_i. \quad (9)$$

Данные гистограммы (см. рис. 5) и таблицы позволяют определить те изменения, которые необходимо внести в толщины пленок, чтобы получить требуемую структуру, или провести коррекцию при изготовлении покрытий, если допущены ошибки в слоях. Анализ ошибок в спектрах показывает, что все ошибки в предыдущих слоях могут быть сведены к ошибке в  $z$ -слое, и для него легко рассчитать коррекцию в последующем слое ( $z + v$ )  $> z$ , где  $v$  — целое число.

При расчете коррекции ошибок должно выполняться условие

$$\Delta D_{z+v} = -\frac{F_z}{F_{z+v}} \Delta D_z. \quad (10)$$

Например, если в 12-й слой ввести ошибку  $D_{12} = 0,025 \lambda_0$ , то для компенсации искажений спектра можно использовать последующие слои, т. е. 13-й или 14-й. Если использовать 13-й слой, то его толщина должна быть в соответствии с формулой (10) уменьшена на  $D_{13} = 0,046 \lambda_0$  мкм. Спектры структур с ошибкой в 12-м слое, которая корректируется изменениями толщин в 13-м слое (см. рис. 1, кривая 3), практически полностью совпадают со спектром исходной структуры.

### Заключение

В работе описана программа на языке Wolfram Mathematica-8 для анализа устойчивости и коррекции интерференционных покрытий. С ее помощью можно прогнозировать наиболее критичные к ошибкам слои и корректировать эти ошибки в последующих слоях в процессе изготовления покрытия. В качестве примера проведен анализ устойчивости и коррекции 15-слойного полосового интерференционного фильтра. Показано, что используемый критерий наилучшим образом описывает трансформацию спектров и их коррекцию.

## Литература

1. **Фурман Ш. А.** Тонкослойные оптические покрытия. — Л.: Машиностроение, 1977. — 264 с.
2. **Введенский В. Д., Столов Е. Г.** Синтез интерференционных оптических покрытий // Оптико-механическая промышленность. 1981. № 7. С. 59–62.
3. **Котликов Е. Н., Прокашев В. Н., Хонинев А. Н., Хонинева Е. В.** Синтез светоделительных покрытий // Оптический журнал. 2001. Т. 68. № 8. С. 49–52.
4. **Яковлев П. П., Мешков Б. Б.** Проектирование интерференционных покрытий. — М.: Машиностроение, 1987. — 192 с.
5. **Tikhonravov A. V. et al.** New optimization algorithm for the synthesis of rugate optical coatings // Appl. Opt. 2006. Vol. 45. P. 1515–1524.
6. **Котликов Е. Н., Тропин А. Н.** Критерий устойчивости спектральных характеристик многослойных интерференционных покрытий // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 3. С. 60–64.
7. **Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Моцарь Е. В., Тропин А. Н.** Анализ устойчивости спектральных характеристик многослойных оптических покрытий // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 111. № 3. С. 525–531.
8. **Балышев К. В., Путилин Э. С., Старовойтов С. Ф.** Исследование воспроизводимости выходных параметров многослойных диэлектрических систем во время изготовления // Оптический журнал. Т. 65. № 3. 1998. С. 39–43.
9. **Котликов Е. Н., Новикова Ю. А., Щербак С. Я.** Анализ устойчивости и коррекции многослойных интерференционных покрытий по трансформации спектров пропускания // Научная сессия ГУАП: сб. докл. Ч. 1. СПб., 2012. С. 174–177.
10. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики / пер. с англ. С. Н. Бресуа, А. И. Головашкина, А. А. Шубина. — М.: Наука, 1973. — 856 с.
11. **Wolfram Mathematica — 8.0.** License Number: L3400-2803, Version: 8.0.4. <https://user.wolfram.com/portal/> (дата обращения: 01.04.2012).

### Уважаемые подписчики!

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2010 гг. в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>) и на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>). Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2010 гг. Вы можете заказать в редакции по льготной цене.

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 3600 рублей, для подписчиков стран СНГ — 4200 рублей, включая НДС 18 %, почтовые и таможенные расходы.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, эл. почта: [press@crp.spb.ru](mailto:press@crp.spb.ru), [zajavka@crp.spb.ru](mailto:zajavka@crp.spb.ru),

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, эл. почта: [export@periodicals.ru](mailto:export@periodicals.ru), сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: [Alfimov@viniti.ru](mailto:Alfimov@viniti.ru), сайт: <http://www.informnauka.com>

«Гал»

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>

«ИНТЕР-ПОЧТА-2003»

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80, эл. почта: [interpochta@interpochta.ru](mailto:interpochta@interpochta.ru), сайт: <http://www.interpochta.ru>

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, эл. почта: [krasnodar@interpochta.ru](mailto:krasnodar@interpochta.ru)

Новороссийск, тел.: (8617) 670-474

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: [podpiska@delpress.ru](mailto:podpiska@delpress.ru), сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: [kazan@komcur.ru](mailto:kazan@komcur.ru), сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

и др.