

А. Х. Султанов, В. Х. Багманов, С. В. Костров

## ОПТИЧЕСКИЙ КОММУТАЦИОННЫЙ ЭЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЕЛЕКТИВНОГО ЗЕРКАЛА И ФРАКТАЛЬНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ

Представлено решение задачи синтеза диэлектрического селективного зеркала для нужд интегральной оптики. *Оптический многослойный фильтр; слоистые среды; тонкопленочные структуры; диэлектрическое селективное зеркало; фотонный кристалл; оптические системы; оптическое многослойное селективное зеркало (ОМССЗ); оптический многослойный фильтр (ОМСФ); оптический коммутационный элемент; фрактальная структура*

### ВВЕДЕНИЕ

При создании устройств волоконно-оптической связи основной проблемой является разделение каналов связи. Для селекции, например, одного канала необходимо выделить спектральный интервал шириной от нескольких десятых до одного нанометра. В настоящее время для этого используются интегральные оптические устройства мультиплексирования / демультиплексирования AWG (Arrayed Wave-guide Gratings) и узкополосные четвертьволновые светофильтры. Основным недостатком четвертьволновых светофильтров, или иначе четвертьволновых диэлектрических зеркал, является значительная протяженность их конструкции и, как следствие, значительное затухание поглощения и расходимость светового пучка в структуре диэлектрического зеркала, что равносильно ухудшению светопропускания волоконно-оптических систем. При определенных обстоятельствах, в частности, при уменьшении протяженности конструкции, оптимизации частотной характеристики у диэлектрических зеркал открываются широкие перспективы не только в пассивной селекции оптических сигналов различных длин волн, но при и оптимизации перестраиваемых режимов работы, – перспектива стать оптическим переключателем в составе оптического коммутатора.

Наиболее перспективным методом коммутации, по числу публикаций за рубежом и РФ, а также числу упоминаний в сети Интернет, является коммутация с использованием эффектов нелинейности в фотонных кристаллах. С общей точки зрения фотонный кристалл является сверхрешеткой (crystal superlattice) – средой, в которой искусственно создано дополнительное поле с периодом, на

порядки превышающим период основной решетки. Для фотонов такое поле получают периодическим изменением коэффициента преломления среды – в одном, двух или трех измерениях (1D-, 2D-, 3D-фотонные структуры соответственно). Диэлектрическое зеркало является одномерной фотонной структурой.

Актуальным на данный момент является вопрос возможности динамического управления структурой фотонного кристалла. Понятно, что с изменением структуры фотонного кристалла меняется распространение излучения в таких структурах, что позволяет говорить об оптической коммутации.

Важным является вопрос синтеза фотонного кристалла с оптимизированной структурой. Перспектива оптимизации заманчива тем, что такие структуры позволяют добиться уменьшения протяженности конструкции и, как следствие, уменьшения затухания поглощения и расходимости светового пучка. Структура такого фотонного кристалла рассчитана и нацелена на задачу конкретного частного случая и имеет необходимую частотную характеристику.

Поэтому, до разработки методов оптической коммутации, были разработаны алгоритмы синтеза оптимизированных многослойных интерференционных структур. В работах [8] и [9] показано, что синтез элемента на основе перестраиваемого диэлектрического селективного зеркала с оптимизированной структурой усложняется тем, что задача расчета оптимальных параметров диэлектрического зеркала решается с помощью многомерной оптимизации с поиском минимума оценочного функционала неявно заданной функции  $N$ -переменных. К тому же расчет такой функции по каждой длине вол-

Контактная информация: (347) 273-06-89

Результаты работы были получены при помощи гранта «CARL ZEISS» компании ООО ОПТЕК, официального представителя концерна CarlZeiss в СНГ

ны ведется рекуррентно. Последовательные приближения к результату требуют промежуточной обработки данных и выявления «узких мест». Существуют краевые условия, связанные с физическими ограничениями при электрооптическом эффекте. Все эти условия требуют для своего проведения большого количества вычислительного ресурса. Поэтому для достижения поставленной цели была создана система имитационного моделирования фотонных кристаллов. Для ряда частных случаев с целью упрощения задачи многомерной оптимизации параметров фотонного кристалла, необходимо было свести задачу многомерной оптимизации параметров многослойных интерференционных структур к задаче одномерной оптимизации, что было сделано в работах [8] и [9]. На заключительном этапе с помощью разработанной системы имитационного моделирования фотонных кристаллов или/и конструкторского программного обеспечения было проведено исследование возможностей создания коммутационного элемента на основе перестраиваемого диэлектрического селективного зеркала. При существующих физических ограничениях оценена возможность оптической коммутации на основе электрооптического эффекта, предложена конструкция коммутационного элемента и конструктив оптического коммутатора.

**Новизна** данной работы заключается в следующем:

- определена возможность создания оптического переключателя, функционирующего на основе электрооптического эффекта в узкополосной избирательной структуре;
- предложено использовать оптимизированные диэлектрические селективные зеркала в волоконно-оптической линии связи для оптического мультиплексирования/ демultipлексирования по длинам волн.

## 1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СЛОИСТЫХ СРЕД

Расчет прошедшей и отраженной волн (рис. 1) можно осуществить суммированием прошедшей и отраженной волн с учетом набега фаз.

Но этот процесс можно упростить, используя понятие импеданса. Так, поле на одной границе слоя удобно выражается через поле на другой его границе с помощью специальной матрицы, которую Абеле [2] назвал характеристической матрицей слоя. Для  $j$ -го слоя с параметрами  $n_j$  и  $d_j$  она имеет вид

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j\right) & -\frac{i}{n_j} \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j\right) \\ -i n_j \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j\right) & \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j\right) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Поле на левой границе самого правого слоя

$$\begin{pmatrix} E(d_1) \\ H(d_1) \end{pmatrix} = M_1 \begin{pmatrix} E(0) \\ H(0) \end{pmatrix}.$$

Последовательно переходя от слоя к слою и учитывая при этом условие непрерывности на границах раздела, можно связать между собой поле на границе с правым полупространством и поле на границе с левым полупространством.

$$M = \prod_{i=1}^N M_j.$$

Поле на левой границе самого левого  $N$ -го слоя:

$$\begin{pmatrix} E\left(\sum_{j=1}^N d_j\right) \\ H\left(\sum_{j=1}^N d_j\right) \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E(0) \\ H(0) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Метод Абеле дает возможность непосредственного пересчета соотношений напряженностей электрического и магнитного полей в понятиях волновых сопротивлений.

Отношение амплитуды электрического поля к амплитуде магнитного поля называется импедансом (волновым сопротивлением) в этой плоскости. В среде, которая поддерживает распространение только одной волны (т. е. где нет отраженной волны), это волновое сопротивление называется характерным импедансом среды и обозначается  $\eta$ . Если  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды и  $\mu$  – ее магнитная проницаемость, то характерный импеданс среды:

$$\eta = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}. \quad (3)$$

Если обозначить характеристическое волновое сопротивление вакуума  $\eta_0$ , для немагнитной диэлектрической среды с показателем преломления  $n$ , импеданс равен

$$\eta_j = \frac{\eta_0}{n_j}. \quad (4)$$

Если импеданс в какой-либо плоскости внутри диэлектрика равен  $Z_{(j-1)}$  (так называемое сопротивление нагрузки), то импеданс на расстоянии  $d_j$  перед ней, называемый входным сопротивлением, в зависимости от длины волны  $\lambda$ , определяется выражением:

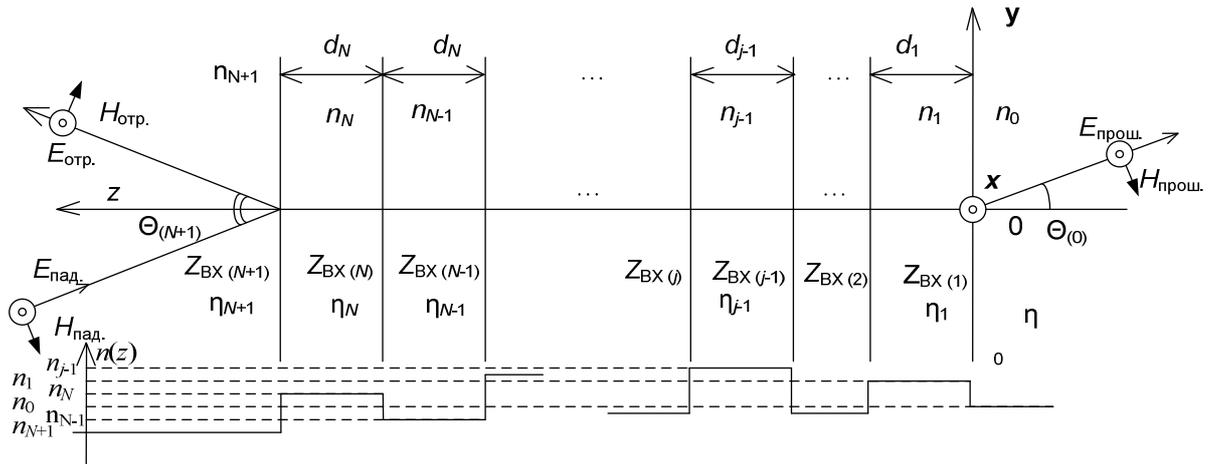


Рис. 1. Многослойная структура

$$Z_{(j)}(\lambda) = \eta_j \frac{Z_{(j-1)}(\lambda) - i\eta_j \operatorname{tg}(2\pi \cdot n_j d_j / \lambda)}{\eta_j - iZ_{(j-1)}(\lambda) \operatorname{tg}(2\pi \cdot n_j d_j / \lambda)}. \quad (5)$$

Последовательно переходя от слоя к слою и учитывая при этом условие непрерывности на границах раздела, можно связать между собой поле на границе с правым полупространством и поле на границе с левым полупространством.

Причина, по которой понятие импеданса может быть полезным, состоит в том, что коэффициенты отражения и пропускания могут быть выражены в терминах волновых сопротивлений. В частности, коэффициент отражения на границе раздела с сопротивлением нагрузки  $Z_L$ , в диэлектрике с характерным импедансом  $\eta$ , дается формулой

$$r(\lambda) = \frac{Z_N(\lambda) - \eta_1}{Z_N(\lambda) + \eta_1}. \quad (6)$$

Коэффициент отражения по мощности – доля мощности, прошедшая через него, определяется как

$$R(\lambda) = |r(\lambda)|^2. \quad (7)$$

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЕЛЕКТИВНОГО ЗЕРКАЛА И ПРОБЛЕМЫ В ТЕОРИИ СИНТЕЗА СЛОИСТЫХ СРЕД

Обозначим требуемое спектральное распределение энергетического коэффициента отражения  $\check{R}(\lambda)$ , а соответствующий интервал длин волн –  $[\lambda_1, \lambda_2]$ . Спектральное распределение энергетического коэффициента отражения проектируемого покрытия с распределением показателя преломления  $n(z)$  обозначим  $R(n(z), \lambda)$ . Задача численного метода синтеза – найти такую функцию  $n(z)$ , для которой  $R(n(z), \lambda) \equiv \check{R}(\lambda)$  на интервале длин волн  $[\lambda_1, \lambda_2]$ . На самом деле, в общем случае это условие практически недос-

тижимо. Таким образом, лучше говорить о синтезе покрытия, имеющего отражение в определенном смысле близкое к распределению  $\check{R}(\lambda)$  на интервале длин волн  $[\lambda_1, \lambda_2]$ .

Для определения степени близости характеристик покрытий к заданным используется целевой функционал (функционал качества) вида:

$$F(n(z)) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} [R(n(z), \lambda) - \check{R}(\lambda)]^2 u(\lambda) d\lambda, \quad (8)$$

где  $n(z)$  – искомая функция, описывающая профиль показателя преломления по толщине покрытия,  $u(\lambda)$  – весовая функция, определяющая «ценность» различных диапазонов длин волн, в интервале  $[\lambda_1, \lambda_2]$ .

Очевидно, глобальный минимум этого функционала соответствует наилучшему математическому приближению покрытия, обладающего заданными спектральными свойствами. Согласно работе [3], оптимальное распределение показателя преломления  $n(z)$ , соответствующее минимуму функционала качества, должно быть кусочно-экстремальным. Очевидно, что это чрезвычайно важный для практики результат. Необходимое условие минимума оценочного функционала согласуется с одним из основных условий наилучшей конструктивной реализуемости – оптимальное распределение  $n(z)$  соответствует двухкомпонентному покрытию. Тогда, если для синтеза двухкомпонентных покрытий могут быть использованы различные материалы, то из них надо выбрать те, у которых показатели преломления – минимальный и максимальный среди возможных. Последний вывод имеет глубокое физическое содержание. Достижение требуемых спектральных свойств слоистых сред обеспечивается за счет интерференционных эффектов при наложении волн, отраженных от различных неоднородностей среды. Эти эффекты тем сильнее,

чем больше неоднородность среды, а в данном случае – чем больше скачки показателей преломления соседних слоев. Полученный вывод подтверждается практикой численного решения задач синтеза на ЭВМ.

При численном решении, разумеется, невозможно вычислить  $R(n(z), \lambda)$  во всех точках спектрального диапазона. Таким образом, при численном решении необходимо выбрать большое, но конечное множество длин волн  $\{l_1, l_2, \dots, l_L\}$ . С другой стороны, при численном расчете интеграла всегда используются приближенные формулы, также использующие конечное множество точек интервала интегрирования. Таким образом, естественным образом можно преобразовать выражение (8) к виду

$$F(n(z)) = \sum_{i=1}^L [R(n(z), \lambda_i) - \check{R}(\lambda_i)]^2 u_i. \quad (9)$$

Для нахождения искомой функции  $n(z)$ , соответствующей глобальному (или некоторому локальному) минимуму целевого функционала, можно воспользоваться одним из следующих алгоритмов поиска минимума функции многих переменных: метод наискорейшего спуска, метод сопряженных градиентов, метод Ньютона–Рафсона, квази-ньютоновские методы: метод Давидона–Флетчера, метод Флетчера–Пауэла [4]. Перечисленные методы позволяют находить глубокие минимумы функции (9). В общем случае решением бывает не всегда глобальный минимум.

Согласно работе [5] утверждается, что обратная задача синтеза не является корректной. Задача называется корректной по Адамару, если имеют место:

- **Существование решения.** В задачах синтеза  $\check{R}(\lambda)$  – чаще всего идеализированная желаемая частотная характеристика фильтра, и почти всегда можно сказать, что для нее решения обратной задачи не существует. Спектральные характеристики слоистой среды являются аналитическими функциями волнового числа. А такие функции дифференцируются бесконечное число раз, то есть являются гладкими и не могут иметь разрывов. Более того, они не могут быть постоянными ни на каком участке спектра (иначе аналитические функции вообще не зависят от частоты, а это имеет место лишь для границы раздела двух сред в отсутствии слоистой среды). Чаще всего задаваемые при синтезе идеализированные характеристики имеют перечисленные свойства. Поэтому задача синтеза решается нахождением параметров многослойной структуры с некоторой приближенной частотной характеристикой к заданной. Для этого вводится функционал (8).

- **Единственность решения.** В задачах синтеза наличие множества решений является скорее более лучшим результатом, чем строгого единственного. Из всей совокупности возможных решений можно будет выбрать то, которое больше всего подходит по условиям физической и конструктивной реализуемости.

- **Устойчивость решения относительно малых вариаций входных данных.** С точки зрения синтеза неустойчивость обратной задачи означает, что очень близкие характеристики могут реализовываться с помощью сильно различающихся по своим параметрам и, следовательно, по своим конструктивным свойствам сред.

Устойчивость также необходима при синтезе и должна обеспечиваться за счет правильного включения в постановку задачи дополнительных ограничений на физические параметры, например, толщины слоев и / или общую протяженность структуры [6].

### 3.1. Оптимизация параметров диэлектрического селективного зеркала

Минимизацию функционала качества коэффициента отражения (9) можно проводить рекуррентно, минимизируя функционал от слоя к слою, от последнего к первому [8]. Минимизацию (9) можно также проводить для периодического двухкомпонентного диэлектрического зеркала [8] либо по одному из методов многомерной оптимизации, к примеру, по методу последовательного квадратичного программирования (SQP). В любом случае стараются получить структуру минимальной протяженности, с профилем показателя преломления, тяготеющим к показателю преломления оптически активного вещества, чтобы увеличить кумулятивное влияние оптически активного компонента на возможно большей протяженности конструкции. Задача синтеза сводится к определению геометрических толщин слоев  $d_1, \dots, d_N$ . Если ввести  $N$ -мерное пространство параметров  $x$ , то решение будет определяться вектором толщин

$$(d_1, \dots, d_N).$$

Условие минимизации переписывается в форме

$$(x_1, \dots, x_N) \Big|_{\min} \sum_{i=1}^L [R(x_1, \dots, x_N, \lambda_i) - \check{R}(\lambda_i)]^2 u_i = (d_1, \dots, d_N). \quad (10)$$

Ограничения накладываются, прежде всего, физическими условиями ( $d_i > 0$ ). Также существуют технологические ограничения на толщину каждого слоя или общую толщину покрытия (в нашем случае  $d_i < 3900$  нм).

Условие минимизации функционала (9), используя формулу (6) нахождения коэффициента

отражения, можно переписать в следующей форме:

$$\begin{aligned} & \min \sum_{i=1}^L [R(x_1, \dots, x_N, \lambda_i) - \check{R}(\lambda_i)]^2 u_i = \\ & = \min_{x_N} \sum_{i=1}^L \left[ \frac{Z_{B(N)}(x_1, \dots, x_N, \lambda_i) - \eta_{N+1}}{Z_{B(N)}(x_1, \dots, x_N, \lambda_i) + \eta_{N+1}} - \check{R}(\lambda_i) \right]^2 u_i. \end{aligned} \quad (11)$$

### 3.2. Синтез фрактальных структур

На следующем этапе дается оценка возможностям нетиповых структур, к примеру, фрактальных, и определяются их характеристики. Сравним четвертьволновую пятнадцатислойную классическую структуру с толщиной слоя 0,4 мкм и многослойную структуру на основе одномерного фрактала пыли Кантора с конечной глубиной разбиения. Рекурсивный метод синтеза фрактала заключается в делении отрезка на три части и отбрасывании центрального отрезка, далее эта процедура выполняется для каждого из оставшихся отрезков. Длина наименьшего элемента пыли Кантора из рис. 2 равна  $Y$ .

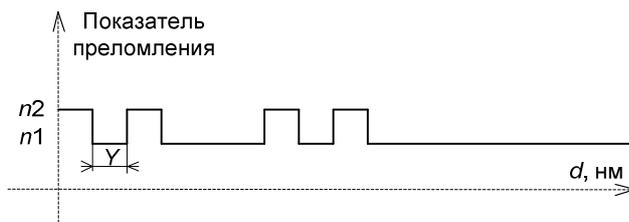


Рис. 2. Фрактал пыли Кантора, изображена часть с глубиной разбиения 2

Многослойная структура синтезируется в строгом соответствии оптических толщин слоев геометрии фрактала, при этом пустоты фрактала соответствуют слоям с показателем преломления  $n_1$ , а отрезки – слоям с показателем преломления  $n_2$ .

Как в случае с четвертьволновым фильтром пусть  $Y$  также равен 0,4 мкм. А глубина биения по Кантору равна 3. Будет синтезирована структура с пятнадцатью слоями. Зависимость коэффициента пропускания от длины волны оптического многослойного зеркала дана на рис. 3.

Визуализация профиля показателя преломления вдоль многослойной структуры (физические толщины) дано на рис. 4.

При одинаковых отношениях показателей преломления 2,3/1,48 структура на основе пыли Кантора не дала лучшего результата по сравнению с четвертьволновым фильтром. По абсолютному значению максимального затухания пропускания, как и следовало ожидать, 15 слоев структуры на основе пыли Кантора дают до

24,6 дБ затухания, 15 слоев четвертьволновой структуры также 24,6 дБ. Оптическая протяженность четвертьволнового фильтра – 3,2 мкм, канторовского – 10,8 мкм. При этом форма частотной характеристики канторовской структуры становится гребенчатой, а ширина центрального максимума затухания пропускания сужается, появляются боковые лепестки.

Определено, что при увеличении глубины разбиения канторовской структуры, боковых лепестков становится больше, ширина центрального максимума затухания уменьшается. Основное преимущество структуры пыли Кантора заключается в доминировании одного из компонентов в структуре диэлектрического селективного зеркала, а также в узкополосности частотной характеристики в интервалах пропускания и отражения. Зависимость коэффициента отражения структуры пыли Кантора с глубиной разбиения 5 от длины волны излучения дано на рис. 5, ему соответствует фильтр с частотной характеристикой, приведенной на рис. 4, з.

### 3.3. Коммутация по длине волны на основе перестраиваемого диэлектрического селективного зеркала

Теперь требуется определить и оценить возможность создания коммутационного элемента на основе перестраиваемого диэлектрического селективного зеркала. Здесь ограничения являются: физическая реализуемость перестраиваемого диэлектрического селективного зеркала, толщины слоев, общая толщина конструкции, определенная исходя из приемлемых потерь при расхождении светового пучка в материале, допуски на изменение показателей преломления.

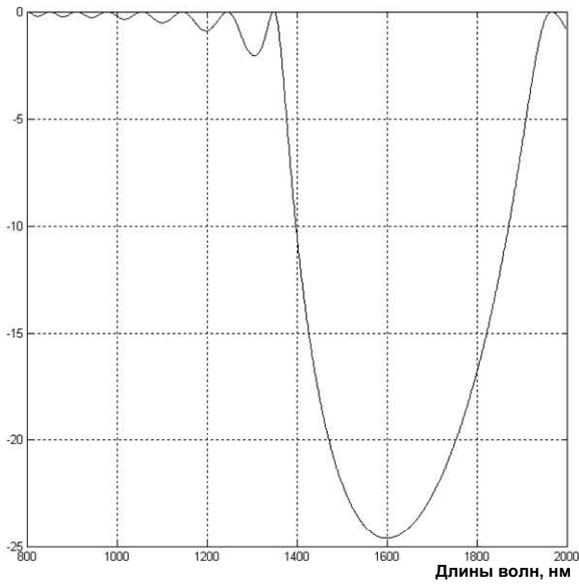
В целях уменьшения затухания поглощения в оптическом компоненте, требуется уделять повышенное внимание элементу, обеспечивающему селекцию длин волн.

Следует принимать во внимание жесткие требования, предъявляемые к селективному элементу, это:

- узкая полоса выделяемого сигнала,
- низкие вносимые искажения в форму сигнала,
- низкое значение поляризационно-модовой дисперсии в элементе,
- низкие переходные шумы.

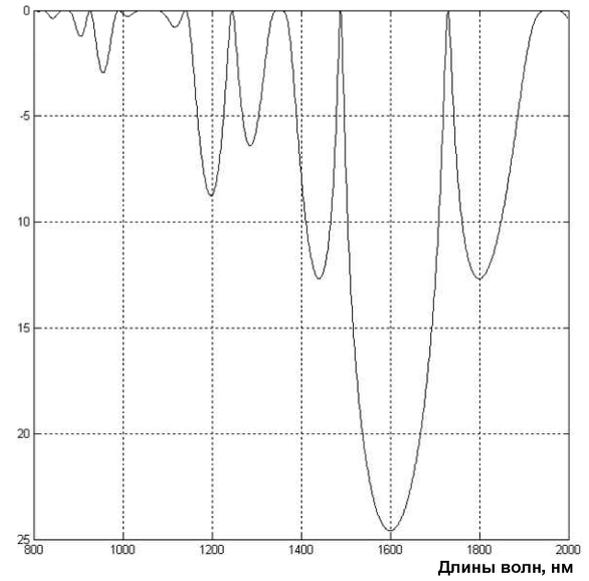
То есть недостаточно иметь оптический коммутатор, необходимо требовать от него узкую полосу частот переключения.

Четвертьволновая структура  
Затухание пропускания, дБ



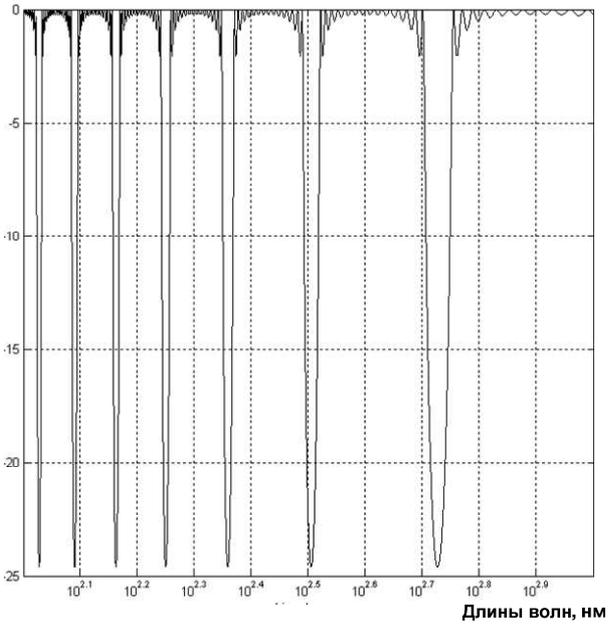
*a*

Структура пыли Кантора  
Затухание пропускания, дБ



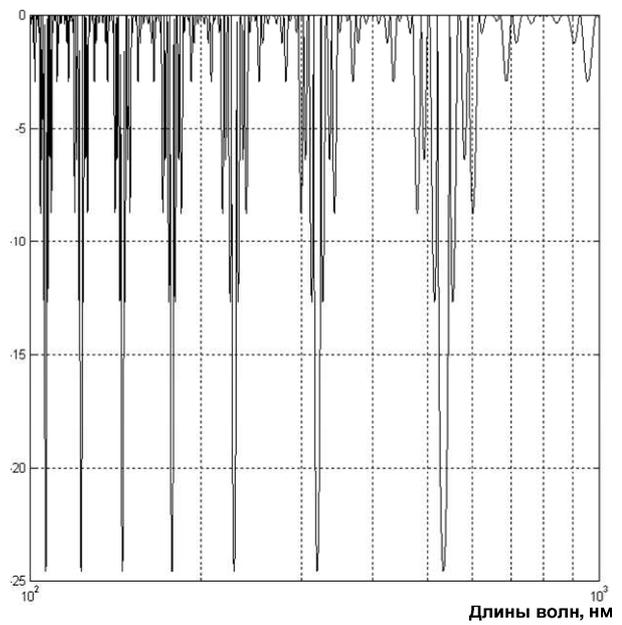
*б*

Четвертьволновая структура с длинами волн в логарифмическом масштабе  
Затухание пропускания, дБ



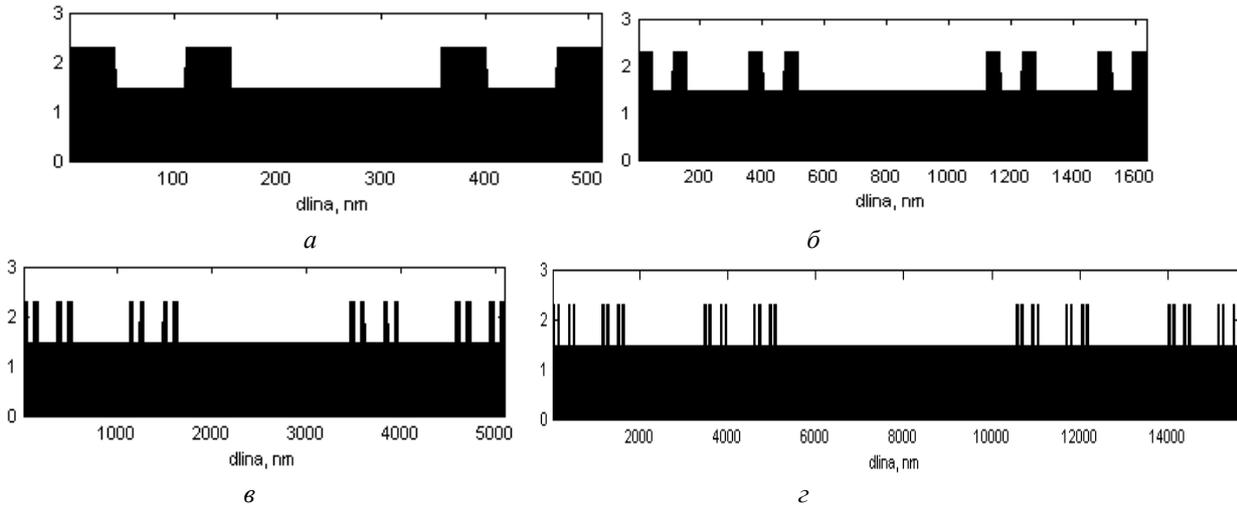
*в*

Структура пыли Кантора с длинами волн в логарифмическом масштабе  
Затухание пропускания, дБ

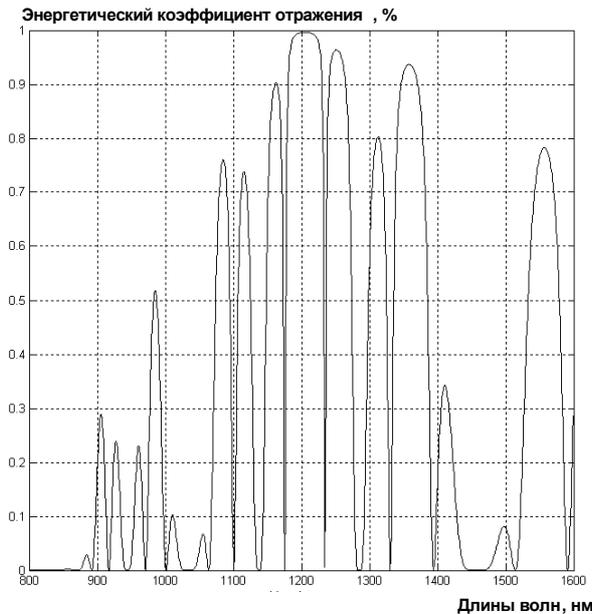


*г*

**Рис. 3.** Зависимость затухания пропускания в: *a, в* – в четвертьволновом фильтре, *б, г* – в многослойной структуре типа пыли Кантора с глубиной биения равной 3, при одинаковой оптической толщине наименьшего слоя 400 нм и 15 слоях



**Рис. 4.** Визуализация профиля показателя преломления в нанометрах для глубины биения пыли Кантора: *a* – 2, *б* – 3, *в* – 4, *г* – 5



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента отражения структуры пыли Кантора с глубиной биения 5 от длины волны излучения

Вне узкой полосы частот переключения коммутационный элемент может иметь широкую полосу пропускания.

Предположим, что в силу внешних воздействий, природу которых мы пока не рассматриваем, один компонент многослойной структуры изменил показатель преломления на  $\Delta n$ . Это означает, что изменилась оптическая длина хода луча в этом компоненте на  $\Delta n \cdot d$ , где  $d$  – физическая, иначе геометрическая толщина компонента. Оптическая толщина компонента стала равна  $(\Delta n + n)d$ . Если этот компонент встречается в структуре  $N$  раз, то меняется  $N$  параметров диэлектрического селективного зеркала. Изме-

нение параметров диэлектрического селективного зеркала вызывает изменение интерференционных соотношений. Для такого диэлектрического селективного зеркала частотная характеристика смещается по оси длин волн, на  $\Delta\lambda$ , которое прямо пропорционально  $\Delta n \cdot d$ .

Итак, изменение показателя преломления компонента многослойной структуры вызывает изменение интерференционных соотношений. Диэлектрическое селективное зеркало перестраивается на другую частотную характеристику коэффициента отражения.

Для того, чтобы  $\Delta\lambda$  был максимален, надо требовать максимальное физически реализуемое значение  $\Delta n$  и (или) максимальное возможное значение  $d$ . Однако, так как оптически активный компонент встречается в структуре  $N$  раз, то выбор максимального  $d$  идет в противоречие с требованием, которое мы выдвигали на этапе оптимизации структуры диэлектрического селективного зеркала, а именно требования минимума протяженности конструкции диэлектрического селективного зеркала. Разумеется, имеет смысл требовать минимальных толщин от остальных оптических компонентов. В данном контексте оптимизация перестраиваемого диэлектрического селективного зеркала находится в компромиссе между требованием снижения протяженности конструкции с одной стороны и доминированием толстых слоев оптически активного вещества над остальными компонентами. Для нахождения этого компромисса потребовалось проведение вычислительного эксперимента с созданной программной имитационной моделью.

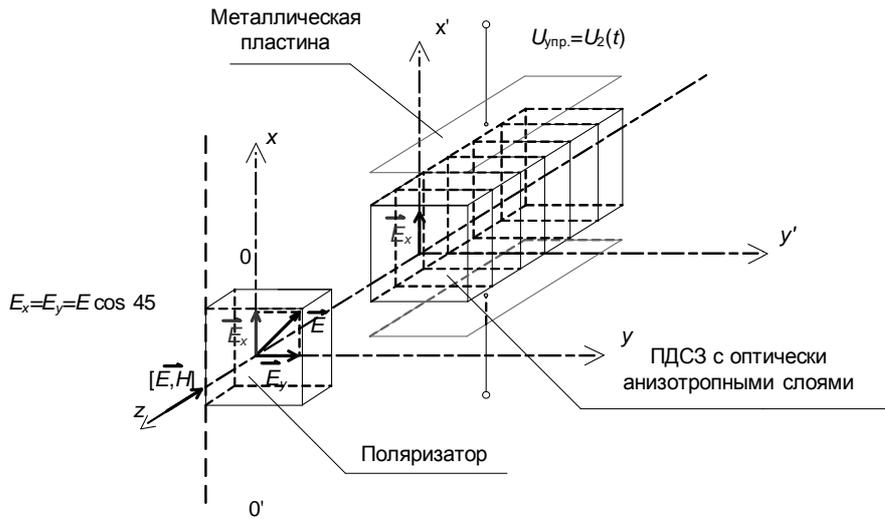


Рис. 6. Коммутационный элемент

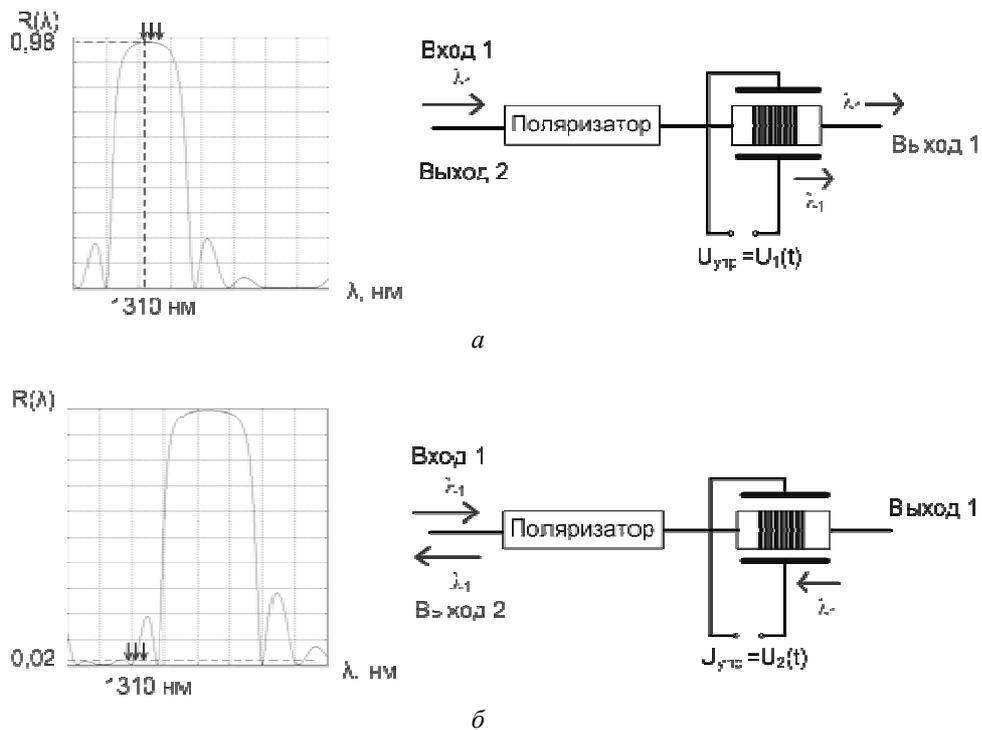


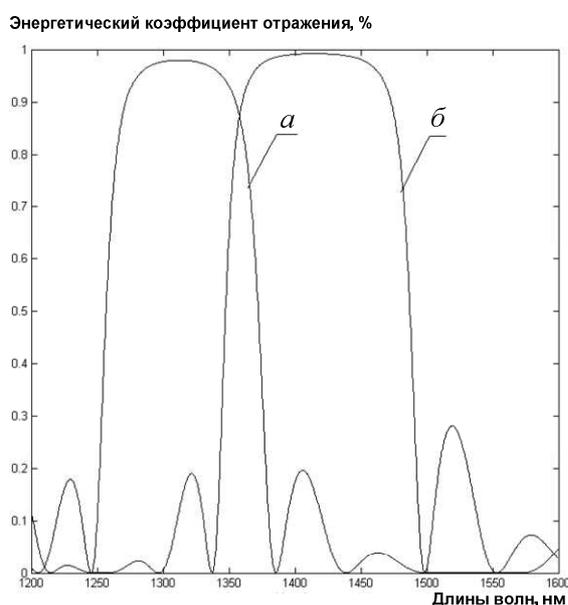
Рис. 7. Схема коммутации при перестройке диэлектрического селективного зеркала:  
 а – до воздействия,  $U_{упр1}$ ; б – при воздействии на ячейку,  $U_{упр2}$

Предлагается коммутационный элемент на основе перестраиваемого диэлектрического селективного зеркала (ПДСЗ). Схема коммутационного элемента приводится на рис. 6. Один из компонентов перестраиваемого диэлектрического селективного зеркала, наиболее протяженный, выполняется из оптически активного материала, способного под действием управляющего напряжения  $U_{упр}$  изменять показатель

преломления, а следовательно, оптическую толщину компонента и тем самым осуществлять частотный сдвиг коэффициента отражения.

Смещение в частотной характеристике диэлектрического селективного зеркала в представленной схеме включения интерпретируется как коммутация, рис. 7.

Иллюстрация принципа коммутации при изменении показателя преломления дана на рис. 8.



**Рис. 8.** Изменение зависимости коэффициента отражения 11-слойной структуры: *а* – до воздействия, *б* – при воздействии на структуру от длины волны излучения

Показана зависимость коэффициента отражения 11-слойной структуры:

а) с вектором значений оптических толщин слоев (2302, 321, 2302, 321, 2302, 321, 2302, 321, 2302) нм и вектором значений показателей преломления (2.3, 1.48, 2.3, 1.48, 2.3, 1.48, 2.3, 1.48, 2.3, 1.48, 2.3) до воздействия;

б) с вектором значений оптических толщин слоев (2502, 321, 2502, 321, 2502, 321, 2502, 321, 2502) нм и вектором значений показателей преломления (2.5, 1.48, 2.5, 1.48, 2.5, 1.48, 2.5, 1.48, 2.5, 1.48, 2.5) при воздействии на структуру от длины волны излучения.

Важно отметить, что физические (геометрические) толщины в представленной модели коммутации не изменяются.

### 3.4. Конструктор диэлектрических селективных зеркал

Для проведения вычислительного эксперимента была создана программа – конструктор диэлектрических селективных зеркал. Программа предназначена для автоматического моделирования и конструирования оптического многослойного селективного зеркала и может применяться для подбора наиболее эффективных его параметров.

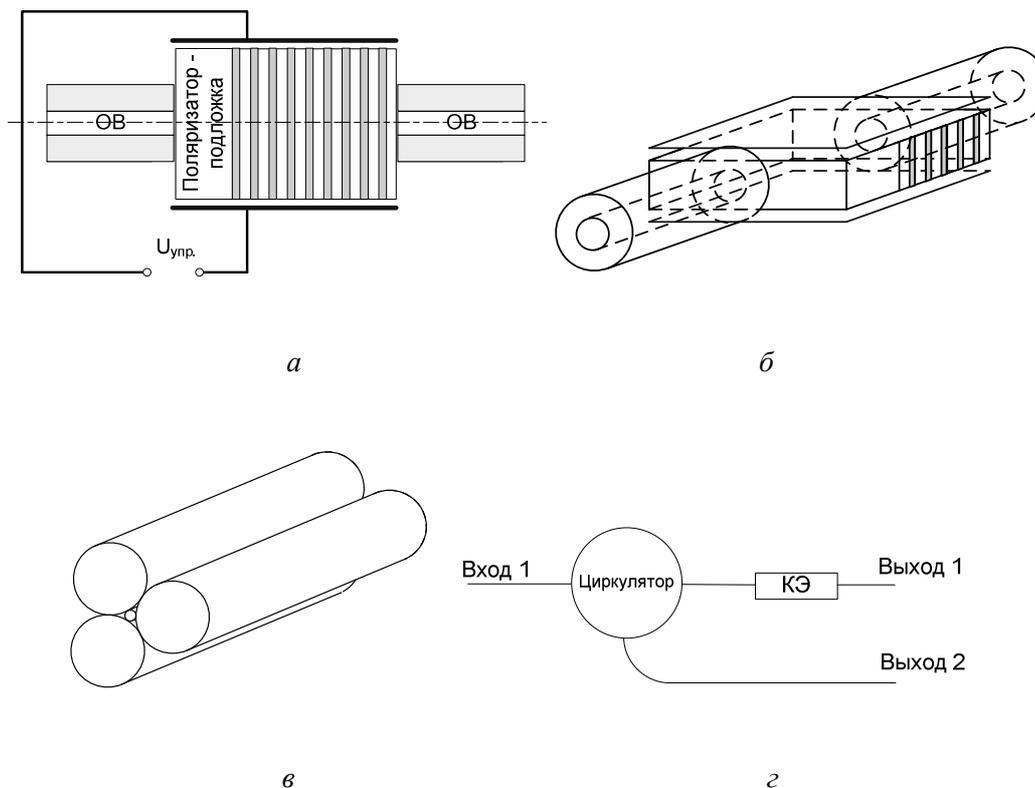
Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- синтез диэлектрического селективного зеркала по методу последовательного квадратичного программирования (SQP),
- синтез диэлектрического селективного зеркала по методу рекуррентной одномерной оптимизации многослойной структуры, по методу одномерной оптимизации периодической двухкомпонентной структуры;
  - моделирование селективного зеркала:
    - с заданными параметрами;
    - с задаваемыми частотными характеристиками;
  - подбор наиболее эффективных параметров зеркала;
  - имитация перестраиваемых режимов работы диэлектрического селективного зеркала;
  - оценка максимально достижимого коэффициента отражения для заданного числа слоев;
  - конструирование и расчет частотных характеристик структуры с двусторонней гауссовой огибающей профиля показателя преломления;
  - синтез фрактальных структур вида пыль Кантора и расчет частотных характеристик такого диэлектрического селективного зеркала;
  - конструирование и расчет частотных характеристик периодической многослойной структуры, в том числе четвертьволновой.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617929, 02.12.2010.

### 3.5. Конструктивное исполнение переключателя

В результате моделирования были достигнуты продольные размеры многослойной структуры в 7 мкм, для сравнения поперечные размеры оптического одномодового волокна 10 мкм. Геометрические размеры диэлектрического селективного зеркала позволяют осуществлять выращивание слоев зеркала непосредственно на одном скеле волокна. Далее должна следовать прецизионная стыковка с сердцевинной второго волокна; размещение конструкции в иммерсионной жидкости с низким показателем преломления, которая будет выполнять функции аналогичные функциям оболочки обычного оптического волокна. Далее следует герметизация, нанесение эпоксидного клея и усиление конструкции тремя стальными прутками. Эскизно это показано на рис. 9.



**Рис. 9.** Конструктивное исполнение переключателя: *а* – переключатель, *б* – прецизионная стыковка волокон, *в* – усиление стальными прутками, *г* – переключатель и вспомогательный циркулятор

Для успешного решения задачи ввода оптической мощности в световедущую часть оптического волокна с минимальными потерями предлагается использовать несколько способов коллимации оптического излучения [7]. Это способ слабого искривления поверхности раздела слоев и способ реализации конструкции переключателя в теле волокна. Коллимация оптического излучения позволит уменьшить вносимое затухание.

Вносимое структурой затухание в основном определяется уменьшением вновь вводимой мощности излучения в торец оптического волокна за счет расходимости светового пучка. Затухание для представленной многослойной структуры протяженностью в 7 мкм без дополнительных средств коллимации оценено. Оно составляет 1,21 дБ в проходящий сигнал в длинах волн полного пропускания и 1,81 дБ в отраженный в длинах волн отражения.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработан конструктор оптических селективных диэлектрических зеркал. Средство раз-

работчика является модульным конструкторским программным продуктом в среде Matlab с открытой архитектурой.

Предложен способ оптической коммутации, основанный на использовании многослойных интерференционных структур. Также показана возможность создания оптического переключателя, имеющего время срабатывания соизмеримое со временем релаксации вещества, функционирующего на основе электрооптического эффекта с применением перестраиваемого диэлектрического селективного зеркала. Элемент, реализующий способ оптической коммутации, миниатюрен, может быть выполнен в структуре волокна и использоваться в волоконно-оптических линиях связи.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тихонравов А. В. О методе синтеза оптических покрытий, использующем необходимые условия оптимальности // Вестник МГУ. Сер. «Физика-астрономия». 1982. 23, № 6. С. 91–93.
2. Фурман Ш. А. Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение, 1977.

3. **Тихонравов А. В.** Синтез слоистых сред. М.: Знание. Физико-математическая серия. 1987. № 5. С. 47.

4. **Furman Sh., Tikhonravov A. V.** Basics of optics of multilayer systems, Editions Frontiers. Gif-sur Yvette, 1992. 242 p.

5. **Бреховских Л. М.** Волны в слоистых средах. М: Наука, 1973. 342 с.

6. Stress reduction of Mo/Si multilayer structures / S. S. Andreev [et al.] // NIMA. 2001. V. 470, Nos. 1+2. P. 162–167.

7. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1970. 720 с.

8. Рекуррентные методы минимизации оптических многослойных структур для волоконно-оптических средств связи / А. Х. Султанов [и др.] // Вестник УГАТУ : науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Т. 13, №1 (34). С. 193–199.

9. Синтез оптических отражательных фильтров на основе тонкопленочных структур / А. Х. Султанов [и др.] // Вестник УГАТУ : науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Т.13, №1 (34). С. 206–213.

## ОБ АВТОРАХ

**Султанов Альберт Ханович**, проф., зав. каф. телекоммуникац. систем. Дипл. инженер по многоканальн. электросвязи (Новосибирск. электро-техн. ин-т связи, 1973). Д-р техн. наук по управлению в техническ. системах (УГАТУ, 1996). Иссл. в обл. телекоммуникац. систем, оптоэлектрич. аэрокосмическ. систем.

**Багманов Валерий Хусаинович**, проф. той же каф. Дипл. физик (МГУ, 1975). Д-р техн. наук по системному анализу, управлению и обработке информации (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. математическ. моделирования и обработки сигналов.

**Костров Сергей Владимирович**, асп. той же каф. Дипл. инженер по многоканальным телекоммуникац. системам (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. волоконно-оптической связи.