

УДК 681.7:621.39

А. Х. СУЛТАНОВ, В. Х. БАГМАНОВ, С. В. КОСТРОВ, Р. В. КУТЛУЯРОВ

РЕКУРРЕНТНЫЕ МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СВЯЗИ

В данной статье представлено решение задачи синтеза оптического многослойного селективного зеркала (ОМССЗ) для нужд интегральной оптики. *Оптический фильтр; слоистые среды; тонкопленочные структуры; оптические системы*

В рамках технологии мультиплексирования по длинам волн (WDM) существует задача выделения из агрегатного информационного потока одной или нескольких частотных составляющих с целью демультиплексирования оптических сигналов этих длин волн с дальнейшим вводом в магистраль нового сигнала с длиной волны выделенного (рис. 1). При этом необходимым требованием является внесение минимальных искажений в магистральный агрегированный поток на остальных длинах волн. Только при таком условии задача имеет прикладной практический смысл.

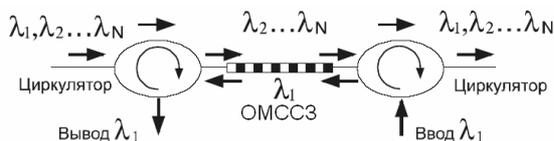


Рис. 1. Селекция сигнала длины волны λ_1 в сторону локального мультиплексора и агрегация нового сигнала λ_1 в магистральный поток

Успешное решение такой задачи позволяет организовать:

- промежуточные малые узлы без демультиплексирования по всем длинам волн в потоке;
- на пересечении нескольких магистралей WDM позволяет строить сеть WDM с узлами без преобразующего оптоэлектронного оборудования WDM.

Решением обозначенной задачи является использование пассивного оптического элемента, такого, как оптическое многослойное селективное зеркало (ОМССЗ). ОМССЗ представляет собой многослойную структуру с парамет-

рами, выбранными согласно разработанным и представленным далее методикам. ОМССЗ не является четвертьволновым фильтром.

1. СЛОИСТЫЕ СРЕДЫ

Исследование слоистых сред может проводиться в рамках двух возможных направлений постановки задачи. Это прямая и обратная задачи [1], возникающие в практических приложениях при моделировании прохождения света через многослойные структуры.

Прямая задача. Моделирование оптических свойств: коэффициентов прохождения и отражения оптических систем по заданным параметрам световой волны и материалов.

Обратная задача. Определение оптических параметров оптических систем по заданным данным частотных зависимостей интенсивности отраженного или пропущенного света.

Для решения задачи синтеза ОМССЗ в качестве основных элементов математических моделей используются волновая теория света, уравнения Максвелла, свойства диэлектрического тензора материала. Основными оптическими параметрами материалов, используемыми как в прямой, так и в обратной задаче, являются тензор диэлектрической проницаемости и толщина материала.

В качестве основных выходных оптических свойств в прямой задаче моделирования используются пропускание и отражение (интенсивности). Эти же характеристики обычно выступают в качестве входных параметров в обратной задаче. Дополнительными выходными (рассчитываемыми на основе пропускания и отражения) параметрами в прямой задаче могут также служить вектора Стокса прошедшего и отраженного света, степень поляризации, фазовые задержки, контраст, эффективность, раз-

личные цветовые координаты, цветопередача и другое.

Заметим, что при расчете параметров материала по измеренным данным (обратная задача) проводится многократное решение прямой задачи с целью подбора неизвестных значений профилей показателя преломления в многослойной структуре. Таким образом, эффективное решение прямой задачи играет ключевую роль.

При расчете параметров тонких пленок с заданными материалами, т.е. значениями показателя преломления, их толщина, как правило, известна приближенно. Однако незначительное изменение в толщине (2–10 нм) может привести к значительному изменению интерференционной картины для отражения и пропускания. В связи с этим толщина является весьма важным дополнительным неизвестным параметром в обратной задаче.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА СЛОИСТЫХ СРЕД

Расчет прошедшей и отраженной волн (рис. 2) можно осуществить суммированием прошедшей и отраженной волн с учетом набега фаз.

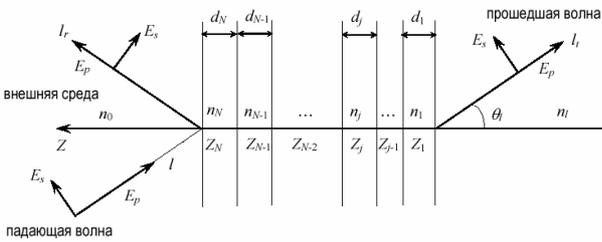


Рис. 2. Многослойная структура

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.

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

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 напряженности электрического поля и магнитного 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 \$\epsilon\$ – диэлектрическая проницаемость среды и \$\mu\$ – ее магнитная проницаемость, то характерный импеданс среды:

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

Если обозначить характерное волновое сопротивление вакуума \$\eta_0\$, для немагнитной диэлектрической среды с показателем преломления \$n\$, характерный 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:

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

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 η , 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

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

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА ОМСФ 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 недостижимо. 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, квазиньютоновские 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.

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

1. 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. Из результатов теории дифференциальных уравнений

следует, что спектральные характеристики слоистой среды являются аналитическими функциями волнового числа. А такие функции дифференцируемые 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 отсутствие 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).

2. 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.

3. 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].

4.1. Метод рекуррентной минимизации ОМССЗ

Минимизацию (9) можно проводить рекуррентно, минимизируя функционал от слоя к слою, от последнего к первому. В такой постановке 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

$$[d_1, \dots, d_N].$$

То есть число слоев покрытия равно N плюс два полупространства по бокам многослойной структуры, показатели преломления каждого слоя известны и равны максимально различным.

Условие минимизации переписывается в форме

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

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:

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

Суть метода рекуррентной минимизации заключается в следующем: если найти такое значение x_N для последнего слоя, при котором значение функционала будет минимальным, а затем, используя его, перейти к следующему слою, то, проводя последовательно такие операции, получим $x = [d_1, \dots, d_N]$. Очевидно, что такой вектор решений будет минимумом функционала $F(x)$. Математически это запишется следующим образом:

$$\begin{aligned} (d_1, \dots, d_N) = \\ \left\{ \begin{aligned} d_N &= \arg \min_{x_N} \sum_{i=1}^L \left[\frac{Z_{B(N)}(d_1, \dots, d_{N-1}, x_N, \lambda_i) - \eta_0}{Z_{B(N)}(d_1, \dots, d_{N-1}, x_N, \lambda_i) + \eta_0} - \tilde{R}(\lambda_i) \right]^2 u_i, \\ d_{N-1} &= \arg \min_{x_{N-1}} \sum_{i=1}^L \left[\frac{Z_{B(N-1)}(d_1, \dots, d_{N-2}, x_{N-1}, \lambda_i) - \eta_N}{Z_{B(N-1)}(d_1, \dots, d_{N-2}, x_{N-1}, \lambda_i) + \eta_N} - \tilde{R}(\lambda_i) \right]^2 u_i, \\ d_{N-2} &= \arg \min_{x_{N-2}} \sum_{i=1}^L \left[\frac{Z_{B(N-2)}(d_1, \dots, d_{N-3}, x_{N-2}, \lambda_i) - \eta_{N-1}}{Z_{B(N-2)}(d_1, \dots, d_{N-3}, x_{N-2}, \lambda_i) + \eta_{N-1}} - \tilde{R}(\lambda_i) \right]^2 u_i, \\ &\dots \dots \dots \\ d_2 &= \arg \min_{x_2} \sum_{i=1}^L \left[\frac{Z_{B(2)}(d_1, x_2, \lambda_i) - \eta_3}{Z_{B(2)}(d_1, x_2, \lambda_i) + \eta_3} - \tilde{R}(\lambda_i) \right]^2 u_i, \\ d_1 &= \arg \min_{x_1} \sum_{i=1}^L \left[\frac{Z_{B(1)}(x_1, \lambda_i) - \eta_2}{Z_{B(1)}(x_1, \lambda_i) + \eta_2} - \tilde{R}(\lambda_i) \right]^2 u_i, \end{aligned} \right. \quad (12) \end{aligned}$$

где η – волновое сопротивление среды, N – количество слоев многослойной структуры между двумя полупространствами (индекс последнего полупространства – l , первого – 0) (рис. 1), u_i – весовая функция, Z_B – импеданс среды, считается по рекуррентной формуле (5).

В результате рекуррентной минимизации достигается глубокий локальный минимум функционала, этого вполне достаточно для реализации широкополосных фильтров. Подчерк-

нем, реализация этого алгоритма с помощью ЭВМ решает поставленную задачу синтеза оптического многослойного фильтра, оставаясь в рамках условия оптимума его структуры.

Осталось определить, с какой точностью должно осуществляться приближение функции $R(x)$ к $\check{R}(x)$. Критерием будет величина ξ . Такая, что:

$$\max_{\lambda \in [1, L]} [R(x_1, \dots, x_N, \lambda_i) - \check{R}(\lambda_i)]^2 u_i \leq \xi. \quad (13)$$

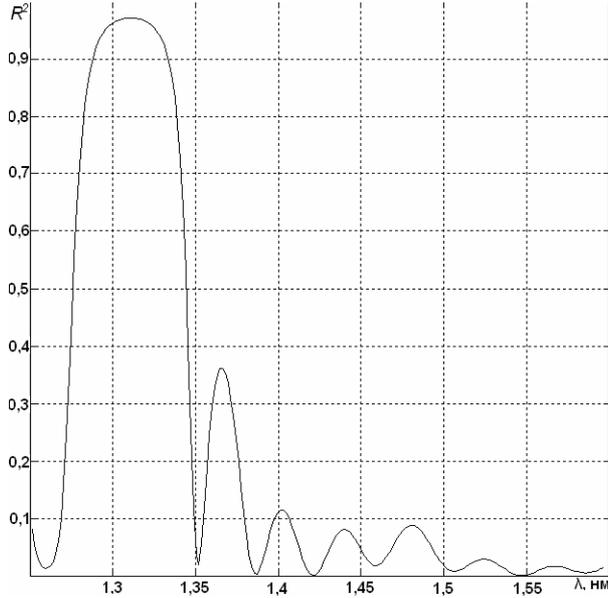


Рис. 3. Зависимость энергетического коэффициента отражения ОМСФ от длины волны оптического излучения

Предложенный алгоритм дает хорошие результаты. На рис. 3 представлен график энергетического коэффициента отражения одиннадцатислойного фильтра, рассчитанного методом рекуррентной минимизации. Структура ОМСФ состоит из чередования высокого (2,3) и низкого (1,48) значения показателя преломления. Оптические толщины слоев подсчитаны программой с использованием MATLAB и равны: 2302 нм, 2965 нм, 2302 нм, 2302 нм, 1556 нм, 2355 нм, 1556 нм, 2355 нм, 1556 нм, 3105 нм и 1556 нм. Полная оптическая длина многослойного компонента 23910 нм, а физическая – 13548 нм. Для такого ОМСФ величина $\xi = 0,03$. Многослойная структура заключена в два полупространства с показателем преломления 1,48. По длине волны 1550 нм вносимое затухание 15,37дБ (отражается 97,1% интенсивности), по дине волны 1310 нм – 0,007 дБ (отражается 0,15% интенсивности).

4.2. Метод синтеза фильтров периодической структуры с разными оптическими толщинами

Лучшие результаты дает минимизация функционала качества коэффициента отражения периодического двухкомпонентного ОМСФ. Рассмотрим многослойный оптический фильтр, состоящий из N чередующихся неравных по толщине слоев. В силу того, что используется только два типовых слоя с заранее заданными показателями преломления и числом слоев, то переменных в выражении (11) останется только две. Условие минимизации запишется в виде:

$$(x_1, x_2) \Big|_{\min \sum_{i=1}^L [R(x_1, x_2, \lambda_i) - \check{R}(\lambda_i)]^2 u_i} = (d_1, d_2). \quad (14)$$

Минимизация одного слоя, как если бы фильтр был однослойный, позволяет исключить одну переменную из выражения (14).

$$d_1 = \arg \min_{x_1} \sum_{i=1}^L \left[\frac{Z_{B(1)}(x_1, \lambda_i) - \eta_2}{Z_{B(1)}(x_1, \lambda_i) + \eta_2} - \check{R}(\lambda_i) \right]^2 u_i. \quad (15)$$

Затем для большей точности метода будем минимизировать функционал не для предпоследнего слоя, а общий функционал для N слоев. Сделать это весьма легко, так как теперь функционал – это функция одной переменной $F(d_1, x_2)$. Для функции одной переменной легко найти глобальный минимум.

$$d_2 = \arg \min_{x_2} \sum_{i=1}^L \left[\frac{Z_{B(N)}(d_1, x_2, \lambda_i) - \eta_0}{Z_{B(N)}(d_1, x_2, \lambda_i) + \eta_0} - \check{R}(\lambda_i) \right]^2 u_i. \quad (16)$$

Общее условие запишется в виде:

$$(x_1, \dots, x_N) = (d_1, d_2, d_1, d_2, \dots, d_1, d_2) = \begin{cases} d_2 = \arg \min_{x_2} \sum_{i=1}^L \left[\frac{Z_{B(N)}(d_1, x_2, \lambda_i) - \eta_0}{Z_{B(N)}(d_1, x_2, \lambda_i) + \eta_0} - \check{R}(\lambda_i) \right]^2 u_i, \\ d_1 = \arg \min_{x_1} \sum_{i=1}^L \left[\frac{Z_{B(1)}(x_1, \lambda_i) - \eta_2}{Z_{B(1)}(x_1, \lambda_i) + \eta_2} - \check{R}(\lambda_i) \right]^2 u_i, \end{cases} \quad (17)$$

где $Z_{B(j)}$ – сложная функция. Считается по рекуррентной формуле:

$$Z_{B(j)}(y_1, \dots, y_{j-1}, y_j, \lambda_j) = \frac{Z_{B(j-1)}(y_1, \dots, y_{j-1}, \lambda_j) - i \eta_j \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_j y_j\right)}{\eta_j - i Z_{B(j-1)}(y_1, \dots, y_{j-1}, \lambda_j) \operatorname{tg}\left(\frac{2\pi}{\lambda} n_j y_j\right)} \eta_j, \quad (18)$$

где η_j – волновое сопротивление текущей среды, $y_1, y_2, y_3, \dots, y_{N-1}, y_N$ – соответственно равны чередованию толщин слоев d_1, x_1, d_1, \dots, N – количество слоев многослойной структуры между двумя полупространствами (индекс последнего полупространства – 0, первого – $N+1$), $Z_{B(j)}$ – импеданс текущей среды, $Z_{B(j-1)}$ – импеданс предыдущей среды, для последней среды-полупространства $Z_{B(L)} = \eta_L$, n_j – показатель преломления текущей среды, λ – длина волны излучения проходящего сквозь многослойную структуру, x_j – аргумент функции $Z_{B(j)}$ – толщина текущего слоя j .

На рис. 4 представлен фильтр, состоящий из 11 слоев высокого (2,3) и низкого (1,48) значения показателя преломления. Оптические толщины слоев подсчитаны программой с использованием MatLab и равны 2307 нм и 321 нм соответственно. Полная оптическая длина многослойной структуры 15447 нм. Физическая – 7103 нм. Многослойная структура заключена в два полупространства с показателем преломления 1,48. Функция энергетического показателя преломления на интервалах длин волн отражения и пропускания меняется слабо и имеет гладкий максимум и минимум. В интервале длин волн пропускания [1520, 1580] нм значение энергетического коэффициента отражения не превышает 0,002%, в интервале длин волн отражения [1300, 1320] нм значение энергетического коэффициента отражения достигает 98%. Это означает, что пропускание света длин волн [1520, 1580] нм будет наблюдаться с ослаблением в 0,009 дБ, а длин волн [1300, 1320] нм с ослаблением в 16,99 дБ.

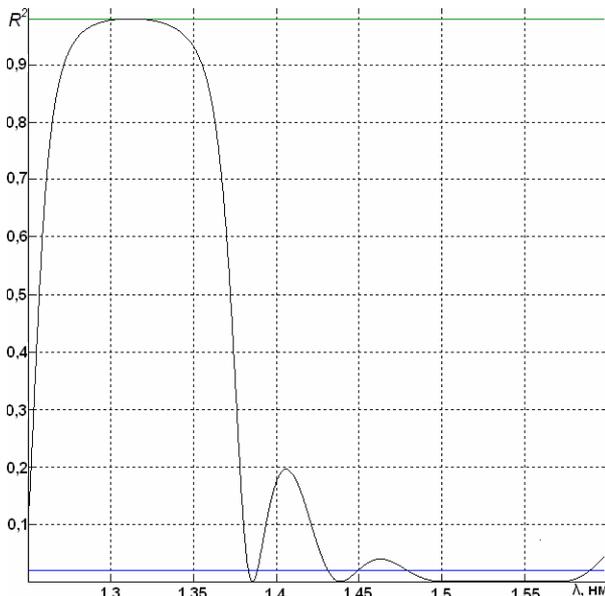


Рис. 4. Зависимость энергетического коэффициента отражения ОМССФ от длины волны оптического излучения

5. ПРЕИМУЩЕСТВА МЕТОДИК

Результаты представленных двух методик синтеза структуры ОМССЗ с одинаковой частотной маской в областях максимума отражения, $R > 0,97\%$ в длинах волн [1300, 1310] нм и пропускания $R < 0,045\%$ в длинах волн [1540, 1560] нм составляют протяженности конструкции, по первой методике – 13548 нм и по второй – 7103 нм.

Для сравнения, классические четвертьволновые фильтры имеют частотные характеристики с такой же маской максимума только при небольшой относительной разности показателей преломления слоев и большем числе слоев. При оптической толщине одного слоя в четверть длины волны отражения 1310/4 нм, показателях преломления 1,60 и 1,48, физическая длина конструкции 110-слойного фильтра 23428 нм [7].

Четвертьволновый фильтр сильно уступает рассчитанным в этой статье фильтрам по общему числу слоев и протяженности конструкции, а значит, по простоте реализации и вносимым затуханиям в оптический сигнал.

6. ПРИМЕНИМОСТЬ ОМССЗ

Во-первых, оптический многослойный фильтр, число слоев которого (одиннадцать), при прочих равных частотных характеристиках, на порядок–два меньше числа слоев четвертьволнового фильтра. Конструкция фильтра короче, а вносимое затухание меньше, составляет в 1,2 дБ в прошедший сигнал на длине волны 1550 нм и 1,8 дБ в отраженный на длине волны 1310 нм (комплексные расчеты не являются материалом этой статьи).

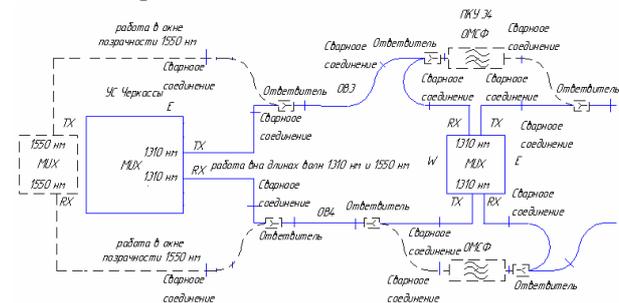


Рис 5. Схема включения ОМССЗ

Во-вторых, в результате реализации структуры, представленной на рис. 5, предлагается схема включения ОМССЗ. Длины волн 1,55 мкм будут беспрепятственно проходить сквозь ОМССЗ. Интервал длин волн с центральной в 1,31 мкм пассивно демультиплексируются на станционное оборудование и с по-

следнего мультиплексироваться по длинам волн в общий агрегатный поток.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Итак, можно говорить о хороших результатах применения представленных методов расчета многослойных оптических структур. Лучших, чем используемые при синтезе четверть-волновых фильтров. ОМССЗ, реализованный по предложенным методикам, может использоваться на волоконно-оптических линиях связи в качестве пассивного оптического компонента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тихонравов А. В.** О методе синтеза оптических покрытий, использующем необходимые условия оптимальности // Вестник МГУ (серия «Физика-строномия»). 1982. № 6. С. 91–93.
2. **Фурман Ш. А.** Тонкослойные оптические покрытия. Л.: Машиностроение, 1977.
3. **Тихонравов А. В.** Синтез слоистых сред. М.: Физ.-мат, 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 [и др.] // NIMA. 2001. V. 470, Nos. 1+2, P. 162–167.
7. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1970. 720 с.

ОБ АВТОРАХ



Султанов Альберт Ханович проф., зав. кафедрой телекоммуникац. систем. Дипл. инженер по многоканальн. электросвязи (Новосибирск. электротехн. ин-т связи, 1973). Д-р техн. наук (УГАТУ, 1996). Иссл. в обл. телекоммуникац. систем, оптоэлектронных аэрокосмических систем.



Багманов Валерий Хусаинович, проф. каф. телеком. систем. Дипл. физик (МГУ, 1975). Д-р техн. наук по сист. анализу, упр-ю и обр. информ. (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. мат. моделирования и обраб. сигналов.



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



Кутлюяров Руслан Владимирович, асп. той же каф. Дипл. инженер по многоканальн. телеком. системам (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. волоконно-оптической связи.