

УДК 681.7.068

## ОПТИЧЕСКИЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ НА ОСНОВЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО МНОГОСЛОЙНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЕЛЕКТИВНОГО ЗЕРКАЛА

А. Х. Султанов<sup>1</sup>, В. Х. Багманов<sup>2</sup>, С. В. Костров<sup>3</sup>

<sup>1,2</sup>tk@ugatu.ac.ru, <sup>2</sup>sergey.kostrov@rambler.ru

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)  
<sup>2</sup>ООО «ДСА»

Поступила в редакцию 22.12.2013

**Аннотация.** Представлено решение задачи синтеза многослойного диэлектрического селективного зеркала для ROADM.

**Ключевые слова:** оптический многослойный фильтр; слоистые среды; тонкопленочные структуры; многослойное диэлектрическое селективное зеркало (МДСЗ); перестраиваемое многослойное диэлектрическое селективное зеркало (ПМДСЗ); оптический многослойный фильтр (ОМСФ); оптический переключатель.

### ВВЕДЕНИЕ

Средства связи находятся в эволюционном развитии в сторону увеличения пропускной способности каналов связи. В настоящее время ведущие операторы связи внедряют технические новинки, призванные осуществить переход к полностью оптическим сетям (AllOpticalNetworks, AON). Как известно, основными достоинствами полностью оптических сетей связи являются их высокая пропускная способность и высокая защищенность при передаче данных. Основная парадигма полностью оптических сетей – это прозрачность компонентов сети. Это означает, что оптический сигнал передается от одного пограничного устройства сети до другого без промежуточных преобразований в электрическую форму. Поэтому полностью оптическую сеть нельзя построить без коммутации на оптическом уровне. Основным элементом полностью оптической сети является реконфигурируемый оптический мультиплексор ввода-вывода (Reconfigurable optical add-drop multiplexer, ROADM). Это устройство воплощает в себе две основные технологии полностью оптических сетей: спектральное уплотнение (WDM) и коммутацию спектральных каналов (WSS) [1].

К числу устройств, обеспечивающих функцию спектрального уплотнения в реконфигурируемых оптических мультиплексорах ввода-вывода, относятся: интегральные фазовые решетки AWG (Arrayed Waveguide Gratings), интерферометры Маха–Цандера, брэгговские ре-

шетки, тонкопленочные фильтры и т. д. Это устройства с фиксированными характеристиками.

К числу устройств, обеспечивающих функцию коммутации спектральных каналов в ROADM, относятся оптические переключатели: на основе микроэлектромеханических систем (MEMS), на основе полупроводниковых оптических усилителей (SOA), интегральные активно-волноводные, на жидкокристаллических матрицах, на интегральных схемах с набором матриц оптоэлектронных вентилях. Наиболее быстродействующими среди них являются переключатели с использованием электрооптических эффектов. В перечисленных оптических переключателях не используется оптоэлектронное преобразование сигнала. Посредством оптоэлектронного преобразования сигнала в ROADM осуществляется частотный перенос каналов.

На данный момент актуальным является задача интеграции технологий WDM и WSS в одном элементе с целью упрощения функциональной схемы, увеличения надежности за счет сокращения числа функциональных элементов, удешевления, снижения вносимого затухания и искажений.

Реконфигурируемый элемент, сочетающий в себе одновременно высокую частотную селективность и возможность переключения, в перспективе открывает дорогу к динамическому реконфигурируемому оптическому мультиплексору ввода-вывода. Узкополосный частотно-селективный переключатель позволит отказаться от использования блока блокиратора спек-

тральных каналов (WB) одной из основных технологий в ROADM, представленных сейчас на рынке.

В направлении интеграции технологий WDM и WSS в одном элементе уже ведется научно-исследовательская и инженерно-конструкторская деятельность, достигнуты значительные успехи благодаря применению MEMS в сочетании с устройствами WDM. Интеграция большей степени достигается благодаря включению нелинейных компонентов, с возможностью обратимого изменения какого-либо параметра, непосредственно в структуру устройства спектрального уплотнения. Одним из технологически выгодных устройств спектрального уплотнения, с готовыми планарными решениями является тонкопленочный фильтр. Основное его преимущество – это компактность продольных размеров и низкое вносимое затухание.

Характеристики реконфигурируемого частотно-селективного переключателя определяются требованиями к нему со стороны ROADM. В общем они должны быть не хуже характеристик ROADM. Частотно-селективный переключатель должен иметь: максимальные вносимые потери переключения на любой порт 5 дБ, коэффициент направленности – 40 дБ, возвратные потери – 35 дБ, стыковка с одномодовым волокном коннектором (например, SC/APC), переключение в полосе частот одного оптического канала согласно частотному плану ITU-T, т.е. с шириной спектра от 0,78 до 7,88 нм. Требуется осуществлять переключение на скоростях сетей высоких уровней (STM-64, STM-256, 1 Gb, 10 Gb и выше), длительность информационных импульсов в которых менее 100 пс. Оптический переключатель требует электронной системы управления, подачи мощности, а переключение должно осуществляться без оптоэлектронного преобразования.

Таким образом, разработка высокоскоростного узкополосного полностью оптического переключателя, время переключения которого на порядок ниже длительности передаваемых битов, является актуальной научно-технической задачей [2].

#### 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 пе-

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

Предположим, что в силу внешних воздействий, природу которых мы пока не трогаем, все слои многослойной структуры изменили показатель преломления на величину  $\Delta n_j$ . Это означает, что изменилась оптическая длина хода луча в каждом слое на  $\Delta n_j \cdot d_j$ , где  $d_j$  – физическая толщина  $j$ -слоя. Оптическая толщина  $j$ -слоя стала равной  $(\Delta n_j + n_j) d_j$ , т.е. приращение оптической толщины  $j$ -слоя составило

$$\Delta d_{j\text{опт}} = \Delta n_j \cdot d_j. \quad (1)$$

Пропорциональное изменение всех толщин слоев МДСЗ вызывает смещение частотной характеристики МДСЗ по оси длин волн на  $\Delta \lambda$ , равное:

$$\Delta \lambda = \Delta n_j / n_j \cdot \lambda. \quad (2)$$

Предположим, что только один компонент многослойной структуры, состоящей из слоев с показателями преломления  $n_L, n_H, n_H > n_L$ , изменил показатель преломления. Пусть это будет компонент с высоким показателем преломления  $n_H$ , его изменение  $\Delta n_H$ . Это означает, что изменилась оптическая длина хода луча в этом компоненте на  $\Delta n_H \cdot d_j$ , где  $d_j$  – физическая толщина  $j$ -слоя. Оптическая толщина компонента стала равной  $(\Delta n_H + n_H) d_j$ . Если этот компонент встречается в структуре  $N$  раз, то меняется  $N$  параметров МДСЗ. Изменение параметров МДСЗ вызывает изменение интерференционных соотношений. МДСЗ перестраивается на другую частотную характеристику коэффициента отра-

жения. Для такого МДСЗ частотная характеристика смещается по оси длин волн, на  $\Delta\lambda$ , которое прямо пропорционально  $\Delta n_H/n_H \cdot \lambda$ . А так как меняет показатель преломления только компонент  $n_H$ , то имеет место неравенство:

$$\Delta\lambda < \Delta n_j/n_j \cdot \lambda. \quad (3)$$

Чтобы  $\Delta\lambda$  максимально приблизить к  $\Delta n_j/n_j \cdot \lambda$ , требуется максимальное возможное значение  $d_j$ . Однако так как оптически активный компонент встречается в структуре  $N$  раз, то выбор максимального  $d_j$  идет в противоречие с требованием, которое мы выдвигали на этапе оптимизации структуры диэлектрического селективного зеркала, а именно – требования минимума протяженности МДСЗ. 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. Решение этого противоречия видится в создании программного модуля и проведении вычислительного эксперимента.

В вычислительном эксперименте необходимо синтезировать структуру перестраиваемого МДСЗ и смоделировать режимы его работы.

Требования, предъявляемые к перестраиваемому МДСЗ, определяются требованиями к характеристикам частотно-селективного оптического переключателя, это:

- узкая полоса переключения оптического сигнала, согласно частотному плану ITU-T, с шириной спектра от 0,78 до 7,88 нм;
- малое вносимое затухание;
- максимальные вносимые потери переключения на любой порт 5 дБ;
- коэффициент направленности 40 дБ;
- возвратные потери – 35 дБ;
- стыковка с одномодовым волокном коннектором (например, SC/APC);
- переключение в полосе частот одного оптического канала согласно частотному плану ITU-T, т. е. с шириной спектра от 0,78 до 7,88 нм;
- минимальные вносимые потери вне диапазона рабочих длин волн.

Недостаточно иметь оптический переключатель, необходимо требовать от него узкую полосу частот переключения. Вне узкой полосы частот переключения коммутационный элемент должен иметь широкую полосу пропускания. В целях уменьшения затухания поглощения в оп-

тическом компоненте, требуется уделять повышенное внимание снижению протяженности элемента, обеспечивающего селекцию длин волн.

На основании требований к характеристикам частотно-селективного оптического переключателя, предъявляются следующие требования к перестраиваемому МДСЗ:

- малая протяженность структуры до 15 мкм для обеспечения низкого вносимого затухания из-за расхождения светового пучка;
- узкая полоса пропускания/отражения оптического сигнала, согласно частотному плану ITU-T, с шириной спектра от 0,78 до 7,88 нм;
- смещение полосы пропускания/отражения оптического сигнала не менее чем на ширину полосы пропускания/отражения – от 0,78 до 7,88 нм;
- максимальная гладкость энергетического коэффициента отражения вне диапазона рабочих длин волн.

Теперь реализуем частный случай перестраиваемого МДСЗ исходя из требований, предъявляемых к перестраиваемому МДСЗ. В качестве основной длины волны, на которой будет реализован режим переключения, выберем 1550 нм. Эта длина волны является основной для волоконно-оптических систем передачи большой дальности, так как 1550 нм соответствует третьему, наиболее глубокому, окну прозрачности оптического волокна. Показатели преломления слоев МДСЗ возьмем максимально отличные, при этом они должны соответствовать доступным материалам, технологически пригодным для производства МДСЗ. Пусть это будет кварц и  $\text{TiO}_2$ . Вне диапазона переключения вблизи 1550 нм, МДСЗ должен иметь максимально ровные диапазоны пропускания и отражения. Допустимое изменение показателя преломления сегнетоэлектрического компонента ( $\text{TiO}_2$ ) МДСЗ не должно превышать долей процента, в частности должно быть не более 0,7 %. Итак, синтезируем МДСЗ со следующими характеристиками:

- пропускание на центральной длине волны 1550 нм с шириной 7,88 нм;
- смещение полосы пропускания с центральной длиной волны 1550 нм не менее чем на 7,88 нм при изменении показателя преломления одного из компонентов МДСЗ на 0,7 %;
- показатели преломления слоев  $n_L=1,48$ ,  $n_H=2,3$ ;
- максимальная гладкость энергетического коэффициента отражения вне диапазона рабочих длин волн.

В результате рекуррентного синтеза периодической двухкомпонентной структуры реализован частный случай МДСЗ с полосой пропускания [1290, 1330] нм и отражения [1470, 1630] нм, что соответствует второму и третьему окну прозрачности оптического волокна и двум основным рабочим длинам волн телекоммуникационной аппаратуры. Внутри широкой полосы отражения [1470, 1630] нм реализована узкая полоса пропускания шириной 6 нм на длине волны 1550 нм.

В таком 19-слойном МДСЗ имеется явное преобладание оптического компонента с большим значением показателя преломления. Оптические толщины слоев равны 1959, 373, 1959, 373, 1959, 373, 1959, 373, 1959, 764, 1959, 373, 1959, 373, 1959, 373, 1959, 373, 1959 нм. Физическая протяженность МДСЗ 11,038 мкм. Используются материалы с показателем преломления  $n_L = 1,48$  и  $n_H = 2,3$ , профиль структуры с оптическими толщинами представлен на рис.1.

Иллюстрация принципа оптического переключения при изменении показателя преломления дана на рис. 2 в виде зависимости энергетического коэффициента отражения от длины волны проходящего излучения, непрерывной линией для состояния без воздействия (природа воздействий, интенсивность и материалы описываются в следующем разделе) и пунктирной при воздействии на перестраиваемое МДСЗ. Важно отметить, что физические толщины в представленной модели коммутации не изменяются.

Представленный частный случай перестраиваемого МДСЗ удовлетворяет заданным характеристикам. Узкая полоса пропускания (рис. 2) шириной 6 нм на длине волны 1550 нм при изменении показателя преломления на 0,7 % смещается на 8 нм в длинноволновую часть спектра.

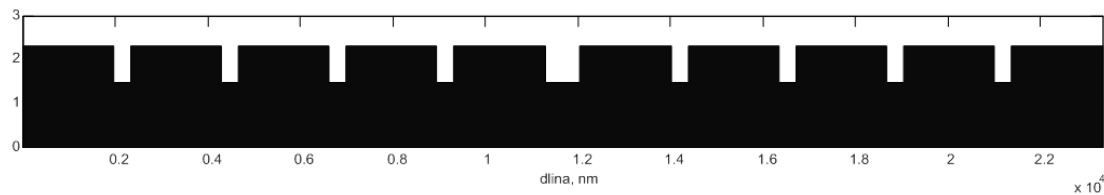


Рис. 1. Профиль показателя преломления в нанометрах двухкомпонентного периодического МДСЗ

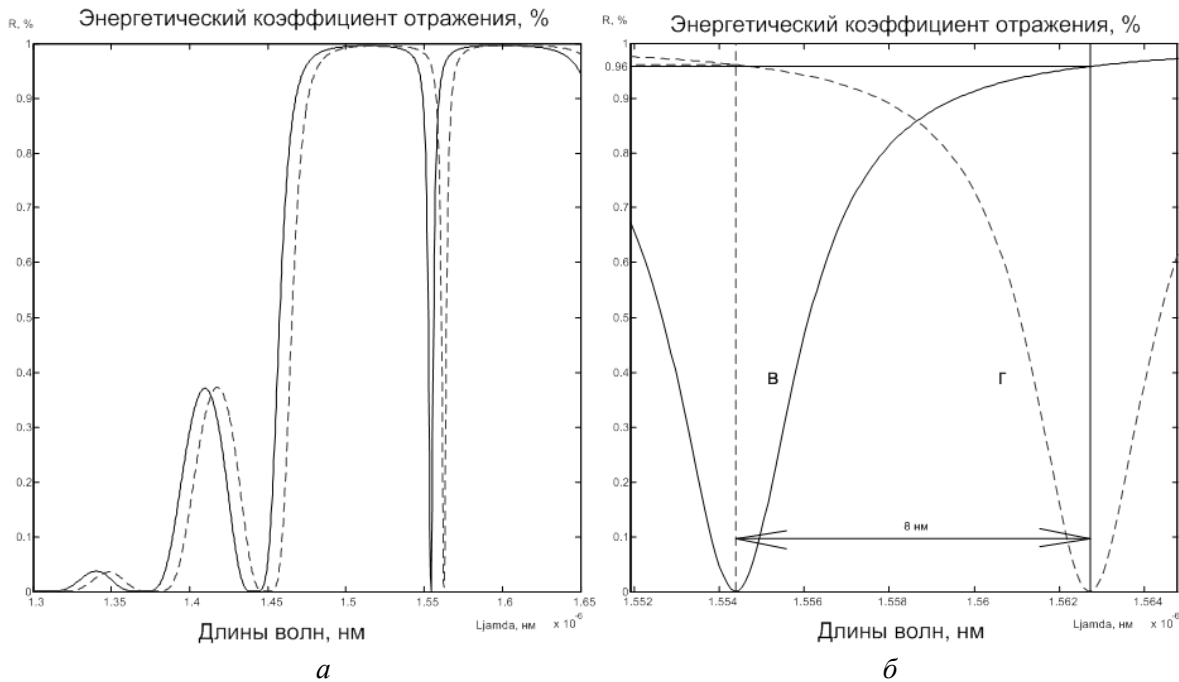


Рис. 2. Энергетический коэффициент отражения 19-слойной структуры: *а* – в диапазоне длин волн [1300, 1650] нм, *б* – в диапазоне длин волн [1470, 1630] нм

В результате этого перестраиваемое МДСЗ на длине волны 1550 нм дает отражение мощности оптического излучения в 96 % (рис. 2, б), пунктирная линия. В представленном частном случае для осуществления переключения необходимо относительное изменение показателя преломления оптически активной среды

$$\Delta n_H / n_H = 0,007.$$

### ОПТИЧЕСКОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ НА ОСНОВЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО МДСЗ

Предлагается осуществлять оптическое переключение на основе электрооптического, акустооптического или иного эффекта, обеспечивающего изменение показателя преломления в перестраиваемом диэлектрическом селективном зеркале. Наиболее выгодными с точки зрения динамики переключения являются электрооптические эффекты, в которых динамика переключения определяется скоростью релаксации вещества и составляет  $10^{-10}$ – $10^{-11}$  с [3, 4]. Квадратичный эффект Керра в общем случае позволяет достигать больших значений изменения показателя преломления, чем линейный электрооптический эффект Погкельса [5, 6]. На данный момент достигаются значения изменения показателя преломления в  $\Delta n = 0,2$ – $0,3$  для капсулированных жидких кристаллов в тонких пленках. Известны образцы сегнетокерамики, к примеру PLMN–PT 3/75/25 с  $\Delta n = 0,002$ – $0,003$  [7]. Указанные значения достигаются при обычных напряженностях электрических полей  $10^4$  В/см между обкладками конденсатора [8]. Указанные значения не являются пределом: так, при создании поля в сегнетоэлектрике импульсным лазерным излучением накачки могут достигаться на порядок большие напряженности электрического поля, и индуцироваться на порядок большее изменение показателя преломления. Ввиду развития области материаловедения есть основания ожидать появления новых материалов с лучшими характеристиками. Есть опытные данные и образцы из наноструктурных материалов, в частности силалла, проявляющие нелинейные изменения показателя преломления порядка  $\Delta n = 0,02$ – $0,03$  [9–12]. В плане реализации оптического переключателя данная работа носит теоретический характер, и вопрос с окончательным выбором оптического активного материала не закрывается.

Вид активной ячейки оптического переключателя приводится на рис. 3. Один из компонентов перестраиваемого диэлектрического селективного зеркала, наиболее протяженный, выполняется из оптически анизотропного мате-

риала, к примеру  $\text{TiO}_2$  ( $n_{\text{TiO}_2} = 2,3$ ), способного под действием управляющего напряжения  $U_{\text{упр}}$  изменять показатель преломления, а следовательно, оптическую толщину компонента. Тем самым осуществляется частотный сдвиг коэффициента отражения.

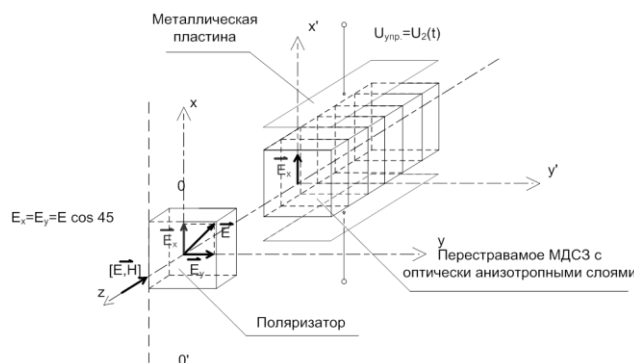
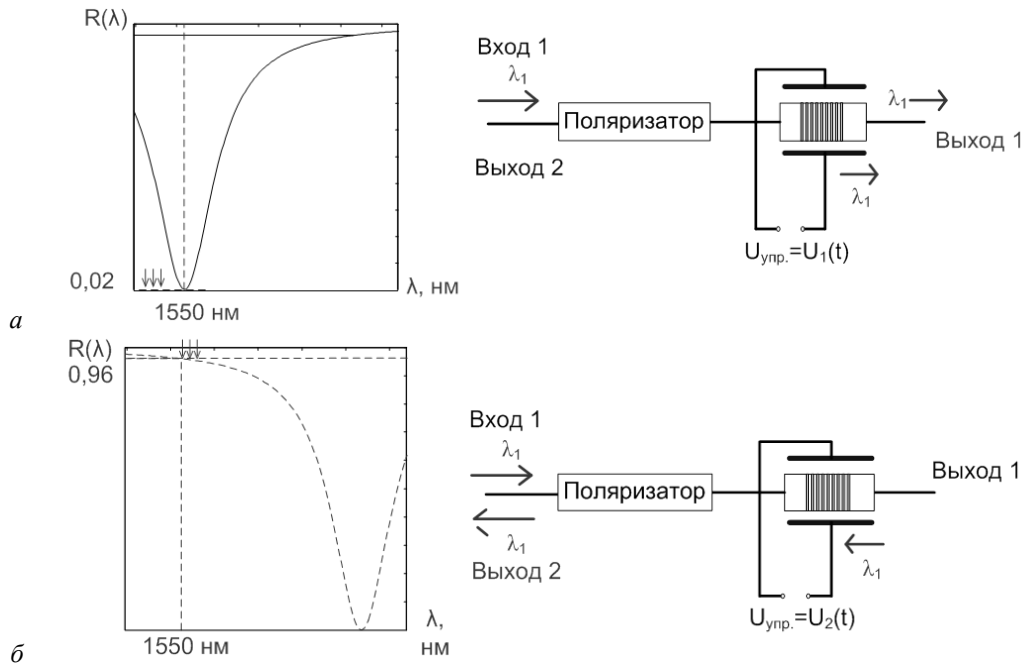


Рис. 3. Активная ячейка коммутационного элемента

Поляризатор необходим для удаления поляризации, соответствующей распространению обыкновенного луча сквозь структуру активной ячейки. Вносимое затухание поляризатором – не менее 3 дБ.

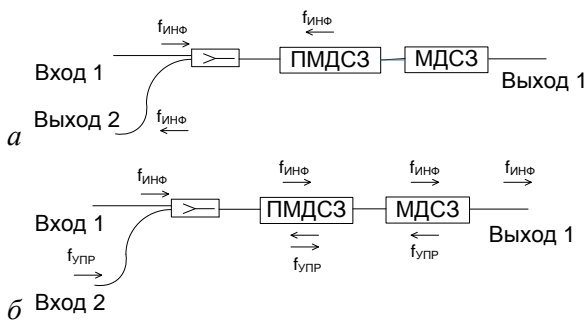
Смещение в частотной характеристике диэлектрического селективного зеркала в представленной активной ячейке коммутационного элемента интерпретируется как коммутация по длине волны. Схема включения активной ячейки коммутационного элемента и смещение частотной характеристики до воздействия управляющим напряжением и после воздействия показаны на рис. 4, а и 4, б соответственно. На рис. 4, а видно, что коэффициент пропускания на длине волны 1550 нм равен 98 %, что соответствует затуханию пропускания 0,088 дБ. Из рис. 4, б видно, что коэффициент пропускания на длине волны 1550 нм уже равен 2 %, что соответствует затуханию пропускания 16,99 дБ.

Активная ячейка поглощает оптическое излучение в очень малых количествах, так как имеет короткую физическую протяженность (11 мкм, поперечный размер одномодового волокна 10 мкм) и выполнена из диэлектрических, прозрачных материалов. Ячейка под воздействием управляющего напряжения отражает до 98 % мощности светового потока. Однако наблюдается явление расхождения светового потока в теле оптически активной ячейки, существует проблема ввода светового потока в торцы сердцевины оптических волокон, с которыми смыкается оптически активная ячейка. Поэтому важно оценить затухание, связанное с потерей оптического излучения, уходящего в окружающую среду.



**Рис. 4.** Схема коммутации при перестройке диэлектрического селективного зеркала:  
*а* – до воздействия,  $U_{упр.1}$ ; *б* – при воздействии на ячейку,  $U_{упр.2}$

Предлагается также оптический переключатель на основе эффекта изменения показателя преломления оптически активной среды под действием интенсивного оптического излучения в перестраиваемом диэлектрическом селективном зеркале. Схема коммутации при перестройке диэлектрического селективного зеркала под действием управляющего излучения показана на рис. 5.



**Рис. 5.** Переключение под действием интенсивного оптического излучения в перестраиваемом МДСЗ:  
*а* – без управляющего интенсивного излучения; *б* – под действием управляющего излучения

Схема включения состоит из двух МДСЗ, одно из которых перестраиваемое. Без внешнего воздействия перестраиваемое МДСЗ отражает информативное оптическое излучение на частоте

$f_{инф}$  (рис. 5, *а*). Под действием интенсивного излучения  $f_{упр}$  (рис. 5, *б*) МДСЗ перестраивается на пропускание информативного оптического излучения  $f_{инф}$ . Второе МДСЗ служит для отражения интенсивного излучения управления обратно в сторону перестраиваемого МДСЗ и предотвращает прохождение интенсивного неинформативного излучения на 'Выход 1'. Второе МДСЗ всегда прозрачно для информативного излучения. Видно, что по 'Выходу 1' в зависимости от управляющего излучения детектируется, либо не детектируется информативный сигнал. Если не детектируется, то его можно обнаружить на 'Выходе 2' схемы (рис. 5, *а*).

### ЗАТУХАНИЕ И КОЛЛИМАЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Наисложнейшая задача практической применимости МДСЗ как функционального элемента – это обеспечение минимального вносимого затухания. Потери проходящего и отраженного светового потока преимущественно определяются потерями на ввод оптического излучения обратно в оптическое волокно [13]. Затухание в компонентах МДСЗ пренебрежимо мало, так как используются оптически прозрачные материалы. Затухание оптического сигнала в МДСЗ определяется частичным вводом оптического излучения в оптическое волокно. Как известно, световод пропускает лишь свет, за-

ключенный в пределах телесного угла  $\theta$ . Этот телесный угол характеризуется апертурой – углом между оптической осью и одной из образующих светового конуса, попадающего в торец волоконного световода, при котором выполняется условие полного внутреннего отражения. Излучение, исходящее из торца оптического световода, также распространяется в пределах данного телесного угла. За пройденный оптический путь в МДСЗ световой конус расширяется, поэтому не все оптическое излучение вводится через торец световода обратно. Это касается как проходящего излучения длин, так и отраженного излучения. Отраженное излучение чувствительно к числовой апертуре в большей степени, так как отраженное излучение проходит тело многослойной структуры дважды.

Апертурный угол волокна  $25^\circ$  наблюдается при переходе из оптического волокна ( $n = 1,48$ ) в воздух ( $n = 1$ ). При переходе из оптического волокна в  $\text{TiO}_2$  ( $n = 2,3$ ) и благодаря фокусировке оптического излучения апертурный угол волокна  $11^\circ - 0,19$  рад. Затухание продольного смещения волокон с МДСЗ в зазоре 1,273 дБ. При радиальном смещении дополнительные потери 0,01 дБ. Потери вследствие углового рассогласования оптического волокна, максимальное значение  $a_0 = 0,07$  дБ. Итого суммарные потери, вносимые МДСЗ в прошедший сигнал, составляют 1,2073 дБ.

Суммарные потери, вносимые МДСЗ в отраженный сигнал, за счет удлинения оптического пути для отраженного света в МДСЗ и отражения на уровне 97–98 %, составляют величину большую в полтора раза, 1,81095 дБ с запасом.

Показатель преломления сердцевин оптического волокна может не равняться значению показателя преломления  $n = 1,48$  обоих полупространств у краев многослойной структуры, а быть равным, к примеру, 1,46. В этом случае появляется дополнительное отражение оптической интенсивности на сдвиге оптический волновод ( $n_{\text{ОВ}} = 1,46$ ) – МДСЗ ( $n_{\text{МДСЗ } L} = 1,48$ ). Для исключения потерь на паразитное отражение на длине волны  $\lambda$  необходим согласующий слой – оптический трансформатор. Поэтому пусть согласующий слой будет четвертьволновым слоем с показателем преломления:

$$n_{\text{согл.}} = \sqrt{n_N^* \cdot n_{\text{ОВ}}}, \quad (4)$$

где  $n_{\text{ОВ}}$  – показатель преломления оптического волокна;  $n_{\text{согл.}}$  – показатель преломления согласующего слоя;  $n_N^*$  – эффективный показатель преломления МДСЗ, посчитанный по рекуррентной формуле

$$n_j^*(\lambda) = \frac{n_{(j-1)}^*(\lambda) - i n_j \cdot \text{tg} \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j}{n_j - i n_{(j-1)}^*(\lambda) \cdot \text{tg} \frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j} n_j, \quad (5)$$

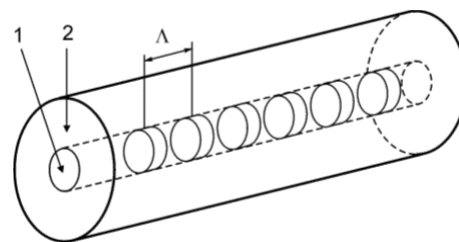
где  $n_j^*$  – эффективный показатель преломления  $j$ -слойной структуры;  $n_j$  – показатель преломления  $j$ -слоя;  $d_j$  – толщина  $j$ -слоя.

Для согласования МДСЗ с оптическим волноводом с показателем преломления сердцевин 1,46 для лучшего пропускания в третьем окне прозрачности можно дополнительно использовать с обеих сторон МДСЗ по одному просветляющему слою толщиной 387,5 нм и показателем преломления 1,47.

Очевидно, оптическое излучение в МДСЗ необходимо фокусировать. Может быть использованы различные способы фокусировки в зависимости от конструкции МДСЗ. Далее предлагаются способы фокусировки оптического излучения в МДСЗ.

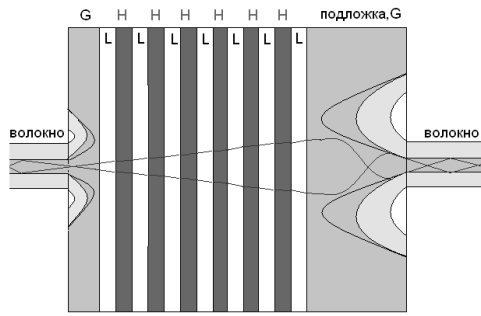
*Первый способ.* Исполнение МДСЗ в теле сердцевин оптического волокна. На данный момент технология изготовления не позволяет выращивать многослойные структуры в сердцевине волокна. Но в будущем автору это представляется возможным. Такая конструкция во многом будет похожа на решетку Брэгга (рис. 6).

Основное отличие решеток Брэгга от МДСЗ, реализованного в структуре оптического волокна, это то, что показатель преломления в решетках Брэгга претерпевает гладкое изменение вдоль структуры с небольшой относительной амплитудой изменения показателя преломления по отношению к абсолютному его значению.



**Рис. 6.** Исполнение ДСЗ в теле сердцевин оптического волокна: 1 – сердцевина; 2 – оболочка оптического волокна;  $\Lambda$  – расстояние между типовыми слоями, период

*Второй способ.* В целях фокусировки с обоих торцов у такого фильтра по периметру при замыкания оптического волокна к подложке создается структура с низким, градиентным профилем показателем преломления, или просто вытравливается (рис. 7).



**Рис. 7.** Прохождение оптического излучения через МДСЗ с фокусировкой с обоих торцов фильтра

*Третий способ.* Исполнение МДСЗ с модифицированными толщинами слоев. В такой конструкции толщины слоев высокого показателя преломления в радиальном направлении от оптической оси фильтра уменьшаются. Слои в таком фильтре можно рассматривать как набор чередующихся тонких оптических линз с большим радиусом кривизны. Оценку радиуса кривизны можно провести средствами геометрической оптики. Разумеется, такая операция весьма условна, так как геометрической оптикой следует пользоваться в условиях, когда линейные размеры систем много больше длин волн оптического излучения. Поэтому результат, полученный средствами геометрической оптики, будет рассмотрен как приближение к действительности и будет служить только для оценки данного метода фокусировки.

*Четвертый способ.* При изменении показателя преломления в сторону уменьшения, величина этого изменения в глубине тела активной ячейки будет меньше чем, к примеру, в поверхностных слоях, что естественным образом образует систему линз с количеством линз по числу оптически активных слоев. В этой ситуации незначительная коллимация оптического излучения будет происходить естественным образом.

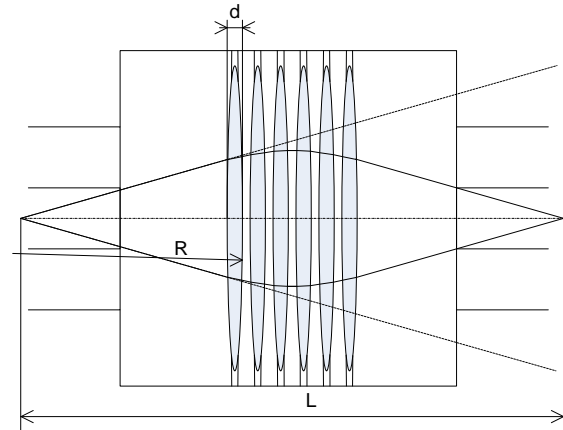
На рис. 8 представлена оптическая система, состоящая из шести тонких оптических линз с большим показателем преломления.  $R$  – параметр, характеризующий радиус кривизны слоя;  $d$  – расчетная толщина слоя;  $L$  – расстояние между фокусами для системы из шести линз.

Оптическая сила линзы считается по следующей формуле:

$$f = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) = \frac{2}{R} \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right), \quad (6)$$

где  $R_1$  и  $R_2$  – радиусы кривизны двух поверхностей линзы, на которых преломляется свет, для нашего случая они равны  $R$ , м;  $n_1$  и  $n_2$  – показате-

ли преломления окружающей среды и линзы соответственно.



**Рис. 8.** МДСЗ с фокусировкой в теле многослойной структуры

Параметры разработанного в части исследования фильтра – десять слоев с показателем преломления  $n_2 = 2,3$ , физической толщиной 851,7 нм каждый, и девять слоев с показателем преломления  $n_1 = 1,48$ , физической толщиной 252,0 нм каждый. Перенесем параметры на модель геометрической оптики (см. рис.8). Оптической сила системы из  $N$  тонких линз:

$$f_{\text{сис}} = \sum_i^N f_i = N \cdot \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \frac{2}{R}. \quad (7)$$

Фокусное расстояние – величина, обратная оптической силе системы:

$$h = \frac{1}{f_{\text{сис}}} = \frac{R}{2N \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right)}. \quad (8)$$

В то же время справедливо, длина оптической системы (рис.8), для полной сходимости оптических лучей в точке второго фокуса системы, составляет два фокусных расстояния. Отсюда легко дать оценку значению необходимой кривизны слоя.

$$R = NL \left( \frac{n_2}{n_1} - 1 \right). \quad (9)$$

Радиус кривизны тонкого слоя с высоким показателем преломления прямо пропорционален произведению оптической длины системы на количество таких слоев и относительной разности показателей преломления слоев.

Длина оптической системы с параметрами разработанного МДСЗ 11038 мкм. Радиус кривизны слоя высокого показателя преломления



при полной сходимости лучей в точке второго фокуса должен составлять:

$$R = 9 \cdot 11038 \cdot \left( \frac{2,3}{1,48} - 1 \right) = 55041 \text{ нм.} \quad (10)$$

Реальная ситуация позволяет менять толщину слоя высокого показателя преломления с сохранением частотных характеристик фильтра в пределах до 2,5 % толщины слоя или 45 нм. Ограничение на девиацию толщины слоя влечет ограничение снизу на радиус кривизны оптического слоя. Пусть девиация  $\Delta d$  толщины слоя  $d$  равна 45 нм (рис. 9).

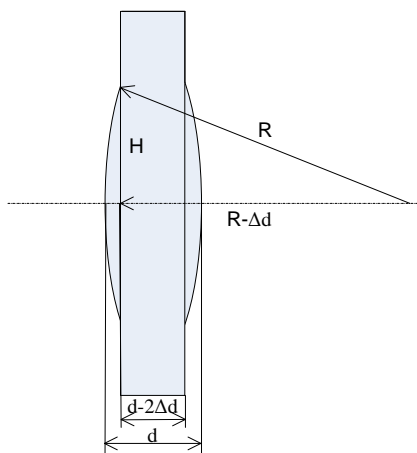


Рис. 9. Один слой с высоким показателем преломления

$$\Delta d = R - \sqrt{R^2 - H^2}, \quad (11)$$

где  $H$  – поперечный размер активной области фильтра, равен 20 мкм, удвоенной толщине поперечного размера сердцевинки волокна. Тогда радиус кривизны будет равен:

$$R = \frac{H^2 + \Delta d^2}{2\Delta d} = \frac{20000^2 + 45^2}{2 \cdot 45} = 4,44 \cdot 10^6 \text{ нм.} \quad (12)$$

Сравнивая (12) с (10), можно видеть, что достигаемый радиус кривизны в 81 раз превосходит желаемый. Система из девятнадцати фокусирующих слоев явно недостаточна для того, чтобы вновь свести лучи на участке длины фильтра. Но все же может быть весьма эффективна для целей уменьшения телесного угла, в пределах которого исходящий свет из оптического волокна распространяется в МДСЗ.

Для успешного решения задачи ввода оптической мощности в световедущую часть оптического волокна с минимальными потерями предлагается использовать на этапе производства МДСЗ комбинированный метод, использующий собой сочетание двух представленных

здесь способов фокусировки оптического излучения. Это способ искривления поверхности раздела слоев и способ реализации конструкции ДСЗ в теле волокна.

### КОНСТРУКЦИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ

Геометрические размеры МДСЗ в 11 мкм позволяют осуществлять выращивание слоев зеркала непосредственно на одном скеле волокна. Далее должна следовать прецизионная стыковка с сердцевинкой второго волокна (рис. 10, а, б). 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 пластмассовыми прутками для прочности (рис.10,в).

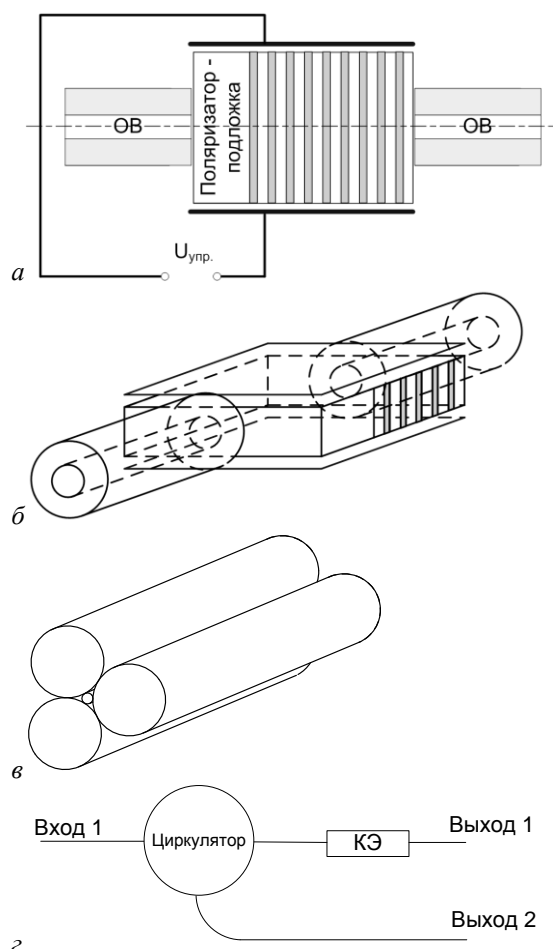


Рис. 10. Конструктивное исполнение переключателя: а – переключатель; б – прецизионная стыковка волокон; в – усиление стальными прутками; г – переключатель и вспомогательный циркулятор

Для успешного решения задачи подвода высокочастотных импульсов управления используются достижения СВЧ-электроники и микропроцессорной техники. На текущем этапе развития этих направлений имеется возможность генерации в непосредственной близости к оптическому переключателю устройством управления высокочастотных сигналов, например генерация и усиление второй гармоники в нелинейных фотонных кристаллах или генерация СВЧ-колебаний до 150 ГГц в диодах Ганна. Так как электрооптический эффект Керра – достаточно быстрый эффект, динамика в нем определяется временем релаксации вещества  $10^{-10}$ – $10^{-11}$  с, то скорость работы оптического переключателя полностью определяется инертностью цепей передачи управляющего сигнала и инерционностью обкладок конденсатора. В случае управления переключением импульсным лазером накачки, указанные лимитирующие факторы устраняются.

Для успешного решения задачи ввода оптической мощности в световедущую часть оптического волокна с минимальными потерями, предлагается использовать представленные в прошлом разделе способы коллимации оптического излучения. 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 11 мкм без дополнительных средств коллимации составляет 1,21 дБ в проходящий сигнал в длинах волн полного пропускания и 1,81 дБ – в отраженный в длинах волн отражения.

Влияние модуляционной неустойчивости не ведет к превышению регламентной величины амплитуды джиттера при оптической мощности сигналов в пределах 0,07 Вт. Вероятность битовой ошибки не превышает значения  $10^{-11}$  при входной оптической мощности, равной 0,07 Вт. Поэтому модуляционная неустойчивость является незначительной.

Нелинейные параметрические процессы, проявляющиеся в виде гармонических составляющих, не приводят к искажению полезного сигнала. Последнее связано с тем, что пороговые мощности, необходимые для генерации паразитных гармоник даже при достижении полного синхронизма, оказываются порядка 37...54 Вт, т.е. существенно превышают значения мощности 0,07 Вт. Таким образом, действи-

ем других нелинейных эффектов (кроме нелинейного преломления) для входного сигнала 0,07 Вт можно пренебречь.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Разработана структура оптического узкополосного переключателя, отличающаяся от известных исполнением на основе многослойного диэлектрического селективного зеркала с включением компонента из сегнетоэлектрика, изменяющего под действием внешнего электрического поля коэффициент преломления. Оптический узкополосный переключатель позволяет осуществлять переключение за счет смещения полосы отражения за пределы рабочей области, имеет протяженность в 11 мкм, малую инерционность переключения из-за электрооптического эффекта до  $10^{-11}$  сек и достижимую полосу переключения до десятка нм. Для него определено затухание пропускания 1,21 дБ и затухание отражения 1,81 дБ.

Результаты работы были получены при помощи гранда «CARL ZEISS» компании ООО «ОПТЕК», официального представителя концерна Carl Zeiss в СНГ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Маккавеев В. И.** Фотонные коммутаторы // Компоненты и технологии. 2006. № 2. С. 55–57. [V. I. Makeev, "Photonic switches," *Components and technologies*, no. 2, pp. 55-57, 2006.]
2. **Kostrov S. V., Bagmanov V. Kh., Sultanov A. Kh.** Optical switching element based on selective dielectric mirrors and fractal heterostructure // Proc. Paper SPIE Bellingham, Washington: ETATS-UNIS, 2011. Vol.7992.P. 176–184. [S. V. Kostrov, V. Kh. Bagmanov, A. Kh. Sultanov, "Optical switching element based on selective dielectric mirrors and fractal heterostructure," in *Proc. Paper SPIE Bellingham*, Washington: ETATS-UNIS, vol.7992, pp. 176–184, 2011.]
3. **Балакин А. В. и др.** Усиление генерации сигнала суммарной частоты в многослойных периодических структурах на краях брэгговской запрещенной зоны // Письма в ЖЭТФ. 1999. Т.70, № 11. С. 718–721. [A. V. Balakin et al., "Strengthening signal generation cumulative frequency in multi-layered periodic structures rounds at the edges of the Bragg forbidden zone," *JETP Letters*, vol. 70, no. 11, pp. 718-721, 1999.]
4. **Бушуев В. А., Манцызов Б. И., Петров Е. В.** Усиление генерации терагерцового излучения в нелинейном одномерном фотонном кристалле с микрорезонатором // Изв. РАН. Сер. физическая. 2005. Т. 69, № 12. С. 1799–1804. [V. A. Bushuev, B. I. Mancusov, E. V. Petrov, "Strengthening generation of terahertz radiation in a nonlinear one-dimensional photonic crystal with a microcavity," *Izv. RAS, ser. Physical*, vol. 69, no. 12, pp. 1799-1804, 2005.]
5. **Агравал Г. П.** Нелинейная волоконная оптика. М.: Мир, 1996. 324 с. [G. P. Agrawal, *Nonlinear fiber optics*. Moscow: Mir, 1996.]

6. **Афонин О. А., Названов В. Ф.** О характеристике пропускания капсулированных нематических жидких кристаллов // ЖТФ. 1990. Т. 60, вып. 10. С. 93–98. [O. A. Afonin, V. F. Nazvanov, "About the characteristic of the transmission dispersed nematic liquid crystals," *ZhTF*, vol. 60, iss. 10, pp. 93-98, 1990. ]

7. **Камзина Л. С. и др.** Электрооптические свойства соединений PMN-xPT: монокристаллы и прозрачная сегнетокерамика // Физика твердого тела. 2010. Т. 52, вып. 10. С. 1999–2004. [L. S. Kamsina, et al., "Electro-optical properties of compounds PMN-xPT: monocrystals and transparent segnetoceramic," *Physics of strongly about the body*, vol. 52, iss. 10, pp. 1999-2004, 2010. ]

8. **Петров Е. В., Манцызов Б. И.** Генерация сигналов терагерцового диапазона в сверхрешетке фотонных кристаллов // Изв. РАН. Сер. физическая. 2005. Т. 69, № 8. С. 1113–1115. [E. V. Petrov, B. I. Mancusov, "Generation of signals of the terahertz range at the superlattice photonic crystals," *Izv. RAS, ser. Physical*, vol. 69, no. 8, pp. 1113-1115, 2005. ]

9. **Воробьев Г. А.** Физика диэлектриков, область сильных полей. Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1977. [G. A. Vorobiev, *Physics of dielectrics, strong fields*. Tomsk: Tomsk University, 1977. ]

10. **Ковальчук А. В., Курик М. В., Лаврентович О. Д.** Капсулированные нематические жидкие кристаллы: новый класс устройств отображения информации // Зарубежная радиоэлектроника. 1989. № 5. С. 44–58. [A. V. Kovalchuk, M. V. Kuric, O. D. Lavrentovich, "Dispersed nematic liquid crystals: a new class of device information display," *Foreign radio electronics*, no. 5, pp. 44-58, 1989. ]

11. **Петров Е. В., Манцызов Б. И.** Генерация сигналов терагерцового диапазона в сверхрешетке фотонных кристаллов // Изв. РАН. Сер. физическая. 2005. Т. 69, № 8. С. 1113–1115. [E. V. Petrov, B. I. Mancusov, "Generation of signals of the terahertz range at the superlattice photonic crystals," *Izv. RAS, ser. Physical*, vol. 69, no. 8, pp. 1113-1115, 2005. ]

12. **Султанов А. Х., Виноградова И. Л., Салихов А. И.** Описание нелинейных оптических эффектов в неравновесном наноструктурном материале // Проблемы машиноведения, технологии и автоматизации технологических процессов в машиностроении Республики Башкортостан: сб. науч. тр. Уфа: Гилем, 2007. С. 61–68. [A. Kh. Sultanov, I. L. Vinogradov, A. I. Salikhov, "Description of nonlinear optical effects in a nonequilibrium nanostructured material," in *Problems of engineering science, technology and automation of technological processes in mechanical engineering of the Republic of Bashkortostan: collection of scientific papers*, pp. 61-68, Ufa: Gilem, 2007. ]

13. **Андреев А. В.** Фокусировка пучков при отражении от кристаллов и многослойных периодических структур с переменным периодом // Письма в ЖЭТФ. 2001. Т. 74, вып. 1. С. 8–11. [A. V. Andreev, "Focusing beam upon reflection from the crystals and multilayer periodic structures with a variable period," *JETP Letters*, vol. 74, iss. 1, pp. 8-11, 2001. ]

## ОБ АВТОРАХ

**СУЛТАНОВ Альберт Ханович**, проф., зав. каф. телеком. систем. Дипл. инж. по многоканальн. электросвязи (Новосиб. электротехн. ин-т связи, 1973). Д-р техн. наук по упр. в техн. сист. (УГАТУ, 1996). Иссл. в обл. телеком. систем, оптоэл. аэрокосм. систем.

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

**КОСТРОВ Сергей Владимирович**, ст. преп. каф. телеком. систем. Дипл. инж. по многоканальн. телеком. системам (УГАТУ, 2008). Канд. техн. наук по сист., сетям и устр. телекоммуникаций. Иссл. в обл. волоконно-оптической связи.

## METADATA

**Title:** optical switch based on tunable multilayer dielectric selective mirror.

**Authors:** A. Kh. Sultanov, V. Kh. Bagmanov, S. V. Kostrov.

**Affiliation:**

<sup>1</sup> Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

<sup>2</sup> DSA Ltd, Russia.

**Email:** tks@ugatu.ac.ru, sergey.kostrov@rambler.ru.

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 1 (62), pp. 84-94, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** This article presents a solution to the problem of synthesis of multilayer dielectric mirrors for the selective ROADM.

**Key words:** optical multilayer filter; stratified media; thin-film structures; multilayer dielectric selective mirror (MDSM); tunable dielectric multilayer selective mirror (TDMSM); optical multilayer filter (OMLF); optical switch.

**About authors:**

**SULTANOV, Albert Khanovich**, Prof., Dept. of Telecommunications Systems, Dipl. Eng. on multi-channel telecommunications (Novosibirsk Telecommunication Institute, 1973). Dr. Tech. Sciences (USATU, 1996). Research in the sphere of Telecom. systems, optoelectronics. aerospace systems.

**BAGMANOV, Valeriy Khusainovich**, Prof., Dept. of Telecommunications systems, Dipl. physicist (Moscow state University, 1975). Dr. Tech. Sciences (USATU, 2007). Research in the field of mathematical modeling and signal processing.

**KOSTROV, Sergey Vladimirovich**, Senior Teacher, Dept. of Telecommunications Systems. Dipl. Eng. on multi-channel telecommunications (Ufa State Aviation Technical University, 2008). PhD on systems, networks and devices of telecommunication (USATU, 2011). Research in the sphere of fiber-optical communication.