

# ОПТИЧЕСКИЕ МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ ВВОДА-ВЫВОДА

Н. Слепов

В синхронных цифровых сетях передачи данных важнейшую роль играют мультиплексоры/демультиплексоры. С развитием оптических технологий передачи все более востребованными становятся оптические мультиплексоры/демультиплексоры. Однако их структура достаточно сложна, поскольку они неизбежно должны реализовывать свои функции как на оптическом, так и на электрическом уровне. Но развитие современных технологий позволяет надеяться, что в недалеком будущем появятся оптические сети передачи данных без промежуточных электронных преобразований. О современных подходах к созданию оптических мультиплексоров рассказывает предлагаемая публикация, продолжающая серию статей об элементах и технологиях оптических сетей.

## СТРУКТУРА ОПТИЧЕСКИХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ

**Оптический мультиплексор-демультиплексор** или просто мультиплексор (OADM, Optical Add/Drop Multiplexer) – это устройство, на входе и выходе которого – по  $n$  волокон, и каждое из них передает по  $m$  оптически мультиплексированных каналов. В состав современных OADM входят: электронный мультиплексор-демультиплексор ввода-вывода (ADM), оптические демультиплексор (divider) и мультиплексор (или комбайнер – combiner) [1] (рис. 1). Для увеличения мощности в устройство включают оптический предусилитель на входе и мощный оптический усилитель – на выходе.

Электронный мультиплексор выполняет функции ввода/вывода трибов (SDH, PDH, SONET), компонентных сигналов (ATM) и потоков. Оптический демультиплексор

- выделяет транзитный поток из нескольких несущих и передает его непосредственно на оптический мультиплексор;
- выделяет оптические несущие (обычно по одной с каждого волокна) для передачи зарезервировавшим их пользователям, имеющим оптические интерфейсы к оптоволоконным каналам;
- выделяет оптические несущие и передает их на электронный мультиплексор для оптоэлектронного преобразования и электрон-

ного демультиплексирования каналов (трибов или компонентных сигналов), зарезервированных пользователями.

Оптический мультиплексор формирует выходной поток, объединяя транзитный поток от демультиплексора (оптические несущие) с оптическими потоками от электронного демультиплексора и с прямыми оптическими каналами от пользователей.

На рис. 1 показан OADM, принимающий восемь несущих, из которых четыре передаются транзитным потоком с входа на выход, две выводятся через оптические интерфейсы пользователям, а две другие преобразуются в электрические, демультиплексируются до трибов нужного уровня с помощью ADM и выводятся через его электрические интерфейсы пользователям. Аналогично формируется и мультиплексированный поток.

Однако у современных мультиплексоров (первого поколения) есть ряд недостатков. Так, число оптических несущих, которое можно ввести-вывести в OADM, ограничено из-за сложности устройств оптического ввода-вывода. В работе [2] показано, что число таких несущих составляет для разных систем от 1/10 до 1/4 от общего числа оптических каналов (вводимых/выводимых и транзитных). Причины этого в основном экономические: для вывода оптических несущих используются модули оптических фильтров, для ввода – пассивные WDM-модули, стоимость которых 1000–2000 долл. на несущую. Возможность реконфигурации несущих практически удваивает эту цену [3].

Поскольку модули оптических фильтров реализованы аппаратно, они не перестраиваемые. Из-за этого OADM работают на фиксированных частотах, и их нельзя динамически реконфигурировать. В большинстве случаев OADM не могут конвертировать длины волн входных несущих. А проблемы с фильтрацией оптических несущих ограничивают скорость обмена в системах WDM на уровне STM-16 (2,5 Гбит/с).

Перечисленные недостатки постепенно преодолеваются, в первую очередь благодаря появившейся возможности конвертации длин волн входных несущих [4]. Оптические конверторы и перестраиваемые

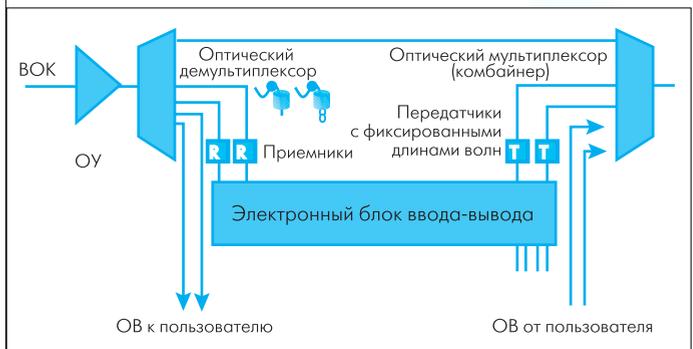
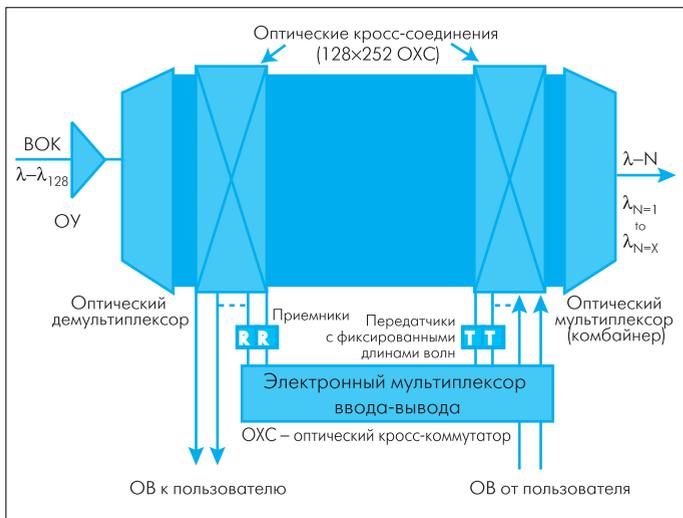


Рис. 1. Оптический мультиплексор ввода-вывода первого поколения



мые лазерные источники позволяют реконфигурировать оптические каналы. Но сложнее всего оказалось создать оптический кросс-коммутатор, который сделал бы OADM таким же гибким и полнофункциональным, как и ADM.



**Рис. 2. Оптический мультиплексор ввода-вывода второго поколения**

Однако предположив, что названные недостатки преодолены, можно представить структурную схему оптического мультиплексора второго поколения (рис. 2). Она отличается не только увеличенным числом мультиплексированных каналов (128–256 против 8–32) и более высокими скоростями передачи (10–40 Гбит/с). В составе нового мультиплексора – полноразмерный неблокируемый оптический кросс-коммутатор и управляемый блок волновых конверторов. Эти устройства позволят ввести-вывести сколько угодно оптических несущих, а при необходимости – их динамически реконфигурировать и перемаршрутизировать. Такой мультиплексор не только позволит увеличить емкость систем передачи до нового, терабитного уровня (1,28–10 Тбит/с), но и сделает реальными **полностью оптические сети** – конечную цель развития оптоволоконных сетей связи.

### ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВВОДА-ВЫВОДА НЕСУЩИХ

Динамическая реконфигурация оптических WDM-систем, т.е. дистанционное изменение числа оптических каналов, – мощное средство оптимизации производительности сети, наделяющее ее операционной гибкостью. В ее основе – *оптические технологии ввода-вывода несущих* с разделением по длине волны в промежуточных узлах сети. Сегодня по крайней мере пять технологий реализуют ввод-вывод оптических несущих [3]:

- фильтры на основе оптоволоконных дифракционных решеток Брэгга;
- фильтры на основе интерферометра Фабри-Перо;
- интерференционные фильтры на тонких пленках;
- поляризационные фильтры на жидких кристаллах;
- акустооптические перестраиваемые фильтры.

Однако к этим фильтрам предъявляются достаточно высокие требования. Так, они должны иметь малые вносимые потери, чтобы не использовать оптические усилители-компенсаторы. Потери фильтра не должны зависеть от поляризации входного сигнала, чтобы при ее изменении не менялась выходная мощность. Полоса пропускания фильтра не должна зависеть от температуры (в рабочем диапазоне температур). Амплитудно-волновая характеристика (АВХ) фильтра должна быть максимально плоской в рабочем интервале длин волн, с большой крутизной спада в переходной полосе, чтобы допускать

каскадирование фильтров в системах WDM без потери плоскостности и минимизировать влияние переходного затухания соседних каналов. Сами фильтры должны быть высокотехнологичными и недорогими в расчете на одну несущую.

### ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ ОПТОВОЛОКОННЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА

Оптоволоконная дифракционная решетка Брэгга отличается от обычной дифракционной решетки тем, что периодическое изменение показателя преломления, необходимое для создания собственной структуры решетки, осуществляется в сердцевине оптического волокна путем облучения его отрезка ультрафиолетовым источником света через специальную маску (структуру с периодически изменяющимся коэффициентом пропускания).

Принцип действия такой решетки в следующем. При распространении двух волн (с постоянными распространения  $\beta^1$  и  $\beta^2$ ) в одном направлении перекачка энергии одной волны в другую (возникновение дифракционного максимума) происходит, если выполняются условия совпадения фаз Брэгга-Вульфа (Б-В) [5]:

$$|\beta^1 - \beta^2| = 2\pi/a, \quad (1)$$

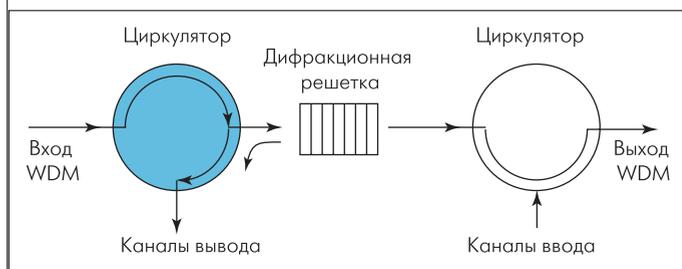
где  $a$  – постоянная решетки. Если вторая волна – это отраженная от решетки первая, то  $\beta^2 = -\beta^1$ , а тогда  $\beta^1 = 2\pi \cdot n_{эфф} / \lambda^1$ , и условие Б-В (1) примет вид  $\lambda^1 = \lambda_B = 2 \cdot n_{эфф} \cdot a$ .

Волна  $\lambda_B$  носит название **волны Брэгга**. Она соответствует центральной частоте главного лепестка спектральной характеристики света, отражаемого решеткой Брэгга. Спектр симметричен относительно волны Брэгга, а его боковые лепестки затухают достаточно слабо. Разница амплитуд главного и первых боковых лепестков не более 10 дБ, а ширина главного лепестка в единицах нормированной расстройки  $\Delta\lambda/a = 1,8$ . Амплитуды боковых лепестков существенно уменьшаются с помощью специальной технологии "отсекания пьедестала" отраженного спектра. Для этого применяют неоднородную решетку Брэгга, период которой изменяется на длине решетки: в центре он больше, на краях – меньше. В результате разница амплитуд увеличивается до 30 дБ, однако ширина главного лепестка возрастает с 1,8 до 3.

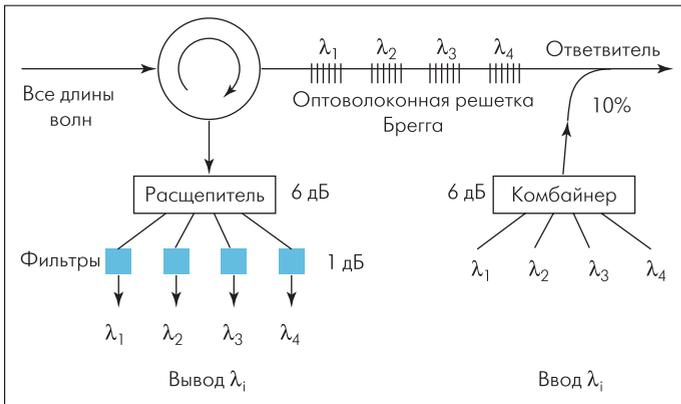
Модуль ввода-вывода на основе фильтра на решетке Брэгга (рис. 3) состоит из двух циркуляторов с оптоволоконной решеткой Брэгга между ними. Входной циркулятор играет роль фильтра ввода несущей, а выходной работает как мультиплексор ввода несущей. В принципе он может быть заменен модулем мультиплексора WDM с двумя входами на основе стандартного разветвителя.

На рис. 4 показана схема модуля для ввода-вывода четырех несущих на основе решеток Брэгга с циркулятором и разветвителем для вывода несущих и комбайнера с разветвителем на два входа для ввода несущих.

Недостаток этого типа фильтров – в том, что решетка Брэгга рассчитывается на определенную длину волны и не может перестраиваться.



**Рис. 3. Модуль ввода-вывода несущих на основе решетки Брэгга**

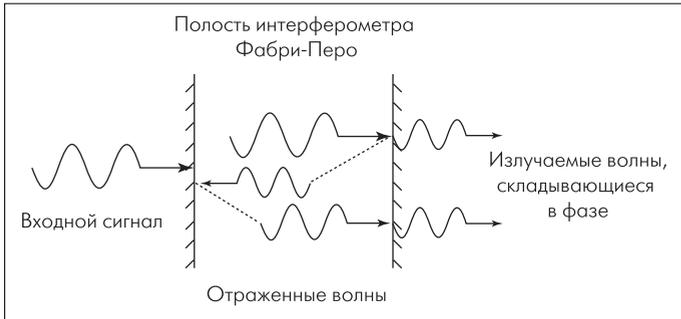


**Рис. 4. Модуль ввода-вывода четырех несущих на основе решетки Брэгга**

**ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ РЕЗОНАТОРА ФАБРИ-ПЕРО**

Основной элемент фильтра – резонатор Фабри-Перо. Он составлен из двух плоскопараллельных зеркал с высокой отражающей способностью внутренних поверхностей. Такой фильтр часто применяют в оптике, а его принципы использованы в интерференционных фильтрах на тонких пленках.

Пусть расстояние между зеркалами равно  $L$  и входной луч падает нормально к плоскости левого зеркала (рис. 5), попадает внутрь полости резонатора, частично проходит через правое зеркало, а частично отражается от него. Отраженный луч вновь отражается от левого зеркала, и процесс многократно повторяется. Если  $L$  кратно  $\lambda/2$ , то все лучи, проходящие через правое зеркало, сколько раз бы они ни отражались, оказываются в фазе. Такие длины волн  $\lambda$  называются резонансными.



**Рис. 5. Фильтрация света резонатором Фабри-Перо**

Передаточная функция такого фильтра  $T_{FP}(f)$  – это периодическая функция частоты  $f$  (рис. 6) [5]:

$$T_{FP}(f) = [1 - A(1 - R)]^2 / [1 + \{2\sqrt{R} \cdot \sin(2\pi \cdot f\tau) / (1 - R)\}^2], \quad (2)$$

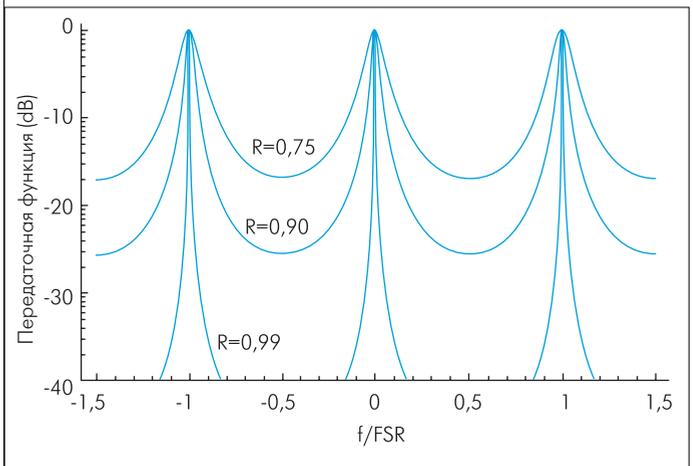
где  $A$  – потери на поглощение света зеркалом,  $R$  – отражательная способность поверхности зеркал,  $\tau$  – задержка распространения света через резонаторную полость.

Полосы пропускания фильтра повторяются на частотах, удовлетворяющих соотношению  $f\tau = k/2$  ( $k$  – целое положительное число). Крутизна спада ABX фильтра в переходной полосе тем больше, чем выше  $R$ . Характеристика фильтра Фабри-Перо (ФП) (см. рис. 6) имеет вид гребенки, что может быть нежелательно при использовании его в системах с WDM, если только все несущие не лежат в так называемом свободном спектральном диапазоне (FSR), равном расстоянию между центрами соседних полос пропускания.

Оценку числа несущих  $F$  в этом диапазоне дает отношение  $F = FSR/FWHM$ , где FWHM – ширина полосы фильтра ФП на уровне половины от максимума. Используя (2), получим  $F = \pi \cdot \sqrt{R} / (1 - R)$  [5].

Если  $R$  меняется в диапазоне 0,9–0,99, то  $F$  принимает значения от 29 до 312. Однако эта оценка еще должна быть связана с частотным планом в конкретной системе WDM.

Отличительная особенность фильтров ФП – возможность их перестройки, а значит и реконфигурации мультиплексора ввода-вывода на их основе. Для перестройки фильтра достаточно изменить  $\tau = n \cdot L / c$ , что эквивалентно изменению  $n$  – коэффициента преломления среды между зеркалами, или  $L$ . Механическое изменение расстояния  $L$  – достаточно грубая операция, она может нарушить параллельность зеркал. Поэтому обычно зеркала крепят к пьезоэлектрику и изменяют расстояние, прикладывая к нему напряжение. Но и это решение достаточно сложное. Кроме того, сами фильтры ФП не нашли должного применения в современных системах WDM, уступив место конкурентным решениям. Одно из них – интерференционные фильтры на тонких пленках.



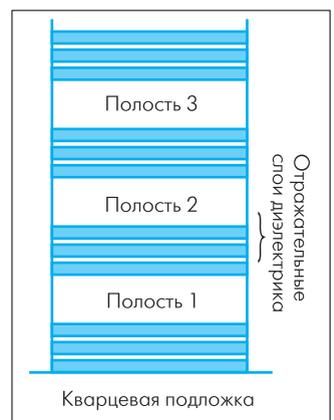
**Рис. 6. Передаточная функция фильтра на резонаторе Фабри-Перо**

**ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ТОНКИХ ПЛЕНКАХ**

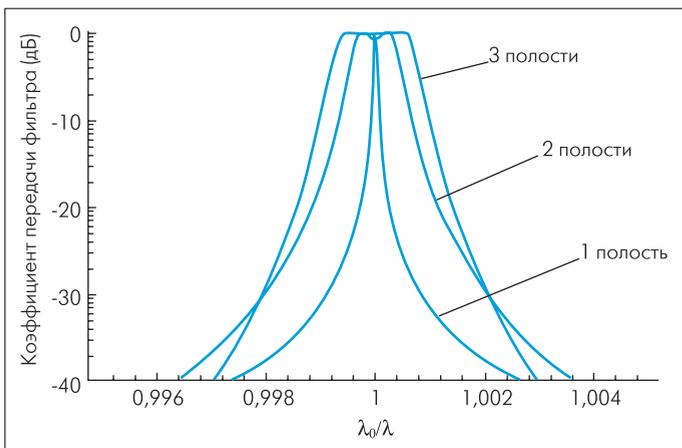
Эти фильтры применяют в современных системах с WDM так же часто, как и фильтры на решетке Брэгга. В них роль зеркал, ограничивающих резонаторную полость, играют тонкие диэлектрические пленки многократного отражения.

Фильтры на тонких пленках делятся на два типа: тонкопленочные с одной резонаторной полостью (TFF) и тонкопленочные со многими резонаторными полостями (TFMF). На рис. 7 приведена схема трехрезонаторного фильтра, полости которого разделены отражающими слоями тонких пленок (длиной  $\lambda/4$ ) с чередованием слоев с высокими (H) и низкими (L) значениями показателя преломления. Эту структуру формируют, последовательно выращивая или осаждая диэлектрические отражающие и пропускающие слои на стеклянной подложке (G). Для однорезонаторного фильтра такая структура имеет вид:  $G(HL)^9HL(HL)^9HG$ .

Из рис. 8 видно, что форма ABX фильтров зависит от числа резонансных полостей. Чем их больше, тем выше крутизна спада характеристики фильтра в переходной полосе и тем вершина ABX более плоская. В отличие от фильтров ФП, фильтры на тонких пленках пропускают только одну волну, длина которой зависит от высоты полости,



**Рис. 7. Структура тонкопленочного фильтра с тремя резонаторными полостями**



**Рис. 8. Нормированная АВХ резонаторных фильтров на тонких пленках**

однако они также имеют FSR, нормированная ширина полосы которого составляет примерно  $\pm 0,4 \lambda_0/\lambda$  [5].

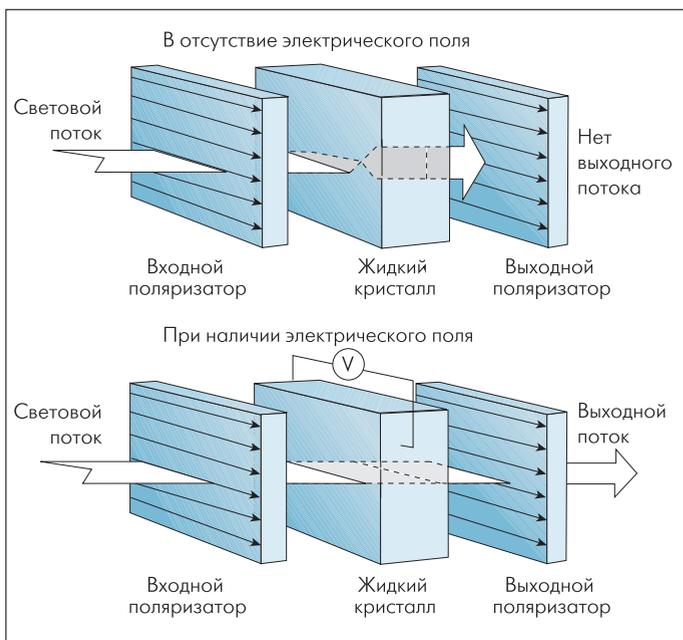
Недостаток данного типа фильтров в том, что они рассчитываются на определенную длину волны и не могут перестраиваться.

### ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ НА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

В основе фильтров — свойство жидких кристаллов (ЖК) вращать плоскость поляризации под действием электрического поля. Эта технология выглядит многообещающей в плане управляемой реконфигурации, но она только начала развиваться и еще не отработана.

Фильтр на ЖК можно представить в виде трехэлементной сборки (рис. 9). Жидкокристаллическая пленка, поворачивающая плоскость поляризации света определенной длины волны на  $90^\circ$ , помещается между поляризатором, линейно поляризующим свет, и анализатором, пропускающим только линейно-поляризованный свет с плоскостью поляризации, формируемой поляризатором.

В нормальном состоянии ЖК-пленка поворачивает плоскость поляризации на  $90^\circ$  и фильтр блокирует определенный диапазон волн — сборка работает как оптический изолятор. При приложении к кристаллу некоего напряжения плоскость поляризации поворачивается еще на  $90^\circ$  и совпадает с плоскостью анализатора. Свет заданного диапазона проходит на выход.



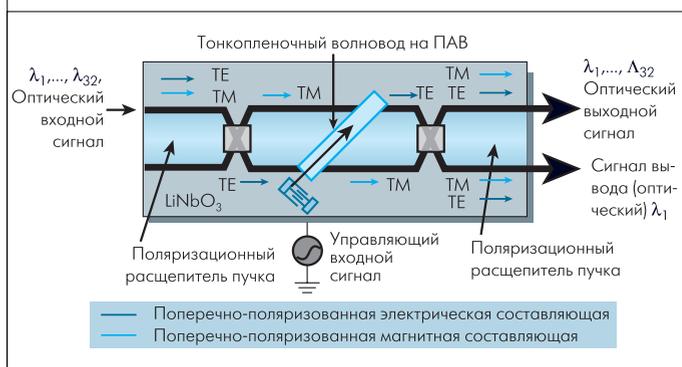
**Рис. 9. Поляризационный фильтр на жидких кристаллах**

К сожалению, фильтр на ЖК работает только с одной длиной волны, которая должна быть предварительно выделена из набора несущих, обрабатываемого мультиплексором.

### АКУСТООПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЕ ФИЛЬТРЫ

Наиболее перспективной технологией фильтрации, основанной на вращении плоскости поляризации, является акустооптическая технология [4]. Акустооптический фильтр (рис. 10) [3] представляет собой полупроводниковый кристалл ниобата лития, в котором сформированы титановые волноводы. На кристалле монтируется пьезоэлектрический вибратор акустических волн, управляемый генератором 170–180 МГц. Вибратор создает поверхностную акустическую волну (ПАВ), распространяющуюся по тонкопленочному акустическому волноводу, размещенному в центре под углом к основному световому потоку. Слева и справа от него расположены поляризационные расщепители светового потока.

Входной расщепитель разделяет входной поток на моды ТЕ (вниз) и ТМ (вверх), которые проходят через акустический волновод. ПАВ этого волновода вызывает гармоническое изменение в нем показателя преломления (возникновение акустической решетки Брэгга),



**Рис. 10. Акустооптический перестраиваемый фильтр**

создавая условия для "акустической" дифракции Брэгга или вращения на  $90^\circ$  плоскости поляризации одной из длин волн, которая и фильтруется вторым расщепителем на выходе как несущая, выводимая из мультиплексора.

Достоинство фильтра в том, что он позволяет изменять длину волны фильтрации путем изменения частоты управляющего генератора, возбуждающего ПАВ (меняется постоянная решетки Брэгга). Фильтр можно настроить на вывод одной несущей, группы несущих или всех несущих. Кроме того, у фильтров данного типа низкий уровень вносимых потерь, низкая потребляемая мощность и широкая полоса перекрытия при перестройке (порядка 80 нм в третьем окне прозрачности). Их работа не зависит от скорости передачи данных. Температурную нестабильность компенсируют специальные стабилизаторы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Montgomery Jeff D. Optical evolutions. — Telecommunications, 2000, Feb., p.101–103.
2. Слепов Н. Оптическое мультиплексирование с разделением по длине волны. — Сети, 1999, №4, с. 24–31.
3. Wavelength converter. Oki Electric Industry Co., Ltd., 1996 — <http://www.oki.co.jp/OKI/RDG/English/kikaku/vol.1/okayama/eWC.html>
4. Слепов Н. Оптические волновые конверторы и модуляторы. — ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2000, №6, с. 6–10.
5. Ramaswami, Rajiv and Sivarajan Kumar N. Optical networks: a practical perspective. — Morgan Kaufmann Publishers, Inc. San Francisco, California, 1998.