

Интегрально-оптический аналог эшелона Майкельсона, его основные свойства и приложения

А.А.Гончаров, В.В.Светиков, К.К.Свидзинский, В.А.Сычугов, Б.А. Усиевич

Проанализирована работа устройства спектрального уплотнения и разуплотнения оптического сигнала, которое можно трактовать как интегрально-оптический аналог эшелона Майкельсона. Показано, что рабочие характеристики устройства определяются его конструктивными параметрами и могут быть предварительно рассчитаны. Отмечено, что первостепенную роль в работе устройства играет порядок дифракции света m и число канальных волноводов N , образующих дисперсионный элемент. На ряде практических примеров показано, что симметрия устройства спектрального уплотнения и разуплотнения каналов связи относительно его входа и выхода обуславливает многофункциональность этого устройства. Представлены три новых возможности использования интегрально-оптического аналога эшелона. Одна из них, в частности, касается системы сбора и обработки информации в оптической линии, последовательно связывающей набор волоконных датчиков с брэгговскими решетками.

Ключевые слова: эшелон Майкельсона, интегральная оптика, волоконные световоды, волоконные датчики.

1. Введение

На рубеже XIX и XX веков А.Майкельсоном был предложен и затем создан спектральный прибор высокого разрешения [1], позже названный эшелон Майкельсона. Идея прибора была достаточно проста, но в изготовлении и сборке он был весьма сложен. В 1907 г. А.Майкельсон получил Нобелевскую премию по физике за создание прецизионных инструментов и выполнение с их помощью спектроскопических и метрологических исследований. В конце 80-х гг. XX столетия идея А.Майкельсона, заложенная в эшелоне, обрела второе и, надо сказать, очень бурное развитие. Прогресс волоконной оптики и оптических систем связи поставил задачу увеличения пропускной способности одного волокна, чего, естественно, можно достичь путем увеличения спектральной полосы сигналов, передаваемых по волокну. После многолетних попыток приспособить для этих целей всевозможного вида микроспектрографы [2], в конце 90-х годов разработки систем спектрального уплотнения пришли к идее создания интегрально-оптического аналога эшелона Майкельсона. В результате усилий многих исследователей [3–8] в настоящее время интегрально-оптический аналог эшелона Майкельсона выглядит следующим образом (рис.1).

Прежде всего, это планарная структура, представляющая собой набор одномодовых канальных волноводов различной длины (назовем их эшелонными волноводами). Увеличение длины при переходе от одного эшелонного волновода к другому является постоянным. Эшелонные канальные волноводы начинаются и заканчи-

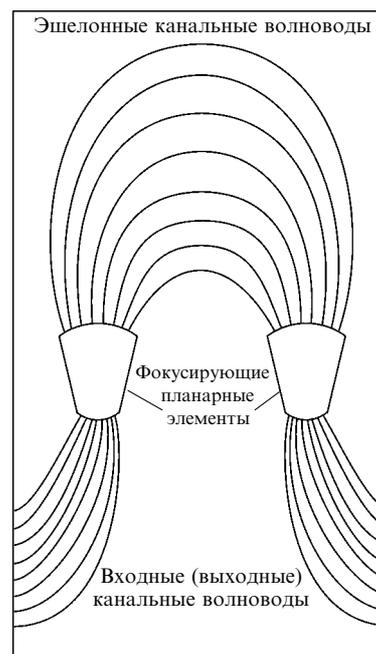


Рис.1. Оптическая схема интегрально-оптического аналога эшелона Майкельсона (AWG-мультиплексора).

ваются на окружностях, ограничивающих планарные волноводы с одной стороны. С другой стороны планарные волноводы тоже ограничены окружностями, но меньшего радиуса, и к этим границам тоже подходят канальные волноводы. С одного конца устройства они являются входными канальными волноводами, а с другого – выходными. Чаще всего устройство делают симметричным, поэтому его вход может использоваться как выход и наоборот.

Симметричная форма устройства обуславливает его многофункциональность и широкое применение в систе-

А.А.Гончаров, В.В.Светиков, К.К.Свидзинский, В.А.Сычугов, Б.А. Усиевич. Научный центр волоконной оптики Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: svetikov@kapella.gpi.ru

мах оптической связи. Изготовление подобного устройства требует использования высоких технологий, чему предшествуют, естественно, расчет, численные эксперименты и создание методов контроля его параметров. Устройство характеризуется большим количеством параметров, знание взаимосвязи которых чрезвычайно важно как для создания устройства и работы с ним, так и для расширения его многофункциональности. В связи с этим цель настоящей работы – дать ясное представление о взаимосвязи параметров устройства, об основных его свойствах, а также указать новые возможности его использования. Интегрально-оптический аналог эшелона Майкельсона часто называют phasag (phased array), или AWG-мультиплексор (Arrayed Waveguide Multiplexer). Далее мы будем использовать последнее название.

2. Анализ работы интегрально-оптического аналога эшелона Майкельсона

Интегрально-оптическое устройство типа AWG-мультиплексора служит для спектрального разделения или объединения каналов оптической связи. Оно характеризуется большим числом конструктивных параметров, основными из которых являются разность длин эшелонных канальных волноводов ΔL , их количество N и период расположения. Именно эти параметры определяют рабочие характеристики устройства, к которым относятся число разделяемых каналов K , диапазон разделяемых длин волн $\Delta\lambda$, центральная длина волны устройства λ_c , потери излучения на прохождение, величина перекрестных помех и т. д.

Для установления связи между рабочими характеристиками AWG-мультиплексора и его конструктивными параметрами рассмотрим упрощенную схему устройства, представленную на рис.2.

Прежде всего выпишем разность хода волн ΔH в соседних каналах. В максимуме интенсивности света она равна целому числу волн [9]:

$$\Delta H = \Delta L n_{ch}^* + d n^* \sin \varphi = m \lambda. \tag{1}$$

Здесь m – порядок интерференции; λ – длина волны света; ΔL – разность длин соседних канальных волноводов; d – период их расположения; n_{ch}^* и n^* – эффективные показатели преломления мод канального и планарного волноводов соответственно. Если углы φ малы, то $\sin \varphi \simeq \varphi$, и тогда

$$\Delta L n_{ch}^* + d n^* \varphi = m \lambda, \tag{2}$$

$$\varphi = \frac{m \lambda - \Delta L n_{ch}^*}{n^* d}. \tag{3}$$

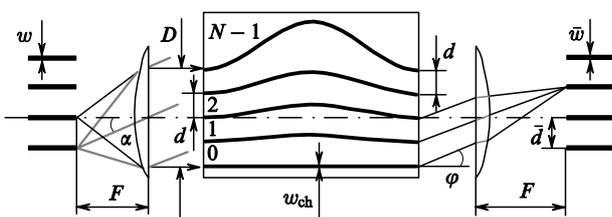


Рис.2. Упрощенная схема AWG-мультиплексора.

Изменение φ при изменении m на единицу есть $\Delta\varphi = \lambda \times (n^* d)^{-1}$. Центральная длина волны определяется условием $\varphi = 0$, тогда $\Delta L n_{ch}^* = m \lambda_c$, т. е.

$$\lambda_c = \frac{\Delta L n_{ch}^*}{m}. \tag{4}$$

Обычно AWG-устройство имеет набор канальных эшелонных волноводов с $N > 2$, поэтому интенсивность света в фокальной плоскости выходной линзы будет определяться соотношением

$$I(\varphi) = I_0 \left(\frac{\sin \alpha \sin N \beta}{\alpha \sin \beta} \right)^2, \tag{5}$$

где $\alpha = \pi w_{ch} \lambda^{-1} n^* \sin \varphi^*$; $\beta = \pi \lambda^{-1} (\Delta L n_{ch}^* + d n^* \sin \varphi)$; w_{ch} – ширина канального волновода.

При условии $\sin \beta = 0$ или

$$\pi \lambda^{-1} (\Delta L n_{ch}^* + d n^* \sin \varphi) = m \pi, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \tag{6}$$

функция $I(\varphi)$ имеет максимумы, т. е. условие максимума сохраняется при переходе от двух каналов к N каналам. Обычно дифракция света на N щелях порождает $N - 1$ дополнительных минимумов в распределении света. Условием, определяющим угловое расположение этих минимумов, является равенство $\sin N \beta = 0$ или

$$\pi \lambda^{-1} N (\Delta L n_{ch}^* + d n^* \sin \varphi_i) = \pi i, \tag{7}$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, N - 1, N + 1, \dots$$

Учитывая, что $\sin \varphi \approx \varphi$, имеем

$$\varphi_i = \frac{i}{N} \frac{\lambda}{d n^*} - \frac{\Delta L n_{ch}^*}{d n^*}. \tag{8}$$

Из условия (8) определим угловую ширину максимума в распределении интенсивности света. Пусть $\delta\varphi$ – ширина максимума по нулевому уровню. Тогда, определив из (8) углы φ_{N-1} и φ_{N+1} , найдем

$$\delta\varphi = \frac{2\lambda}{N d n^*}. \tag{9}$$

Отметим здесь, что отношение $\Delta\varphi/\delta\varphi = N/2$.

Положим теперь, что необходимо спектрально разделить спектральные каналы с длинами волн, лежащими в диапазоне $\lambda_1 - \lambda_2$. Пусть центральная длина волны $\lambda_c = \frac{1}{2}(\lambda_1 + \lambda_2)$, и тогда $\lambda_1 = \lambda_c - \Delta\lambda/2$ и $\lambda_2 = \lambda_c + \Delta\lambda/2$. Весь спектр разделяемых длин волн находится в одном порядке интерференции m . Величину m можно определить из условия

$$\Delta L n_{ch}^* + n^* d \frac{\Delta\varphi}{2} = m \left(\lambda_c + \frac{\Delta\lambda}{2} \right) \tag{10}$$

или

$$\Delta L n_{ch}^* - n^* d \frac{\Delta\varphi}{2} = m \left(\lambda_c - \frac{\Delta\lambda}{2} \right). \tag{11}$$

С учетом $\Delta L n_{ch}^* = m \lambda_c$ и $\Delta\varphi = \lambda/(n^* d)$ получим

$$m = \frac{\lambda_c}{\Delta\lambda}. \tag{12}$$

Отметим, что формула (12) определяет порядок m , в котором целиком размещается диапазон разделяемых волн. Из соотношения (12) можно установить связь между шириной диапазона $\Delta\lambda$ разделяемых длин волн и величиной ΔL :

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_c^2}{n_{ch}^* \Delta L}. \quad (13)$$

Поскольку угловой размер разделяемого диапазона длин волн $\Delta\varphi$ в $N/2$ раз превышает угловую ширину $\delta\varphi$ главного максимума интенсивности света, то число разделяемых спектральных каналов K должно удовлетворять неравенству $N/2 \geq K$. Равенство $N = 2K$ по сути определяет минимально возможное число N канальных эшелонных волноводов в устройстве спектрального разделения каналов связи.

Как известно, произведение mN является важнейшей характеристикой спектрального прибора ($mN = \lambda/\delta\lambda$). В случае интегрально-оптического аналога эшелона Майкельсона оно имеет несколько иное выражение, а именно:

$$mN = \frac{2\lambda}{\delta\lambda} \frac{\bar{d}}{\bar{w}^*}, \quad (14)$$

где $\delta\lambda$ – спектральное разделение компонент оптического сигнала; \bar{d} – расстояние между выходными канальными волноводами; \bar{w}^* – эффективная ширина выходного канала. Иной вид выражения (14) обусловлен тем, что при его выводе использован более жесткий критерий разрешения двух соседних спектральных линий, чем критерий Рэля. Этот критерий определяет уровень развязки между соседними линиями в -30 дБ и менее. Из соотношения (14) следует, что число канальных эшелонных волноводов в наборе N волноводов, приходящихся на один связной канал, должно удовлетворять условию

$$\frac{N}{K} \geq 2 \frac{\bar{d}}{\bar{w}^*}. \quad (15)$$

В реализованных до настоящего времени демультиплексорах значение N/K (число канальных эшелонных волноводов, приходящихся на один связной канал) изменяется от 2.6 в [10] до 6.3 в [11].

Обычно концы канальных эшелонных волноводов эквидистантно располагаются на окружности радиусом R , являющейся границей планарного участка волновода, обеспечивающего фокусировку света на противоположной границе участка [12]. Эта граница также представляет собой окружность, но радиусом $r = R/2$, и она является началом входных или выходных канальных волноводов (рис.3). Прямая линия, на которой лежат центры окружностей с радиусами $r_1 = R$ и $r_2 = R/2$, является осью планарного фокусирующего элемента AWG-устройства. Канальные эшелонные волноводы, а также входные (выходные) канальные волноводы обычно располагаются симметрично относительно этой оси элемента фокусировки. Входные (выходные) каналы устройства находятся вблизи оси фокусирующего элемента на окружности радиусом $r_2 = R/2$, что обеспечивает минимальные aberrации света при фокусировке его на выходных каналах и сохранность распределения засветки канальных волноводов набора при использовании различных входных каналов.

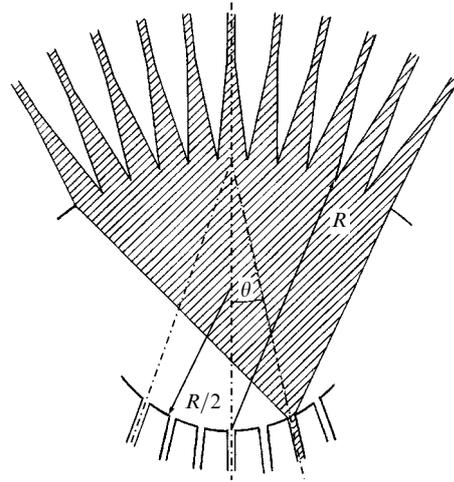


Рис.3. Оптическая схема фокусирующего планарного элемента AWG-мультиплексора.

Обычно период d расположения канальных волноводов на окружности радиусом $r = R$ выбирается таким, чтобы обеспечить как минимальную туннельную связь между канальными эшелонными волноводами, так и по возможности большой коэффициент η пропускания света устройством, который определяется соотношением

$$\eta = \frac{w_{ch}}{d}. \quad (16)$$

Уменьшение d до предельно возможной величины, например до $d \approx 2w_{ch}$, позволяет получить $\eta \approx 50\%$; дальнейшее увеличение η возможно при уширении концов канальных волноводов. Однако это уширение приводит к явной туннельной связи волноводов и к необходимости учета фазовых изменений на фронте распространяющейся в AWG-мультиплексоре волны [13].

С помощью метода распространяющегося пучка (BPM) [14] нами было изучено влияние туннельной связи между канальными волноводами, возникающей за счет адиабатических уширений на концах канальных эшелонных волноводов, на качество фокусировки света в выходных волноводах, т.е. на величину перекрестных помех. Установлено, что изменение параметров этих областей существенно не влияет на уровень перекрестных помех даже тогда, когда эти области слегка перекрываются вблизи границы планарного волновода. И наоборот, показано, что при наличии уширений на выходных волноводах их влияние на величину перекрестных помех достаточно велико и существуют оптимальные размеры уширений, которые следует использовать в устройстве.

Использование уширений на концах канальных волноводов существенно снижает потери света на пропускание в демультиплексоре. Следовательно, при симметричной форме устройства, т.е. при идентичности входа и выхода, AWG-устройство является эффективной системой отображения (1:1) источника света на входе в его изображение на выходе (на одной длине волны) и наоборот.

Допустим теперь, что на центральный входной канал демультиплексора подан спектрально широкий оптический сигнал. На выходе AWG-устройства, например в центральном канале, мы получим набор узких спектральных линий, эквидистантно располагающихся относи-

тельно друг друга по шкале частот. Диапазон частот, разделяющий две соседние линии, называют обычно свободной спектральной областью (FSR) (или областью дисперсии). Спектральные линии, о которых идет здесь речь, – это результат интерференции света в устройстве в различных порядках m дифракции. Поэтому величина свободной спектральной области F_{FSR} может быть найдена из условия

$$\Delta L(n_{ch}^* + \Delta n_{ch}^*) = (m + 1) \frac{c}{f + F_{FSR}}, \quad (17)$$

где f – частота, соответствующая одному спектральному пику излучения; $f + F_{FSR}$ – частота ближайшего пика излучения. Полагая, что $f \gg F_{FSR}$, получим

$$F_{FSR} = \frac{c}{n_{gr}^* \Delta L}, \quad (18)$$

где $n_{gr}^* = n_{ch}^* - \lambda dn_{ch}^*/d\lambda$ – групповой эффективный показатель преломления канального эшелонного волновода; c – скорость света. Поскольку диапазон частот F_{FSR} не превышает обычно 10 ТГц, выражение (18) может быть представлено в несколько ином виде:

$$|\Delta\lambda|_{FSR} = \frac{\lambda^2}{n_{gr}^* \Delta L}. \quad (19)$$

Отметим, что соотношение (19) практически совпадает с выражением (13), полученным выше, и это неудивительно. В проведенном здесь рассмотрении учтена дисперсия света в канальном волноводе.

Если теперь на вход центрального входного канала подан сигнал, спектральная ширина которого $\Delta\lambda$ не превышает $|\Delta\lambda|_{FSR}$, то на выходе мы получим его в виде спектральных компонент во всех выходных каналах AWG-устройства, причем угловая дисперсия сигнала, т. е.

$$\frac{d\theta}{df} = -\frac{m\lambda^2 n_{gr}^*}{n^* dcn_{ch}^*}, \quad (20)$$

будет теперь определять положение выходных каналов относительно оси планарных фокусирующих элементов. Обычно величина $d\theta/df$ используется при проектировании AWG-устройства [13].

3. Некоторые приложения AWG-мультиплексора

Напомним, что прежде всего интегрально-оптическое устройство типа AWG-мультиплексора может служить для спектрального разделения или объединения каналов связи, т. е. выполнять функции демультиплексора и мультиплексора оптических сигналов. Эти две функции AWG-устройства послужили главным стимулом для его разработки и совершенствования. В настоящее время потери на проход в данных устройствах составляют менее 2 дБ [15], что открывает возможность их использования в генераторах спектральных сигналов с эквидистантным расположением излучения по длинам волн, определенным связными стандартами. В этих генераторах интегрально-оптический аналог эшелона Майкельсона работает на проход [16]. Однако возможен также интегрально-оптический эшелон, работающий на отражение, т. е.

автоколлимационный режим работы эшелона в генераторе спектрально уплотненных сигналов.

Возможность такой работы становится очевидной при рассмотрении рис.2. Допустим, в лазере с обычным AWG-устройством спектрально уплотненный сигнал идет слева направо; пройдя набор эшелонных волноводов, он разлагается по спектру и попадает в канальные волноводы, представляющие собой, например, активные волноводы. Эти активные волноводы заканчиваются зеркалами, отражающими усиленные спектральные компоненты назад. На обратном пути все спектральные компоненты излучения снова попадают в исходный канал, который тоже может иметь зеркало. В таком случае мы получаем генератор излучения с многими частотами, имеющим два планарных участка внутри резонатора. Обратим внимание на то, что на левый торец эшелонных волноводов усиленное излучение всех компонент сигнала приходит с плоским вертикальным фронтом и на этом месте может быть установлено плоское зеркало. Скорее всего, оно должно быть полностью отражающим. В этом случае мы будем иметь, по сути, селективно отражающее зеркало, спектр отражения которого дискретен и зависит от места ввода входного сигнала. Преимущества многочастотного генератора с таким зеркалом очевидны, т. к. в нем используется только один планарный участок волновода и по-прежнему возможна независимая временная модуляция каждой спектральной компоненты излучения [17].

Следует отметить, что при таком селективно отражающем зеркале эквидистантное расположение зеркально отражающих левых торцов эшелонных канальных волноводов не требуется. Отметим также, что в представленном здесь многочастотном источнике излучения AWG-устройство не выполняет функции мультиплексирования (рис.4).

Симметричный AWG-мультиплексор, в котором число входных каналов равно числу выходных, может служить спектральным селектором излучения заданной длины волны. На рис.5,а показана схема соединения входных и выходных каналов селектирующего устройства, а также необходимых для его работы интегрально-оптических элементов. На вход селектора подается спектрально уплотненный сигнал и на выходе получается сигнал требуемой длины волны. Для работы устройства каждый выходной канал (кроме одного) подключен через оптический усилитель на соответствующий ему вход мульти/демультиплексора. Выбор сигнала с необходимой длиной волны осуществляется путем включения соответствующего усилителя. Если все усилители, кроме одного, выключены, на выходе устройства имеется только

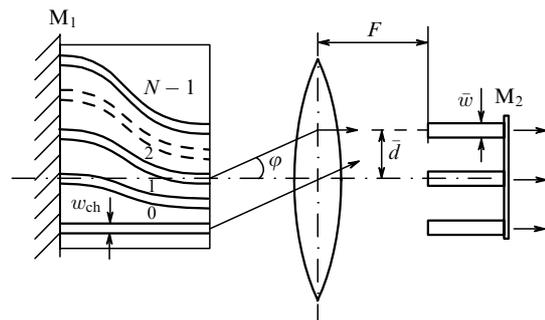


Рис.4. Автоколлимационная схема многочастотного лазера на основе AWG-мультиплексора (M_1 , M_2 – зеркала).

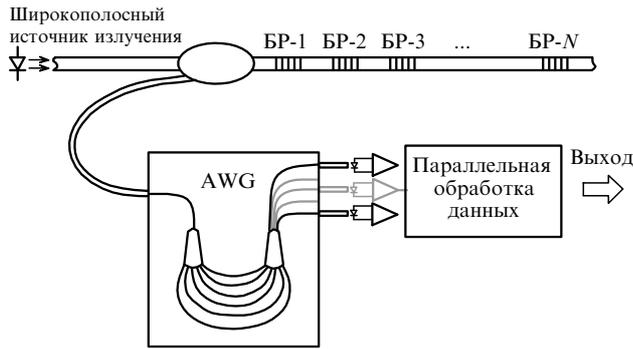


Рис. 6. Оптическая схема сбора и обработки данных последовательно соединенных волоконных датчиков, использующая AWG-мультиплексор; БР- i – брэгговское зеркало i -го канала.

ровать группу выходных каналов AWG-устройства, например каналы № 8, 9, 10 и 11, то на них последовательно будет появляться весь спектр излучения спектрально уплотненного сигнала, если этот сигнал последовательно подается на входы № 1, 5, 9 и 13. Более внимательное рассмотрение табл. 1 показывает, что существуют четыре комбинации входных (N_{in}) и выходных (N_{out}) каналов, приводящие к одному результату.

Если спектрально уплотненный сигнал содержит K спектральных компонент, то необходимо, чтобы $N_{in}N_{out}$ было равно K . Обозначив число работающих комбинаций N_{in} и N_{out} через C , получим

$$C = \frac{K}{N_{in}} = N_{out}. \quad (22)$$

Описанное здесь свойство AWG-устройства можно использовать для построения спектрального селектора каналов. Обычно он состоит из демультиплексора и следующего за ним древовидного набора переключателей. Для выделения одного канала из K обычно используется $S = K - 1$ переключатель типа (2×1) . Однако при разбиении спектрального диапазона сигнала на N_{in} поддиапазонов число требуемых переключателей может быть сокращено в несколько раз. Так, например, если $K = 2^{2n}$, то число переключателей сокращается в $(2^n + 1)/2$ раз [18].

Рассмотрим, наконец, одно из перспективных приложений AWG-устройства в сенсорной технике. Речь идет об использовании демультиплексора в устройстве опроса сенсоров, которыми являются участки волоконного световода с записанными в них брэгговскими решетками. Изменение параметров волокна с решеткой при изменении, например, температуры объекта приводит к изменению длины волны света, отражаемого решеткой, которое должно быть зафиксировано, чтобы отслеживать температуру объекта. В последнее время для этой цели предложено использовать схему, основным элементом которой является демультиплексор (рис. 6).

Для измерения сдвига линии отражения в демультиплексоре используются два его соседних канала, причем положение длины волны отраженного решеткой света λ_{Br} приходится на середину спектрального промежутка между каналами (рис. 7). Изменение длины волны отраженного света оценивается по изменению

$$\rho(\lambda_{Br}) = \lg \frac{I_{k+1}(\lambda_{Br})}{I_k(\lambda_{Br})}, \quad (23)$$

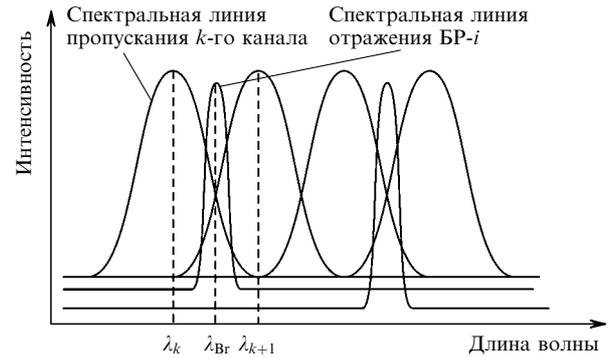


Рис. 7. Спектральное расположение каналов пропускания AWG-мультиплексора и волоконных датчиков с брэгговскими решетками.

где I_{k+1} и I_k – интенсивности сигналов отраженного света, регистрируемые в соседних каналах демультиплексора. Линейная зависимость между $\rho(\lambda_{Br})$ и $\Delta\lambda_{Br}$ была продемонстрирована в достаточно широком диапазоне изменения параметров волокна [19], причем утверждается, что погрешность измерения $\Delta\lambda_{Br}$ меньше 0.5 пм.

Таким образом, проведенные в настоящей работе анализ и обзор основных свойств интегрально-оптического аналога эшелона Майкельсона (AWG-устройства) демонстрируют широкие возможности его использования в современных системах оптической связи и в системах сбора и обработки информации.

Авторы работ благодарят РФФИ за финансовую поддержку работы (грант № 03-02-16266а).

1. Michelson A.A. *Astrophys. J.*, **8**, 37 (1898); *Proc. Am. Acad. Arts Sci.*, **35**, 109 (1899).
2. Сычугов В.А., Еленский В.Г. *Зарубежная электроника*, № 12, 50 (1983).
3. Smit M.K. *Electron. Lett.*, **24**, 385 (1988).
4. Dragone C. *Electron. Lett.*, **24**, 942 (1988).
5. Takahashi H., Suzuki S., Kato K., Nishi I. *Electron. Lett.*, **26**, 87 (1990).
6. Vellekoop A., Smit M. *J. Lightwave Technol.*, **9** (3), 310 (1991).
7. Dragone C. *J. Opt. Soc. Am. A*, **7** (11), 2081 (1990).
8. Dragone C. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **3**, 812 (1991).
9. Ландсберг Г.С. *Оптика* (М.: Наука, 1976, с. 209–211).
10. Takada K., Abe M., Shibata M., Ishii M., Okamoto K. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **13** (10), 1182 (2001).
11. Tachikawa Y., Inoue Y., Ishii M., Nozawa T. *J. Lightwave Technol.*, **14** (6), 977 (1996).
12. Takahashi H., Oda K., Toba H., Inoue Y. *J. Lightwave Technol.*, **13** (3), 447 (1995).
13. Smit M., Cor van Dam. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **2** (2), 236 (1996).
14. Handley G.R. *IEEE J. Quantum Electron.*, **28** (1), 363 (1992).
15. Larsen B.H., Nielsen L.P., Zenth K., Leich L., Laurent-Lund C., Andersen L.-U.A., Mattsson K.E. *Proc. ECOC'2003* (Rimini, Italy, 2003, p. 366).
16. Zirngill M., Joyner C.H., Doerr C.R., Stulz L.W., Presby H.M. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8** (7), 870 (1996).
17. Свидзинский К.К., Гончаров А.А., Качуровский Ю.Г., Сычугов В.А. Многочастотный источник лазерного излучения для ВОЛС, Заявка на патент № 2002106222/28. Приоритет от 12.03.2003, положительное решение от 13.02.2004.
18. Свидзинский К.К., Гончаров А.А., Кузьмин С.В., Светиков В.В., Сычугов В.А., Усиевич Б.А. Оптический волноводный спектральный переключатель, Заявка на патент № 2004100689.
19. Sano Y., Yoshino T. *J. Lightwave Technol.*, **21** (1), 132 (2003).