

Д. т. н. В. Ш. БЕРИКАШВИЛИ¹, к. т. н. Н. Т. КЛЮЧНИК,
к. т. н. М. Я. ЯКОВЛЕВ

Россия, г. Москва, ЦНИТИ «Техномаш-ВОС»;
¹Московский государственный открытый университет
E-mail: berikashvily@yandex.ru, optdevice@yandex.ru

Дата поступления в редакцию
27.12.2010 г.

Оппонент д. т. н. В. В. ДАНИЛОВ
(ДонНУ, г. Донецк)

ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ И ФИЛЬТРЫ НА ОСНОВЕ КОЛЬЦЕВЫХ МИКРОРЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Проведен анализ исследований в области создания высокоскоростных модуляторов и фильтров на основе кольцевых микрорезонаторов. Рассмотрены особенности микрорезонаторных структур в фазовых модуляторах и интерферометрах Маха–Цандера.

В настоящее время во всем мире интенсивно ведутся работы по созданию широкополосных и высокоскоростных цифровых волоконно-оптических систем передачи информации (ВОСП) [1—3]. В таких системах используется временное и спектральное уплотнение каналов связи. Электронные методы временного уплотнения являются наиболее распространенными, однако они достигли своего предела — 40 Гбит/с.

С целью дальнейшего увеличения пропускной способности ВОСП в последнее десятилетие интенсивно развивается техника многоволнового уплотнения оптических несущих (спектральное уплотнение каналов). При этом несколько десятков волн разной длины обеспечивают передачу информации по одному волоконному световоду. Суть метода состоит в том, что несколько информационных цифровых потоков, переносимых каждый на своей оптической несущей волне, с помощью спектральных уплотнителей — оптических мультиплексоров — объединяются в один оптический поток, который затем вводится в оптическое волокно линии передачи. На приемной стороне с помощью спектральных разуплотнителей (демультиплексоров) производится обратная операция демультиплексирования. Отметим, что в качестве и мультиплексоров, и демультиплексоров используются одни и те же обратимые оптические устройства спектрального уплотнения, которые обычно называют демультиплексорами. Характеристики демультиплексоров определяются типом используемых в них дисперсионных элементов [4]. Эти элементы обеспечивают спектральную фильтрацию оптических несущих, тем самым позволяя выделить отдельные несущие на приемной стороне.

В зарубежной литературе волоконно-оптические системы со спектральным уплотнением каналов называются WDM-системами (wavelength division multiplexing systems) [4]. В настоящее время уже

созданы волоконно-оптические WDM-системы с пропускной способностью более 1 Тбит/с (терабитные системы). В начале 2010 года компания NTT (Япония) в своем пресс-релизе сообщила о новом рекорде в скорости передачи данных по одному волокну — 69,1 Тбит/с. Столь высокий результат был достигнут при длине волокна 240 км с использованием 432 оптических каналов со скоростью передачи 160 Гбит/с по каждому из них.

Дальнейшее развитие WDM-систем связано с необходимостью перераспределения потоков данных в волоконно-оптических сетях связи, с вводом в действие новых узлов и исключением старых, адаптацией систем к неисправностям. Для этого необходимо создание WDM-маршрутизаторов, разработка мультиплексоров с оперативной перестройкой структуры.

Другим важным направлением в области создания компонентов высокоскоростных цифровых ВОСП является создание высокоскоростных модуляторов оптической несущей.

В настоящее время для цифровой передачи данных на скорости до 1 Гбит/с наиболее популярны передатчики с прямой модуляцией тока лазерного диода ввиду их меньшей стоимости. При больших скоростях передачи такой тип модуляции приводит к частотной неустойчивости лазера, что негативно сказывается на передаче данных. Поэтому в высокоскоростных линиях передачи данных используют одночастотные полупроводниковые лазеры непрерывного излучения (CWL — continue wave laser) и внешние модуляторы (EM — external modulator). Обычно для внешней модуляции используют электрооптические модуляторы на основе интегрально-оптических интерферометров Маха–Цандера или электроабсорбционные модуляторы, основанные на эффекте Франца–Келдыша [1, 2]. Высокая стоимость устройств интегральной оптики ранее ограничивала применение таких модуляторов, однако совершенствование и удешевление процесса производства позволило начать их серийное производство.

Внешняя модуляция имеет большое значение для повышения предельной частоты модуляции, широкополосности, глубины модуляции, стабильной передачи на одной частоте при высоком коэффициенте экстинкции. Вместе с тем, внешний модулятор увеличивает стоимость и сложность системы, вносит дополнительные оптические потери и усложняет управ-

ление состоянием поляризации излучения. Важными задачами при создании внешнего модулятора является снижение управляющего напряжения, повышение глубины модуляции, обеспечение селективных спектральных свойств модулятора.

В последние годы для создания рассмотренных выше компонентов ВОСП все больший интерес представляют кольцевые микрорезонаторы [5—8]. Проводимые исследования показывают перспективность их использования в таких областях, как фильтрация оптических несущих, мультиплексирование и демultipлексирование, модуляция излучения, маршрутизация оптических сигналов.

В настоящей работе представлен краткий анализ работ в области создания высокоскоростных модуляторов и фильтров на основе кольцевых микрорезонаторов. Рассмотрена также возможность использования микрорезонаторных структур для фильтрации, селекции оптических каналов и создания коммутаторов.

Фильтры на основе кольцевых микрорезонаторов

Использование интегрального кольцевого резонатора в качестве полосового фильтра рассмотрено в [7—10]. Простейший кольцевой микрорезонатор представляет собой два параллельных прямых волновода и расположенный в непосредственной близости между ними резонатор, который выполнен в виде кольцевого волновода (рис. 1, а). Такая схема фильтра используется в мультиплексорах с «add-drop»-конфигурацией, обеспечивающих функцию вставки/выделения сигналов с оптическими несущими волнами различной длины. Теоретический анализ кольцевых резонаторов приведен, в частности, в [11—13].

Принцип действия фильтра на основе кольцевого микрорезонатора показан на рис. 1, б. Излучение направляется на вход 1 прямого волновода, проходит по нему, при этом часть поступающей энергии попадает в кольцо резонатора. Связь канального волновода и кольцевого резонатора осуществляется перекрытием их мод на участке L_1 , где расстояние между прямым и кольцевым волноводами наименьшее. Кольцевой резонатор выбирает преимущественно резонансные оптические частоты (длины волн) и через область связи L_2 передает колебания второму прямому волноводу, действуя как направленный ответвитель. В зависимости от степени связи передача осуществляется в большей или меньшей степени, что характеризуются общими потерями фильтра. Таким образом,

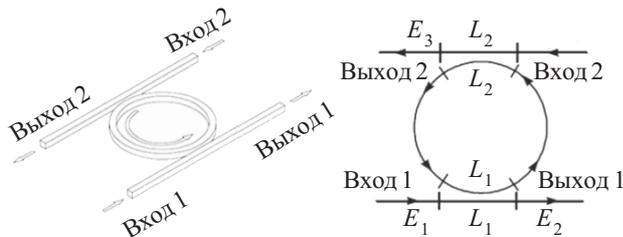


Рис. 1. Пространственная (а) и схематическая (б) структура спектрального фильтра на основе кольцевого резонатора

разом, кольцевой резонатор действует как узкополосный фильтр, выделяющий только резонансные частоты. Условие резонанса определяется выражением $m\lambda = Ln$, $m=1, 2, \dots$, (1)

где L и n — длина окружности и эффективный показатель преломления кольцевого волновода микрорезонатора, соответственно.

Мощность оптического излучения, передаваемого на выходы 1 и 2 ($P_{\text{ВЫХ1}}$ и $P_{\text{ВЫХ2}}$, соответственно), определяется выражениями [12,14]

$$\frac{P_{\text{ВЫХ1}}}{P_{\text{ВХ1}}} = \frac{|E_2|^2}{|E_1|^2} = \frac{|\tau_1 - \tau_2 e^{-j\varphi_r} \chi_r|^2}{|1 - \tau_1 \tau_2 e^{-j\varphi_r} \chi_r|^2}, \quad (2)$$

$$\frac{P_{\text{ВЫХ2}}}{P_{\text{ВХ1}}} = \frac{|E_3|^2}{|E_1|^2} = \frac{|-k_1 k_2 e^{-j\varphi_r/2} \sqrt{\chi_r}|^2}{|1 - \tau_1 \tau_2 e^{-j\varphi_r} \chi_r|^2}, \quad (3)$$

где $P_{\text{ВХ1}}$, $P_{\text{ВХ2}}$ — мощность излучения на входах 1 и 2, соответственно;

E_1, E_2 — напряженности электрического поля;

τ_1, τ_2 — коэффициенты передачи на участках связи между волноводами;

k_1, k_2 — коэффициенты связи между кольцевым и прямым волноводами;

φ — фазовый набег при прохождении оптического излучения по кольцевому волноводу;

χ_r — фактор потерь в кольцевом резонаторе.

Параметры k и τ связаны соотношением $k^2 + \tau^2 = 1$.

Фазовый набег и фактор потерь определяются выражениями

$$\varphi_r = \frac{4\pi^2}{\lambda_0} R n_g, \quad (4)$$

$$\chi_r = 10^{\frac{-\alpha_r}{20}}, \quad \alpha_r = 2\pi R \alpha_{dB}, \quad (5)$$

где R — радиус кольцевого резонатора;

n_g — показатель преломления волновода;

α_{dB} — коэффициент оптического затухания волновода.

На рис. 2 приведены рассчитанные по формулам (2) и (3) фрагменты спектральных характеристик фильтра для $R=50$ мкм; $k=0,5$; $\alpha_{dB}=1$ дБ/см и $n_g=1,5$. Из рисунков видно, что имеются характерные пики поглощения интенсивности излучения на выходе 1 и резонансные полосы увеличения интенсивности на выходе 2.

Важной характеристикой фильтра является свободный спектральный интервал FSR (free spectral range), определяемый величиной промежутка между соседними резонансными пиками. Ширина полосы фильтра $\Delta\lambda$ определяется по уровню 0,5 (−3 дБ) от максимума сигнала на выходе 2.

На основе кольцевых микрорезонаторов могут строиться более сложные многорезонаторные фильтры, используемые в WDM-устройствах. Один из примеров такого фильтра приведен на рис. 3. Его можно выполнить с помощью планарных кольцевых резона-

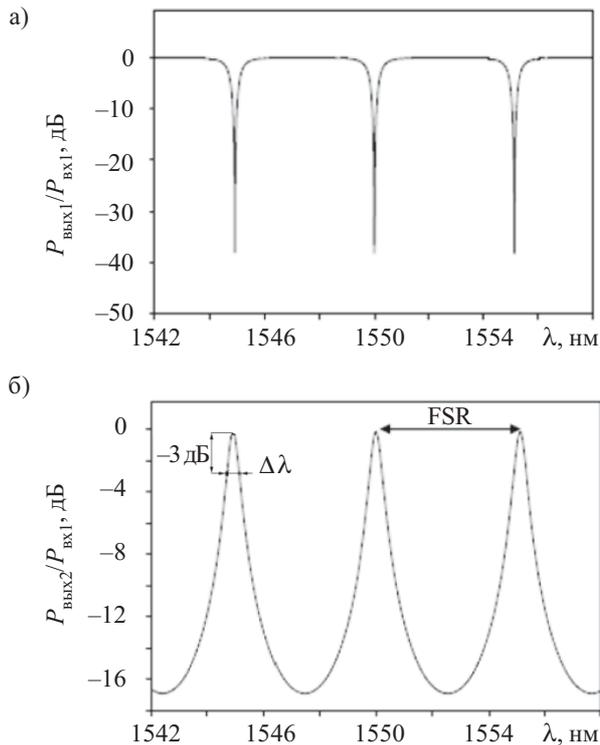


Рис. 2. Спектральные характеристики фильтра на основе кольцевого резонатора на выходе 1 (а) и на выходе 2 (б)

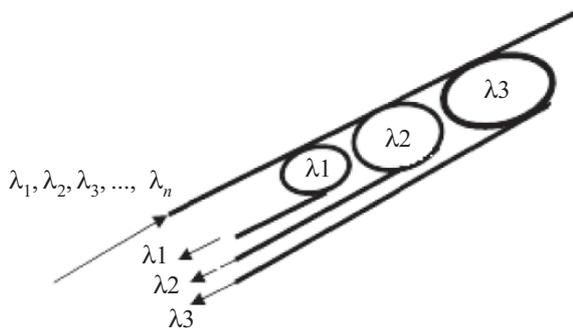


Рис. 3. Структурная схема селектора волн разной длины на основе кольцевых микрорезонаторов

торов разного размера, расположенных вдоль магистрального волновода. Такое устройство обеспечивает разделение сигналов с разной длиной оптической несущей волны по отдельным каналам.

Модуляторы на основе кольцевых резонаторов и интерферометра Маха–Цандера

В настоящее время для осуществления внешней модуляции оптического излучения в ВОСП успешно применяются планарные интерферометры Маха–Цандера, выполненные на пластинах ниобата лития (LiNbO₃) [13,15]. Монокристаллический ниобат лития обладает уникальными электрооптическими свойствами, прозрачен в диапазоне длин волн, используемом в ВОСП (1,2—1,6 мкм). Технология создания в пластинах ниобата лития оптических волноводов в приповерхностном слое за счет диффузии титана уже хорошо отработана. Кроме того, на поверхность вдоль

одного или двух каналов наносят металлические электроды. При подаче напряжения на электроды происходит изменение показателя преломления в волноводе, что приводит к увеличению или уменьшению (в зависимости от полярности прикладываемого напряжения) фазовой задержки.

Схематическое изображение модулятора на основе интерферометра Маха–Цандера с одним плечом модуляции приведено на рис. 4, а.

Интерферометр образован двумя параллельно расположенными волноводами 3 и 4, связанными на входе и выходе разветвителями Y-типа. При вводе излучения I от одночастотного лазера в канал 2 входной разветвитель делит оптический поток на две равные части, которые проходят разные плечи интерферометра, после чего суммируются в канале 7 выходного Y-разветвителя с учетом фазовых соотношений. Вдоль волноводных каналов 3 и 4, являющихся плечами интерферометра, нанесены электроды 5 и 6. Приложенное электрическое поле вследствие электрооптического эффекта изменяет показатель преломления, что вносит фазовый сдвиг такой величины, при которой волны на выходе (в общем плече разветвителя) могут оказываться либо в фазе, либо в противофазе. В результате интерференции волн это приводит к изменению интенсивности оптического излучения на выходе интерферометра. Для снижения управляющего напряжения необходимо увеличивать длину канала 3 и электродов или использовать схему, приведенную на рис. 4, б, где электроды канала 4 действуют в противофазе с электродами канала 3. В обоих случаях емкость электродов увеличивается, и это служит препятствием для повышения быстродействия модулятора.

Для получения коэффициента модуляции порядка 90% (или коэффициента экстинкции 10 дБ) в электрооптических модуляторах, используемых в современных ВОСП, достаточно напряжения электрического сигнала 2,5 В [1]. Такие модуляторы могут использоваться для модуляции света цифровыми сигналами со скоростью до 40 Гбит/с.

Проведенные в последние годы исследования показали перспективность создания оптических моду-

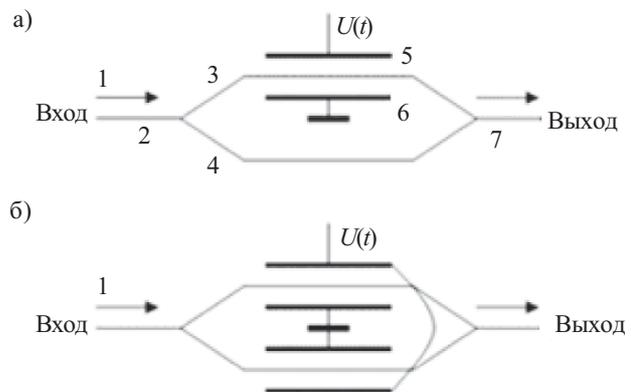


Рис. 4. Схемы модуляторов на основе интерферометра Маха–Цандера:

а — с одним плечом модуляции; б — с двумя противофазными плечами модуляции

ляторов на основе кольцевых микрорезонаторов [16—20].

Одна из возможных реализаций микрорезонаторной структуры в виде погруженных (диффузных) волноводов на пьезоэлектрической пластине из LiNbO_3 в сочетании с металлическими электродами позволяет создать устройство, показанное схематически на рис. 5, а.

Как и в случае микрорезонаторного фильтра, рассмотренного выше (см. рис. 1), кольцевой резонатор и прямой волновод находятся в непосредственной близости друг к другу, при этом часть поступающей световой энергии переходит в резонатор за счет направленной оптической связи. В микрорезонаторе часть этой энергии направляется вдоль окружности резонатора и после совершения полного витка интерферирует с входящим полем волновода. На резонансных частотах, когда оптическая длина пройденного пути кратна эффективной длине волны, интерференция в области связи приводит к сложению волн резонатора и волновода при совпадении по фазе. Эта конструктивная связь на основе интерференции может привести к усилению электромагнитного поля и, соответственно, к увеличению мощности на выходе волновода и в резонаторе.

Передаточная функция T такого резонатора определяется выражением [12]

$$T(\varphi) = \frac{|E_{\text{вых}}|^2}{|E_{\text{вх}}|^2} = \frac{|\tau - e^{-j\varphi_r} \chi_r|^2}{|1 - \tau e^{-j\varphi_r} \chi_r|^2}, \quad (6)$$

где τ — коэффициент передачи на участке связи между кольцевым и прямым волноводами.

В непосредственной близости от кольцевого волновода размещается управляющий электрод, который обычно выполняют также в виде кольца. При приложении к управляющему электроду напряжения модулирующего сигнала происходит изменение величины показателя преломления материала кольцевого волновода, а следовательно, изменяется значение фазового набега φ . В результате происходит модуляция интенсивности оптического излучения, подаваемого на вход кольцевого модулятора, что иллюстрируется на рис. 5, б.

Это один из принципов создания высокоскоростных модуляторов, позволяющих получать модуляцию оптического излучения на выходе с предельной частотой свыше 10 ГГц.

Особенностью кольцевых микрорезонаторов являются их малые размеры (диаметр от нескольких десятков до сотен микрон) и, следовательно, малые радиусы изгиба. Для поддержания оптического поля в таком резонаторе необходима большая разница между показателями преломления световедущей сердцевины и оптической оболочки. Поэтому такие резонаторы изготавливают путем травления в фосфиде и арсениде галлия (GaAsP , GaAs), у которых показатель преломления $n=2,5—2,8$. Пассивные кольцевые резонаторы в форме трека были реализованы в материале GaInAsP и AlGaAs-GaAs [8, 21]. В последнее время появились сообщения о создании интегрально-оптических планарных микрорезонаторных структур с использованием кварца, кремния [16, 19, 22], электрооптических полимеров [18, 21].

В [17] показана возможность применения кольцевого микрорезонатора для модуляции оптического излучения с частотой до 165 ГГц. Кольцевой микрорезонатор был выполнен из электрооптического полимера на базе хромофоров. Диаметр кольцевого волновода в данном случае составлял около 2 мм. Структура такого модулятора приведена на рис. 6.

Резонатор может быть выполнен не только в виде кольца, но и в виде диска, эллипса или вытянутого

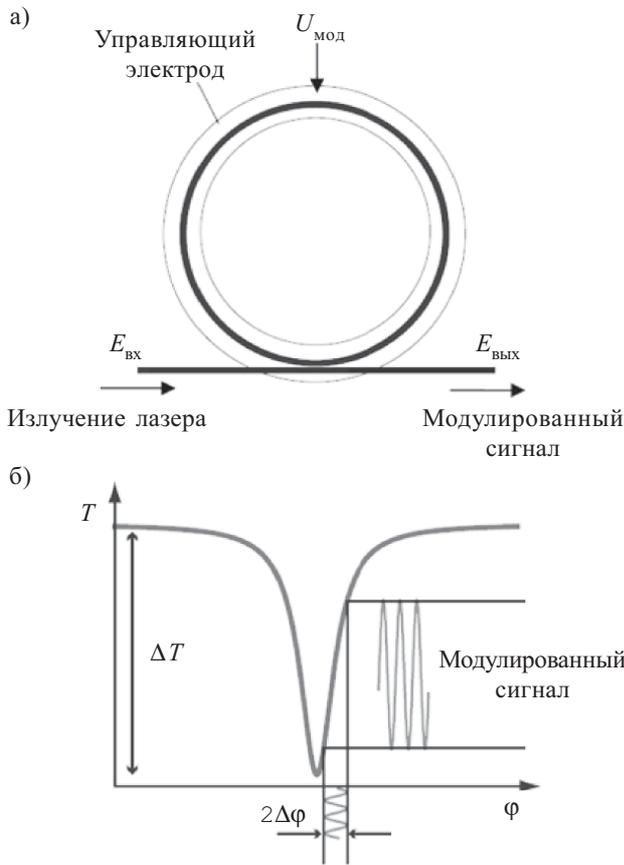


Рис. 5. Схема оптического модулятора на основе кольцевого резонатора (а) и иллюстрация принципа действия модулятора (б)

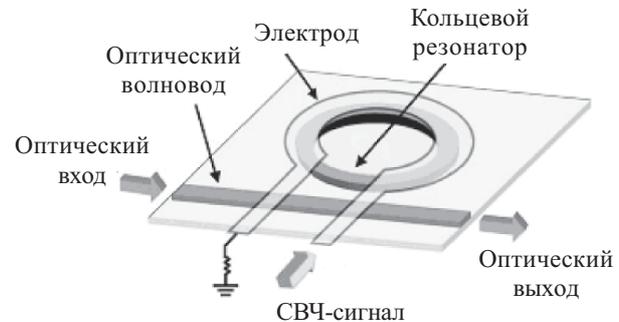


Рис. 6. Оптический модулятор на основе кольцевого микрорезонатора для модуляции СВЧ-сигналом

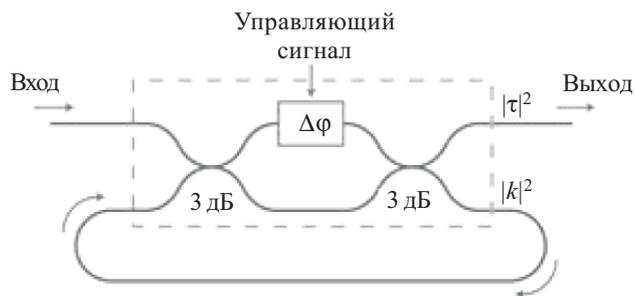


Рис. 7. Структурная схема модулятора на основе интерферометра Маха-Цандера с встроенным одиночным кольцевым резонатором

трека. Главное условие резонанса — число укладываемых в периметре значений длины волны света должно быть целым.

Для улучшения частотных и модуляционных характеристик используют совмещение кольцевого резонатора с интерферометром Маха-Цандера (рис. 7) [18]. В данной структуре кольцевой резонатор формируется таким образом, чтобы имел место резонанс с проходящим по волноводу излучением. Управляющий сигнал изменяет фазу в одном из плечей интерферометра Маха-Цандера. Это приводит к изменению коэффициента связи $|κ|^2$ и коэффициента передачи $|τ|^2$. Настроенный в резонанс кольцевой резонатор повышает общую чувствительность, поэтому такой модулятор может управляться напряжением, которое на порядок меньше, чем у обычного интерферометра Маха-Цандера. Исследования показали, что в таких схемах модуляторов при скорости модуляции 10 Гбит/с управляющее напряжение можно снижать до 0,12 В [18]. Общие потери в кольце малы по сравнению с силой связи в волноводах. Уменьшение размеров электродов в таких модуляторах ведет к улучшению частотных характеристик.

Несколько одиночных кольцевых резонаторов, связанных с одним волноводом, могут использоваться для дополнительного усиления глубины модуляции или снижения уровня управляющего напряжения. Одновременное использование резонаторов приводит к фильтрации сигнала.

Схематическое представление модулятора на основе нескольких кольцевых резонаторов приведено на рис. 8. Обычно резонаторы располагают симметрично и организуют подключение фазовых модуляторов так, чтобы они действовали в противофазе в верхнем и нижнем плечах интерферометра.

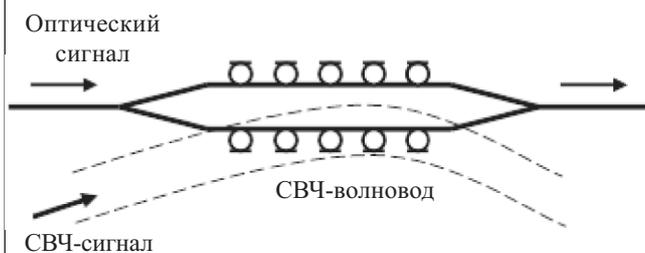


Рис. 8. Структурная схема СВЧ электрооптического модулятора на основе интерферометра Маха-Цандера с кольцевыми резонаторами

При сверхвысоких частотах модуляции возникает проблема подачи модуляционного сигнала к фазовым модуляторам. Несмотря на малые размеры микрочипа и небольшую длину электродов (менее 10 мкм), возникают проблемы, связанные с индуктивностью и емкостью цепей. Поэтому иногда организуют волноводную подачу СВЧ-сигнала к области модуляции непосредственно по СВЧ-волноводу, как это показано на рис. 7.

Структура со многими резонаторами в плече интерферометра Маха-Цандера вне волновода позволяет вести независимую фазовую подстройку режима модуляции.

Особенности конструкции кольцевых микрорезонаторов и области связи

Кольцевые резонаторы классифицируют по форме резонатора (диск, кольцо, трасса или эллипс), по схеме расположения волновода и резонатора (боковые и вертикальные) и по их взаимосвязи, т. е. по схеме передачи энергии между волноводом и резонатором (частично связанные и с полевой связью).

В схеме с боковой связью (рис. 9) резонатор и волновод изготавливаются на одном уровне из одинакового материала [8, 19]. При этом взаимосвязь определяется расстоянием между волноводом и резонатором.

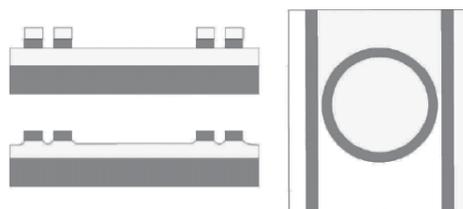


Рис. 9. Структура с гребневыми волноводами и резонатором с боковыми связями в одной плоскости

Для создания кольцевых резонаторов используют известную технологию создания гребневых волноводов на подложке. Один из методов заключается в предварительном нанесении на подложку изолирующего слоя GaAs и волноводного слоя с повышенным показателем преломления AlGaAs или GaAsP. Затем с помощью фотолитографии на поверхности формируют маску из фоторезиста в соответствии с требуемой топологией резонатора и производят ионно-плазменное травление в атмосфере хлора и водорода. После этого фоторезист удаляют и получают структуру, приведенную на рис. 10.

Кольцевые микрорезонаторы с вертикальной связью формируют методом многослойной фотолитографии (рис. 10) [9, 23]. Вначале формируют погру-

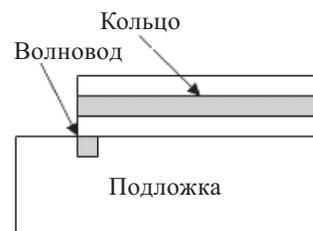


Рис. 10. Структура погруженного волновода с вертикальной связью с кольцом в наращенном слое

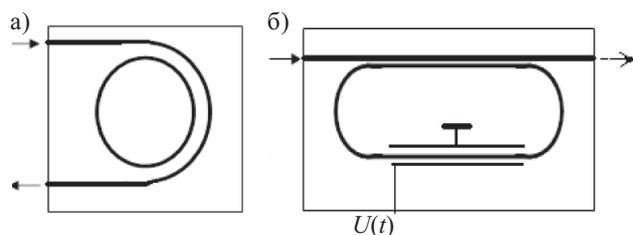


Рис. 11. Увеличение области связи волновода (а) и области связи с областью модуляции (б)

женный волновод методом диффузии легирующих присадок. Затем наращивают защитный и волноводный слой, травлением формируют кольцо, наносят защитный слой.

Для уменьшения модулирующего напряжения и увеличения глубины модуляции область связи волновода с резонатором увеличивают за счет огибания кольца волноводом (рис. 11, а). Область связи волновода с резонатором и область модуляции увеличивают за счет эллиптической или ленточной формы микрорезонатора (рис. 11, б).

Приведем для примера некоторые параметры модуляторов на основе кольцевых резонаторов с боковой связью на основе InGaAsP [21].

Параметры структуры:

Ширина волновода	0,8—1,0 мкм
Диаметр окружности	200—400 мкм
Спектральный диапазон	1,5—3,3 мкм
Коэффициент преломления	$n = 2,5$
Длина зоны связи	50—150 мкм
Зазор в зоне связи	0,3—0,45 мкм

Оптические и модуляционные параметры:

Ширина половины максимума резонанса	0,1—0,7 нм
Ширина свободной спектральной области	1—7 нм
Добротность	2000—17000
Потери в модуляторе	1—4 дБ
Связь с резонатором	5—40%
Предельная частота модуляции	20—25 ГГц
Глубина модуляции	60—80%

Другие области применения оптических кольцевых резонаторов

Оптимизация оптических сетей связи и передачи цифровой информации связана с интеграцией быстродействующих приемопередающих устройств, оптических фильтров, и переключателей, маршрутизаторов и коммутаторов. При этом желательно объединение разнотипного оборудования в одно устройство. Последнее стало возможным благодаря использованию интегрально-оптических кольцевых микрорезонаторов, которые работают как селективные управляемые фильтры высокого разрешения. Управление частотой микрорезонатора осуществляется тепловым, электрооптическим или пьезоэлектрическим воздействием в области связи резонаторов с волноводами.

Использование управляемых кольцевых микрорезонаторов позволяет создать маршрутизатор (рис. 12)

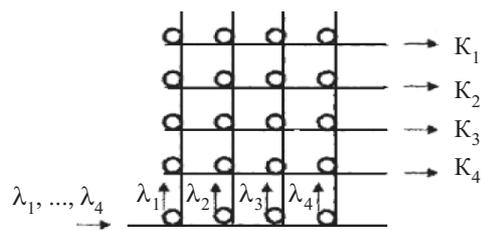


Рис. 12. Структурная схема маршрутизатора с селекцией каналов по длине волн на основе управляемых кольцевых микрорезонаторов

с выборкой информационных каналов по длине волн [22, 24, 25]. Входной WDM-сигнал разбивают на отдельные каналы λ_i с помощью первого ряда микрорезонаторов. Один из множества этих каналов может быть переключен на желаемый выход K_j благодаря другим кольцевым микрорезонаторам, расположенным на перекрестии с выбранным каналом. Индивидуальные настройки достигаются за счет использования в мультиплексоре заранее подобранных значений напряжения или тока в управляющем элементе.

В заключение необходимо отметить, что управляемые оптические кольцевые микрорезонаторы могут успешно применяться в качестве высокоскоростных модуляторов, фильтров, переключателей каналов, мультиплексоров, демультимплексоров, стабилизаторов частоты лазеров, коммутаторов и других устройств, необходимых для многоканальных волоконно-оптических систем связи.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Скляров О. К. Волоконно-оптические сети и системы связи.— М.: СОЛОН-Пресс, 2004. [Sklyarov O. K. Moscow. SOLON-Press. 2004]
2. Иванов А. Б. Волоконная оптика, компоненты, системы передачи, измерения.— М.: Сайрус Системс, 1999. [Ivanov A. B. Moscow. Sairus Systems, 1999]
3. Иоргачев Д. В., Бондаренко О. В. Волоконно-оптические кабели и линии связи.— М.: Эко-Трендз, 2002. [Iorgachev D. V., Bondarenko O. V. Volokonno-opticheskie kabeli i linii svyazi. Moscow. Eko-Trendz. 2002]
4. Берикашвили В. Ш., Ключник Н. Т., Костенко К. Н., Яковлев М. Я. Интегрально-оптические волноводные дисперсионные элементы для ВОЛС//Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2005.— № 2.— С. 10—16. [Berikashvili V. Sh., Klyuchnik N. T., Kostenko K. N., Yakovlev M. YA. // Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature. 2005. N 2. P. 10]
5. Rabiei P., Steier W. H., Zhang C., Dalton. L. R. Polymer micro-ring filters and modulators//Journal of Lightwave Technology.— 2002.— Vol. 20, N 11.— P. 1968—1975.
6. Little B. E., Chu S. T., Absil P. P. et al. Very high-order microring resonator filters for WDM applications//IEEE Photonics Technology Letters.— 2004.— Vol. 16, N 10.— P. 2263—2265.
7. Little B. E., Chu, S.T., Haus H. A. et al. Microring resonator channel dropping filters // J. Lightwave Technol.— 1997.— Vol. 15.— P. 998—1005.
8. Chin M. K., Youtsey C., Zhao W. et al. GaAs microcavity channel-dropping filter based on race-track resonator // IEEE Photon. Technol. Lett.—1999— Vol. 11.— P. 1620—1622.
9. Chu S. T., Little B. E., Pan W. et al. An eight-channel add-drop filter using vertically coupled microring resonators over as cross grid // IEEE Photon. Technol. Lett.— 1999.—Vol. 11.—P. 691—693.
10. Tan F. S., Klunder D. J. W., Bulthuis H. F. et al. High finesse microring resonator for WDM applications // Proc.of 10th «ECIO-2001».— Italy, Torino.— 2001.— P. 489—492.

11. Котляр В. В., Ковалев А. А., Шуюпова Я. О. и др. Субволновая локализация света в волноводных структурах // Компьютерная оптика.— 2010.— Т. 34, № 2.— С. 169—186. [Kotlyar V. V., Kovalev A. A., Shuyupova YA. O. i dr. // Komp'yuternaya optika. Vol. 34. N 2. P. 169]

12. Chin M. K., Ho S. T. Design and modeling of waveguide-coupled single-mode microring resonators // Journal of Lightwave Technology.— 1998.— Vol. 16, N 8.— P. 1433—1446.

13. Madsen C. K. Zhao J. H. A general planar waveguide autoregressive optical filter // IEEE J. Lightwave Technol.— 1996.— Vol. 14, N 3.— P. 437—447.

14. Yariv A. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides // Electronics Letters.— 2000.— Vol. 36.— P. 321—322.

15. Minakata M. Recent progress of 40 GHz high-speed LiNbO₃ optical modulator // Proc. SPIE.— 2001.— Vol. 4532.— P. 16—27.

16. Xu Q. F., Schmidt B., Shakya J., Lipson M. Cascaded silicon micro-ring modulators for WDM optical interconnections // Optics Express.— 2006.— N 14 (20).— P. 9430—9435.

17. Bortnik B., Hung Y.-C., Tazawa H., et al. Electrooptic polymer ring resonator modulation up to 165 GHz // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics.— 2007.— Vol. 13, N 1.— P. 104—110.

18. Hitz B. Microring modulator points to greater integration of electronics and photonics // Optics Express.— 2007.— N 10.— P. 17264—17272.

19. Xu Q. F., Manipatruni S., Schmidt B., et al. 12,5 Gbit/s carrier-injection-based silicon microring silicon modulators // Optics Express.— 2007.— Vol. 15, N 2.— P. 430—436.

20. Rabiei P., Steier W. H., Cheng Z., Dalton L. R. Polymer microring filters and modulators // J. Lightwave Technol.— 2002.— Vol. 20.— P. 1968—1975.

21. Vanderhaegen B., Van Tourhout D., De Merlier J. et al. High Q InGaAsP ring resonator filters // Proc. of 8th «ECIO-1999».— Italy, Torino.— 1999.— P. 381—384.

22. Bogaerts W., Dumon P., Van Tourhout D. et al. Compact wavelength-selective functions in silicon-on-insulator photonic wires // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics.— 2006.— Vol. 12, N 6.— P. 1394—1401.

23. Little B. E., Chu S. T., Pan W., Kokobun Y. Microring resonator arrays for VLSI photonics // IEEE Photonic Technology Letters.— 2000.— Vol. 12, N 3.— P. 323—325.

24. Soref R. A., Little B. E. Proposed N-wavelength M-fiber WDM crossconnect switch using active microring resonators // IEEE Photonics Technology Letters.— 1998.— Vol. 10, N 8.— P. 1121—1123.

25. Андросик А. Б., Моргунов А. С. Анализ особенностей волноводных микрорезонаторных фотонных устройств // Вестник Московского государственного открытого университета.— 2010.— № 1.— С. 73—82. [Androsik A. B., Morgunov A. S. // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo otkrytogo universiteta. 2010. N 1. P. 73]

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Термовакuumные испытания системы электроснабжения университетского наноспутника НТУУ «КПИ» (Украина, г. Киев)
- Применение технологии тонких пленок и наноструктурированных материалов при изготовлении теплонагруженных печатных плат со встроенными резисторами (Россия, г. Москва)
- Повышение помехоустойчивости бинаризации изображений фотошаблонов в пространстве вейвлет-преобразования (Украина, г. Одесса)
- Природа переходов и механизмы генерации в лазерах с электронной накачкой на основе оптических однородных, радиационно легированных кристаллов CdS (Германия, г. Штутгарт)
- Характеристики, технология и конструкция интегральных двухсторонних кремниевых микростриповых детекторов (Украина, г. Киев)
- Формирование дельта-легированного водородом *p*-слоя в природных и CVD кристаллах алмаза (Россия, г. Фрязино)
- Фоторефрактивные кристаллы в запоминающих устройствах оптоэлектронных процессоров корреляционного типа (Украина, г. Донецк)
- Низкоразмерные кристаллы кремния для фотоэлектрических преобразователей (Украина, г. Львов; Польша, г. Вроцлав)
- Математическая модель процесса избыточных измерений при непрерывном воздействии измеряемой физической величины на чувствительный элемент датчика (Украина, г. Киев)
- Автодинные характеристики стабилизированных СВЧ-генераторов при сильном отраженном сигнале (Россия, г. Екатеринбург, г. Москва)
 - Формирование полированной поверхности халькогенидов висмута и сурьмы (Украина, г. Киев)
 - Модель алмазного СВЧ-транзистора (Россия, г. Фрязино)
 - Исследование спектров фотолюминесценции низкоразмерных структур InSb, сформированных в матрице GaSb жидкофазной эпитаксией (Украина, г. Херсон)
 - Исследование допустимой импульсной мощности кремниевой p^+-p-n^+ -структуры от частоты импульса (Узбекистан, г. Ташкент)



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции