

Д. т. н. В. Ш. БЕРИКАШВИЛИ, Н. Т. КЛЮЧНИК,  
К. Н. КОСТЕНКО, к. т. н. М. Я. ЯКОВЛЕВ

Россия, г. Москва, ЦНИТИ «Техномаш-ВОС»  
E-mail: kirkostenko@yandex.ru, optcom@rol.ru

Дата поступления в редакцию  
01.02 2005 г.

Оппонент д. т. н. В. И. ОСИНСКИЙ  
(Центр оптоэлектронных технологий, г. Киев)

## ИНТЕГРАЛЬНО-ОПТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДНЫЕ ДИСПЕРСИОННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ВОЛС

*Показана возможность многократного увеличения пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации. Рассмотрены особенности технологии получения дисперсионных элементов.*

### Терабитные системы связи на основе спектрального уплотнения

Известно, что за первые 90 лет развития техники связи скорость передачи информации возросла на пять порядков, начиная от первых телефонных линий связи, которые имели скорость передачи информации порядка 1 бит/с. Примерно на те же пять порядков возросла скорость передачи информации систем связи за последние 20 лет, достигнув примерно 2 Тбит/с ( $2 \cdot 10^{12}$  бит/с) [1].

Резкое увеличение скорости передачи информации произошло благодаря использованию новой технологии спектрального мультиплексирования. Применение этой технологии не требует трудоемкой и дорогостоящей замены уже проложенного оптического кабеля. Даже если в будущем стоимость волокна уменьшится за счет использования новых технологий, волоконно-оптическая инфраструктура (проложенное волокно и установленное оборудование) всегда будет стоить достаточно дорого.

Технология спектрального уплотнения с разделением по длинам волн (WDM — Wavelength Division Multiplexing) является основополагающей для использования обширной полосы пропускания оптического волокна. Применение данной технологии позволяет одновременно на разных длинах волн передавать по одному волокну самые разные информационные потоки (аналоговые, ВЧ, СВЧ и цифровые). Одновременно с развитием технологии спектрального уплотнения решалась задача увеличения дальности передаваемой информации — как за счет снижения потерь в волокне, так и путем использования усилителей-ретрансляторов. Усовершенствование существующих электронно-оптических усилителей прекратилось после создания квантовых оптических усилителей на основе активного оптического волокна, легированного эрбием с накачкой излучения полупроводниковым лазером [2]. Появление таких усилителей с брэгговскими решетками позволило сделать их широкополосными и усиливать сигнал во всем диапа-

зоне длин волн, на которых работают устройства спектрального уплотнения [3].

В периодической литературе предлагаются различные конструкции терабитных систем связи на основе спектрального уплотнения каналов [4]. Для локальных, корпоративных и внутриобъектовых сетей вполне достаточно грубого спектрального уплотнения до 10—16 уплотняемых каналов (Coarse WDM или CWDM). Однако там, где есть большие информационные потоки, целесообразно использовать большее количество каналов в «окне» минимальных потерь оптических волокон в диапазоне длин волн от 1,45 до 1,6 мкм. В настоящее время системы с частотным интервалом между каналами 100 ГГц ( $\approx 0,8$  нм) и меньше называют системами плотного спектрального мультиплексирования (DWDM — Dense WDM). Именно такие системы используются для магистральной передачи информации (для межконтинентальных и межрегиональных линий связи), а также в системах с большими информационными потоками. Целесообразно использовать для вышеупомянутых целей и сверхплотное спектральное уплотнение (UDWDM — Ultra Dense WDM) с шагом деления 0,1—0,2 нм.

Сейчас технология спектрального мультиплексирования применяется в основном на линиях связи большой протяженности, где требуется большая полоса пропускания. Вместе с тем широким потенциальным рынком для применения технологии спектрального мультиплексирования являются также сети городского и регионального масштаба и системы кабельного телевидения. Эта технология перспективна для прокладки оптических кабелей в каждый дом для создания качественных информационных каналов связи широкого назначения (ТВ, интернет, видеотелефон и т. д.).

Необходимость эффективно использовать проложенный кабель привела к значительному увеличению числа каналов, передаваемых по одному волокну, и уменьшению спектральных интервалов между ними. Однако при сближении каналов, особенно в протяженных DWDM-системах связи, начинают проявляться линейные и нелинейные перекрестные помехи между каналами, что в конечном счете приводит к снижению соотношения сигнал/шум и качества связи.

Обобщенная структура многоканальной системы передачи информации со спектральным уплотнением представлена на **рис. 1**. Система включает следую-

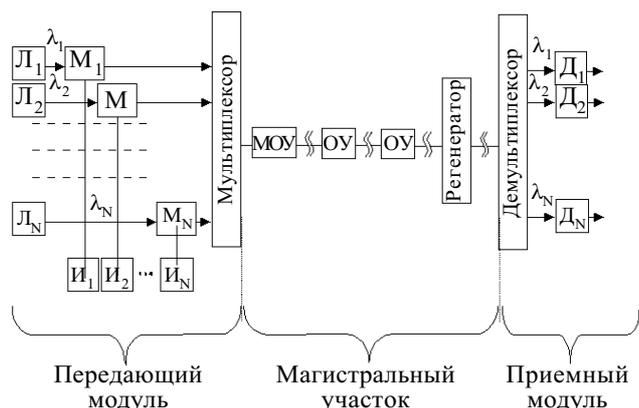


Рис. 1. Блок-схема многоканальной системы передачи со спектральным уплотнением (WDM)

щие составные элементы (см. обозначения на рисунке): Л — лазеры, И — источники потока данных (информации), М — модуляторы, МОУ — мощный оптический усилитель (бустер), ОУ — квантовый оптический усилитель, Д — фотодетекторы. Наиболее важными элементами системы являются мультиплексор и демультиплексор.

Каждый сигнал от источника информации и сигнал от соответствующего лазера с длинами волн  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$  поступают в модулятор, где происходит модуляция сигнала. Далее промодулированные сигналы попадают в мультиплексор, где происходит спектральное уплотнение сигналов. На выходе мультиплексора мы имеем уплотненные сигналы, готовые для передачи на необходимое расстояние.

Как известно, оптоволокно имеет известный коэффициент затухания, поэтому через определенное расстояние необходимо ставить усилители сигналов. Но усилитель не восстанавливает форму сигнала. Поэтому при передаче сигнала на расстояния более 1000 километров необходимо ставить регенератор для восстановления формы сигнала. На другом конце линии оптический демультиплексор осуществляет разделение переданных сигналов по соответствующим приемникам или канальным волноводам. Желательно, чтобы все элементы схемы были обратимыми.

**Дисперсионные элементы, предназначенные для систем CWDM**

Объемные дисперсионные элементы давно используются в оптике, в спектральном анализе, и реализованы в монохроматорах, спектроанализаторах, спектрографах.

Имеется три основных типа объемных дисперсионных элементов, позволяющие разделять спектрально уплотненные каналы: призма, дифракционная решетка проходящего типа, дифракционная решетка отражательного типа. Конструкция таких устройств представлена на рис. 2, где они показаны в качестве элементов в многомодовых волоконно-оптических системах спектрального уплотнения.

Устройства работают следующим образом. По оптическому волокну 1 распространяется излучение на нескольких длинах волн. На выходе волокна 1 установлен коллимирующий объектив 2, пройдя который, пучок света становится параллельным и подается на дисперсионный элемент — призму 3 (рис. 2, а), ди-

фракционную решетку проходящего типа 7 (рис. 2, б) или на отражательную дифракционную решетку 8 (рис. 2, в). На выходе дисперсионного элемента (призма или решетка) ставится выходная фокусирующая система 4, с помощью которой угловое разделение длин волн (каналов) преобразуется в сфокусированное пространственное разделение каналов по элементам линейки фотодетекторов или по торцам набора оптических волокон. Вогнутая отражательная дифракционная решетка (рис. 2, в) не требует фокусирующего объектива.

Основной особенностью дисперсионных элементов является разложение смешанного спектра на составляющие по длинам волн (частотам). В частности, в призме и дифракционной решетке проходящего типа осуществляется разделение спектральных составляющих по углам (по направлениям). Фактически угловое распределение является двухмерным преобразованием Фурье.

Использование линз или объективов позволяет осуществлять пространственное преобразование и, одновременно, фокусировку отдельных длин волн.

Подобные объемные дисперсионные устройства оказались эффективными для использования в системах разреженного спектрального уплотнения (CWDM). Причем данные системы спектрального уплотнения могут использоваться в системах связи

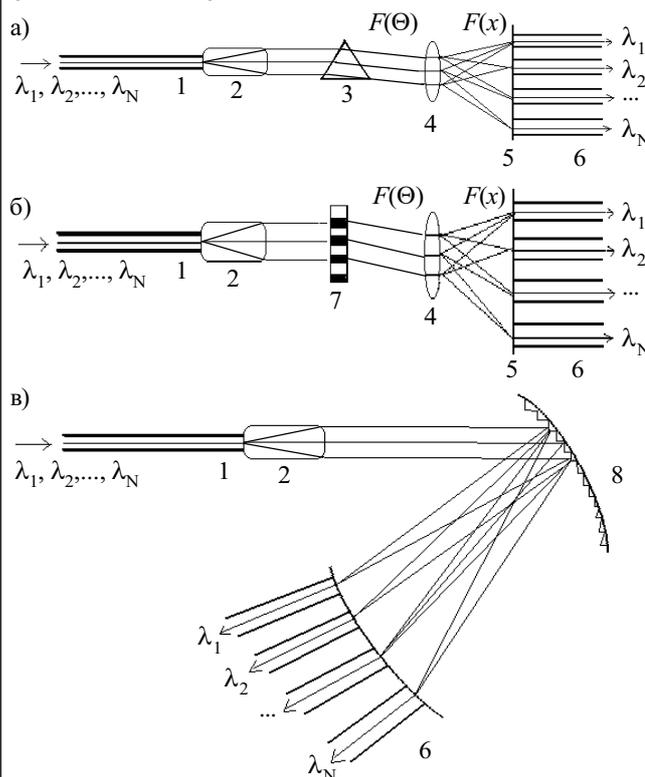


Рис. 2. Схемы основных типов объемных демультиплексоров на основе призмы (а), дифракционной решетки проходящего типа (б), на основе отражательной дифракционной решетки (в):

1, 6 — оптическое волокно; 2 — коллимирующий микрообъектив; 3 — объемная призма; 4 — фокусирующая система на выходе; 5 — каналные волноводы (линейка фотодетекторов); 7 — объемная дифракционная решетка проходящего типа; 8 — объемная дифракционная решетка отражательного типа

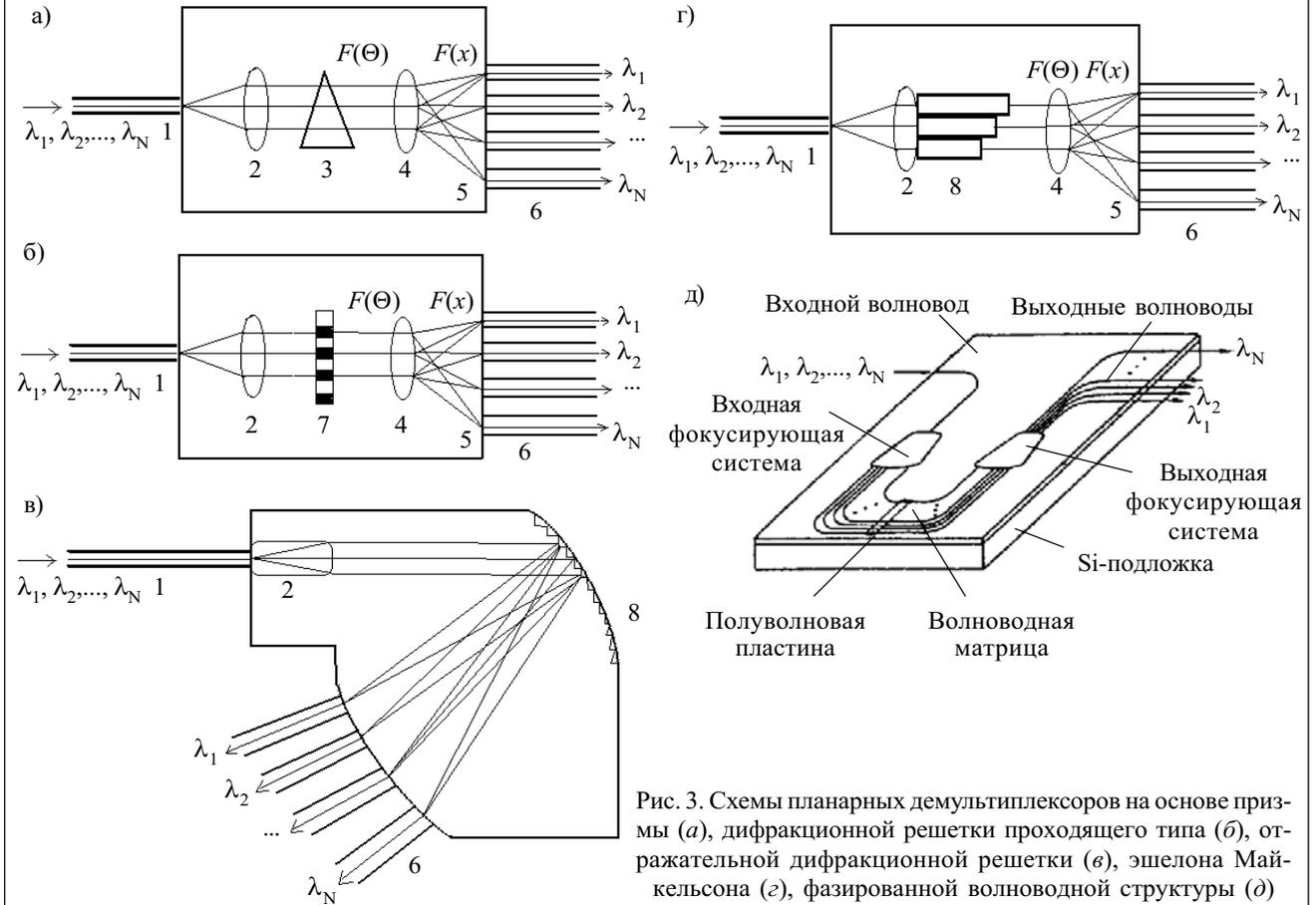


Рис. 3. Схемы планарных демультиплексоров на основе призмы (а), дифракционной решетки проходящего типа (б), отражательной дифракционной решетки (в), эшелона Майкельсона (г), фазированной волноводной структуры (д)

на основе многомодовых волокон, более дешевых и простых в использовании, что особенно удобно при реализации идеи «волокно в каждый дом».

Аналогом объемных дисперсионных элементов является их *планарная реализация в виде плоских волноводных слоев структур*. Причем для случая использования одномодовых спектральных оптических волокон планарная реализация является единственно возможным средством достижения высокой степени уплотнения/разуплотнения каналов. На **рис. 3** представлены наиболее перспективные схемы интегрально-оптических дисперсионных элементов.

Принцип работы планарных (интегрально-оптических) демультиплексоров рассмотрим на примере рис. 3, а. По одномодовому волокну 1 распространяется свет с информационными каналами на различных длинах волн. Диаметр волокна составляет 8—9 мкм, и толщина волноводного слоя должна быть такой же. Введенное в плоский волновод излучение расходится. На пути расходящегося пучка помещается планарный коллимирующий элемент 2 (геодезическая линза, выполненная дополнительным легированием в волноводе), причем расстояние между торцом волокна и центром линзы равно ее фокусному расстоянию. В результате этого после линзы пучок становится коллимированным, а его ширина должна быть равной апертуре дисперсионного элемента демультиплексора. Дисперсионный элемент 3 — призма, равно как и линза, выполняется дополнительным легированием волноводного слоя. Пройдя дисперсионный элемент, оптический сигнал разделяется на  $N$

каналов, каждый из которых на выходе дисперсионного элемента имеет свое фазовое распределение и распространяется под определенным углом к выходной апертуре.

Отметим, что эта и другие конструкции дисперсионных элементов — дифракционная решетка (рис. 3, б), отражательная дифракционная решетка (рис. 3, в), эшелон Майкельсона (рис. 3, г) и волноводная дифракционная решетка (рис. 3, д) — осуществляют угловое разделение каналов и являются наиболее перспективными с точки зрения обеспечения максимального числа каналов.

За выходной апертурой дисперсионного элемента располагается фокусирующий элемент 4 (геодезическая линза), который обеспечивает попадание каждого из  $N$  каналов на соответствующий элемент линейки фотодетекторов или один из канальных волноводов 5 или 6.

Фотодетекторы или канальные волноводы должны находиться в фокальной плоскости линзы. При этом условии поперечный размер области, занятой оптическим сигналом одного канала, будет минимальным. Ширина фотодетекторов и расстояние между ними определяются параметрами дисперсионного элемента, выходной линзой и допустимым уровнем перекрестных помех в каналах.

Следует особо подчеркнуть, что интегрально-оптические технологии обеспечивают не только существенное улучшение характеристик указанных устройств, но и позволяют создавать структуры, реализация которых на принципах объемной оптики невозможна. Кро-

ме того, принципы интегральной оптики позволяют объединить на единой подложке все элементы передающего модуля (лазеры, модуляторы, мультиплексоры, оптические усилители), т. е. создавать единую интегрально-оптическую схему передающего, а также приемного модулей. Поэтому устройства, построенные на принципах интегральной оптики, считаются наиболее перспективными устройствами для высокоскоростных многоканальных систем оптической связи со спектральным уплотнением.

Отдельные элементы — призмы, линзы, дифракционные решетки и каналные волноводы с разной фазовой задержкой — создаются путем дополнительного легирования или путем изменения геометрии канального волновода.

По результатам обзора различных схем дисперсионных элементов можно сделать следующие выводы.

1. Наиболее эффективной для мультиплексоров с высокой степенью уплотнения каналов оказалась волноводная структура, представленная на рис. 3, д, соответствующая видоизмененному эшелону Майкельсона (рис. 3, з).

2. На таких структурах получены мультиплексоры с разделением на 16, 32, 64, 128 и более каналов.

3. Получено разделение каналов по длинам волн с интервалом 0,5 и 0,2 нм, соответствующее частотному спектральному разделению на 100 и 50 ГГц.

4. Развязка соседних каналов составляет не менее 25 дБ.

#### Технология изготовления планарных интегрально-оптических дисперсионных элементов

Отправной точкой при изготовлении канальных волноводов многих типов является подложка, на которой образован плоский волновод, реализованный с помощью какой-либо технологии. В этом случае на поверхности пластины можно одновременно задать поперечные размеры ряда канальных волноводов, используя обычную фотолитографическую технику, подобную той, которая используется в технологии изготовления электрических схем.

Существует множество различных типов планарных оптических волноводов, отличающихся способом формирования волноводной структуры: а) гребенчатые волноводы, получаемые с помощью травления; б) гребенчатые волноводы с наложенной полоской; в) каналные волноводы, получаемые методом имплантации или диффузии; г) каналные волноводы, получаемые методом ионного обмена. Например, гребенчатые волноводы, получаемые с помощью травления, из-за шероховатых краев имеют достаточно большие потери. Однако именно данный тип волноводов позволяет реализовать на практике большую материальную и волноводную дисперсию и разность фазовой задержки  $\Delta\gamma$ . Канальные волноводы, получаемые методом ионного обмена, имеют малые потери (порядка 0,1 дБ/см), но обеспечивают малую разность фазовой задержки  $\Delta\gamma$  (порядка 0,1), что в итоге приводит к небольшому числу спектрально разрешаемых каналов.

Особенностью создания таких структур является то, что они создаются по технологии, близкой к мик-

роэлектронике, на кварцевых или кремниевых подложках.

Обычный метод изготовления гребенчатых волноводов состоит в нанесении фоторезиста на подложку с уже имеющимся в ней плоским волноводным слоем, облучении фоторезиста ультрафиолетовым или рентгеновским излучением через контактно наложенную маску (которая и определяет форму волновода) и проявлении фоторезиста. После выполнения всех вышеперечисленных операций на поверхности фоторезиста остается картина требуемой структуры (см. рис. 4).

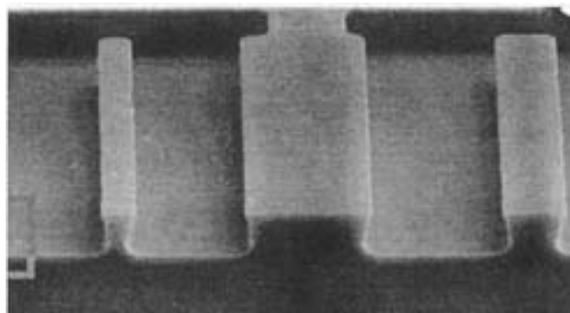


Рис. 4. Фрагмент волноводной структуры на основе гребенчатых волноводов

При создании гребенчатого волновода используется полированная подложка из кремния с окисленным поверхностным слоем  $\text{SiO}_2$ , на котором плазмохимическим методом наносится  $\text{SiO}_2$ , легированный  $\text{GeO}_2$ , или  $\text{P}_2\text{O}_5$ , или  $\text{Pb}_2\text{O}_3$ . Легированный слой является волноводным слоем с повышенным показателем преломления. После этого наносится тонкий слой  $\text{SiO}_2$ .

Фоторезист используется в качестве маски как в случае обычного химического травления, так и при травлении с помощью ионного пучка. При нанесении фоторезиста на подложку необходимо добиться однородности наносимой пленки. В зависимости от технологических задач можно получить пленку методом центрифугирования (порядка 0,25 мкм) или методом вытягивания из раствора (расплава). В последнем случае пленка получается с большей толщиной (порядка 1 мкм). Чем меньшей будет скорость вытягивания из раствора, тем тоньше и однороднее получится наносимая пленка.

Для получения структур гребенчатых волноводов можно использовать и влажное химическое травление в сочетании с фоторезистивным маскированием. Такое травление не приводит к образованию радиационных эффектов, как в случае ионного травления, однако при его использовании очень трудно получить структуры с заданной глубиной и формой профиля с прямоугольными стенками.

Как один из вариантов, подобные гребенчатые волноводы можно получать напыляя слой металла на подложку, которая не содержит в себе плоского волноводного слоя. В дальнейшем, после нанесения фоторезиста и его засветки через маску, происходит частичное травления металла в незащищенной фоторезистом области. Далее производится ионно-плазменное травление поверхности во фторсодержащей атмосфере. В результате после завершения процесса травления на фоне напыленной пленки получаются участки гребенчатых волноводов.

В наших экспериментах [5] планарные волноводные структуры создавали методом плазмохимического осаждения слоев кварцевого стекла, легированного фтором, на кварцевую подложку с последующим нанесением слоев синтетического кварцевого стекла и фторированного защитного слоя. Изображение такого волноводного слоя приведено на **рис. 5**. Последующее применение фотолитографии и ионно-плазменного травления позволяло получать требуемые планарные структуры гребенчатых волноводов с затуханием менее 0,5 дБ/см.

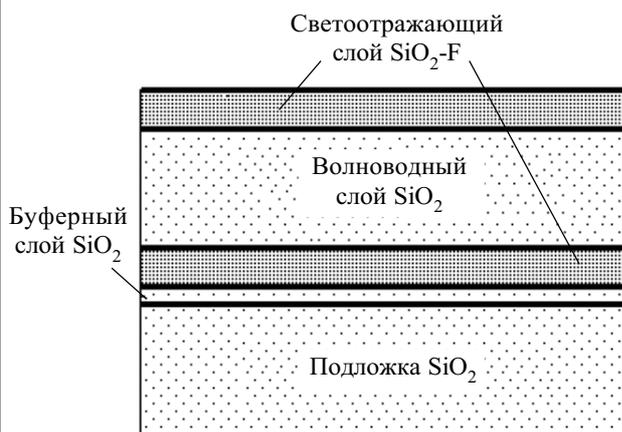


Рис. 5. Поперечное сечение волноводной структуры на основе  $\text{SiO}_2$

Гребенчатые волноводы могут изготавливаться методом наложения полоски с волноведущим слоем. Вместо формирования кварцевого волноводного слоя можно использовать наложенную полоску из органического диэлектрика, которая наносится на верхнюю поверхность. Форму полоски можно получить с помощью того же фотолитографического процесса, который применялся для получения канальных волноводов, рассмотренных выше. Волноводы подобного типа можно также изготавливать используя маскирование фоторезистом, а также с помощью ионно-лучевого или плазмохимического травления.

Не все методы изготовления канальных волноводов основаны на начальном использовании волноводов с плоской структурой. Существуют методы, основанные на *использовании либо диффузии, либо ионной имплантации соответствующих легирующих атомов непосредственно в подложку, но через маску*. Такие волноводы часто называют погруженными канальными волноводами, т. к. они находятся под поверхностью. В данном случае маскирование с помощью фоторезиста не является эффективным, т. к. последний не выдерживает воздействия высоких температур, необходимого для проведения диффузии, и не обладает достаточной молекулярной массой для экранирования подложки от попадающих на нее высокоэнергетических ионов. Здесь обычно в качестве маскирующих материалов используются пленки оксидов  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , однако для формирования рисунка на маскирующем слое оксида или металла используют фоторезист.

При изготовлении волноводов непосредственно диффузией атомов в подложку крайне важно опти-

ческое качество материала подложки. Он должен обладать малыми оптическими потерями, а также иметь гладкую полированную поверхность для предупреждения рассеяния. Одним из самых значительных преимуществ метода является планарность процесса — поверхность подложки не нарушается выступами или впадинами, что упрощает процесс оптического согласования при вводе и выводе излучения, а проблемы, связанные с загрязнением поверхности пылью или влагой, сводятся к минимуму.

Перед тем, как приступить к изготовлению волноводной структуры, необходимо убедиться в том, что полосковые волноводы, получаемые методом твердотельной диффузии, являются одномодовыми на заданной длине волны и обеспечивают такое поперечное распределение интенсивности света, которое приводило бы к максимальному коэффициенту связи с одномодовым волоконным световодом.

В качестве материала для изготовления канальных волноводов методом диффузии можно использовать ниобат лития. Рассчитать заранее процесс диффузии титана в анизотропный кристалл ниобата лития довольно трудно, поскольку он, кроме всего прочего, зависит и от состава атмосферы, в которой проводится диффузия, и от параметров технологического оборудования. Проще провести экспериментальную «калибровку» этого процесса на реальном технологическом оборудовании. Для этого необходимо нанести на тестовую подложку, например ниобата лития, несколько различных по ширине полосок титана и провести диффузию в конкретных технологических условиях.

Для проведения указанной «калибровки» разработан специальный фотосаблон, позволяющий на одной подложке сформировать несколько различных по ширине полосковых волноводов. Для установления необходимых параметров полоскового волновода шаг по ширине на фотосаблоне выбран равным одному микрометру, что позволяет, используя при необходимости интерполяцию, выбрать ширину волновода с точностью 0,5 мкм. Вторым параметром, которым является распределение интенсивности света по глубине волновода, можно управлять изменением толщины напыляемой пленки титана.

Затем на подложку поверх пленки фоторезиста наносится сплошная пленка титана толщиной порядка 70—80 нм. Нанесение пленки титана осуществляется методом вакуумного термического испарения титана. В нашем случае для этого использовалась промышленная вакуумная установка РР600, в которой паромасляный насос был заменен турбомолекулярным. Это позволило избавиться от остаточного давления паров масла в вакууме.

Для нагрева и испарения титана использовался испаритель, состоящий из 3—4 проволочек вольфрама диаметром 0,5 мм, скрученных между собой. На этот нагреватель плотно навивалась полоска титана сечением 0,6×2 мм длиной около 50 мм. При пропускании через такой нагреватель тока силой 3—5 А происходило нагревание и испарение титана. Подложка была расположена на расстоянии примерно 0,5 м от нагревателя. Рядом с подложкой помещалась стеклянная пластина, через которую проходил луч гелий-неонового лазера, расположенного вне вакуумного объема. Прошедший через стеклянную пластину лазерный луч выводился из вакуумного объема и попадал на фотоприемник, позволяющий измерять его интенсивность. При росте толщины пленки титана интенсивность прошедшего света уменьшалась, что позволяло остановить процесс напыления при достижении нужной толщины.

После напыления пленки титана заданной толщины подложку следует поместить в органический растворитель (например ацетон), где фоторезист быстро растворяется, а расположенная поверх него пленка титана оказывается свободно плавающей в растворителе. В результате на подложке остается система из узких полосок титана, в точности повторяющая рисунок волноводной системы.

Далее необходимо провести диффузию титана внутрь подложки из ниобата лития с целью формирования непосредственно волноводной структуры. Процесс диффузии протекает при температуре 980°C в течение 4—6 ч. Подложку (рабочей поверхностью вниз) помещают в негерметичный контейнер из палладиевой фольги толщиной 0,2 мм и всё вместе размещают в кварцевой пробирке, на дне которой находится гидроокись лития в количестве 2—3 г.

Дело в том, что при нагревании ниобата лития до температур порядка 900—1000°C происходит потеря им окиси лития, что в свою очередь повышает показатель преломления в приповерхностном слое кристалла, и тем самым формируется нежелательный планарный оптический волновод. Для предотвращения этого процесса и используется гидроокись лития, которая при таких температурах уже разлагается на окись лития и воду. Тем самым создается избыточное давление паров окиси лития в кварцевой пробирке, что препятствует протеканию обратной диффузии окиси лития из ниобата лития.

Следует заметить, что при столь высоких температурах ниобат лития вступает в химические реакции с кварцем. Избежать этого можно, если не допускать непосредственного контакта подложки с кварцем, что легко достигается путем изоляции кристаллической подложки в палладиевом контейнере.

Остается отметить, что процесс диффузии проводится в атмосфере воздуха. Температурные режимы, а именно — скорость нарастания температуры, точность поддержания температуры диффузии и скорость остывания, определяются типом используемой муфельной печи (в нашем случае это печь типа СУОЛ—0.44/12-М2-У4.2).

После завершения процесса диффузии и полного остывания печи с подложкой (по времени это занимает примерно 14—16 ч) следует провести дополнительный осмотр волноводной системы под микроскопом на предмет обнаружения каких-либо повреждений, вызванных высокотемпературным воздействием на кристалл ниобата лития.

Кварцевую пробирку и палладиевый контейнер можно использовать повторно, гидроокись лития следует обновлять.

К достоинствам этого процесса можно отнести то, что он не столь сложен по сравнению с процессами, которые были описаны ранее, т. к. нет необходимости в изготовлении плоской волноводной структуры по всей поверхности чипа перед формированием полосковых волноводов.

Суть метода ионного обмена в создании оптических волноводов состоит в том, что при контакте поверхности натриевого стекла с расплавом солей типа  $\text{AgNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$  и им подобных ионы серебра и калия замещают ионы натрия, находящиеся в стекле. При этом показатель преломления в приповерхностной области стекла возрастает. Волноводы, полученные в стекле при использовании ионов калия, имеют малые потери (порядка 3 дБ/см) [6], хорошо стыкуются с одномодовым волокном. Кроме того, при оп-

ределенных технологических режимах можно добиться равенства скоростей распространения низших волн разной поляризации. Это очень важно при использовании одномодовых волокон с круглой сердцевинной.

Подложка с металлической титановой маской, обращенной вниз, помещается на стеклянные прокладки толщиной 3—4 мм и пружинным рычагом прижимается к ним. Ванна помещается в печь марки СНОЛ 1.6.2.51/9-ИЗ, задается рабочая температура в камере (355°C). Через 20 мин после достижения этой температуры ванна устанавливается в положение, в котором происходит процесс ионного обмена, который продолжается 10,5 ч. По истечении этого времени ванна возвращается в исходное положение, и печь выключается. Ванна с образцом может быть извлечена из печи не ранее чем спустя 15 ч после ее выключения.

Остатки соли  $\text{KNO}_3$  на поверхности подложки удаляются сначала в сосуде с дистиллированной водой (4—5 мин), а затем в проточной дистиллированной воде в течение 2—3 мин. После этого осуществляется сушка в потоке очищенного и горячего воздуха.

Удаление маски из Ti проводится в сосуде с травителем. Состав травителя:  $\text{HNO}_3$  (20 мл) +  $\text{H}_2\text{O}$  (30 мл) +  $\text{NH}_4\text{F}$  (5 мл). Травитель нагревают до 50°C, затем в него опускают образец. Процесс удаления титановой маски проходит за 1—2 мин при помешивании травителя.

Как и в случае канальных волноводов, получаемых методом имплантации или диффузии, метод ионного обмена имеет те же достоинства — планарный характер волноводов и простота технологического процесса. Помимо всего, к достоинствам ионно-обменных волноводов можно отнести их относительно невысокий уровень потерь. Однако существенным недостатком таких систем является малая разность фазовых задержек  $\Delta\tau$  (порядка 0,1), что, в конечном счете, не приводит к большому числу спектрально разрешаемых каналов.

### Перспективы развития многоканальных систем связи

Несмотря на то, что солитонные системы связи пока еще не стали коммерчески доступными, многое говорит о быстром развитии солитонной передачи [7]. В солитонных системах не нужны повторители и оптические усилители, а потому появление таких систем в сочетании с использованием технологии DWDM значительно уменьшит затраты на передачу информации. Объем публикаций и исследований, выполняемых университетскими и промышленными научными центрами, служит несомненным показателем огромного интереса к этой области и позволяет надеяться, что через некоторое время солитонные системы связи станут коммерчески доступными.

Важным направлением в области создания систем со спектральным уплотнением каналов является разработка лазеров с фемтосекундной длительностью импульсов и высокой частотой их следования. Такие лазеры создают спектральный и временной суперконтинуум, из которого с помощью демультимплексоров и модуляторов формируются многоканальные потоки информационных импульсов с разделением по длинам волн.

На пороге широкого применения стоит технология «волоконно до дома». Единственное препятствие, из-за которого эта технология пока коммерчески невыгодна, это высокая цена трансивера, который необходимо устанавливать в каждом доме. Возможно, использование беспроводной передачи на конечном отрезке линии связи [8] позволит обеспечить приемлемые скорости передачи, без необходимости широкого развертывания совершенно новой волоконно-оптической инфраструктуры.

Еще одна многообещающая технология для локальных и других линий связи небольшой протяженности — использование WDM-мультиплексирования по многомодовому волокну. При совмещении с технологией «волоконно до дома» она, возможно, обеспечивает меньшую стоимость и большую надежность.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Дианов Е. М. На пороге Тера-эры // Квантовая электроника.— 2000.— Т. 30, № 8.— С. 659—662.

2. Taga H. Long distance transmission experiments using the WDM technology // Journal of Lightwave Technology.— 1996.— Vol. 14.— P. 1287—1297.

3. Потапов В. Т. Optical Fiber Communication 2003 // Фотон-Экспресс.— 2003.— № 4.— С. 3.

4. Takashina K., Shibano E., Taga H., Goto K. 1 Tbit/s WDM repeaterless transmission over 200 km with Raman amplifier // Optical Fiber Communication Conference.— 2000.— Vol. 37.— P. 53.

5. Берикашвили В. Ш., Григорьянц В. В., Ключник Н. Т. и др. Планарные волноводные структуры из кварцевого стекла, полученные в СВЧ-плазме пониженного давления // Мат-лы II Межрег. семина. «Нанотехнологии и фотонные кристаллы».— М.: МГТУ им. Н. Баумана, 2004.— С. 283—289.

6. Honkanens Li. M. J. Ion-doped arrayed optical waveguides // Applied Physics Letters.— 1991.— Vol. 58, N 23.— P. 2607—2609.

7. Suzuki K., Kubota H., Nakazawa M. 1 Tb/s (40 Gb/s × 25 channel) DWDM quasi-DM soliton transmission over 1500 km using dispersion managed single-mode fiber and conventional C-band EDFAs // Optical Fiber Communication Conference.— 2001.— Vol. 54.— P. 235—237.

8. Фритц Дж. Устройства DWDM для корпоративных сетей // Сети.— 2001.— № 6.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



**МОСКВА, 8—10 сентября 2005 г.**

**Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана  
при участии ОАО ЦНИТИ “Техномаш”**

**XI Международная научно-техническая конференция**

**ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ**

(Материалы и устройства функциональной электроники и нанофотоники)

**XVII Международный симпозиум**

**ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

**Посвящается 175-летию МВТУ**

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ**

*Электронные технологии в машиностроении.*

*Вакуумное технологическое оборудование и системы автоматического управления.*

*Материалы, оборудование и технологии наноэлектроники и нанофотоники.*

*Нанотехнологии и фотонные кристаллы.*

*Новые технологии производства, обработки и исследования наноматериалов.*

*Технологии и оборудование для производства приборов электронной техники и радиоэлектронных устройств.*

*Наноструктурированные материалы и фотонные кристаллы в оптоэлектронике, медицине и оптическом приборостроении.*

*Микроэлектромеханические системы в медицине и промышленности.*

*Получение, свойства и применение тонких пленок в электронике.*

*Системы и устройства радиотехники и средств связи.*

*Методы контроля функциональных свойств материалов электронной техники, измерительная аппаратура и аналитические методы.*

*Моделирование и информационное обеспечение исследований.*

☎ (095)267-0983, факс (095)267-1739; E-mail: bulygina@mx.bmstu.ru