

Интегрально-оптический демультиплексор на основе волноводной структуры SiO₂ – SiON

А.А.Гончаров, С.В.Кузмин, В.В.Светиков, К.К.Свидзинский, В.А.Сычугов, Н.В.Трусов

Сообщается о реализации на основе структуры SiO₂–SiON интегрально-оптического демультиплексора, работающего в области длин волн 1.5 мкм. Размеры чипа демультиплексора составляют 10 × 10 мм. Представлены параметры оптической схемы устройства, описана технология его производства и приведены результаты измерений рабочих характеристик. Показано, что перекрестные помехи между отдельными каналами связи (K=8) не превышают –25 дБ. Продемонстрирована работа демультиплексора в качестве селективно отражающего зеркала и показано, что он может быть использован при создании многочастотных источников лазерного излучения для систем волоконно-оптической связи.

Ключевые слова: интегральная оптика, демультиплексор, многочастотный лазер.

1. Введение

Исследуемый демультиплексор – это первое полностью интегрально-оптическое устройство, выполняющее первичную обработку оптического сигнала. В процессе разработки, реализации и последующего использования прибора выявились его многофункциональные возможности. Исследования и усовершенствования демультиплексора, а также разработка технологий его производства, осуществляемые в течение 15 лет, обусловили его высокие рабочие характеристики.

Принцип работы демультиплексора описан в ряде работ (см. напр., обзор [1]), в том числе в нашей работе [2], где он рассматривался как интегрально-оптический эшелон Майкельсона. Основными параметрами, характеризующими демультиплексор, являются число разделяемых каналов, рабочий диапазон длин волн, спектральное разделение каналов, потери света на проход, перекрестные помехи, а также равномерность потерь по спектру. В настоящее время демультиплексоры с требуемыми характеристиками созданы на основе различных волноводных систем: SOI, InGa, SiO₂ – SiON [3]. В последнее время наибольшую популярность приобрела система SiO₂ – SiON, что обусловлено дешевизной используемых материалов, шириной диапазона изменения параметров структуры, а также возможностью получения демультиплексора высокого качества [4]. В настоящей работе для создания демультиплексора мы также использовали эту систему. Здесь продемонстрированы возможности SiON-технологии и представлены результаты её применения на практике.

А.А.Гончаров, С.В.Кузмин, В.В.Светиков, К.К.Свидзинский, В.А.Сычугов, Н.В.Трусов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: borisu@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 8 сентября 2005 г.

2. Технология создания волноводной структуры

В качестве подложки волноводной структуры мы использовали стандартные для микроэлектроники пластины кремния толщиной 480 мкм и диаметром 100 мм. Первоначально на кремниевую пластину наносился слой SiO₂ толщиной 8 мкм с показателем преломления $n_s = 1.46$. Этот слой служил оптическим изолятором для устранения утечки света с длиной волны $\lambda = 1.5$ мкм из нанесенного на слой SiO₂ волноводного слоя в кремниевую подложку с показателем преломления $n = 3.5$. Волноводный слой представлял собой слой оксинитрида кремния толщиной $h = 2.5$ мкм с показателем преломления $n_w = 1.495$. Слои SiO₂ и SiON наносились в установке PECVD Plasmalab80⁺ плазмохимическим методом.

После изготовления планарной волноводной структуры использовался стандартный фотолитографический метод формирования фоторезистивной маски (проеctionная печать 1:10) для создания оптической схемы демультиплексора, образованной совокупностью канальных и планарных волноводов. Волноводные элементы схемы формировались с помощью реактивного ионного травления в установке RIE Plasmalab80⁺. После этого в течение двух часов при $T = 1150$ °C в атмосфере аргона осуществлялся отжиг структуры. Затем на поверхность волноводной структуры наносился слой SiO₂ толщиной $h \approx 8$ мкм для защиты интегральной схемы от внешних воздействий. Процесс изготовления интегральной схемы завершался процедурой резки кремниевой подложки на чипы размером 10 × 10 мм и полировкой одного торца чипа, на который были выведены все входные и выходные каналы демультиплексора.

3. Оптическая схема демультиплексора

Оптическая схема демультиплексора (рис.1) представляет собой набор одномодовых канальных волноводов различной длины, причем разность длин соседних вол-

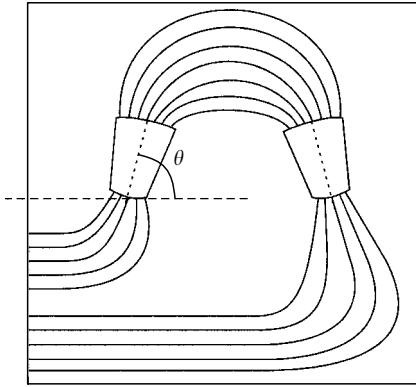


Рис.1. Схема демультимплексора, реализованного на основе волноводной структуры $\text{SiO}_2\text{-SiON}$.

новодов постоянна ($\Delta L = \text{const}$). Концы канальных волноводоов эквидистантно располагаются на круглых границах планарных участков волноводоов, которые являются фокусирующими элементами схемы. На других границах фокусирующих элементов схемы тоже эквидистантно расположены концы канальных волноводоов для ввода и вывода света из схемы. Радиус закругления внутренних границ фокусирующих элементов вдвое больше радиуса внешних границ, что обеспечивает лучшую фокусировку света на входных и выходных концах волноводоов.

Набор канальных волноводоов различной длины в совокупности с фокусирующими элементами образует дисперсионный элемент демультимплексоора, и число N канальных волноводоов в нем является существенным для эффективной работы устройства. Число N канальных волноводоов в наборе должно быть как минимум вдвое больше числа K разделяемых каналов; оно ограничивается числом каналов, при котором между ними возникает туннельная связь. Более подробные данные о соотношениях между параметрами демультимплексоора можно найти в работах [2, 5].

4. Некоторые детали оптической схемы реализованного демультимплексоора

Наша задача состояла в том, чтобы всю схему демультимплексоора уложить на чипе с размерами 10×10 мм. Поэтому ширина W канальных волноводоов в наборе составляла 3.0 мкм, длина самого короткого волноводооа была равна всего лишь 5.729 мм, разность длин волноводоов ΔL достигала 75.503 мкм. Число N канальных волноводоов в дисперсионном элементе равнялось 59, т.е. более чем в 7 раз превышало число каналов K ($K = 8$); при этом период расположения концов каналов на границе фокусирующих элементов составлял 8.4 мкм. Концы канальных волноводоов состыковывались с границами фокусирующих элементов демультимплексоора с помощью адиабатических переходов длиной 110 мкм и начальной шириной 6.5 мкм. Радиус кривизны R границы фокусирующих элементов устройства равнялся 1.823 мм.

Ось симметрии фокусирующих элементов проходила через центры кривизны его границ и делила набор канальных волноводоов дисперсионного элемента пополам. Поскольку каждый фокусирующий элемент имеет свою ось симметрии, то угол $\varphi = \pi - 2\theta$ между осями фокусирующих элементов мы взяли равным 24.62° , чтобы рас-

положить весь демультимплексоор на чипе указанного размера. Внешняя граница каждого фокусирующего элемента имела радиус кривизны $R' = 0.912$ мм и являлась частью окружности Роланда. Период расположения входных и выходных канальных волноводоов на этой границе фокусирующих элементов составлял 8.4 мкм, а ширина волноводоов W_{in} достигала 6.5 мкм. Другие торцы канальных волноводоов были выведены на отполированный торец чипа. Поскольку фокусирующие элементы были удалены от края чипа на различное расстояние, длины входных и выходных волноводоов также различались, но все они имели 90° -градусный поворот с разными радиусами закруглений. Минимальный радиус закругления был равен 2.0 мм, и для минимизации потерь света на излучение на этом повороте скачок показателя преломления канальных волноводоов Δn составлял 0.035.

5. Исследования характеристик демультимплексоора

Для измерения спектральных характеристик пропускания каналов чипа интегрального демультимплексоора использовались источник перестраиваемого излучения (интегрированный в измерительный комплекс EXFO IQ-206) и спектрометр Burleigh WA-7100. Ширина спектральной линии излучения $\delta\lambda$ лазерного комплексоа EXFO IQ-206 была равна 0.1 нм на уровне -30 дБ. В ходе исследований измерялась спектральная характеристика пропускания мультимплексоора в диапазоне длин волн $\lambda = 1550 - 1560$ нм в режиме $I_{\text{in}} \rightarrow J_{\text{out}}$ (I_{in} – номер входного канала, J_{out} – номер выходного канала). Для обеспечения оптического контакта между одномодовыми световодами и канальными волноводоами интегрального чипа последние полировались механическим способом. Интенсивность света, прошедшего через демультимплексоор, измерялась с помощью спектрометра Burleigh WA-7100, кроме того, этот же прибор использовался нами для контроля частоты и интенсивности излучения перестраиваемого лазера, сигнал с которого подавался на вход № 1 исследуемого демультимплексоора. Все измерения осуществлялись при комнатной температуре ($T = 24^\circ\text{C}$), термостабилизация интегрального чипа не проводилась, поляризация входного излучения была произвольной.

На рис.2 представлена спектральная характеристика пропускания изготовленного чипа для связи каналов 1–4 ($I_{\text{in}} = 1, J_{\text{out}} = 4$). В этом режиме интегральный чип функ-

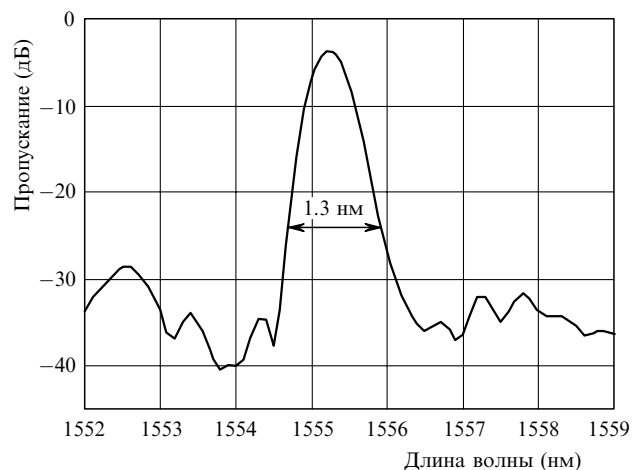


Рис.2. Спектральная характеристика пропускания демультимплексоора.

ционирует в режиме демультиплексора, т. е. при подаче на один из входов широкого спектра частот на каждом из выходных каналов выделяется заданная спектральная составляющая входного сигнала. Из представленной характеристики видно, что спектральная ширина пропускания канала составляет 1.3 нм по уровню –20 дБ. Изменение поляризации входного сигнала приводило к изменению амплитуды выходного сигнала на уровне измерительных флуктуаций. В этом же режиме работы демультиплексора была измерена область его свободной дисперсии $\Delta\lambda_{\text{FSR}}$ [2], которая составила 17.3 нм, что соответствует расчетному значению.

На рис.3 представлены наложенные на одно координатное поле спектральные характеристики, измеренные для всего массива выходных каналов ($I_{\text{in}} = 1$, $J_{\text{out}} = 1-8$), которые демонстрируют эквидистантное расположение спектральных максимумов каналов пропускания, равное 0.8 нм. Перекрестные помехи при подаче на вход сигнала из восьми спектральных составляющих, соответствующих максимумам пропускания каналов, не превысили –25 дБ. Общие потери света на проход без учета стыковки подводящих волокон с каналными волноводами равны 3 дБ.

6. Использование демультиплексора в качестве лазерного зеркала

В системах оптической связи со спектральным уплотнением каналов первостепенное значение имеют источники излучения нужных длин волн с подходящей шириной спектральных линий. До последнего времени для создания таких источников излучения использовались лазеры с распределенной обратной связью. Теперь, с появлением устройств, описанных выше, возникают новые возможности. Дело в том, что демультиплексор может работать как селективное лазерное зеркало, если на выходных торцах канальных волноводов установлены отражающие зеркала. В качестве последних мы использовали микрзеркала, расположенные перед полированными торцами выходных канальных волноводов демультиплексора [6].

Источником излучения служил полупроводниковый лазер [7] с длиной волны излучения $\lambda = 1.550$ мкм и шириной спектра усиления $\Delta\lambda = 20$ нм. На один торец

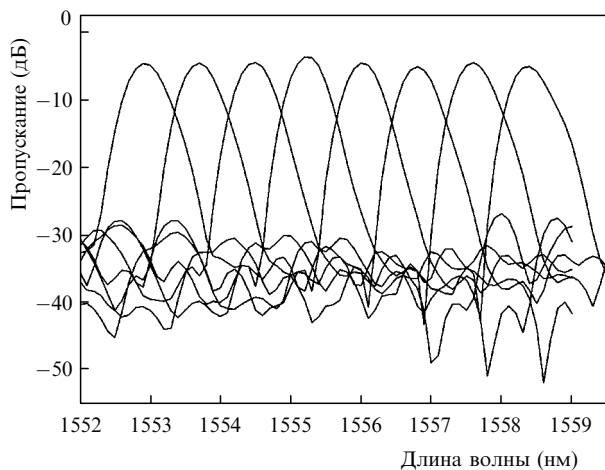


Рис.3. Спектральные характеристики демультиплексора, измеренные для всего массива выходных каналов (1–8) при включении 1-го входного канала.

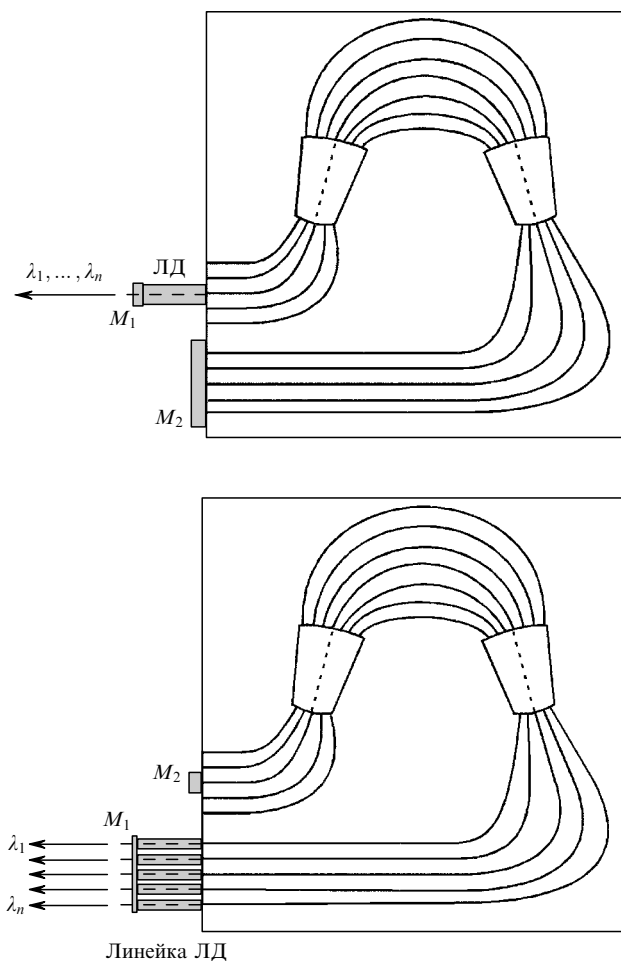


Рис.4. Схемы работы демультиплексора в режиме спектрально-селективного зеркала (а) и в режиме многочастотного источника лазерного излучения (б).

лазерного чипа было нанесено отражающее диэлектрическое покрытие с $R_{\text{out}} = 30\%$, а на другой – просветляющее покрытие с $R_{\text{out}} = 0.5\%$. Лазерный чип был пристыкован просветленным торцом ко входному полированному торцу канального волновода через иммерсионную жидкость (глицерин) (рис.4,а). При токах накачки $I_{\text{max}} = 50$ мА на выходе лазера наблюдалась генерация нескольких отдельных длин волн излучения, соответствующих спектру пропускания демультиплексора. Спектральная ширина линий излучения составляла 0.3 нм [6]. Эквидистантность расположения частот излучения по спектру является одним из достоинств полученного лазера по сравнению с набором РОС-лазеров, частоты излучения которых определяются отдельными независимыми друг от друга решетками.

Для того чтобы иметь лазеры с заданными длинами волн излучения, которые определяются спектром пропускания демультиплексора, необходимо использовать линейку полупроводниковых лазеров с периодом расположения излучателей, совпадающим с периодом расположения выходных канальных волноводов демультиплексора (рис.4,б). Для современной технологии изготовление такой линейки лазеров не вызывает трудностей. Отметим, что модуляция излучения лазеров в линейке, а также переключение лазерных каналов с целью изменения длины волны является уже чисто электротехнической задачей.

7. Заключение

Таким образом, нами показано, что на основе SiON-технологии можно создать интегрально-оптический демultipлексор, работающий в области длин волн 1.5 мкм, с приемлемыми для практики характеристиками. Экспериментально продемонстрирована работа демultipлексора в качестве зеркала обратной связи в многочастотном источнике излучения, который может быть использован в системах оптической передачи информации со спектральным уплотнением каналов. Отметим, что разработанное нами устройство (DemWDM) является многофункциональным, и на его основе можно реализовать целый ряд устройств, весьма необходимых в системах оптической связи [8].

Авторы выражают благодарность Н.М.Журавлевой за помощь в проведении фотолитографических работ, Ю.В.Паршукову и М.Ю.Лукину – за помощь при создании волноводных структур.

1. Smit M.K., Van Dam C. *PHASAR-Based WDM-Devices: Principles, Design and Application. IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, **2** (2), 236 (1996).
2. Гончаров А.А., Светиков В.В., Свидзинский К.К., Сычугов В.А., Усиевич Б.А. *Квантовая электроника*, **34** (8), 755 (2004).
3. Свидзинский К.К. *Квантовая электроника*, **33** (8), 699 (2003); Svidzinskiy K.K. *Microelectron. Eng.*, **69**, 221 (2003).
4. Shimoda T., Suzuki K., Takaesu S., Furukawa A. *Proc. Europ. Conf. on Opt. Commun.* (Copenhagen, Denmark, 2002, paper 4.2.2).
5. Гончаров А.А., Светиков В.В., Свидзинский К.К., Сычугов В.А., Усиевич Б.А. *Радиотехника*, **12**, 54 (2004).
6. Goncharov A.A., Kuzmin S.V., Svetikov V.V., Trusov N.V. *Advanced Laser Technologies-2005* (China, Tianjin, 2005, 4-R5).
7. Голикова Е.Г., Дураев В.П., Козиков С.А., Кригель В.Г., Лабутий О.А., Швейкин В.И. *Квантовая электроника*, **22** (2), 105 (1995).
8. Свидзинский К.К., Гончаров А.А., Кузмин С.В., Светиков В.В., Сычугов В.А., Усиевич Б.А. *Заявка на патент 2004100689 «Оптический волноводный спектральный переключатель».*