

# Сверхплотное мультиплексирование на основе волоконных матриц

**И.В.Черемискин, Т.К.Чехлова**

*Показана возможность создания волоконного мультиплексора/демультиплексора со сверхплотным мультиплексированием, не имеющего принципиальных ограничений по числу каналов и соответствующему спектральному интервалу между ними. Продемонстрирована работоспособность волоконного мультиплексора на основе матрицы из четырех волокон, обеспечивающего спектральное разнесение каналов 0.7 нм (~10 ГГц).*

**Ключевые слова:** мультиплексор/демультиплексор, спектральное уплотнение, диспергирующая система, разрешающая способность, волоконно-оптическая связь.

Совершенствование систем спектрального уплотнения и разуплотнения каналов волоконно-оптических линий связи с целью увеличения числа каналов привело к разработке мультиплексоров/демультиплексоров (М/Д) с чрезвычайно узкими спектральными каналами. Наряду с волноводными спектральными М/Д (WDM/D-системами) с числом каналов  $N = 8$  и  $16$  и частотным разнесением каналов ~200 ГГц появились разработки и демонстрационные образцы мультиплексоров с  $N = 32$ –40 и частотным разнесением ~100 ГГц (DWDM-системы с плотным мультиплексированием), а также с  $N = 64$ –128 и разнесением каналов 50 ГГц и менее (HDWDM-системы со сверхплотным мультиплексированием).

В ряде последних работ [1, 2], посвященных этой проблеме, заявлено о создании 320- и 480-канальных мультиплексоров, обеспечивающих частотное разнесение каналов 10 ГГц. При этом основной принципиальной трудностью дальнейшего увеличения числа каналов в планарных мультиплексорах является ограниченный размер кристалла – основы мультиплексора.

В настоящей работе представлена схема двухкаскадного М/Д на основе матрицы волоконных световодов с числом каналов  $N = 10^4$  (рис. 1). Входной сигнал  $I$ , содержащий излучение с длинами волн  $\lambda_1, \dots, \lambda_N$ , поступает на вход I каскада мультиплексора, состоящего из волоконной матрицы 2, фокусирующих устройств 3 на входе и выходе волоконной матрицы и выходных световодов 4. С выхода I каскада излучение направляется на входы II каскада мультиплексора, состоящего из  $M$  одинаковых мультиплексоров, которые представляют собой устройства, аналогичные мультиплексору I каскада, но в отличие от него обладают более высоким разрешением. Волоконная матрица I каскада состоит из  $M_I$  отрезков оптических волокон с постоянной разностью длин соседних волокон  $h_I$  и является диспергирующей системой этого мультиплексора. Волоконные матрицы II каскада, соот-

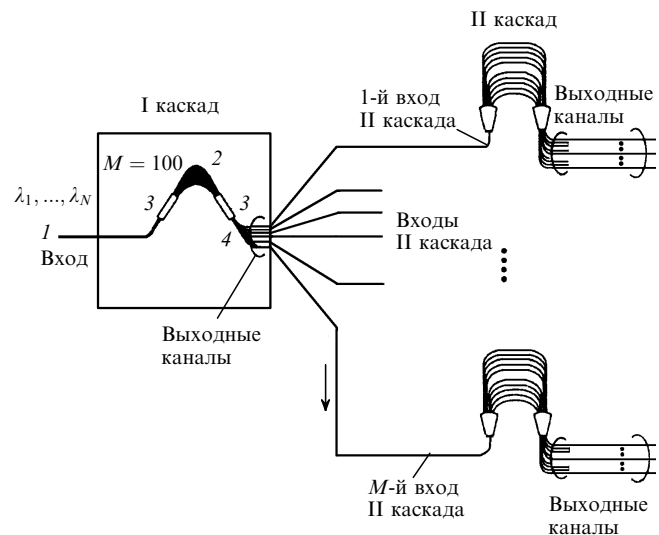


Рис.1. Схема двухкаскадного волоконного М/Д.

ветственно диспергирующие системы его мультиплексоров, имеют  $M_{II}$  элементов и обеспечивают более высокое разрешение за счет увеличения  $h_{II}$ .

Задавая спектральную область дисперсии  $\Delta\lambda$ , число каналов  $N$  и параметры фокусирующей системы, можно рассчитать основные характеристики мультиплексора, такие как постоянная разность длин соседних элементов волоконной матрицы  $h$ , определяющая наряду с числом элементов матрицы  $M$  минимальный разрешимый спектральный интервал  $\delta\lambda$ , угловая ( $D_\phi$ ) и линейная ( $D_L$ ) дисперсии, минимальное расстояние между выходными каналами  $\delta x$  и разрешающая способность  $\mathfrak{R}$  [3, 4]. При этом излучение из каждого выхода I каскада имеет спектральный диапазон  $\delta\lambda_1$ , а область дисперсии каждого мультиплексора II каскада  $\Delta\lambda_{II}$  должна перекрывать спектральный диапазон  $\delta\lambda_1$ , т. е. необходимо выполнение условия  $\Delta\lambda_{II} = \delta\lambda_1$ , с учетом которого определяется разность длин соседних элементов матриц II каскада  $h_{II}$ . Следует отметить, что длины самого короткого и самого длинного элементов матрицы I каскада равны  $h_I$  и  $M_I h_I$ , а длины самого короткого и самого длинного элементов матрицы II каскада –  $h_{II}$  и  $M_{II} h_{II}$ .

Табл.1.

Кас- кад	$N$	$\Delta\lambda$ (нм) (ГГц)	$h$ (мкм)	$\delta\lambda$ (нм) (ГГц)	$D_\phi$ (мкм <sup>-1</sup> )	$D_L$	$\delta x$ (мкм)	$\mathfrak{R}$
I	100	26.4 (3300 ГГц)	60	0.264 (33 ГГц)	4	$8 \cdot 10^4$	21	$6 \cdot 10^3$
II	100	0.264 (33 ГГц)	6000	$0.264 \cdot 10^{-2}$ (0.33 ГГц)	400	$8 \cdot 10^6$	21	$6 \cdot 10^5$

Параметры волоконного М/Д с числом каналов  $N = 10^4$  были рассчитаны для спектрального диапазона 1530–1560 нм. Таким образом, в соответствии с этим диапазоном области дисперсии  $\Delta\lambda$  волоконной матрицы I каскада полагали равной 26.4 нм (3300 ГГц). Если использовать матрицу I каскада с  $M = 100$  элементов, то реализация  $10^4$ -канального мультиплексора требует наличия во II каскаде также 100 элементов с разнесением по длинам волн 0.26 нм. При расчете параметров мультиплексора мы полагали, что диаметры волоконных световодов сердцевин и оболочки равны 10 и 100 мкм соответственно, а фокусное расстояние линзы  $f$  и ее диаметр  $D$  составляют 2 и 1 см. Рассчитанные значения параметров волоконного М/Д для I и II каскадов представлены в табл.1.

Исходя из полученных геометрических характеристик, I каскад мультиплексора может быть изготовлен на единой подложке, например на  $\text{SiO}_2/\text{Si}$  или  $\text{InP}$ . О создании подобного мультиплексора со 128 каналами сообщалось в работе [5]. Создание же такого планарного двухкаскадного мультиплексора на единой подложке весьма проблематично, поскольку размер самого длинного элемента мультиплексора II каскада превышает 60 см. По-видимому, целесообразно рассматривать гибридную схему, в которой I каскад осуществляется в планарном волноводном варианте, а II каскад выполняется на основе волоконных световодов. При этом в силу очень малых потерь мощности в оптическом волокне значительная длина элементов матрицы не приведет к ухудшению характеристик мультиплексора.

В качестве фокусирующих элементов могут быть использованы либо волноводные фокусирующие пластины [6], либо объемные линзы в гибридном варианте. Соединение одномодовых волокон со входами/выходами может быть осуществлено с помощью градиентных линз или специальных волокон с расширяющимися выходами. Кроме того, могут быть использованы технологии, примененные авторами работы [7] для создания модулей волоконных разветвителей.

Основные потери мощности возникают при вводе сигнала в волноводную матрицу на соединениях волокно–волновод и волокно–волново-волокно. По оценкам эти потери могут составить 1–5 дБ. Ввод в волоконную матрицу в случае линзовой фокусирующей системы для удобства и уменьшения потерь целесообразно выполнять в виде пучка плотно расположенных волокон, имеющего круглое поперечное сечение. С этой же целью может быть использована монолитная сферическая стеклянная поверхность, к которой пристыковываются входные волокна, образуя сходящийся волновой фронт, а в фокусе с другой стороны пристыковываются волокна матрицы. Следует также иметь в виду возможность использования отражательного варианта демультиплексора [3, 8], имеющего вдвое большее разрешение при равных с прозрачным демультиплексором размерах.

Основная трудность реализации волоконного М/Д связана с необходимостью обеспечения длин волокон в волоконной матрице с точностью до  $0.01\lambda$  [9]. Такие точности могут быть достигнуты с помощью корректировки уже изготовленной волоконной матрицы путем непосредственного воздействия на волокно (нагрев, изгиб и пр.) [10–12]. Расчет, проведенный с использованием методики, описанной в работах [10, 11], показал, что изогнутый участок волокна (с указанными выше параметрами) длиной 1–5 см и радиусом изгиба  $R = 5$  см обеспечивает изменение длины оптического пути от 0.01 до 0.09 мкм.

В работе [12] для компенсации фазовых ошибок в центр волноводного М/Д встраивалась волноводная матрица, состоящая из небольших отрезков волноводов. Изменение фазы обеспечивалось двумя методами: за счет термооптического эффекта при изменении температуры волноводов тонкопленочными нагревателями или за счет пьезооптического эффекта, осуществляемого с помощью нанесения  $\alpha\text{-Si}$  пленки. В первом случае реализовывалась динамическая подстройка фазы каждого канала, которая обеспечивала фазовую ошибку менее  $10^\circ$  и перекрестные помехи менее –35 дБ; во втором случае статическая подстройка уменьшала среднеквадратичное отклонение фазы до  $2^\circ$  и перекрестные помехи ниже –30 дБ для всех 16 каналов мультиплексора.

Весьма привлекательным представляется вариант подстройки фазы каналов мультиплексора с помощью дополнительной матрицы волноводов, описанной в работе [13], которая была выполнена в структуре  $\text{InGaAsP}$  длиной 1.4 мм с интервалом между канальными волноводами 85 мкм. Сдвиг фазы 0.4 рад/мА осуществлялся с помощью тока инжекции, который изменял показатель преломления структуры, изменяя плотность носителей заряда. Таким образом, необходимая точность изготовления волоконных М/Д может быть обеспечена путем использования одного из перечисленных методов корректировки.

Работоспособность предложенного волоконного мультиплексора была продемонстрирована с помощью макета с матрицей из четырех волокон; разность длин соседних волокон  $h = 9$  см [11]. Макет обеспечивал спектральное разрешение  $\delta\lambda = 0.7$  пм ( $\sim 10$  ГГц) и разрешающую способность  $\mathfrak{R} = 10^6$ . В качестве иллюстрации с помощью изготовленного макета были разрешены две продольные моды He–Ne-лазера, отстоящие друг от друга на 0.8 пм (рис.2).

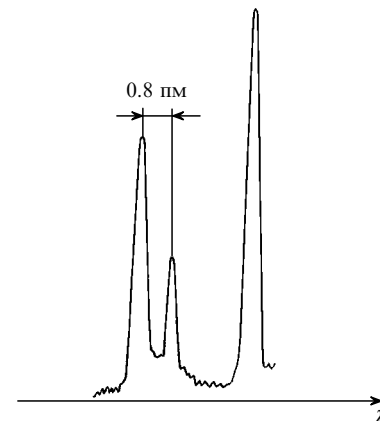


Рис.2. Спектр продольных мод He–N-лазера, разрешенный с помощью экспериментального макета.

Предложенный волоконный М/Д не имеет принципиальных ограничений по числу каналов и интервалу между ними. Дальнейшее увеличение спектрального разнесения каналов волоконных М/Д по предложенной схеме, т. е. уменьшение  $\delta\lambda$ , может быть продолжено и использовано в оптических линиях связи. При этом минимальная ширина полосы узких каналов будет определяться только температурной стабильностью мультиплексоров и стабильностью частоты источников излучения.

1. Takada K., Yamada H., Okamoto K. *Electron.Letts*, **35**, 824 (1999).
2. Takada K., Yamada H., Okamoto K. *Electron.Letts*, **35**, 1964 (1999).
3. Tchermiskin V., Chekhlova T.K., Timakin A.G. *Electron.Letts*, **33**, 1952 (1997).
4. Takahashi H., Oda K., Toba H., Inone Y. *J.Lightwave Technol.*, **13**, 447 (1995).
5. Okamoto K., Shuto K., Takahashi H., Ohmori Y. *Electron.Letts*, **32**, 1474 (1996).
6. Миллер М., Сычугов В.А., Тулайкова Т.В. *Квантовая электроника*, **11**, 597 (1984).
7. Hida Y., Fukumitsu T., Hanava F., Enomoto Y., Sumuda S., Takato N. *Electron.Letts*, **34**, 75 (1998).
8. Тимакин А.Г., Черемискин И.В., Чехлова Т.К. *Тез. докл. VII Межд. науч.-техн. конф. «Лазеры в науке, технике, медицине»* (Сергиев Посад, изд-е ИРЭ РАН, 1996, с.109–111).
9. Гудзенко А.И., Черемискин И.В., Чехлова Т.К. *Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника*, **31**, № 8, 77 (1988).
10. Белов А.В., Дианов Е.М., Игнатьев С.В. и др. *Квантовая электроника*, **12**, 1076 (1985).
11. Васкес Х.Г., Черемискин И.В., Чехлова Т.К. *Квантовая электроника*, **19**, 387 (1992).
12. Yamada H., Takada K. *J.Lightwave Technol.*, **16**, 364 (1998).
13. Doerr C.R., Joyner C.H., Stulz L.W., Monnard R. *IEEE Photon. Technol.Letts*, **10**, 117 (1998).