

Оптические интегральные схемы на основе кремния для терабитных сетей связи

К.К.Свидзинский

Приведен краткий обзор состояния разработок оптических интегральных схем, изготавливаемых на основе кремниевой технологии, которые предназначены для использования в качестве компонентов современных полностью оптических систем связи с пропускной способностью порядка 1 Тбит/с. Описаны конструкции и технологии изготовления этих схем, а также рассмотрены проблемы, связанные с их разработкой и применением в спектрально-мультиплексированных системах оптической связи.

Ключевые слова: оптические линии и сети связи, оптическое спектральное уплотнение, кремниевые оптические интегральные схемы.

Предисловие

Впервые автор встретился с А.М.Прохоровым ровно 50 лет назад, будучи студентом МФТИ (туда в то время Александра Михайловича пригласил преподавать радиофизику П.Л.Капица). Последняя встреча с Александром Михайловичем произошла в октябре 2001 г. Тогда я рассказал ему о DWDM-революции, происходящей в оптической связи, и о решающем вкладе в нее интегральной оптики, которая тем самым реализовывалась как важное научно-техническое направление. Александр Михайлович предложил мне сделать соответствующий доклад на его семинаре в ИОФРАН. К сожалению, я не успел это осуществить при жизни Александра Михайловича, но надеюсь, что данная работа отвечала бы его пожеланию.

1. Введение

В последнее десятилетие XX века благодаря открытию и разработке новых способов и технических средств в области оптической связи [1] произошел революционный скачок, приведший к 1000-кратному увеличению пропускной способности волоконно-оптических линий связи. Фирмами Lucent, NTT и Alcatel в 2000–2001 гг. достигнут рубеж скорости передачи информации порядка терабит в секунду (10^{12} бит/с); последний рекорд – передача со скоростью 3.2 Тбит/с на расстояние 2500 км [2].

Этот успех обусловлен тремя основными достижениями в области оптической связи. Во-первых, полоса пропускания волоконно-оптического усилителя (OFA) на легированном ионами эрбия волокне в области $\lambda = 1.55$ мкм была увеличена в несколько раз и доведена до 10 ТГц (4 ТГц в С-диапазоне и 6 ТГц в L-диапазоне). Во-вторых, скорость импульсной модуляции инжекционных лазеров, а также скорость электронных интегральных

схем временного уплотнения была увеличена на порядок и достигла 10 Гбит/с (рекорд – 40 Гбит/с). И наконец, была разработана техника плотного оптического спектрального мультиплексирования (DWDM), которая позволила увеличить скорость передачи по одной волоконно-оптической линии более чем в 100 раз (рекорд – передача по 512 спектральным каналам, разделенным по частоте на 25 ГГц [4]).

Главную роль в этой технике мультиплексирования играют устройства на оптических интегральных схемах (ОИС), изготавливаемых на основе технологии кремниевых ОИС. Эти схемы, кратко именуемые КОИС (Si-OIS), а также устройства мультиплексирования и коммутации на них являются предметом настоящей статьи.

С начала 90-х годов для полного использования терагерцовой полосы OFA разрабатывались два альтернативных метода уплотнения каналов – оптическое временное мультиплексирование (OTDM) [5] и оптическое спектральное мультиплексирование (WDM) [3]. Последний метод основан на линейном оптическом преобразовании и реализуется на ИС, которые работают по принципу оптического спектроскопа. Метод OTDM базируется на нелинейно-оптическом взаимодействии в отрезке волоконного волновода [5]. При выборе между этими методами решающим фактором стала совокупность очень жестких требований к компонентам систем связи по стоимости, надежности, эксплуатационным характеристикам и т. п., которые предъявляет техника связи, в частности оптическая техника. Этим требованиям в настоящее время способны удовлетворить только КОИС. Поэтому на данном этапе развития терабитных волоконных линий связи предпочтение отдается построению систем WDM на КОИС, что, конечно, не исключает применения OTDM в современных линиях связи.

Разработка техники DWDM на основе КОИС, обеспечивающей 100-кратное увеличение скорости передачи, является, несомненно, одним из наиболее значительных технических успехов последнего десятилетия. Это важное прикладное достижение интегральной оптики аккумулировало результаты почти 40-летнего периода ее развития.

К.К.Свидзинский, Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38

Поступила в редакцию 30 апреля 2003 г.

2. Компоненты терабитной сети на КОИС

Современный этап развития оптической связи характеризуется переходом от сетей с оптоэлектронными узлами коммутации к полностью оптическим сетям связи (AON), в которых коммутация информационных потоков производится путем переключения каналов без фотоэлектрического преобразования и регенерации световых сигналов, снижающих скорость передачи. Полностью оптические сети связи могут иметь разную структуру и способы реализации [6]. Для выяснения роли КОИС в их элементной базе достаточно проследить одну полную линию в сети связи, т.е. отдельный маршрут от передающего абонента к принимающему. Такая линия, выделенная из состава некой гипотетической терабитной сети, изображена на рис. 1.

Линия с предельно высокими параметрами может объединять на входе до 128 абонентов (персональных компьютеров). Каждый из них передает в реальном масштабе времени на тактовой частоте шины, например 133 МГц (или 266 МГц), 4-байтовые (или 8-байтовые) числа, которые уплотняются временным электронным мультиплексором в один канал с пропускной скоростью до 10 Гбит/с. Сигнальный поток подается на модулятор излучения инжекционного лазера, настроенный на одну из стандартных фиксированных несущих частот в области длин волн $\lambda = 1.55$ мкм. Для каждого спектрального канала требуются оптическая полоса частот около 50 ГГц и разделение между несущими ~ 100 ГГц, необходимое для обеспечения достаточно малых перекрестных помех. Все эти каналы по волоконным световодам подаются на вход КОИС оптического спектрального мультиплексора DWD Mux, который сводит их в общую однододовую выходную линию, передающую совокупность сигналов на N несущих частотах. В полосе волоконного усилителя шириной около 10 ТГц может быть размещено до 128 спектральных каналов (с разделением по 100 ГГц) с результирующей скоростью передачи 1.2 Тбит/с.

При прохождении потока сигналов по линии в узлах сети может осуществляться частичная коммутация, т.е.

ответвление некоторых выбранных каналов $\lambda_i, \lambda_j, \lambda_k \dots$ промежуточным абонентам, и подключение в этом же узле других каналов $\lambda'_i, \lambda'_j, \lambda'_k \dots$ на тех же несущих частотах. Такая операция производится специальным устройством на КОИС – селективным мультиплексором ввода – вывода (OADM). Кроме того, в сложных сетях сигналный поток может поступать на центральный оптический кросс-коммутатор (OXC), если таковой имеется в сети, который производит неблокирующую $M \times M$ матричную коммутацию оптических каналов. После коммутации оптический поток снова усиливается и, проходя через узлы сети, может снова подвергаться частичной коммутации на перестраиваемых селективных мультиплексорах ввода – вывода.

В конечном узле сети поток разуплотняется с помощью оптического спектрального демультиплексора DWD Demux на основе КОИС, с выхода которого выводится N разуплотненных каналов, имеющих скорость передачи 10 Гбит/с. Далее эти каналы распределяются по абонентам-получателям, что может быть выполнено с помощью селективных оптических волноводных переключателей SWS, каждый из которых выбирает один из M каналов (например, из $M = 16$) по команде от соответствующего абонента. Выбранный λ -канал по волоконной линии поступает на фотоприемник, после которого поток электрических сигналов разуплотняется электронным демультиплексором (TD Demux) и подается на вход приемного компьютера или иного приемника.

Все перечисленные оптические компоненты линии, за исключением лазеров с модуляторами и волоконными усилителями, могут быть изготовлены на основе кремниевой технологии, что обеспечивает им стабильные характеристики и потенциально низкую стоимость. Особое положение занимает наиболее сложный оптический кросс-коммутатор. Для небольшого числа каналов ($M \leq 16$) коммутатор размером $M \times M$ может быть изготовлен из M последовательно включаемых перестраиваемых селективных мультиплексоров ввода – вывода на КОИС. Однако при большем размере матрицы кросс-коммутатора количество требуемых волоконных межсоединений силь-

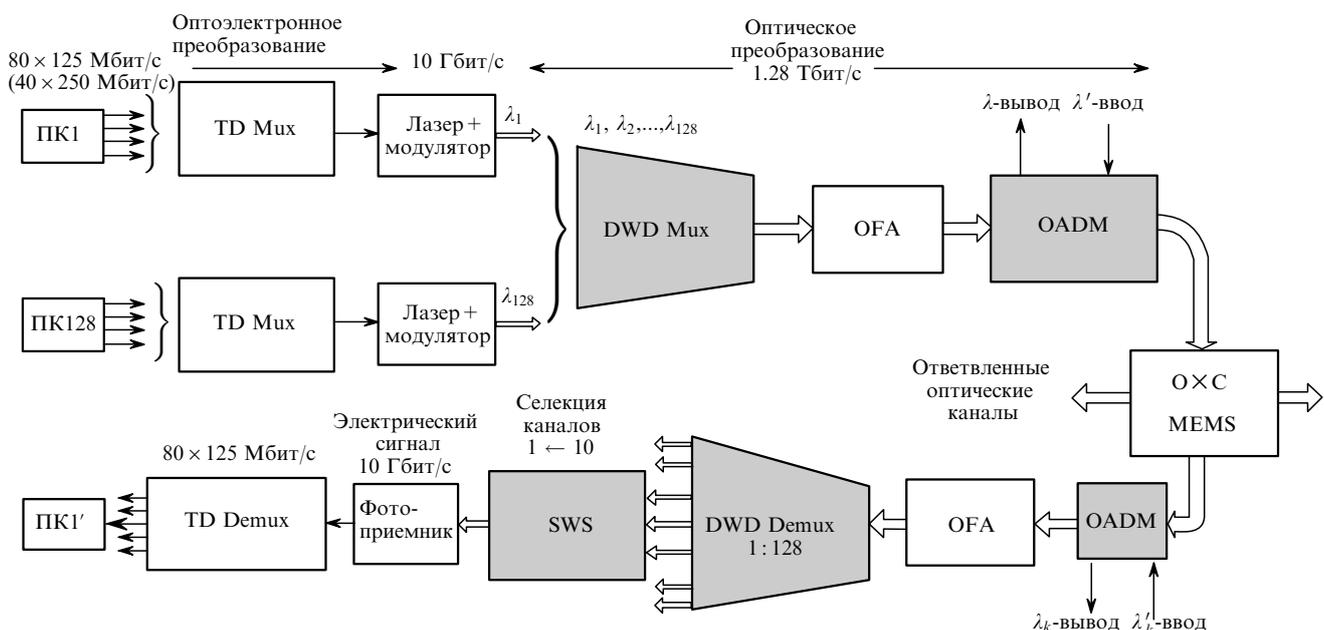


Рис. 1. Типичная мультиплексированная линия передачи как фрагмент терабитной оптической сети. (затемнены элементы линии на кремниевых ОИС, коммутатор OXC на основе MEMS-технологии).

но возрастает и стоимость коммутатора увеличивается пропорционально M^2 .

Наиболее перспективным техническим решением для больших (~100 × 100) оптических кросс-коммутаторов считается микроэлектромеханическая система (MEMS) типа кросс-бар-коммутатора. В настоящее время весьма дорогостоящая технология MEMS освоена двумя крупнейшими фирмами – Lucent и NTT. Таким образом, остальные важные компоненты, а именно DWD Mux, DWD Demux, OADM и SWS (на рис.1 затемнены), изготавливаются на основе КОИС, которые более подробно рассмотрены ниже.

3. Технология и конструкция КОИС

КОИС – это планарная волноводная оптическая схема, изготавливаемая на толстопленочном слое SiO₂, который в свою очередь наносится на стандартную кремниевую пластину для изготовления ИС. Помимо стандартных процессов изготовления полупроводниковых ИС – очистки, окисления, термического отжига, фотолитографии, металлизации и т. д. – изготовление КОИС основывается на двух базовых процессах. Первый из них – плазмохимическое осаждение из паровой фазы (PECVD), обеспечивающее осаждение толстых слоев SiO₂ (3–30 мкм) на кремниевую подложку с тонким слоем термического окисла. Второй процесс – реактивно-ионное травление (RIE) – обеспечивает глубокое травление SiO₂ и Si. Требуемая глубина травления с вертикальными стенками достигает 100 мкм.

На современной стадии разработок КОИС утвердились и считаются перспективными три типа волноводных слоев на кремниевой подложке: легированные Ge – SiO₂:GeO₂/SiO₂/Si; SION-волноводы – SiO_xN_y/SiO₂/Si и SOI-волноводы – Si mono/SiO₂/Si.

Волноводы первого типа на основе кварцевого стекла, легированного Ge, в которых ожидалось максимально возможное подобие модовой структуры структуре одноименного волокна на $\lambda = 1.55$ мкм, были предложены на начальной стадии разработки КОИС [1]. Эти волноводы в настоящее время наиболее хорошо изучены и технологически освоены. Именно на них получены наиболее высокие уровни интеграции КОИС: созданы DWDM-мультиплексор на 256 каналов и оптический кросс-коммутатор размером 16 × 16 на 16-ти DWD-переключателях. Однако, во избежание излучательных потерь на изгибах, радиусы закругления этих волноводов при скачке показателя преломления сердцевин $\Delta n \sim 0.003$ должны быть довольно велики – около 10 мм. Это приводит к тому, что размеры схем становятся слишком большими – до 100 мм. Схемы занимают целую кремниевую пластину, вследствие чего необходимо применять дорогостоящую контактную литографию. Из-за больших размеров схем возникают трудности получения высокооднородных оптических слоев на большой площади, что принципиально необходимо для функционирования устройств на КОИС.

По этой причине усилия разработчиков были направлены на создание SION-волноводов (рис.2) с большим скачком показателя преломления $\Delta n \sim 0.03$, которые допускают радиусы закругления 1.5 мм. Благодаря этому КОИС среднего масштаба интеграции (например, 16-канального DWDM-мультиплексора) размещается на чипе размером 10 × 12 мм. Такая КОИС уже может быть из-

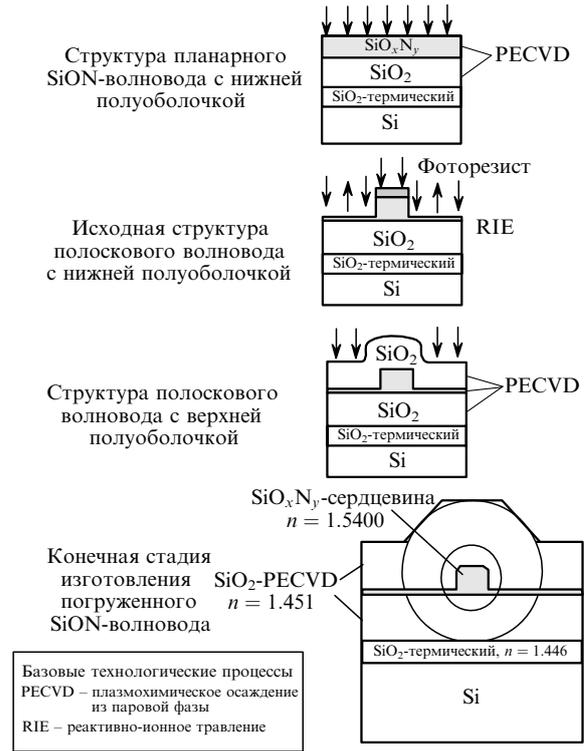


Рис.2. Технология изготовления волноводных структур КОИС на полосковых SION-волноводах.

готовлена методом проекционной (а не контактной) литографии на степере. Однако при этом, к сожалению, увеличивается трудоемкость изготовления оптических торцевых соединений планарно-полосковых SION-волноводов с волоконными световодами, обладающих малыми (менее 1дБ) потерями на ввод излучения. (В настоящее время на многоканальные волноводные соединения приходится до 90 % стоимости интегрального мультиплексора в целом.) Наилучшим конструктивным решением для оптических вводных элементов волокно – планарный волновод является, по-видимому, торцевое соединение через волоконный рупор, изготовленный из отрезка световода с термически расширенной сердцевиной

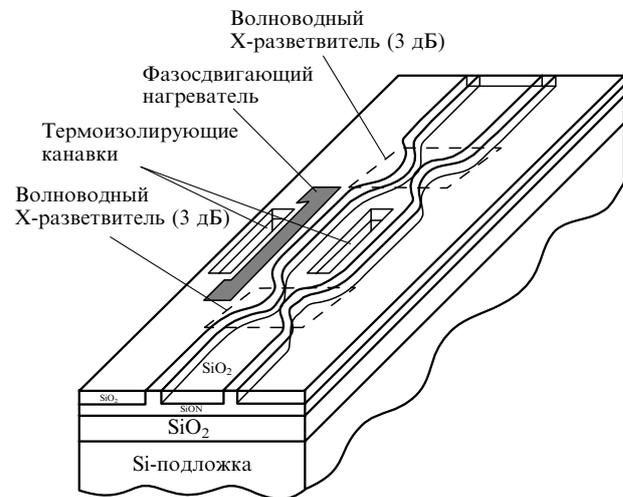


Рис.3. Оптический волноводный переключатель 2 × 2 на основе интерферометра Маха – Цендера с термооптическим модулятором на кремниевой ОИС с SION/SiO₂-волноводами.

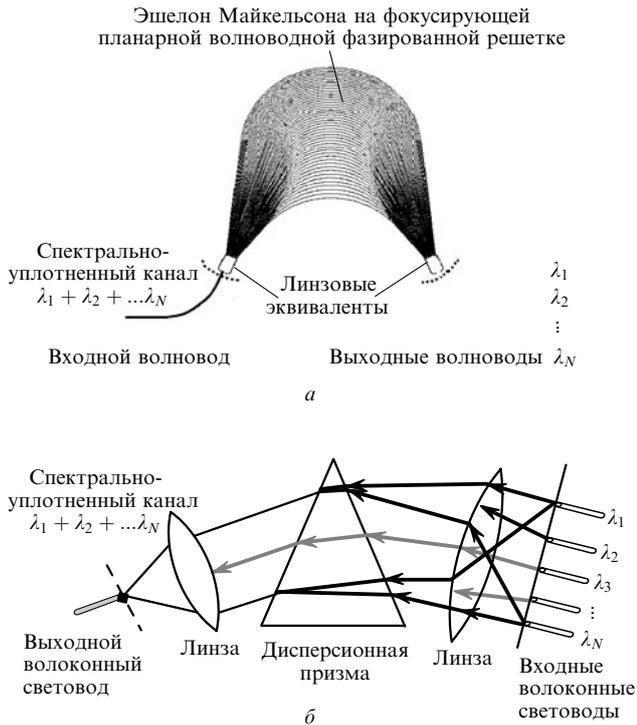


Рис.4. Оптический сигнальный мультиплексор на планарной волноводной фазированной решетке (а) и его объемный прототип на призмном спектрооскопе (б).

(ТЕС) [8], направляемого с помощью глубоко вытравленной V-образной канавки в кремниевой подложке.

В качестве элементов управления и переключения оптических каналов в КОИС наилучшим образом зарекомендовали себя термооптические 2×2 переключатели на основе интерферометра Маха–Цендера (рис.3). Этот переключатель имеет быстродействие порядка миллисекунды, которого хватает для реконфигурации связей ка-

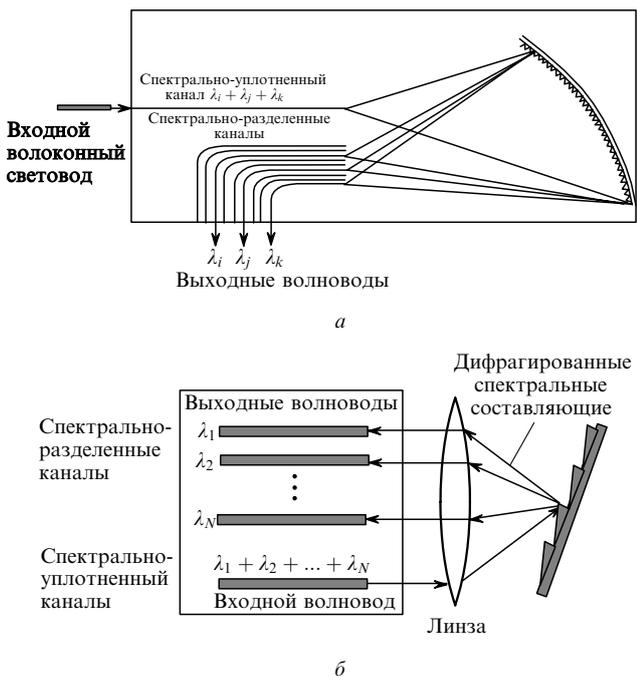


Рис.5. Оптический спектральный демультиплексор на планарном эшелоне Майкельсона–Роуланда (а) и его объемный аналог на отражательной дифракционной решетке (б).

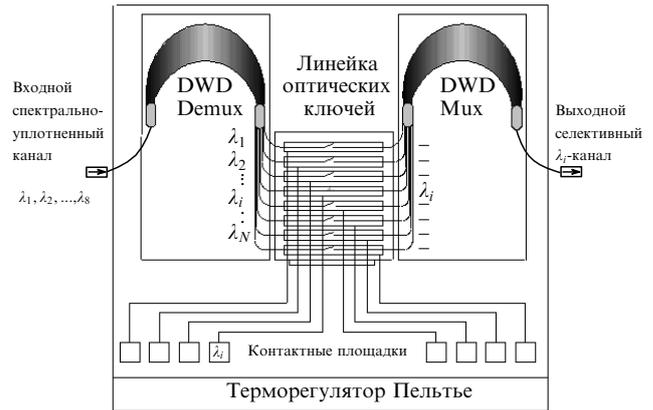


Рис.6. Оптический спектрально-селективный переключатель.

налов в сети, но недостаточно для осуществления других важных задач оптической коммутации. С целью повышения скорости оптического переключения в последнее время активно разрабатываются КОИС на SOI-структурах [10], где быстродействие, определяемое временем жизни неосновных носителей в кремнии, может быть повышено до 100 нс.

Эффективная реализация метода оптического спектрального уплотнения основана на хорошо известных принципах классической оптической спектроскопии, а также на принципе действия радиолокационной фазированной антенной решетки. Планарная реализация DWD-мультиплексора и демультиплексора на ОИС, а также их объемный эквивалент на призмном спектрооскопе представлены на рис.4. На рис.5 изображены альтернативные варианты конструкции этих же устройств на планарном решеточном эшелоне Майкельсона–Роуланда, являющемся эквивалентом объемного отражательного решеточного спектрооскопа. К настоящему времени пассивные неперестраиваемые мульти(демульти)плексоры на КОИС вышли на уровень коммерческой продукции и производятся более чем 30 фирмами.

Для построения селективных волноводных переключателей было предложено множество разных способов и конструкций. На данный момент наиболее привлекательной и близкой к реализации является конструкция, состоящая из демультиплексора и мультиплексора, которые соединяются между собой через ряд (решетку) эле-

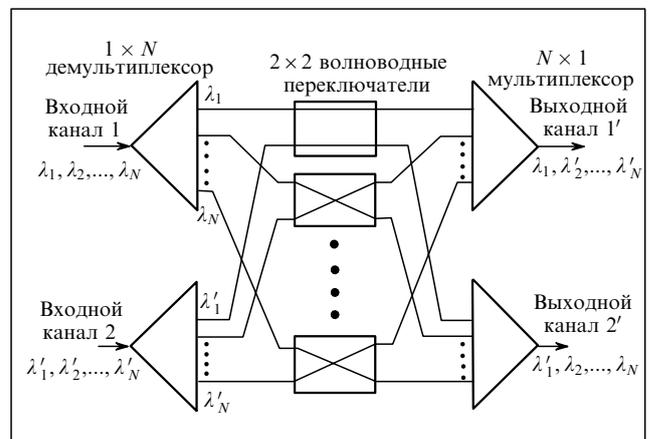


Рис.7. Принципиальная схема коммутируемого оптического мультиплексора ввода–вывода, содержащего линейку волноводных переключателей 2×2 .

кthroоптических или термооптических переключателей [11] (рис.6). Реконфигурируемый (перестраиваемый) селективный DWD-мультиплексор ввода–вывода описан в работе [12]. Он состоит из двух мультиплексоров, соединенных через ряд 2×2 переключателей (рис. 7).

4. Заключение

На современном этапе развития волоконно-оптических систем связи наиболее важной задачей является не столько возможность увеличения скорости передачи и числа мультиплексируемых каналов, сколько снижение стоимости компонентов, увеличение их надежности и расширение номенклатуры. Как следует из вышеизложенного, эта задача в значительной мере решается на основе разработки КОИС. Главные базовые компоненты для терабитных спектрально-уплотненных оптических сетей связи, а именно мульти- и демультиплексоры, селективные коммутаторы ввода–вывода, а также селективные переключатели, могут быть созданы с использованием КОИС, изготовленных на основе современной кремниевой технологии с широким применением PECVD- и RIE-процессов. Компоненты на основе КОИС удовлетворяют основным требованиям к оптической связи и, по-видимому, будут перспективными для элементной базы терабитных оптических сетей в течение десяти, а возможно, и более лет.

Управляемые коммутационные КОИС не обеспечивают достаточно быстрого переключения каналов и могут претендовать на скорости до 10 МГц. Для более быстрых переключателей, которые понадобятся, например, для оптической пакетной коммутации в сетях, остается

ниша, которую, скорее всего, будут занимать ОИС на структурах из четверных соединений InGaAs/InP [12]. Основная проблема, стоящая на этом пути, – высокая стоимость технологии ОИС на четверных соединениях. В качестве перспективного направления создания более быстродействующих кремниевых ОИС заслуживают внимания разработки КОИС на SOI-структурах [8, 10].

Автор выражает признательность А.А.Гончарову за обсуждение технологических аспектов разработки КОИС, а также Е.М.Дианову за стимулирующую поддержку этой работы.

1. Kartalopoulos S.V. *Introduction to DWDM Technology* (New York: IEEE Press, 2000).
2. Hullin C., Gueritch C., Grand E., Lesterlin D., Ruggeri S., Adlerfligel M., Blondel J.P., Boudier V., Trecasser C., Curincks L., Brandon E., Courtois O., Filet D. *Proc. ECOC'2002* (Copenhagen, Denmark, September 2002).
3. Emkey W.L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4289**, 46 (2001).
4. Takada K., Abe M., Shibata M., Ishii M., Okamoto K. *IEEE Photonic Technol. Lett.*, **13** (11), 1182 (2001).
5. Nakazawa M., et al. *Electron. Lett.*, **36**, 2027 (2000).
6. Goralski W. *Optical Networking & WDM* (Osborn: McGraw-Hill, 2002).
7. Neukermans A., Ramaswami R. *IEEE Communications Magazine*, **39**, 62 (2001).
8. Yhibino K., Hida Y., Kaneko A., et al. *Proc. OFC'2000* (Baltimore, ND, 2000, paper WH2-1/127).
9. Goh T., Yasu M., Hattori K., et al. *J. Lightwave Technol.*, **19** (3), 371 (2001).
10. Tang Yin S., Xu Y., Chan J.K. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3953**, 2 (2000).
11. Ticknor A., Chen W. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4289**, 88 (2001).
12. Smit M. *Proc. ICIO'01* (Paderborn, Germany, 2001, paper FrA1.1, p. 379).