

ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Оптический маршрутизатор на основе кольцевого микрорезонатора для фотонной сети на чипе*

Жихуа Ю, Ки Жанг, Ксин Джин, Хуан Жао, Хади Багсиаи, Д.Р.Селвиа

Проведено проектирование и анализ работы неблокирующего оптического маршрутизатора на основе микрорезонаторов, который может быть использован в качестве переключающего узла для построения большой фотонной сети на чипе. Предлагаемый маршрутизатор включает в себя 16 кольцевых микрорезонаторов (КМР), 14 пересечений и четыре 90-градусных изгиба. КМР можно перестраивать за счет термооптического или электрооптического эффекта. По сравнению с ранее описанным оптическим маршрутизатором 5×5 данный маршрутизатор содержит меньшее число КМР, пересечений и изгибов, что делает структуру более компактной, увеличивает скорость переключения, уменьшает потери и энергопотребление. Кроме того, все кольцевые резонаторы работают на одной длине волны, что делает возможным масштабирование на сеть любого размера.

Ключевые слова: оптический маршрутизатор, сеть на чипе, кольцевой микрорезонатор, интерфейс человек-машина, оптический переключатель, фотонные сети, кремниевая фотоника, внутреннее соединение.

1. Введение

В последнее время фотонные сети на чипе (ФСЧ) привлекают внимание многих исследователей для реализации внутренних соединений в многоядерных распределенных кластерных системах для облачных вычислений. Как указано в международном плане по развитию полупроводниковой технологии (International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS), ФСЧ – единственная альтернативная технология формирования таких соединений, которая может обеспечить высокую скорость передачи сигнала в сочетании с низким потреблением энергии [1, 2]. Для построения эффективных ФСЧ анализировалось несколько вариантов сетевой топологии [3]: ячеистая, тороидальная, матричная, утолщенное дерево и сеть Клоза [4, 5]. По конфигурируемости структуры маршрутизаторов можно разделить на две категории. Одна из них – селективная по длине волны пассивная сеть, структура которой жестко определена ее дизайном. Путь от источника к приемнику устанавливается с помощью динамического выбора специфической длины волны источника или приемника [6]. Другая категория – переключаемая

сеть с электронным управлением. Первую отличает малое время ожидания, т.к. маршрутизирующая сеть пассивна, однако проблемой является необходимость иметь много источников света, поскольку возможные пути жестко фиксированы. Это приводит к проблемам с масштабированием из-за необходимого физического пространства и расходования мощности каждым источником света.

В оптической переключаемой сети дизайн оптического маршрутизатора является ключевым. В последние годы сообщалось об оптических маршрутизаторах на чипе [7, 8], из которых следует особо отметить пятипортовый оптический маршрутизатор, сконструированный авторами [9]. Они использовали 16 кольцевых микрорезонаторов (КМР) одинакового радиуса и 12 волноводных пересечений на чипе площадью 460×1000 мкм. Динамическое переключение достигалось за счет термооптической (ТО) настройки КМР. Была продемонстрирована двухсторонняя связь между пятью входами и пятью выходами.

В настоящей работе мы предлагаем новую конфигурацию пятипортового 5×5 неблокирующего оптического переключаемого маршрутизатора, который можно использовать как переключающий узел при построении ФСЧ. Оптический маршрутизатор имеет 16 микроколец, 14 пересечений и четыре 90-градусных волноводных изгиба. Для реализации различных схем соединения КМР можно управлять за счет ТО или электрооптического (ЭО) эффекта. Кроме того, все кольцевые резонаторы работают на одной длине волны, что позволяет проводить масштабирование на сеть любого размера.

2. Архитектура и маршрутизаторы фотонной сети

2.1. Архитектура фотонных сетей

Для объединения слоев электронных и фотонных устройств в интегральной схеме на одном или нескольких

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

Zhihua Yu. School of Automation, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China; Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, UCL, London WC1E 7JE, UK; e-mail: yuzhihua@cug.edu.cn;

Qi Zhong. China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China

Xin Jin, Juan Zhao. School of Automation, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China

Hadi Baghsiahi, D.R.Selvia. Department of Electronic and Electrical Engineering, University College London, UCL, London WC1E 7JE, UK

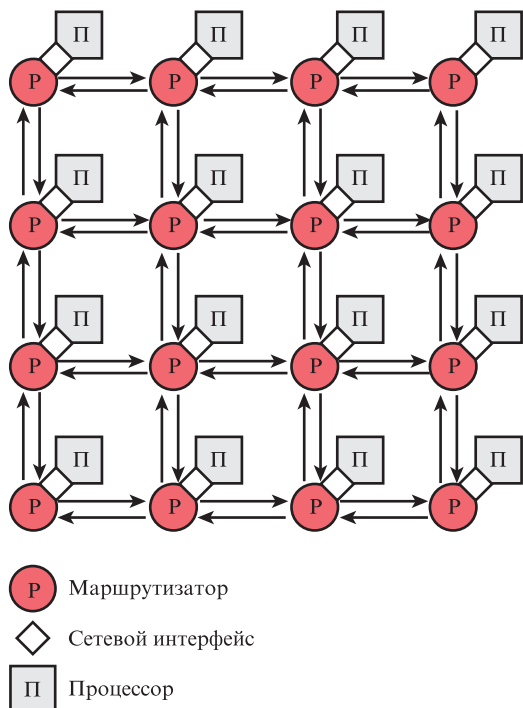


Рис.1. Схематическое изображение двумерной ячеистой фотонной сети.

чихах на печатной плате предлагались различные подходы [6]. Однако общепризнано, что ФСЧ должны иметь многослойную архитектуру с электрическим управлением и ячеистой или тороидальной топологией [10, 11]. На рис.1 показана универсальная блок-схема ячеистой сети 4 × 4, соединяющей 16 различных элементарных процессоров. Каждый процессор связывается с пятипортовым маршрутизатором через электронно-оптические/оптоэлектронные интерфейсы в оптическом слое. Поскольку в данной ячеистой сети нет оптических буферов, она является фотонной схемой-переключаемой сетью. В отличие от сетей с маршрутизацией по длине волны, путь передачи данных от источника к приемнику динамически конфигурируется электронными схемами.

2.2. Топология маршрутизатора

На рис.2 показан пятипортовый оптический маршрутизатор с 16 КМП, являющийся одним из узлов приведенной на рис.1 ячеистой фотонной сети. Конфигурация включает в себя четыре волновода, изогнутых на 90°, и один прямой волновод, которые образуют пять входных и пять выходных портов, обеспечивающих одновременную двухстороннюю связь. Кроме того, все 16 зеркально копирующих резонаторов имеют одинаковую резонансную длину волны и могут управляться электронной схемой, интегрированной на том же чипе. Поскольку все КМП идентичны, они имеют одни и те же структурные параметры, что упрощает изготовление данного маршрутизатора по сравнению с таковыми, использующими селекцию по длине волны. В табл.1 приведен 21 возможный способ установления оптической связи между различными портами входа и выхода. Любому из портов в четырех направлениях запрещено связываться с самим собой.

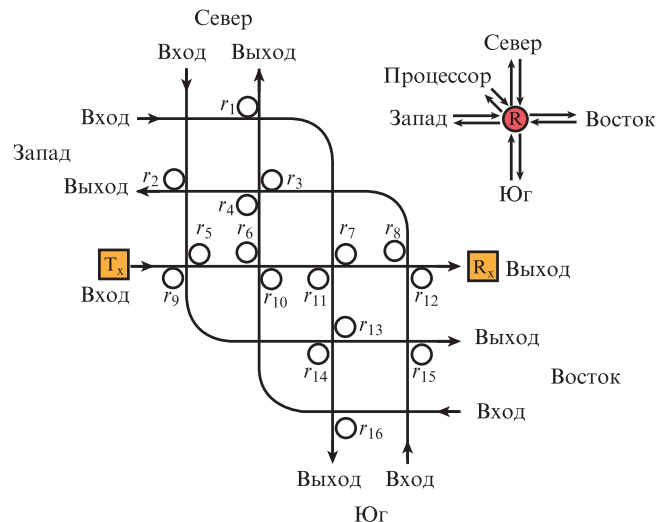


Рис.2. Пятипортовый двунаправленный оптический маршрутизатор.

Табл.1. Оптические связи в пятипортовом неблокирующем оптическом маршрутизаторе.

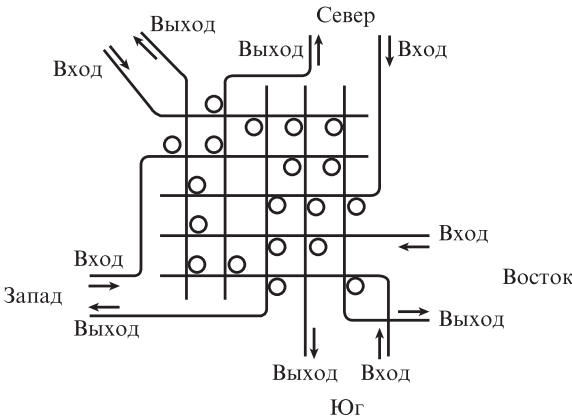
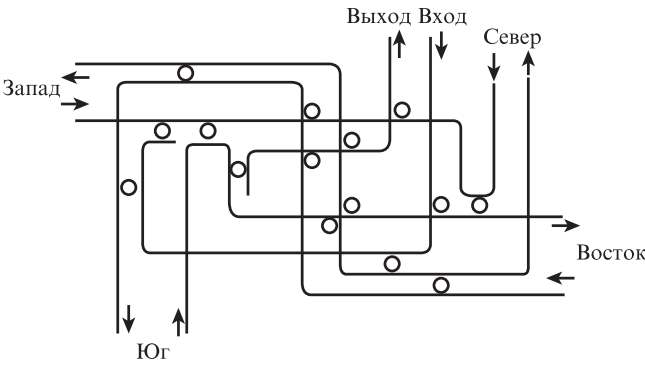
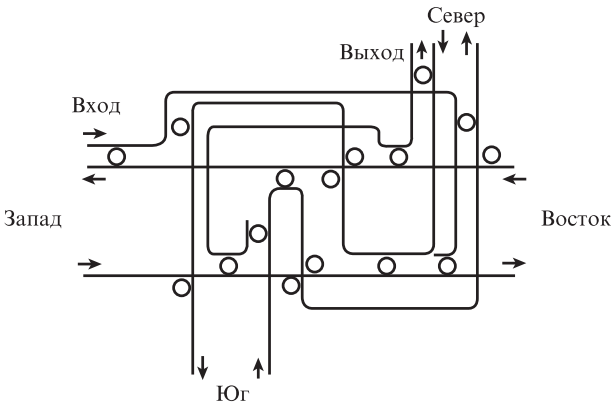
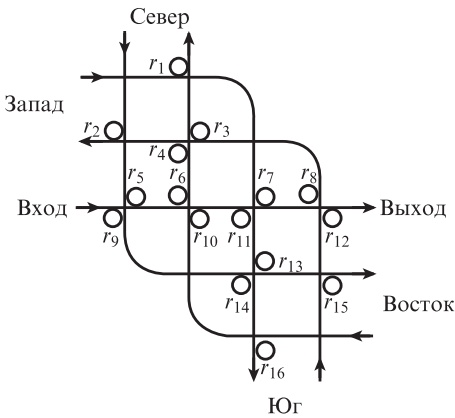
Входные порты	Выходные порты				
	Восток	Юг	Запад	Север	Выход
Восток	–	r_{16}	r_4	нет	r_{10}
Юг	r_{15}	–	нет	r_3	r_{12}
Запад	r_{13}	нет	–	r_1	r_7
Север	нет	r_{14}	r_2	–	r_5
Вход	r_9	r_{11}	r_8	r_6	нет

Более того, каждая из 21 оптической связи устанавливается специфическим резонансным микрокольцом с номером m (обозначается r_m) или непосредственно волноводом (обозначается «нет» – микрокольцо не нужно).

В отличие от внутренних соединений с использованием металлических дорожек, в фотонных схемах могут применяться пересечения оптических волноводов, поэтому можно осуществить сложную маршрутизацию в двумерном слое. Однако пересечения и изгибы волноводов тоже вносят дополнительные потери на проход и отражение, а также перекрестные помехи. Поэтому топология маршрутизатора должна содержать минимальное число пересечений и изгибов. Поскольку изгибы вносят большие потери, чем пересечения, лучше минимизировать число изгибов за счет небольшого увеличения числа пересечений.

Предлагаемый пятипортовый оптический маршрутизатор имеет 16 КМП, 14 пересечений и четыре изгиба. По сравнению с другими пятипортовыми маршрутизаторами, предложенными в [3, 7, 8, 10], наш маршрутизатор имеет меньшее число пересечений, изгибов и КМП. В табл.2 приведены четыре типичных оптических маршрутизатора, имеющие по пять портов входа–выхода. Уменьшение числа пересечений и изгибов означает снижение вносимых потерь и перекрестных помех, которые существенно ограничивают возможность масштабирования ФСЧ. Кроме того, уменьшение числа КМП дает выигрыш в общей площади и потребляемой мощности, хотя и не влияет на отдельные оптические связи с использованием волноводов без КМП, такие как Восток→Север, которые не требуют затрат мощности.

Табл.2. Пятипортовые маршрутизаторы.

Конфигурация	Комментарий	Литература
	<p>20 микроколец, 26 пересечений, 8 изгибов, ЭО перестройка</p>	[3]
	<p>16 микроколец, 12 пересечений, 16 изгибов, ТО перестройка</p>	[7, 8]
	<p>16 микроколец, 11 пересечений, 18 изгибов, ТО перестройка</p>	[10]
	<p>16 микроколец, 14 пересечений, 4 изгиба, ТО или ЭО перестройка</p>	Настоящая работа

3. Конструкция переключателя на КМР

3.1. Конструкция КМР

Основным элементом переключателя является фильтр типа вставка – выделение, состоящий из КМР, связанного с пересечением волноводов. На рис.3,а показана схема основного стандартного блока. Исходный сигнал, возбуждаемый на входном порте, распространяется по волноводу, расположенному вертикально. Если длина волны сигнала не соответствует резонансной длине волны КМР, оптический сигнал продолжает распространяться без взаимодействия с другим, ортогональным (горизонтальным) волноводом. Если длина волны сигнала является резонансной, оптический сигнал проходит в микрорезонатор и выходит в другой волновод. На рис.3,б показаны спектры пропускания, рассчитанные методом матриц передачи.

Для передачи большей мощности во второй волновод на резонансной длине волны проанализирован фактор

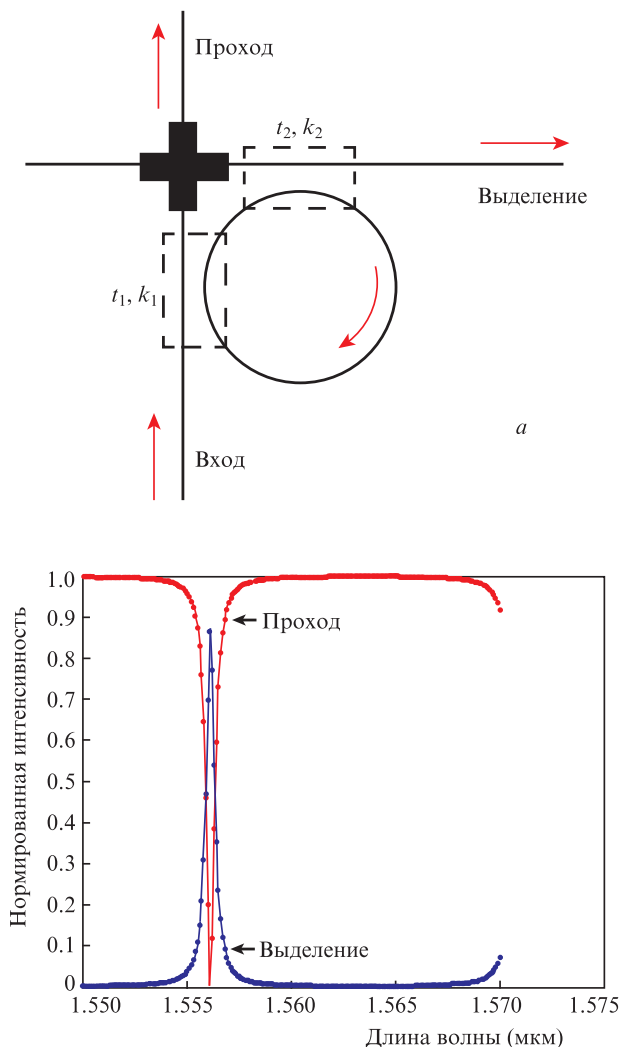


Рис.3. Основной переключательный элемент: схема КМР, имеющего боковую связь с пересекающимися волноводами ($k_{1,2}$ и $t_{1,2}$ – коэффициенты связи и пропускания соответственно) (а), а также спектры пропускания при проходе и выделении, полученные путем численного моделирования с использованием метода матриц передачи ($k_1 = k_2 = 0.3$, $A = 0.993$ – амплитудный коэффициент пропускания микрорезонатора за один полный оборот) (б).

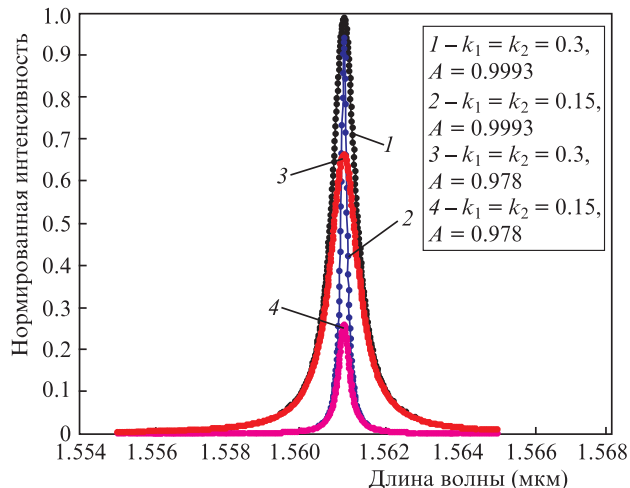


Рис.4. Нормированная интенсивность сигнала, отводимого во второй волновод, вблизи резонансной длины волны при различных $k_{1,2}$ и A . Цветной вариант рис.4 помещен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

экстинкции ER ($ER = -10\lg(P_{\min}/P_{\max})$) спектра пропускания в зависимости от $k_{1,2}$ и A . Согласно [12] большие $k_{1,2}$ и A (низкие потери на пропускание) дают высокий фактор ER. Таким образом, сильная связь и низкие потери в КМР – лучший выбор характеристик для данного маршрутизатора. Это видно из рис.4, где показана зависимость нормированной интенсивности выделяемого во второй волновод сигнала от длины волны при разных $k_{1,2}$ и A .

3.2. Реализация переключения

В соответствии с приведенным выше обсуждением при выполнении условия резонанса свет не проходит через узел, а направляется в боковой волновод. Изменяя показатель преломления кремния и, следовательно, эффективный показатель преломления моды, можно переключать излучение с фиксированной длиной волны между портами прохода и выделения. Выражение для сдвига резонансной длины волны можно представить в виде $\Delta\lambda = \lambda_0 \Delta n_{\text{eff}}/n_{\text{eff}}$, где Δn_{eff} – сдвиг эффективного показателя преломления микрорезонатора, а λ_0 – исходная резонансная длина волны.

Существуют два основных способа перестройки показателя преломления кремния. Один из них состоит в использовании ТО эффекта. [13, 14]. При нагреве микрорезонатора меняется его показатель преломления и сдвигается резонансная длина волны. Термооптический эффект для кремния на длине волны 1.5 мкм можно описать выражением

$$\frac{dn_{\text{eff}}}{dT} = 1.86 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}. \tag{1}$$

Формула (1) показывает, как температура T связана с эффективным показателем преломления кремния, который, в свою очередь, связан с резонансной длиной волны кольца. При повышении температуры микрорезонатора на 5 К эффективный показатель преломления возрастает на 0.001, а резонансная длина волны сдвигается в красную область на 0.5 нм, как показано на рис.5,б.

Другим способом перестройки резонансной длины волны является использование ЭО эффекта [15, 16], из-

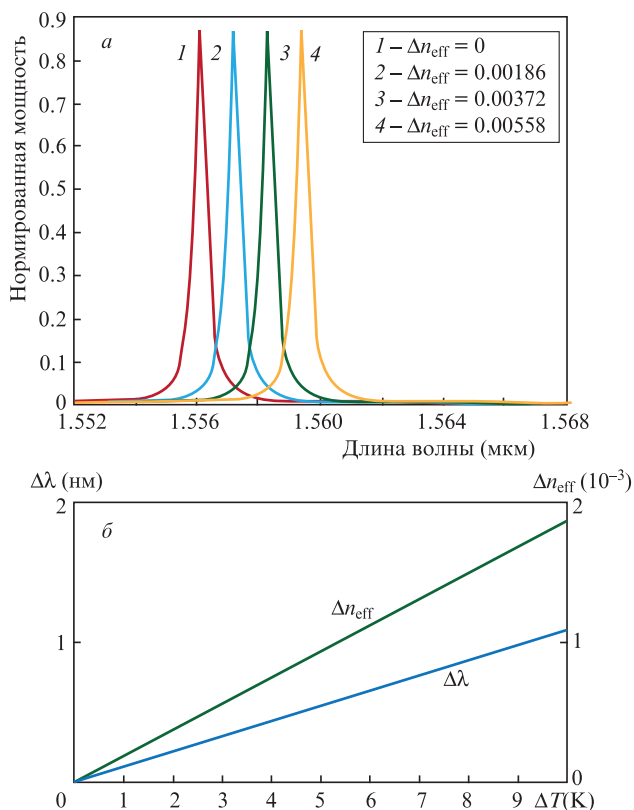


Рис.5. Сдвиг резонансной длины волны микрокольца из-за изменения эффективного показателя преломления (а) и эквивалентный температурный сдвиг (б).

вестного как эффект дисперсии плазмы свободных носителей в кремнии. Эмпирические уравнения, описывающие изменение показателя преломления Δn и коэффициента поглощения $\Delta\alpha$ в зависимости от изменения концентраций свободных электронов и дырок ΔN_e (в см^{-3}) и ΔN_h (в см^{-3}) на длине волны 1.55 мкм, имеют вид

$$\Delta n = \Delta n_e + \Delta n_h = -[8.8 \times 10^{-22} \Delta N_e + 8.5 \times 10^{-18} (\Delta N_h)^{0.8}], \quad (2)$$

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_e + \Delta\alpha_h = 8.5 \times 10^{-18} \Delta N_e + 6.0 \times 10^{-18} \Delta N_h. \quad (3)$$

Преимуществом использования ЭО эффекта является малое время переключения резонанса, которое для кремния составляет менее 100 пс. Однако смещение $\Delta\lambda$ длины волны резонанса за счет ЭО эффекта не превышает ~ 2 нм, тогда как при использовании ТО эффекта было получено большее смещение – порядка 20 нм, поскольку ТО эффект вызывает очень сильное изменение показателя преломления кремния ($\Delta n \sim 1 \times 10^{-2}$). Поэтому на практике именно ТО эффект обычно используется в переключателях оптических схем. Однако ЭО схема переключения будет полезна в будущем, т. к. она обеспечивает большую компактность, большую скорость переключения и меньшее энергопотребление.

4. Анализ потребления оптической мощности

Потери оптической мощности в данном маршрутизаторе связаны в основном с пропусканием в прямой канал, когда он закрыт, потерь на пересечениях и изгибах волноводов (если не принимать во внимание потери на со-

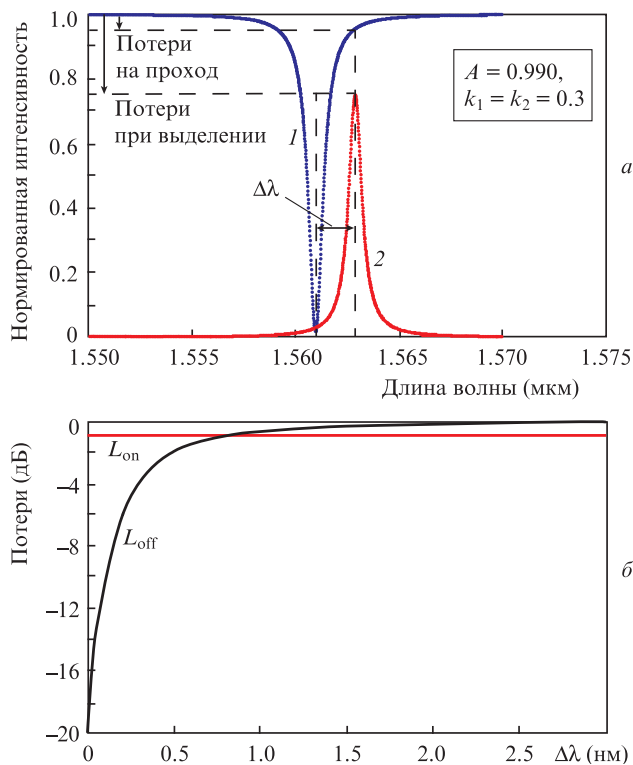


Рис.6. Рассчитанные спектры пропускания для портов одного переключающего элемента, когда порт прохода выключен, а порт выделения включен (интенсивности проходящего через закрытый порт прохода (1) и через открытый порт выделения (2) сигналов) (а), а также рассчитанные потери на пропускание выключенного порта прохода (L_{off}) и включенного порта выделения (L_{on}) в зависимости от сдвига резонансной длины волны при включенном порте выделения (б).

гласование на входе и на выходе). Мы пренебрегаем потерями при распространении в волноводах, т. к. длины внутренних соединений составляют микрометры, а потери в волноводах – до 1.7 дБ/см. Поскольку радиус изгиба волновода намного больше радиуса микрокольца (см. рис.3,а), потери на изгибе можно приравнять к потерям при распространении и ими также пренебречь. Таким образом, потери на линии, вносимые маршрутизатором, зависят только от числа переключающих элементов типа включено/выключено, а также от числа волноводных пересечений, проходимых световым сигналом на всем его пути. Как показано на рис.6,а, потери на открытом выделении намного больше, чем на закрытом проходе. Если свет в данном маршрутизаторе проходит длинный путь, число выключенных коммутирующих элементов может намного превышать число включенных. Следовательно, по сравнению с потерями выделяемого (отводимого) сигнала накапливающиеся потери пропускаемого сигнала могут быть преобладающими.

Рассмотрим микрокольца радиусом 6 мкм и выберем следующие расчетные параметры: $n_{\text{eff}} = 2.65$, $A = 0.990$, $k_1 = k_2 = 0.3$ (в соответствии с работой [3]). Для расчета потерь на пропускание закрытого порта прохода и открытого порта выделения использовался метод матриц передачи. Из рис.6 видно, что оба типа потерь определяются отстройкой $\Delta\lambda$ от резонансной длины волны при выключенном состоянии.

В многоядерной сети максимальная масштабируемость межпортового соединения главным образом зависит от потерь мощности, особенно при прохождении того

Табл.3. Потери (в дБ) для 21 оптической связи в пятипортовом неблокирующем оптическом маршрутизаторе (числа пересечений волноводов и выключенных элементов приведены через косую черту в квадратных скобках для каждого маршрута).

Вход	Выход				Выход
	Восток	Юг	Запад	Север	
Восток	–	–1.04[1/0]	–2.48[4/3]	–2.28[6/4]	–2.48[4/3]
Юг	–1.04[1/0]	–	–2.28[6/4]	–2.66[5/3]	–1.52[2/1]
Запад	–2.66[5/3]	–2.28[6/4]	–	–1.34[1/1]	–2.18[4/2]
Север	–2.28[6/4]	–2.66[5/3]	–1.22[2/0]	–	–2.96[5/4]
Вход	–2.00[3/2]	–2.78[4/4]	–3.44[6/5]	–2.30[3/3]	–1.92[4/4]

пути в маршрутизаторе, где они максимальны. Поэтому необходимо проанализировать потери связи через маршрутизатор. Полагая сдвиг в красную область $\Delta\lambda$ равным 1.5 нм, согласно рис.6,б находим, что потери за счет пропускания в закрытом порте прохода $L_{\text{off}} = -0.30$ дБ, потери за счет неполного пропускания в открытом порте выделения $L_{\text{on}} = -0.86$ дБ и потери на пересечении $L_{\text{cross}} = -0.18$ дБ [10]. Тогда для каждого из путей в маршрутизаторе получаем значения потерь, указанные в табл.3.

В табл.3 приведены потери для 21 оптической связи в маршрутизаторе. Видно, что наибольшие потери имеют место для связи Вход–Запад и составляют –3.44 дБ. Эта величина складывается из потерь на пропускание в прямом направлении через шесть закрытых переключателей, потерь на четырех волноводных пересечениях и одном порте выделения. Самые низкие потери, всего –1.04 дБ, для связи Восток–Юг. Эта величина складывается из по-

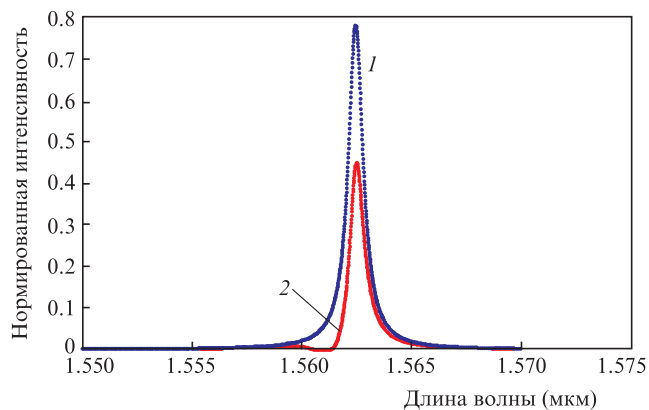


Рис.7. Рассчитанные спектры пропускания для оптических связей при наименьших (Восток–Юг, 1) и наибольших (Вход–Запад, 2) потерях.

терь на прохождение одного открытого порта выделения и на пропускание в прямом направлении одного порта, закрытого для прохода. На рис.7 показаны спектры пропускания для этих двух связей с наибольшими и наименьшими оптическими потерями. Чтобы снизить потери оптической связи в данном маршрутизаторе, особенно для связи с максимальными потерями, можно увеличить сдвиг длины волны в красную область за счет усиления ТО или ЭО эффекта. С другой стороны, для достижения этой цели можно увеличить коэффициенты $k_{1,2}$ и A за счет совершенствования процесса изготовления (что означает снижение потерь на пропускание).

5. Заключение

Разработан и исследован пространственно неблокирующий пятипортовый оптический маршрутизатор. Он имеет 16 КМР, 14 пересечений и четыре изгиба волноводов и может управляться за счет ТО или ЭО эффекта. После детального анализа 21 оптической связи в данном маршрутизаторе предложены два пути уменьшения оптических потерь с целью создания больших оптических внутренних соединительных сетей на чипах.

Работа поддержана Национальным фондом естественных наук Китая (NSFC) (грант № 61205089).

- Xia F., Sekaric L., Vlasov Y. *Nat. Photonics*, **1** (1), 65 (2007).
- Bogaerts W., Heyn P.D., Vaerenbergh T.V., et al. *Laser Photonics Rev.*, **6** (1), 47 (2012).
- Poon A.W., Luo X., Xu F. *Proc. IEEE*, **97** (7), 1216 (2009).
- Yu Z., Han T., Wang G., et al. *Optik*, **124**, 3734 (2013).
- Shacham A., Bergman K., Carloni L.P. *Proc. First Int. Symp. on Networks-on-Chip (NOCS'07)* (IEEE Press, 2007, pp 53–64).
- Pitwon R.C.A., Wang Kai, et al. *J. Lightwave Technol.*, **30** (21), 3316 (2012).
- Zhou L., Djordjevic S.S. *Appl. Phys. A*, **95**, 1111 (2009).
- Ji R., Yang L., Zhang L., et al. *Opt. Express*, **19** (21), 20258 (2011).
- Ruiqiang Ji, Jiang Xu, Lin Yang. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **25** (5), 492 (2013).
- Gu H., Mo K., Xu J., et al. *Proc. IEEE Computer Society Annual Symp. on VLSI* (Tampa, FL, 2009, pp 19–24).
- Sherwood-Droz N., Wang H., Chen L. *Opt. Express*, **16** (20), 15915 (2008).
- Yariv A. *Electron. Lett.*, **36** (4), 321 (2000).
- Ji R., Yang L., Zhang L., et al. *Opt. Express*, **19** (20), 18945 (2011).
- Magdalena S.N., Tao L., Xuan W. *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 071110 (2006).
- Green W.M.J., Hamann H.F., Sekaric L. *Proc. Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conf. (OFC/NFOEC 2007)* (Anaheim, CA, 2007, pp 1–3).
- Rashed A.M., Papakonstantinou I., Selviah D.R. *Proc. IEEE LEOS Annual Meeting Conf.* (Rio Grande, Puerto Rico, 2004, pp 457,458).