

Высокопроизводительное оптоэлектронное коммутирующее устройство с матрицами вертикально излучающих лазеров

В.Б.Фёдоров

Предложено схемотехническое решение построения предназначенного для использования в суперкомпьютерах и телекоммуникационных системах связи высокопроизводительного коммутирующего устройства с топологией полносвязанного соединения. Важной особенностью этого решения является применение матриц вертикально излучающих полупроводниковых лазеров и поляризационно-чувствительных кубиков. Оценки показывают, что при использовании коммерчески доступной элементной базы возможна практическая реализация оптоэлектронного коммутатора, по своим основным параметрам и функциональным возможностям превосходящего известные электронные аналоги.

Ключевые слова: оптоэлектронный коммутатор, матрицы вертикально излучающих лазеров, матрицы фотоприёмников, пространственная оптика, поляризационно-чувствительные кубики.

1. Введение

Исследования возможностей использования оптических методов и средств в устройствах передачи, хранения и обработки информации в течение многих лет интенсивно ведутся во многих научных центрах и промышленных фирмах. Хорошо известным важным практическим результатом таких исследований стало широкое применение волоконно-оптических линий связи, оптических дисковых накопителей, лазерных принтеров.

Применительно к высокопроизводительным вычислительным машинам исследования в этой области в настоящее время в большей степени сосредоточены на создании устройств, коммутирующих информационные потоки. Это объясняется рядом факторов. Во-первых, актуальностью самой проблемы, поскольку при разработке суперкомпьютеров, производительность которых должна достигать 10^{15} операций с плавающей запятой в секунду, организация обмена информацией как между большим числом кластеров из быстродействующих процессоров и модулей памяти, так и внутри кластеров является наиболее узким местом [1]. Во-вторых, тем, что большие достижения в разработке требуемой элементной базы в значительной степени способствуют созданию оптоэлектронных коммутаторов, по производительности и функциональным свойствам превосходящих существующие и разрабатываемые электронные аналоги. В первую очередь это относится к вертикально излучающим лазерам (ВИЛ), технология изготовления которых допускает интеграцию матриц таких приборов с кремниевыми интегральными схемами [2]. В-третьих, тем, что потенциальные преимущества оптических соединений в сравнении с электрическими могут привести к

созданию оптоэлектронных коммутаторов, основные параметры и функциональные возможности которых недоступны для их полностью электронных аналогов.

В настоящее время известно много решений проблемы создания оптоэлектронных коммутаторов, в которых применяются отдельные лазеры. В таких коммутаторах активизация требуемых соединений осуществляется либо дефлекторами светового пучка (акустооптическими, электрооптическими или зеркальными), либо с использованием матриц оптических модуляторов. Коммутаторы первого типа (см., напр., [3]) не представляют интереса для разработчиков современной вычислительной техники, поскольку по своим основным параметрам (главным образом, по времени реконфигурации) и функциональным возможностям они не способны конкурировать с интегральными электронными аналогами. В то же время успехи, достигнутые в технологии изготовления больших оптоэлектронных интегральных схем с оптическими модуляторами на базе полупроводниковых квантоворазмерных структур, стимулировали исследования по разработке коммутаторов второго типа. В частности, была показана возможность создания для телекоммуникационных систем коммутатора, пропускная способность которого достигает 10^{12} бит/с [4].

Среди работ, посвященных высокопроизводительным коммутаторам, в которых для активизации требуемых соединений применяются матрицы ВИЛ, следует выделить [5, 6]. В работе [5] в коммутаторе с 16 входами и 16 выходами полносвязанное соединение осуществляется с помощью волоконных световодов. Его определённым недостатком является проблематичность увеличения числа входов и выходов. В работе [6] в коммутаторе с 64 входами и 64 выходами для этих целей используется пространственная оптика. Однако реализуемая топология соединений отличается от полносвязанной.

Цель данной работы состоит в том, чтобы на примере возможного варианта построения высокопроизводительного оптоэлектронного коммутатора с топологией полносвязанного соединения показать важность последних достижений в разработке матриц полупроводнико-

Институт микропроцессорных вычислительных систем РАН, Россия, 117997 Москва, Нахимовский просп., 36, корп.1; www.imvs.ru; e-mail: Fyodorov@imvs.ru

Поступила в редакцию 11 ноября 2002 г., после доработки – 18 декабря 2002 г.

вых инжекционных лазеров для практической реализации такого коммутирующего устройства, которое по основным параметрам и функциональным возможностям превосходит известные электронные аналоги.

2. Свойства топологии полносвязанного соединения

Основной функцией коммутирующего устройства является прием в его входные порты поступающих по каналам связи от пользователей многозарядных данных, в заголовке которых указывается один или несколько адресов назначения, и пересылка их в соответствующие выходные порты по одному или нескольким адресам. Известно достаточно много топологий соединения входных и выходных портов. Применительно к высокопроизводительным многопроцессорным вычислительным машинам самой лучшей по своим функциональным возможностям, но и самой сложной для практического осуществления из-за необходимости реализации наибольшего числа внутренних соединений (межсоединений), считается топология полного соединения входов и выходов, часто называемая «каждый с каждым». Общая схема коммутатора с такой топологией соединений изображена на рис.1 (здесь и далее номера выходов отличаются от номеров входов наличием тильды). Назначение селекторов адресов состоит в активизации межсоединений, необходимых для пересылки в выходные порты информации в соответствии с заданными адресами назначения. Концентраторы в выходных портах обеспечивают передачу поступившей информации непосредственно в каналы связи.

Полносвязанная топология может обеспечить передачу информации одновременно и независимо по N^2 межсоединениям без возникновения внутренних конфликтных ситуаций, свойственных другим топологиям, и тем самым существенно упрощает управление коммутатором в случаях конфликтных ситуаций, когда возникает необходимость одновременной пересылки данных от нескольких пользователей в один и тот же выход. Наличие в коммутаторе N^2 межсоединений обеспечивает также возможность реализации любых картин соединений входов с выходами. Все иные известные топологии не обладают таким свойством, т. к. содержат менее N^2 межсоединений и вследствие этого реализуют только определённые картины соединений, например только перестановки.

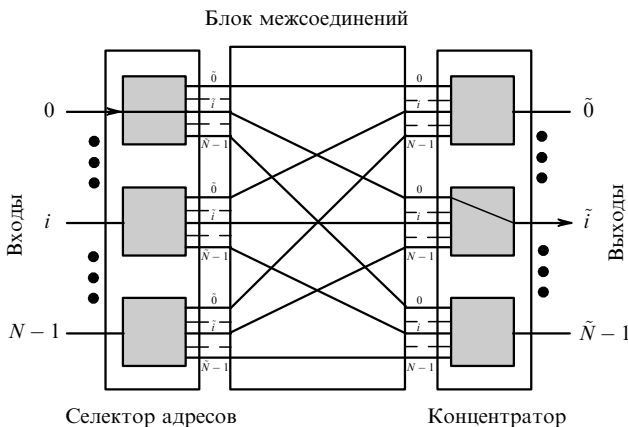


Рис.1. Топология полносвязанной переключающей сети.

Одной из основных характеристик коммутатора является его пропускная способность W (в бит/с), т. е. скорость передачи в выходные порты потока информации, поступающего на входы. Эта характеристика в существенной степени зависит от функциональной возможности коммутатора осуществлять те или иные межсоединения. В связи с этим представляется важным оценить доли наиболее характерных картин соединений в общем числе всех возможных.

Если считать, что в коммутаторе с топологией полного соединения могут быть одновременно активными любые межсоединения, то общее число картин соединений K_{Σ} , отличающихся хотя бы одной активной или неактивной связью без учета одной «пустой» картины, когда через коммутатор информация не пересылается, будет таково:

$$K_{\Sigma} = K_{\Sigma N} + K_{\Sigma M} = 2^{N^N} - 1, \tag{1}$$

где $K_{\Sigma N}$ и $K_{\Sigma M}$ – число картин соединений, включающих сборки (конфликтные ситуации на выходах) и ветвления (пересылка одной и той же информации одновременно по нескольким адресам назначения), соответственно для случаев одновременной работы всех или только 1, 2, 3, ..., $M < N$ входов коммутатора. Примеры возможных картин соединений показаны на рис.2. Поскольку каждый из N входов коммутатора имеет \tilde{N} независимых связей с его выходами, то

$$K_{\Sigma N} = (2^N - 1)^N. \tag{2}$$

Из сравнения выражений (1) и (2) следует, что для $N \gg 1$ отношение $K_{\Sigma M}/K_{\Sigma N} \approx N/2^N \ll 1$. Например, уже при $N = 10$ это отношение составит ~ 0.01 . Иными словами, в коммутаторе достаточно большой размерности подавляющее число картин соединений приходится на режим передачи информации одновременно через все его входы.

В свою очередь $K_{\Sigma N}$ можно представить в виде суммы из трёх видов картин соединений:

$$K_{\Sigma N} = K_P + K_A + K_C = (2^N - 1)^N, \tag{3}$$

где K_P – число картин, отображающих перестановки адресов \tilde{N} выходов; K_A – число картин, содержащих сборки, но не имеющих ветвлений; K_C – число картин, имеющих одновременно не менее одной сборки и не менее одного ветвления. Достаточно несложно показать, что

$$K_P = N! \approx (2\pi N)^{0.5} (N/e)^N, \tag{4}$$

$$K_A = N^N - N! \approx N^N, \tag{5}$$

$$K_C = (2^N - 1)^N - N^N \approx (2^N - 1)^N. \tag{6}$$

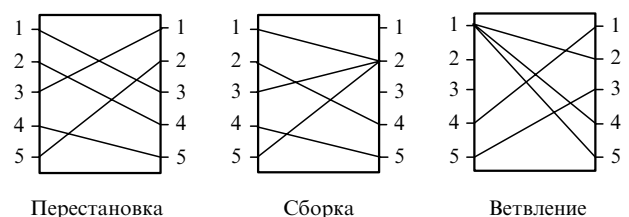


Рис.2. Возможные картины соединений в полносвязанной сети.

Следует отметить, что вследствие симметрии топологии полносвязанного соединения относительно его входов и выходов число картин соединений $K_A = K_B$, где K_B – число картин соединений только с одними ветвлениями, реализуемых соединениями $K_{\Sigma M}$. Из выражений (4)–(6) видно, что наименьшее число картин соединений приходится на перестановки, а наибольшее – на соединения, имеющие одновременно сборки и ветвления. С увеличением N это различие резко возрастает. Относительные доли таких соединений могут быть найдены из пропорции

$$(K_P/K_A):(K_A/K_A):(K_C/K_A) \approx e^{-N}(2\pi N)^{0.5}:1:(2^N/N)^N. \quad (7)$$

На основании (7) получим для $N = 16$

$$(K_P/K_A):(K_A/K_A):(K_C/K_A) \approx 10^{-6}:1:2 \times 10^{57} \quad (8)$$

и для $N = 100$

$$(K_P/K_A):(K_A/K_A):(K_C/K_A) \approx 2 \times 10^{-42}:1:10^{3000}. \quad (9)$$

Цифры в правой части выражений (8) и (9) наглядно показывают, что число картин соединений, осуществляющих перестановки, пренебрежимо мало в сравнении с числом картин, в которых имеются только сборки или только ветвления. В свою очередь число последних пренебрежимо мало в сравнении с числом картин, в которых присутствуют и сборки, и ветвления.

На пропускные возможности коммутатора достаточно сильно влияет его способность разрешать выходные конфликты. Оценка влияния этого фактора (помимо технических особенностей коммутатора) существенно зависит от модели входного трафика информационного потока. Простейшая представляющая интерес модель трафика предполагает:

в каждом временном такте во все входные порты поступают предназначенные для пересылки данные;

требуемый для передачи порт для каждого поступившего адреса выбирается независимо и с равной вероятностью из всего множества адресов назначения;

многоадресная пересылка данных отсутствует.

С использованием такой модели нетрудно найти пропускную способность полносвязанного коммутатора для двух возможных способов разрешения многократных конфликтных ситуаций в выходных портах. Первый способ – данные в выходной порт могут передаваться только из одного входа, второй способ (реализуемый оптическими средствами) – данные в выходной порт могут передаваться как из одного, так и одновременно из двух входов. В обоих случаях предполагается, что при наличии в рассматриваемом временном такте передачи информации данных ещё и от других входов они теряются или записываются в буферную память.

В работе [7] показано, что при условии одновременной передачи информации через все входы предельная пропускная способность коммутатора для первого способа, нормированная на её величину в режиме перестановок адресов назначения, есть

$$V_1 = 1 - (1 - 1/N)^N \approx 1 - 1/e \approx 0.632. \quad (10)$$

Предельная пропускная способность коммутатора V_2 для второго способа разрешения выходных конфликтов может быть найдена из следующего выражения [8]:

$$V_2 = 2 - (1 - 1/N)^N [2 + (1 - 1/N)^{-1}] \approx 2 - 3/e \approx 0.896. \quad (11)$$

Таким образом, из (10) и (11) следует, что второй способ разрешения выходных конфликтов даёт (уже при $\tilde{N} \geq 16$) значительный выигрыш (в ~ 1.4 раза) в предельной пропускной способности коммутатора.

3. Потенциальные преимущества оптических соединений

В сравнении с электрическими оптические соединения обладают рядом существенных преимуществ, вытекающих из фундаментального различия электрона и фотона. Основные наиболее важные для оптических коммутирующих устройств преимущества состоят в следующем.

Существенно большая пропускная способность. Для сравнения предельной, ограниченной физическими процессами пропускной способности различных соединений используется некоторый безразмерный параметр вида передающей линии («aspect ratio»), отражающий геометрические характеристики конструкции в виде l/\sqrt{S} (l – длина линии, S – площадь её поперечного сечения). Пропускная способность W и этот параметр связаны соотношением $W = \alpha S/l^2$, где α – константа, зависящая от физических свойств линии передачи. Как показано в работе [9], эта константа для резистивно-ёмкостных RC -линий передачи, характерных для большинства межсоединений в интегральных схемах, и индуктивно-ёмкостных LC -линий передачи (коаксиальные кабели и полосковые линии) равна $\sim 10^{16}$ и $\sim 10^{15}$ соответственно. Причём при фиксированной площади S поперечного сечения соединения его предельная пропускная способность не зависит от того, выполнено ли оно в виде одной быстродействующей RC -линии или в виде n линий такого же типа, но с предельной пропускной способностью, в n раз меньшей.

Пропускная способность оптических линий передачи существенно больше. Показано [10], что в оптических системах на основе пространственной оптики предельная плотность информационного потока $\omega_{op} = W/S$ (в бит·с⁻¹·см⁻²), а следовательно, и их пропускная способность (при одинаковых значениях поперечного сечения S) примерно на 4 порядка больше, чем ω_{RC} для многоканальных RC -соединений и ещё больше, чем ω_{LC} для LC -линий. Выигрыш в предельной пропускной способности световодных соединений составляет 250–500 раз, т. е. существенно более скромный.

Возможность передачи информации в виде двумерных изображений или параллельным многоадресным двоичным кодом.

Поляризованность светового излучения. Это свойство позволяет осуществить дуплексный (двунаправленный) режим с одновременной независимой передачей информации в обоих направлениях.

Практически одинаковое время задержки сигналов в параллельных каналах связи. При использовании пространственных (проекционных) оптических систем в силу их таутохронности разброс этой величины может не превышать единиц фемтосекунд, а при использовании упорядоченных жгутов световодов – десятков фемтосекунд.

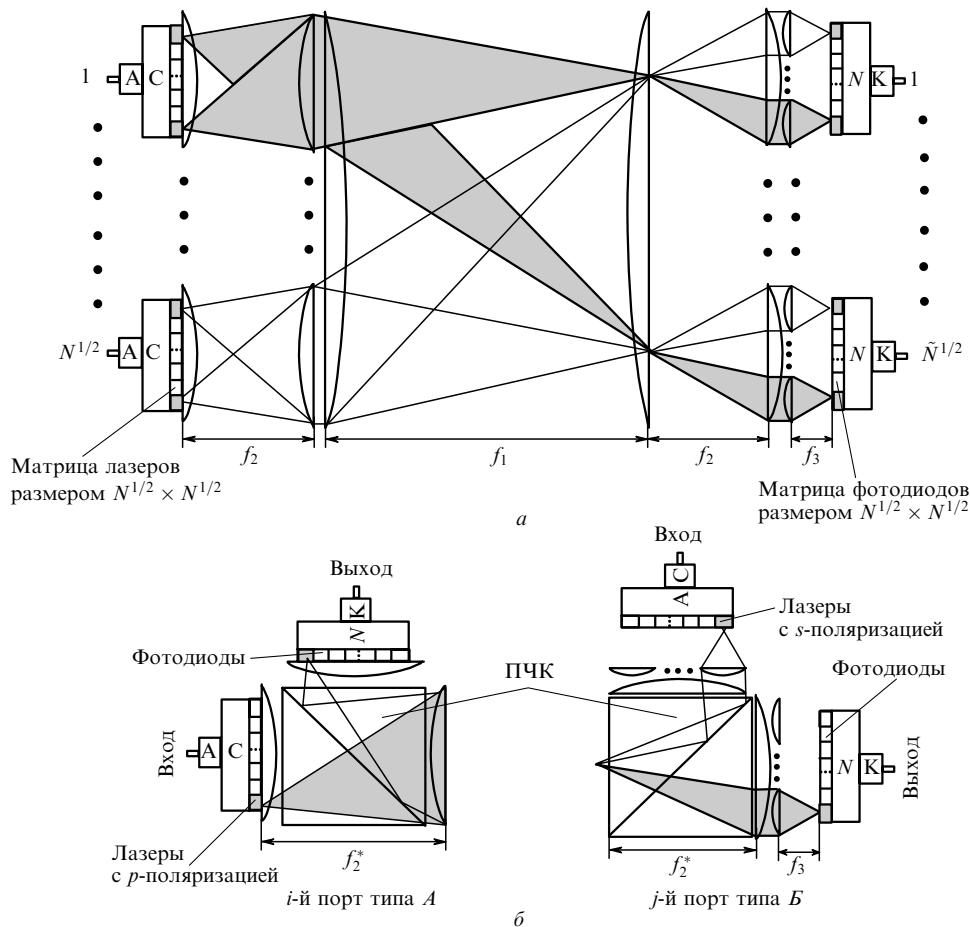


Рис.3. Устройство полностью оптоэлектронного коммутатора с последовательной передачей разрядов (а) и его модификация (б); АС – адресный селектор на \tilde{N} направлений, НК – \tilde{N} -канальный концентратор, ПЧК – поляризационно-чувствительный кубик, $i = 1, 2, 3, \dots, \tilde{N}$, $j = 1, 2, 3, \dots, \tilde{N}$.

В электрических соединениях такие значения недостижимы из-за температурной зависимости их омического сопротивления [11].

Возможность независимой передачи информации по пересекающимся в пространстве связям.

Возможность использования третьего измерения для создания дополнительных каналов ввода/вывода информации, в том числе оптическими методами и средствами.

Простота согласования импедансов. Согласование импедансов передатчика и приемника с оптическим соединением осуществляется нанесением просветляющих покрытий, не поглощающих световую мощность. В электрических передающих линиях согласование импедансов обеспечивается с помощью омического сопротивления, потребляющего значительную часть энергии передаваемого или принимаемого сигнала.

Частотная независимость оптических связей. Несущая частота светового сигнала, равная $\sim 10^{15}$ Гц, значительно превышает частоту модуляции передаваемых по линии связи сигналов. Поэтому изменение частоты модуляции не приводит к ощутимой деградации сигнала или скорости его распространения, и, следовательно, не возникает необходимости в перестройке самой линии связи. В то же время электрические устройства, например сконструированные для фиксированной тактовой частоты сложные шины или межсоединения, перестают работать даже при небольшом ($\sim 20\%$ [11]) её изменении.

4. Общая схема построения высокопроизводительного оптоэлектронного коммутатора

Схемотехническое решение построения оптоэлектронного коммутатора с топологией полного соединения N входов с \tilde{N} выходами приведено на рис.3,а. В состав коммутатора входят следующие основные компоненты: N квадратных матриц ВИЛ, используемых для передачи информации и независимо адресуемых электронным селектором АС, N квадратных матриц фотоприёмников, связанных с выходными каналами \tilde{N} -канальными электронными концентраторами НК, и оптическая система, состоящая из объективов, матриц микрообъективов и растров линз с фокусными расстояниями f_1 , f_2 и f_3 соответственно. Оптическая система, предложенная в работе [12], позволяет реализовать любую из $2^{N\tilde{N}} - 1$ пространственных картин соединений входов с выходами, свойственных полностью связанной топологии, и, следовательно, обеспечивает возможность осуществления многоадресной передачи информации по произвольному набору из $k \leq \tilde{N}$ адресов назначения одновременно и независимо из любого числа входов.

Обратимость оптической системы по отношению к входам и выходам позволяет путём её модификации реализовать в коммутаторе новые важные функциональные возможности. Это, во-первых, организация пересылки информации с подтверждением её получения адресатом

и, во-вторых, двунаправленный обмен данными между входами и выходами. Для этого в оптическую систему вводятся элементы, чувствительные к плоскости поляризации светового пучка (см. рис.3,б). В качестве таких элементов могут применяться, например, поляризационно-чувствительные кубики (ПЧК) [13], пропускающие в направлении светового пучка p -компоненту и отражающие в перпендикулярном направлении s -компоненту. Такие соответствующим образом ориентированные кубики размещаются на входах и выходах оптической системы перед и после микрообъективов с фокусным расстоянием f_2^* . (Фокусное расстояние f_2^* несколько превышает указанную на рис.3,а величину f_2 , т. к. показатель преломления поляризационно-чувствительного кубика больше единицы.) На двух ортогональных гранях каждого ПЧК устанавливаются матрица из N ВИЛ и матрица из N фотодиодов с соответствующими электронными схемами управления. В портах, условно названных портами типа A и типа B , используются соответственно лазеры с s - и p -поляризованным излучением, что позволяет организовать между ними одновременный и независимый обмен информацией с возможностью подтверждения получения сообщения. Предельный темп обмена информацией в модифицированном варианте коммутатора возрастает вдвое.

Схема на рис.3,б допускает обмен информацией по оптическим соединениям только между портами разного типа. В то же время, если в каждом из портов предусмотреть возможность пересылки информации электронными средствами из устройства управления концентратором в устройство управления адресным селектором, то обмен информацией между портами одного типа может быть осуществлен транзитным способом через любой свободный порт другого типа. В таком коммутаторе с $2N$ портами внутренние конфликты могут возникать только при обмене информацией одновременно между портами одного типа.

Пропускная способность оптоэлектронных коммутаторов может быть повышена, если концентраторы в выходных каналах выполнить в виде интегральных схем, в которых кремниевые фотодиоды связаны с выходным каналом через буферные регистры. Такое исполнение выходных каналов обеспечивает возможность разрешения выходных конфликтов до кратности \tilde{N} . При этом, как показано в разд.2, пропускная способность коммутаторов может быть повышена, по крайней мере, на 40 %.

Ещё одним возможным решением оптоэлектронного коммутатора является осуществление связи оптической системы с матрицами ВИЛ и фотоприёмников посредством упорядоченных жгутов световодов. Технология подобных соединений описана в работах [14, 15]. В этом случае матрицы лазеров и фотоприёмников не будут жёстко ограничены размерами оптики, что важно при практической реализации оптической системы коммутатора [16], и могут размещаться вместе с электронными устройствами управления этими матрицами в портах подключаемой к коммутатору аппаратуры.

5. Возможные параметры оптоэлектронного коммутатора

Оценка основных параметров оптоэлектронного коммутатора (его пропускной способности, возможного числа входов и выходов, времени реконфигурации, вноси-

мой оптическими связями задержки, габаритных размеров) будет сделана для предельных значений этих параметров и с учетом реальных возможностей существующей в настоящее время основной элементной базы квантовой электроники.

Оценим максимально возможную плотность q межсоединений в коммутаторе с полностью связанной топологией, выполненном по оптической схеме рис.3, из следующего соотношения [17]:

$$q = (u/\chi\lambda)^2, \quad (12)$$

где λ – длина волны светового излучения; u – относительное отверстие «оквадраченных» объективов; χ – константа, определяющая уровень допустимых помех в соседних каналах. При использовании в качестве источников излучения лазеров с гауссовым распределением интенсивности светового пучка $\chi^2 \approx 10$, когда уровень взаимных помех, вносимых соседними соединениями, не превышает 5 % [18]. На основании (12) найдем, что максимальная плотность реализуемых каналов связи равна $\sim 2.5 \times 10^6$ канал./см² при $\lambda = 0.8$ мкм и относительном отверстии объективов $u = 1/2.5$. При такой плотности соединений оптическая система оптоэлектронного коммутатора могла бы обеспечить 8000 входов и столько же выходов при площади её поперечного сечения $S = 5 \text{ см} \times 5 \text{ см}$. Следует отметить, что создание такого полностью электронного коммутатора не представляется возможным вследствие проблематичности достижения в электронных схемах требуемой плотности соединений.

Предельная плотность информационного потока $\omega_{\text{оп}}$ при частоте световых колебаний $\nu = c/\lambda$ и предельно возможной частоте следования модулирующих импульсных сигналов $F_{\text{max}} \approx \nu/10$

$$\omega_{\text{оп}} = qF_{\text{max}} = 0.01cu^2/\lambda^3 \approx 10^{20} \text{ бит} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1} \quad (13)$$

при $\lambda = 0.8$ мкм и $u = 1/2.5$. Используя (13) и приведённые выше оценки предельной пропускной способности многоканальных электрических RC - и LC -линий передачи, находим, что $\omega_{\text{оп}}/\omega_{RC} \approx 10^5$ и $\omega_{\text{оп}}/\omega_{LC} \approx 10^4$. Поскольку плотность потока информации в оптических соединениях на основе пространственной оптики обратно пропорциональна λ^3 , то для источников с длиной волны излучения менее 0.8 мкм этот выигрыш будет ещё более значительным.

Возможные параметры оптоэлектронных коммутаторов, достижимые при их практической реализации в настоящее время или в ближайшей перспективе, определяются, главным образом, состоянием разработок матриц лазеров и фотоприёмников. Основными факторами, влияющими на численные значения этих параметров, являются возможная частота импульсной модуляции F источников излучения, требуемая скорость отвода тепла Q от матриц источников излучения и фотоприёмников и пороговая чувствительность фотоприёмников E_{lim} . В случае m -канального оптического соединения его пропускная способность W_m связана с Q и E_{lim} следующим соотношением [17]:

$$W_m = \frac{r\eta QL^2}{(1-\eta)E_{\text{lim}}}. \quad (14)$$

Здесь r – коэффициент, учитывающий потери в оптической системе из-за апертурных ограничений и поглощения света в оптических элементах; η – квантовая эффектив-

ность лазерных источников излучения; L – поперечный размер матриц лазеров и фотоприёмников, содержащих по m элементов.

Коммерчески доступные матрицы ВИЛ, разработанные рядом зарубежных фирм, характеризуются следующими параметрами: количество лазеров в матрице $m = 8 \times 8$, мощность линейно поляризованного излучения одного лазера $P \geq 3$ мВт (в одномодовом режиме), потребляемая электрическая мощность ~ 25 мВт, максимальная частота синусоидальной модуляции при работе с постоянным, близким к порогу генерации смещением 7 ГГц, расстояние между центрами лазеров 250 мкм. Матрицы изготавливаются по технологии перевернутого кристалла (технология *flip-chip*) и поэтому пригодны для размещения на интегральных КМОП-схемах. Используя эти параметры, получаем, что при $E_{\text{lim}} = 10$ фДж/бит [19], $L = 0.2$ см и близких к реальным значениям $r \approx 1$, $\eta = 0.5$, $Q = 5$ Вт/см² общая пропускная способность 64-канального оптического соединения $W_m \approx 20$ Тбит/с при скорости передачи информации по каждому каналу в одном направлении ~ 0.3 Тбит/с. Темп обмена информацией между двумя портами в модифицированном варианте оптоэлектронного коммутатора может достигать ~ 0.6 Тбит/с при общем предельном темпе обмена информацией ~ 80 Тбит/с.

Поскольку время переключения лазеров из режима «молчания» в режим передачи информации не превышает долей наносекунды, то время реконфигурации коммутатора будет в большей степени определяться быстродействием применённых электронных схем управления. При ортогональном шаге расположения лазеров и фотоприёмников в матрицах, равном 250 мкм, площадь поперечного сечения оптической системы S с числом входов и выходов $N = \tilde{N} = 64$ равна $1.6 \text{ см} \times 1.6 \text{ см}$, а её общая длина $l = f_1 + 2f_2 + f_3 \approx 5$ см для согласованного с расходимостью светового пучка ($\sim 12^\circ$) значения $u = 0.25$. При такой длине оптической системы вносимая задержка в передаче сигналов по межсоединениям коммутатора не превысит 0.17 нс. Следует отметить, что нам не известны чисто электронные аналоги коммутаторов с полностью связанной топологией соединения с такими основными параметрами.

Работоспособность оптической системы коммутатора была подтверждена экспериментально. В её макетном варианте применялись объективы и растр линз, которые позволяли осуществить полностью связанное соединение 64 входов с 64 выходами. Матрица ВИЛ имитировалась диафрагмирующей маской с 64 отверстиями, освещаемой гелий-неоновым лазером. Качество изображений контролировалось ПЗС-камерой BW-360CD с разрешающей способностью 300 лин./мм.

В том же макете с использованием матриц ВИЛ 2×2 швейцарской фирмы GSEM ($\lambda = 0.85$ мкм) была подтверждена возможность передачи двоичной информации по произвольным соединениям, реализуемым оптической системой. Максимальная скорость передачи информации составляла 250 Мбит/с и ограничивалась быстродействием фотоприёмников и имеющейся электронной аппаратуры.

6. Заключение

Таким образом, потенциальные преимущества оптических соединений в сравнении с электрическими дают

основание для создания высокопроизводительных оптоэлектронных коммутирующих устройств с пропускной способностью, недостижимой для чисто электронных коммутаторов. В настоящей работе предложены общая схема и варианты построения оптоэлектронного коммутатора с топологией полностью связанного соединения с использованием матриц ВИЛ, матриц фотоприёмников, пространственной оптики и поляризационно-чувствительных кубиков. Сделанные оценки показали, что этот оптоэлектронный коммутатор при его практической реализации на коммерчески доступной элементной базе по таким основным параметрам, как общая пропускная способность, число входов и выходов, вносимая задержка и габаритные размеры, а также по своим функциональным возможностям мог бы превзойти известные и гипотетические электронные аналоги.

Создание и улучшение параметров оптоэлектронных коммутаторов зависит, главным образом, от дальнейшего прогресса в разработке матриц лазеров и фотоприёмников в направлении повышения частоты импульсной модуляции при одновременном снижении пороговой чувствительности быстродействующих фотоприёмников до значения, близкого к предельному ($\sim 10^3$ фотонов [18]). Представляется, что достижение такой пороговой чувствительности при надёжной регистрации принимаемых импульсных сигналов возможно только для многоканальных фотоприёмников, принцип работы которых позволяет усиливать фототок без внесения в сигнал дополнительных шумов [19]. При успешном решении этих проблем в значительной степени возрастёт конкурентоспособность высокопроизводительных оптоэлектронных коммутирующих устройств и их практическая значимость.

Автор выражает благодарность В.В.Цветкову и Д.В.Марюшину за выполнение экспериментальных исследований.

1. Collet J.H., Litaize D., Campenhout J.V., et al. *Appl. Opt.*, **39**, 671 (2000).
2. Захаров С.М., Фёдоров В.Б., Цветков В.В. *Квантовая электроника*, **28**, 189 (1999).
3. Scott Hinton H. *An Introduction to Photonic Switching Fabrics* (New York, London: Plenum Press, 1993).
4. Tobagi F.A. *Proc. IEEE Int. Soc. Opt. Eng.*, **78**, 133 (1990).
5. Walker A.C., Desmuller M.P.Y., Forbes M.G., et al. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, **5**, 236 (1999).
6. Kosaka H., Kajita M., Yamada M., Sugimoto Y. *IEEE Photon. Tech. Lett.*, **9**, 244 (1997).
7. Li Y., Kawai S. *Appl. Opt.*, **37**, 254 (1998).
8. Фёдоров В.Б. В кн. *Сборник научных трудов ИМВС РАН. Высокопроизводительные вычислительные системы и микропроцессоры* (М.: ИМВС РАН, 2002, № 3, с. 106).
9. Miller D.A.B., Ozaktas H.M. *J. Parallel and Distributed Computing*, **41**, 42 (1997).
10. Фёдоров В.Б. В кн. *Сборник научных трудов ИМВС РАН. Высокопроизводительные вычислительные системы и микропроцессоры* (М.: ИМВС РАН, 2001, № 2, с. 124).
11. Miller D.A.B. <http://ee.stanford.edu/~dabm>.
12. Fyodorov V.B. *Optical Memory and Neural Networks*, **5**, 263 (1996).
13. Мицай В.Н., Фёдоров В.Б. *Квантовая электроника*, **7**, 1028 (1980).
14. Chiralli D.M., Levitan S.P., Derr P., et al. *Appl. Opt.*, **39**, 698 (2000).
15. Gruber M., Jahns J., Joudi E.M.E., Sinzinger S. *Appl. Opt.*, **40**, 2902 (2001).
16. Naruse M., Ishikawa M. *Appl. Opt.*, **39**, 293 (2000).
17. Fyodorov V.B. *Opt. Comp. Proc.*, **3**, 123 (1993).
18. Фёдоров В.Б., Митяков В.Г. *Радиотехника*, **40**, 79 (1985).
19. Гусев В.К., Рослова М.Л., Шилов И.А., Фёдоров В.Б. *Радиотехника*, **37**, 22 (1982).