

06;07

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ АССОЦИАТИВНЫЙ ПОЛНОСВЯЗАННЫЙ КОММУТАТОР: ПРИНЦИП СОЗДАНИЯ И ВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ

© В.Б.Федоров

Институт высокопроизводительных вычислительных систем РАН,
117334 Москва, Россия
(Поступило в Редакцию 25 мая 1995 г.)

Предлагается новый принцип построения полносвязанного коммутатора размера $N \times N$, основанный на ассоциативном поиске ключа адресов назначения передаваемой информации. Коммутатор содержит $\sim N \lg_2 N$ двоичных переключателей, допускает режим самомаршрутизации, пересылку данных одновременно в несколько или во все выходы, а также передачу информации по соединенным парам входов и выходов параллельным двоичным кодом. Оцениваются основные параметры такого коммутатора и обсуждается возможность его реализации при использовании матриц вертикально излучающих лазеров, оптических пороговых инверторов и фотоприемников, заломляющих матриц на основе гибридных плат памяти с индивидуально адресуемыми электрически управляемыми оптически-микселями, сферической проекционной оптики и электронных схем управления.

Введение

Последнее десятилетие характеризуется большими научными и технологическими достижениями в области создания элементной базы на принципах квантовой электроники. Становится реальной практическая осуществимость матриц с большим числом индивидуально адресуемых электрически управляемых вертикально излучающих полупроводниковых лазеров с низкими пороговыми токами при диаметре излучающей области ~ 10 мкм, допускающих модуляцию светового сигнала с частотой, превышающей 1 ГГц [1^{-3}]. Методами интегральной технологии созданы экспериментальные образцы больших многофункциональных матриц оптических управляемых пикселов двух типов. В одном случае каждый управляемый пиксел выполняется в виде комбинации полевого фототранзистора или фототеристора (оптический вход пиксела) и вертикально излучающего полупроводникового лазера (оптический выход пиксела) [4^{-6}]. Матрицы с такой структурой могут использоваться в качестве быстродействующих пороговых

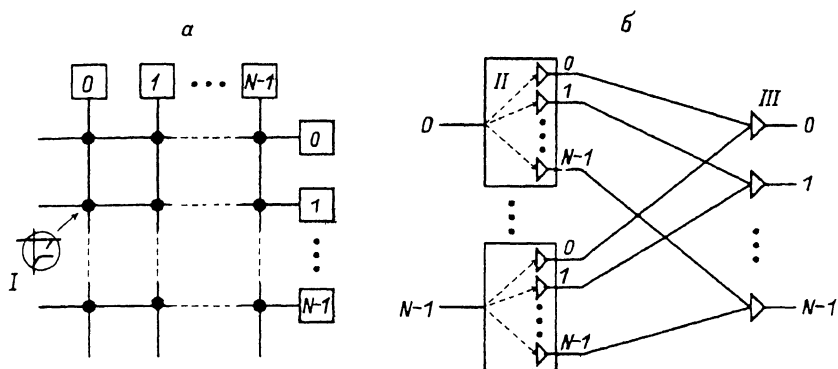


Рис. 1. Два представления полностью связанного коммутатора размера $N \times N$. а — коммутатор с электрическими, б — оптическими межсоединениями. I — узел коммутации, II — селекторный переключатель на основе N индивидуально адресуемых модулируемых источников света, III — фотоприемник.

усилителей, или инверторов, световых сигналов. В другом типе пикселированных матриц применяются электрооптические модуляторы света на основе жидких кристаллов [7], прозрачной сегнетокерамики [8] или квантоворазмерной структуры [9], встроенные в электронную интегральную схему. Такие матрицы могут выполнять функции электрически управляемых пространственно-временных модуляторов света и запоминающих матриц с оптическим считыванием информации, хранящейся в электронных ячейках памяти [10].

Эти успехи квантовой электроники открывают возможность создания оптоэлектронных средств, в которых потенциальные преимущества оптических методов обработки информации в сравнении с электронными проявляются в гораздо большей степени. К их числу относятся коммутационные устройства (коммутаторы), с помощью которых организуется обмен информацией между многими пользователями. Наибольшая потребность в коммутаторах в настоящее время испытывается при разработке суперЭВМ с архитектурой массового параллелизма [11,12], где коммутатор должен обеспечить обмен данными одновременно и независимо между N процессорами и N модулями памяти, при организации сетей для информационного обмена между N абонентами [13], в системах на основе нейронных сетей и устройствах обработки изображений.

Наилучшим решением считается коммутатор с топологией сети полного соединения (полностью связанный коммутатор), например ставший теперь классическим координатный (матричный) коммутатор, который позволяет без внутренних конфликтов произвольным образом соединять каждый из N входов с каждым из N выходов, а также имеет простую структуру и прямой алгоритм маршрутизации. Обобщенная структура такого коммутатора при выполнении связей электрическими и оптическими средствами приведена на рис. 1. Координатный коммутатор требует для его реализации N^2 индивидуально адресуемых двоичных электронных переключателей (рис. 1,а) или модулируемых источников света (рис. 1,б), если информация по соединенным парам входов и выходов передается последовательным двоичным ко-

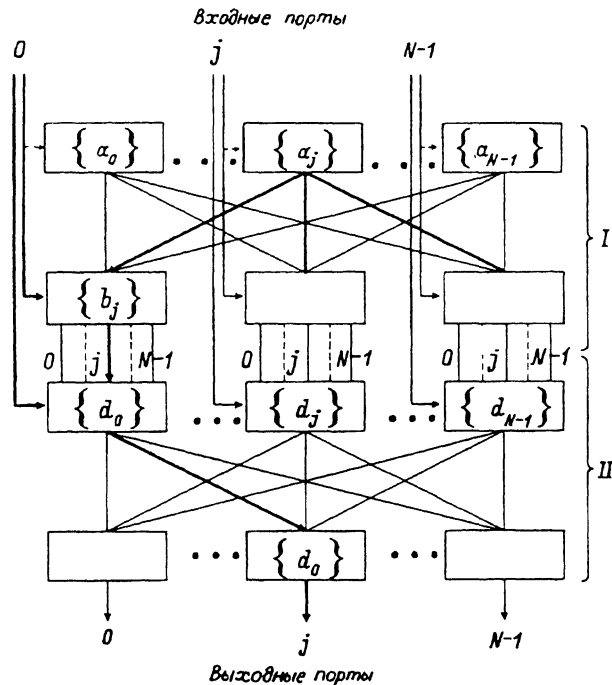


Рис. 2. Общая схема связей в ассоциативном полностью связанном коммутаторе размера $N \times N$.

Жирной линией выделены соединения, которые используются при пересылке данных $\{d_0\}$, связанных с ключом $\{b_j\}$, из порта 0 в j -тый порт. I — блок выявления адреса порта назначения передаваемых данных, II — блок пересылки данных в порт назначения.

дом. При передаче информации параллельным l -разрядным двоичным кодом число таких переключателей в коммутаторе возрастает до lN^2 . Вследствие большого числа требуемых переключателей координатный коммутатор при существующей технологии используется только при сравнительно небольших значениях N .

Помимо этого электронному матричному коммутатору присущи еще два следующих недостатка. Один из них состоит в относительно больших затратах времени на маршрутизацию связей при изменении картины требуемых соединений, поскольку необходимо последовательно перевести в новое или подтвердить прежнее состояние N переключателей. Для этого устройство управления таким коммутатором должно перед пересылкой информации затратить по крайней мере N временных тактов, что ведет к снижению средней величины общей пропускной способности коммутатора. Другой недостаток связан с зависимостью времени задержки передаваемых через коммутатор сигналов от координаты адресуемого переключателя. В синхронном режиме работы это приводит к необходимости увеличения длительности такта передачи бита информации на время максимальной задержки, т.е. на время задержки сигнала между входом 0 и выходом $N-1$ (рис. 1).

В случае коммутационных устройств большого размера предпочтительнее отдается многокаскадным перестраиваемым неблокируемым коммутаторам, так как они содержат только $N(2 \lg_2 N - 1)$ двоичных переключателей.

чателей [13-15]. Однако их реконфигурация возможна, как правило, только после выполнения вычислений по трассировке, неблокируемых маршрутов, занимающих вследствие сложности алгоритмов достаточно большое время, поэтому применение таких коммутаторов оправдано только при передаче больших пакетов информации, когда полное время реконфигурации сравнимо со временем пересылки пакета.

В данной работе предлагается новый принцип построения оптоэлектронного полносвязанного коммутатора размером $N \times N$, основанный на ассоциативном поиске адресов назначения передаваемой информации. Такой коммутатор, называемый в дальнейшем ассоциативным полносвязанным коммутатором (АПК), является строго неблокирующим, как матричный коммутатор; содержит всего на $N/2$ двоичных переключателей больше, чем перестраиваемо неблокирующий; допускает режим самомаршрутизации, пересылку данных одновременно в несколько или во все выходы, а также передачу информации по соединенным парам входов и выходов параллельным двоичным кодом. Обсуждаются вопросы избыточного кодирования адресов назначения информации, повышающего надежность его работы. Оцениваются основные параметры предлагаемого коммутатора и обсуждается возможность его реализации при использовании матриц вертикально излучающих лазеров, оптических пороговых инверторов и фотоприемников, запоминающих матриц на основе гибридных плат памяти с индивидуально адресуемыми электрически управляемыми оптическими пикселями, сферической проекционной оптики и электронных схем управления.

Принцип работы ассоциативного полносвязанного коммутатора

Принцип работы АПК можно наиболее просто пояснить на примере многопортовой ассоциативной памяти [16,17]. Такая память позволяет N пользователям одновременно и независимо выполнять параллельный поиск ключевых слов по их содержанию с помощью N двоично-кодированных l -разрядных аргументов поиска $\{a_i\} = a_0 a_1 \dots a_{l-1}$, $i = 0, 1, 2, \dots, N-1$ и выборку данных в общей запоминающей матрице емкостью K двоично-кодированных слов, состоящих из l -разрядных ключей $\{b_j\} = b_0 b_1 \dots b_{l-1}$, $j = 0, 1, 2, \dots, K-1$ и связанных с этими ключами m -разрядных данных $\{d_j\} = d_0 d_1 \dots d_{m-1}$, а также запись слов по произвольному адресу через N портов. В такой ассоциативной памяти запрос i -того пользователя всегда появляется в i -том выходном порту.

Ассоциативный полносвязанный коммутатор размером $N \times N$ можно рассматривать как частный случай N -портовой ассоциативной памяти, в которой, во-первых, запоминающая матрица выполнена в виде $K = N$ регистров слов для хранения ключей $\{b_j\}$ и связанных с ними передаваемых m -разрядных данных $\{d_j\} = d_0 d_1 \dots d_{m-1}$, во-вторых, l -разрядные аргументы поиска $\{a_i\} = a_0 a_1 \dots a_{l-1}$, $l = \lg_2 N$ и l -разрядные ключи $\{b_n\} = b_0 b_1 \dots b_{l-1}$ представляют собой двоичные коды номеров портов. Нетрудно понять, что при такой организации ассоциативной памяти она будет функционировать как коммутатор, схема взаимных связей в котором показана на рис. 2.

Такой коммутатор имеет N входных портов с отдельными каналами для приема от пользователя адреса (аргумента поиска $\{a_i\}$ или

ключча $\{b_j\}$ и передаваемых данных $\{d_j\}$) и N выходных портов, в которые поступают переданные данные, и состоит из двух коммутирующих блоков (I и II на рис. 2) с топологией сети полного соединения, связанных друг с другом N^2 прямыми связями. В блоке I производится сравнение всех аргументов поиска с каждым из хранящихся ключей и выявление при совпадении их кодов адреса (номера) порта назначения передаваемых данных. Блок II по найденному адресу осуществляет пересылку связанных с ключом данных в назначенный выходной порт.

Для выявления совпадения аргумента поиска с хранящимся ключом элементы блока I должны выполнять определенные логические функции. В устройствах с оптической обработкой информации для этих целей предпочтительно применять логические схемы на основе многоходового вентиля ИЛИ-НЕ, функции которого может выполнять оптический пороговый инвертор. В этом случае при поразрядном сравнении каждого i -того аргумента поиска ($i = 0, 1, \dots, N-1$) со всеми ключами $j = 0, 1, \dots, N-1$ выполняется операция неравнозначности, определяемая логической функцией исключающее ИЛИ,

$$w_{s,i,j} = a_{s,i} \oplus b_{s,j} = \bar{a}_{s,i} b_{s,j} + a_{s,i} \bar{b}_{s,j} \quad (1)$$

и затем операция логического сложения результатов этого поразрядного сравнения

$$\Omega_{i,j} = \bar{w}_{0,i,j} \bar{w}_{1,i,j} \dots \bar{w}_{l-1,i,j} = \overline{w_{0,i,j} + w_{1,i,j} + \dots + w_{l-1,i,j}}. \quad (2)$$

Логический сигнал $\Omega_{i,j} = 1$, указывающий на факт совпадения i -того аргумента поиска $\{a_i\}$ с j -тым ключом $\{b_j\}$, вырабатывается только тогда, когда все логические сигналы $w_{s,i,j}$, $s = 0, 1, 2, \dots, l-1$ равны нулю.

Ассоциативный полностью связанный коммутатор может работать в трех режимах самомаршрутизации, т.е. таких режимах работы, которые не требуют для трассировки маршрутов соединений отдельного устройства управления. В первом режиме i -тый отправитель корреспонденции указывает адрес $\{b_j\}$ ее назначения. В этом случае код адреса $\{b_j\}$ и передаваемые данные $\{d_j\}$ записываются через i -тый входной порт в i -запоминающий регистр, а коды последовательных номеров $\{a_0\}$, $\{a_1\}$, $\{a_{N-1}\}$ портов назначения постоянно хранятся в регистрах аргумента поиска. Пример пересылки данных $\{d_0\}$ из нулевого входного порта в j -тый выходной порт показан на рис. 2 жирной линией. Во втором режиме j -тый отправитель корреспонденции записывает через свой входной порт в j -тый запоминающий регистр собственный адрес $\{a_j\}$ и передаваемые данные, в регистрах ключа постоянно хранятся коды последовательных номеров портов $\{b_0\}$, $\{b_1\}$, \dots , $\{b_{N-1}\}$, а один, несколько или все остальные адресаты запрашивают через входные порты о наличии корреспонденции с адресом $\{a_j\}$, записывая в регистры аргумента поиска код этого адреса. Третий режим работы АПК объединяет первые два режима. В этом режиме данные могут пересылаться из i -того порта в j -тый порт, например только в том случае, если код адреса назначения известен только i -тому и j -тому абонентам.

Сложность проблемы создания крупноразмерных АПК обусловлена главным образом необходимостью выполнения большого числа связей

между его элементами. Как следует из рис. 2, общее число глобальных межсоединений в таком коммутаторе при передаче по его каналам связи парафазнокодированных аргументов поиска и m -разрядных данных равно $(m + 2 \lg_2 N)N^2$. Если такие связи выполнить высокочастотным электрическим или световолоконным кабелем диаметром 1 мм, то, например, при $N = 10^3$ и $m = 100$ бит поперечное сечение объемной конструкции может быть грубо оценено величиной $\sim 10 \times 10$ м, что совершенно неприемлемо для практических конструкций. Десятикратное уменьшение диаметра кабеля также не позволит создать коммутатор допустимых габаритов. Поскольку пространственные оптические соединения открывают возможность относительно просто и эффективно решать эту проблему, то оптоэлектронный АПК по своим важнейшим параметрам (пропускной способности соединенных пар каналов связи и их числу) может существенно превзойти коммутаторы такого типа, выполненные с использованием только электронных средств.

Реализация ассоциативного полносвязанного коммутатора оптоэлектронными средствами

Устройство двумерного оптоэлектронного АПК поясняется на примере коммутатора размером 4×4 , схема которого показана на рис. 3. Для конкретности рассматривается первый режим пересылки данных. Блок I, осуществляющий поиск и выявление физических адресов ключей, и блок II, осуществляющий пересылку данных, выполнены из элементов, размещенных соответственно в плоскостях P_a, P_b и P_c и плоскостях P_d и P_e . Запись, стирание и хранение ключей и данных в таком АПК реализуются электронными средствами, в то время как ассоциативный поиск ключей и считывание данных выполняются с использованием оптических методов. С этой целью запоминающие регист-

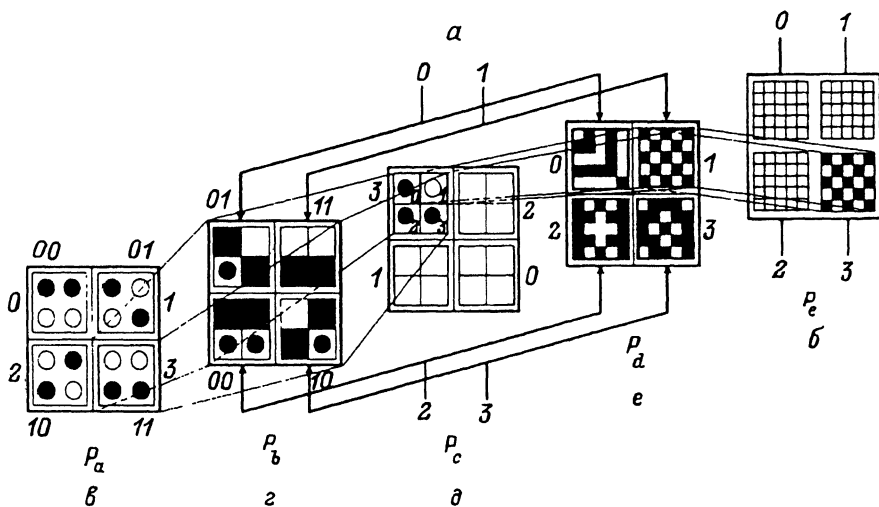


Рис. 3. Схема двумерного оптоэлектронного ассоциативного полносвязанного коммутатора размером 4×4 ($l = 2, m = 25$).

В качестве примера показана передача данных по адресу получателя информации из порта 1 в порт 3; а — входные порты, б — выходные порты, в — постоянные адреса $\{a_i\}$, г — назначенные адреса $\{b_j\}$, д — субматрицы инверторов, е — данные $\{d_n\}$.

Ключи и данные, расположенные соответственно в плоскостях P_b и P_d , выполняются в виде гибридной платы памяти с индивидуально адресуемыми управляемыми пикселями (см., например, [7-9]). Такая гибридная плата памяти представляет собой двумерную матрицу запоминающих ячеек, каждая из которых состоит из модулятора света и размещенного в непосредственной близости триггера на КМОП транзисторах, электрически связанного с модулятором и электронной схемой адресной записи информации.

Адреса выходных портов $\{a_j\}$ ($j = 0, 1, 2, 3$), представленные в соответствии с (1) в инверсном парафазном коде $\bar{a}_0\bar{a}_0, \bar{a}_1\bar{a}_1 = 10, 10; 10, 01; 01, 10; 01, 01$, отображаются в плоскости P_a темными (излучающими свет) кружками, соответствующими двоичной единице, и светлыми кружками, соответствующими двоичному нулю. Адреса портов назначения, представленные в соответствии с (1) в прямом парафазном коде $b_0\bar{b}_0, b_1\bar{b}_1$, и данные $\{d_j\}$ регистрируются в виде прозрачных или затемненных участков (модуляторы света в состояниях "включено" или "выключено"), которым соответствуют 1 или 0 в двоичном разряде. Изображение каждого адреса проецируется оптической системой на коды всех ключей, затем прошедшие через модуляторы световые пучки фокусируются другой оптической системой на четыре квадратные субматрицы, каждая из которых состоит из четырех оптических пороговых инверторов. При совпадении какого-либо аргумента поиска с каким-нибудь ключом соответствующий оптический пороговый инвертор оказывается незасвеченным. Выходной световой пучок этого оптического порогового инвертора освещает связанные с найденным ключом данные, хранящиеся в гибридной плате памяти (плоскость P_d), и их изображение проецируется оптической системой на плоскость P_e в соответствующий выходной порт считывания передаваемых данных.

Рис. 3 иллюстрирует передачу данных $\{d_1\}$ из порта 1 в порт 3, когда первый пользователь записал в свой запоминающий регистр в плоскости P_b двоичный код 1010. Как видно из рис. 3, в субматрице 3 световой сигнал отсутствует на пороговом оптическом инверторе 1, который соответствует физическому адресу данных, передаваемых первым пользователем. Возникающее на выходе этого инвертора световое излучение освещает данные $\{d_1\}$ и проецирует их изображение на плоскость P_e в выходной порт 3.

Записанные в субматрицах управляемых пикселей парафазные двоичные коды соответствуют картине соединений в коммутаторе, когда в первом режиме работы данные из входных портов 0, 1, 2, 3 передаются в выходные порты 1, 3, 0, 2. При использовании АПК во втором режиме пересылки данных эти коды отображаются в плоскости P_a четырьмя субматрицами точечных источников света (например, на основе матриц индивидуально адресуемых вертикально излучающих полупроводниковых лазеров), управляемых двоично-кодированными электрическими сигналами.

Устройство оптоэлектронного АПК во втором режиме пересылки данных отличается от приведенного на рис. 3 только тем, что постоянные коды адресов выходных портов отображаются в плоскости P_b с помощью кодирующей маски, а код адреса абонента, данными которого хочет воспользоваться какой-то пользователь, отображается

этим пользователем в плоскости P_a . Следует отметить, что при таком устройстве блока I , когда остаются неизменными коды ключей и изменяются аргументы поиска, может быть организован режим пересылки данных по адресу назначения пересылаемых данных (т.е. первый режим работы коммутатора), если в состав коммутатора ввести дополнительное устройство, которое управляет аргументами поиска, используя поступающую от абонентов информацию об адресах назначения.

Оптическая схема

Оптическая схема блока I для ассоциативного поиска и выборки физических адресов передаваемых через АПК данных приведена на рис. 4 для частного случая $N = 4$. Она является модифицированным вариантом схем, предложенных в работах [16–18]. В схеме используется только сферическая оптика. В отличие от рис. 3, где разряды N ключей размещены в плоскости P_b в N отдельных участках гибридной платы, в схеме на рис. 4 одноименные разряды b_s и \bar{b}_s ($s = 0, 1$) всех ключей сгруппированы в этой плоскости в $2l = 4$ областях и ассоциативный поиск выполняется в соответствии с графом, приведенным на рис. 5. Такая группировка разрядов ключей позволяет использовать в оптической системе объективы приемлемого размера, поскольку в коммутаторах большого размера $N \gg 2l$, а также упрощает получение равномерной освещенности разрядов ключей при использовании источников с гауссовым распределением интенсивности излучения.

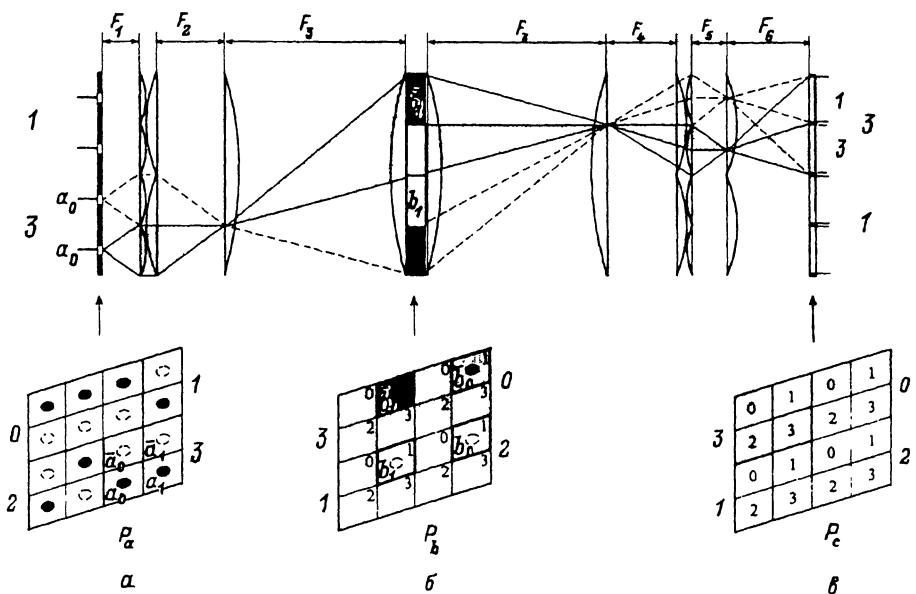


Рис. 4. Оптическая схема блока I ассоциативного поиска и выявления физических адресов запоминающих регистров передаваемых данных $N = 4$, $l = 2$.

Ход световых лучей соответствует случаю установления связей между портом I и выходным портом 3 этого блока, a — источники света, b — субматрицы пикселей или \sim кодирующая маска, $в$ — субматрицы из 2×2 инверторов.

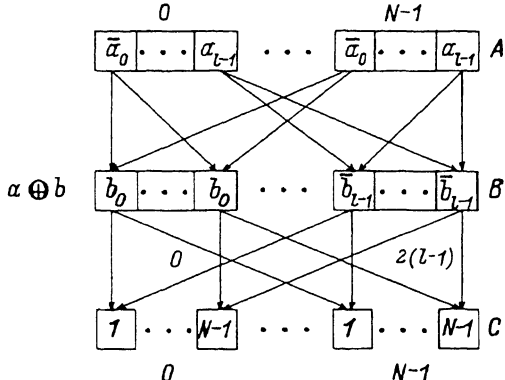


Рис. 5. Граф, отображающий топологию глобальных связей при выполнении операции неравнозначности $a + b$ в случае, когда одноименные разряды N парафазнокодированных ключей $\{b_j\}$ сгруппированы в $2l$ области.

A — l -разрядные инверсно парафазно кодированные аргументы поиска $\{a_i\}$ (субматрицы точечных источников света), B — N -разрядные матрицы памяти (субматрицы управляемых пикселей), C — многоходовые вентили НЕ-ИЛИ (субматрицы оптических пороговых инверторов).

В схеме блока I , приведенной на рис. 4, функции регистров аргумента поиска выполняют субматрицы точечных источников света. Каждый из источников любого аргумента поиска освещает одну из запоминающих субматриц гибридной платы памяти. Прошедшие через гибридную плату памяти изображения областей одноименных разрядов накладываются $2l$ раз в плоскости P_c в каждом выходном порту. Как видно из рис. 4, оптический пороговый инвертор, отмеченный в субматрице управляемых пикселей 3 цифрой 1 , фиксирует в соответствии с (2) физический адрес данных $\{d_1\}$.

Приведенная на рис. 4 оптическая схема может быть использована для работы в отраженном свете, если перед объективом гибридной платы памяти установить поляризационно-чувствительный кубик и управляемые пиксели выволнить на основе модуляторов плоскости поляризации света. Ее можно применить и для построения блока II , выполняющего по найденному физическому адресу пересылку данных из запоминающего регистра в требуемый порт назначения. Для этого данные необходимо хранить в гибридной плате отдельными m -разрядными словами, как на рис. 3, а для адресной выборки использовать световой пучок, формируемый на выходах субматриц оптических пороговых инверторов, поскольку физический адрес хранящегося ключа и связанных с ним данных один и тот же. При адресной выборке световой пучок на выходе оптического инвертора, соответствующий физическому адресу произошедшего совпадения j -того ключа с i -тым аргументом поиска, освещает данные, хранящиеся в j -том регистре гибридной платы памяти, и их изображение проецируется в i -тый выходной порт, где считывается субматрицей из m фотоприемников.

Избыточное кодирование аргументов поиска и ключей

Парафазное кодирование аргументов поиска и ключей, вдвое увеличивающее их разрядность, является необходимым условием для выполнения операции ассоциативного поиска. Кроме такого кодирования в оптоэлектронном АПК для повышения надежности ассоциативного поиска целесообразно ввести еще одно кодирование l разрядных аргументов поиска и ключей, увеличив длину их кодов на $r-l$ двоичных разрядов. В этом случае из 2^r -кодových комбинаций могут быть отобраны $2l$ рабочие комбинации той же разрядности r , которые от-

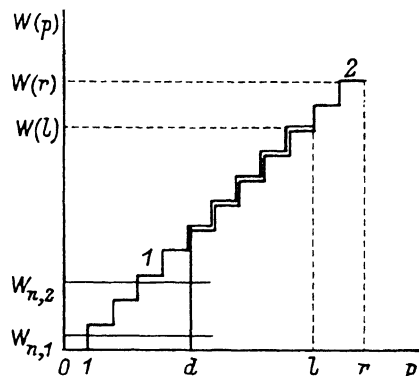


Рис. 6. Идеализированная зависимость относительного уровня светового сигнала $W(p)$ на входе оптического инвертора при выполнении логической операции неравнозначности от числа p несовпадающих разрядов в случае избыточного 1 и избыточного 2 кодирования аргументов поиска и ключей ($W_{n,1}$ и $W_{n,2}$ — уровень помех при избыточном и избыточном кодировании соответственно).

личаются друг от друга по крайней мере d разрядами или, что то же самое, имеют минимальное кодовое расстояние d .

Изменение уровня светового сигнала $W(p)$ на входе оптического инвертора в зависимости от числа несовпадающих разрядов p при выполнении логической операции неравнозначности показано на рис. 6. При избыточном кодировании одновременно с увеличением разрядности кодового слова возрастает разница между уровнями световых сигналов при полном несовпадении ключа и аргумента поиска и их несовпадении по минимальному числу разрядов. За счет выбора определенного способа кодирования отношение $\alpha = (d/1)/(r/l) = dl/r$, характеризующее относительное изменение этого различия, может быть сделано большим единицы. Это позволяет снизить примерно в α раз пороговую чувствительность оптических инверторов, во столько же раз увеличить допустимый уровень помех W_n и, как следствие последнего, снизить требования к контрастности модуляторов света в управляемых пикселях, допустимому разбросу уровня светового сигнала и его нестабильности.

Наиболее простым решением является добавление одного избыточного контрольного разряда четности, представляющего собой результат суммирования по модулю два всех разрядов кодового слова [19]. В этом случае минимальное кодовое расстояние $d = 2$ и для $l = 4, 7, 12$ величина α принимает соответственно значения 1.6, 1.75 и 1.85.

Значения величин α и β при избыточном кодировании

Код	Хэмминга		Рида-Мюллера			Боуза-Чоудхури		Голея
	l, r, d							
$\alpha = dl/r$	1.71	2.75	2.50	3.00	3.50	2.33	2.86	4.00
$\beta = r/l$	1.75	1.75	3.20	5.33	9.14	2.14	1.75	2.00

В таблице для иллюстрации возможностей более сложного избыточного кодирования ключей и аргументов поиска приведены значения величины α и коэффициента $\beta = r/l$, отражающего степень избыточности кода, для нескольких известных кодов [19] (Хэмминга, Рида-Мюллера, циклического кода Боуза-Чоудхури и совершенного кода Голея) для конкретных значений их параметров l, r, d . Как следует из этой таблицы, избыточное кодирование дает существенные результаты в случае коммутаторов большой размерности, когда

$l > 7$ ($N > 128$). При разрядности кодового слова $l = 12$ наибольший выигрыш в величине α достигается при использовании совершенного кода Голея. Применение кодов Хэмминга, Рида-Мюллера и Боуза-Чоудхури для коммутаторов, размерность которых не превышает 128×128 , нецелесообразно, поскольку приводит к неоправданно большому увеличению числа элементов в матрицах источников света и регистрах ключа. В этом случае приемлемым решением может быть добавление одного избыточного контрольного разряда четности.

Оценка возможных параметров оптоэлектронного ассоциативного полностью связанного коммутатора

Основными параметрами коммутатора являются его размер $N \times N$, число двоичных разрядов m , передаваемых по оптическим каналам параллельным кодом, время реконфигурации t_r , темп передачи данных по соединенной паре каналов V и общая пиковая пропускная способность R .

Если предположить, что расстояние между центрами соседних пикселей соответствует 3-кратному критерию Рэля, используются объективы с одинаковой числовой апертурой u , и, следовательно, для фокусных расстояний объективов выполняются условия $F_1 = F_5$ и $F_2 = F_4 = F_6$ и, кроме того, апертура $S = D \times D$ оптической системы одна и та же для любого ее поперечного сечения, то можно показать [14], что в блоке пересылки данных из запоминающих регистров в порты назначения предельные величины m и N связаны следующим соотношением:

$$mN^2 = (2u/3\lambda)^2 S, \quad (3)$$

где величина $(2u/3\lambda)^2$ представляет собой плотность дифракционно ограниченных световых пятен в задней плоскости объективов с фокусным расстоянием F_5 .

Такое же соотношение справедливо и для блока ассоциативного поиска физических адресов совпадений, если m заменить разрядностью ключей.

В соответствии с (3) для конкретных значений $S = 5 \times 5$ см, $u = 0.25$ и $\lambda = 0.8$ мкм предельная величина $mN^2 \approx 10^8$. Это означает, что АПК может обеспечить, в частности, следующие характеристики: число портов $N = 1024$, формат передаваемых слов $m = 100$ двоичных разрядов. При этом расстояние между центрами соседних оптических пороговых инверторов, управляемых пикселей и фотоприемников в субматрицах соответственно равно $\sim 50, 160$ и 160 мкм, общая длина оптической системы составляет примерно 25 см и апертурный размер наименьшей линзы $d_5 = D/N^{0.5} \approx 1.6$ мм. Изготовление матриц таких линз, формирующих в поле изображения 10×10 разрешаемых пятен в настоящее время не представляется проблематичным [20,21]. При использовании для кодирования ключей и аргументов поиска кода Голея с числом двоичных разрядов $r = 24$ расстояние между центрами соседних источников излучения в субматрицах аргументов поиска и отверстий в кодирующей маске (или управляемых пикселей) в блоке ассоциативного поиска физических адресов совпадений в соответствии с (3) в $(m/2r)^{0.5} \approx 1.4$ раза больше, чем в блоке II.

Создание оптической системы, обеспечивающей такие параметры АПК, является достаточно сложной задачей из-за жестких требований, предъявляемых к абберационным характеристикам и юстировке, и требует дополнительного исследования. В то же время опыт разработки оптической системы подобного типа [22] дает основания предположить, что ее практическая осуществимость вполне возможна.

В самомаршрутизирующемся АПК время реконфигурации t_r определяется в основном временем ассоциативной выборки ключей (адресов назначения) t_a , которое зависит от многих факторов и обстоятельств. В случае реализации АПК оптоэлектронными средствами два принципиальных фактора, связанные с конечной скоростью распространения света и его квантовой природой, ограничивают минимально достижимую величину t_a . Первый фактор ограничивает это время величиной $t_{a,1} \approx 2-3$ нс. Такое время необходимо для прохождения светового сигнала в оптической системе АПК между оптическим входом аргумента поиска и портом считывания переданных данных.

Второй фактор определяет минимальную энергию светового сигнала W_{th} , при которой они надежно регистрируются, и, следовательно, ограничивает предельную величину $t_{a,2}$ из энергетических соображений. В случае когерентного излучения пороговая чувствительность W_{th} фотоприемников [23], как и оптических пороговых инверторов [24], в матрицах с большим числом элементов равна $W_{th} \approx 20$ фДж. Величина $t_{a,2}$ может быть оценена с помощью следующего выражения:

$$t_{a,2} \geq rN^2 W_{th} / dP, \quad (4)$$

где P — средняя суммарная мощность излучения всех источников света.

Используя соотношение (3) применительно к блоку I , выражение (4) можно представить в виде

$$t_{a,2} \geq \frac{(1 - \eta)W_{th}}{2dQ_l} \left(\frac{2u}{3\lambda} \right)^2, \quad (5)$$

где η — коэффициент полезного действия источников света, Q_l — удельная мощность тепловыделения в субматрицах таких источников.

Полагая, что от матриц полупроводниковых инжекционных лазеров можно обеспечить теплоотвод $Q_l = 5$ Вт/см², их кпд $\eta = 0.2$ и используется избыточный код Голея с минимальным кодовым расстоянием $d = 8$, на основании (5) для приведенного выше примера оптической системы АПК получим $t_{a,2} \approx 2$ нс, т.е. величину, практически совпадающую с временем оптической задержки сигналов. Следовательно, максимально возможный темп передачи данных по одной паре каналов такого АПК ограничен величиной $V = m/t_{a,2} \approx 50$ Гбит/с и его общая пиковая пропускная способность — величиной $R = NV \approx 50$ Тбит/с. Если не учитывать апертурные и абсорбционные потери света в оптических компонентах, то для поддержания такого темпа коммутации информационных потоков средняя суммарная мощность P всех матриц полупроводниковых лазеров должна составлять примерно 30 Вт. При этом каждый лазерный источник должен излучать ~ 1 мВт световой мощности.

Уменьшение размера $N \times N$ оптоэлектронного АПК существенно (примерно в $N \lg_2 N$ раз, если не производится избыточного кодирования ключей) снижает требуемую световую мощность без изменения темпа передачи данных по соединенным парам оптических каналов. Например, для оптоэлектронного АПК размером 128×128 достаточно матрица из 2048 полупроводниковых лазеров с общей средней излучаемой мощностью ~ 1 Вт.

В практических разработках время реконфигурации t_r определяется главным образом быстродействием электрически управляемых источников света и пороговых оптических инверторов. Учитывая успехи в создании матриц таких приборов $[1-5]$, можно предположить, что достижимо время реконфигурации, сравнимое с предельно возможной его величиной $t_{a,2}$. Поскольку перезапись ключей и данных в запоминающих регистрах гибридной платы памяти обеспечивается электронными схемами, то модуляторы света в запоминающих ячейках могут не иметь резкой пороговой модуляционной характеристики, обязательной для обратимой светочувствительной регистрирующей среды. Это обстоятельство значительно расширяет класс материалов, которые могут быть применены в модуляторах управляемых пикселов. Поэтому представляется возможным, используя изготовленные на основе таких пространственно-временных модуляторов света и быстрых электронных схем на КМОП транзисторах методами интегральной технологии матрицы управляемых пикселов, в перспективе достичь времени реконфигурации оптоэлектронного самомаршрутизирующегося АПК, близкого к 100–10 нс.

Заключение

Выполненное исследование и анализ физических ограничений показывают, что в настоящее время, сочетая оптические и электронные методы и средства обработки информации, можно создать высокопроизводительный полносвязанный самомаршрутизирующийся компактный коммутатор размером $N \times N$, обеспечивающий передачу данных по каналам связи параллельным кодом при числе управляемых элементов примерно $O(N \lg_2 N)$.

Предложены оптическая схема и устройство такого оптоэлектронного коммутатора, которые допускают возможность реализации, в частности, следующих параметров: размер коммутатора 1024×1024 , разрядность пересылаемых данных 100 бит, время реконфигурации 100–10 нс, общая пиковая пропускная способность 50 Тбит/с при суммарной световой мощности лазерных источников излучения ~ 30 Вт. Электронных аналогов коммутатора с такими параметрами в настоящее время неизвестно, и их реализация даже с учетом перспектив интегральной технологии из-за необходимости осуществления примерно 10^8 глобальных пространственных связей не представляется возможной.

Список литературы

- [1] Yamamoto Y., Slusher R.E. // Phys. Today. 1993. N 6. P. 66–73.
- [2] Kasahara K., Numal T., Ogura I. et al. // NEG Res. & Develop. 1992. T. 33. N 3. P. 424–436.
- [3] Zeeb E., Mueller B., Hackbarth T. // Optical Computing. Proc. of the Intern. Conf. / Ed. B.S.Wherrett, P.Chavel. London, 1994. P. 481–484.

- [4] *Song J.I., Lee Y.H., Yoo J.Y.* et al. // IEEE Photon. Technol. Lett. 1993. Vol. 5. N 8. P. 902-904.
- [5] *Cheng J., Zhou P., Sun S.Z.* et al. // IEEE J. Quant. Electronics. 1993. Vol. 29. N 2. P. 741-756.
- [6] *Brown J.J., Gardner J.T., Forrest S.R.* // IEEE J. Quant. Electronics. 1993. Vol. 29. N 2. P. 715-726.
- [7] *Johnson K.M., McKnight D.J., Underwood P.* // IEEE J. Quant. Electronics. 1993. Vol. 29. N 2. P. 699-714.
- [8] *Lee S.H., Ersen A., Wang J.H.* et al. // Appl. Opt. 1990. Vol. 29. N 12. P. 1595-1603.
- [9] *Lentine A.L., Miller D.A.B.* // IEEE J. Quant. Electronics. 1993. Vol. 29. N 2. P. 655-669.
- [10] *Miller D.A.B.* // Opt. and Quant. Electronics. // 1990. Vol. 22. P. 61-98.
- [11] *Burtsev V.S., Fyodorov V.B.* // Optical Computing & Processing. 1991. Vol. 1. N 4. P. 275-288.
- [12] *Бурцев В.С., Федоров В.Б.* // Квантовая электрон. 1992. Т. 19. № 8. С. 795-803.
- [13] *Тобаги Ф.И.* // ТИИЭР. 1990. Т. 78. № 1. С. 105-142.
- [14] *Федоров В.Б.* // Квантовая электрон. 1994. Т. 21. № 6. С. 535-544.
- [15] *Федоров В.Б.* // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 2. С. 116-128.
- [16] *Федоров В.Б.* // Оптическая техника. 1994. № 2. С. 18-20.
- [17] *Fyodorov V.B.* // Optical Computing. Proc. of Intern. Conf. / Ed B.S.Wherrett, P.Chavel. London, 1994. P. 137-140.
- [18] *Fukui M., Kitayama K.* // Appl. Opt. Vol. 31. N 26. P. 5542-5547.
- [19] *Березюк Н.Т., Андриященко А.Г., Мощицкий С.С.* и др. // Кодирование информации (двоичные коды) / Под ред. Н.Т.Березюка. Харьков: Вища школа, 1978. 252 с.
- [20] *Borrelli N.F., Morse D.L.* // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. N 3. P. 476-485.
- [21] *Haselbeck S., Schresber H., Schwider J., Streibf N.* // Opt. Engineering. 1993. Vol. 32. N 6. P. 1322-1329.
- [22] *Грамматин А.П., Новиков А.А., Федоров В.Б.* и др. // Опт. мех. пром-сть. 1988. № 6. С. 24-27.
- [23] *Гусев В.К., Рослова М.Л., Федоров В.Б., Шилов И.А.* // Радиотехника. 1982. Т. 37. № 6. С. 22-30.
- [24] *Федоров В.Б.* Квантовая электрон. // 1990. Т. 17. № 12. С. 1539-1545.