

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ ЛАЗЕРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПАМЯТИ И БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ОПТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ

К.Н. Коростик, К.Г. Кузьмин, А.В. Поляков, С.И. Чубаров

В системах обработки информации в последние годы все большее внимание уделяется оптическим методам. Это связано с успехами в создании оптических логических элементов (ОЛЭ) и пороговых усилителей света (ПУС) для высокопроизводительных вычислительных средств, в частности для цифровых оптических процессоров (ОП). Оптические методы обработки информации являются наиболее быстрыми из известных до настоящего времени.

Исследование и разработка таких систем ведется в нескольких направлениях:

1. Создание полностью оптических систем, в которых оптическими являются не только информационные сигналы, но и сигналы питания (накачки или смещения). Основным физическим механизмом, используемым в таких системах, является нелинейное изменение показателя преломления вещества в интенсивных световых полях.

2. Создание оптоэлектронных систем обработки информации, в которых информационные сигналы являются оптическими, а для питания или получения требуемых рабочих условий используются электрические сигналы.

Перспективны оптические методы, использующие в качестве активных элементов малогабаритные инжекционные лазеры (ИЛ) и волоконные световоды (ВС). Их перспективность обусловлена, во-первых, наличием быстродействующих, мощных, обладающих высоким КПД, низким порогом генерации и высоким ресурсом работы порядка 10^5 часов ИЛ [1], в том числе мощных линеек и матриц ИЛ с суммарной импульсной мощностью, достигающей единиц и более киловатт [2] и, во-вторых, наличием разработанных к настоящему времени ВС с потерями менее 0,2 дБ/км [3], что близко к теоретическому пределу 0,18 дБ/км для $\lambda = 1,55$ мкм.

До настоящего времени развитие оптических систем обработки информации и создание на их основе ОП сдерживается отсутствием разработанных принципов их структурной организации, а также аппаратуры для исследования явлений в их элементах. Однако уже намечились два возможных архитектурных решения в построении высокопроизводительных цифровых ОП с применением ОЛЭ и ПУС. Одно из них основано на копировании схемотехники современных ЭВМ при использовании соединений между ОЛЭ методами интег-

ральной оптики или с помощью ВС [4,5]. Другое [5–9], учитывает специфику оптических методов обработки информации и оптической элементной базы двумерность изображения, возможность параллельной конвейерной обработки массивов двоичной информации и организации между элементами двумерных матриц большого числа чрезвычайно широкополосных пространственных связей. Такая архитектура представляется более целесообразной при создании ОП.

1. Оптические логические элементы для систем обработки информации.

Одним из первых оптических приборов, предложенных для использования в качестве полностью оптического вентиля, был нелинейный интерферометр Маха–Цандера (НИМЦ) [6]. Вводимый в одно плечо этого интерферометра оптический управляющий логический импульс (ЛИ) изменяет оптическую длину плеча на $\lambda/2$, что приводит к переключению мощности синхроимпульса (СИ) оптического питания с одного выхода на другой. Недостаток такого вентиля в необходимость иметь два идентичных плеча, в которых распространяются одинаковые волны. При достаточно большой длине плеч под действием внешних факторов равенство их оптических длин нарушается и НИМЦ становится неработоспособным. Этот недостаток устраняется в нелинейном интерферометре Санька (НИС) [7], где интерферирующие волны распространяются навстречу друг другу по одному и тому же световоду длиной более 100 м. Однако, для обеспечения максимально возможного темпа поступления ЛИ, вводимых в интерферометр с одного конца световода, их скважность должна быть мала ($\approx 1/2$). Тогда в световоде одновременно распространяется много СИ, а ЛИ изменяют оптическую длину световода не только для СИ, распространяющихся в попутном направлении, но и для встречных СИ. Эти недостатки устраняются если интерферирующие волны в виде СИ вводятся в один и тот же световод с одного и того же конца так, чтобы они распространялись в одном и том же направлении вдоль главных осей сохраняющего поляризацию нелинейного одномодового световода (рис.1). Для этого достаточно ввести в световод линейно поляризованные СИ, поляризация которых составляет угол 45° с главными осями световода. Рассмотрим сущность работы такого интерферометра.

Пусть ЛИ подаются вдоль одной из главных осей световода, направленного вдоль оси X. Длины волн ЛИ и СИ несколько различаются с тем, чтобы они не интерферировали между собой. Пусть длина световода L выбрана такой, что при отсутствии ЛИ волна СИ после целого числа полуоборотов при распространении по ВС на его выходе линейно поляризована и направление ее поляризации составляет угол 45° с главными осями световода. Под действием ЛИ, направле-

ние поляризации которого совпадает с одной из главных осей светодиода, немного изменяется длина биений $L_{\text{п}}$. Если при этом число полуоборотов поляризации СИ изменяется на четверть оборота, то поляризация СИ на выходе изменится на 90° . Это изменение легко фиксируется традиционными методами, подавая ЛИ в каждое из плеч такого интерферометра, как и в НИМЦ можно получить оптический вентиль с двумя выходами.

Общим требованием, предъявляемым к ОЛЭ, является требование функциональной полноты [8]. В устройствах, использующих для выполнения логических операций метод символьных подстановок, достаточно иметь только пороговые инверторы. Для надежной работы ОЛЭ необходима развязанность (независимость) входов логического

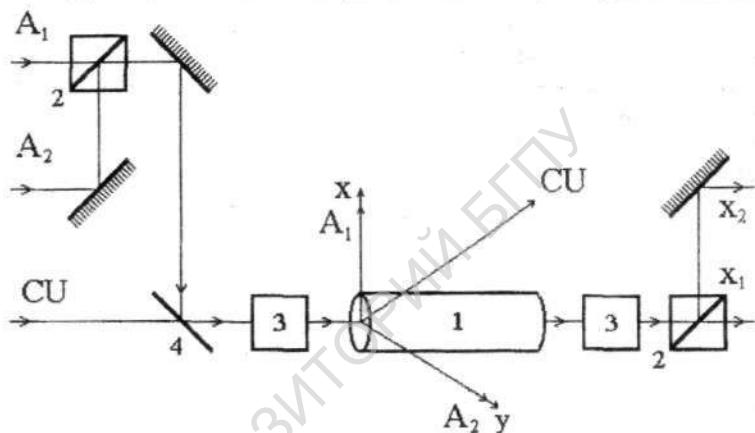


Рис. 1. Функциональная схема, поясняющая суть работы модифицированного интерферометра Саньяка.

1 — нелинейное одномодовое сохраняющее поляризацию световолокно, 2 — поляризационно чувствительные кубики, 3 — Фарадеевский вращатель поляризации на 45° , 4 — частотоизбирательные зеркала.

элемента, исключая взаимную интерференцию информационных сигналов и сигнала накачки, а также сохранение у сигналов на дополняющих выходах поляризации и частоты входных логических сигналов. Поляризационный аналог интерферометра Маха — Цандера [6] выполняет только функции совпадения $AB + AB$ и несовпадения $AB + \overline{AB}$, которые не образуют функционально полной системы, при этом длины волн входных и выходных сигналов не совпадают. Этот недостаток устраняется использованием двух последовательно соединенных интерферометров. Рассматривая пару интерферометров как один вентиль и учитывая, что сдвиг частоты во втором вентиле происходит в обратном направлении, получают такую же длину волны выходного сигнала, как и на входе первого интерферометра.

Если операции выполняются в конвейерном режиме (сигналы, полученные на вентилях некоторого слоя, передаются на последующий слой) различия в длинах волн для входных и выходных сигналов не существенны. В оптических логических приборах по сравнению с электронными появляются дополнительные возможности, связанные с тем, что они обладают целым рядом дополнительных параметров (длина волны, фаза, поляризация, модовый состав, спектр, длина когерентности и др.). Во-вторых, оптические импульсы пикосекундной длительности очень слабо взаимодействуют между собой в малоинерционной нелинейной среде, так как очень слабо изменяют ее параметры.

Вместе с тем возникают и новые проблемы по стабилизации параметров ОЭЛ. Наибольшие трудности при стабилизации параметров ОЭЛ возникают с фазами оптических сигналов, т.к. фаза оптического сигнала резко зависит от длины пути, по которому передается сигнал. Традиционные для электронных элементов требования (максимальное число входных сигналов и максимальная нагрузочная способность) никак не совпадают с требованиями стабильности, оптических параметров, исследуемыми во многих работах [9,10].

Требования к ОЭЛ, рассматривавшиеся в [9,10], учитывались при разработке ЛЭ на основе гибрида интерферометра Маха-Цандера [11] и нелинейного направленного ответвителя (рис.2). Работа такого ЛЭ основана на нестабильности двух одинаковых волн, распространяющихся по двум одинаковым связанным нелинейным световодам. Если небольшой управляющий сигнал подать на вход любого из двух одинаковых волноводов нелинейного направленного ответвителя (ННО), то он вызывает нарушение его симметрии и приводит к резкому переключению всей мощности из двух волноводов в один.

Такой логический элемент не требует когерентности между тактовыми световыми импульсами и управляющими сигналами, не обязательно точное совпадение во времени распространения по световоду управляющего и тактового импульса, при одинаковых параметрах используемых ВС и уровнях управляющих сигналов длина оптического переключателя оказывается приблизительно в 6 раз меньше длины ИМЦ. Если же длины переключателя и ИМЦ одинаковы, то для работы переключателя требуется интенсивность световых импульсов в 6 раз меньше чем для ИМЦ. Оценка необходимой пиковой мощности тактовых импульсов P_T показывает, что $P_T \approx 25 \text{ мВт}$.

В работах [11-14] рассматриваются пути получения функционально-полного набора логических элементов. В [11] приведена логическая схема DV-триггера, в который может быть записан сигнал, поступающий на вход D, когда на вход V поступает разрешающий сигнал. В отличие от традиционного DV-триггера рассматриваемый триггер может хранить 2 бита информации, если период τ синхронизации импульсов, поступающих в качестве питания, равен задержке элемен-

тов T . Если же $\tau = T/N$, где N — целое, то рассматриваемая схема может хранить $2N$ битов. В результате рассмотрения свойств оптических логических элементов на основе переключателей можно отметить их следующие особенности.

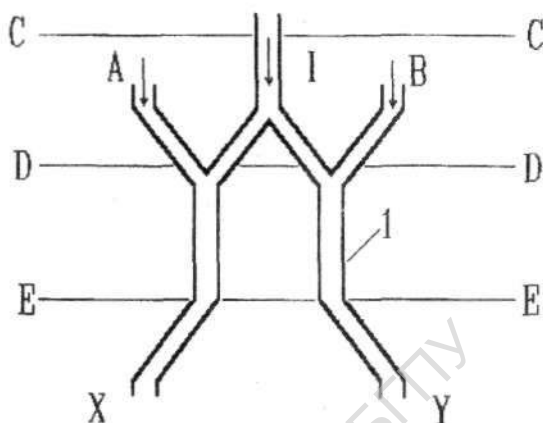


Рис.2. Схема ЛЭ на основе гибрида интерферометра Маха-Цандера и ННО. CD — ИМЦ, DE — ННО. A, B — управляющие сигналы, I — ВС.

1. Оптический переключатель имеет отдельные входы для управляющих логических сигналов и сигналов синхронизации, совмещенных с оптическим питанием и позволяет производить инвертирование оптического сигнала с одновременным его усилением, стандартизацией уровня и положения во времени.

2. Оптический переключатель имеет прямой и инверсный выходы.

3. Набор логических элементов на основе оптических переключателей является функционально полным.

4. Оптический переключатель по принципу своей работы допускает неполное совпадение во времени входных логических сигналов и синхроимпульсов.

5. При одинаковой длине и степени нелинейности используемого материала требуемая интенсивность сигналов для переключателя приблизительно в 6 раз меньше, чем для ПМЦ.

6. Минимальная длительность световых сигналов может составлять 10^{-12} — 10^{-13} с.

7. Оптический переключатель является реактивным элементом.

8. Соотношение уровней логической 1 и 0 могут различаться в 10 и более раз, что обеспечивает высокую надежность хранения информации и переключений.

9. Коэффициент усиления по мощности для переключателя может достигать 100 и более, что обеспечивает его высокую нагрузочную способность.

В изготовлении элементной базы ОП существует проблема изготовления разделенно – связанных световодов. Эта технологическая трудность может быть преодолена использованием поляризационного аналога световодного направленного ответвителя (СНО) [15].

Отрезок одномодового сохраняющего поляризацию ВС можно рассматривать как аналог симметричного (состоящего из двух одинаковых световодов) направленного ответвителя на основе двух разделенно – связанных световодов. Симметричные и антисимметричные собственные моды в СНО в световодах 1 и 2 (рис.3) имеют одинаковые и отличающиеся на π фазы и различаются своими постоянными распространения β_- и β_+ . В поляризационном аналоге СНО этим решениям соответствуют моды вдоль главных осей световода, постоянные распространения которых также равны β_- и β_+ .

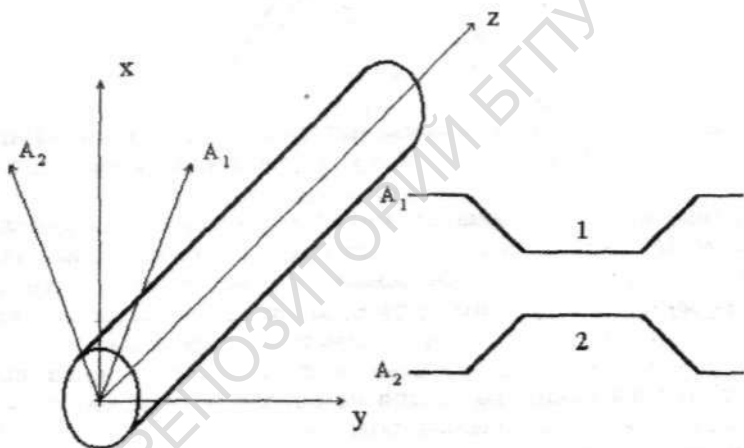


Рис.3. Поляризационный аналог СНО на основе двух разделенно – связанных волноводов.

Волна A_1 , вводимая только в первый световод СНО, соответствует сумме симметричного и антисимметричного решений. Поэтому этой волне в поляризационном аналоге СНО соответствует волна A_1 , поляризация которой составляет угол 45° с главными осями световода. Волна A_2 , вводимая только во второй световод СНО, соответствует разности симметричного и антисимметричного решений. Поэтому этой волне в поляризационном аналоге СНО отвечает волна A_2 , поляризация которой также составляет угол 45° с главными осями световода и ортогональна поляризации волны A_1 .

Направленному ответвлению волны A_1 во второй световод СНО соответствует метаморфоза волны в поляризационном аналоге СНО, при которой волна постепенно переходит в волну A_2 . Расстояние L ,

на котором это происходит, определяется из условия $(\beta_+ - \beta_-)L = \pi$, т.е. это расстояние в два раза меньше длины биений в сохраняющем поляризацию световоде.

Можно видеть, что проблема изготовления распределенно-связанных ВС с максимально возможной степенью идентичности — в поляризационном аналоге СНО решена автоматически.

Тот же отрезок сохраняющего поляризацию одномодового ВС можно рассматривать как аналог не только симметричного, но и асимметричного направленного ответвителя. В этом случае параллельно осям A_1 и A_2 на выходе ВС должен быть установлен поляризационно-чувствительный прибор.

Отличительной особенностью структур вычислительных устройств на основе ЛЭ, использующих ВС, является их широкополосность. Возникает возможность работать со световыми импульсами вплоть до субпикосекундных длительностей с частотой переключения до 1–10 ТГц [16–20]. Однако из-за слабой нелинейности материалов, используемых для изготовления ВС, требуются значительные мощности оптической накачки. Например, для ВС длиной 38 и 200 м для интерферометров Маха-Цандера [21] и Саньяка [20] требуются мощности накачки в единицы ватт.

2. Элементы и вычислительные устройства на основе нейронных сетей и векторно-матричных систем.

Анализ многочисленных вариантов построения ЛЭ [22–25] для создания сложных вычислительных устройств показал, что при одной и той же функциональной сложности в тех вычислительных устройствах, где организована трехмерная структура оптических связей используется, примерно, на два порядка меньшее число компонент, чем в устройствах, созданных на элементной базе с размещением связей в одной плоскости [26]. При этом имеет место и увеличение производительности вычислительного устройства в N_n раз, например, для задач, связанных с обработкой изображений (N_n — размерность изображения). Вычислительные устройства такой архитектуры получили название нейронных сетей.

Процесс развития элементной базы вычислительной техники показывает, что к настоящему времени основной резерв повышения производительности вычислительных устройств (ВУ) за счет увеличения тактовой частоты, практически исчерпан. Определяющим фактором становятся уже не физические, а схемотехнические ограничения, когда время передачи информации от устройства управления к произвольному логическому элементу соизмеримо со временем переключения элемента. Оценки показывают, что длительность такта в указанных устройствах не должна превышать 10^{-9} с [26].

При определении производительности, которой должны достигать оптические цифровые ВУ, необходимо учитывать два фактора. Во-первых, к концу 1995 года предполагается достижение производительности электронных ВУ до $10^{11} - 10^{12}$ операций в секунду и удельной производительности до $10^{12} - 10^{11}$ вентиль·Гц/см². Поэтому производительность оптических устройств должна быть не менее $10^{14} - 10^{15}$ операций в секунду ($3 \cdot 10^{15} - 10^{17}$ элементарных операций в секунду), а число элементов не менее $10^7 - 10^8$. Во-вторых, прямое сравнение производительности двух классов ВУ (которые оказываются пока не в пользу оптических систем) [26], не является достаточно корректным. Преимущества оптических ВУ надо искать не в простом увеличении числа операций в секунду, а в уменьшении числа операций, необходимых для решения конкретных задач, например, связанных с обработкой изображения.

При оценке оптических ВУ следует учитывать не только абсолютное число операций в секунду, но и более высокую эффективность использования элементарных логических операций и более высокую удельную производительность (на единицу объема, веса и т.п.) которая доходит до 10^{14} вентиль·Гц/см². Более высокое значение удельной производительности может быть достигнуто введением оптических каналов связи в логические структуры, при отсутствии в этих каналах вентильных и переключающих элементов, характерных для чисто электронных схем, а также обеспечивает возможностью сочетания в элементарных логических элементах функций памяти и логики, отсутствием необходимости сортировки массива информации на отдельные части с предварительным запоминанием и т.д.

Оптическим устройствам ассоциативной памяти и оптическим реализациям нейронных сетей в последнее время уделяется значительное внимание. Привлекательность оптических методов для создания нейронных сетей обусловлена высокой степенью параллелизма, присущей оптике, что является необходимым условием реализации большого количества соединений — одного из основных признаков нейронных структур.

Большинство реализаций ассоциативной памяти на принципах нейронных сетей используется модель Хопфилда [27]. Однако, для этой модели характерны ограничения объема M (числа записываемых векторов) значением $M \leq N/4 \ln N$, где N — число нейронов.

Эти ограничения значительно ослабляются для моделей нейронных сетей высших порядков [28], и моделей с нелинейным (степенным) преобразованием в корреляционной плоскости [29–31]. Большинство реализаций моделей ассоциативной памяти (29, 32–35) основываются на бинарном представлении данных $\{0,1\}$. Биполярное представление данных $\{-1,1\}$ в этих моделях достигается организацией отдельных параллельных структур для отрицательных и положительных значений [36, 37]. Вместе с тем, как показано в [38],

только биполярное представление данных обеспечивает максимальное отношение сигнал/шум.

В [39] предложена модель ассоциативной памяти для биполярных векторов, которая эквивалентна нейронной сети высокого порядка, показана также возможность существенного увеличения объема памяти в такой системе. Основой для синтеза относительно простой оптической реализации нейронной сети высокого порядка является итерационный алгоритм ассоциативной выборки информации, т.е. в качестве входного вектора $n+1$ -й итерации задается выходной вектор k -й итерации. После выполнения некоторой итерации $K=K_0$ нейронная сеть переходит в устойчивое состояние, когда

$$Y^{(K_0+1)} = Y^{(K_0)}$$

где Y^k — выходной вектор нейронной сети k -ой итерации.

В такой сети при использовании модуляции интенсивности оптической несущей прямое представление векторов в биполярном виде невозможно. Применение фазовой модуляции сложно из-за технических трудностей, возникающих при детектировании. В [39] для представления данных в биполярном виде используется изменение поляризации проходящей линейно поляризованной световой волны, т.к. поляризационная модуляция легко детектируется. Предложенная в работе схема позволяет реализовать оптическое устройство ассоциативной памяти для биполярных векторов, эквивалентное нейронной сети любого порядка, определяемого видом нелинейности.

Моделирование работы системы [39] показало возможность существенного увеличения объема памяти с ростом порядка сети, вероятность ассоциативного считывания сильнокоррелированных образов и устойчивости к искажениям исходной информации. Система достаточно проста для реализации даже на основе существующей элементной базы. Это достигается прежде всего за счет использования поляризационных свойств света для реализации биполярного представления данных и арифметических операций над ними. Такие устройства могут найти широкое применение в задачах распознавания образов в реальном масштабе времени, в частности для ввода текстовой информации в компьютер.

При обработке потока двоичных символов зачастую базовой операцией, выполняемой над массивами данных является векторно-матричное произведение [40–43]. Для поиска (сортировки) вектора в массиве под векторно-матричным произведением понимают последовательное выполнение двух операций [40], а именно логическое умножение входного вектора на эталонную матрицу и многомерное логическое сложение по модулю 2 элементов внутри каждой строки матрицы, полученной после первой операции логического умножения, с формированием выходного вектора.

В [44] рассмотрен вариант технической реализации ОП для векторно-матричного умножения, предназначенный для логической обработки потока двоичных сигналов в задачах поиска (или сортировки) вектора в массиве данных. Выполнение логических операций в ОП может осуществляться в амплитудном, фазовом и поляризационном базисе. Использование фазового базиса в ОП затруднено.

Как отмечается в [44], преимуществами поляризационного метода кодирования информации по сравнению с амплитудным является практически полное отсутствие потерь оптической мощности из-за поглощения в оптической системе, а также значительно меньшие энергетические потери, обусловленные характерной для такого типа архитектурой процессора, как и в случае [26].

Оптическая схема, поясняющая сущность поляризационного способа выполнения операций логического умножения показана на рис.4. Устройство содержит три последовательно расположенные управляемые оптически анизотропные среды и поляроид-анализатор. Оно реализует операцию логического умножения одно-разрядных величин $x = \{0;1\}$ и $v = \{0;1\}$. Принцип его действия основан на последовательном преобразовании состояния поляризации управляемыми анизотропными средами, вносящими в проходящее излучение фазовые набег.

На рис.5 показана принципиальная схема оптического процессора для векторно-матричного умножения сигналов, работающего в поляризационном базисе с использованием электрооптических материалов [44]. Такой ОП содержит лазер 1; расширитель пучка лазерного излучения на линзах 2,3; матричные v_{1-j} модуляторы 4 на основе жидких кристаллов для ввода элементов эталонной матрицы V ; одноканальные x -модуляторы 5 для ввода элементов входного вектора \bar{x} ; поляроид-анализатор 6; объектив 7 и фотоприемное устройство 8. О наличии данного входного вектора x в массиве векторов, составляющих эталонную матрицу V судят по превышению выходного электрического сигнала фотоприемного устройства над порогом. Производительность такого процессора составляет около $8,2 \cdot 10^{10}$ бит/с, а в перспективе может достигать до 10^{13} бит/с [44].

В последние годы интенсивно разрабатывается ЛЭ для ОП на основе тонкопленочных светомодуляторов. Оптические коммуникационные каналы, представленные в интегральных схемах с помощью тонкопленочных светомодуляторов позволяют понизить число элементов на 2 порядка, а число соединений — на порядок и увеличить в m раз (m — размерность изображения) производительность, по сравнению с подобными электрическими схемами.

Принцип работы оптического устройства на тонкопленочных светомодулях основан на модуляции луча электрическим полем. Используется только одно преобразование энергии (световой в электрическую) и общий источник света для большого числа элементов. С этой точки зрения многообещающими являются электрооп-

тические светомодуляторы, фотоэлектрические преобразователи энергии и электростатические устройства хранения энергии. Состояние устройства определяется по интенсивности $I_{\text{вых}}$ светового луча на выходе светомодулятора (или разностью потенциалов между его электродами), которая однозначно связана с интенсивностью $I_{\text{вх}}$

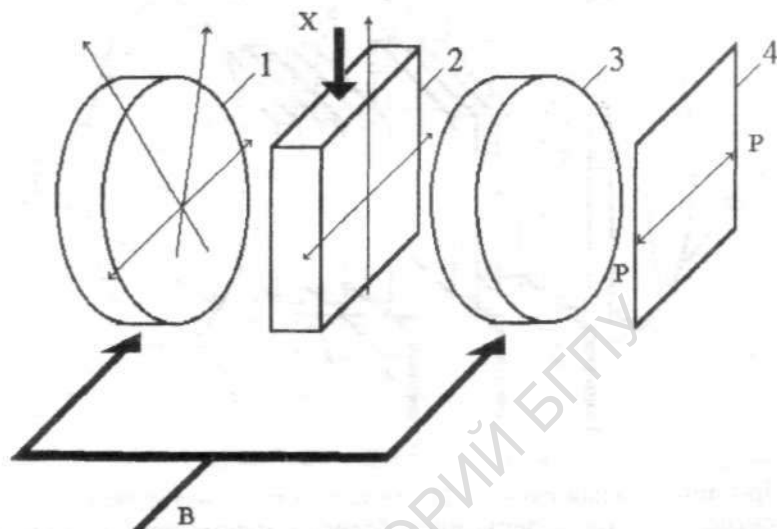


Рис.4. Оптическая схема для ОП, выполняющая операции логического умножения в поляризованном базисе X^*V .

1—3— оптически анизотропные среды, 4— поляризатор— анализатор с осью пропускания $P-P$.

светового сигнала, приложенного ко входу фотоэлектрического преобразователя энергии. Действие логического элемента состоит в управлении интенсивностью светового луча, передаваемого светомодулятором и интенсивностью луча, приложенного ко входу компонента. На рис.6 показана ячейка динамической памяти, состоящая из светомодулятора M , фотоэлектрических преобразователей энергии F и накопительных конденсаторов C . (В [45—52] даны схемы, реализующие основные логические функции на базе из данных компонентов, где логические сигналы передаются через оптические коммуникационные каналы). Алгоритм их работы следующий:

1. Цикл стирания информации в элементе 2. Выключатель $K2$ замыкается на контакт 1 и емкость $C2$ заряжается.

2. Считывание данных в инверсном коде с элемента 1 световым сигналом $I_{\text{т}}$. Выключатели $K1$ и $K2$ в позиции 2 и выходной сигнал $M1$ является входным, записывающим сигналом для элементов 2.

3. Удаление информации в элементе 1. Выключатель $K1$ в позиции 1 и $C1$ заряжается.

4. Считывание информации в прямом коде с элемента 2 световым сигналом $I_{\tau 2}$ — выключатели K1 и K2 заземлены. Выходной сигнал модулятора 2 — входной сигнал элемента 1.

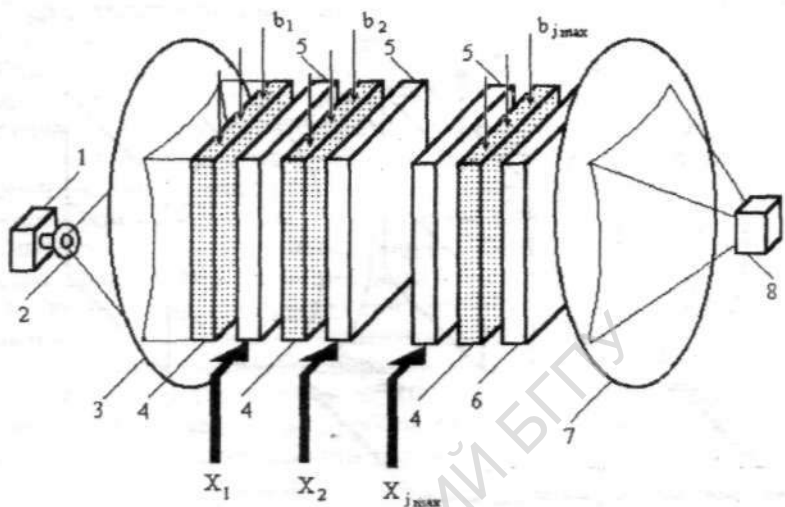


Рис.5. Принципиальная схема ОП для векторно — матричного умножения сигналов в поляризацонном базисе с использованием электрооптических материалов.

Повторяя циклы 1—4 информация в ячейке может храниться сколько угодно долго. Данный принцип использован также для конструирования двумерного сдвигового регистра (2D-регистра). Он включает 16 элементов и состоит из 2 ячеек на 2-х пространственных уровнях, связанных друг с другом восемью оптическими каналами. Матрица данных может храниться в регистре и быть сдвинута в любые из 4-х направлений. Для минимизации количества компонентов и электрических соединений в ОП придерживаются следующих принципов.

- 1). Для поддержки элементов используются параллельные электрические схемы.
- 2). Параллельные функциональные соединения достигаются благодаря использованию оптических каналов.
- 3). Функциональные соединения между структурами и отдельными компонентами, реализованные непосредственно электрическими схемами, являются последовательными.

В [53] описан процессор на данных элементах (рис.7). Процессор, состоящий из $[m \times m]$ элементов, состоящих из шести ячеек на шести пространственных уровнях способен хранить $5[m \times m]$ матриц данных, одновременно хранить и преобразовывать $3[m \times m]$ матрицы данных,

сдвигать $[kxk]$ $1 < k < m$, матриц в 4-х направлениях. выполнять полный набор логических операций с двумя переменными и операцию одновременного попарного сложения $2m$ чисел с $m-1$ цифрой и ряд других функций [52].

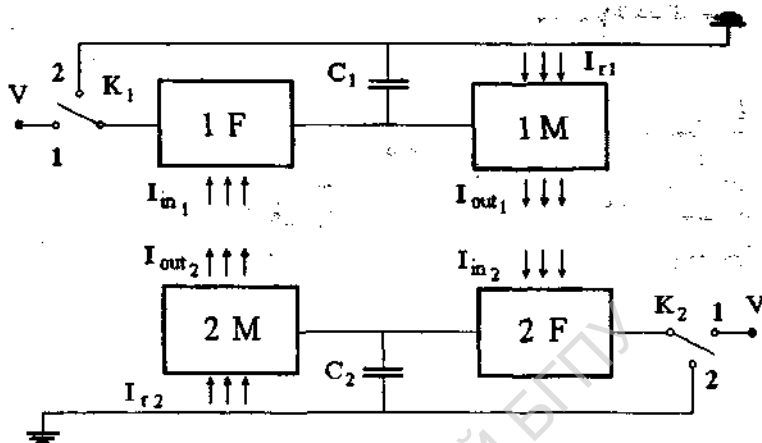


Рис.6. Схема ячейки динамической памяти на основе тонкопленочных светомодуляторов.

Процессор [53] содержит на два порядка меньше компонентов, чем электронный. Число циклов нужных для выполнения различных логических операций в нем в N раз меньше (N — число рядов изображения), а время, требуемое для работы с изображением не зависит от его размерности. Объем, занимаемый соединениями (в таком ОП) 7–8% общего объема (в современных микросхемах это более 90%). Управляющие напряжения могут быть $\sim 5V$ (для кристаллов $NbLiO$).

3. Системы обработки оптической информации на основе интегральной оптики и масочные оптические Фурье-процессоры.

В последнее время очень бурно развивается направление по созданию систем оптической обработки информации, использующих достижения в разработке устройств и элементов интегральной оптики. Интенсивно ведутся исследования по разработке ОП для задач спектральной и корреляционной обработки сигналов на базе пространственно-временных электрооптических и интегрально-оптических модуляторов с использованием эффектов для поверхностных акустических волн (ПАВ). В таких процессорах временная координата входного сигнала превращается в пространственную. Тогда при считывании когерентным светом в фокусе объектива реа-

лизуется двумерное преобразование Фурье. Такой процессор позволяет осуществлять панарамную (одновременную) обработку больших массивов входных сигналов.

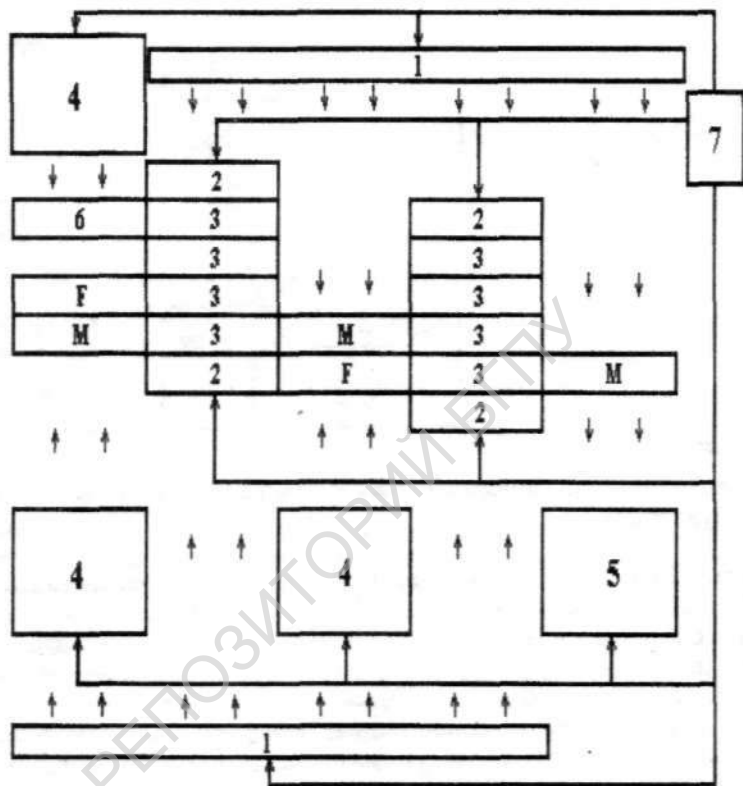


Рис.7. Функциональная схема процессора.

- 1 — источник света, 2 — управляемые транспаранты,
 3 — матрицы элементов, 4 — 5 — устройства ввода — вывода,
 6 — устройство хранения, 7 — устройство управления.

В гибридном интегрально — оптическом процессоре с использованием ПАВ [53] (рис.8), Излучение лазера 1 формируется объективом 2, преобразуясь в широкоапертурный в плоскости волновода и сжатый в перпендикулярном направлении пучек. Призмменным элементом связи 4 он вводится в оптический волновод 3. На поверхности волновода 3 во встречных направлениях, перпендикулярных к оси пучка, распространяются две акустические волны, возбуждаемых преобразователями 5 под действием сигналов $S_1(t)$ и $S_2(t)$. В зоне пересечения волноводной моды и пучков ПАВ происходит акустическое

взаимодействие и оптический пучок распадается на ряд дифракционных порядков, которые выводятся из волновода элементом связи 4. Изображение зоны акустооптического взаимодействия переносится в плоскость фотоприемного устройства 8 проекционным объективом 6. Совокупность дифракционных порядков пространственно фильтруется в фокальной плоскости экраном с отверстием 7.

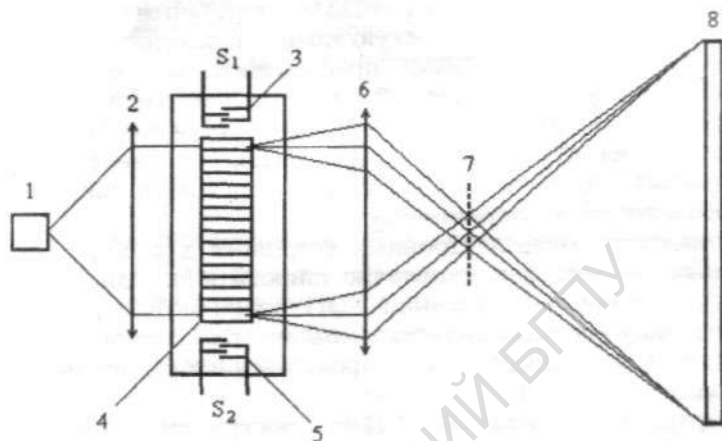


Рис.8. Функциональная схема гибридного интегрально — оптического процессора на ПАВ.

Данный процессор может функционировать в следующих режимах:

1. Режим спектроанализатора с пространственным интегрированием. Выходной сигнал ФПУ в этом случае представляет собой спектр сигнала $S_1(t)$, свернутый с аппаратной функцией окна вида $\text{Sin}U/U$.

2. Режим конвольвера с пространственным интегрированием. В данном случае выходной сигнал ФПУ пропорционален свертке сигналов S_1 и S_2 .

3. Режим коррелятора с временным интегрированием. В данной конфигурации выходной сигнал ФПУ пропорционален функции взаимной корреляции сигналов S_1 и S_2 .

4. Режим спектроанализатора с временным интегрированием.

Одним из перспективных направлений создания ОП является использование алгоритма обработки, предусматривающего операцию многоканального временного интегрирования. Устройство формирования ядра преобразования в таком процессоре должно обеспечивать перемножение и когерентное сложение обрабатываемых сигналов. Для перемножения двух матриц $N \times N$ матричным перемножителем на основе одномерных электрооптических модуляторов требуется

выполнение всего N временных циклов. В цифровых компьютерах такое перемножение осуществляется за N^3 временных циклов.

Гибридно — оптические процессоры на ПАВ находят применение для обработки пространственно — временных (ПВ) сигналов антенных решеток [46]. В этом случае ПВ — сигналы $E_n(t)$, принятые элементами антенной решетки, усиленные и преобразованные в и блоке предварительной обработки (БПО), управляют соответствующими каналами ПВ — модулятора света (ПВМС). В ПВМС когерентная световая волна лазера преобразуется в оптическую модель принятого ПВ — волнового поля $E(t)$. Входной сигнал ПВМС преобразуется в оптическом канале, состоящем, в общем случае, из объективов, голографических фильтров, управляемых оптических трансформаторов и т.п. На выходе оптического канала сигнала формируется в виде некоторого распределения $e(t)$ светового поля $E(t)$, регистрируемого с помощью многоэлементного фотоприемника.

Номенклатура оптоэлектронных устройств для создания оптоэлектронных процессоров достаточно широка [55]. Однако, наибольшие достижения в создании ОП и ПВМС достигнуты с использованием акустооптических модуляторов с пространственным, временным и комбинированным пространственно — временным интегрированием [56 — 69].

Рассмотренные в [53 — 59] ОП с пространственной обработкой сигналов предложены и развиваются как системы, реализующие интегральное преобразование Фурье. При использовании дискретного преобразования Фурье намечается создание оптических Фурье — процессоров (ОФП) по ряду показателей превосходящих аналоговые системы. Это становится возможным благодаря иному принципу построения, основанному на представлении базисных функций анализа с помощью набора оптических масок [60].

Преобразование Фурье дискретного сигнала определяется следующим образом [60].

$$F(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} U(n\Delta t) \exp(-j\omega n\Delta t), \quad (1)$$

где $U(n\Delta t)$ — амплитуда n -й выборки анализируемого сигнала; Δt интервал дискретизации; N — число отсчетов сигнала.

В масочных ОФП формируются косинусная и синусная составляющие преобразования (1):

$$C(\alpha x) = \operatorname{Re}\{F(\alpha x)\} = \sum_{n=0}^{N-1} U(n\Delta t) \cos(n\gamma x), \quad (2)$$

$$S(\alpha x) = \operatorname{Im}\{F(\alpha x)\} = \sum_{n=0}^{N-1} U(n\Delta t) \sin(n\gamma x), \quad (3)$$

где $\omega = \alpha x$, $\gamma = \alpha \Delta t$, x — пространственная координата, α — коэффициент пропорциональности.

Для выполнения операций (2), (3) масочный ОФП должен содержать один или N источников света, модулируемых отсчетами анализируемого сигнала, два набора оптических масок $\cos(n\gamma x)$ и $\sin(n\gamma x)$ обеспечивать формирование произведения $U(n\Delta t) \cos(n\gamma x)$ и $U(n\Delta t) \sin(n\gamma x)$ и осуществлять их суммирование.

Поскольку отсчеты сигнала появляются в разные моменты времени, выполнение операции суммирования требует наличия в составе ОФП памяти. По способу реализации памяти масочные ОФП могут быть разбиты на два класса (рис.9).

К первому из них относятся ОФП с запоминанием отсчетов анализируемого сигнала. Такие ОП содержат N источников света, каждый из которых оптически связан с одной из N масок. Ко второму классу относятся масочные ОФП с запоминанием произведений $U(n\Delta t)\cos(n\gamma x)$ и $U(n\Delta t)\sin(n\gamma x)$, формируемых последовательно во времени (процессоры с временным суммированием).

У процессоров с временным суммированием верхняя граничная частота анализируемого сигнала $F_B < F_{nsc}/2K$, где F_{nsc} — граничная частота вывода информации из многоэлементного фотоприемника, K — число отсчетов сигналов. Точностные характеристики масочных ОФП могут быть существенно улучшены при использовании масок с дискретной записью базисных функций.



Рис.9. Классификация масочных ОФП.

Одной из важных характеристик Фурье-процессоров является динамический диапазон. Дискретные масочные ОФП обеспечивают такой же динамический диапазон, как и другие процессоры с модуляцией по интенсивности, в то же время превосходят их по точности

анализа, сочетая это преимущество с простотой перестройки полосы анализа.

В масочных ОФП не нужны когерентные источники света, отпадает необходимость применения сложнореализуемых генераторов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-генераторов) и не требуется создания опорных пучков, как в интерференционных системах. Для изменения полосы анализа достаточно лишь перестроить фильтр нижних частот на входе процессора, в то время как в ОФП, основанных на ЛЧМ-преобразовании необходима перестройка скорости изменения ЛЧМ-сигнала. В масочных ОФП просто формируются мгновенные амплитудно-фазовые спектры, они намного компактнее, чем любые другие ОФП на объемных элементах. Масочные ОФП обеспечивают возможность формирования в одном устройстве спектров широко- и узкополосных сигналов. В литературе имеются лишь отдельные сведения о вариантах реализации масочных ОФП [60,61].

В последнее время все больший интерес вызывают лазерные пороговые элементы на основе ИЛ [8]. Они имеют важное преимущество перед другими ЛЭ, состоящее в том, что генерация выходных световых импульсов в них осуществляется за счет энергии электрических источников питания.

Максимально возможную величину частоты переключения вентиля n характеризуют временем полного срабатывания $t = t_{\text{вкл}} + t_{\text{выкл}}$ ($t_{\text{вкл}}$ — время реакции вентиля на входной световой сигнал, а $t_{\text{выкл}}$ — время готовности его к очередному логическому воздействию). Для высокопроизводительных ОП требуется частота $n = 1/t_n = (10+100)\text{ГГц}$ [8]. Световую мощность P_n , необходимую для накачки N_B пороговых вентилях можно найти из соотношения

$$P_n = gnN_B DE_a, \quad (4)$$

где g — коэффициент усиления активного элемента, DE_a — пороговая чувствительность (минимальная энергия импульсного светового сигнала, необходимая для переключения ЛЭ).

Используя (4) для $N_B = 4 \cdot 10^5$, $g = 10$, $n = 10\text{ГГц}$, $DE_a = 10\text{фДж}$ можно получить $P_n \sim 400$ Вт при мощности накачки одного элемента $\sim 1\text{мВт}$. Учитывая, что потери световой мощности при входе излучения в ЛЭ и при ее мультиплицировании составляют около 50–70% [8], то потребуется источник световой мощности ~ 1 КВт.

К настоящему времени созданы ЛЭ на основе двух последовательно включенных $p-i-n$ — диодов на основе GaAs с i -слоем в виде сверхрешетки, способных работать в режиме оптического RS-триггера [63]. Созданы матрицы таких триггеров из 32×64 приборов, характеризующихся энергией срабатывания $E_a \sim 1\text{пДж}$ и временем срабатывания $\sim 1\text{нс}$.

Для лазерных пороговых элементов на основе многосекционных ИЛ уже получены оптические вентили с параметрами, близкими к требуемым: $\Delta E_a \sim 1 \text{ фДж}$; $\nu \sim 10 \text{ ГГц}$; $g = 10$ [64].

4. Рециркуляционные системы обработки информации.

В последнее время ведутся интенсивные работы по созданию систем хранения информации, работающих на тактовой частоте 1 ГГц и выше. Такие запоминающие устройства позволяют осуществлять согласование скорости обмена высокопроизводительных процессоров с внешними устройствами, последовательно — параллельное преобразование информационных потоков, а также некоторые операции с матрицами [65].

Небольшие потери и широкая полоса пропускания одномодовых ВС позволяют создавать на их основе замкнутых линий задержки с циркуляцией сигнала, который может быть использован в качестве аналога динамического запоминающего (ДЗУ) устройства для оперативного хранения и обработки информации [66]. Контур, в ОДЗУ может включать [67] ВС и оптический ретранслятор, который в свою очередь состоит из фотоприемного модуля, устройства коррекции и устройства, преобразующего информацию из электрического формата в оптический. Преобразователем электрического сигнала в оптический в [67] служит интегральный электро-оптический модулятор.

Использование принципа внешней модуляции для преобразования информации из электрической в оптическую форму представления позволяет существенно увеличить ширину полосы частот информационного сигнала [67], увеличить объем сохраняемой информации за счет спектрального и поляризационного уплотнения. Но при этом возникает проблема ухудшения качества хранимой информации, вызванная уменьшением отношения с/ш при каждом проходе по контуру, что обусловлено потерями на стыке интегрального модулятора и ВС. Поэтому оптимизация согласования приобретает важное значение, как средство уменьшения потерь мощности информационного оптического сигнала.

Вероятность ошибки при рециркуляции импульсов в контуре зависит от отношения сигнал/шум на входе электронного регенератора (РГ). Этот вопрос рассмотрен в [68,69]. В работе [70] исследована возможность расширения динамического диапазона за счет специального РГ и применения оптических отводов для обработки информации.

Рассмотрим влияние характеристик РГ и ВС на информационную емкость контура ОДЗУ с учетом отвода части энергии для обработки

информации. Для этого предположим, что отношение c/λ на входе РГ является заданным. Информационная емкость N в случае бинарных сигналов определяется произведением скорости V информационного потока на время T задержки оптических импульсов в световоде ($T = Ln/c$, где L — длина световода, n — показатель замедления групповой скорости в нем, c — скорость света в вакууме). Эта емкость может быть ограничена как затуханием, так и полосой пропускания ВС и следовательно, ее значение определяется наименьшей из следующих величин:

$$N_f = \frac{nF}{c f} V, \quad (5)$$

$$N_z = \frac{n\gamma}{c k} V, \quad (6)$$

Здесь N_f и N_z — величина информационной емкости при частотном ограничении и ограничении, связанного с затуханием; F — полоса частот, пропускаемых ВС единичной длины ($\Gamma\text{ц}\cdot\text{м}$); f — полоса пропускания оптоэлектронных компонент устройства; γ — динамический диапазон пары передатчик — приемник ($\gamma = 10 \lg P_1/P_2$); P_1 — максимальная мощность излучения, вводимого в ВС; P_2 — минимальная мощность, регистрируемая фотоприемником при заданной вероятности ошибки; k — затухание в ВС на единицу длины ($\text{дБ}/\text{м}$). Если $N_f < N_z$, в ВС могут быть внесены дополнительные потери, связанные с обработкой сигнала, которые не повлияют на информационную емкость контура. В этом случае, как следует из (5), (6):

$$Fk / fj < 1, \quad (7)$$

Как видно из рис.10, для любого световода можно подобрать такие параметры РГ, при которых достигается частотное ограничение информационной емкости. Следовательно, в любой световодный тракт контура независимо от его длины (при соответствующей подборе F и k) могут быть внесены потери (отводы), которые не изменят информационной емкости устройства в целом. При реализации ОП на базе замкнутого контура необходимо рассматривать вопрос об их стабильности процесса рециркуляции в условиях флуктуаций параметров окружающей среды. Различные внешние воздействия на ВС могут изменить время задержки импульсов в нем, что нарушит тактовый синхронизм системы. Влияние таких факторов, как изменение температуры и давления, возрастает с увеличением длины ВС. Однако, как следует из (5), при одной и той же информационной емкости N_f с ростом длины ВС уменьшается необходимая скорость потока информации V , т.е. увеличивается период следования импульсов. Отношение изменения времени задержки к периоду следо-

вания импульсов не зависит от длины световода. Таким образом, влияние внешних воздействий, не изменяющих потерь в световоде, на стабильность работы кольцевой структуры определяется не длиной световодного тракта, а информационной емкостью устройства.

Одним из основных видов потерь мощности являются потери из-за рассогласования мод ВС и полоскового волновода, стыкуемых между собой. Разные коэффициенты преломления стыкуемых материалов, а также отличие в форме поперечных сечений ВС и волновода изменяют в характер распределения поля моды или характеристики излучения. Критерием, определяющим потери из-за

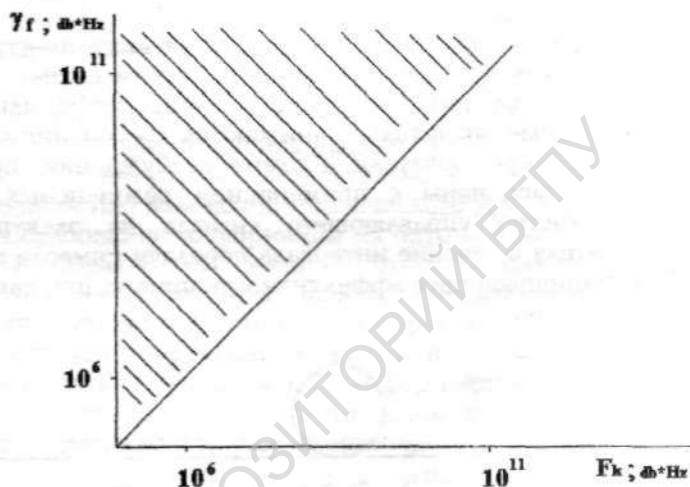


Рис.10. Диаграмма ограничений информационной ёмкости в ОДЗУ.

рассогласования мод, может служить интеграл перекрытия поперечных полей [71] в ВС $\phi_c(x,y)$ и в полосковом волноводе $\phi_B(x,y)$

$$I = \left[\iint_{-\infty}^{+\infty} (\phi_c \phi_B) dx dy \right]^2 / \left[\iint_{-\infty}^{+\infty} \phi_c^2 dx dy \iint_{-\infty}^{+\infty} \phi_B^2 dx dy \right], \quad (8)$$

Оптимальное согласование ВС и интегрального волновода обеспечивается при условии достижения максимума интегрального перекрытия

Наибольшее значение интегрального перекрытия достигается для моды полоскового волновода имеющей форму, близкую к форме моды ВС. Например, для ВС с радиусом сердцевинки $R=5$ мкм, разность показателей преломления сердцевинки и оболочки $\Delta = 0,003$ на

длине волны $\lambda = 1,5$ мкм. Этим условиям отвечает полосковый волновод с размерами $\omega_x = 5,39$ и $\omega_y = 8,35$ мкм (ω_x, ω_y — продольный и поперечный размеры волновода).

Таким образом, критерий (8) позволяет определить параметры полоскового волновода, который наилучшим образом стыкуется с конкретными ВС, а также их оптимальное взаиморасположение.

Важной проблемой совершенствования рециркуляционных систем обработки информации является повышение частоты повторения импульсов в контуре. Для ее решения в [65,67] предложено использовать оптическое демультиплексирование информационного сигнала. Его сущность можно пояснить с использованием функциональной схемы, показанной на рис.11.

В схеме для демультиплексирования используются электрооптический переключатель, управляемый гармоническим сигналом с периодом в два раза большим периода следования информационного сигнала. В этом случае значительно снижаются требования к электрическому каналу переключателя и схеме возбуждения, поскольку они могут быть выполнены с применением резонансных систем. Однако непостоянство управляющего сигнала на электрическом входе переключателя в течение интервала передачи символа переходных помех, ограничивающих эффективность приема при таком методе разделения.

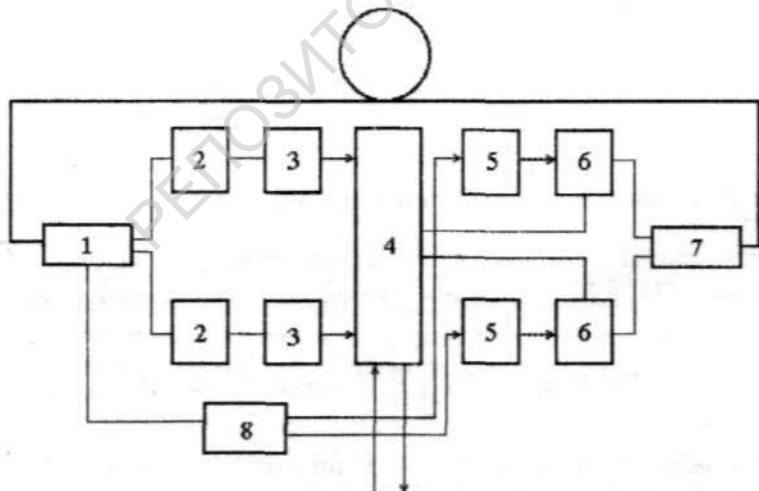


Рис.11. Схема волоконно — оптического ДЗУ

1 — электрооптический коммутатор, 2 — фотоприёмник, 3 — декодер, 4 — блок ввода — вывода информации, 5 — лазер, 6 — электрооптический модулятор, 7 — волоконный разветвитель.

По оценкам [65] при коэффициенте заполнения тактового интервала 0,8–0,9, коэффициент межсимвольных искажений составляет 4–5%.

Для хранения информации в течении времени t необходимо $K = t/t_{\text{ц}}$ циклов ($t_{\text{ц}}$ – задержка в контуре). Время хранения, при котором соответствующая вероятность ошибки P_k не превышает заданного значения:

$$P_k = 1 - (1 - P_e)^K, \quad (9)$$

В соответствии с [9] при коэффициенте заполнения тактового интервала, близком к 1 и вероятности ошибки 10^{-9} в контуре длиной 20 км схема [65] обеспечивает времена хранения информации 1 ч. ($k = 10^7$). При этом отношение сигнал/шум в оптическом канале составляют 20 дБ, а степень сохранения поляризации $\epsilon = 0,9 - 1,0$. Демультимплексирование сигнала непосредственно в оптическом канале позволяет в два раза повысить предельную частоту повторения информационных импульсов, следовательно и емкость ДЗУ.

Особенностью волоконно – оптического ДЗУ является многократное преобразование информации из оптической формы в электрическую и обратно. В связи с этим весьма актуальна задача предотвращения накопления ошибок, обусловленных ограниченной полосой пропускания электрического тракта ОДЗУ. Одним из методов уменьшения требований к полосе пропускания электрического канала является формирование информационных и проверочных символов непосредственно в оптическом канале. Наиболее просто этот метод реализуется для сверхточного кодирования. Операция свертки в оптическом канале может осуществляться двумя последовательно расположенными фазовыми модуляторами. В [65] предлагается метод формирования информационных и проверочных символов кода Финка – Хагенбергера, использующий указанный принцип модуляции для коррекции серийных ошибок в волоконно – оптическом контуре.

В подобных ОДЗУ время доступа к записанной информации равно задержке сигнала в контуре. Для уменьшения доступа целесообразно уменьшать длину контура, а для компенсации емкости ДЗУ должно содержать ряд параллельных контуров по количеству разрядов информационного потока. Например, при длине каждого контура 200 м, количестве разрядов 32 и тактовой частоте 10^{10} Гц ДЗУ [65] имеет емкость $3 \cdot 10^5$ бит, при времени доступа 1 мкс.

Для компенсации затухания в ВС могут использоваться различные усилительные элементы. Интересным решением этого вопроса является использование в рециркуляционном контуре усилителя – повторителя на эффекте вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света [72]. Для таких усилителей – повторителей характерны

передаточные характеристики $P_{\text{вых}}(P_{\text{вх}})$ нескольких типов (рис.12). В зависимости от вида характеристики $P_{\text{вых}}(P_{\text{вх}})$ реализуются различные по свойствам рециркуляционные системы. ВКР–усилитель с характеристикой типа 1 позволяет осуществить стабильную рециркуляцию импульса с мощностью $P_{\text{ст}}$ в замкнутом контуре. Если в контур попадает импульс с мощностью $P > P_{\text{ст}}$, то в процессе рециркуляции $P \rightarrow P_{\text{ст}}$. Однако и любой шумовой сигнал при рециркуляции в контуре будет стремиться к $P_{\text{ст}}$. Для контура с передаточной характеристикой, показанную на рис.12б, характерен бистабильный режим работы, лишь точки А и С являются стабильными. Импульс с мощностью, соответствующей точке В, не может циркулировать длительное время, т.к. любое случайное изменение его амплитуды приводит к убегаению от точки В в А или в точку С.

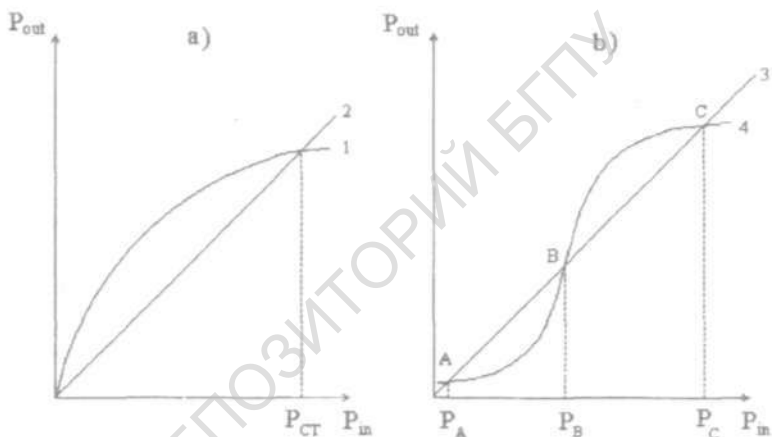


Рис.12. Режимы работы ВКР–усилителей:
 а – стабильный, б – бистабильный.

Работу ВКР–усилителя при попутном распространении световых импульсов в ВС в стабильном и бистабильном режимах анализируют с использованием соотношений [72] (рис.13):

$$P_{\text{н вых}} = \frac{P_0}{1 - \frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{с}}} \frac{P_{\text{с вых}}}{P_{\text{н вых}}} \exp\left\{\frac{g P_0}{S} L\right\}}, \quad (10)$$

$$P_{c,вых} = \frac{P_0 \frac{P_{c,вх}}{P_{н,вх}} \exp\left\{\frac{gP_0 L}{S}\right\}}{1 + \frac{V_n}{V_c} \frac{P_{c,вх}}{P_{н,вх}} \exp\left\{\frac{gP_0 L}{S}\right\}}, \quad (11)$$

$$P_0 = \frac{V_n}{V_c} P_{c,вх} + P_{н,вх}, \quad (12)$$

где $P_{н,вх}$, $P_{н,вых}$, $P_{c,вх}$, $P_{c,вых}$ — соответственно мощности световых импульсов накачки и стоксового сигнала на выходе и входе ВС V_n и V_c ; L — длина ВС; S — площадь поперечного сечения сердцевины; g — коэффициент усиления ВКР — усилителя.

Для обеспечения длительной циркуляции импульсов, т.е. когда есть усиление и частота входных и выходных информационных сигналов одинаковы, необходимо, чтобы входной и выходной сигналы имели стоксовые длины волн. Такой усилитель имеет характеристику типа 1 и обеспечивает стабильную рециркуляцию. Сложные цепи, состоящие из нескольких усилителей, позволяют получать бистабильную динамическую кольцевую структуру.

Входной сигнал стоксовой длины волны [73] подается на вход волокна 1 синхронно с накачкой. При малых уровнях мощности стоксового входного сигнала или при его отсутствии импульс накачки практически не ослабляется, поскольку мощность импульса накачки ниже пороговой мощности ВКР и вводится во второй отрезок волокна. Параметры второго отрезка ВС подбираются так, чтобы мощность вводимого в него импульса накачки оказалась больше порогового уровня ВКР. В результате на выходе второго отрезка волокна возникает мощный стоксовый импульс. При больших

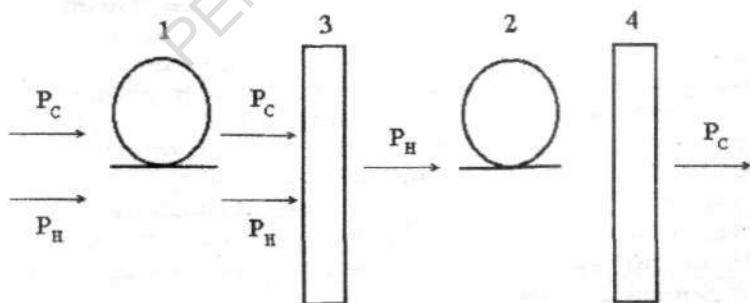


Рис.13. Схема ВКР-инвертора.

1, 2 — отрезки волокна; 3 — устройство ввода света, обеспечивающее передачу из волокна 1 в волокно 2 излучения с длиной волны накачки; 4 — устройство вывода излучения.

мощностях стокового импульса в отрезке волокна 1, возникает взаимодействие импульса накачки и стокового импульса, источающего импульс накачки до уровня ниже порогового уровня мощности ВКР во втором отрезке волокна. В этом случае мощного стокового импульса на выходе не образуется, а входной и выходной сигналы имеют одинаковые частоты, если волокна 1 и 2 имеют одинаковые сдвиги частоты при ВКР.

Соединяя последовательно два инвертора и подавая сигнал с выхода второго инвертора на вход первого можно полностью оптическими методами реализовать бистабильные кольцевые системы. На их базе возможно построение полностью оптической динамической волоконной памяти, способной запоминать информацию, поступающую со скоростями до 10^{11} бит/с и более.

Увеличение информационной емкости ОДЗУ за счет увеличения длины ВС помимо увеличения времени доступа усложняет систему синхронизации, требует определенного времени вхождения в синхронизм. Это приводит к необходимости использования методов уплотнения информации (спектральных, временных, поляризационных). Кроме этих возможностей рециркуляционные системы памяти допускают дополнительные методы уплотнения за счет организации встречно-направленной циркуляции информационной последовательности в ВС [73]. При этом не исключаются и традиционные методы уплотнения каналов.

Дополнительный канал уплотнения информации в контуре за счет встречно-направленной циркуляции можно использовать как для увеличения информационной емкости ОДЗУ, так и обеспечения синхронизации. Кроме того, встречно-направленная циркуляция позволяет вдвое снизить частоту сигналов в оптическом тракте и, следовательно, уменьшить вероятность ошибок при хранении информации.

Однако за счет рассеяния оптической мощности в ВС возникает связь между встречно-направленными модами излучения, что является дополнительным источником шумов. Как показано в [73] для одномодовых ВС эта составляющая шума незначительна. Показана также возможность использования встречно-направленной циркуляции для компенсации затухания информационных импульсов, распространяющихся в ВС и потерь ее в ответвителях. При этом установлено, что такой метод компенсации наиболее эффективен для контуров длиной 2–4 км.

Другой разновидностью рециркуляционных систем являются волоконно-оптические устройства на основе поверхностно-излучающих ИЛ. Электрооптические устройства на основе таких ИЛ могут выполнять функции излучателя, порогового устройства и триггера с защелкой [74]. Такое устройство может использоваться для высокоскоростного выполнения операций и памяти.

Функциональные схемы и временные диаграммы, поясняющие принцип действия оптической памяти на основе поверхностно-излучающих ИЛ показаны на рис.14. В такой схеме (рис.14а) оптические импульсы из порта ввода-вывода возбуждают электрооптическое устройство (ЭУ) на основе поверхностно-излучающего ИЛ. Его выходное излучение делится делителями и распространяется по ВС в противоположных направлениях. Одна половина импульсов в порте ввода-вывода становится выходными, а другая вновь поступает на ЭУ, запуская его вновь. В такой системе оптические элементы могут быть заменены оптоволоконными соединителями (рис.14б).

Особенностью ЭУ на основе поверхностно-излучающего ИЛ является то, что оно имеет теристорно-подобную структуру и соответствующую разрывную вольтамперную характеристику. Временная диаграмма на рис.14в показывает последовательность операций записи, хранения и стирания данных в рециркуляционной системе с ЭУ. Такая система на основе ЭУ с выходной мощностью $\sim 0,8$ мВт, переключаемой энергией 0,6 пДж с одномодовыми ВС длиной 20 Ом при эффективности ввода излучения в ВС $\sim 16\%$ позволила получить время хранения последовательности до 30 мин при частоте рециркуляции 12 МГц [74].

До сих пор ВС, чаще всего, рассматривались как пассивная передающая среда. Однако открытие нелинейности второго порядка вместе с развитием технологии изготовления волокон с изменяющейся по длине дисперсией позволяет обрабатывать информацию в волоконно-оптическом рециркуляционном контуре [75]. Наиболее важные применения таких волокон — это получение солитонов и генерация их последовательностей.

Метод генерации высокочастотной последовательности солитонов основывается на распространении двухчастотного сигнала через ВС с медленно уменьшающейся дисперсией. В течение распространения сигнала генерируются новые спектральные компоненты и общие фазы компонент самоустанавливаются так, что формируется предельно чистая последовательность солитонов. Эксперимент, у которого дисперсия на протяжении 1 км изменяется от 10 пс/нм·км до 15 пс/нм·км позволил получить последовательности солитонов с частотой до 80 ГГц [75].

В [75] для хранения двоичной информации в волоконно-оптической петле предложено использовать солитоны, распространяющиеся по центру ВС (quiding-center soliton). В одномодовых волокнах такой тип солитонов имеет место, когда

$$\Gamma = \frac{2\pi j \tau^2}{\lambda^2 D} \geq 1, \quad (13)$$

где j — потери, τ — ширина импульса, D — параметр дисперсии.

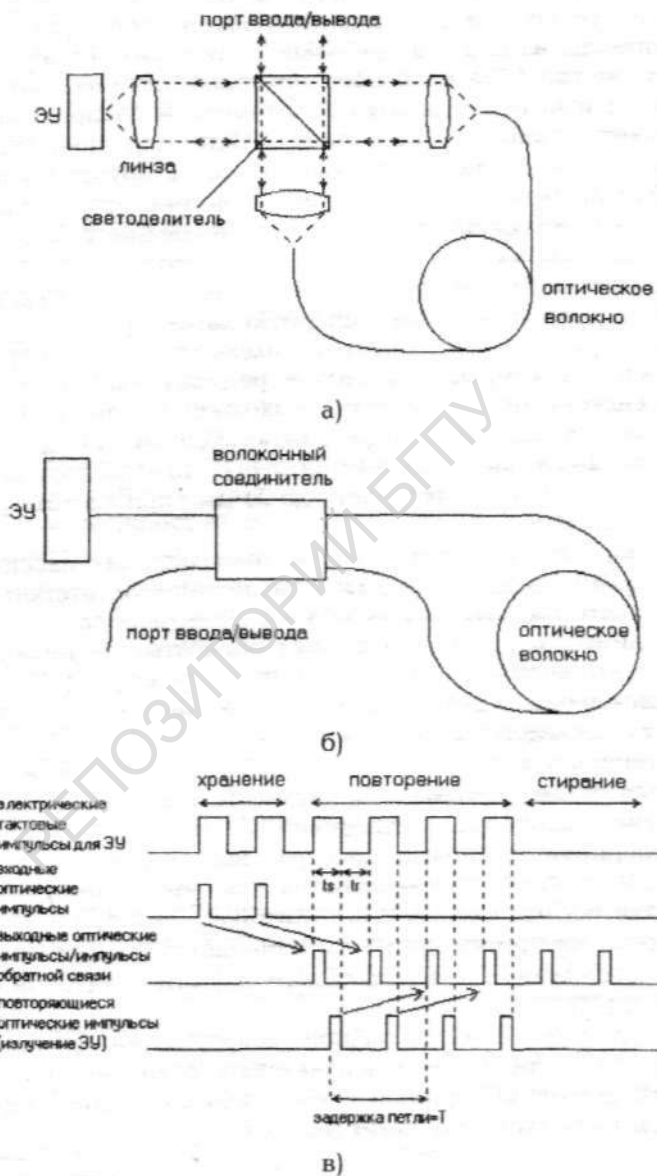


Рис.14.Функциональные схемы (а,б) и временные диаграммы (в) быстродействующей оптической памяти на поверхностно – излучающих ИЛ с вертикальной структурой.

Информационная емкость солитонной системы хранения N определяется соотношением

$$N = n_0 L (cQ\tau)^{-1}, \quad (14)$$

где n_0 — коэффициент преломления, Q — время переключения. В соответствии с (13) для каждой τ существует оптимальная длина L и, соответственно N_c .

Экспериментальное ДЗУ [76] состояло из полупроводникового генератора и кремниевого одномодового оптического ВС с малыми потерями. Получены частоты повторения импульсов до 2,6 ГГц. Для $\tau = 4,4$ пс пиковая мощность составила 100 мВт. В волоконной петле были сформированы и хранимы 32 битовые слова.

Таким образом из проведенного анализа можно видеть, что основными тенденциями в развитии элементной базы быстродействующих ОП является использование дополнительных возможностей оптических элементов по сравнению с электрическими. Основные усилия исследователей направлены на разработку новых методов представления информации, используя спектральные, поляризационные и временные свойства оптических элементов. При создании ОП на первый план в таких системах выходят такие характеристики как высокая степень параллелизма, быстродействие и возможность сочетания функций хранения и обработки информации. Требуют дальнейших исследований вопросы увеличения времени хранения и объема хранимой информации.

Литература

1. Дураев В.П., Елисеев П.Г., Максудов Б.И. и др. Низкопороговые инжекционные лазеры на основе InGaAsP/InP // Квантовая электроника. — 1980. — Т.7, N9. — С.1990—1992.
2. Rao M.K., Goh S.C. A Low-cost near-IR laser radar // IEEE Photon. Technol. Lett. — 1990. — V.2, N9. — P.683—685.
3. Суэмацу Я., Такаока С., Кисино К. и др. Основы оптоэлектроники: пер. с яп. — М.: Мир. — 1988. — 288с.
4. West L.C. Computer. — 1987. — V12. — P34.
5. Kiamilev F.K., Esener S.C., Paturi R. et al. // Opt. Eng. 1989. — V.28. — P396.
6. Торчигин В.П. Поляризационный аналог интерферометра Маха Цандера в качестве полностью оптического вентиля // Квант. электрон. — 1992. — Т.19, N4. — С.363.

7. Whitaker N.A., Avramopolilos H., French P.M. et al. All optical arbitrary demultiplexing at 2.5 Gbit/s with tolerance to timing jitter // Opt. Lett. — 1991.v.16, №23. — pp.1838 — 1840.
8. Федоров В.Б. Оптические логические элементы для высокопроизводительных оптических процессоров // Квант.электрон. — 1990, — V.17, N12. — С.1539 — 1549.
9. Гиббс К. Оптическая бистабильность: управление светом с помощью света. — М.:Мир. — 1988.
10. Gibbs H.M., Khitrava G., Reughambarian N. Nonlinear photonics. — Springer. — 1990.
11. Торчигин В.П., Кострюнов В.А., Романова О.Б., Споряшев Е.В. Логические элементы для компьютеров, управление оптическими сигналами. // Квант.электрон. — 1991. — Т.18, N11. — С.1374 — 1378.
12. Lattens F., Haus H., Krupke W.F., Weber M.J. // IEEE S. — 1983. — QE — 19. — P.1718.
13. Майер А.А. // Квантовая электроника. — 1982. — Т9. — С.2296.
14. Торчигин В.П. В сб: Вычислительные машины с нетрадиционной архитектурой. — М.: Наука. — 1990. — С.43 — 85.
15. Торчигин В.П. Оптические величины на основе поляризационных эффектов // Квант.электрон. — 1992. — Т.19, N4. — С.360 — 389.
16. Lattens F., Haus H. // IEEE — 1983. — J.QE — 19. — P.1718.
17. Кузин Е.А., Петров М.П. // Автометрия. — 1986. — N2. — С.87.
18. Friberg S.R., Silberberg Y., Oliver V.K. // Appl. Phys. Lett. — 1987. — V.51. — P.1137.
19. Sabin J.P., Finlason N., Stegman G.I. // Appl. Phys. Lett. — 1989. — P.1176.
20. Jinna M., Matasumota T. / Intern. Top. Meet. on photonic Switching Techn. Dig. — 1990. — P.95 — 97.
21. Kubodera K. / Inter. Top. Meet. on Photonic Switching Techn. Dig. — 1990. — P.238 — 239.
22. Косцов Э.Г., Мишин А.И. // Микроэлектроника. — 1977. — Т.6, N2. — С.139 — 151.
23. Егоров В.М., Косцов Э.Г. // Автометрия. — 1986. — N1. — С.114 — 126.
24. Егоров В.М., Косцов Э.Г. // Автометрия. — 1989. — N3. — С.61 — 68.
25. Egorov V.M., Kostsov E.G. // Appl. Opt. — 1990. — V29(8). — P.1178 — 1185.
26. Косцов Э.Г. Оптические квантователи и цифровые вычислительные устройства на их основе // Весці АН БССР, сер.физ.—мат. н. — 1990. — N6. — С.85 — 87.
27. Hopfield I.S. — Proc. Natl. Acad. Sce USA. — 1982. — V.79.
28. Chen H. H.et.al. — In J. Denker (Ed), AIP Conference Proceedings (p.86) — New York: American Institute of Physics. — 1986.
29. Athale R., Sru H., Friedlauder C. // Opt. Lett. — 1986. — V.11, N 7.

30. Lalanne Ph., Tabary J., Chaver P // *Opt.Communic.* – 1987. – V.63 N1.
31. Jang J.S., Shin S.Y., Lee S.Y. // *Opt. Lett.* – 1988. – V.13, N8.
32. Psaltis D., Farhat N. // *Opt.Lett.* – 1985. – V.10, N2.
33. Jang J.S., Jung S.W., Lee S.Y., Slin S.Y. // *Opt.Lett.* – 1988. – V.13, N3.
34. Gindi G.R., Gmitro A.F., Parthasarathy K. // *Appl.Opt.* – 1988. – V.27, N1.
35. Telfer B., Casasent P. // *Appl. Opt.* – 1989. – V.28, N13.
36. White H., Aldrige N. // *Opt.Eng.* – 1988. – V.24, N1.
37. Farhat N. / *International Optical Computing Conference.SPIE.* – 1986 – V.7010 CC – P.283 – 288.
38. Lalanne Ph., Chavel P., Tabary S. // *Appl. Opt.* – 1980. – V.28, N2.
39. Киселев Б.С., Кулаков Н.Д., Микаэлян А.П., Шкитин В.А. Опти- ческая ассоциативная память высокого порядка на основе нейронных сетей // *Радиотехника.* – 1990. – N10. – С.54 – 62.
40. Морозов В.Н. Оптоэлектронные матричные процессоры. – М.: Радио и связь. – 1986. – 216с.
41. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки ин- формации. – Л.:Высшая школа. – 1988. – 237с.
42. Твердохлеб П.Е., Михляев С.В.и др.Опыт параллельного вычисления логических функций неравнозначности оптико электрон- ным способом. // *Автометрия.* – 1989. – N5. – С.120 – 125.
43. Маньшин Э.А., Сурина Н.И. Нейронные сети и их оптические реализации. – М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ. – 1988. – 88с.
44. Одинокоев С.Б., Одинцов С.Л., Невежин А.Ю. Оптический процессор для обработки потока оптических символов на основе по- ляризационного модулятора света. // *Вести МГТУ. Сер.прибо- ростр.* – 1992. – N2. – С.23 – 35, 127.
45. Kostsov E.G. etal., Features of the Physical Realization of an Optical RAM. // *Avtometriia.* – 1976. – N4 – P.3 – 7.
46. Kostsov E.G., Malinovcky V.R., Nesterichin Y.E. and et.al. Sane Peculiarities of Realization of Operation
Optical Memory an Optical information Processing (publisher, Washington. D.C, 1975).
47. Kostsov E.G., Michin A.I. Photoelectrooptical Logis Elements. // *Autometria.* – 1976. – N1. – P.28 – 34.
48. Egorov V.M., Kostsov E.G. Features of Communication Arrangement an Optical Digital Computers Based on the light Beam Modulation. // *Autometria.* – 1981 – N5. – P.111 – 113.
49. Kostsov E.G., Mishin A.I. Features of the Construction of Optical Computers, // *Mikroelektronika G.* – 1977. – P.139 – 151.
50. Caulfield H.J., Kinser J., Rogers S // *Proc. IEEE* – 1989. – V.77, N10. – P.1573.
51. Song A., Harri S., Chondehary A. // *Opt.Commun.* – 1992. – V.91, N3 – 4. – P.304.

52. Egorov V.M., Kostsov E.G. The Prospects for Constructing High – Performance Optical Digital Computers. // *Autometria*. – 1985. – N1. – P.114 – 126.
53. Бережной А.А., Ветров А.А., Волконский В.Б. Оптические процессоры для обработки больших массивов локационных сигналов // *Оптич.журн.* – 1993. – N16. – С.44 – 54.
54. Гринев А.Д., Воронин Е.Н., Темченко В.С. Оптико – электронные процессоры обработки пространственно – временных сигналов // *Изв.ВУЗов. Радиоэлектроника.* – 1990. – Т.33, N8. – С.5 – 14.
55. *Advances in Optical information Processing // Proc.Soc. Photo – Opt.Instrum. Eng. (SPIE).* – 1983. – V.388. – P.3 – 227.
56. Бондаренко В.С., Зоренко В.П., Чкалова В.В. Акустооптические модуляторы света. – М.:Радио и связь. – 1988. – 136с.
57. Гусев О.Б., Кулаков С.В., Радживин Б.П. и др. Оптическая обработка радиосигналов в реальном масштабе времени. – М.:Радио и связь. – 182с.
58. Егоров Ю.В. Акустооптические процессоры // *Изв. ВУЗов Радиоэлектроника.* – 1986. – N7. – С.3 – 10.
59. Акустооптические устройства радиозлектронных систем. / Под ред. С.В.Кулакова – Л.:Наука. – 1988. – 156с.
60. Блок А.С., Яковлев В.И. Дискретные оптические масочные Фурье – процессоры // *Автоматрия*. – 1989. – N4. – С.65 – 72.
61. Casasent P., Psaltic D. Classification for optical signal processing architectures // *SPIE, Acousto – Optic Bulk Wave Devic.* – 1979. – V.214. – P.32.
62. Bromley K., Monahan M.A., Saxe G. Linear transformation performed by an electro – optical processor // *SPIE Trans format. Opt. Signal Proces.* – 1981. – V.373. – P.95.
63. Lentine A.L., Hinton H.S., Miller D.A. ed. // *IEEE S.* – 1989. – QE – 25. – P.1928.
64. Dagenats M., Sharlin W.F. // *Proc.SPIE.* – 1986. – V.94. – P.625.
65. Пилипович В.А., Есман А.К., Визнер А.А. Волоконно – оптическая память циркуляционного типа // *Весці АН БССР. Сер.фіз. – мат. н.* – 1990. – N6. – С.75 – 79.
66. Tur M. // *IEEE Trans. НТТ.* – 1985. – N3. – P.201.
67. Пилипович В.А., Есман А.К., Витер А.А. // *Докл. АН БССР.* – 1990. – Т.34, N4. – С.317 – 320.
68. Беловолов М.И., Головина Т.Н., Головин Н.Н. и др. // *Квантовая электроника.* – 1985. – Т.12, N1. – С.214.
69. Беловолов Н.И., Дианов Е.М., Карпов В.И. // *Тр. ИОФАН.* – 1986. – Т.5. – С.114.
70. Гулляев Ю.В., Дементяненко В.В., Львов М.В. и др. // *Письма в ЖТФ.* – 1986. – Т.12, N6. – С.350.
71. Ramer O.G. // *J.Opt.Commun.* – 1981. – V.2, N4. – P.122 – 127.