

УДК 681.325.65 : 535.232.65

В. И. Козик, П. Е. Твердохлеб  
(Новосибирск)

### 3-D ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТИ

Предложен способ построения оптического ассоциативного ЗУ (ОАЗУ) в виде интегральной микросхемы с использованием электрооптических тонкопленочных модуляторов и интегрально-оптических расщепителей и интеграторов световых пучков. Даны оценки основных параметров микросхемы. Показано, что ОАЗУ может быть изготовлено в виде многослойной тонкопленочной структуры с оптическими межсоединениями. Изложенный подход пригоден при построении других оптических вычислительных структур.

**Введение.** Благодаря прогрессу в развитии оптических технологий, совместимых с микроэлектронными технологиями, достижениям в области элементной базы фотоники (полупроводниковые лазеры, оптические волноводы, голографические решетки, модуляторы света, фотодетекторы и т. п.) появились уникальные возможности для создания специальных оптико-электронных устройств обработки информации в виде трехмерных (3-D) интегральных микросхем. Микросхема в этом случае может содержать источники излучения, элементы памяти, модуляторы света, фотодетекторы и другие элементы, объединенные 3-D коммуникационной сетью оптических межсоединений.

Достоинство таких межсоединений состоит в том, что пересекающиеся световые потоки не взаимодействуют друг с другом, а при их расщеплении или ветвлении не вносятся дополнительные задержки в распространение сигналов. Упрощается передача сигналов в произвольную точку интегральной схемы: или через свободное пространство, или через волноводы. Кроме того, оптические разъемы обеспечивают значительно более высокую плотность размещения контактных площадок [1].

В настоящей статье изложена концепция построения одной из таких систем: оптического ассоциативного ЗУ (ОАЗУ) в виде микросхемы с использованием электрооптических модуляторов, интегрально-оптических расщепителей и интеграторов световых пучков. Даны оценки ожидаемых параметров такой микросхемы. Сформулированы требования к интегральной элементной базе, отмечены имеющиеся экспериментальные результаты.

Нам представляется, что такой подход может быть использован при создании и других однородных вычислительных структур: параллельных коммутаторов данных, интегральных схем с нейроподобной структурой, клеточных автоматов и т.п.

**Принцип работы оптического АЗУ.** Если представить входное слово  $x^k$  и выходное  $y^k$  в виде векторов ( $x^k = [x_1^k, \dots, x_N^k]$ ,  $y^k = [y_1^k, \dots, y_M^k]$ ) размером  $N$  и  $M$  соответственно, то операцию линейного ассоциативного поиска можно описать следующим образом [2]:

$$(y^k)^T = W(x^k)^T,$$

где  $W$  — матрица ассоциативной памяти (ассоциативная матрица) размером  $N \times M$ ;  $T$  — символ транспонирования.

Схема оптического вектор-матричного умножителя показана на рис. 1, где 1 — линейка из  $N$  источников света, с помощью которых вводятся значения вектора  $x^k$ ; 2 — пространственно-временной модулятор света (ПВМС) для хранения матрицы  $W$ ; 3 — линейка фотодетекторов, обеспечивающая считывание значений вектора  $y^k$ .

Излучение каждого из источников света 1 проецируется на соответствующий столбец ПВМС 2. Световое распределение после ПВМС 2 интегрируется по другой координате, в результате чего суммарное световое распределение по каждой строке собирается на соответствующем элементе линейки фотодетекторов 3.

Для того чтобы значение полученного сигнала в плоскости  $j$ -го элемента линсйки фотодетекторов соответствовало расстоянию Хемминга между входным вектором и  $j$ -й строкой матрицы, интенсивность света после каждой  $i, j$ -й ячейки ПВМС 2, содержащей один элемент ассоциативной матрицы, должна отражать результат вычисления функции неравнозначности соответствующего элемента матрицы и разряда входного слова:  $y_{ij}^k = w_{ij} \bar{x}_i^k + \bar{w}_{ij} x_i^k$ , где символ « $\bar{\phantom{x}}$ » означает инверсию. Для этого данные во входном векторе и ассоциативной матрице представляются во взаимно-инверсных парафазных кодах. Тогда на  $j$ -м элементе линейки фотодетекторов получаем сигнал, пропорциональный

$$y_j^k = \sum_i y_{ij}^k = \sum_i (w_{ij} \bar{x}_i^k + \bar{w}_{ij} x_i^k).$$

Значение  $y_j^k$  пропорционально расстоянию Хемминга между вектором  $x^k$  и  $j$ -й строкой матрицы  $W$ , а в случае, если вектор  $x^k$  совпал с соответствующей  $j$ -й строкой матрицы  $W$ ,  $y_j^k = 0$ .

Повысить точность при интегрировании сигналов после ПВМС 2 можно за счет дифференциального приема сигналов линейкой фотодетекторов 3 [3]. Это реализуется, например, путем введения в каждую ячейку ПВМС 2 дополнительных опорных модуляторов (светоклапанных элементов) [4]. Пропускание этих модуляторов подбирается таким образом, чтобы выходной сигнал, полученный в результате интегрирования по строке с опорными модуляторами, имел среднее значение между сигналами, соответствующими нулевому и единичному расстояниям по Хеммингу. Требуемая подставка может быть обеспечена путем настройки усилителя дифференциальных фото-

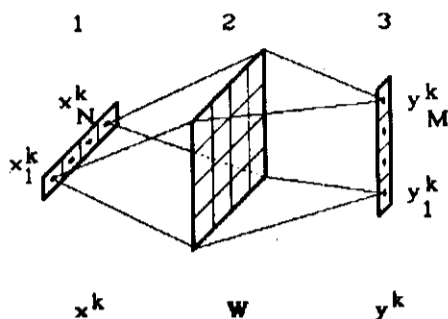


Рис. 1

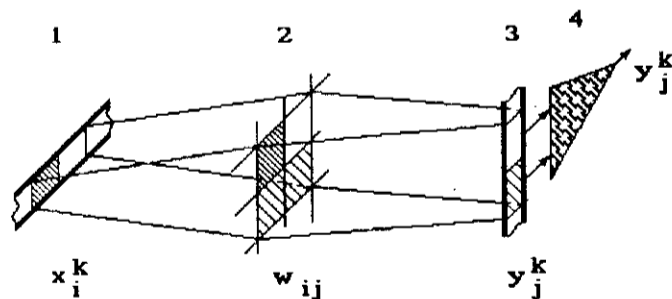


Рис. 2

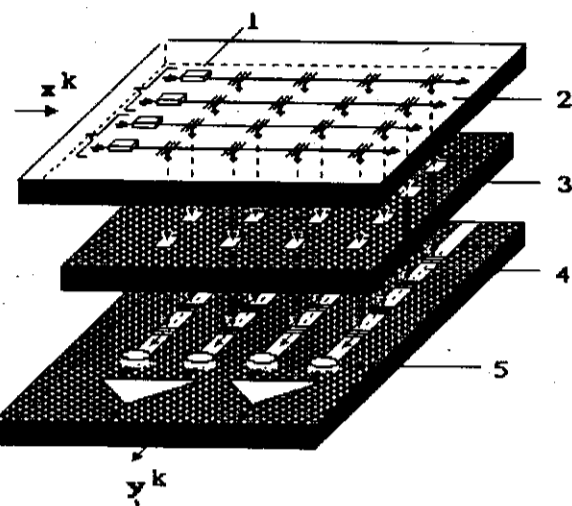


Рис. 3

приемников, тогда дополнительные модуляторы ПВМС 2 должны иметь полностью нулевые значения.

В этом случае ячейка ПВМС 2 будет состоять из четырех светоклапанных элементов, как показано на рис. 2. Здесь 1 — элемент линейки источников света для ввода разряда  $x^k$  в парафазном коде, 2 — ячейка ПВМС, 3 — элемент дифференциальной линейки фотодетекторов, 4 — дифференциальный усилитель. Два верхних элемента ПВМС отведены для регистрации элемента ассоциативной матрицы в парафазном коде, а два нижних — для формирования опорных сигналов. Интегрирование производится вдоль строк транспаранта, а считывание осуществляется дифференциальными фотоприемниками.

Таким образом, рассмотренная система обеспечивает проведение ассоциативного поиска путем умножения входного вектора  $x^k$  на ассоциативную матрицу  $W$ . Рассмотрим теперь возможности ее создания в виде оптической микросхемы.

Построение ОАЗУ в виде микросхемы. Структура микросхемы ОАЗУ показана на рис. 3, где 1 — линейка излучателей (лазерных диодов — ЛД), 2 — интегрально-оптические расщепители света, 3 — тонкопленочный ПВМС с памятью, 4 — интегрально-оптические интеграторы света, 5 — линейка дифференциальных фотоприемников (ФП). Линейки лазеров ЛД 1 и фотоприемников ФП 5 размещаются вне микросхемы. На самой микросхеме могут быть помещены приемно-передающие элементы для восстановления уровня сигнала на ее входе и/или выходе.

Для разводки световых пучков внутри микросхемы могут быть использованы расщепители и интеграторы на основе планарных световодов с полным внутренним отражением [5] или волноводных голограмм [6]. Поскольку ПВМС имеет конечную толщину, то будет происходить дифракционное уширение световых пучков между плоскостями расщепителей и интеграторов. Для компенсации такого уширения можно использовать голографические фокусирующие решетки, совмещенные с дифракционными решетками расщепителя [7, 8].

В качестве интеграторов могут быть использованы волноводы с объемными голограммами для ввода излучения в волновод с последующим объединением отдельных волноводов в общую шину, как показано на рис. 4, где 1 — объемные волноводные голограммы; 2 — отдельные волноводы; 3 — общая шина.

Ход лучей в микросхеме ОАЗУ показан на рис. 5. Здесь 1 — расщепители пучков света, 2 — модулятор, 3 — интеграторы световых пучков. В качестве расщепителей пучков на рисунке изображены планарные световоды с полным внутренним отражением с фокусирующими дифракционными решетками. Ис-

пользование принципа наложенных голограмм [5] за счет увеличения эффективной входной апертуры позволяет в еще большей степени сфокусировать световые пучки в плоскости ячеек модулятора 2. Следует заметить, что этот принцип может быть использован и в случае волноводных голограмм.

Одним из основных элементов микросхемы является ПВМС. Его ячейки должны обеспечивать запись, хранение и считывание информации в парафазном коде. При создании ПВМС необходимо обеспечить технологическую совместимость изготовления светомодулирующего слоя и микроэлектронных компонент, управляющих его ячейками. Кроме того, управляющее напряжение должно быть соизмеримо с напряжениями, характерными для микроэлектронных интегральных схем, т. е. не более  $10 \div 20$  В. Этим требованиям удовлетворяют, например, модуляторы на основе многослойных структур с квантовыми ямами [9], электрооптические тонкопленочные модуляторы на основе эффекта Поккельса (например, на ниобате бария-стронция) [10], жидкокристаллические модуляторы [11].

Первые два типа модуляторов обладают потенциально значительно более высоким быстродействием: время переключения может составлять  $\sim 1$  нс и менее. Однако модуляторы на жидких кристаллах имеют более высокий контраст (более 0,99 в матричном исполнении) и обеспечивают поворот плоскости поляризации на  $90^\circ$ . Последнее обстоятельство важно тем, что позволяет применять поляризационное кодирование данных и тем самым сокращать вдвое требуемое количество ячеек ПВМС. Высокую тактовую частоту работы ОАЗУ можно согласовать с низкой частотой переключения элементов ПВМС за счет использования быстрой буферной электронной памяти небольшой емкости в случае так называемого прямого представления слов в ассоциативной матрице [12, 13], т. е. когда слова регистрируются в памяти непосредственно в качестве строк матрицы.

Модуляторы на основе многослойных структур с квантовыми ямами характеризуются меньшей энергией переключения и более высокой эффективностью использования света, чем модуляторы на ниобате бария-стронция, однако более критичны к рабочему диапазону длин волн считываемого света и к изменению температуры модулятора. Окончательный выбор типа модулятора света определяется требованиями, предъявляемыми к АЗУ.

Оценка параметров оптической микросхемы и требования к ее элементам. Для оценки параметров микросхемы обратимся к схеме, изображенной на рис. 5. Минимальный размер пятна в плоскости ячеек ПВМС по координате  $Y$  можно оценить, исходя из дифракционных ограничений:  $l_y \sim 2\lambda/d_y$ , где  $\lambda$  —

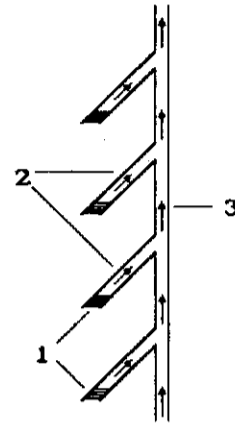


Рис. 4

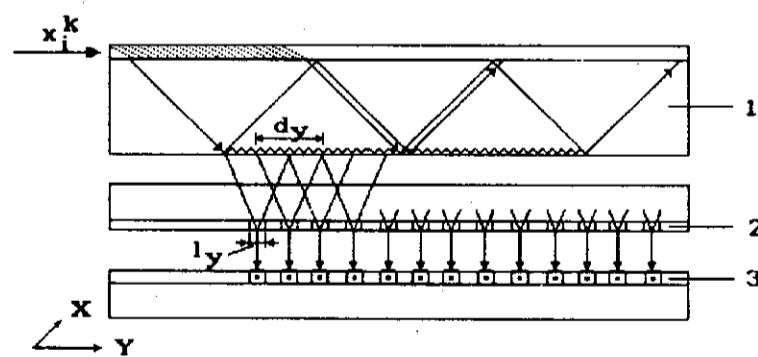


Рис. 5

длина волны излучения,  $f$  — толщина подложки,  $d_y$  — размер голограммы по оси  $Y$ , формирующей отдельный пучок. Пусть  $\lambda = 0,85$ ,  $f = 100$ ,  $d_y = 50$  мкм. Тогда получим, что  $l_y \sim 4$  мкм.

Для оценки размеров модуляторов по  $X$ -координате положим, что скважность размещения голограмм в 2 раза меньше скважности размещения светоклапанных элементов. Их соотношение можно оптимизировать, но для этого нужно дополнительно исследовать форму распространяющихся по световоду пучков. Тогда  $d_x = 2l_x$ , где  $l_x$  и  $d_x$  — размеры модуляторов и голограмм по оси  $X$ . Отсюда  $l_x \sim 9$  мкм. Учитывая, что приведенные оценки дают минимальные значения параметров  $l_x$  и  $d_x$ , а также принимая во внимание, что толщина электрооптических слоев [9—11] составляет величину порядка нескольких микрон, целесообразно принять минимальный размер светоклапанного элемента ПВМС равным  $\sim 5 \times 10$  мкм.

Таким образом, при скважности размещения ячеек  $\sim 2,5$ , с учетом парафазного кодирования данных и дифференциального приема, общий размер схемы емкостью  $10^6$  бит составит  $\sim 10$  см<sup>2</sup> или при компоновке данных в виде квадратной матрицы —  $\sim 3,5 \times 3,5$  см. В этом случае максимальная длина оптического пути составит  $\sim 7$  см, а время распространения света (с учетом показателя преломления подложки) — порядка 0,5 нс.

Мощность, рассеиваемую при поиске, можно оценить по формуле

$$P = 4NMQ/\tau\eta,$$

где  $N \times M$  — размер ассоциативной матрицы,  $Q$  — энергия срабатывания фотоприемного элемента,  $\tau$  — время обработки одного входного слова,  $\eta$  — коэффициент потерь света в микросхеме. Положим  $N \times M = 10^6$ ,  $Q = 10^{-14}$  Дж,  $\tau = 1$  нс. При отсутствии затухания в расщепителе и интеграторе световых пучков можно положить  $\eta \sim 10^{-1}$  (с учетом того, что лазерные диоды вынесены за пределы микросхемы, эффективность ввода излучения в интегральные волноводы может достигать 90 %, пропускание ячеек модулятора  $\sim 50$  %, дифракционная эффективность голограмм расщепителя  $\sim 30$  %). Тогда получим  $P \sim 100$  Вт, что соответствует предельной допустимой рассеиваемой мощности при площади  $\sim 10$  см<sup>2</sup>, т. е. для данных параметров системы тактовая частота  $\sim 1$  ГГц является близкой к предельной.

Если входной вектор  $x^k$  задается полностью, то с целью снижения потребляемой мощности модуль памяти целесообразно разбить на более мелкие фрагменты («кристаллы»), а для выбора фрагмента, по которому ведется поиск, использовать хеширование. При компоновке модуля памяти из  $10 \times 10$  «кристаллов» емкость каждого из них составит  $\sim 10^4$  бит, размеры «кристалла» —  $\sim 3 \times 3$  мм, а потребляемая мощность может быть снижена почти на два порядка. В этом случае потери в волноводном расщепителе будут пренебрежимо малы, а в расщепителе на плоскопараллельной пластине составят  $\sim 2 \div 10$  раз. Общая рассеиваемая мощность будет порядка  $2 \div 10$  Вт на модуль, т. е. примерно на порядок меньше предельно допустимой.

Оценим вероятность появления ошибок при поиске на полное совпадение. Для этого рассмотрим выходные сигналы, соответствующие случаям полного совпадения двух слов и их несовпадения в одном разряде на примере сравнения 36-разрядных слов.

В случае полного совпадения слов среднее значение выходного сигнала будет  $\hat{S}_0 = n\hat{I}_0$  (где  $\hat{I}_0$  — среднее значение темнового сигнала  $I_0$ , соответствующего уровню одного разряда;  $n$  — количество сравниваемых разрядов) и его дисперсия  $D_0 = nd_0$ , где  $d_0$  — дисперсия сигнала  $I_0$ . При несовпадении в один

бит средний сигнал будет  $\hat{S}_1 = (n-1)\hat{I}_0 + \hat{I}_1$ , а дисперсия  $D_1 = (n-1) \times d_0 + d_1$ , где  $\hat{I}_1$  и  $d_1$  — величины среднего сигнала и дисперсии для одного включенного (прозрачного) светоклапанного элемента ПВМС при наличии входного сигнала.

Для определенности будем считать, что коэффициенты вариации  $\sigma = \sqrt{D}/S$  сигналов  $I_0$  и  $I_1$  одинаковы. Тогда для коэффициентов вариации сигналов  $S_0$  и  $S_1$  получаем

$$\sigma_0 = \sigma/\sqrt{n}, \quad \sigma_1 = \sigma\sqrt{(n-1)I_0^2 + I_1^2}/((n-1)I_0 + I_1).$$

Для модулятора с глубиной модуляции 90 % положим  $\hat{I}_0 = 1$ ,  $\hat{I}_1 = 10$ . Тогда для  $n = 36$   $\sigma_0 \sim 0,17\sigma$ ,  $\sigma_1 \sim 0,26\sigma$ . Оценим вероятность ошибки при  $\sigma = 0,1$ . Значение величины оптимального порога  $\gamma = \hat{S}_1(\sigma_1 + \sigma_0)/(\sigma_0 + S\sigma_1)$  [14], где  $S = \hat{S}_1/\hat{S}_0$ , составляет  $\gamma \sim 39$ . Для вероятности ложного совпадения  $E_{0,1} = (1 - \Phi(z_{0,1}))/2$  ( $\Phi(z)$  — интеграл ошибок, а  $z_{0,1}$  определяется следующим образом:  $z_1 = (1 - \gamma/\hat{S}_1)/\sigma_1$ ,  $z_0 = (\gamma S/\hat{S}_1 - 1)/\sigma_0$ ) получаем  $E_0 \sim E_1 \sim 2 \cdot 10^{-7}$ , где  $E_0$  и  $E_1$  — соответственно вероятности ошибочного обнаружения полного совпадения векторов и их несовпадения в одном разряде. Путем уменьшения  $\sigma$  в 1,5 раза можно получить вероятность ошибки  $E \sim 10^{-12}$ .

Видно, что даже значение  $\sigma = 0,1$  для сигнала в отдельном канале (связывающем одиночный источник света с одним фотоприемником) является недостаточным для обеспечения вероятности ошибки менее  $10^{-10}$ .

При использовании обычной (без дифференциального приёма) линейки фотоприемников в дисперсию сигнала отдельного канала входит разброс интенсивности лазерного излучения, параметров расщепителей, интеграторов и модуляторов по всему полю, а также разброс чувствительностей фотоэлементов по линейке. Дифференциальный приём позволяет исключить влияние разброса параметров по всему модулю. В этом случае в дисперсию нулевого сигнала входит только разброс параметров пар соседних элементов — дифракционных решеток расщепителей и интеграторов, ячеек модулятора и фотоприемников, обеспечивающих дифференциальный приём. Разброс мощностей лазерного излучения вносит вклад в дисперсию только единичного сигнала.

Отсюда следуют требования к элементам микросхемы. При контрасте ПВМС 10 : 1 для обеспечения вероятности ошибки  $E \sim 10^{-12}$  суммарный коэффициент вариации сигналов (куда входит разброс интенсивности излучения лазерного диода, чувствительности элементов фотоприемников, пропускания ячеек модулятора, а также рассеяния и поглощения излучения в расщепителях и интеграторах пучков света) не должен превышать  $\sigma \sim 0,07$ . В случае дифференциального приёма учитывается только разброс параметров элементов, управляющих двумя соседними световыми пучками. Тот факт, что влияние на достоверность оказывают только флуктуации параметров соседних элементов, позволяет значительно упростить задачу повышения достоверности поиска.

Использование модуляторов с отношением  $I_1/I_0 \sim 100$  может обеспечить вероятность ошибки  $\sim 10^{-12}$  при значении  $\sigma \sim 0,13$ , что позволило бы получить достаточно высокую надежность обработки с недифференциальными приемниками, однако на настоящий момент нет в достаточной степени разработанных быстродействующих тонкопленочных модуляторов, обладающих высоким контрастом и технологически совместимых с микроэлектронными компонентами.

Излучатели и приемники света должны обеспечивать работу с частотой  $\sim 1$  ГГц.

Необходимое быстродействие модуляторов составляет величину  $\sim 1$  нс, однако в случае так называемого прямого представления слов в ассоциативной матрице это требование может быть значительно снижено.

Требования к энергии переключения модуляторов определяются в основном частотой обновления данных в ассоциативной матрице.

Предельные размеры элементов оптической микросхемы могут составлять величины порядка единиц микрон. Характерным размером можно считать  $\sim 10$  мкм.

Тактовая частота при поиске по модулю емкостью  $10^6$  бит ограничивается величиной  $\sim 1$  ГГц. Однако разбиение модуля на отдельные «кристаллы» и использование хеширования для выбора «кристалла», по которому ведется поиск, позволяют значительно понизить общую потребляемую мощность и размеры отдельного кристалла и, как следствие, повысить тактовую частоту работы микросхемы.

Дифференциальный фотоприем значительно снижает требования к качеству изготовления элементов микросхемы. На дисперсию выходного сигнала в этом случае оказывает влияние только разброс параметров между ближайшими элементами микросхемы.

Принцип построения ОАЗУ в виде многослойной микросхемы. Для записи (обновления) информации в ОАЗУ максимальное быстродействие может быть получено при использовании оптических связей. Пример такой структуры изображен на рис. 6 (размещение элементов на рисунке показано условно). Здесь 1 — линейка лазерных диодов для ввода входного слова при поиске (ЛП), 2 — лазерные диоды для ввода слова при его записи (ЛЗ), 3 — лазерные диоды для выбора адреса при записи слова (ЛА), 4 — линейка фотоприемников, М — светоклапанные элементы ПВМС, Ф — фотоприемные элементы. Для простоты структура показана без учета парафазного представления данных. Возможная структура ячейки модулятора для этого случая на примере использования светомодулирующих слоев на основе ниобата бария приведена в [4].

Для записи слова в ОАЗУ оно подается на ЛЗ 2, а на ЛА 3 включается лазер, указывающий строку, в которую можно записать информацию. Энергия, требуемая для переключения ячеек модулятора, поступает от ЛА, а ЛЗ обеспечивает управление переключением. При мощности лазеров ЛА  $\sim 10^{-2}$  Вт и времени переключения  $\sim 10^{-8}$  с это может быть обеспечено для модуляторов с энергией переключения  $\sim 10^{-12}$  Дж. В противном случае необходима подкачка энергии по электрическим шинам питания.

Поскольку все коммуникации могут быть подведены к торцам кристалла, существует возможность создания многослойной структуры. При толщине

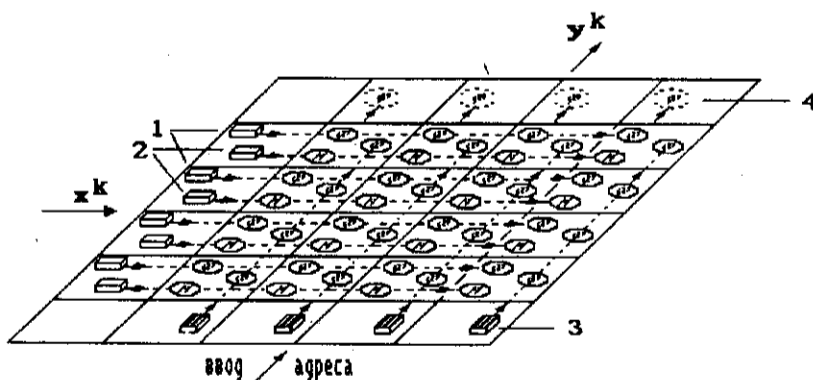


Рис. 6

слоя  $\sim 100$  мкм в модуле  $\sim 1$  см<sup>3</sup> можно разместить до 100 слоев, т. е. общая емкость ОАЗУ составит  $\sim 10^7$  бит. Использование хеширования для выбора слоя и отдельного «кристалла», в котором идет поиск, позволяет в каждый момент времени включать только один «кристалл». Тогда рассеиваемая в модуле объемом 1 см<sup>3</sup> мощность составит  $\sim 1$  Вт без учета затухания света в волноводах. Ввод/вывод информации в такие модули может осуществляться при помощи волоконных разъемов, подключаемых к торцам модулей. На плате площадью  $20 \times 20$  см можно разместить до 100 таких модулей общей емкостью  $\sim 10^9$  бит.

В настоящее время в Институте автоматики и электрометрии СО РАН ведутся работы практически по всем направлениям реализации микросхемы.

Исследуются варианты расщепителей световых пучков — на основе планарных световодов с полным внутренним отражением [5] и на основе планарного волновода. Создан макет расщепителя на 16 световых пучков с неравномерностью дифракционной эффективности менее 5% [6].

Освоена технология изготовления высокоэффективных дифракционных оптических элементов [8].

Осуществлен синтез сегнетоэлектрических пленок ниобата бария стронция. Показано, что при управляющем напряжении 15–20 В на пленках толщиной 3–5 мкм вращение плоскости поляризации света составляет  $5\text{--}6^\circ$  [10]. Предложена конструкция тонкопленочного поляризатора света, позволяющая получить поляризационное отношение  $\sim 50 : 1$ . Экспериментально получено отношение  $\sim 20 : 1$  [15].

На основе электрооптических пленок разработана структура ячейки ПВМС для случаев электрического и оптического управления записью данных [4].

Налажены связи с промышленными предприятиями по разработке и созданию отдельных оптико-электронных компонент (быстродействующих полупроводниковых лазеров и фотоприемников), а также по изготовлению фотоматричных БИС [16].

#### ВЫВОДЫ

ОАЗУ может быть изготовлено в виде микросхемы методами интегральной оптической и микроэлектронной технологий. Характерный размер одной ячейки памяти может составлять  $\sim 25 \times 25$  мкм или при использовании дифференциального фотоприема —  $25 \times 50$  мкм.

Минимальные размеры микросхемы ОАЗУ емкостью  $10^6$  бит в виде однослойной структуры составят  $\sim 10$  см<sup>2</sup>, а в виде многослойной — менее 1 см<sup>2</sup>. При этом общая мощность, рассеиваемая микросхемой на тактовых частотах  $\sim 1$  ГГц, может не превышать единиц ватт.

При контрасте светоклапанных элементов ПВМС  $\sim 10 : 1$  для обеспечения вероятности появления ошибки при сравнении на полное совпадение не более  $\sim 10^{-12}$  необходимо, чтобы суммарные среднеквадратичные отклонения оптических параметров элементов микросхемы, расположенных в одном оптическом канале, составляли величину  $\sigma \sim 0,07$ .

Использование дифференциального считывания выходного сигнала позволяет значительно снизить требования к качеству изготовления элементов микросхемы. В этом случае на вероятность появления ошибки будут оказывать влияние в основном флуктуации параметров между ее соседними элементами.



#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goodman J. W., Leonberger F. J., Kung S-Y., Athale R. A. Optical interconnections for VLSI // Proc. IEEE.—1984.—72, N 7.
2. Austin J., Stonham T. J. Distributed associative memory for use in scene analysis // Image and Vision Comput.—1987.—5, N 4.
3. Панков Б. Н., Твердохлеб П. Е. Ассоциативное однокристальное ЗУ с оптическим входом // Тез. докл. 2 Всесоюз. конф. по оптической обработке информации.—Фрунзе: ИЛИМ, 1990.
4. Панков Б. Н. Структура и схемная реализация ячейки оптического транспаранта на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Автометрия.—1993.—№ 3.
5. Базанов М. В., Пен Е. Ф., Твердохлеб П. Е. Планарные голографические расщепители для формирования объемных межсоединений // Там же.
6. Камснев Н. Н., Наливайко В. И. Дифракционные демультимплексоры для трехмерных интегрально-оптических схем // Там же.
7. Amitai Y., Erteza I. A., Goodman J. W. Recursive design of a holographic focusing grating coupler // Appl. Opt.—1991.—30, N 27.
8. Полещук А. Г. Фоторастровый метод синтеза киноформов для лазерной техники // V Всесоюз. конф. «Оптика лазеров».—Л.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1986.
9. Lentine A. L., Chirovsky L. M. F., D'Asaro L. A. et al. Energy scaling and sub-nano second switching of symmetric self electro-optic effect devices // IEEE Photon. Technol. Lett.—1989.—1, N 1.
10. Косцов Э. Г. Электрооптическая запоминающая среда на основе тонких сегнетоэлектрических пленок // Автометрия.—1993.—№ 3.
11. Johnson K. M., Handschy M. A., Pagano-Stauffer L. A. Optical computing and image processing with ferroelectric liquid crystals // Opt. Eng.—1987.—26, N 5.
12. Psaltis D., Hong J. Shift-invariant optical associative memories // Ibid.—N 1.
13. Yang G. G. Performance analysis of associative memory with translation invariance // Optik.—1991.—87, N 2.
14. Домбровский В. А., Домбровский С. А., Пен Е. Ф. Достоверность считывания информации в канале голографического ЗУ с постоянными параметрами // Автометрия.—1988.—№ 6.
15. Бельтюгов В. Н., Проценко С. Г. Тонкопленочный диэлектрический поляризатор света // Автометрия.—1993.—№ 3.
16. Панков Б. Н. Параллельная фотоматричная БИС с логической обработкой страниц данных // Там же.

*Поступила в редакцию 5 апреля 1993 г.*