

Г. Г. ВОЕВОДКИН, Е. М. ДИАНОВ, А. А. КУЗНЕЦОВ, С. М. НЕФЕДОВ
(Москва)

СИМВОЛЬНАЯ ПОДСТАНОВКА И ЭЛЕМЕНТ ФРЕДКИНА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ МДП — ЖК

В настоящее время уже известен ряд задач, требующих применения вычислительных комплексов с производительностью до 10^{12} опер./с. Хотя время переключения отдельных электронных схем составляет всего несколько десятков пикосекунд, однако количественного скачка в быстродействии ЭВМ не произошло, что в первую очередь связано с проблемой соединений на уровне как кристалла, так и субблоков. Уникальные возможности, предоставляемые оптикой, позволяющие осуществлять трехмерные связи и параллельную обработку информации, стимулировали развитие работ по созданию оптической вычислительной машины (ОВМ). Архитектура такой машины для более полного использования преимуществ оптики может существенно отличаться от архитектуры ЭВМ.

Одной из возможностей использования параллелизма в оптике является недавно предложенный [1] метод вычислений на основе символьной подстановки, который близок к способу вычислений на основе клеточной логики*. Этот метод состоит из двух основных этапов: на первом — происходит распознавание определенных картин в исходном изображении, а на втором — замена этих картин другими в соответствии с законом преобразования. Основное отличие метода от традиционной булевой алгебры, в которой происходит распознавание некоторой входной комбинации нулей и единиц и выдачи одного сигнала на выход (0 или 1), заключается в том, что распознаются не только значения входных данных, но и их взаиморасположения и выходом является тоже некая пространственная комбинация из нулей и единиц. Это придает методу дополнительные степени свободы [2]. Так, логические операции И, ИЛИ можно выполнить достаточно легко, в то время как операции И — НЕ, ИЛИ — НЕ, ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ — ИЛИ требуют для их осуществления привлечения дополнительных физических явлений. Метод символьной подстановки позволяет легко выполнить любую логическую операцию на основе простейших законов подстановки, используя единообразный механизм (например, теневой метод [3]), и не требует привлечения дополнительных физических явлений. Применяя четыре правила подстановки, достаточно просто выполнить арифметические операции сложения и умножения.

Для осуществления операции символьной подстановки предлагается использовать оптически управляемый транспарант [4] и бихроматический источник света. Принцип работы оптически управляемого транспаранта основан на переориентации анизотропных молекул в слое жидкого кристалла (ЖК) при приложении напряжения, причем потенциальный рельеф может быть создан оптическим путем. Интенсивность света, прошедшего через такой модулятор, работающий на S эффекте и помещенный между скрещенными поляризаторами, равна

$$I = I_0 \sin^2 2\varphi \sin^2 \frac{\pi \Delta n(V)d}{\lambda}, \quad (1)$$

где $\Delta n(V)$ — разность показателей преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей (зависящая от напряжения V на ЖК); λ — длина волны считывающего света; φ — угол между осями поляризатора и директора ЖК (для получения максимального контраста φ выбирают рав-

* В отечественной печати аналогичные оптические цифровые вычислительные устройства, в которых состояние элемента определяется состоянием соседей в предшествующий такт (клеточный автомат), описаны ранее: Косцов Э. Г., Мишин А. И. // Автоматизация. — 1976. — № 4; Микроэлектроника. — 1977. — 6, вып. 2. (Прим. ред.)

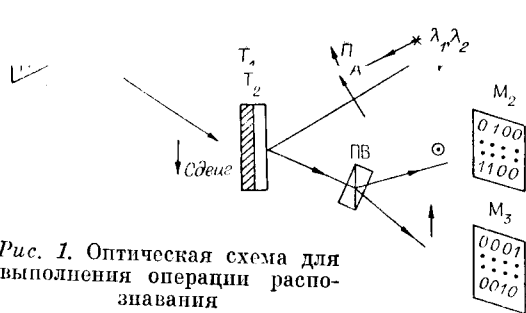


Рис. 1. Оптическая схема для выполнения операции распознавания

ным 45°); d — толщина слоя ЖК. При представлении внешнего позитивного изображения матрицы на длине волны считывающего света λ_1 и инвертированного (негатива) — λ_2 [5]. Таким образом, если A — входное изображение, то A на выходе будет красным, а \bar{A} — зеленым, т. е. происходит кодирование значений логической операции цветом (1 — красный, 0 — зеленый).

Для выполнения первой операции символьной подстановки — распознавания — предлагается оптическая схема (рис. 1). Входная матрица (M_1) отображается на слой фотополупроводника (ФП) двух прозрачных (T_1, T_2). При бихроматическом считывании поляризованным светом (поляризатор Π) после анализатора (A) будет присутствовать двухцветная матрица, и этой матрицей считывается сдвинутое (в соответствии с правилом распознавания) изображение входной матрицы на ФП второго прозрачного. После призмы Волластона (ПВ) (являющейся выходным анализатором) будут присутствовать два разноцветных изображения матрицы. Причем для матрицы одной поляризации красные ячейки соответствуют реализации логической операции И, а зеленые — ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ — ИЛИ, для ортогональной поляризации красные ячейки соответствуют операции $\bar{A} \cdot B$, а зеленые — $A \cdot \bar{B}$, что означает распознавание следующих комбинаций:

$$\begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} \rightarrow 1; \quad \begin{matrix} 1 \\ 0 \end{matrix} \rightarrow 1; \quad \begin{matrix} 0 \\ 0 \end{matrix} \rightarrow 1; \quad \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix} \rightarrow 1,$$

здесь 1 свидетельствует о наличии света (красного или зеленого).

Выполнение операции сложения двоичных чисел на основе метода символьной подстановки требует распознавания именно четырех таких комбинаций [2], для чего приходится использовать обычно два-три канала, в то время как в данном случае достаточно одного.

Таким образом, описанное поляризационно-цветовое кодирование расширяет метод поляризационного кодирования, предложенный (для метода символьной подстановки) в [6]. На рис. 2 представлены результаты распознавания для матрицы из 64 ячеек при сдвиге на один шаг вдоль диагонали. Распознавание более сложных комбинаций осуществляется также достаточно просто. Так, картина вида $\begin{matrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{matrix}$ перейдет в 1 для матрицы с одной поляризацией (красная) и в 1 для матрицы с другой поляризацией (зеленая). Объединяя (для устранения единиц от комбинаций $\begin{matrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{matrix}$) эти матрицы с помощью дихроичных зеркал (фильтров), получаем матрицу с набором $\begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix}$, которая распознается аналогично. Применение коммутируемого источника с двумя длинами волн позволяет сократить число каналов для выполнения операции распознавания. Процесс подстановки аналогичен предыдущему. Предположим, что мы распознали комбинацию $\begin{matrix} 1 \\ 1 \end{matrix} \rightarrow 1$ и хотим заменить ее на 01. Для этого выходная красная матрица проецируется на ФП первого прозрачного и со сдвигом на один ФП второго прозрачного, а считывание производится с помощью бихроматиче-

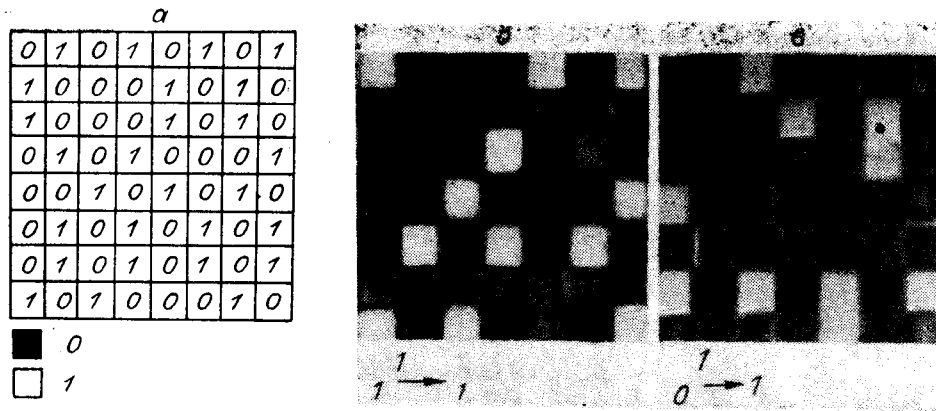


Рис. 2. Входная матрица (а) и результаты распознавания комбинаций вида $\begin{matrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{matrix}$ (б) и $\begin{matrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{matrix}$ (в)

ского источника света. В этом случае после первого анализатора появится разноцветная матрица (1 соответствуют красные ячейки, а 0 — зеленые). Этой матрицей считывается изображение со второго транспаранта. Тогда после соответствующим образом ориентированного второго анализатора появится комбинация 01. Понятно, что, комбинируя набор транспарантов (при соответствующем умножении входной матрицы), можно заменить 1 на более сложную комбинацию.

Важно отметить, что на основе транспарантов реализованы устройства, необходимые для выполнения подобных операций: стабилизатор интенсивности светового пучка и оптический триггер, позволяющий запоминать матрицу данных [7].

В качестве примера рассмотрим возможность применения данного метода для реализации некоторых логических и арифметических операций в троичной системе счисления. Обращение к небинарной системе счисления обусловлено как увеличением информационного потока через каждое соединение, так и тем, что с точки зрения потенциальной экономичности троичная система является оптимальной. Действительно, при использовании n знаков в m -й системе счисления (т. е. n/m разрядов) можно записать $m^{n/m}$ чисел. Легко показать, что эта функция достигает максимума (по m) при m , равном «е». Используя 60 знаков, в двоичном коде можно записать 2^{30} чисел, а в троичной системе счисления — 3^{20} (что почти в 4 раза больше). Сложность реализации быстрых и эффективных многопортовых устройств натолкнула исследователей на мысль воспользоваться бинарным кодированием троичных символов, в частности представлением [8]

$$0_t = 0,0; 1_t = 1,0 = 0,1; 2_t = 1,1, \quad (2)$$

т. е. для представления чисел в троичной системе необходимо два канала. На основе этого представления в работе рассматриваются возможности оптической реализации логических и арифметических операций в троичной системе счисления с использованием интерферометра Саньяка.

Рассмотрим выполнение операции сложения в троичной системе счисления. Введем матрицу внешних данных с двоичным представлением троичных символов в описанную схему и произведем сдвиг на одну позицию влево. Легко видеть, что после призмы Волластона 0_t и 2_t соответствует некая зелено-красная матрица со светом одной поляризации, а для другой поляризации будет другая матрица, соответствующая 1_t , причем одна 1_t — зеленая, а другая — красная. Таким образом, происходит одновременное распознавание всех значений троичной системы счисления, что в принципе соответствует практически одному каналу (для передачи значений троичной системы, действительно, 0_t — зеленый и 2_t — красный свет (одной поляризации), 1_t — красный и зеленый свет (другой поляри-

зации)). Следует отметить энергетическую эквивалентность всех значений данных в троичной системе.

На основе этого легко сформировать три матрицы, состоящие из нулей, единиц и двоек. Для выполнения операции сложения необходимо распознать девять возможных комбинаций и заменить их другими в соответствии с законами подстановки (см. (3)). При одновременном выполнении этих законов после нескольких итераций (пока верхний ряд не будет состоять из одних нулей) получаем результат сложения в троичной системе счисления:

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{ccc}
 0 \rightarrow 0 & 1 \rightarrow 0 & 0 \rightarrow 0 \\
 0 \rightarrow 0 & 1 \rightarrow 2 & 2 \rightarrow 2 \\
 0 \rightarrow 0 & 1 \rightarrow 1 & 2 \rightarrow 0 \\
 1 \rightarrow 1 & 2 \rightarrow 0 & 0 \rightarrow 2 \\
 1 \rightarrow 0 & 2 \rightarrow 1 & 2 \rightarrow 1 \\
 0 \rightarrow 1 & 1 \rightarrow 0 & 2 \rightarrow 1
 \end{array} \\
 + \begin{array}{ccc}
 2210212 & 1100101 & 0000101 \\
 1202211 & 0112120 & 11110100
 \end{array} \rightarrow \begin{array}{ccc}
 0000000 & 0000000 & 0000000 \\
 11120200 & 11120200 & 11120200
 \end{array}
 \end{array} \quad (3)$$

Рассмотрим оптическую реализацию процесса распознавания. Для этого каждая из двух слагаемых матриц разбивается на три матрицы из нулей, единиц и двоек. Считывание трех матриц первых слагаемых производится аналогичными матрицами вторых (нулевая считывается нулевой и т. д.). Считывание осуществляется светом с двумя длинами волн, причем в каждой из трех считываемых матриц наличие символа соответствует красному цвету (так, в матрице двоек красным точкам соответствует двойка на зеленом поле). В результате этого после разделения лучей с различной поляризацией образуются три матрицы, соответствующие распознаванию комбинаций (0,0), (1,1), (2,2) в красном цвете, и три матрицы (строки которых состоят соответственно из несовпавших элементов), попарно объединяя которые и выполняя операцию И, можно получить две матрицы, на одной из которых распознаются комбинации (2,1) и (1,2), а на другой — (2,0), (0,2), (1,0), (0,1) в соответствующих цветах. Таким образом, для осуществления операции распознавания достаточно четырех каналов. Выполнение подстановочных законов осуществляется аналогично. Время суммирования зависит от числа итераций. В общем, для n знакового слова требуется n итераций. Увеличение числа каналов (оборудование) компенсируется уменьшением количества знаков для представления одного и того же числа в троичной системе счисления.

Недавно предложен новый тип логической ячейки [9], названный вентилям Фредкина, имеющий равное число входов и выходов и правила управления:

$$\begin{array}{ll}
 \text{если } c = 0, & \text{если } c = 1, \\
 a' = a, & a' = b, \\
 b' = b, & b' = a.
 \end{array}$$

Основная особенность работы систем на основе вентиля Фредкина заключается в том, что в них не происходит необратимой потери информации (число входов вентиля равно числу выходов) [10]. Там же проиллюстрирован способ создания вентилях на основе волоконных световодов, акустооптических модуляторов и т. д. и показаны пути выполнения логических операций.

На рис. 3 приведена возможная схема реализации матрицы вентилях Фредкина на основе оптически управляемого жидкокристаллического транспаранта и бихроматического источника света. В качестве примера представлены схемы для оптической реализации логических операций И и ИЛИ. Так, для выполнения операции ИЛИ входом А является информация на слое ФП ЖК транспаранта, считывание производится бихроматическим светом («с» соответствует зеленое постоянно присутствующее

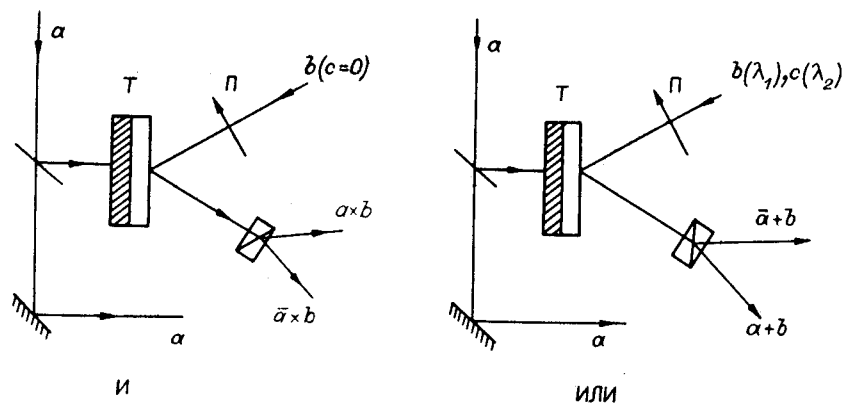


Рис. 3. Оптическая схема для выполнения логических операций И и ИЛИ на основе матрицы элементов Фредкина

излучение), на вход B поступает красный считывающий свет; 1 и 0 означают наличие или отсутствие света вне зависимости от длины волны. Следует обратить внимание на возможность компенсации потерь в оптической схеме усилителем на основе того же транспаранта.

Таким образом, нами реализованы метод символической подстановки и матрица элементов Фредкина на основе структуры МДП — ЖК с использованием бихроматического источника света. Показана возможность выполнения логических и арифметических операций на основе этого метода и логических операций с использованием матрицы элементов Фредкина. Представляется вероятным, что дальнейшее развитие предложенной бихроматической методики позволит создать достаточно простые узлы (субблоки) оптической вычислительной машины.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang A. Parallel algorithms for optical digital computers // IEEE III Internat. Opt. Comput. Conf.— 1985.— P. 13.
2. Brenner K. N., Huang A., Strtibl N. Digital optical computing with symbolic substitution // Appl. Opt.— 1986.— 25, N 18.— P. 3054.
3. Итиока Е., Танида Д. Оптические параллельные логические вентили на основе теневой системы для оптических цифровых вычислителей // ТИИЭР.— 1984.— 72, № 7.
4. Грибов Б. Г., Думарский Ю. Д., Ковтонюк Н. Ф. и др. Оптические управляемые транспаранты на основе структуры МДП — ЖК // Электрон. техника, Сер. микроразлектроника.— 1981.— Вып. 5.
5. Воеводкин Г. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. А., Нефедов С. М. Сегментация изображений на однотипные области методом цветового кодирования // Письма в ЖТФ.— 1986.— 12, вып. 122.
6. Brenner K. New implementation of symbolic substitution logic // Appl. Opt.— 1986.— 25, N 18.— P. 3061.
7. Воеводкин Г. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. А., Нефедов С. М. Обратная связь в устройствах на основе оптически управляемого пространственного модулятора // Квантовая электрон.— 1988.— 15, № 4.
8. Eichmann G., Lii Y., Alfmano R. Optical binary coded ternary arithmetic and logic // Appl. Opt.— 1986.— 25, N 18.— P. 3113.
9. Fredkin E., Toffoli T. Conservative logic // Int. J. Theoret. Phys.— 1982.— N 32.— P. 219.
10. Shamir J., Caulfield H., Micelli W., Seymour R. Optical computing and Fredkin gates // Appl. Opt.— 1986.— 25, N 10.— P. 1604.

Поступила в редакцию 2 января 1989 г.