

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.3 : 621.396.535.8

Э. А. МНАЦАКАНЯН, В. Н. МОРОЗОВ, Ю. М. ПОПОВ,
 В. А. ЦВЕТКОВ, Г. Д. ЯКОВЛЕВ
 (Москва)

**О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ
 В УСТРОЙСТВЕ ЛОГИЧЕСКОГО УМНОЖЕНИЯ
 МАТРИЦЫ НА ВЕКТОР**

Задачами настоящей работы являются нахождение эффективного оптоэлектронного способа выполнения логического умножения матрицы на вектор и оценка перспективности применения в предполагаемом вычислительном устройстве оптоэлектронных элементов.

Вначале рассмотрим алгоритм вычислений. Пусть даны квадратная матрица A , содержащая $n \times n$ элементов A_{ij} , и векторы f , каждый из которых содержит n элементов f_j , причем A_{ij} и f_j принимают значения 0 или 1, а индексы i и j , обозначающие номера строк и столбцов, — целочисленные значения от 1 до n .

Операция умножения матрицы на вектор $\hat{A}f = g$ состоит в вычислении элементов g_i вектора g :

$$g_i = \sum_{j=1}^n A_{ij} \wedge f_j,$$

где знак Σ означает суммирование по модулю 2. Предлагаемый в работе алгоритм вычислений построен с учетом того, что для оптоэлектронных методов обработки информации характерно оперирование световыми информационными картинками, т. е. массивами информации. Итак, пусть векторы f и матрица A хранятся в электронной памяти, а вычисленные векторы g содержатся в световой картине (что может быть необходимо, например, для дальнейшей обработки векторов в оптоэлектронной системе). Цикл вычислений проводится сразу для n векторов f . В каждом из n тактов цикла в качестве входного операнда подготавливается массив B_j , состоящий из n одинаковых строк, причем строка составлена из одинаковых разрядов n векторов f :

$$B_j = \left. \begin{array}{l} f_j^1, f_j^2, \dots, f_j^\alpha, \dots, f_j^n, \\ \vdots \\ \dots \end{array} \right\} \begin{array}{l} n \text{ одинаковых} \\ \text{строк.} \end{array}$$

Здесь индекс α — номер вектора f в выбранной группе векторов. Число таких массивов B_j для набора n векторов f равно n . Далее проводится построчная конъюнкция элементов j -го столбца матрицы A и массива B_j :

$$C_j = \begin{array}{l} A_{1j} \wedge f_j^1, A_{1j} \wedge f_j^2, \dots, A_{1j} \wedge f_j^\alpha, \dots, A_{1j} \wedge f_j^n, \\ A_{2j} \wedge f_j^1, A_{2j} \wedge f_j^2, \dots, A_{2j} \wedge f_j^\alpha, \dots, A_{2j} \wedge f_j^n, \\ \vdots \\ \dots \\ A_{nj} \wedge f_j^1, A_{nj} \wedge f_j^2, \dots, A_{nj} \wedge f_j^\alpha, \dots, A_{nj} \wedge f_j^n. \end{array}$$

В том случае когда в столбце A_{ij} есть нулевые элементы, в массиве C_j существуют нулевые строки с соответствующими номерами; этим и различаются массивы B_j и

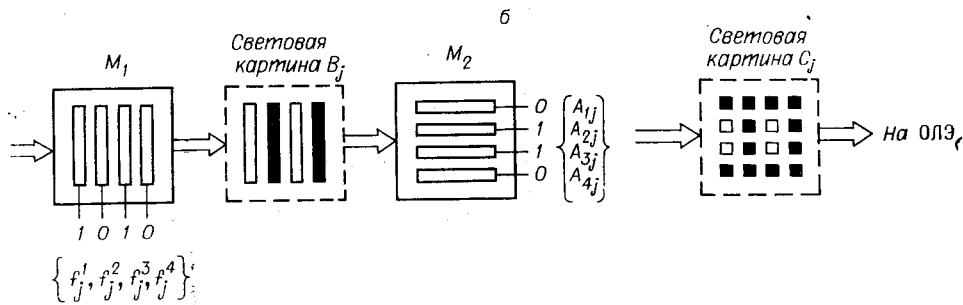
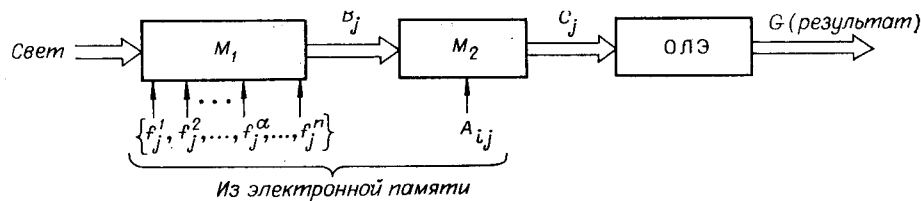


Рис. 1.

C_j . Массив G , полученный за n тактов путем поэлементного сложения по модулю 2 n массивов C_j ($j=1, 2, \dots, n$):

$$G = \sum_{j=1}^n C_j,$$

будет содержать в виде столбцов n векторов g . При этом мы полагаем, что один такт состоит из формирования массивов B_j , C_j и сложения массивов C_j и C_{j+1} . На вычисление n векторов затрачивается n тактов. Таким образом, можно считать, что на вычисление одного вектора приходится один такт. Легко видеть, что при фиксированной размерности матрицы и векторов увеличение информационной емкости поля (т. е. дальнейшее распараллеливание вычислений) позволяет наращивать производительность вычислений. Например, при емкости поля $2n \times 2n$ вычисления проводятся сразу с $4n$ векторами (4 группы по n векторов). При этом каждый из n массивов B_j будет состоять из четырех подмассивов, которые содержат n одинаковых строк, сформированных из одинаковых разрядов n векторов одной из четырех групп. Массив C_j получается в результате конъюнкции j -го столбца матрицы на все четыре подмассива, составляющих B_j . Далее следуют n тактов поэлементного сложения по модулю 2 последовательности из n картин C_j . Для вычисления $4n$ векторов требуется n тактов, т. е. при вычислении одного вектора эффективно используется $1/4$ такта. В общем случае при размерности матрицы и вектора, равной n , и фиксированной емкости информационного поля $C^2 = Ln \times Ln$, где L — целое число, эффективная часть такта, приходящаяся на вычисление одного вектора, составляет

$$N = \frac{\text{число вычислительных тактов в цикле}}{\text{число вычисляемых в цикле векторов}} = \frac{n}{LnLn} n = \frac{1}{L^2} \leq 1.$$

Величина N^{-1} , умноженная на тактовую частоту $F = \tau^{-1}$, дает производительность вычислений P , т. е. число операций в секунду, $P = N^{-1}F = L^2F$. Скорость обработки информации $V = L^2nF$. Заметим, что рассмотренный выше алгоритм может использоваться и для выполнения операции логического умножения матрицы на матрицу. При этом массив B_j должен быть составлен из элементов умножаемой матрицы.

На рис. 1, а приведена структурная схема оптоэлектронного устройства, на котором можно реализовать рассмотренный алгоритм вычислений (для простоты обсуждается вариант, когда $C=n$). Схема содержит два электрически управляемых n -канальных модулятора света M_1 и M_2 , предназначенных для формирования световых картин массивов B_j и C_j соответственно, а также оптоэлектронный логический элемент (ОЛЭ), выполняющий операцию поэлементного сложения по модулю 2 последовательности из n картин. Поясним процесс формирования световых картин. Для этого предположим, что модуляторы M_1 и M_2 работают на пропускание и модуляция света амплитудная. Модулятор M_1 управляется одновременно по n каналам электрическими сигналами, поступающими из внешней электронной памяти (j -е

разряды вычисляемой группы векторов f). Форма ячеек модулятора прямоугольная с соотношением сторон $2n:1$ (см. рис. 1, б). Пусть при приложении к ячейке управляющего электрического импульса, соответствующего логической единице, поглощение света в ячейке становится минимальным. Тогда при пропускании света через M_1 на выходе M_1 возникает модулированная по амплитуде световая картина массива B_j (см. рис. 1, б, здесь в качестве примера показан случай, когда $n=4$). Каждая вертикальная полоса в такой картине представляет собой n одинаковых разрядов в массиве B_j . Сформированная с помощью M_1 световая картина подается на модулятор M_2 , имеющий ту же конструкцию, что и M_1 . Модулятор M_2 управляется одновременно по n каналам сигналами из электронной памяти, соответствующими j -му столбцу матрицы A . Пространственное расположение M_2 таково, что плоскости M_1 и M_2 параллельны, а длинные стороны ячеек в M_1 и M_2 взаимно перпендикулярны. Управляющие сигналы одновременно подаются на M_1 и M_2 , в это же время через M_1 и M_2 пропускается свет. Световая картина массива C_j с выхода M_2 подается на ОЛЭ, с которого, спустя n тактов поэлементного сложения по модулю 2 картин C_j , оптически считывается результат — картина массива G . ОЛЭ может быть выполнен на одном или двух оптически управляемых транспарантах (ОУТ). Количество ОУТ в ОЛЭ определяется тем, сколько на данном ОУТ складывается картин (n или менее) без считывания результата. В первом случае проводится последовательное сложение n картин C_j , а затем следует оптическое считывание. Во втором случае применяются два ОУТ (рис. 2), один из которых выполняет необходимую логическую операцию, например, над парами картин, а на второй ОУТ переносится результат сложения C_j и C_{j+1} , т. е. этот ОУТ используется как оптическая память. Оптические элементы, необходимые для подачи на схему света, трансляции картин массивов B_j , C_j , G на рис. 1, 2 не показаны.

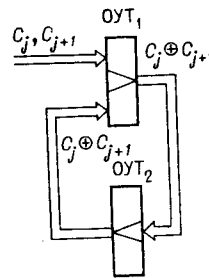


Рис. 2.

Для того чтобы оптоэлектронное устройство было конкурентоспособным с аналогичным электронным устройством, оно должно иметь производительность вычислений P на уровне $\sim 10^8$ — 10^9 опер./с при размерности $n=32$. Это означает, что при емкости поля $C^2=128 \times 128$ элементов тактовая частота работы устройства будет $\sim 10^7$ — 10^8 Гц. Действительно, если принять $\tau \approx 10^{-8}$ с, $C=Ln=128$, то при $n=32$, $16,8$ производительность вычислений составит $P \approx 1,6 \cdot 10^9$; $6,4 \cdot 10^9$; $2,6 \cdot 10^{10}$ опер./с, а скорость обработки — $V \approx 5,1 \cdot 10^{10}$; $1 \cdot 10^{11}$; $2 \cdot 10^{11}$ бит/с соответственно. Основными элементами оптоэлектронного устройства являются ЭУТ и ОУТ — электрически и оптически управляемые транспаранты; их информационная емкость, тактовая рабочая частота определяют производительность устройства. Среди разработанных или предложенных к настоящему времени матричных ЭУТ и ОУТ тактовые рабочие частоты $\sim 10^7$ Гц могут обеспечить два типа транспарантов. В первом из них вместо традиционного для ОУТ однородного фотопроводящего слоя используется фоточувствительная токоуправляемая интегральная схема, соединенная со слоем электрооптического материала [1]. Такие ОУТ могут работать с тактовой частотой до $\sim 10^7$ Гц. Во втором (интегрально-оптическом) ОУТ вместо светомодулирующего слоя применяются оптические интегральные схемы (ОИС) [2]. Конструкции интегрально-оптических ОУТ бывают различными. Например, в работе [2] предлагается изготавливать ОИС на подложках из электрооптического материала. ОИС состоит из системы планарных волноводов, электрооптических модуляторов, элементов ввода и вывода излучения из плоскости волноводного слоя. На той же подложке — «строке» — располагается электронная интегральная схема, состоящая из линейки фотоприемников, усилителей и логических элементов, сигналы с которых поступают на затворы электрооптических модуляторов ОИС. Двумерность рабочего поля ОУТ достигается в данном случае тем, что отдельные «строки» собираются в пакет. Вследствие небольшой толщины «строки» ($\sim 0,5$ мм) число «строк» может быть велико, при этом рабочее поле ОУТ способно содержать $\sim 10^4$ элементов. Необходимо также, чтобы набор ОИС выполнял и функции матричного ЭУТ.

При решении вопроса о том, насколько перспективен именно оптоэлектронный вариант устройства умножения матрицы на вектор, следует учесть, что и традиционная элементная база современной вычислительной техники позволяет работать с тактовыми частотами $\sim 10^7$ — 10^8 Гц при распараллеливании вычислений до $\sim 10^4$ каналов. Однако такое число каналов реализуется путем применения большого числа (~ 100) отдельных устройств, каждое из которых содержит ~ 100 логических элементов. Такой уровень распараллеливания по устройствам представляется близким к предельному. Таким образом, при использовании оптоэлектронных схем, имеющих емкость рабочего поля $\sim 10^4$ бит и работающих с теми же тактовыми частотами, что и электронные схемы, возможно получение выигрыша по производительности вычислений в ~ 100 раз. Распараллеливание по оптоэлектронным блокам (ОУТ, ЭУТ и т. д.) ~ 100 происходит в основном потому, что ОИС имеют небольшие габариты. Оптоэлектронный вариант устройства становится перспективным в случае применения элементной базы, позволяющей работать не только с большой емкостью

информационных картин ($\sim 10^4$ бит), но и с большими тактовыми частотами ($\geq 10^7$ Гц). Несмотря на то что в настоящей работе требования к оптоэлектронной базе (ОУТ и ЭУТ) сформулированы при решении частной задачи, полагаем, что эти требования носят достаточно общий характер*. Поэтому усилия, необходимые для преодоления трудностей создания быстродействующих оптоэлектронных элементов, представляются оправданными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Володин Е. Б., Свидзинский К. К. Возможность построения интегральных оптических транспарантов для оптической цифровой техники связи.— Автотметрия, 1977, № 4.
2. Белин А. М., Рябоконт В. Н., Свидзинский К. К. Интегрально-оптические транспаранты.— Электрон. пром-сть, 1978, № 7.

Поступило в редакцию 6 мая 1980 г.

УДК 535.4 : 546.32'131

Л. НИКОЛОВА, Т. ГОДОРОВ
(София, Болгария)

ГОЛОГРАФИЧЕСКАЯ ЗАПИСЬ НА ОСНОВЕ ФОТОИНДУЦИРОВАННОГО ДИХРОИЗМА В КРИСТАЛЛАХ KCl:Na

Исследования фотохромных свойств окрашенных кристаллов щелочных галоидов для осуществления объемной голографической записи проводятся давно [1]. Наиболее интересными оказались процессы фотопереориентации анизотропных центров, которые происходят при облучении линейно-поляризованным светом. Кроме высокой чувствительности и возможности многократной записи без промежуточной термической обработки, кристаллы, содержащие анизотропные центры, позволяют регистрировать также векторный характер интерференционной картины, что дает возможность сохранить в восстановленном изображении поляризацию записываемой волны. Благодаря этому запись приобретает ряд преимуществ: увеличивается информационная емкость, повышается контраст записи, уменьшается шум и т. п.

Запись на основе F_A -центров. Из всех анизотропных центров в щелочных галоидах наиболее подходящие характеристики для поляризационной записи имеет F_A -центр — F -центр в соседстве с примесным щелочным ионом радиусом, меньшим, чем у основных (рис. 1). Нарушенная симметрия этого центра приводит к появлению двух абсорбционных полос: одна, более длинноволновая, связана с оптическими переходами, поляризованными вдоль оси центра, а вторая, коротковолновая, обусловлена переходами, поляризованными перпендикулярно оси. F_A -центр может иметь три оптически различных положения в кристаллической решетке — вдоль трех направлений [100]. Под воздействием света подходящей длины волны в широких пределах изменения температуры (включая комнатную) F_A -центры переориентируются и в образце создается или меняется дихроизм. В работе [2] рассмотрена голографическая запись на основе переориентации анизотропных центров типа F_A по схеме с двумя линейно-поляризованными плоскими волнами с произвольно направленной поляризацией. Во время экспонирования кристалла такой интерференционной картиной в нем происходит переориентация анизотропных центров и индуцируется локальный дихроизм, соответствующий результирующей поляризации света. Из-за индуцированной в кристалле анизотропии его электропроводимость после регистрации является тензорной величиной. В системе кристаллофизических осей [100] тензор σ яв-

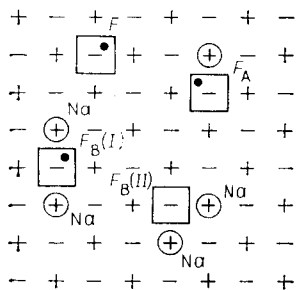


Рис. 1.

* Эта точка зрения авторов является спорной. (Прим. ред.)