

## ПОЛИХРОМАТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПЕРАЦИИ ЦИФРОВОГО УМНОЖЕНИЯ

Г. Г. Воеводкин, Е. М. Дианов, А. А. Кузнецов, С. М. Нефедов

Возможность параллельной обработки двумерных массивов, данных в оптике, позволяет эффективно выполнять векторно-матричные операции линейной алгебры.

Точность вычислений аналоговых оптоэлектронных процессоров определяется их динамическим диапазоном (зависящим от применяемых источников излучения, фотоприемника и модулятора) и обычно ограничивается типичным значением  $1/256$  при аналоговой обработке сигналов, соответствующей 8 разрядам; такая точность часто не соответствует требованиям решаемой задачи. Несмотря на это, было предложено использовать операцию аналоговой

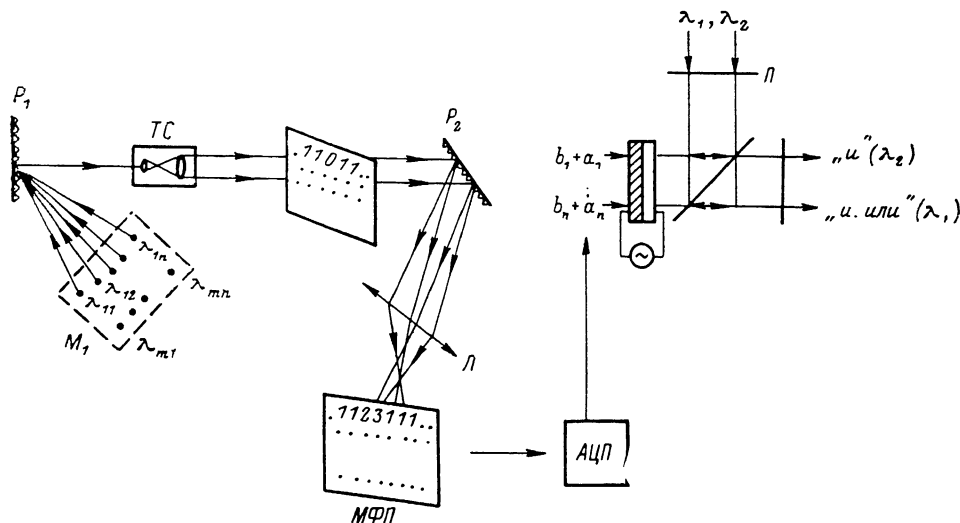


Рис. 1. Оптическая схема полихроматического умножителя.

$M_1$  — линейки (матрица) излучателей,  $P_1, P_2$  — дифракционные решетки,  $T, C$  — телескопическая система,  $T_1$  — входной транспарант,  $Л$  — линза, МФП — матрица фотоприемников,  $П$  — поляризатор,  $А$  — анализатор.

свертки для выполнения одной из наиболее трудоемких операций цифровых процессоров — операции умножения [1].

Операцию цифрового перемножения на основе свертки можно показать на примере перемножения двух чисел, записанных в двоичной системе ( $1101 \times 1011$ ). Результат этого перемножения соответствует выполнению операции свертки над последовательностью чисел  $(1101) * (1011) = (1113111)$ . Этот результат, записанный в смешанной форме, в дальнейшем преобразуется в двоичный. Преимущества метода таковы: увеличение точности вычислений, которое дает возможность работать с большими числами (действительно, при перемножении двух  $N$ -разрядных чисел требуется различение только  $N$  уровней сигнала); повышение быстродействия системы (для выполнения операции умножения обычным способом требуется  $N-1$  операция сложения, результат получается за  $[\log_2(N)]$  шагов, а в данном случае после аналого-цифрового преобразования смешанного представления в двоичную форму достаточно  $[\log_2(N+1)] - 1$  операции сложения за  $[\log_2 \log_2(N+1)]$  шагов, что для  $N=32$  дает соответственно 31 и 5 операций сложения за 5 и 3 шага; здесь  $[A]$  наименьшее целое число, большее  $A$ ).

На основе операции аналоговой свертки были предложены различные схемные реализации оптических процессоров [2-8]. Так, описанный в [8] акустооптический процессор способен производить умножение матрицы на матрицу с точностью 32-го разряда и скоростью до  $10^9$  операций умножения (сложения) в секунду.

В нашей работе предлагается для выполнения операции аналоговой свертки использовать полихроматический источник света. В работах [6, 7] описаны оптические 7- и 20-канальные

системы, работающие со спектральным уплотнением на полупроводниковых лазерах с эквидистантно расположенными длинами волн их излучения. При использовании  $N$  таких лазеров возможно оптическое цифровое перемножение как минимум  $N \times N$  разрядных чисел.

Оптическая схема выполнения операции свертки изображена на рис. 1. Ввод информации осуществляется модуляцией излучения линейки лазеров (вкл/выкл) согласно двоичному представлению первого сомножителя. После первой дифракционной решетки излучение всех лазеров сводится в один луч и расширяется телескопической системой, а затем спектрально закодированный пучок света модулируется транспарантом  $T_1$ . Линза  $L$  после второй дифракционной решетки строит изображение транспаранта в плоскости матрицы фотоприемников. При соответствующей дисперсии решетки изображения транспаранта в каждом цвете будут сдвинуты в плоскости фотоприемника на величину шага в записи матрицы внешних данных на транспаранте. Таким образом, суммарное распределение интенсивности в каждой строке

матрицы фотоприемника будет соответствовать свертке входного сигнала с каждой строкой матрицы данных. В результате в плоскости фотоприемника будет представлен результат свертки первого сомножителя с числами, записанными на каждой строке транспаранта.

В качестве устройства ввода матрицы данных (вместо транспаранта  $T_1$ ) возможно использование транспаранта на основе жидких кристаллов, работающего на управлении оптической активностью ячейки электрическим полем (твист-эффект). Такой же транспарант дает возможность осуществлять модуля-

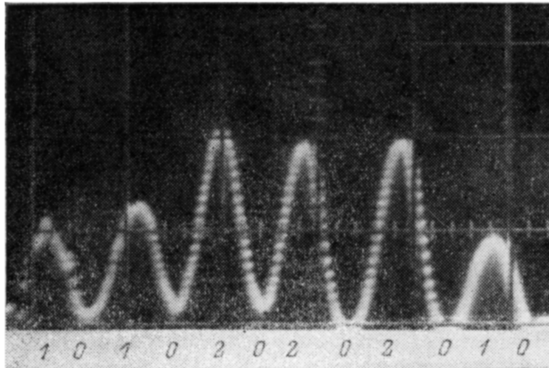


Рис. 2.

цию белого света, т. е. модулировать излучение любого лазера независимо от длины волны его излучения.

На рис. 2 представлен результат перемножения чисел  $138 \times 21$  ( $10001010 \times 10101$ ) с использованием трех источников света (для отображения трех единиц в бинарной записи числа 21). Число 138 было представлено одной из строк бинарного слайда. Регистрация осуществлялась на ПЗС линейку 1200-ЦЛ2.

Альтернативным вариантом выполнения операции аналоговой свертки является возможность использования линейки или матрицы «одноцветных» лазеров, размещенных в фокальной плоскости коллимирующей линзы, в результате чего пучок света от каждого лазера освещает входной транспарант под разными углами. Тогда в фокальной плоскости второй линзы Фурье-образы входного транспаранта будут пространственного разнесены. Поместив сюда растр из клиньев с различными углами (или соответствующую голограмму), можно добиться того, что в результате различной фазовой модуляции в фокальной плоскости каждого Фурье-образа изображения, построенные третьей линзой, будут смещены относительно друг друга на шаг в записи чисел на транспаранте. Ввиду монохроматизма всех лазеров возможно использование более отработанного транспаранта на основе структуры МДП—ЖК, работающего на  $S$ -эффекте. Понятно, что результат будет аналогичен приведенному выше.

Преобразование смешанного представления результата цифрового перемножения в бинарную форму возможно как чисто электронными устройствами, так и оптоэлектронными. В качестве аналого-цифрового преобразователя возможно использование электрооптического преобразователя на основе матрицы интерферометров. Однако в работе [5] предложен АЦП на основе дефлектора, работающего с субнаносекундными скоростями и низким управляющим напряжением. Приложенное к дефлектору напряжение отклоняет считывающий луч на ту или иную строку транспаранта с записанным на нем двоичным кодом, и, таким образом, распределение интенсивности света за транспарантом соответствует бинарной записи числа (напряжения, поданного на дефлектор). Основное преимущество данного АЦП состоит в использовании только одного активного элемента и возможности применять различные коды, видоизменяя маску.

После аналого-цифрового преобразования смешанного представления результата перемножения необходимо выполнить  $\lceil \log_2(N+1) \rceil - 1$  операций сложения. В оптике непросто осуществить операцию сложения двух бинарных чисел, что связано с трудностью осуществления переноса из младшего разряда в старший; при неблагоприятных условиях эти переносы

могут распространяться по всей длине бинарного числа. Выполнение этой операции в системе счисления в остаточных классах не требует осуществления переноса, но возникают сложности с обратным переводом числа в двоичную или десятичную форму.

В работе [8] рассматриваются возможности реализации полного сумматора на основе оптически управляемых жидкокристаллических модуляторов. В нашей работе для выполнения операции сложения предлагается применить тот же модулятор, но для считывания использовать источник света с двумя длинами волн (рис. 1). Принцип работы модулятора. Работая на  $S$ -эффекте, основан на переориентации анизотропных молекул в слое ЖК при приложении напряжения, причем потенциальный рельеф может быть создан оптическим путем. Интенсивность света, прошедшего модулятор, помещенный между скрещенными поляризаторами, зависит как квадрат синуса от отношения  $\Delta n(V)/\lambda$ , где  $\Delta n(V)$  — разность показателей преломления для обыкновенного и не обыкновенного лучей (зависящая от напряжения на ЖК, которое в свою очередь зависит от освещенности фоточувствительного слоя модулятора). При создании на фотослое модулятора трех градаций освещенности 2, 1 и 0 (рис. 3, а) возможно получение распределения интенсивности после анализатора 010 для  $\lambda_1$  и 100 для  $\lambda_2$  (что прямо следует из работы [9], где описано псевдоокрашивание с помощью такого модулятора черно-белого изображения на слайде). Это дает ключ для реализации оптического суммирования двух чисел, записанных в двоичном коде, с оптической реализацией переноса из младшего разряда в старший. Действительно, при сложении чисел 1011 и 1010 распределение интенсивности на фотополупроводнике транспаранта будет 2021, что дает при считывании светом с длиной волны  $\lambda_1$  001 и соответствует выполнению логической функции «исключающее или»; при считывании с  $\lambda_2$  результат будет 1010, что соответствует функции «и». Результат считывания светом с длиной волны  $\lambda_2$  (перенос) должен быть суммирован, со сдвигом влево на один шаг и с результатом считывания с  $\lambda_1$ . Такое суммирование со сдвигом может быть выполнено с приме-

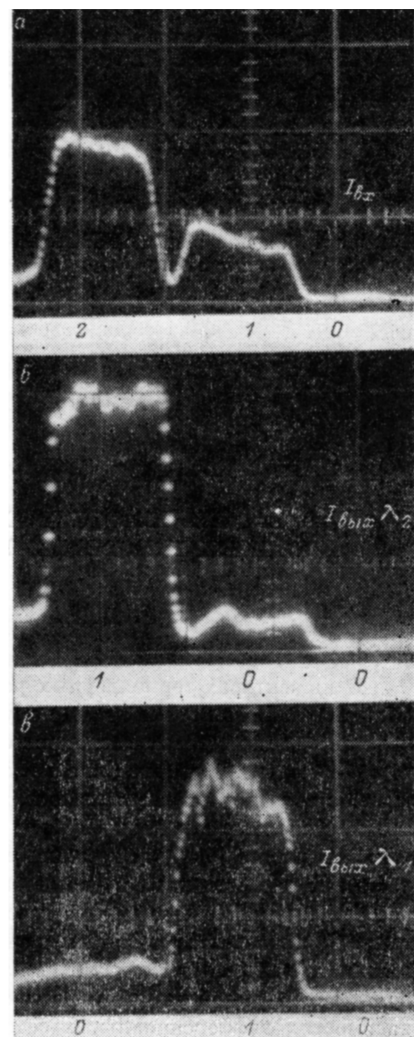


Рис. 3. Оптическая реализация полного сумматора.

$I_{вх}$  — распределение интенсивности на фотослое транспаранта  $a_{вх} = I(2, 1, 0)$ ; б — результат считывания светом с длиной волны  $\lambda_2$  (логическая функция «и»)  $I_{вых} = I(1, 0, 0)$ ; в — результат считывания светом с длиной волны  $\lambda_1$  (логическая функция «и. или»)  $I_{вых} = I(0, 1, 0)$ .

нением дихроичного зеркала или диспергирующего элемента. Это даст на выходе распределение интенсивности 10101. При суммировании пары картинок с  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  возможно получение интенсивности уровня 2, и тогда для осуществления дальнейшего переноса необходимо последовательное включение нескольких транспарантов.

В качестве примера оценим время на выполнение операции перемножения 16-разрядных бинарных чисел такой системой. Скорость выполнения элементарной операции определяется временем оптического отклика транспаранта  $T$ . Время на выполнение одного шага суммирования (в силу его последовательного характера из-за переноса) будет  $\sim 30 T$ . Поскольку конечный результат получается за 3 шага, то общее время выполнения операции умножения будет порядка  $90 T$ . Для транспаранта с количеством независимых элементов  $1000 \times 1000$  и  $T = 10$  мс эквивалентное время на выполнение одной операции умножения составит  $\sim 100$  мкс. Дальнейшее увеличение быстродействия в таких системах связано с созданием более быстрых модуляторов.

Предложенная схема оптического цифрового перемножителя с использованием источников света с различными длинами волн позволяет простым образом реализовать умножение на основе операции аналоговой свертки. При считывании данных с жидкокристаллического транспаранта бихроматическим излучением возможно одновременное выполнение двух логических операций, необходимых для выполнения операции суммирования с переносом.

### Литература

- [1] Whitehouse H. J., Speiser J. M. // Aspects of Signal Processing. 1977. Vol. 2. 90 p.
- [2] Родес У. Т., Джилофойл П. С. // ТИИЭР. 1984. Т. 72. № 7. 80 с.
- [3] Guilfoyle P. // Opt. Eng. 1984. Vol. 23. P. 20—25.
- [4] Psaltis D., Casasent D. // Proc. SPIE. 1980. Vol. 98. P. 232.
- [5] Li Y., Eichmann G., Alfano R. R. // Opt. commun. 1987. Vol. 64. N 2. P. 99.
- [6] Беловолов М. И., Дианов Е. М., Гурьянов А. Н. // Электросвязь. 1987. № 11. С. 54.
- [7] Seki M., Koboyashi K., Odagiri Y. // Electronics Letters. 1982. Vol. 18. N 6. P. 35—37.
- [8] Fatehi M. T., Wasmundt K. C. // Appl. Opt. 1981. Vol. 20. N 13. P. 2250.
- [9] Воеводкин Г. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. А., Нефедов С. М. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 22. Вып. 22. С. 1373—1377.

Институт общей физики АН СССР  
Москва

Поступило в Редакцию  
14 марта 1988 г.

Журнал технической физики, т. 59, в. 5, 1989

## РАССЕЯНИЕ БЫСТРЫХ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ ИХ С АТОМАМИ He И МОЛЕКУЛАМИ H<sub>2</sub>

Р. Н. Ильин, В. И. Сахаров, И. Т. Серенков

В инжекторах термоядерных реакторов предполагается использование пучков быстрых ( $E > 100$  кэВ) атомов водорода, полученных путем нейтрализации ускоренных отрицательных ионов при столкновении последних с атомами и молекулами. Для выбора параметров инжектора необходима информация о расхождении пучка, в частности об ее изменении в процессе транспортировки и нейтрализации, т. е. об упругом и неупругом рассеянии ионов H<sup>-</sup>. Рассеяние при нейтрализации быстрых ( $E=50-150$  кэВ) ионов H<sup>-</sup> исследовалось экспериментально в работе [1], где изучались зависимости угловых характеристик пучков нейтральных частиц от толщины мишени, но не были получены такие характеристики элементарных процессов, как дифференциальные сечения и не рассматривалось упругое рассеяние. В работах [2-4] приведены результаты расчетов дифференциальных сечений нейтрализации и упругого рассеяния быстрых ионов H<sup>-</sup> на различных мишенях. Интересной особенностью результатов расчетов упругого рассеяния следует считать наличие минимума на угловых зависимостях дифференциальных сечений, связанного с особенностями структуры иона H<sup>-</sup>.

Задачей настоящей работы является измерение дифференциальных по углу сечений нейтрализации и упругого рассеяния быстрых ионов H<sup>-</sup> при столкновении их с атомами и молекулами с целью получения более детальной, чем в работе [1], информации об элементарных процессах и проведения сопоставлений с теорией, в частности проверки наличия особенностей в упругом рассеянии.

В качестве мишеней были выбраны молекулярный водород, являющийся основным компонентом остаточного газа в инжекторах, и гелий. Энергии столкновений составляли 100 и 200 кэВ. Диапазон углов рассеяния  $0-10^{-3}$  рад.

### Методика эксперимента

Первичный пучок ионов H<sup>-</sup>, сформированный коллиматором, направлялся в камеру столкновений. Выходящий из камеры пучок рассеянных частиц проходил пролетную часть и попадал на неподвижный детектор, представляющий собой шевронную сборку из двух 60-миллиметровых МКП. Коллиматор состоял из двух вертикальных щелей шириной 10 мкм