

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. А. Бычатин, И. Г. Гольдман. Поворотный индуктосин. Л., «Энергия», 1965.
2. Фотоэлектрические преобразователи информации. Под. ред. Л. Н. Преснухина. М., «Машиностроение», 1974.
3. К. Миз, Т. Джеймс. Теория фотографического процесса. Пер. с англ. ред. А. Л. Картужанского и В. Н. Синцова. Л., «Химия», 1972.
4. С. Т. Васильков, А. Н. Касперович, И. М. Сахаров, Ю. В. Шалагинов. Функциональное преобразование код—свет в задачах вывода изображений из ЭВМ на фотоматериал.— «Автометрия», 1976, № 3, с. 41—46.
5. Л. П. Ярославский. Устройство ввода-вывода изображений для цифровых вычислительных машин. М., «Энергия», 1968.
6. Н. К. Игнатов. Оптимальная дискретизация двумерных сообщений.— «Изв. высш. учеб. заведений. Радиотехника», 1961, № 6, с. 684—691.
7. А. М. Остапенко, Э. А. Талныкин, И. С. Яковенко. ФОТ—диалоговая система обработки данных.— «Автометрия», 1976, № 1, с. 72—79.

Поступила в редакцию 25 октября 1975 г.

УДК 681.325 : 621.375.826

С. П. БЕРЕСТНЕВ, И. Н. КОМПАНЕЦ, Г. Ш. МЦКЕРАДЗЕ

(Москва)

ОПТОЭЛЕКТРОННОЕ АРИФМЕТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО С ПАРАЛЛЕЛЬНО-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ УПРАВЛЯЕМЫХ ТРАНСПАРАНТОВ

Предложено несколько вариантов создания оптоэлектронных арифметических устройств (ОЭАУ) [1—3]. В предыдущей работе [4] было описано ОЭАУ на управляемых транспарантах, в котором оптически был реализован логический сумматор. Возможности метода оптической обработки информации в таком ОЭАУ полностью не были использованы, поскольку оптически осуществлялась только дизъюнкция (+), а конъюнкция (·) выполнялась с помощью обычного электронного дешифратора, содержащего большое количество полупроводниковых диодов. Это явилось основным недостатком схемы с параллельным расположением электрически управляемых транспарантов (ЭУТ) в ОЭАУ.

В данной работе описывается оптоэлектронное арифметическое устройство, в котором оптически реализованы дешифратор и логический сумматор, составляющие вместе арифметический сумматор. Работа представляет собой экспериментальную проверку работоспособности другого варианта ОЭАУ, в котором реализуется схема последовательно-параллельного расположения ЭУТ. Как и дизъюнкция, конъюнкция осуществляется оптически, благодаря последовательному просвечиванию световых клапанов одним и тем же лучом. Дизъюнкция выполняется путем фокусировки выходных сигналов на один и тот же фотодиод. Таким образом, заданная арифметическая операция может выполняться за один такт.

Данное устройство производило операцию сложения над двухрядными числами, записанными в двоичном коде: $A = a_1 a_2$ и $B = b_1 b_2$. При этом результат $\Sigma = \sigma_0 \sigma_1 \sigma_2$ формировался по формулам [1]:

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= a_1 b_1 + a_1 a_2 b_2 + b_1 a_2 b_2; \\ \sigma_1 &= a_1 b_1 a_2 b_2 + \bar{a}_1 \bar{b}_1 a_2 b_2 + a_1 \bar{b}_1 \bar{a}_2 + \bar{a}_1 b_1 \bar{a}_2 + a_1 \bar{b}_1 \bar{b}_2 + \bar{a}_1 b_1 \bar{b}_2; \\ \sigma_2 &= a_2 \bar{b}_2 + \bar{a}_2 b_2.\end{aligned}$$

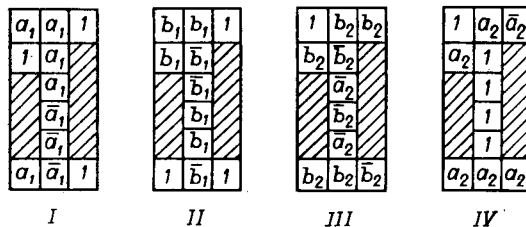


Рис. 1. Схема подачи входных операндов a и b и их инверсии на элементы четырех последовательно расположенных ЭУТ.

Для реализации ОЭАУ, согласно вышеприведенным расчетным формулам, потребовалось четыре последовательно расположенных транспаранта с тремя столбцами световых элементов в каждом транспаранте, причем числа световых элементов в столбцах равнялись трем, шести и двум соответственно. Схема подачи входных операндов a и b на элементы последовательно расположенных ЭУТ

выбран жидкий кристалл — хорошо изученный в настоящее время высокочувствительный материал.

На рис. 2 показана схема оптического тракта ОЭАУ. Коллимированный пучок гелий-неонового лазера 1 освещал систему 3 четырех последовательно расположенных ЭУТ, выполненных в виде единой структуры — многослойной жидкокристаллической ячейки. Такая конструкция позволяла упростить настройку и согласование элементов разных ЭУТ, а также значительно уменьшить потери света на отражение. Для улучшения отношения сигнал/шум по ходу светового луча за ячейкой устанавливалась маска 4, пропускающая только ту часть светового пучка, которая прошла через площадки рабочих элементов всех четырех транспарантов. Цилиндрическая линза 5 фокусировала каждый столбец выходных световых сигналов на соответствующую приемную площадку линейки фотодиодов 6. Электрические сигналы с фотодиодов перебрасывали пороговые устройства — триггеры Шмидта — в положения 0 или 1 в зависимости от сигналов (0 или 1) на выходе оптического тракта. В соответствии с ними на индикаторной панели фиксировался результат операции, произведенной арифметическим устройством.

Рабочим материалом ЭУТ являлся нематический жидкий кристалл МББА. Для управления световым потоком использовался эффект электрорассеяния света. С целью уменьшения потерь света в самом

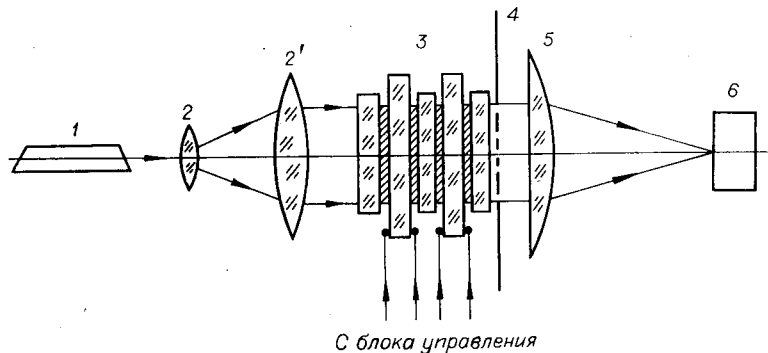


Рис. 2. Схема оптического тракта ОЭАУ с многослойной жидкокристаллической ячейкой:

1 — лазер; 2 — коллиматор; 3 — многослойная жидкокристаллическая ячейка; 4 — маска; 5 — цилиндрическая линза; 6 — линейка фотоприемников.

рабочем материале слой жидкого кристалла ориентировался, толщина его составляла 10 мкм.

Конфигурация электродов ЭУТ, используемых в схеме, показана на рис. 3. Индивидуально адресуемые световые элементы компоновались в виде трех столбцов. Размеры каждого элемента составили 3×3 мм, а размеры рабочей площади каждого ЭУТ около 10×20 мм. Использовались прозрачные электродные слои из двуокиси олова сопротивлением порядка 200 Ом на квадрат. Пропускание изготовленной жидкокристаллической ячейки составило около 35%. Интенсивность света, прошедшего через отдельный элемент такой ячейки, имела величину около 25 мкВт. Фоновый сигнал определялся в основном паразитной засветкой из соседних каналов. В результате оптический контраст, регистрируемый фотоприемником (фотодиод ФД-3а), составил около 12:1 при амплитуде электрических импульсов на элементах ЭУТ 25 В. Быстродействие устройства ограничивалось выбранным рабочим веществом, для которого время включения рассеяния света составляло около 100 мс, а время релаксации — порядка 500 мс.

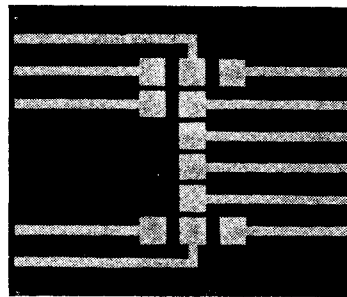


Рис. 3. Геометрия электродов на подложках УТ.

В процессе реализации данного варианта ОЭАУ была проведена оптимизация оптической и электронной частей блок-схемы устройства, изучены его динамические и оптические характеристики и проверены функциональные возможности устройства. Разработанное ОЭАУ удовлетворительно производило за один такт операцию сложения двухрядных чисел при подаче операндов исходных чисел непосредственно на соответствующие элементы ЭУТ (см. рис. 2).

В схемах с последовательным расположением ЭУТ целесообразным оказывается применение построчной адресации [5], которое позволяет упростить подвод управляющих электрических импульсов на световые клапаны ЭУТ. При этом для уменьшения числа строк в управляемых транспарантах целесообразно формировать отдельно логические функции $t = a + b$ и $\bar{t} = \bar{a} + \bar{b}$ (рис. 4). Формирование этих функций может производиться с помощью оптических или электронных схем логического сложения. Подавая на клапаны «1Σ» сигнал, соответствующий 1, а на клапаны \bar{b} и \bar{b} инверсии соответствующих операндов, можно осуществлять также операцию вычитания.

Основной недостаток последовательной схемы — повышенное требование к пропусканию света используемым рабочим материалом, так как с увеличением количества разрядов обрабатываемых чисел растет число последовательно расположенных ЭУТ и потери света в системе ЭУТ могут быть весьма ощутимыми. Действительно, ОЭАУ для n -рядных чисел, например 64-рядных, будут содержать $(n+2) = 66$ последовательно расположенных транспарантов. Число строк в каждом транспаранте будет равняться $(4n+1) = 257$ при максимальном числе элементов в каждой строке $(n+1) = 65$. Таким образом, общее число элементов в транспаранте будет равно $N = (4n+1)(n+1) \approx 16\,000$. Если брать за основу параметры современных фотоприемных устройств (чувствительность 10^{-12} Дж и быстродействие 10^{-8} с), то для регистрации световых сигналов с каждого светового клапана на фотоприемник должна поступать световая мощность $P_{\text{вых}}$ порядка 10^{-4} Вт. На выходе 66 последовательно расположенных транспарантов при пропускании каждого ЭУТ около 90% световая мощность будет иметь величину порядка $10^{-3} P_0$, где P_0 — мощность света на входе системы по-

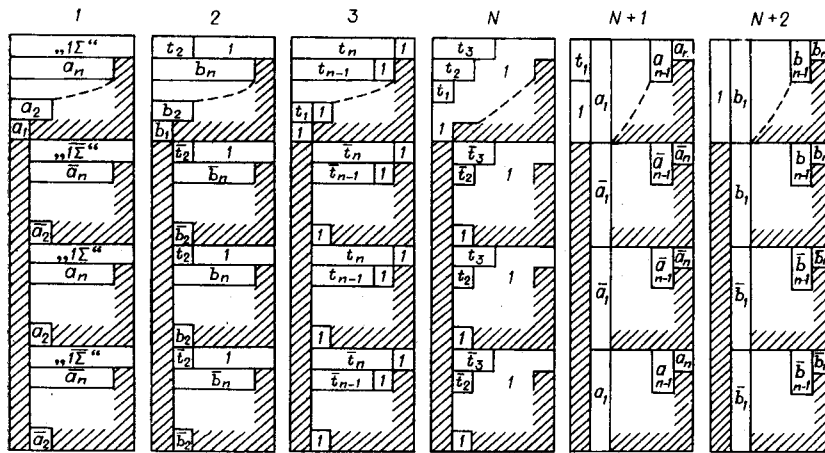


Рис. 4. Схема подачи входных операндов a и b , их инверсии и логических функций i и \bar{i} на элементы $N = (n+2)$ последовательно расположенных ЭУТ с построчным адресованием.

следовательных ЭУТ. Тогда необходимая мощность излучения лазера

$$P_0 = (16\,000 \cdot 10^{-4}) / 10^{-3} = 1600 \text{ Вт!}$$

Очевидно, что такой путь не может быть выбран для реализации схемы. Если же разбить обрабатываемые 64-разрядные числа на 8 байтов, то потребуется 8 байтовых процессоров, оперирующих только с 8-разрядными числами. Для каждого из этих сумматоров общее число элементов в транспаранте будет всего $(4n+1)(n+1) = 33 \times 9 \approx 300$. Пропускание света в системе транспарантов увеличится до $0,35 P_0$, и необходимая мощность излучения лазера будет выражаться приемлемой величиной

$$P_0 = (300 \cdot 10^{-4}) / 0,35 \approx 10^{-1} \text{ Вт.}$$

С учетом потерь в оптической схеме эта величина может составлять 0,5—1,0 Вт, что дает возможность применить в качестве источника излучения компактные инжекционные полупроводниковые лазеры. Правда, такой выигрыш по мощности обеспечивается за счет увеличения общего числа тактов ОЭАУ, поскольку время выполнения заданной операции многобайтовым ОЭАУ будет выражаться суммой времен срабатывания всех байтовых процессоров, цепочек байтовых переносов ($\tau_{\text{пер}}$), срабатывания фотоприемных устройств ($\tau_{\text{ФП}}$) и перебросов триггеров (τ_{T}).

Для примера оценим быстродействие 8-байтового ОЭАУ для 64-разрядных чисел на основе ЭУТ в предположении, что время переключения его рабочего материала $\tau_{\text{п}} = 10$ нс. Тогда время τ , необходимое для выполнения арифметической операции и выдачи конечного результата данным ОЭАУ,

$$\tau_{\text{п}} = 8\tau_{\text{п}} + 7\tau_{\text{пер}} + \tau_{\text{ФП}} + \tau_{\text{T}} = 8(\tau_{\text{п}} + \tau_{\text{ФП}} + \tau_{\text{T}}),$$

поскольку $\tau_{\text{пер}}$ можно считать равным сумме $(\tau_{\text{ФП}} + \tau_{\text{T}})$. Подставляя значения времен и принимая $\tau_{\text{T}} = 5$ нс, в итоге получаем, что для выполнения операции требуется $\tau = 200$ нс. Для сравнения укажем, что современные арифметические устройства электронного типа при выполнении операции над 64-разрядными числами затрачивают порядка 640 нс. Сравнение в пользу ОЭАУ становится еще более значительным с повышением числа разрядов обрабатываемых чисел.

Следующим шагом в реализации ОЭАУ по рассмотренной схеме является, очевидно, подбор оптимального рабочего материала для ЭУТ. Основными требованиями к нему будут малое время переключения оптических свойств (не хуже 10^{-8} с) и высокая прозрачность. Одновременное выполнение этих требований — весьма сложная задача, хотя возможный для использования класс веществ и расширяется за счет материалов, не обладающих свойством памяти (это справедливо для ограниченного числа элементов транспаранта в байтовом процессоре).

При модуляции света на основе эффекта поглощения нужно добиться совмещения прозрачности материала с получением достаточной глубины модуляции. Последнюю можно определить, исходя из перепада интенсивности на фотоприемной площадке, минимально необходимого для переброса триггера из положения «0» в «1». Регистрируемая фотоприемником интенсивность света складывается из пропускания $(4n+1) = 4 \cdot 8 + 1 = 33$ элементов столбца и для результатов «1» или «0» в данном разряде равна:

$$I(1) = I_{\max} + 32I_{\min};$$

$$I(0) = 33I_{\min},$$

где I_{\max} и I_{\min} — интенсивности света на выходе открытого и закрытого световых клапанов соответственно. Принимаем минимально необходимый перепад интенсивности в 5%, т. е. $I(1)/I(0) = 1,05$. Отсюда требуемый контраст на фотоприемнике должен иметь величину $K = I_{\max}/I_{\min} = 2,65$, а необходимая глубина модуляции света рабочим материалом транспаранта $m = (K-1)/(K+1) = 0,45$.

При оптимальном значении эффективности модуляции [6] такое значение m соответствует величине 2,6 относительного изменения коэффициента поглощения света веществом. Известные эффекты поглощения, например эффект Франца — Келдыша в полупроводниках, не обеспечивают такого изменения коэффициента поглощения без существенных потерь интенсивности света и поэтому, несмотря на свое исключительное быстрое действие, не могут быть использованы в ЭУТ для ОЭАУ.

Необходимая контрастная характеристика и прозрачность ЭУТ могут быть достигнуты в случае применения фазовых принципов модуляции излучения в электрооптических кристаллах. Здесь возможны две схемы выделения амплитудно-модулированного сигнала: при расположении поляризационных элементов между соседними ЭУТ и с расположением всей системы транспарантов между парой скрещенных поляроидов [5]. Первая схема, по-видимому, характеризуется значительными суммарными потерями света в поляроидах и невысоким быстрым действием (порядка 10^{-6} с), которое определяется отсутствием удовлетворительных кристаллов (с малым полуволновым напряжением) и относительно большим сопротивлением прозрачных электродов, что подтверждается работой дефлекторов света дискретного типа.

В другой возможной схеме, использующей одну пару скрещенных (по направлению пропускания электрического вектора света) поляроидов, функции булевой алгебры фактически реализуются на основе эффекта вращения плоскости поляризации света. В этом случае любой из элементов транспаранта пропускает свет, поворачивая или не поворачивая его плоскость поляризации в зависимости от того, подан на него операнд «0» (импульс напряжения) или «1» (импульс напряжения отсутствует) соответственно. Важно, что амплитуда управляющего напряжения может составлять величину, меньшую $1/N$ части полуволнового напряжения (эффект Поккейса) для используемого электрооптического кристалла; здесь N — число последовательно расположенных транспарантов. За вторым поляроидом в столбце j сигнала

для отсчета и выдачи их на дисплей последовательно соединенных фотоприемников и регистрируя перепад сопротивления (проводимости) этой цепи при появлении в ней хотя бы одного незасвеченного элемента (результат «1»). Замена линейки фотоприемников на матрицу, по-видимому, не внесет серьезных трудностей вследствие простоты считывания с нее результата.

В этой схеме, использующей электрооптические кристаллы, могут обеспечиваться высокие скорости переключения при максимальном пропускании света системой ЭУТ. Выигрыша по свету здесь тем не менее не существует. Действительно, фотоприемный элемент должен регистрировать за анализатором уже не $P_{\text{вых}}$ — интенсивность света на выходе системы последовательно расположенных транспарантов, а уменьшенное значение $P = P_{\text{вых}} \sin^2 \Delta\Gamma/2 \approx P_{\text{вых}} (\Delta\Gamma/2)^2$ для малых $\Delta\Gamma$, где $\Delta\Gamma$ — изменение фазы света на переключаемом элементе при подаче на него управляющего импульса. Даже в случае $\Delta\Gamma_{\text{max}} = \pi/N$ мощность излучения лазера 10^{-1} Вт может оказаться достаточной лишь при увеличении коэффициента пропускания ЭУТ до 0,98 для 8-байтового сумматора (с увеличением разрядности ситуация ухудшается).

Отметим, что значение 0,98 коэффициента пропускания электрооптического элемента, имеющего два прозрачных электрода из окиси индия, является реальным для современных модуляторов и дефлекторов света. В таком случае использование для создания ОЭАУ амплитудного принципа модуляции света, например эффекта рассеяния, оказывается более предпочтительным; требуемая мощность излучения лазера снижается до 10^{-2} Вт (возможно использование полупроводниковых лазеров, работающих в непрерывном режиме при комнатной температуре). Однако известное быстрое действие эффекта электрорассеяния света в оптической керамике и других материалах пока недостаточно (10^{-5} с).

Таким образом, подбор рабочего материала для ЭУТ — в настоящее время основная проблема в создании ОЭАУ. Только решение этой проблемы, а также дальнейшее улучшение параметров работы лазеров (в частности, полупроводниковых) и фотоприемных матриц позволят использовать большие возможности рассмотренного ОЭАУ. В этом случае можно надеяться, что ОЭАУ сможет с успехом конкурировать с электронными вычислительными системами.

В заключение авторы выражают благодарность Л. А. Орлову за ценные консультации, а также И. И. Климову, В. Н. Морозову, В. В. Никитину и Ю. М. Попову за поддержку работы и ее обсуждение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Орлов, Ю. М. Попов. Оптоэлектронное быстродействующее арифметическое устройство на управляемых транспарантах. — «Автометрия», 1972, № 6, с. 8—13.
2. Л. А. Орлов, Ю. М. Попов. Возможность построения арифметического устройства с помощью управляемых световых транспарантов. — «Квантовая электроника», 1974, № 1, с. 27—34.
3. Л. А. Орлов, Ю. М. Попов. Оптоэлектронное арифметическое устройство в системе остаточных классов. — «Автометрия», 1972, № 6, с. 14—22.
4. Г. Ш. Мцкерадзе, И. Н. Компанец, Л. А. Орлов. О реализации оптоэлектронного арифметического устройства на управляемых транспарантах. — «Автометрия», 1976, № 6, с. 44—47.

5. Н. Г. Басов, Ю. М. Попов, И. Н. Компанец, В. Н. Морозов, А. С. Наси-
бов, В. В. Никитин, Л. А. Орлов, В. Д. Самойлов, Н. Н. Шуйкин. Ис-
следование возможностей создания новых быстродействующих многоканальных оп-
тоэлектронных вычислительных систем.—Препринт № 3. М., Изд. ФИАН, 1973.
6. Е. Р. Мустель, В. Н. Парыгин. Методы модуляции и сканирования света. М.,
«Наука», 1970, с. 150—151, 161—166.

Поступила в редакцию 21 января 1976 г.

УДК 621.319.15 : 681.327

А. АКАЕВ, М. Н. ГОЛУБКОВА, С. А. МАЙОРОВ
(Ленинград)

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ СЧИТЫВАНИЯ ГЗУ С ПОЛУПРОВОДНИКОВЫМИ ЛАЗЕРАМИ

Использование полупроводниковых лазеров для считывания информации с голограмм открывает большие перспективы в построении малогабаритных ГЗУ [1]. Однако излучению полупроводникового лазера присущи такие недостатки, как низкая степень пространственно-временной когерентности, относительно широкий спектр излучения и значительная расходимость, вызывающие резкое ухудшение качества восстановленного изображения, что выражается в размытии информационных световых точек и снижении отношения сигнал/шум. Влияние частично-когерентного излучения на качество восстанавливаемого изображения было детально исследовано в работах [2—4].

В работе [3] было показано, что улучшения качества изображения можно добиться путем формирования считывающего луча с улучшенными характеристиками с помощью голограмм. В ГЗУ для формирования такого считывающего луча из излучения полупроводникового лазера используются гололинзы. Экспериментальные данные об эффективности применения гололинзы для этой цели были представлены в [5]. В настоящей работе рассматривается вопрос об оптимизации параметров схемы считывания, в которой считывающий луч формируется с помощью гололинзы из излучения полупроводникового лазера.

Рассмотрим сначала изображение, восстановленное пучком излучения полупроводникового лазера, коллимированным обычной линзой. Допустим, что Фурье-голограмма входной страницы записана с помощью монохроматического источника света с длиной волны λ_0 . Пусть излучение полупроводникового лазера характеризуется следующими параметрами: d_x, d_y — размеры излучающей области; $\bar{\lambda}_1$ — средняя длина волны излучения; $\Delta\lambda$ — полуширина спектра излучения. Тогда считывающий пучок в плоскости голограммы описывается распределением комплексных амплитуд

$$\Sigma_{CH} \sim \exp \left\{ 2\pi i \left[x_H \left(\frac{\sin \theta_c}{\bar{\lambda}_1 + \Delta\lambda} + \frac{d_x}{f(\bar{\lambda}_1 + \Delta\lambda)} \right) + y_H \frac{d_y}{f(\bar{\lambda}_1 + \Delta\lambda)} \right] \right\}, \quad (1)$$

где f — фокусное расстояние коллимирующей линзы.