

Г. Л. Лысенко, к. т. н., доц.; И. В. Мялковская

ОПТИМИЗАЦИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СЛОЖНЫХ МАТРИЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ НА ОСНОВЕ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПАРАНТОВ

Рассмотрены специализированные вычислительные системы на основе оптических транспарантов для выполнения операций с многомерными матрицами. Оптимизируются схемы ячеек оптических транспарантов с целью улучшения таких характеристик, как: быстроедействие и габаритные размеры.

Ключевые слова: специализированные вычислительные системы; оптический транспарант; матричные операции; коэффициент поглощения; электроабсорбционный модулятор; двойной диод.

Введение

Оптоэлектронные вычислительные системы демонстрируют свои преимущества в течение последних 30 лет. Они характеризуются высокой скоростью передачи данных, параллелизмом, низкой потребительской мощностью и пр. Применение матричной передачи данных (в т. ч. изображений) позволяет реализовать принцип параллелизма оптоэлектронных систем. Матричная форма данных может быть представлена, в частности, и с помощью оптических транспарантов. Проанализировано [1, 2], что для оптоэлектронных специализированных вычислительных систем лучше всего подходят полупроводниковые транспаранты, поскольку они имеют высокую степень интеграции и, что не менее важно, полупроводник имеет свойство изменять свои оптические свойства под воздействием различных факторов (электрического напряжения, оптического излучения, температуры и пр.). Последнее свойство полупроводникового материала используется для осуществления модуляции входного оптического излучения на транспаранте.

Оптимизация специализированных вычислительных систем для выполнения операции поэлементного умножения матриц

Одним из направлений использования систем с оптическими транспарантами в специализированных вычислителях является выполнение матричных операций, то есть работа с информацией картинного типа. На сегодняшний день исследовано выполнение такими системами лишь простых матричных операций, таких как: суммирование, умножение, обращение и др. – с матрицами ограниченных размеров (порядка $10^2 \times 10^2$ [1]). Однако существует проблема быстрой обработки крупноразмерных матриц.

Предлагается использовать специализированные системы с оптическими транспарантами для выполнения последовательности матричных операций. При этом каждая матричная операция будет выполняться последовательно на отдельном оптическом транспаранте. А именно: используется набор оптических транспарантов, которые будут работать в качестве логических элементов и выполнять данные операции. В результате последовательности соединения таких транспарантов можно будет получить выполнение сложных матричных операций в специализированных вычислительных системах.

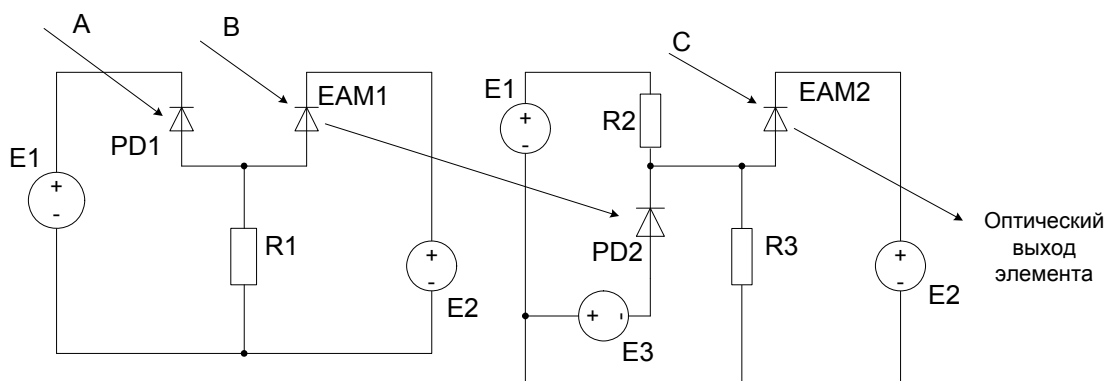


Рис. 1. Электрично-оптическая схема элемента И-НЕ

Известна схема ячейки оптического транспаранта на основе электро-абсорбционного модулятора (EAM – Electro-Absorption Modulator) [3], которая работает в качестве логического элемента И-НЕ. Электрично-оптическая схема такого элемента приведена на рис. 1.

На рис. 1 А и В – информационные сигналы, С – постоянный оптический сигнал, EAM 1 и EAM 2 – электро-абсорбционные модуляторы, PD1 и PD2 – фотоприёмники.

Преимуществами данного логического элемента по сравнению с такими же элементами на S-SEED-приборах (Symmetric Self-Electro-Optic Effect Device) [4] является отсутствие входных парафазных сигналов, что позволяет уменьшить габариты как самого элемента и связей между его составляющими, так и транспарантов, которые могут быть на них построены. Кроме того, в таком элементе И-НЕ решается проблема разных по уровням входных и выходных сигналов, которая существует в поколениях оптических модуляторов OCOG1-OCOГ-4 (Optically Controlled Optical Gates) [5]. В элементе И-НЕ, изображённом на рис. 1 и входной, и выходной сигналы будут иметь одинаковую длину волны, интенсивность и амплитуду сигнала. Это связано с тем, что входные сигналы А, В и С являются одинаковыми по всем вышеперечисленным параметрам. Равенство входных и выходных сигналов данного оптического логического элемента позволит создавать системы с последовательным соединением таких элементов, в которых выход одного элемента может быть входом следующего и так далее.

Другими словами, на рис. 1 изображена одна ячейка оптического транспаранта, который будет выполнять операцию поэлементного умножения с инвертированием. Весь транспарант будет иметь вид, изображенный на рис. 2.

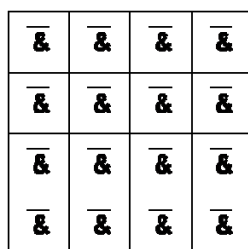


Рис. 2. Оптический транспарант на основе логических элементов И-НЕ

Однако недостатками данной схемы (см. рис. 1) являются три источника питания и значительное количество элементов схемы, которые приводят к увеличению ее габаритов и себестоимости.

Для улучшения характеристик специализированных вычислительных систем, а именно: уменьшения их габаритов (за счет уменьшения количества элементов) и стоимости, а также повышения быстродействия – предлагается оптимизировать схему ячейки оптического

транспаранта на основе логического элемента И-НЕ, которая приведена на рис. 1.

Оптимизированная схема логического элемента И-НЕ изображена на рис. 3.

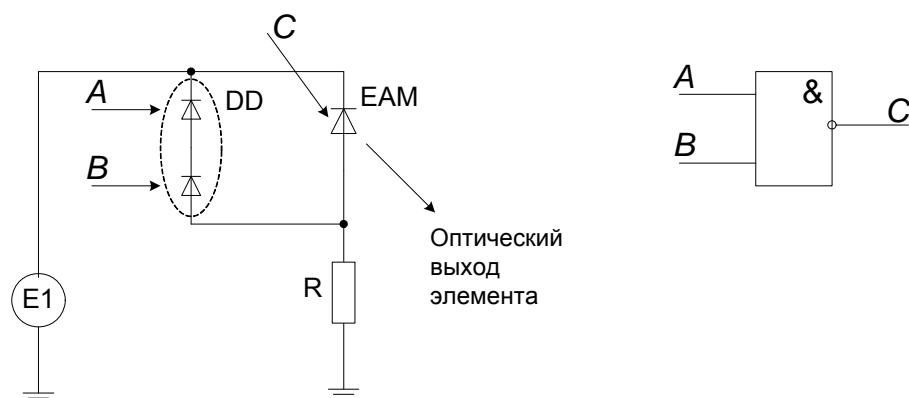


Рис. 3. Оптимизированная электрично-оптическая схема логического элемента И-НЕ

Она работает следующим образом. Информационные сигналы A и B поступают на поверхность двойного диода DD [5], а сигнал C является постоянным оптическим сигналом, что по уровням совпадает с сигналами A и B . Причем двойной диод DD (Double-diode) откроется только в том случае, если на него будет падать оптическое излучение A и B (другими словами, A и B будут равны единице). Тогда через DD начинает увеличиваться ток, который приводит к уменьшению напряжения на модуляторе EAM .

На рис. 4 приведены графики зависимости коэффициента поглощения полупроводников с квантовыми ямами от прилагаемого напряжения на разных длинах волн [6]. Из графиков видно, что уменьшение напряжения на EAM приводит к увеличению его коэффициента поглощения. Поэтому он становится непрозрачным и через него не проходит постоянный оптический сигнал C , и на выходе элемента И-НЕ получаем нуль.

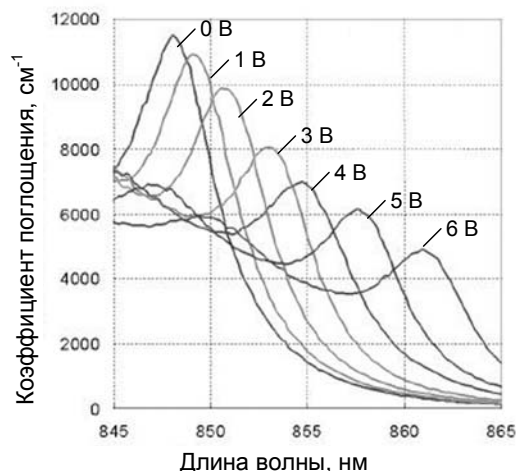


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента поглощения полупроводника с квантовыми ямами от приложенного напряжения [6]

Во всех других случаях (когда хотя бы один из информационных сигналов равен нулю) двойной диод DD не открывается, напряжение на EAM не изменяется и через него проходит постоянный оптический сигнал C , и на выходе получаем единицу. Таким образом, данная схема (см. рис. 3) подтверждает таблицу истинности для элемента И-НЕ.

По сравнению со схемой логического элемента И-НЕ, изображённого на рис. 1, оптимизированная схема содержит меньше элементов. За счет этого повышается быстродействие выполнения этой логической операции и уменьшаются габариты самого

логического элемента, которые являются довольно важными при построении транспаранта на их основе.

Оптимизация специализированных вычислительных систем для выполнения операции сложения матриц

На основе логического элемента И-НЕ (см. рис. 1) можно выполнять и другие матричные операции. Структурная схема операции поэлементного сложения, которая осуществляется с помощью определенной схемы соединения элементов И-НЕ, будет иметь вид, представленный на рис. 5.

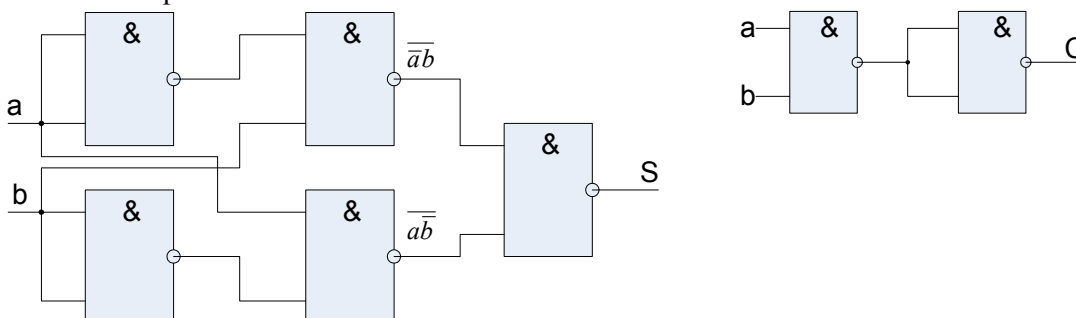


Рис. 5. Структурная схема операции сложения оптических сигналов на примере одной ячейки
S – сумма по модулю 2; C – перенос

Однако эта схема имеет те же недостатки, что и схема, изображенная на рис. 1. Кроме того она является довольно громоздкой за счет того, что содержит много элементов И-НЕ. На рис. 6 приведена электрично-оптическая схема выполнения операции сложения на основе логических элементов И-НЕ, которые изображены на рис. 1.

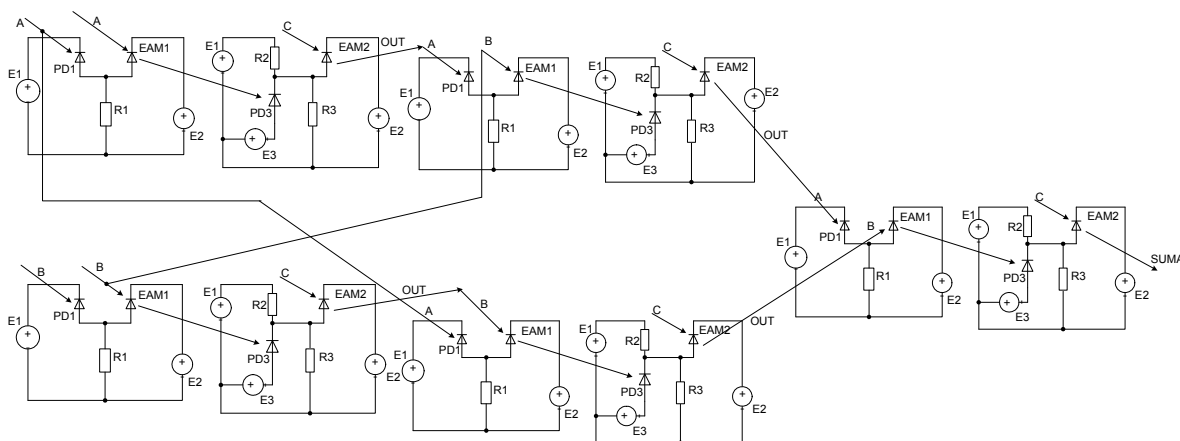


Рис. 6. Электрично-оптическая схема выполнения операции сложения на основе логических элементов И-НЕ

Предлагается оптимизировать схему операции сложения, уменьшив тем самым ее габариты, количество элементов и увеличив быстродействие. Оптимизированная схема сложения двух оптических сигналов для специализированных вычислительных систем на примере одной ячейки приведена на рис. 7.

Схема, приведенная на рис. 7, работает следующим образом. При поступлении единичных сигналов на входы A и B токи через фотодиоды PD 1 и PD 2 – одинаковые, и поэтому напряжение на EAM 1 не изменяется, и он пропускает постоянный оптический сигнал C. Аналогичная ситуация происходит на втором параллельном участке схемы с EAM2. Соответственно, на двойной диод DD поступают два единичных сигнала, а далее ситуация аналогична ситуации по элементному умножению (см. рис. 3), поэтому на выходе получим нуль.

Таким же образом не изменяют напряжение на EAM 1 и EAM 2 нулевые входные сигналы A и B, приводя к нулевому сигналу на выходе схемы.

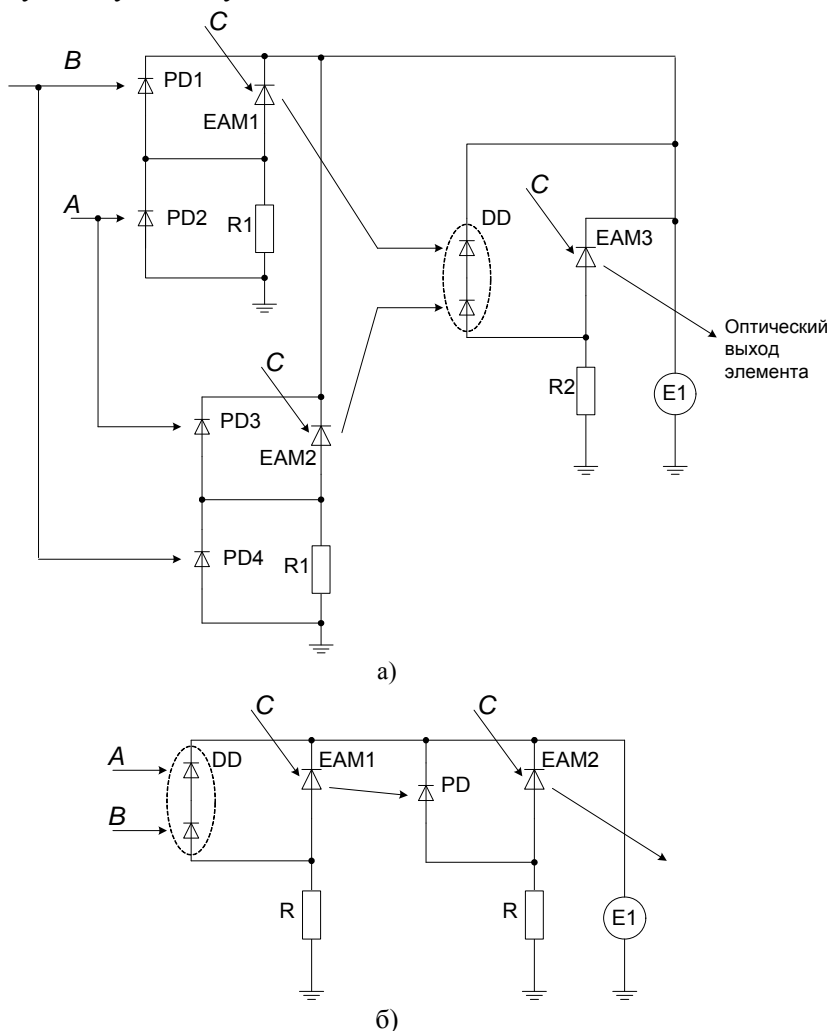


Рис. 7. Оптимизированная электрично-оптическая схема операции сложения двух сигналов: электрично-оптическая схема операции суммы по модулю 2 (а) и переноса (б)

Когда на входе схемы информационные сигналы $A=0$ и $B=1$, то напряжение на EAM 1 уменьшается, приводя к увеличению его коэффициента поглощения излучения (см. рис. 4), и на выходе EAM 1 присутствует нулевой сигнал. Нулевой сигнал A на втором параллельном участке схемы увеличивает напряжение на EAM2, увеличивая его пропускание, и на выходе EAM 2 существует постоянный оптический единичный сигнал. Нулевой и единичный входные сигналы на двойном диоде приводят к единичному сигналу на выходе всей схемы.

В случае, когда на входе схемы информационные сигналы $A=1$ и $B=0$, то напряжение на EAM 2 уменьшается, приводя к увеличению поглощения им излучения, и на выходе EAM 2 присутствует нулевой сигнал. Нулевой сигнал B на первом параллельном участке схемы увеличивает напряжение на EAM1, увеличивая его пропускание, и на выходе EAM 1 существует постоянный оптический единичный сигнал. Единичный и нулевой входные сигналы на двойном диоде DD приводят к единичному сигналу на выходе всей схемы.

Следовательно, работа схемы, приведённая на рис.7, подтверждает таблицу истинности суммы по модулю 2.

По сравнению со схемой логического элемента суммы по модулю 2, изображённой на рис. 6, оптимизированная схема содержит намного меньше элементов. Это позволит

повысить быстродействие этой логической операции и значительно уменьшить габариты самого элемента суммы по модулю 2, что является довольно важным при построении транспаранта на его основе.

Сравнение характеристик оптических транспарантов для выполнения сложных матричных операций

Оптимизация электрично-оптических схем логических элементов И-НЕ и суммы по модулю 2 для выполнения операций с крупноразмерными матрицами в специализированных вычислительных системах привела к уменьшению количества элементов схемы, что позволило уменьшить ее размеры. Еще одним важным параметром таких схем является быстродействие выполнения операций.

Оценим отдельно частоту выполнения операций для оптимизированного логического элемента И-НЕ (см. рис. 3) и оптимизированного логического элемента суммы по модулю 2 (см. рис. 7).

Частота выполнения операций на логическом элементе И-НЕ, изображенном на рис. 3, будет вычисляться по формуле [3]:

$$f_{И-НЕ} = \frac{\sqrt{3}}{2\pi \cdot R(C_{DD} + C_{EAM})}, \tag{1}$$

где R – сопротивление схемы; C_{DD} – ёмкость двойного диода; C_{EAM} – ёмкость электроабсорбционного модулятора.

Соответственно, время выполнения этой логической операции будет составлять

$$\tau_{И-НЕ} = \frac{1}{f_{И-НЕ}}. \tag{2}$$

Аналогично вычисляется время выполнения операций для логического элемента суммы по модулю 2 с переносом, который изображен на рис. 7:

$$\tau_{\oplus} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_{И-НЕ}}, \tag{3}$$

где f₁ – частота работы первого параллельного участка с EAM1:

$$f_1 = \frac{\sqrt{3}}{2\pi \cdot R_{\Sigma}(C_{PD1} + C_{PD2} + C_{EAM1})}. \tag{4}$$

В табл. 1 приведено сравнение скорости выполнения упомянутых выше логических операций на основе существующих и оптимизированных схем.

Таблица 1

Сравнение скорости выполнения логических операций И-НЕ и суммы по модулю 2

Тип транспаранта	Скорость выполнения логической операции для двух матриц размерностью 10240 x 10240 пикселей	
	логическая операция И-НЕ	логическая операция суммы по модулю 2
На основе существующей схемы	422 нс	1,27 мкс
На основе оптимизированной схемы	107 нс	426 нс

Из табл.1 видно, что оптимизированные схемы имеют высшую скорость выполнения приведенных логических операций. Причем скорость обработки в оптимизированных схемах является выше (приблизительно в 2 раза) для логической операции И-НЕ и – приблизительно в 3 раза для логической операции суммы по модулю 2. Кроме того, оптимизированная схема ячейки транспаранта, который выполняет логическую операцию И-НЕ (см. рис. 3) содержит

приблизительно в два раза меньше элементов, а схема для операции суммы по модулю 2 – приблизительно в три раза меньше элементов.

Эти характеристики положительно повлияют на специализированные вычислительные системы на основе оптических транспарантов, что позволит быстрее обрабатывать крупноразмерные массивы данных и уменьшить габаритные размеры таких систем.

Выводы

При использовании полупроводниковых структур, построены схемы специализированных вычислительных систем с оптическими транспарантами для выполнения сложных матричных операций и оптимизирован ряд параметров для улучшения их характеристик. А именно: уменьшено количество элементов в схемах логических элементов И-НЕ и суммы по модулю 2, что привело к уменьшению размеров самих логических элементов, а также повышено быстродействие выполнения логических операций для крупноразмерных матриц. Так, операция умножения двух матриц размерностью 10240 x 10240 с инвертированием выполняется за 107 нс, а операция сложения аналогичных матриц – за 426 нс. Полученные результаты в 2 – 3 раза превышают характеристики существующих специализированных вычислительных систем на основе логических элементов по быстродействию и количеству элементов схем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лисенко Г. Л. Аналіз сучасних типів транспарантів та їх характеристик / Г. Л. Лисенко, І. В. М'ялківська // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2007. – № 2 (14). – С. 145 – 153.
2. М'ялківська І. В. Використання оптичних транспарантів для спеціалізованих обчислювальних систем / І. В. М'ялківська / Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2008. – № 1 (15). – С. 123 – 129.
3. Onur Finader. Photonic integration for optical interconnects: from chip scale to long distance // A dissertation submitted to the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of philosophy. – 2007. – P. 19 – 23.
4. Miller D.A.B. Quantum-well self-electro-optic effect device/ D.A.B. Miller // Optical and Quantum electronics. – 1990. – №22. – P. 61 – 98.
5. Micah B. Yairi. An optically controlled optoelectronic switch: from theory to 50 gigahertz burst-logic demonstration // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. – 2001. – 210 p.
6. Bianca Elizabeth Nelson Keller. Wavelength division multiplexed optical interconnects using short pulses // A dissertation submitted to the department of applied physics and the committee on graduate studies of Stanford University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. – 2002. – P. 48.

Лысенко Геннадий Леонидович – к. т. н., доцент кафедры лазерной и оптоэлектронной техники, e-mail: lgl@vstu.vinnica.ua, тел. 8-0432-59-82-32.

Мялковская Ирина Владимировна – соискатель кафедры лазерной и оптоэлектронной техники, e-mail: koshirina@rambler.ru, тел. 8-0432-59-80-33.

Винницкий национальный технический университет.