

- [1] Hartmann M., Hippler K., Koel-  
le D., Kober F., Bernhardt K.,  
Sermet T., Gross R., Huebener R.P. //  
Z. Phys. B-Condensed Matter. 1989. V. 75. P. 423-432.
- [2] Frenkel A., Clausen E., Chang C.C.,  
Venkatesan T., Lin P.S.D., Wu X.D.,  
Inam A., Lalevic B. // Appl. Phys. Lett.  
1989. V. 55. N 9. P. 911-913.
- [3] Абрикосов А.А., Буздин А.И. // Письма в  
ЖЭТФ. 1988. Т. 47. № 4. С. 204-206.
- [4] Конников С.Г., Уманский В.Е., Лады-  
жинский И.И. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. № 19.  
С. 1183-1186.

Физико-технический институт  
им. А.Ф. Иоффе АН СССР,  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
8 февраля 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 10

26 мая 1990 г.

06.3; 07

© 1990

ОБРАБОТКА БИНАРНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СЕТЯХ  
ОПТИЧЕСКИ СВЯЗАННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УМНОЖИТЕЛЕЙ  
НА ОСНОВЕ ВЕКТОРНОГО ОО-Е СИНХРОНИЗМА

В.Ю. Раковский, А.С. Щербakov

При разработке и построении цифровых алгебраических опти-  
электронных процессоров существенного повышения быстродействия  
можно ожидать при переходе к полностью оптической обработке  
информации в сетях связанных логических вентилей [1, 2]. Нами  
сообщалось об экспериментальной реализации высокоскоростного  
цифрового процессора, в котором на основе оптических логических  
умножителей, использующих явление неколлинеарной генерации вто-  
рой гармоники, осуществлялась дискретная свертка параллельно  
кодированных бинарных данных при быстродействии  $10^{11}$ - $10^{13}$  бит/с  
[3, 4]. В настоящей работе представлены экспериментальные ре-  
зультаты исследования функциональных возможностей полностью  
оптического алгебраического процессора, образованного сетью ло-  
гических элементов на основе векторного ОО-Е синхронизма. Функ-  
циональные возможности рассматриваемого процессора определяются  
выбором сети, допускающей использование третьего пространствен-

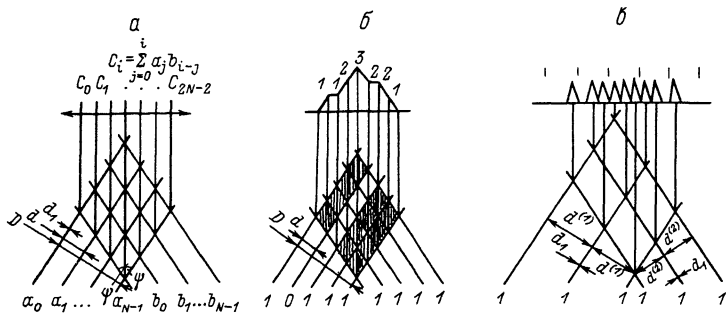


Рис. 1. Модификации сетей оптически связанных логических вентилей на основе ОО-Е синхронизма: а - схема формирования сигнала дискретной свертки с суммированием откликов логических умножителей по диагоналям; б - схема генерации сигнала  $NRZ$ -свертки ( $d_1 = d$ ); в - схема реализации пространственной оцифровки смешанного кода произведения двоичных чисел ( $d^{(1)} \neq d^{(2)}$ ).

ного измерения для скалярного умножения векторов, применение пространственного аналога  $NRZ$ -кода в целях повышения информационной емкости устройства и проведение пространственной оцифровки сигнала дискретной свертки - произведения в смешанном коде.

## 1. У м н о ж е н и е в е к т о р о в

Возможность осуществления скалярного произведения векторов основана на формировании в нелинейном кристалле многослойной структуры, состоящей из плоскостей, подобных изображенной на рис. 1, а, в каждой из которых реализуется дискретная свертка цифровых оптических сигналов. Производя одновременную обработку  $M$  пар  $N$ -разрядных чисел в  $M$  плоскостях взаимодействия и суммируя результирующие сигналы цилиндрической линзой в выходной плоскости, получим результат скалярного произведения в смешанном коде, имеющем не более  $M \cdot N$  дискретных уровней интенсивности в каждом канале.

Максимальные разрядность  $N_{max}$  и количество компонент  $M_{max}$  перемножаемых векторов ограничены дифракционной расходимостью пучков и определяются соотношениями:

$$N_{max} = \sqrt{\frac{nD \sin 2\psi}{8\lambda}}, \quad M_{max} = \sqrt{\frac{nH \sin 2\psi}{8\lambda}}, \quad (1)$$

где  $\psi$  - угол синхронизма,  $D$  - входная апертура цифровых сигналов в плоскости взаимодействия (см. рис. 1, а),  $H$  - толщина

кристалла,  $\lambda$  — длина волны исходных световых пучков,  $n$  — показатель преломления нелинейного кристалла для обыкновенной волны на основной частоте. Так, при  $D = H = 10$  мм,  $\lambda = 1$  мкм,  $n = 2$ ,  $\psi = 20^\circ$  получим  $M_{max} = N_{max} = 32$ , что соответствует пространственному периоду  $d \approx 300$  мкм.

Производительность оптического процессора скалярного умножения векторов в числе элементарных операций над битами обрабатываемых чисел составляет

$$S = \frac{MN^2}{\Delta T + \tau}, \quad \Delta T = \frac{Dn}{c} \operatorname{tg} \psi, \quad (2)$$

где  $\tau$  — длительность импульсов одного бита,  $\Delta T$  — максимальное уширение выходного сигнала вследствие неизохронности откликов логических вентилей конволюционной сети, которое ограничивает возможную тактовую частоту загрузки данных в оптический процессор. Согласно (2), обработка, например, 16-компонентных векторов с 32-разрядными компонентами при характерных временах  $\Delta T = 10$ –20 пс,  $\tau = 1$  пс может вестись с быстродействием  $S \approx 10^{15}$  бит/с.

## 2. NRZ-свертка

В рассматриваемом процессоре часть объема нелинейного кристалла не участвует в образовании выходных сигналов, поскольку для разрешения выходных каналов ширина входных оптических каналов  $d_1$  не превышает половины пространственного периода их следования  $d$ . Существенного увеличения информационной емкости процессора можно добиться, применив пространственный аналог NRZ-кода (рис. 1, б), при котором оптические каналы располагаются вплотную друг к другу ( $d_1 = d$ ), в результате чего в выходной плоскости образуется аналоговый сигнал NRZ-свертки. Выборка значений этого сигнала, отмеченных на рисунке, дает тот же результат произведения в смешанном коде, что и при использовании пространственно разделенного кодирования данных. Несмотря на усложнение слепопроцессорной обработки, применение NRZ-кода может оказаться полезным для уплотнения информации в оптическом процессоре, поскольку позволяет при тех же разрядностях двоичных чисел как минимум в четыре раза сократить рабочий объем нелинейного кристалла.

## 3. Пространственная оцифровка

В цифровых оптических процессорах на основе алгоритма дискретной свертки актуальным является вопрос о преобразовании конечного результата из смешанного в стандартный двоичный код. Использование для выполнения этой операции АЦП накладывает существенные ограничения на быстродействие всей вычислительной сети [5]. Возможность замены аналогоцифрового преобразования

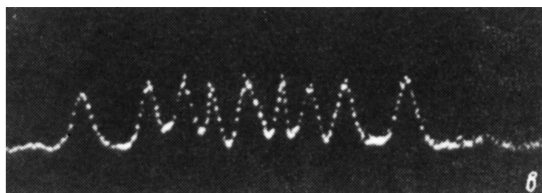
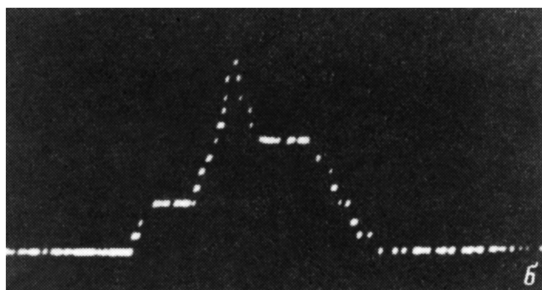
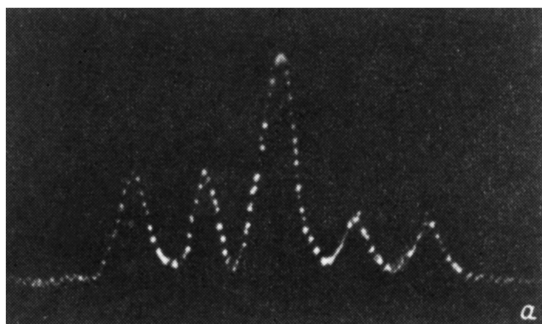


Рис. 2. Осциллограммы сигналов с линейки фотоприемников: а - результат скалярного произведения векторов в смешанном коде; б - сигнал  $NRZ$ -свертки двоичных чисел; в - результат пространственной оцифровки смешанного кода.

на цифровой счет импульсов в каждом разряде смешанного кода представляется одним из путей решения этой проблемы. В схеме с пространственно параллельным кодированием информации такая возможность реализуется за счет внесения различия между пространственными периодами перемножаемых цифровых сигналов. Рис. 1, в иллюстрирует процесс пространственной оцифровки смешанного кода, при котором в выходных каналах процессора вместо сигналов с амплитудами, пропорциональными  $\nu$  ( $\nu = 0.1, \dots, N$ ), формируется  $\nu$  импульсов равной интенсивности. Учет дифракционной расходимости пучков дает для максимальной разрядности чисел в схеме с пространственной оцифровкой соотношение вида:

$$N_{max} \approx \sqrt{\frac{4nD \sin 2\psi}{8\lambda}} \quad (3)$$

Сравнивая (3) с (1), можно заключить, что в рассматриваемой схеме (рис. 1, в) максимальная разрядность составляет величину порядка корня квадратного из разрядности для схемы, использующей суммирование сигналов по диагоналям (рис. 1, а). Тем не менее, применение пространственной оцифровки представляется эффективным методом упрощения послепроцессорной обработки оптических сигналов смешанного кода.

#### 4. Эксперимент

В экспериментальных исследованиях использовался монокристалл  $LiIO_3$  размерами  $30 \times 30 \times 10$  мм<sup>3</sup>, вырезанный параллельно плоскости (100) с входной гранью, перпендикулярной оси [010],  $\psi \approx 20^\circ$ ,  $n = 1.8$ . Световой пучок от ОКГ ЛИ-С801 ( $\lambda = 1.06$  мкм,  $\tau = 5 \dots 7$  пс) делился на полупрозрачном зеркале, и два полученных пучка направлялись через маски, кодирующие бинарные данные, на входную грань кристалла под углом синхронизма; падающие пучки поляризованы по оси [100] кристалла, пучки второй гармоники – по оси [001]. Оптические сигналы пучков второй гармоники считывались линейкой фотоприемников ЛФ1024.

На рис. 2, а приведена осциллограмма сигнала скалярного произведения в смешанном коде для примера перемножения двухкомпонентных векторов с трехразрядными компонентами ( $M = 2$ ,  $N = 3$ ). Были использованы маски с размерами  $d = 1.6$  мм,  $d_1 = 0.8$  мм,  $D = 4$  мм. При этом  $\Delta T = 10$  пс, и, следовательно, производительность процессора составила  $\xi \approx 10^{12}$  бит/с.

На рис. 2, б представлен результат обработки чисел в NRZ-коде для примера, изображенного на рис. 1, б. Размеры масок  $D = 6$  мм,  $d_1 = d = 1.5$  мм.

Для реализации схемы с пространственной оцифровкой были применены маски с размерами  $d^{(1)} = 3$  мм,  $d^{(2)} = 2$  мм,  $d_1 = 0.5$  мм и осуществлена обработка трехразрядных двоичных чисел 111x111, рис. 2, в.

В заключение отметим, что механизм электронной нелинейности, действующий при неколлинеарной генерации второй гармоники, сочетает эффективность  $10^{-5}$ - $10^{-3}$  с субпикосекундными временами отклика [1], что позволяет кодировать цифровую информацию оптическими импульсами с длительностью  $\tau = 0.1 \dots 10$  пс и реализовывать обширные сети оптически связанных вентилях с многократным использованием исходных световых пучков в последовательных актах взаимодействия, достигая в результате указанных выше значений производительности при энергетических затратах на каждое логическое умножение  $10^{-15}$ - $10^{-11}$  Дж/бит.

#### С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] E i c h m a n n G., L i Y., H o P.P., A l f a n o R.R. // Appl. Opt. 1987. V. 26. N 14. P. 2726-2733.
- [2] L i Y., E i c h m a n n G., A l f a n o R.R. // Opt. Commun. 1987. V. 64. N 2. P. 99-104.
- [3] Б е р и ш е в И.Э., Р а к о в с к и й В.Ю., С е л и ш е в А.В., Щ е р б а к о в А.С. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 8. С. 14-18.
- [4] Р а к о в с к и й В.Ю., Щ е р б а к о в А.С. // Оптические и оптоэлектронные средства обработки информации. Л.: ЛИЯФ-ФТИ. 1989. С. 68-76.
- [5] P s a l t i s D., A t h a l e R.A. // Appl. Opt. 1986. V. 25. N 18. P. 3071-3077.

Поступило в Редакцию  
28 марта 1990 г.

Письма в ЖТФ, том 16, вып. 10

26 мая 1990 г.

04; 07; 09

© 1990

ОПТОГАЛЬВАНИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ВЧ-РАЗРЯДЕ,  
ВОЗБУЖДАЮЩЕМ  $\text{CO}_2$  ЛАЗЕР

А.В. К а л м ы к о в, А.С. С м и р н о в

Оптогальванический эффект в разряде постоянного тока, возбуждающем  $\text{CO}_2$  лазер, широко используется для стабилизации частоты генерируемого излучения [1]. Полезным сигналом в таких устройствах является изменение тока или напряжения на разряде, вызванное излучением. Характерное значение этого сигнала составляет доли процента. Использование метода ВЧ-возбуждения активной среды приводит к значительным трудностям при регистрации