

устройства, которое управляется в трех поперечных направлениях с точностью до 1 мкм и обладает двумя угловыми степенями свободы. Допуски разъюстировки осей лазерного пучка и световода, вносящие дополнительные потери (1 дБ для трех поперечных направлений), составляли $\Delta z = \pm 5$, $\Delta x = \pm 1$, $\Delta y = \pm 2$ мкм.

Градуировочная характеристика радиометра при 100%-пой модуляции показана на рис. 3, а зависимость интенсивности ИК-излучения на выходе анализатора при поляризационной модуляции от силы давления — на рис. 4, где величина полуволновой силы равна 0,05 кг.

Проведенные исследования показали, что на основе тонкопленочного полдскогого волновода возможно построение световодного тензоптического ИК-радиометра с достаточно высокой чувствительностью и точностью измерений и приемлемой надежностью в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдошин Е. С. Светопроводные инфракрасные радиометры // ПГО.— 1988.— № 2.
2. Тамир Т. Интегральная оптика.— М.: Мир, 1978.
3. Авдошин Е. С. Инфракрасные интегрально-оптические радиометры // Тез. докл. IX Всесоюз. науч.-техн. конф. «Измерения в медицине и их метрологическое обеспечение». — М.: ВНИИОФИ, 1989.
4. Вечканов И. И., Гурьянов А. А., Девятых Г. Г. и др. Инфракрасные волоконные световоды из халькогенидных стекол // Квантовая электрон.— 1982.— 9, № 2.
5. Mitsuneri S., Masuya T., Mitsunobu M. Infrared optical fiber with vapor deposited cladding layer // J. Lightwave Technol.— 1989.— 7, N 1.— P. 158.
6. Караванский В. А., Молочнев В. И., Морозов В. Н. и др. Исследование условий согласования полупроводниковых излучателей с тонкопленочными планарными и полосковыми волноводами // Квантовая электрон.— 1979.— 6, № 10.
7. Авдошин Е. С. Светодиодный преобразователь звукового давления // Измер. техн.— 1988.— № 7.
8. Яков С. В., Бородин В. И., Останин В. В. Исследование деформации кручения ферромагнитных стержней (эффект Видемана). 2. Теория // Физика металлов и металловедение.— 1984.— 57, вып. 1.

Поступила в редакцию 9 октября 1989 г.

УДК 681.31 : 535

Е. М. ДИАНОВ, А. А. КУЗНЕЦОВ, С. М. ПЕФЕДОВ

(Москва)

МОДЕЛЬ АССОЦИАТИВНОЙ ПАМЯТИ ДЛЯ ТРОИЧНОЙ СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ

Множество экспериментальных данных указывает на то, что биологическая память основана на распределенном хранении информации [1]. Запоминание информации происходит во всей среде, т. е. при этой процедуре происходят небольшие изменения всех элементов памяти. Для считывания не требуется знания адреса того или иного образа, а в случае небольших потерь в отдельных элементах памяти или при неполной (искаженной) входной информации возможно правильное восстановление записанного образа. Таким образом, биопамять ассоциативна.

Существуют два варианта ассоциативной памяти (АП): автоассоциативная память, которая дает возможность выбрать образ из памяти по его неполной или искаженной части, и гетероассоциативная память, для которой выходной образ структурно не соответствует входному.

Модель АП, недавно предложенная Хопфилдом [2], основана на теории пейронных сетей. В его модели информация хранится в структуре

нейронной сети, что позволяет восстанавливать ее по частично искаженным входным данным. Одним из преимуществ данной модели является возможность реализации ее в виде оптической системы, способной за счет параллелизма достаточно просто выполнить операцию вектор-матричного умножения [3].

При векторном представлении входных данных информация запоминается в виде матрицы (происходит увеличение размерности) за счет того, что каждый элемент входного вектора S «размазывается» по строкам матрицы T , причем каждая i -я строка есть произведение элемента s_i на вектор:

$$T_{ij} = \begin{pmatrix} s_1 s_1 & s_1 s_2 & \dots & s_1 s_n \\ s_2 s_1 & s_2 s_2 & \dots & s_2 s_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_n s_1 & s_n s_2 & \dots & s_n s_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где n — размерность векторного пространства. Для M эталонных векторов синаптическая матрица T определяется так:

$$T_{ij} = \sum_{m=1}^M s_i^m s_j^m, \quad T_{ii} \equiv 0. \quad (2)$$

Для биполярной модели значения элементов векторов принимаются за $+1$ (возбужденный нейрон) и -1 (заторможенный нейрон). Таким образом, элементы матрицы T отражают результат взаимодействия отдельных нейронов через синаптические связи, например, результат взаимодействия двух возбужденных нейронов соответствует $+1$. Так происходит запись (запоминание) информации.

В процессе считывания значение элемента вектора (состояние нейрона) определяется как

$$s'_i = \text{sign}(W_i) = \begin{cases} +1, & \text{если } W_i > 0, \\ -1, & \text{если } W_i \leq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где W_i — результат суммирования всех входов, умноженных на соответствующие веса (элементы матрицы T_{ij}):

$$W_i = \sum_{j \neq i}^N T_{ij} s_j. \quad (4)$$

Если на вход будет подан один из эталонных векторов, то значения его элементов на выходе будут

$$s'_i = \text{sign} \left[s_i + \frac{1}{N-1} F(s_{ij}^m) \right], \quad (5)$$

где второе слагаемое представляет шум, обусловленный неортогональностью записанных векторов. При подаче на вход искаженного вектора после нескольких итераций можно получить на выходе исправленный вектор (при $M \ll N$).

Обращение к небинарным системам счисления обусловлено как увеличением информационного потока через каждое соединение, так и тем, что с точки зрения потенциальной экономичности троичная система является оптимальной. Так, используя 60 знаков, в двоичном коде можно записать 2^{30} чисел, а в троичной системе счисления — 3^{20} , что почти в 4 раза больше [4—6].

В троичной системе счисления существуют два основных представления чисел: $-1, 0, 1$ или $0, 1, 2$; мы остановимся на первом.

Синаптическая матрица определяется из формулы (2).

При восстановлении записанного вектора, элементы которого могут принимать значения $0, -1, 1$, состояние нейронов будет определяться пороговым условием:

$$s_i = \begin{cases} +1, & \text{если } W_i \geq 0,5, \\ 0, & \text{если } -0,5 < W_i < 0,5, \\ -1, & \text{если } W_i \leq -0,5, \end{cases} \quad (6)$$

где W_i задается согласно формуле (4), но с нормирующим множителем $1/\sqrt{\frac{2}{3}(N-1)}$. Тогда значения элементов вектора будут равны

$$s'_i = \left[s_i \frac{\sum_{j \neq i}^N s_j s_j}{\frac{2}{3}(N-1)} + \frac{1}{\frac{2}{3}(N-1)} F'(s_{ij}^m) \right]. \quad (7)$$

При равновероятном распределении значений элементов второй сомножитель $\cong 1$, а среднее квадратичное отклонение второго слагаемого будет

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{3}(M-1)/(N-1)}, \quad (8)$$

и при $M \ll N$ можно говорить о надежном восстановлении элементов.

Проведем численное моделирование ЛП для троичной системы счисления. Три вектора длиной 12 знаков получены с использованием программы генерации случайных чисел:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0, -1, 1, 1, 0, 0, -1, 1, 0, -1, 1, 1, \\ a_2 &= 0, 1, -1, -1, 0, -1, 0, 1, 1, -1, 1, -1, \\ a_3 &= -1, 1, 0, -1, 1, -1, 1, 0, 1, 1, -1, 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Рассмотрим умножение этих векторов на матрицу T' , полученную согласно формуле (2), с единичной диагональю и пороговым условием [7] (клиппированная матрица):

$$T'_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{если } T_{ij} \leq -1, \\ 0, & \text{если } -1 < T_{ij} < 1, \\ +1, & \text{если } T_{ij} \geq 1. \end{cases} \quad (10)$$

Результат умножения будет таким:

$$\begin{aligned} a'_1 &= 5, -7, 5, 7, -5, 4, -8, 4, -4, -6, 6, 5, \\ a'_2 &= -2, 4, -6, -4, 2, -7, 3, 5, 7, -1, 1, -6, \\ a'_3 &= -9, 9, -5, -9, 9, -7, 9, -1, 7, 7, -7, -5. \end{aligned} \quad (11)$$

Легко видеть, что результат свидетельствует о невозможности восстановления даже неискаженного входного вектора, что связано с сильным влиянием остаточных членов из-за неортогональности векторов и их небольшой длины (это особенно сильно сказывается на восстановлении нулевых значений элементов).

Ситуация улучшается при преобразовании входных векторов путем вычитания из них вектора (с последующим нормированием), элементы которого соответствуют средним значениям элементов входных векторов, что приводит к увеличению степени их ортогональности, хотя и может не менять хэммингово расстояние (M) между ними. Следует заметить, что в данном случае такая мера сходства, как хэммингово расстояние, не вполне подходит, хотя она определена для любого упорядоченного набора. Эта мера хорошо работает для бинарных кодов, но в троичной системе теряется важное отличие, например $(-1, 1)$ и $(-1, 0)$. Поэтому в качестве меры сходства можно рассматривать величину, равную скалярному произведению векторов (функция корреляции C) [1]:

$$\begin{aligned} M_{12} &= 7, \quad M_{13} = 12, \quad M_{23} = 8; \\ C_{12} &= -1, \quad C_{13} = -5, \quad C_{23} = 2; \\ a_4 &= 0, 1, 0, -1, 0, -1, 0, 1, 1, -1, 1, 0, \\ a_{11} &= a_1 - a_4; \quad a_{22} = a_2 - a_4; \quad a_{33} = a_3 - a_4, \\ a_{11} &= 0, -1, 1, 1, 0, 1, -1, 0, -1, 0, 0, 1, \\ a_{22} &= 0, 0, -1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, -1, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
a_{33} &= -1, 0, 0, 0, 1, 0, 1, -1, 0, 1, -1, 0; \\
M'_{12} &= 7, \quad M'_{13} = 12, \quad M'_{23} = 8; \\
C'_{12} &= 2, \quad C'_{13} = 1, \quad C'_{23} = 0.
\end{aligned}$$

В этом случае результат перемножения на соответствующую матрицу будет равен

$$\begin{aligned}
a'_{11} &= 1, -7, 7, 7, -1, 7, -7, 1, -7, -1, 1, 7, \\
a'_{22} &= 0, 2, -2, -2, 0, -2, 2, 0, 2, 0, 0, -2, \\
a'_{33} &= -6, 1, -1, -1, 6, -1, 6, -6, 1, 6, -6, -1,
\end{aligned} \tag{13}$$

что свидетельствует о восстановлении векторов a_{11} и a_{33} и о неудовлетворительном восстановлении вектора a_{22} .

Представляет интерес рассмотрение несимметричной матрицы, так как симметричная, очевидно, имеет двойную избыточность. Таким образом, должна реализовываться некоммутативная логика: $a_{ij} \neq a_{ji}$.

Для этого введем матрицу $T = T1 + T2$, где $T1$ представляет собой половину матрицы T' (с единичной диагональю), а матрица $T2$ — половину матрицы, полученной из матрицы T' с другим пороговым условием:

$$T2_{ij} = \begin{cases} -1, & \text{если } T_{ij} < -1, \\ 0, & \text{если } -1 \leq T_{ij} \leq 1, \\ 1, & \text{если } T_{ij} > 1. \end{cases} \tag{14}$$

Восстановленный вектор определяется по формуле

$$a'_{ij} = a_{ij}(T1 + T2) + a_{ij}(T1 + T2)', \tag{15}$$

где $(T)'$ — транспонированная матрица. Тогда

$$\begin{aligned}
a'_{11} &= 1, -8, 9, 8, -1, 8, -8, 1, -8, -1, 1, 9, \\
a'_{22} &= 0, 2, -4, -2, 0, -2, 2, 0, 2, 0, 0, 0, -4, \\
a'_{33} &= -7, 1, -1, -1, 7, -1, 7, -1, 1, 7, -7, -1,
\end{aligned} \tag{16}$$

что показывает надежное восстановление векторов при пороге (ненормированном), равном ± 3 .

Для проверки возможности ассоциативной выборки возьмем искаженный вектор a'_1 , в котором изменены второй и третий элементы (относительно a_{11}):

$$a'_1 = 0, 1, -1, 1, 0, 1, -1, 0, -1, 0, 0, 1. \tag{17}$$

Тогда после двух итераций получим с учетом порога ± 3 первоначальный вектор a_{11} :

$$\begin{aligned}
a'_1 &= 1, -2, 3, 4, -1, 4, -4, 1, -4, -1, 1, 3, \\
a'_1 &= 0, 0, 0, 1, 0, 1, -1, 0, -1, 0, 0, 0, \\
a'_1 &= 1, -4, 4, 5, -1, 5, -5, 1, -5, -1, 1, 4, \\
a_{11} &= a'_1 = 0, -1, 1, 1, 0, 1, -1, 0, -1, 0, 0, 1.
\end{aligned} \tag{18}$$

Введение матрицы $T2$ имеет следующее значение. Ненулевые элементы матрицы (с большим порогом клиппирования) подчеркивают совпавшие элементы в матрицах эталонных векторов и увеличивают дискриминацию элементов выходного вектора. Вычитание вектора, состоящего из «усредненных элементов», приводит к тому, что в преобразованных векторах ненулевые элементы представляют собой элементы, отличающиеся от некоего эталона. Таким образом происходит запоминание только новой информации.

Рассмотрим возможность реализации АП с помощью жидкокристаллического модулятора на основе структуры МДП — ЖК, работающего на S -эффекте, и бихроматического источника света (рис. 1). При двоич-

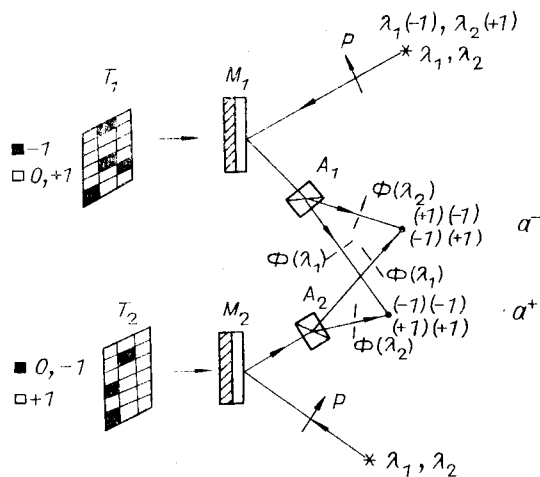


Рис. 1. Оптическая схема для реализации ассоциативной памяти

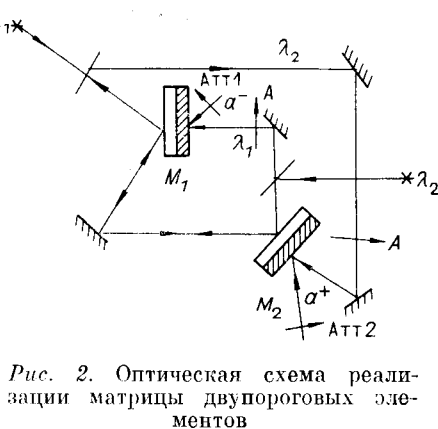


Рис. 2. Оптическая схема реализации матрицы двухпороговых элементов

ном представлении матрицы внешних данных в виде прозрачных и непрозрачных ячеек и проецировании ее на слой фотополупроводника модулятора возможно получение на его выходе (после анализатора) позитивного изображения матрицы на длине волны считывающего света λ_1 (красный) и инвертированного (негатива) на λ_2 (зеленый) [5]. Разделим матрицу T на две матрицы T_1 и T_2 , соответствующие элементам матрицы T $(-1, 0)$ и $(0, 1)$, и спроецируем их на фотослой модуляторов, причем для $T_1 - 1$ и $(0, +1)$ соответствуют непрозрачные и прозрачные ячейки матрицы, а для 1 и $(0, -1)$ (T_2) — наоборот (1 — прозрачная ячейка).

Вектор-матричное умножение возможно выполнить по схеме с помощью оптической системы из цилиндрических и сферических линз [3].

Значения элементов вектора вводятся в оптическую схему путем цветового кодирования, а именно -1 соответствует красный считывающий свет и 1 — зеленый (0 — свет отсутствует). Таким образом, при умножении на матрицу T_1 после поляризационно-делительного кубика и двух светофильтров получаем пространственно разнесенный результат перемножения с положительными $(-1 \cdot (-1) —$ красный) и отрицательными $(-1 \cdot 1 —$ зеленый) членами. При умножении на матрицу T_2 получаем поляризационно (пространственно) совпадающий результат для сумм положительных и отрицательных членов, правда, в обратных цветах.

Для выполнения умножения на транспонированную матрицу достаточно добавить аналогичную (при том же модуляторе) оптическую систему, развернутую в пространстве на 90° .

Оптическая реализация матрицы двухпороговых элементов возможна на основе тех же модуляторов с использованием петли оптической обратной связи [8] с двумя разноцветными источниками считывающего света (рис. 2). При замыкании петли обратной связи в оптической схеме с двумя модуляторами, настроенными так, что при увеличении сигнала на фотослое первого модулятора происходит увеличение сигнала на выходе этого модулятора (после анализатора) для красного света и уменьшение для зеленого, и при противоположной настройке второго модулятора, возможно получить двухпороговую характеристику матрицы элементов. Действительно, при $a^- > a^+$ произойдет лавинообразное увеличение интенсивности красного света в петле обратной связи и сработает оптический триггер для отрицательного порога, что приведет к появлению -1 (красный) на выходе схемы; аналогичный результат будет и для $+1$ (зеленый) при $a^- < a^+$.

Величина порога может регулироваться путем соответствующего изменения (Атт 1,2) сигналов a^- и a^+ .

Таким образом, нами предложена модель ассоциативной памяти с несимметричной матрицей для тройной системы счисления и оптическая схема для ее реализации на основе жидкокристаллического модулятора и бихроматического источника света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кохонен Т. Ассоциативная память.— М.: Мир, 1980.
2. Hopfield J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // Proc. Natl. Acad. Sci. USA.— 1982.— 79.— P. 2554.
3. Farhat N., Psaltis D., Prata A., Pack E. Optical implementation of the Hopfield model // Appl. Opt.— 1986.— 24, N 10.— P. 1469.
4. Карцев М. А. Арифметика цифровых машин.— М.: Наука, 1969.
5. Воеводкин Г. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. А., Нефедов С. М. Символьная подстановка и элемент Фредкина на основе структуры МДП — ЖК // Автометрия.— 1989.— № 3.
6. Сивуха В. И., Редько В. П. Модель ассоциативной памяти на мультистабильных элементах // Весті Академії наук БССР.— 1989.— № 1.
7. Gindi G. R., Gmitro A. F., Parthasarathy K. Hopfield model associative memory with nonzero-diagonal terms in memory matrix // Appl. Opt.— 1988.— 27.— P. 129.
8. Воеводкин Г. Г., Дианов Е. М., Кузнецов А. А. и др. Обратная связь в устройствах на основе оптически управляемого пространственного модулятора // Квантовая электрон.— 1988.— 15, № 4.

Поступила в редакцию 19 января 1990 г.

УДК 539.23 : 539.216 : 546.02

В. В. АТУЧИН, И. П. БОБКОВ, К. К. ЗИЛИНГ,
А. Е. ПЛОТНИКОВ, В. Н. СЕМЕНЕНКО, Н. В. ТЕРПУГОВ

(Новосибирск)

ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ Cs:KTiOPO₄

Кристалл KTiOPO₄ (КТР) представляет интерес для построения интегрально-оптических приборов благодаря своим высоким электрооптическим коэффициентам, низким диэлектрическим постоянным и отсутствию наведенных оптических неоднородностей [1]. В последние годы появились сообщения о том, что волноводные слои на основе КТР могут быть получены замещением части калия, содержащегося в кристалле, на рубидий, цезий или таллий с помощью ионного обмена в расплавах соответствующих нитратов [2, 3]. Однако имеющиеся в литературе сведения о свойствах таких волноводов носят крайне фрагментарный характер и фактически исчерпываются оценками достижимых приращений показателей преломления, составляющих величины от ~0,02 (Rb, Cs) до ~0,2 (Tl), и примерными значениями рабочих температур 320—450 °С, при которых процесс обмена идет достаточно активно.

Целью настоящей работы является определение физических величин, ответственных за оптические характеристики волноводов на основе Cs:КТР, в частности, установление количественной связи приращений показателей преломления с концентрацией легирующего элемента и оценка параметров диффузии. Монокристаллы КТР были выращены с помощью модифицированного метода Чохральского из раствора-расплава на основе K₂O — P₂O₅ — TiO₂ [4]. Эксперимент проводился на подложках Z-среза с показателями преломления: $n_x = 1,7626$; $n_y = 1,7716$; $n_z = 1,8653$. Ионный обмен осуществлялся в расплаве CsNO₃ при температуре 430 ± 5 °С в течение времени $t_0 = 1-4$ ч. Показатели преломления подложек и эффективные показатели волноводных мод измерялись в условиях призматического ввода. В качестве эталона использовались призма из SrTiO₃ с $n = 2,3887 \pm \pm 0,0002$. Все оптические измерения проводились на длине волны света $\lambda = 0,6328$ мкм. Профили приращений показателей преломления $\Delta n(x)$ восстанавливались с помощью обратного ВКБ-метода [5, 6]. Концентрация Cs и K в приповерхностном слое кристалла опре-