

液晶人工神经元阵列的研制*

王勇竞 郭转运 张延忻 张铁群

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

赵颖 熊绍珍

(南开大学光电子研究所, 天津 300071)

摘 要 研制了一种液晶灵巧像素光学神经元阵列器件, 它利用光电混合集成技术, 以非晶硅作光敏材料, 以液晶实现光调制, 通过特殊设计的器件结构, 能实现对两束光的相减和非线性取阈等人工神经元功能。该器件具有 8×8 个神经元, 以全并行方式工作。

关键词 神经网络, 光学神经网络, 神经元, 液晶光阀, 灵巧像素。

1 引 言

人工神经网络以其在探索思维本质, 以及在智能处理系统等方面广泛的理论和应用前景, 受到人们的重视。用光学方法实现人工神经网络, 能充分发挥光学强大的互连能力^[1], 提高人工神经网络实现的规模。光学神经网络(ONN)面临的主要困难是难于实现易控制, 大规模并行处理的光学神经元器件。其次, 光学实现双极权重和神经元状态(减法操作)较之电子学方法困难, 而双极操作对提高网络存储容量, 信噪比, 乃至实现自适应学习都十分重要。从数学模型角度看, 人工神经网络中存在四种基本操作: 相乘, 相加, 相减, 非线性取阈^[2]。神经元是人工神经网络的基本功能单位, 其功能主要是完成上述四种运算中的后三种: 对输入信号的双极求和(加减)和非线性取阈。由于光学在实现相减和取阈方面的困难, 光学神经网络从一开始就采用了光电混合的道路。其方法是利用独立的光电探测器把光信号转换成电信号, 然后利用电子计算机或特定电路实现取阈, 最后再经过电光转换, 还原成光信号, 间接地实现了神经元的所有功能^[3-5]。这种系统中并不存在一个可以称为神经元的空间单元, 神经元的功能由分立的光探测器件、空间光调制器、及相应的反馈回路完成。如果利用电子计算机实现, 则这种操作实际上是串行的; 如果采用电路方法实现并行操作, 则面临引线的困扰, 都难于做到很大的规模。

光学神经网络的最新进展, 即所谓光子神经网络(Photonic neural network) (PNN)^[6]有希望解决这些困难。其策略是把光学和电子学有机地结合在一起, 实现光子神经元, 从而得到融合光学二维并行大互连和电子学易编程易控制优点的光学神经网络系统。据报道国外已

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1996 年 6 月 26 日; 收到修改稿日期: 1996 年 12 月 13 日

有结合超大规模集成电路技术和多量子阱或液晶技术的人工神经元阵列^[7-9]。这些器件大多工艺复杂, 开口率较低(有效调制面积小), 神经元数目也较少。

本文研制了 8×8 元液晶灵巧像素光学神经元阵列器件, 它利用了光电混合集成技术, 以非晶硅的光电导效应和向列液晶的电控双折射方式为基础, 通过特殊设计的器件结构, 能实现对两束光的并行相减和非线性取阈等人工神经元功能。

2 器件结构

结构如图 1 所示的器件实际上可以看作一种纵向控制的透射型液晶光阀。类似的能够完成简单并行取阈功能的器件已在作者前期文章中有过报道^[10]。

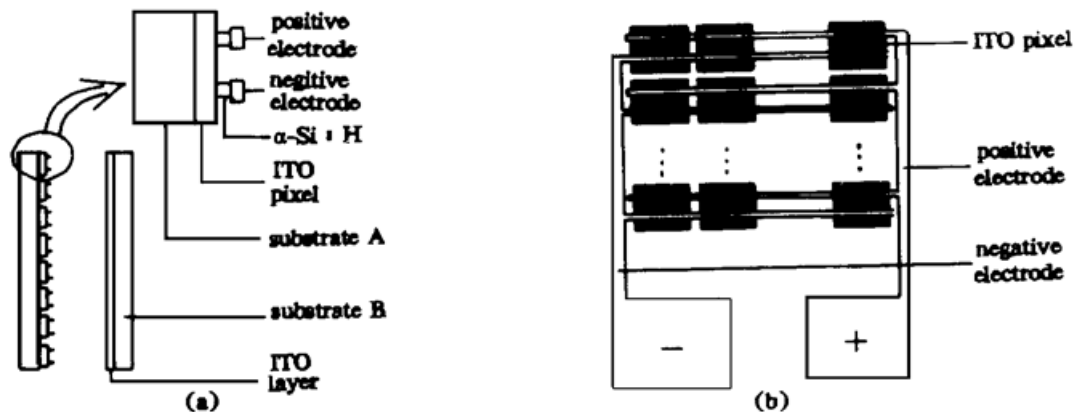


Fig. 1 Construction diagram of device, (a) Cross section of device, (b) Vertical view of substrate A

在基片 A 上先镀制透明导电膜 ITO 层, 其电阻 $100 \Omega/\square$, 并刻蚀成 $1.7 \text{ mm} \times 1.7 \text{ mm}$ 的单元, 单元间距 0.1 mm 。其上依次蒸镀 $1 \mu\text{m}$ 厚的非晶硅层和 $0.1 \mu\text{m}$ 厚的引出电极铝层。两者均被刻蚀成宽为 0.1 mm 的叉指状结构, 如图 1(b)。两套铝条分别作为正引出电极和负引出电极; 非晶硅作为铝条和 ITO 单元之间的光导层。在基片 B 上分别镀制不被刻蚀的 ITO 层, 和高度为 $5 \mu\text{m}$ 的间隔岛。然后在 A, B 两个基片上倾斜蒸镀 SiO_2 定向层, 最后把两片平行定向的基片组装成液晶盒, 充填液晶 E7(BDH) 供实验使用。为了增强取阈的效果, 选择特定的蒸镀角使液晶分子的定向预倾角为零。两片相互正交的偏振片分别贴在两个基片的外表面, 偏振方向分别和定向方向呈 45° 和 135° 角。

3 原理

器件的每一个像素的结构如图 2, 写入光从镀有非晶硅的基片一侧入射, 读出光则从另一侧读出。各像素的等效电路如图 3。这里已忽略引出电极直接与上极板之间的光学和电学作用。入射线偏光(光强为 I_0) 按照液晶层的光轴方向(定向方向)分解为 o 光和 e 光, 经过液晶盒后, 在检偏方向上的输出光强为:

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} = I_0 \sin^2 \left[(n_e - n_o) \frac{\pi d}{\lambda} \right] \quad (1)$$

其中 d 是液晶盒的厚度, n_o 和 n_e 分别是寻常光和非寻常光的折射率。

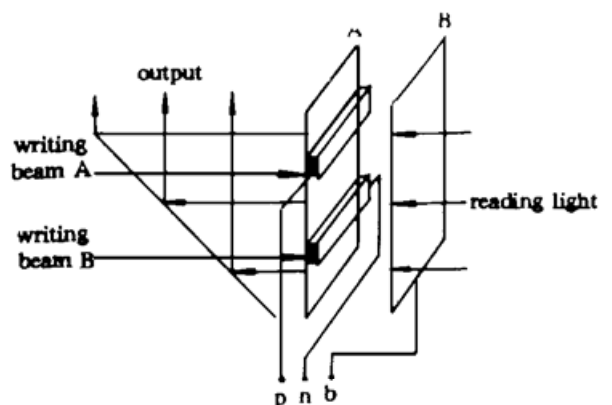


Fig. 2 Schematic of a pixel

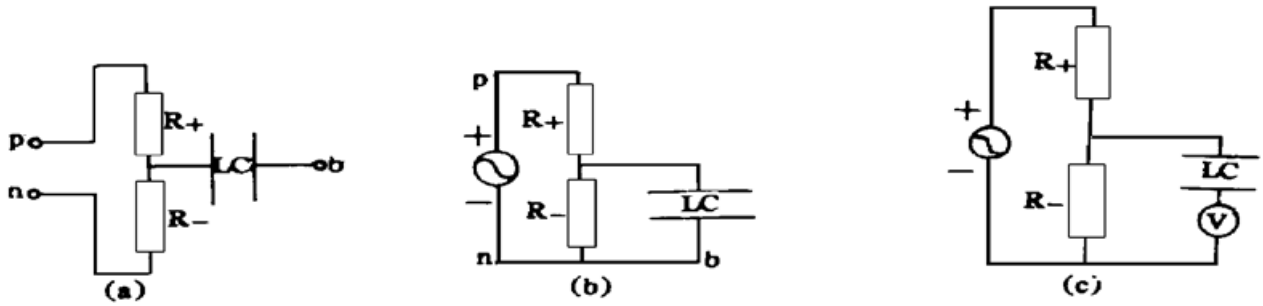


Fig. 3 Equivalent circuit

照射在各像素上的光,使非晶硅的电阻改变,从而也改变了施加在液晶上的电压。而从图3中可以看出,不同部位非晶硅阻值的改变,对分压有着相反的贡献,所以照射在不同部位的光对液晶层具有相反的控制作用,使得器件能够完成两束光之间的相减。施加在液晶层上的电压驱动液晶分子转向,影响相位 δ ,导致不同输出光强。由于液晶分子对驱动电压的反应存在阈值特性,(尤其是液晶分子的预倾角为零时),所以器件透过率对光强的反应具有取阈作用。

当器件的三个电极按图3(b)的接法施加电压时,施加在液晶层的电压由下式决定(这里仅考虑了非晶硅层和液晶层的电阻,这种近似在驱动频率小于电路的特征频率时是成立的):

$$U = U_0 \left[\frac{1}{R_-} + \frac{1}{R_{LC}} \right]^{-1} / \left[R_+ + \left[\frac{1}{R_-} + \frac{1}{R_{LC}} \right]^{-1} \right] \quad (2)$$

作为简单近似,非晶硅的电阻可以表示为:

$$R = (\alpha I)^{-1} \quad (3)$$

其中 I 为照射光强, α 为光敏系数。把(3)式代入(2)式,可得:

$$U = \frac{I_+ U_0}{I_+ + I_- + (\alpha R_{LC})^{-1}} \quad (4)$$

其中 I_+ 和 I_- 为照射在不同部分非晶硅上的光强。为简单计,假设液晶具有两态的电光效应,即:

$$\begin{cases} U > V_c & \text{开态} \\ U \leq V_c & \text{关态} \end{cases} \quad (5)$$

当外加驱动电压 U_0 等于 $2V_c$ 时,结合以上两式,可得:

$$\begin{cases} I_+ - I_- > \frac{1}{\alpha R_{LC}} & \text{开态} \\ I_+ - I_- \leq \frac{1}{\alpha R_{LC}} & \text{关态} \end{cases} \quad (6)$$

同此可见,当器件的电光效应是二值函数时,器件的透过率是对两束光相减结果硬取阈的结果,其阈值为 $(\alpha R_{LC})^{-1}$ 。不难理解,当器件的透过率不是二值,而是一个连续函数时,它的透过率是对两束光相减后连续取阈的结果。

器件实际上是利用了液晶的电控双折射工作方式。其优点是具有更陡的电光特性,在同样的光生转移电压下能产生更大的透过率变化。器件利用了非晶硅的光电导特性和液晶的电光特性实现了取阈操作。这不需要复杂的超大规模集成电路技术,就能得到更大的开口率和更高的分辨率和空间带宽积。

4 实验结果

4.1 器件的电光特性

由(1)式可知器件的透过率和波长有关。在实验中应选择适当的波长使得在关态时器件透过率最小, 以达到最大的对比度。为此测量了它在关态时的透过率曲线, 发现当读出光波长为 570 nm 时, 关态透过率最小。因此用中心波长为 570 nm, 半宽 10 nm 的滤色片得到单色输出光。

在 $20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 光强照射下, 测量了不同的驱动电压下的器件透过率。此时外加电压按一个特定的分压比施加在液晶层上。在 p 极和 n 极之间施加 50 Hz 的交变电压, 同时测量 n 极对 b 极的电压, 如图 3(c)。当电压表内阻足够大时, 即测得施加在液晶层上的真实电压。图 4 是测得的透过率对电压的关系曲线。其阈值电压约为 0.5 V, 对比度大于 20。电光特性是器件光控作用的基础。从图 4 可以看出, 曲线存在五个不同的相。在第二相和第三相分别能得到最大的正斜率光控效应和负斜率光控效应, 可把它用于光寻址液晶光阀中。而为了实现取阈操作, 却必须包括第一相, 在本文的实验中, 驱动电压设为 $2V_c$, 约为 1.0 V, 大约包括第一相和第二相。

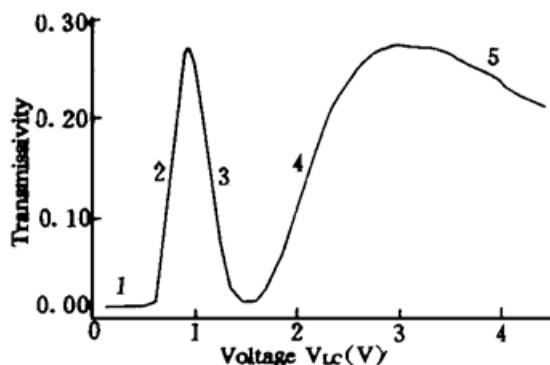


Fig. 4 Transmissivity as a function of driven voltage

4.2 光学相减取阈

为了实现相减, 首先需要把要求相减的两束光分别照射在不同部位的非晶硅上(正负两个

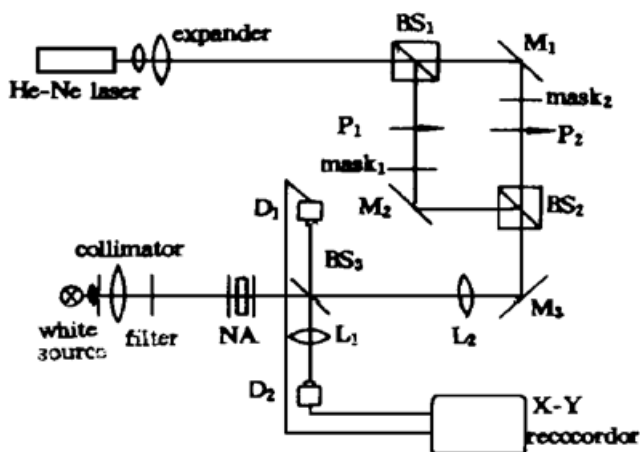


Fig. 5 Setup diagram, BS₁₋₃: Beam splitter, P₁, P₂: Polarizer, M₁ ~ M₃: Mirror, L₁, L₂: Image lens, D₁, D₂: Detector

通道)。这一要求可用多种方法实现: 可以在两个不同通道的光敏层的部位贴加两色滤光片, 用相应波长的输入正负通道的信息, 实现波长编码的相减; 也可以用掩模使两个通道的光分别照射在不同的光敏层, 实现位置编码的相减。为此建立了如图 5 所示的系统, He-Ne 激光器输出的光经过滤波扩束后, 以分束镜 BS₁ 和反射镜 M₁ 后得两束光(正负两通道), 分别照射在模板 Mask₁ 和 Mask₂ 上。两模板都是占空比为 1 的黑白光栅。适当调节二者的位置, 使得它们经 M₂ 和 BS₂ 合束后, 差半个周期(Mask₁ 的黑条纹与 Mask₂ 的白条纹重合)。这样经过成像透镜 L₂ 后, 正负两个通道的光正好照射在神经元阵列 NA 相应的光敏层上。两个通道的光还被分束镜 BS₃ 采样, 双通道探测器 D₁ 探测照射在某一像素上的两束光, 经差分放大器后输入 X-Y 记录仪的 X 轴。白光光源经准直镜和滤波片后得到中心波长为 570 nm 的平行光, 作为器件的读出光。读出光经过神经元阵列后的输出光经分束镜 BS₃, 透镜 L₁, 到达探测器, 探测器探测某一个像素的输出后, 输入 X-Y 记录仪的 Y 轴。

实验中, 采用图 3(b) 的接法, 用有效值 1 V, 50 Hz 的正弦信号驱动。通过改变 P₁ 和 P₂ 的方向, 分别增加正通道或负通道的光强, 测量输出光强和正负两通道光的差分信号之间的关系。得到两条基本重合, 但走向相反的曲线, 如图 6 所示。

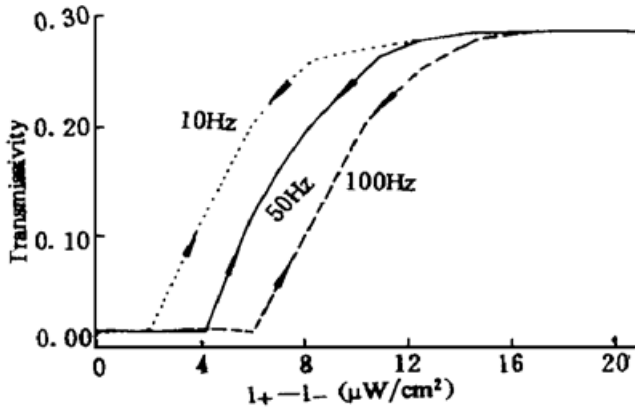


Fig. 6 Subtracting and thresholding character curves with "up arrow" are the results of increasing positive light, curves with "down arrow" are results of increasing negative light

横轴是两束光相减的结果。可见每个像素的透过率是对两束光相减的差取阈的结果。阈值为 $4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。实现了

$$O = f(I_+ - I_- - th) \quad (7)$$

O 为输出光强, I_+ 和 I_- 为两束光强, th 为光强阈值。 f 是类似于 sigmoid 的非线性函数。

从(6)式可以看出, 阈值和液晶的电阻及非晶硅的光敏系数有关。在实际应用中一般要求阈值可调。从(6)式还可以看出, 只要给正负通道增加一个光偏置, 就能独立地增加或减小每一个像素的阈值。另一方面, 在上面的推导中, 假设了驱动电压频率低于电路的特征频率, 并仅考虑了非晶硅和液晶的电阻, 所以改变驱动频率势必影响施加在液晶层上的

电压。这可以全局地改变器件的阈值。作者发现当施加不同频率的驱动电压时, 器件的阈值可以在一定范围内可调。如图6所示。

4.3 响应时间

由于采用的液晶层厚度较薄, 器件响应速度较快。对于 1 V 的驱动电压, 响应时间约 20 ms 左右。

4.4 光学神经元阵列

器件的每一个像素都独立地完成相减和取阈功能, 由于光学相加又可以简单地通过光束叠加来实现, 所以它的每一个像素都能完成上述人工神经元的三种功能。配合适当的外部光学系统, 它就能实现一种全并行的双极神经网络系统。

另一方面, 由于光学相减, 光学取阈还是光学信息处理中重要的处理功能。它还可以广泛应用于光学信息处理系统中。

结 论 本文研制了一种可以实现并行光学相减, 取阈操作的灵巧像素神经元阵列器件。它能克服以往光学神经网络系统串行取阈相减的速度瓶颈, 充分发挥光学二维并行的特点。该器件结构简单, 制造容易, 能够得到较高的空间带宽积和开口率。使用一般的光刻技术(假设每一个像素 $50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$), 在 1cm^2 的有效面积上, 能集成 40000 个神经元。它在弱光下工作, 在光学神经网络和光学信息处理系统中有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] H. S. Hinton, Optical computing: introduction by the feature editors. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(8) : 1335~ 1336
- [2] Chein-Hsun Wang, B. Keith Jenkins, Subtracting incoherent optical neuron model: analysis, experiment, and applications. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(14) : 2171~ 2185
- [3] N. H. Farhat, D. Psaltis, A. Prata *et al.*, Optical implementation of the Hopfield model. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(10) : 1469~ 1475
- [4] T. Lu, S. Wu, F. T. S. Yu, Two dimensional programmable optical neural network. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(22) : 4908~ 4913

- [5] F. T. S. Yu, T. Lu, X. Yang *et al.*, Optical neural network with pocket-sized liquid-crystal television. *Opt. Lett.*, 1990, **15**(15) : 863~ 865
- [6] B. K. Jenkins, A. R. Tanguay, Jr., Optical architectures for neural network implementation, Handbook of neural computing and neural networks, MIT press, Boston 1995 : 673~ 677
- [7] D. Vass, Electrically programmed optical logic arrays, UKDTI Patent 8910168.7
- [8] C. C. Mao, K. M. Jhonson, Optoelectronics array that computers error and weight modification for a bipolar optical neural network. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(8) : 1290~ 1294
- [9] I. B. Tana, J. P. Sharpe, D. J. McKnight *et al.*, Smat-pixel spatial light modulator for incorporation in an optoelectronic neural network. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(3) : 303~ 305
- [10] 王勇竞, 郭转运等, 二维并行取阈液晶光阀的研制. 光学学报, 1997, **17**(1) : 69~ 73

Liquid Crystal Optoelectronic Neuron Array

Wang Yongjing Guo Zhuanyun Zhang Yanxin Zhang Teiqun

(*Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*)

Zhao Yin Xiong Shaozhen

(*Institute of Optoelectronics, Nankai University, Tianjin 300071*)

(Received 26 June 1996; revised 13 December 1996)

Abstract A liquid crystal neuron array with 8×8 neurons which can implement optical subtracting and thresholding parallel has been fabricated. It operates in parallel, that is, all the pixels of input are processed together simultaneously. The device is based on amorphous silicon photoconductor and features of liquid crystal rather than VLSI. So it can have higher aperture ratio, higher resolution and higher space bandwidth product.

Key words artificial neuron, thresholding, subtracting, liquid crystal light valve, optical neural networks, optical processing.