

二维并行取阈液晶光阀的研制*

王勇竞 郭转运 刘德明 牛孔真

(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘 要 研制了一种透射式二维并行取阈液晶光阀, 它能克服光学神经网络、光学信息处理系统中串行取阈的速度瓶颈, 充分发挥光学处理系统空间带宽积大的优点。其分辨率可达 45 l/mm 以上, 响应时间 10 ms 左右, 等效串行取阈处理速度达 4×10^7 time/s。它具有有一种新型控制电极, 制作简单, 以透射方式工作。该器件灵敏度高, 能在弱光下工作, 使用简单, 可以直接插在光路中使用。

关键词 取阈, 液晶光阀, 光学神经网络, 光学信息处理。

1 引 言

取阈是信息处理和神经网络中的一种重要操作。它一方面可以压制信号噪声, 除去不想要的信号, 反映了对信号的去伪存真处理; 另一方面又是神经网络中非线性处理能力的来源^[1], 是人工神经元的重要功能^[2, 3]。光学以其巨大的互连能力和并行处理能力, 在上述领域有着广阔的应用前景, 所以用光学方法实现取阈操作多年来一直是重要的研究课题。光学取阈操作一般有以下几种实现方法。第一, 利用光电转换器件完成光电转换, 再由特殊电路或计算机完成取阈, 最后经电光转换, 把取阈后的信号还原成光信号, 间接实现光学取阈。这一方法, 如果用电路来实现^[4], 由于面临引线复杂的困难, 难于实现较大规模。如果用计算机来实现^[5], 则实际上是串行方法, 不能充分发挥光学并行的优势, 同样也限制了系统规模, 难以满足图像处理 and 光学神经网络对并行二维多通道(1000 路以上)处理的要求。第二, 利用反射式光寻址液晶光阀的阈值特性实现取阈操作^[4, 6]。这种方法需要第二个光源读出, 打断了光路, 增加了系统的复杂性。也有用电子陷阱材料等方法并行实现的^[7], 但是其取阈特性不理想, 阈值不能调节, 没有被广泛使用。近年来结合光学二维并行性和电子学易控制、可编程优点的光电子学器件受到了人们的广泛重视^[8]。利用这一技术的灵巧像素器件^[9], 能很好地完成并行取阈操作, 但要求超大规模集成电路的技术, 所以目前还没有大规模、高分辨率的灵巧像素取阈器件见诸报道。作者研制了一种透射型、具有新型控制机构的液晶光阀, 它充分利用了液晶的物理特性, 避免了对超大规模集成电路技术的要求, 具有较好的取阈特性。

取阈操作是输出信号和输入信号之间的一种非线性关系实现, 不同的处理系统, 所要求

* 国家自然科学基金资助课题。

收稿日期: 1996 年 1 月 15 日; 收到修改稿日期: 1996 年 5 月 10 日

的非线性关系也不尽相同。对于通常的神经网络而言，常用的取阈函数主要有硬取阈和 Sigmoid 函数等。而对于光学信息处理中背景噪声的消除和某些神经网络模型，比如胜者全取模型，则要求输出对小于某一阈值的信号不反应，对超过这一值的信号呈线性输出^[10]。这些不同的取阈函数见图 1。

2 器件结构及制作

透射型液晶光阀曾有过报道^[11]，它使用一种复杂的横向控制，处理较为困难。作者研制了一种纵向控制的透射型光阀机构。器件的结构如图 2 所示。

在基片 A 上先镀制透明导电膜 ITO 层(图 2 中 C)，其电

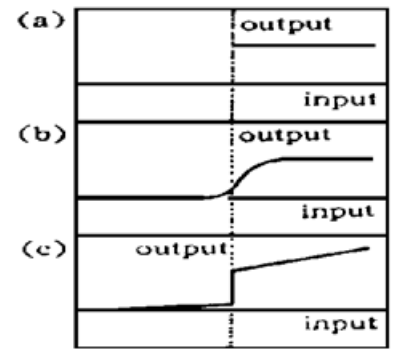


Fig. 1 Thresholding types

- (a) binary thresholder,
- (b) sigmoid function,
- (c) standard thresholder

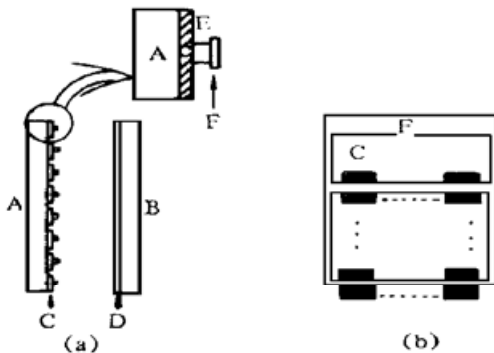


Fig. 2 Construction diagram of device, (a) cross section of device, (b) vertical view of substrate A

A, B: substrate, C, D: ITO, E: amorphous silicon layer, F: aluminum layer

阻为 $100 \Omega/\square$ ，并刻蚀成 $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ 的单元，单元间距 $2 \mu\text{m}$ 。其上依次蒸镀 $1 \mu\text{m}$ 厚度的非晶硅层(图 2 中 E)和 $0.1 \mu\text{m}$ 厚的引出电极铝层(图 2 中 F)。二者均被刻蚀成宽为 $5 \mu\text{m}$ 的条状结构，由于刻蚀非晶硅工艺上的钻蚀问题，非晶硅条略窄于铝条，有利于光屏蔽。铝条作为引出电极，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(图 2 中 D)，和高度为 $4 \mu\text{m}$ 的间隔岛。然后在 A、B 两个基片上倾斜蒸镀 SiO 定向层，最后把两片水平定向的基片组装成液晶盒，充填 BDH 的 E7 液晶供实验使用。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简图如图 3(a) 所示，工作光从镀有非晶硅的基片一侧入射。各

像素的等效电路如图 3(b) 所示。这里已经忽略了引出电极直接和上极板之间的光学和电学作用。光学上，由于铝电极不透明，液晶被调制后的透过率变化并不调制工作光束。电学上，它们之间的电阻电容并联在电源的输出端上，对内部电路不产生影响。当然由于极板之间电场的边缘效应，两者之间的电场对靠近铝电极的窗口部分的液晶仍有一些调制作用。可以通过优化结构参数进一步减小这种边缘效应。

光强为 I 的入射线偏光按照在液晶层的光轴方向(定向方向)分解为 o 光和 e 光，经过液晶盒后，输出光强为：

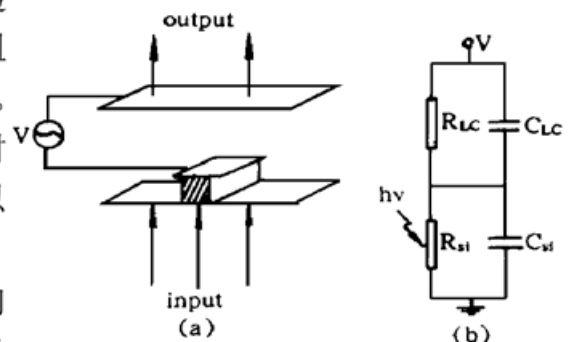


Fig. 3 (a) pixel layout, (b) equivalent circuit of a pixel

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

其中 d 为液晶盒的厚度, n_o 和 n_e 分别为寻常光和非常光的折射率。

照射在各象素上的光, 改变非晶硅的电阻, 从而也改变了施加在液晶上的分压, 该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。

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, 同样的电压转移下能产生更大的透过率变化。但是由于时间关系, 没对器件的结构参数作全面的优化, 从上式可以看出, 为了使器件在“关态”的透过率为零, 对应于实验中的具体参数 ($\Delta n = 0.225$, $\gamma = 0.6328 \mu\text{m}$), 液晶盒厚应为 $d = 2.8, 5.6, 8.4 \mu\text{m}$ 等。

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。它不需要复杂的超大规模集成电路技术, 能够得到更大的开口率和更高的分辨率(45 l/mm 以上), 空间带宽积高达 4×10^5 。

4 实验结果

4.1 器件的电控特性

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。如图 4 所示。其对比度大于 30, 响应速度和电压有关, 对于 1.7 V 左右的电压, 约为 10 ms 左右。电控特性是器件光控作用的基础。从图中可以看出, 曲线存在五个不同的相, 在第三相和第四相分别能得到最大的正斜率光控效应和负斜率光控效应。可以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。

4.2 器件的光控特性

为了给器件提供更多的灵活性, 使之还能应用于除取阈之外的其它场合, 器件中用铝条作为引出电极。铝条对光的屏蔽作用, 使得器件对光的作用具有了方向性, 沿镀有非晶硅基片一测入射的光能够调制器件的透过率, 反向照射的光则只能被调制。为了测量写入光对器件的光控作用, 本文建立了如图 5 所示的系统。读出光随写入光强的变化如图 6。它反应了器件透过率随写入光强的变化。这是该取阈器件的第一种工作方式: 双光束取阈。它能对写入光强进行取阈操作, 然后读出光读出取阈结果。可见阈值约为 $7 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 左右, 光强 $40 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 时, 输出接近饱和, 对比度约为 16.1。器件对工作光强要求较低, 可以在弱光下工作。它有比较明显的趾部和肩部, 但由于器件的厚度并非最佳值, 两者之间的曲线并非单调增加的。只要适当调节液晶盒厚度或采用适当的工作波长就能消除这一缺点, 得到与 Sigmoid 函数相近的取阈函数, 应用于光学神经网络中。另外输出光对写入光来说可以有增益, 有利于网络的级连和迭代。其缺点主要是系统中需要第二个光源, 器件打断了光路, 增加了系统的复杂性。

更重要的是该器件还能实现对输入光束的直接取阈: 单光束取阈。以写入光束从写入面直接照射器件, 通过器件后的光即为对写入光取阈的结果。系统安排如图 6 所示。实验结果如图 7 所示。可以看出由于输出光是器件的透过率和写入光强相乘的结果, 所以取阈函数和

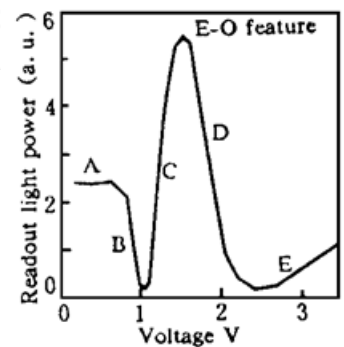


Fig. 4 Transmissivity as a function of driven voltage

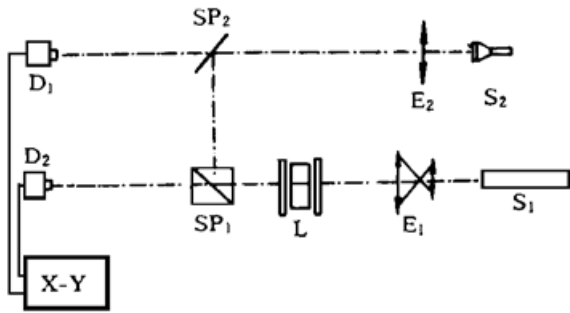


Fig. 5 Setup diagram: two beam thresholding

S₁: He-Ne laser, S₂: white light source, E₁, E₂: beam expander, L: device, SP₁, SP₂: beam splitter, D₁, D₂: detector, X-Y: XY recorder

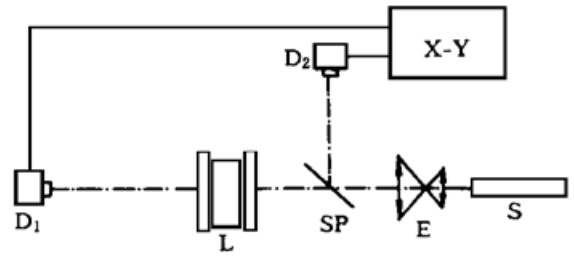


Fig. 6 Setup diagram: single beam thresholding

S: light source, E: beam expander, SP: beam splitter, X-Y: XY recorder

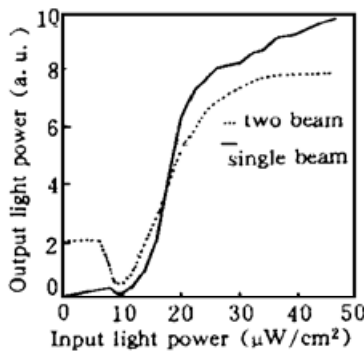


Fig. 7 Thresholding character

双光束取阈有一定差别,尤其是通常取阈函数的饱和区域变成线性增加。由于线性区的斜率并不十分大,它仍然可作为 Sigmoid 函数的一种近似应用于光学神经网络中。另一方面,这一特性可以用于光学信息处理中的噪声抑制,也可以用来实现胜者全取神经网络中所需要的神经元的反应函数。这种单光束工作方式也是该阈值器件区别于用普通液晶光阀实现取阈的重要优点之一。它并不要求改变系统的光路,直接把器件插在光路中就可以实现对两维光束的取阈,使用简单,能实现所谓“即插即用”。

由于液晶盒较薄,器件具有较快的响应速度,响应速度可达 10 ms 左右。器件的各个像素(4×10^5 time)能够并行完成取阈操作,其等效串行取阈速度高达 4×10^7 time/s。

结 论 研制了一种可以实现光学取阈操作的透射型液晶光阀,它有以下几个优点: 1) 空间带宽积大,能充分发挥光学二维并行的特点,消除光学神经网络和信息处理系统中串行取阈的速度瓶颈。分辨率达 45 l/mm 以上,空间带宽积高达 4×10^5 ,响应速度 10 ms 左右,等效串行取阈处理速度 4×10^7 time/s,能满足目前光学神经网络和信息处理系统的要求; 2) 它能在弱光下工作,而且相干光非相干光都能工作; 3) 器件结构简单,制作容易,使用方便,能够直接插在光路中使用。

参 考 文 献

- [1] John Moody, Norman Yarvin, Networks with learned unit response function. *Advances in Neural Information Processing System 4*, J. E. Moody et al., Eds. Morgan Kaufmann Publisher, San Mateo, CA, 1992, 430~ 438
- [2] W. S. McCulloch, W. Pitts, A logical calculus of the ideas imminent in nervous activity. *Bull. Math. Biophys.*, 1943, 5(3) : 115~ 133
- [3] C. H. Wang, B. K. Jenkins, Subtracting incoherent optical neuron model: analysis, experiment, and applications. *Appl. Opt.*, 1990, 29(14) : 2171~ 2186
- [4] N. H. Farhat, D. Psaltis, A. Prata et al., Optical implementation of the hopfield model. *Appl. Opt.*, 1985, 24(10) : 1469~ 1475

- [5] T. Lu, F. T. S. Yu, D. A. Gregory, Self-organizing optical network for unsupervised learning. *Opt. Eng.*, 1989, **20**(8) : 1107~ 1113
- [6] C. H. Wang, B. K. Jenkins, Subtracting incoherent optical neuron model: analysis, experiment, and applications. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(14) : 2171~ 2186
- [7] A. D. McAulay, J. Wang, X. Xu, Optical adder that uses spatial light rebroadcaster. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(26) : 5584~ 5591
- [8] H. S. Hinton, Optical computing: introduction by the feature editors. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(8) : 1335~ 1336
- [9] K. M. Johnson, D. J. McKnight, I. Underwood, Smart spatial modulation using liquid crystals on silicon. *IEEE. J. Quant. Electron.*, 1993, **QE-29**(2) : 699~ 714
- [10] A. Bergeron, H. H. Arsenault, E. Eustache *et al.*, Optoelectronic thresholding module for winner-take-all operations in optical neural networks. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(8) : 1463~ 1468
- [11] P. R. Ashley, J. H. Davis, T. K. Oh, Liquid crystal spatial light modulator with a transmissive amorphous silicon photoconductor. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(9) : 1797~ 1800

Two-Dimensional Nonlinear Thresholding Liquid Crystal Light Valve

Wang Yongjing Guo Zhuanyun Liu Demin Niu Kongzhen

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

(Received 15 January 1996; revised 10 May 1996)

Abstract A transmissive two-dimensional nonlinear thresholding liquid crystal light valve has been fabricated. Each pixel occupies $20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ square and consists of a photodetector and control electrode pad. Its electrooptics, photooptics, and thresholding feature is measured.

Key words thresholding operation, liquid crystal light valve, optical neural networks, optical processing.