

利用电子俘获材料实现光学 IPA 神经网络模型*

阮 昊 陈述春 戴凤妹 干福熹

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘 要 报道用自行研制的 $\text{CaS}(\text{Eu}, \text{Sm})$ 电子俘获材料表示互联权重矩阵以实现光学 IPA 神经网络模型。由于 $\text{CaS}(\text{Eu}, \text{Sm})$ 的红外激励发光强度与俘获的电子密度及红外读出光强度之积成线性关系, 故可用来表示互联权重矩阵以实现光学神经网络。这种互联权重矩阵具有很宽的数值范围, 并可以用光学的办法进行快速擦除、重写。

关键词 电子俘获, IPA 神经网络, 互联权重矩阵。

1 引 言

近年来, 神经网络的研究受到了人们的充分重视。简单人工神经网络是由大量简单的非线性单元通过相互间的加权连接而构成的并行信息处理系统。在光学实现中, 需要有一个能实时表示互联权重矩阵、并具有高灰阶和高清晰度等优点的空间光调制器。目前普遍使用的空间光调制器由于性能上的不足或成本过高(如液晶光阀), 在进一步应用上受到一定限制^[1]。新近开发的电子俘获材料, 由于具有能量需求低、可擦除重写、清晰度高、响应速度快以及高信噪比等优点, 受到了大家的关注, 并已在光存储、光学信息处理中进行了很多应用研究^[2~4]。McAulay 等人报道了用 Quantex 公司研制的电子俘获材料进行并行矢量矩阵相乘的实验^[5]。本文分析了自行研制的 $\text{CaS}(\text{Eu}, \text{Sm})$ 电子俘获材料的光学特性, 根据红外激励发光强度与俘获的电子密度及红外读出光强度之积成线性的特性, 用 $\text{CaS}(\text{Eu}, \text{Sm})$ 表示互联权重矩阵, 进行了 IPA 神经网络模型的演示实验。

2 电子俘获材料与互联权重矩阵

实验所用的电子俘获材料为 $\text{CaS}(\text{Eu}, \text{Sm})$, 合成情况另文描述。用合成的材料制成 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 厚的多聚物薄膜进行实验。 $\text{CaS}(\text{Eu}, \text{Sm})$ 吸收和存储蓝绿光之后, 在近红外光作用下, 发射红色可见光^[6]。其中, 掺杂的 Eu^{2+} 离子形成发光中心, Sm^{3+} 为电子俘获中心; Eu^{2+} 吸收光子后, 一个外层电子被激发, 并通过隧道作用被 Sm^{3+} 俘获; 由于俘获电子的陷阱很

* 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 8 月 27 日

深, 于是被俘获的电子就能长时间保持在陷阱中; 但当用与陷阱深度相当的近红外光激励时, 电子又能从陷阱中释放出来, 并与光学中心俘获的空穴复合发光。

理论分析表明, 当材料有足够的陷阱时, 在非饱和情况下, 红外激励发光强度 I_f 与俘获的电子密度 N_{tr} 及红外读出光强度 I_d 之积成线性关系^[6]:

$$I_f = h\nu N_{tr} A_E I_d \sigma_a \eta_f \quad (1)$$

式中 ν 为发光频率; A_E 为发光中心离子向基态辐射跃迁的速率; σ_a 为俘获中心离子对读出光的吸收截面; η_f 为电子-空穴复合发光的效率。图 1 给出 CaS(Eu, Sm) 在读出光强 I_d 为 0.1 mW/cm^2 情况下, 红外激励发光强度与写入光能量的关系。在出现饱和之前, 两者具有很好的线性关系。实际上, 最低可探测的写入水平可到 $1 \mu\text{J/cm}^2$ 以下。图 2 给出不同俘获电子的水平下, 红外激励发光强度对红外读出光强度的线性关系。随着红外光照时间的延长, 俘获电子数会减少, 并且, 衰减速度随着红外光强度的增大而加快; 当陷阱全部倒空时, 就不再发光了。因此, 可以利用较强的红外光快速排空陷阱, 擦除原有记录。

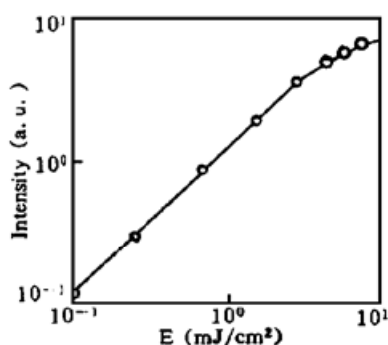


Fig. 1 The intensity of stimulated luminescence plotted as a function of energy of writing light in 485 nm

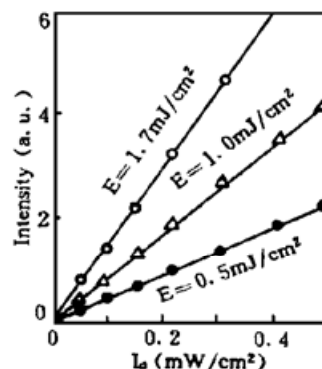


Fig. 2 The linearity of stimulated luminescence versus infrared reading power under different writing energy levels

所以, 可以用 CaS(Eu, Sm) 电子俘获薄膜上俘获的电子密度分布来代表互联权重分布, 用强度调制的红外光(其光强分布代表输入模式)照射电子俘获薄膜, 薄膜发出的红色可见光通过适当的光学成像系统得到的图像就是加权求和的结果。同时, 红外激励发光强度与俘获的电子密度及红外读出光强度之间的线性范围很大, 使所表示的互联权重矩阵可以有很宽的数值范围。矩阵可以用较强的红外光进行擦除, 用光强调制的蓝绿色写入光进行重写。随着半导体微型激光器阵列的出现, 可以预料, 在计算机控制下, 用光学的办法实时改变电子俘获材料所表示的互联权重矩阵是完全可行的^[7]。由于电子俘获材料低的能量需求以及几十个纳秒的响应时间(具体结果另文发表), 使改写操作可以在很短时间内完成。在用红外光进行信息读出时, 存储的电子会有一定程度的减少; 但采用弱的红外光(最低可探测红外读出光强度可在 $0.1 \mu\text{J/cm}^2$ 以下)或脉冲红外光进行读出, 可使系统在完成全部操作过程之后, 俘获电子减少形成的误差控制在许可范围之内。

3 用电子俘获材料实现 IPA 神经网络模型

IPA 模型是 Lu 等人于 1990 年提出的^[8]。在建立互联权重时, 考虑了各存储模式之间的相互联系, 各存储模式之间的相同之处和不同之处以及它们在联想过程中的不同作用。实验和计算机模拟的结果都表明, IPA 模型的寻址能力和存储容量都比 Hopfield 模型有很大的提

高。对存有 P 个模式的一般情况，存储模式由一个二维矩阵 V 表示， $V_{ij}^{(S)}$ 表示第 S 个模式的第 ij 个元素的状态，取值为“0”或“1”。引入量 d_{ij} 表示存储模式中第 ij 个元素的状态之和：

$$d_{ij} = \sum_{s=1}^P V_{ij}^{(S)}, \quad (i = 1, 2, \dots, M; j = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

为表示存储模式中一个模式与其它模式的相互关系，进而确定输入与输出的互联关系，引入量 K_{ijkl} ：

$$K_{ijkl} = \sum_{s=1}^P V_{ij}^{(S)} V_{kl}^{(S)}, \quad (i, k = 1, 2, \dots, M; j, l = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

若以输入神经元和输出神经元分别表示输入模式元素和输出模式元素，对于 $M \times N$ 个元素组成的二维模式，IPA 神经网络模型的输入/输出关系可以由以下迭代公式表示：

$$V_{ij}(n+1) = f \left[\sum_{k=1}^M \sum_{l=1}^N T_{ijkl} V_{kl}(n) \right] \quad (4)$$

T_{ijkl} 为互联权重， $f(x)$ 为阈值函数，定义为：

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

当经过 n 次迭代，第 $n+1$ 次迭代输出与第 n 次迭代的相同时，系统输出一稳定模式。

为计算互联权重 T_{ijkl} ，建立以下规则：

1) 若 $K_{ijkl} = \text{Min}(d_{ij}, d_{kl})$ ，且 $K_{ijkl} \neq 0$ ，

当 $d_{ij} > d_{kl}$ 时， $T_{ijkl} = 1, T_{klij} = 0$ ，表示第 ij 个神经元不能激发第 kl 个神经元，但第 kl 个神经元可以激发第 ij 个神经元；

当 $d_{ij} = d_{kl}$ 时， $T_{ijkl} = T_{klij} = 1$ ，表示第 ij 个和第 kl 个神经元可以互相激发。

2) 若 $0 < K_{ijkl} < \text{Min}(d_{ij}, d_{kl})$ ，

此时， $T_{ijkl} = T_{klij} = 0$ ，表示第 ij 个神经元和第 kl 个神经元没有相互作用。

3) 若 $K_{ijkl} = 0$ ，

当 $d_{ij} \neq 0, d_{kl} \neq 0$ ，则 $T_{ijkl} = T_{klij} = -1$ ，表示第 ij 个神经元和第 kl 个神经元互相抑制；

当 $d_{ij} = 0$ 和(或) $d_{kl} = 0$ ，则 $T_{ijkl} = T_{klij} = 0$ ，表示第 ij 个神经元和第 kl 个神经元没有相互作用。

为了简化实验装置，仅采用了正的互联权重，而把 IPA 模型互联权重矩阵中的负值部分去掉(即置 0)。这是由于负的互联权重在 IPA 模型中只占很小的份额，它们的作用可以通过阈值操作来调整，而且，在本实验中只需要一次迭代过程；Shariv 和 Wang 等人的工作证明了这种处理的可行性^[9, 10]。

图 3 是用电子俘获材料实现光学 IPA 神经网络模型的实验示意图。红外光用普通白炽灯

配合只透红外光的截止型滤光片得到。红外光在穿过输入掩模后，光强得到调制，透光和不透光分别代表“1”和“0”；互联权重矩阵用电子俘获薄膜制作；用只感应可见光的一次成像 Polaroid 底片拍摄电子俘获薄膜的红色发光图象作为实验结果。系统存储模式为三个 5×4 点阵的阿拉伯数字 8, 6, 0[[]见图 4(a)]，所以互联权重矩阵就变成了四维的。按上述的规则计算互联权重 T_{ijkl} ，

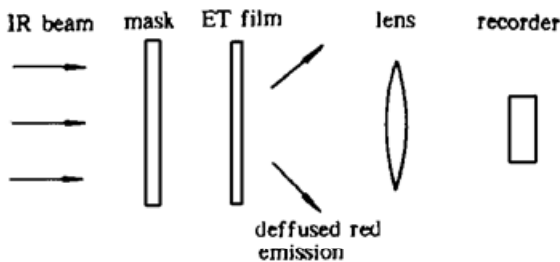


Fig. 3 Optical setup for IPA model employing an-electron trapping film

并参照文献[11]的方法把四维的互联权重重新排列成 5×4 的二维子矩阵阵列 $T_{11kl}, T_{12kl}, \dots, T_{ijkl}, \dots, T_{54kl}$; 每个子矩阵大小为 5×4 [见图 4(b)]。 T_{ijkl} 的下标变量 ij 表示子矩阵在整个互联矩阵阵列中的位置, 第 ij 个子矩阵对应第 ij 个输出神经元; T_{ijkl} 的下标变量 kl 表示权重在子矩阵中的位置, 对应第 kl 个输入神经元。按上述方法得到 IPA 模型的正值互联权重矩阵如图 4(c) 所示。分别把 “8, 6, 0” 作为输入寻址模式, 这样识别过程就能一次完成, 不需要反复迭代。若按通常的做法, 需要在输入掩模与互联权重矩阵之间用透镜阵列来成像, 把输入模式成像到互联矩阵的每个子矩阵上, 每个输入元素 kl 对应每个子矩阵的第 kl 个权重的位置; 在本实验中, 为了便于实现, 把每个输入寻址模式都复制了 20 份, 按 5×4 的阵列排好, 分别按图 4(d)、(e)、(f) 方式制成模板。把这些模板作为输入掩模, 从而省去透镜阵列。

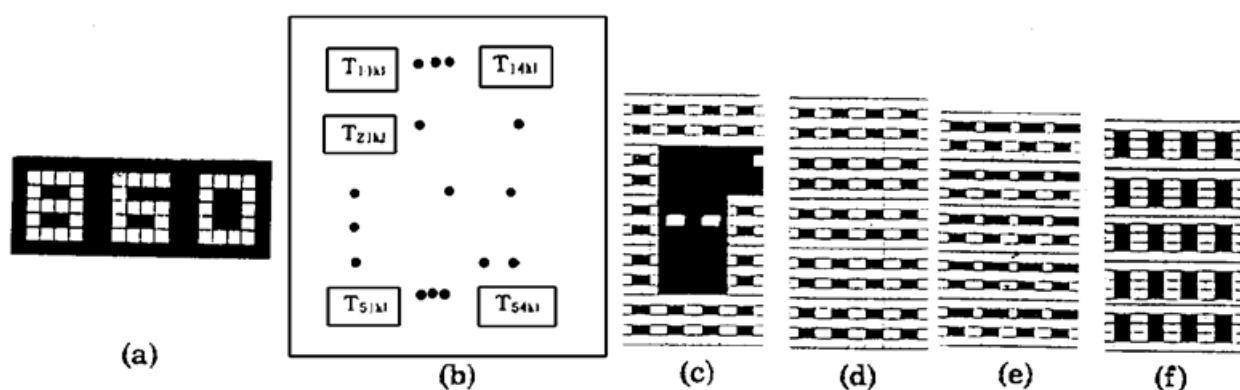


Fig. 4 Three similar Arabic figures as reference patterns (a); partition the four-dimensional weight matrix T_{ijkl} into an array of $T_{11kl}, T_{12kl}, \dots, T_{54kl}$ submatrices (b); the positive part of the interconnection weight matrix of the IPA model (c); input marks (d), (e), (f), which corresponding input patterns “8”, “6”, “0” respectively

在用电子俘获薄膜制作互联权重矩阵时, 先用红外光把俘获有电子的陷阱排空, 再把事先按图 4(b) 制好的互联权重矩阵掩模放在薄膜前, 用蓝绿光进行曝光。对应权重为“1”的位置, 有蓝绿光射入, 它把电子投入到陷阱中去; 对应权重为“0”的位置, 没有蓝光射入, 陷阱仍然是空的。这样, 互联权重矩阵就以俘获的电子密度分布的形式记录在电子俘获薄膜上。图 5(a) 是在均匀红外光照射下, 制作好的电子俘获薄膜发光图像, 正确代表了互联权重矩阵 (由于是从图像背面进行拍摄, 故照片与实际图像左右相反, 下同)。在进行模式识别时, 均匀红外光穿过输入掩模后直接照射到电子俘获薄膜上; 由于红外激励发光强度与俘获的电子密度及红外读出光强度之积成线性关系, 故薄膜发射的红色可见光图像 [图 5(b), (d), (f)] 就相当于一个二维输入寻址模式与一个四维互联权重矩阵的积。例如, 使用 “8” 或 “0” 的输入掩模时, 第(2, 4)个子矩阵的第(2, 4)个互联权重 (即 T_{2424}) 能被透过的红外光照射, 由于权重为 “1”, 即所在点有俘获的电子, 所以有俘获的电子被释放出来与发光中心俘获的空穴复合发光, 在拍摄的照片上, 这一点就是亮的 [分别见图 5(b)、(f)]; 但使用 “6” 的输入掩模时, 虽然互联权重 T_{2424} 为 “1”, 但这一点所对应的输入为 “0”, 即没有红外光透过, 所以没有受激发光, 在拍摄的照片上, 这一点就是暗的 [如图 5(d) 所示]。对于另外一些互联权重, 如 T_{2414} 、 T_{2434} , 虽然红外光通过每个输入掩模后都能照射到它们, 但由于权重本身的值为 “0”, 陷阱是空的, 所以仍然没有受激发光, 在拍摄的三张照片上, 这些点都是暗的。对 Polaroid 底片记录到的结果进行处理 [即对每一子矩阵所对应区域的光强进行求和并按式(5)取阈], 可得到

正确的联想模式[见图 5(c)、(e)、(g)]。实验表明, Ca(Eu, Sm) 电子俘获材料能用来表示互联权重矩阵, 进行正确的模式识别。

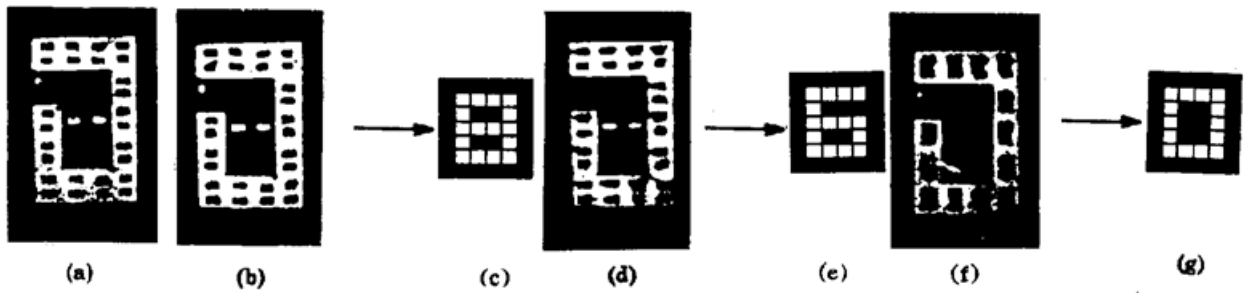


Fig. 5 Experimental results of IPA model. Emission from the electron trapping film verifying the interconnection weight matrix (a); output photographs (b), (d), (f); recalled patterns (c), (e), (g). (The left and right of four photographs are in the converse order)

结 论 基于自行研制的 CaS(Eu, Sm) 电子俘获材料红外激励发光强度与俘获的电子密度及红外读出光强度之积成线性关系的特性, 用 CaS(Eu, Sm) 薄膜来表示互联权重矩阵, 进行了光学 IPA 神经网络模型的演示实验。由实验可见, 用电子俘获材料来实现光学神经网络模型具有以下特点:

1) 由于电子俘获材料的红外激励发光强度与写入光能量之间的线性关系范围可达四个数量级, 使得所表示的互联权重矩阵可以有很宽的数值范围。这样, 电子俘获材料不但可以实现 IPA 这种互联矩阵简单的神经网络模型, 还可以实现如 Hopfield 这类互联矩阵具有较宽数值范围的神经网络模型。

2) 电子俘获材料可以存储互联权重矩阵, 而且存储的矩阵可以用纯光学的办法进行实时擦除重写。这样, 电子俘获材料不但可以用来实现 IPA、Hopfield 等互联权重不变的神经网络模型, 还可以实现如感知机等可以通过学习改变互联权重的神经网络模型。

3) 电子俘获材料还具有较高的能量灵敏度、快速反应速度、成本低、清晰度高等优点。

因此, 可以预料, 随着半导体微型激光器阵列的出现, 电子俘获材料作为一种能表示互联权重的新型光子学器件, 在光学神经网络上会有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] F. T. S. Yu, *Optical Information Processing*. New York, Wiley, 1983
- [2] J. Lindmayer, A new erasable optical memory. *Solid State Technol.*, 1988, **31**(8): 135~ 138
- [3] S. Jutamulia, G. M. Storti, J. Lindmayer *et al.*, Use of electron trapping materials in optical signal processing. I: Parallel boolean logica. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(32): 4806~ 4811
- [4] Z. Wen, A. Bake, N. H. Farhat, Optoelectronic neural dentritic tree processing with electron-trapping materials. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(6): 614~ 616
- [5] A. D. McAulay, J. Wang, C. Ma, Optical heteroassociative memory using spatial light rebroadcasters. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(14): 2067~ 2073
- [6] 陈述春, 戴凤妹, 输出红色光的电子俘获材料及其在图像存储和减法中的应用. *光学学报*, 1995, **15**(12): 1663~ 1668
- [7] J. L. Jewel, Y. H. Lee, A. Scherer *et al.*, Surface emitting microlasers for photonic switching and interclip connection. *Opt. Eng.*, 1990, **29**(3): 210~ 214

- [8] T. Lu, X. Xu, S. Wu *et al.*, Neutral network model using interpattern association. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(2) : 284~ 288
- [9] I. Shariv, A. A. Friesem, All-optical neural network with inhibitory neurons. *Opt. Lett.*, 1989, **14** (10) : 485~ 487
- [10] W. Wang, M. Xu, S. Liu *et al.*, Feature enhanced IPA neural network and optical realization. *Proc. SPIE*, **2026** : 484~ 490
- [11] N. H. Farhat, D. Psaltis, Optical implementation of associative memory based on models of neural network. *Optical Signal Processing*. New York, Academic, 1987

Optical Implementation of IPA Neural Network Using Electron Trapping Materials

Ruan Hao Chen Shuchun Dai Fengmei Gan Fuxi

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 26 June 1996; revised 27 August 1996)

Abstract Optical IPA (Interpattern association) neural network model is implemented using CaS(Eu, Sm) electron trapping materials synthesized by the authors. The intensity of infrared stimulated luminescence from CaS(Eu, Sm) shows a linear relationship with the product of the trapped electrons' density and the infrared reading power. Therefore, these materials are capable of forming the optical interconnection weight matrix, which may have large dynamic range and can be quickly erased and re-written by optical methods.

Key words electron trapping materials, IPA neural network, interconnection weight matrix.