

拓扑层结构中的光学双稳态及其在光神经网络中的应用*

李昀衡¹⁾²⁾ 喻可¹⁾²⁾ 朱天宇¹⁾³⁾ 于桐¹⁾³⁾

单思超¹⁾⁴⁾ 谷亚舟¹⁾⁴⁾ 李志瞳^{1)4)†}

1) (北京邮电大学, 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

2) (北京邮电大学未来学院, 北京 100876)

3) (北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

4) (北京邮电大学理学院, 北京 100876)

(2024 年 4 月 25 日收到; 2024 年 7 月 7 日收到修改稿)

具有光学双稳态的非线性微纳光学器件在光集成电路和光神经网络中有着重要的应用. 然而, 传统光学双稳态特性会受到内部系统无序和外部系统扰动的影响, 不利于应用. 本文利用 SiO_2 和 TiO_2 的拓扑多层薄膜结构, 在拓扑模式电场强度最大的区域引入非线性介电常数, 探究拓扑模式的光学双稳态特性, 并分析了双稳态特性在层厚度变化和折射率变化下的鲁棒性. 最后, 本文将双稳态特性作为非线性激活函数应用到了光神经网络计算中, 相比于传统的非线性激活函数 ReLu 和 Sigmoid, 双稳态非线性激活函数展示出了更好的图像识别精度. 本文结果对研发下一代鲁棒性强的光神经网络有着重要研究意义.

关键词: 光学双稳态, 拓扑层结构, 鲁棒性

PACS: 42.65.Pc, 78.67.Pt

DOI: 10.7498/aps.73.20240569

1 引言

光学双稳态 (optical bistability) 是指光学系统具有多值性的非线性现象, 在一个给定的输入可产生两种不同的稳定态输出, 这两个状态之间可以通过光信号控制发生转换^[1], 出现类似于磁滞回线的光滞回线. 光学双稳器件应用在高速光通信、光学图像处理、光存储、光学限幅器以及光学逻辑元件等方面具有重要意义, 尤其是用半导体材料 (GaAs, InSb 等) 制成的光学双稳器件^[2], 尺寸小 (几毫米直径, 几十至几百微米厚), 功率低

($10 \mu\text{W}/\mu\text{m}^2$ — $1 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$), 开关时间短 (约 10 ns), 成为未来光计算机的逻辑元件. 同时, 光学器件相比较于电子器件有着明显的优点: 开关速度快且不受电磁影响, 使得器件拥有更好的性能和抗干扰性. 但是, 光在传输中会受到散射损耗的影响; 同时微纳光学器件中的光学模式也会受到纳米加工精度、器件表面粗糙度的影响^[3]. 因此, 制备出鲁棒性好的光学双稳态器件变得尤为重要.

拓扑光子学的快速发展为实现强鲁棒性的光学器件提供了很好的思路和方法. 凝聚态中的量子霍尔效应和拓扑绝缘体的发现, 可为光子设计类似的效应, 如光的稳定单向传播 (the robust

* 信息光子学与光通信国家重点实验室自由探索性研究课题 (批准号: IPOC2023ZT03) 和中央高校基本科研业务费专项基金 (批准号: 2022RC28) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhitong.li@bupt.edu.cn

unidirectional propagation of light), 这具有很大的应用前景. 由于光子学系统的灵活性和多样性, 这一领域也为实现奇异的拓扑模型和以新的方式探索和利用拓扑效应开辟了新的机会^[4]. 在已发现的物质拓扑相的凝聚态费米系统中, 一个显著的特性是拓扑绝缘体在整体上是绝缘的, 但在边界处是导电的, 且对材料缺陷具有很强的鲁棒性^[5-7]. 这一特性也可被应用于玻色系统中, 如原子系统^[8]和电磁波系统^[9-11]. 由于拓扑保护, 电磁拓扑边缘模式可以免受导波介质失序和缺陷的影响. 光子晶体中的拓扑边缘态模式 (TES) 由其独特的拓扑保护和局部场增强特性^[12,13], 而在微纳米光电器件中得到了广泛的关注. 在微尺度激光器中, 利用拓扑光子学, 能够在保持较小的尺寸的同时得到稳定的单模激光和高发射功率^[14,15]. 目前, 研究人员在理论上或实验上提出了各种光子结构和方案, 如等离子体纳米粒子^[16]、光波导^[17]、手性双曲超材料^[18]、光环谐振器^[19]、二维光子晶体 (2D PhC) 和三维光子晶体 (3D PhC)^[20] 等.

基于这样的研究背景, 我们设计了由 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 构成的拓扑多层膜结构. 通过在电场最强的

层中引入非线性介电常数, 实现了拓扑态的光学双稳特性. 改变层的周期、厚度以及材料的折射率, 再分别以由低到高和由高到低的光强梯度对材料进行扫描, 对比不同结构共振峰的线宽、峰值和迟滞回线的宽度、阈值, 研究各类参数对拓扑结构中光学双稳性的影响, 发现在周期 $T = 5$ 时所具备的光学双稳性最为优良, 并且在实际加工的误差范围内改变材料的层厚度和非线性系数, 并不会破坏其双稳性, 成功验证了结构的鲁棒性和可行性. 最后, 本文将双稳态的非线性特性作为非线性激活函数应用到了光神经网络计算中, 相比于传统的非线性激活函数 ReLu 和 Sigmoid, 双稳态非线性激活函数展示出了更好的图像识别精度^[21,22]. 本文的研究结果对实现鲁棒性强的光学非线性器件提供了很好的研究思路.

2 模型和仿真结果

如图 1(a) 所示, 我们设计了一个具有中心反转对称拓扑层结构的一维光子晶体 (PhCs). 沿对称中心的上下两侧都是由高低折射率交替的薄膜

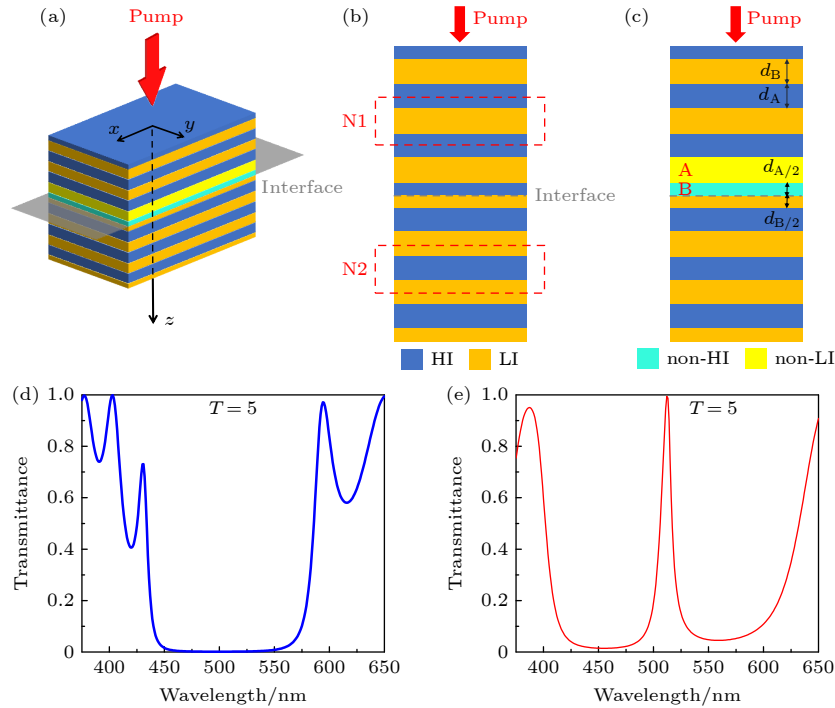


图 1 (a) 拓扑层结构三维示意图; (b) 未加入非线性材料的三维混合结构纵切面图; (c) 加入非线性材料后的切面图, 非线性材料加入到了 A、B 两层中; (d) 周期数 $T = 5$ 时, 拓扑中心对称结构的透射率-波长谱线; (e) 周期数 $T = 5$ 时, 镜面对称结构的透射率-波长谱线

Fig. 1. (a) Three dimensional schematic of topological layered structure; (b) cross section view of the topological layered structure; (c) cross section view of the topological layered structure when the nonlinear permittivity is introduced in layer A and B; (d) transmission spectrum of topological layered structure when $T = 5$; (e) transmission spectrum of mirror-symmetric layered structure when $T = 5$.

层构成, 其中高折射率介质 (HI) 用深黄色表示; 低折射率介质 (LI) 用深蓝色表示. 由对称中心向上下两侧均为周期性层结构, 但每一个周期中层的排列顺序不同. 向上一侧为 N1(HI-LI-HI), 向下一侧为 N2(LI-HI-LI). 图 1(b) 所示的截面图中描述了周期数 $T = 3$ 的拓扑层结构, 其中 HI 折射率为 $n_{\text{HI}} = 2.3$, LI 折射率为 $n_{\text{LI}} = 1.5$, HI 的厚度为 $d_{\text{B}} = 62 \text{ nm}$, LI 的厚度为 $d_{\text{A}} = 70 \text{ nm}$ [23].

在两个 PhC 的界面上, 局域拓扑态的存在是由它们的表面阻抗失配决定的, 这与界面两侧位于 PhC 能带的几何相位 (即 Zak 相位) 有关 [24,25]. 当在界面两侧的 PhC 具有相反符号的表面阻抗时, 可以产生拓扑态. 其中 Zak 相位是一个量子化的拓扑常数, 数值为 0 或 π , 用于描述整个系统的拓扑特性. 由于在反转对称中心两侧的光子晶体具有相同的能带结构, 但具有不同的 Zak 相位, 导致两个 PhC 界面处可以产生拓扑态. 图 1(d), (e) 分别展示了周期 $T = 5$ 的镜像对称层结构和中心反转对称的拓扑层结构的透射谱. 可以看出两个结构的能带间隙相同, 均为波长 450—575 nm. 但是在中心反转对称结构的透射谱中出现了一个拓扑态

透射峰, 波长约为 510 nm.

在低入射光强 ($P_{\text{in}} = 1 \text{ W/m}^2$) 下, 如图 2(a), (c) 所示, $T = 4$ 时波峰也位于 510 nm 左右, FWHM 约为 12 nm; $T = 5$ 时波峰位于 510 nm 左右, 半高全宽 (FWHM) 约为 5 nm. 发现随 T 减少, 谱线共振峰位置基本不发生改变, 均位于 510 nm 左右, 而峰宽逐渐增大. 如图 2(b), (d) 所示, 透射峰峰值处的电场高度局域在结构的反转中心处, 其强度从反转中心向上下两侧的 PhC 体中指数衰减, 为典型的拓扑边界态分布. 根据共振峰的拓扑性质, 在改变周期的情况下, 拓扑性质依然存在, 电场依旧被限制在拓扑边界处, 即两条光学能带之间, 这使得拓扑共振模式的波长不随周期发生改变, 且电场强度在此处达到峰值, 并向上下两部分呈指数衰减. 由于 $T = 5$ 时显示出了更高的品质因子, 且当入射光强增大后, 由非线性特性引发的波峰红移更加显著, 利于双稳态特性的研究.

为了能够最大化引入非线性效应, 我们在电场强度最大两层 A, B (图 1(c) 中高亮黄色以及高亮蓝色矩形表示) 的折射率中加入了非线性参数. 相对介电常数为 $\epsilon_r = \epsilon_L + \chi^{(3)}|E_{\text{loc}}|^2$, 其中线性介

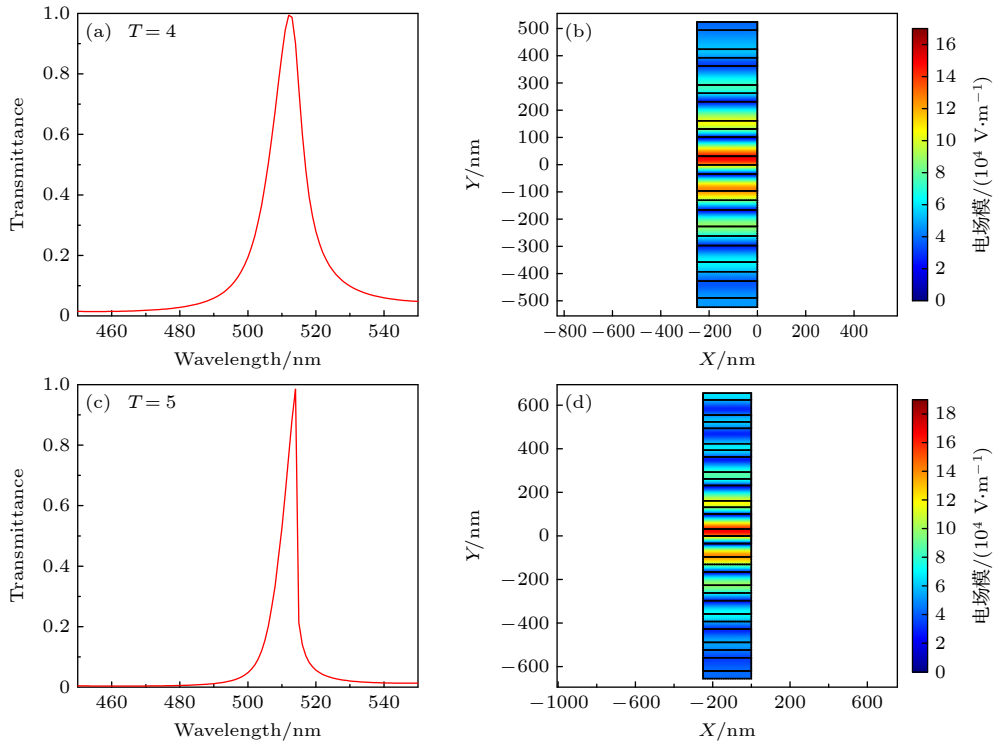


图 2 (a) $T = 4$ 拓扑层结构透射率-波长谱线; (b) $T = 4$ 层结构拓扑模式电场分布; (c) $T = 5$ 拓扑层结构透射率-波长谱线; (d) $T = 5$ 层结构拓扑模式电场分布

Fig. 2. (a) Transmission spectrum of the topological mode at $T = 4$; (b) electric field mode distribution of the topological mode at $T = 4$; (c) transmission spectrum at $T = 5$ of the topological mode; (d) electric field mode distribution of the topological mode at $T = 5$.

电常数为 $\epsilon_L = n^2$, 非线性介电常数为 $\chi^{(3)}|E_{\text{loc}}|^2$, 克尔系数 $\chi^{(3)} = 4.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{V}^2$ [26]. 由于克尔系数是电场依赖的, 当入射光光强增加后, A, B 两层的折射率增大, 拓扑态透射峰因此发生红移. 如图 3(a) 所示, 光强为 1 W/m^2 时, 透射峰在 512 nm 处, 非线性没有产生影响. 随着入射光强增大到 1.5 W/m^2 时, 非线性效应产生, 透射峰峰值红移到 515 nm . 继续增大光强到 2 W/m^2 , 透射峰移动到 517 nm .

根据双稳态工作波长和共振波长的关系 $\lambda_{\text{in}} > \lambda_{\text{res}} + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{FWHM}$ (其中 λ_{res} 为共振波长, FWHM 为共振峰半高全宽, λ_{in} 为双稳态的工作波长), 在 515 nm 工作波长、低入射光强 (0.5 W/m^2) 和高入射光强区间 (5 W/m^2 , 这个高入射光强的判断是非线性引发的共振峰的红移) 下, 扫描光滞回线, 结果如图 3(b) 所示, 蓝色曲线代表光强从高到低扫描得到的结果, 红色曲线代表光强从低到高扫描得到的结果. 在周期 $T = 5$ 时, 迟滞回线位于 1.2 W/m^2 附近, 且回线宽度约为 0.2 W/m^2 . (注:

在 $T = 4$ 的材料中, 迟滞回线位于 4 W/m^2 附近, 且上下行两条曲线十分贴近, 回线宽度不足 0.1 W/m^2). 经对比, 在周期较少的层结构中 ($T = 5$), 材料依旧具有良好的光学双稳性.

为了探究拓扑层结构光学双稳态的鲁棒性, 分别对 $T = 5$ 层结构的各层厚度和折射率中添加了 10% 的随机扰动. 层厚度方面, 在各个 HI 和 LI 的厚度中引入随机扰动 δ_1 ($-7.0 \text{ nm} < \delta_1 < 7.0 \text{ nm}$) 和 δ_2 ($-6.2 \text{ nm} < \delta_2 < 6.2 \text{ nm}$), 用于模拟在微纳加工薄膜蒸镀中的误差. 如图 4(a) 所示, 在低入射光强 1 W/m^2 的透射谱中仍然存在拓扑态, 波峰由原来的 510 nm 左右偏移到了 528 nm 左右, 峰宽由 10 nm 变为了 20 nm 左右. 电场分布局域在拓扑边界处, 强度在此处达到峰值, 并向上下两部分呈指数衰减 (图 4(b)), 在低入射光强 1.5 W/m^2 和高入射光强 2.1 W/m^2 区间扫描光滞回线 (图 4(c)). 虽然限宽有所下降, 从 0.2 W/m^2 减小到 0.1 W/m^2 , 但是双稳态现象仍然存在.

折射率方面, 在 HI 和 LI 的折射率中分别引入随机扰动 δ_3 与 δ_4 , 使 HI 和 LI 的折射率变为

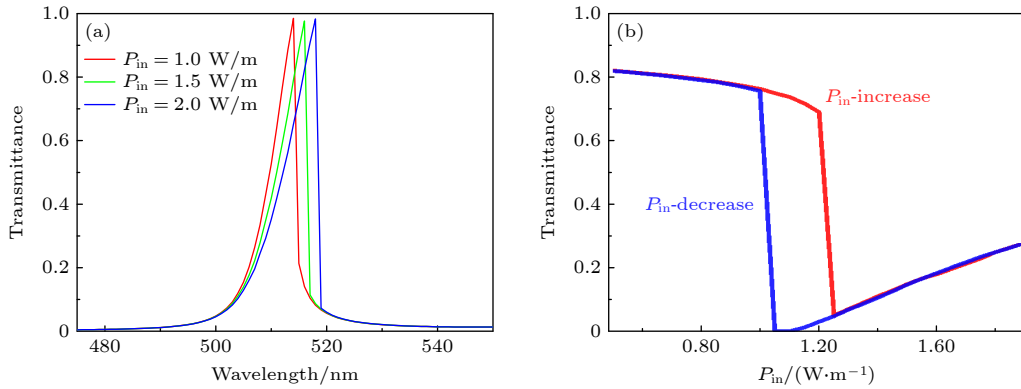


图 3 (a) $T = 5$ 时, 拓扑层结构在不同入射光强下透射谱; (b) 515 nm 工作波长下光滞回线

Fig. 3. (a) Transmission spectra at different incident power densities; (b) photonic hysteresis loop at the operation wavelength of 515 nm .

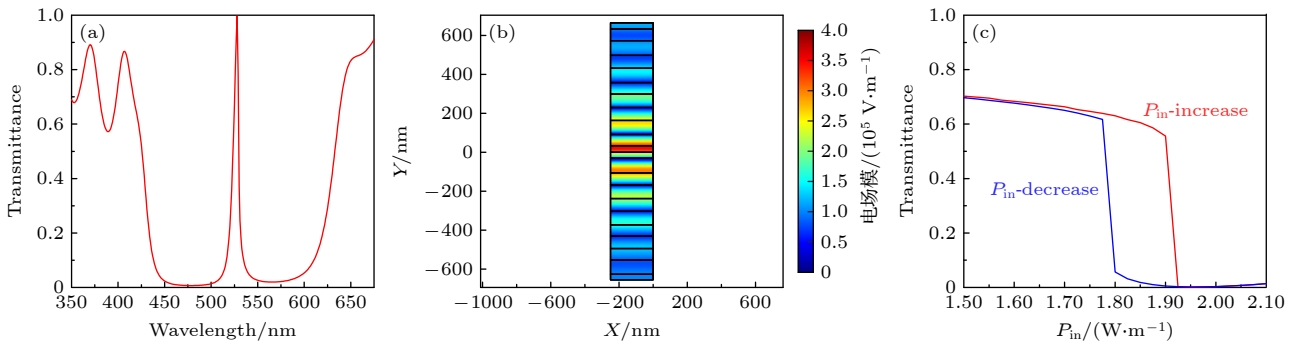


图 4 在层厚度添加 10% 随机扰动获得的结果 (a) 拓扑透射谱; (b) 共振峰处的电场模分布; (c) 双稳态曲线

Fig. 4. Results is obtained by adding 10% random perturbation to each layers: (a) Transmission spectrum; (b) topological mode field distribution; (c) photonic hysteresis loop.

$n_{\text{HI}} + \delta_3$ 和 $n_{\text{LI}} + \delta_4$. δ_3 的变动范围分别为 n_{HI} 的 10%, δ_4 的变动范围分别为 n_{LI} 的 10%. 如图 5(a) 所示, 在低入射光强 1 W/m 的透射谱中仍然存在拓扑态, 波峰由原来的 510 nm 左右偏移到了 500 nm 左右, 峰宽由 10 nm 变为了 20 nm 左右. 电场分布局域在拓扑边界处, 强度在此处达到峰值, 并向上下两部分呈指数衰减 (图 5(b)), 在低入射光强 3.75 W/m 和高入射光强 5 W/m 区间扫描光滞回线 (图 5(c)), 其线宽从 0.2 W/m 增大到 0.6 W/m, 双稳态现象仍然存在. 经过上述研究, 我们发现在周期不变的结构中, 添加层厚度以及折射率的随机扰动之后, 虽然会使波峰有所偏移, 改变双稳态的

阈值和线宽, 但共振模式的拓扑性质依旧存在. 从模式电场分布中可以看出, 高场强依旧局域在边界处, 且向上下两个方向指数衰减.

3 拓扑层结构双稳态曲线在神经网络中的应用

近年来, 全光神经网络被广泛研究. 由于非线性激活函数在神经网络中的作用至关重要, 全光神经网络这一领域需要开发全光非线性激活函数 [21,27-29]. 本文设计的三维多层混合结构可以作为全光神经网络的非线性激活函数. 这种双稳态结构可以轻松

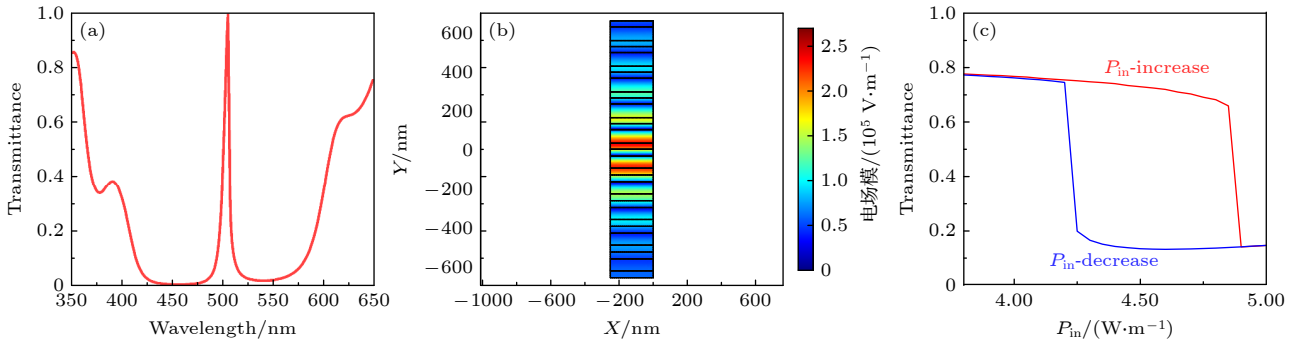


图 5 在材料折射率中添加 10% 随机扰动获得的结果 (a) 拓扑透射谱; (b) 共振峰处的电场模分布; (c) 双稳态曲线

Fig. 5. Results is obtained by adding 10% random perturbation to the refractive index of the material: (a) Transmission spectrum; (b) topological mode field distribution; (c) photonic hysteresis loop.

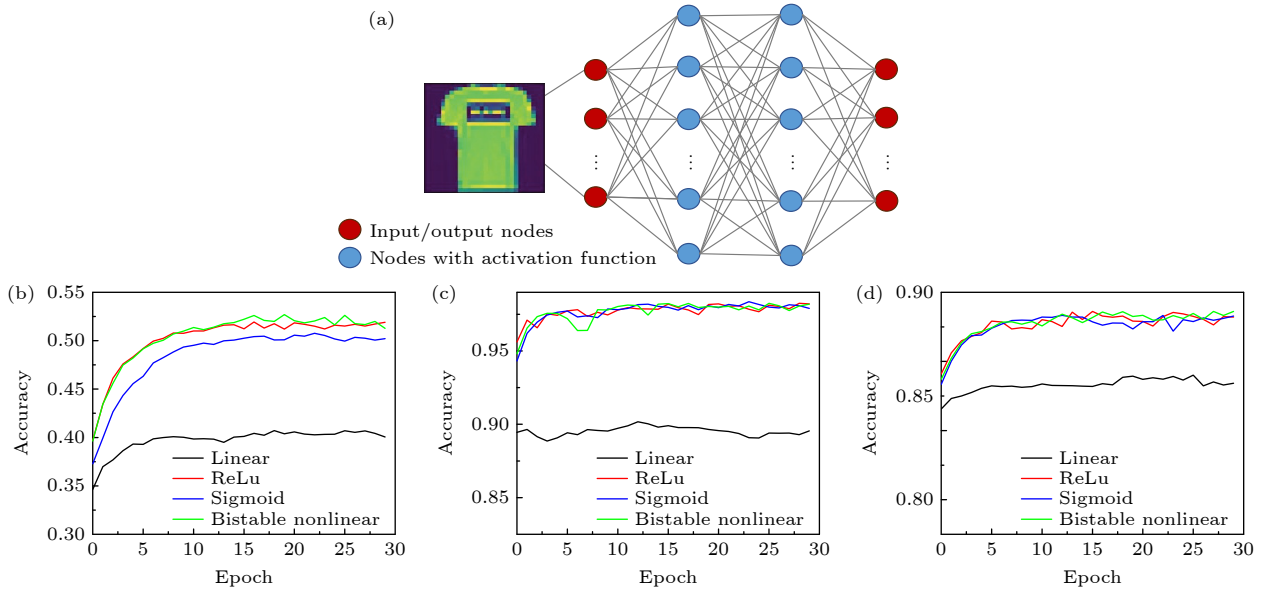


图 6 (a) 全连接深度神经网络结构示意图, 其中包括二维图像的输入层, 两个节点数为 400 和 200 的隐藏层以及输出层, 这些隐藏层分别使用 4 种不同的激活函数: 无激活函数、Relu、Sigmoid 和双稳态曲线. (b)–(d) 4 种激活函数在不同数据集上的表现 (b) CIFAR-10; (c) MNIST; (d) FashionMNIST

Fig. 6. (a) Schematic of a fully connected deep neural network architecture, which includes an input layer for a 2D image, two hidden layers with 400 and 200 nodes, and an output layer, these hidden layers use four different activation functions: no activation function, Relu, Sigmoid, and bistable curve. (b)–(d) Performance of four activation functions on different datasets: (b) CIFAR-10; (c) MNIST; (d) FashionMNIST.

集成到集成光学神经网络中, 因为利用拓扑光子学, 能够在保持较小尺寸的同时得到稳定的单模激光和高发射功率, 从而得到稳定且适合集成的光学双稳态结构.

为了探究本文设计的光学双稳态结构在全光神经网络中的应用, 将本文的双稳态特征作为激活函数放入到全连接深度神经网络中, 如图 6 所示. 模拟中, 使用 MNIST, FashionMNIST 和 CIFAR-10 作为测试数据集, 处理二维图片作为输入层, 两个隐藏层分别包括 400 和 200 个节点, 输出层上有 10 个用于分类的节点. 模拟的结果显示, 我们的双稳态非线性激活函数的性能与经典的数字非线性激活函数 ReLu 和 Sigmoid 相似, 它们在 CIFAR-10 上的准确率约为 52% (图 6(b)), 在 MNIST 上为 98% (图 6(c)), 在 FashionMNIST 上约为 88% (图 6(d)). 在没有非线性激活函数的神经网络中, CIFAR-10 上的准确率仅为 40%, MNIST 为 90%, FashionMNIST 为 83%.

4 结 论

通过在拓扑层结构中引入了非线性介电常数, 探究了由非线性特性引发的光学双稳态及其鲁棒性. 拓扑结构中的电场被高度限制在两能带之间的光学带隙中, 这为我们实现光学双稳态创造了条件. 在材料的选取上, 中心反转对称的 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ 拓扑层结构能够满足要求. 观察结构中的电场分布, 发现在反转中心处场强最高, 沿上下两方向呈指数衰减, 满足拓扑性质, 于是我们在反转中心的材料中引入了非线性部分, 增大入射光强时, 折射率曲线向长波段发生偏移, 从而产生折射率的突变, 显示出光学双稳性. 通过改变模型周期, 比较得到的折射曲线和双稳回线, 选取周期为 5 的结构进行实验, 其兼具良好的光学双稳性和拓扑性质. 在设计好的结构中, 利用改变层和折射率的方式, 对其引入符合现实中工艺误差的微小扰动, 从而探究该结构的鲁棒性. 经过对比分析, 引入误差会使得折射率曲线和双稳回线发生偏移, 改变光学双稳态的线宽和阈值, 但并不会破坏结构的光学双稳性和拓扑性质, 在实际的误差范围内, 可以实现拓扑光子学对光学双稳态的保护功效. 本文最后将双稳态的非线性特性作为非线性激活函数应用到了光神经网络计算中, 相比于传统的非线性激活函数

ReLu 和 Sigmoid, 双稳态非线性激活函数展示出了更好的图像识别精度.

由于传输过程中光的损耗、纳米加工精度等因素, 利用光学双稳态设计高效、低能耗的光学器件始终受到限制, 而根据本文的研究结果, 利用拓扑光子学提高光学器件的鲁棒性具有可行性. 该结构在保持拓扑性质的基础上, 也能展现出良好的光学双稳性质, 未来可以利用这种方式, 突破实际应用中各类因素所带来的限制, 在误差范围内设计出性能优良的光学器件.

参考文献

- [1] Chen X 1984 *Chin. J. Nat.* **10** 761 [陈洗 1984 自然杂志 **10** 761]
- [2] Notomi M, Shinya A, Mitsugi S, Kira G, Kuramochi E, Tanabe T 2005 *Opt. Express* **13** 2678
- [3] Trofimov V A, Egorenkov V A, Loginova M M 2016 *Active Photonic Materials VIII*, San Diego, California, United States, September 16, 2016 p992029
- [4] Ozawa T, Price H M, Amo A, et al. 2019 *Rev. Mod. Phys.* **91** 015006
- [5] Moore J E 2010 *Nature* **464** 194
- [6] Hasan M Z, Kane C L 2010 *Rev. Mod. Phys.* **82** 3045
- [7] Qi X L, Zhang S C 2011 *Rev. Mod. Phys.* **83** 1057
- [8] Wang Z, Chong Y, Joannopoulos J D, Soljačić M 2009 *Nature* **461** 772
- [9] Li Z, Luo X W, Gu Q 2023 *APL Photonics* **8** 070901
- [10] Li Z, Gu Q 2024 *Nanophotonics* **13** 825
- [11] Li Z T, Luo X W, Lin D Y, Gharajeh A, Moon J, Hou J P, Zhang C W, Gu Q 2023 *Phys. Rev. Lett.* **131** 023202
- [12] Li C, Hu X Y, Yang H, Gong Q H 2017 *AIP Adv.* **7** 025203
- [13] Poshakinskiy A V, Poddubny A N, Pilozi L, Ivchenko E L 2014 *Phys. Rev. Lett.* **112** 107403
- [14] Ishida N, Ota Y, Lin W, Byrnes T, Arakawa Y, Iwamoto S 2022 *Nanophotonics* **11** 2169
- [15] Lu L, Joannopoulos J D, Soljačić M 2014 *Nat. Photonics* **8** 821
- [16] Lu L, Fang C, Fu L, Johnson S G, Joannopoulos J D, Soljačić M 2016 *Nat. Phys.* **12** 337
- [17] Verbin M, Zilberberg O, Kraus Y E, Lahini Y, Silberberg Y 2013 *Phys. Rev. Lett.* **110** 076403
- [18] Gao W L, Lawrence M, Yang B, Liu F, Fang F Z, Béri B, Li J S, Zhang S 2015 *Phys. Rev. Lett.* **114** 037402
- [19] Hafezi M, Mittal S, Fan J, Migdall A, Taylor J M 2013 *Nat. Photonics* **7** 1001
- [20] Long X, Bao Y W, Yuan H X, Zhang H Y, Dai X Y, Li Z F, Jiang L Y, Xiang Y J 2022 *Opt. Express* **30** 20847
- [21] Psaltis D, Brady D, Wagner K 1988 *Appl. Opt.* **27** 1752
- [22] Li Z T, Shan S C, Hu S R, Gu Y Z, Ji X Q, Hou J P 2024 *Opt. Mater. Express* **14** 1398
- [23] Tian J, Tan Q Y, Wang Y, Yang Y, Yuan G, Adamo G, Soci C 2023 *Nat. Commun.* **14** 1433
- [24] Blanco-Redondo A, Andonegui I, Collins M J, et al. 2016 *Phys. Rev. Lett.* **116** 163901
- [25] Weimann S, Kremer M, Plotnik Y, et al. 2017 *Nat. Mater.* **16** 433

- [26] Huang Z, Baron A, Larouche S, Argyropoulos C, Smith D R
2015 *Opt. Lett.* **40** 5638
- [27] Miscuglio M, Mehrabian A, Hu Z, et al. 2018 *Opt. Mater.*

- Express* **8** 3851
- [28] Gosciniak J 2024 *IEEE Photonics J.* **16** 1
- [29] Jha A, Huang C, Prucnal P R 2020 *Opt. Lett.* **45** 4819

Optical bistability in topological layered structure and its application in photonic neural network*

Li Yun-Heng¹⁾²⁾ Yu Ke¹⁾²⁾ Zhu Tian-Yu¹⁾³⁾ Yu Tong¹⁾³⁾

Shan Si-Chao¹⁾⁴⁾ Gu Ya-Zhou¹⁾⁴⁾ Li Zhi-Tong^{1)4)†}

1) (State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communication,
Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

2) (School of Future, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

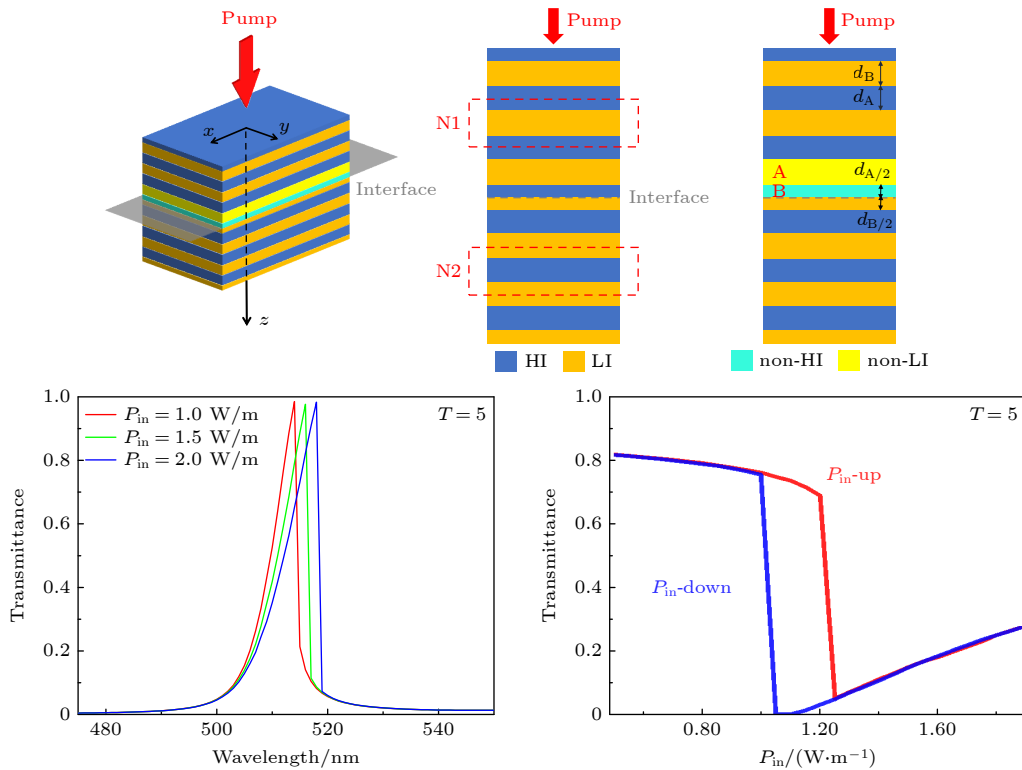
3) (School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

4) (School of Science, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

(Received 25 April 2024; revised manuscript received 7 July 2024)

Abstract

Optical bistable state exhibits its great potential applications in photonic integrated circuit and photonic neural network. However, the traditional optical bistable state will be influenced by the system disorders, which are not suitable for application. In this work, we investigate the topological bistable states in a layered structure with center inversion symmetry consisting of alternating layers of high index material TiO₂ and low index



* Project supported by the Opening Foundation of the State Key Laboratory of Information Photonics and the Optical Communication, China (Grant No. IPOC2023ZT03) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2022RC28).

† Corresponding author. E-mail: zhitong.li@bupt.edu.cn

material SiO₂. In the topological mode, the electric field is highly localized in the inversion center of the layered structure (also known as the interface) and exponentially decays into the bulk. Thus, when the nonlinear permittivity is strategically introduced into those layers, nonlinear phenomena such as the bistable state appears. The finite element numerical simulations reveal that the optimal bistable state appears when the layer period is 5 with a threshold power around 1.2 W/m. Benefiting from the topological characteristics, such a bistable state persists when random perturbations are introduced into the layer thickness and refractive index. Finally, we apply the bistable states to a photonic neural network. The bistable function shows prediction accuracy similar to the classic activation function ReLu and sigmoid in various learning tasks. These results provide a novel method for inserting highly robust optical bistable states from topological layered structure into photonic neural network.

Keywords: optical bistability, topological structure, robustness

PACS: 42.65.Pc, 78.67.Pt

DOI: [10.7498/aps.73.20240569](https://doi.org/10.7498/aps.73.20240569)



拓扑层结构中的光学双稳态及其在光神经网络中的应用

李昀衡 喻可 朱天宇 于桐 单思超 谷亚舟 李志瞳

Optical bistability in topological layered structure and its application in photonic neural network

Li Yun-Heng Yu Ke Zhu Tian-Yu Yu Tong Shan Si-Chao Gu Ya-Zhou Li Zhi-Tong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 164208 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20240569

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240569>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于 Ga_2O_3 -SiC-Ag多层结构的介电常数近零超低开关阈值光学双稳态器件

Ultralow switching threshold optical bistable devices based on epsilon-near-zero Ga_2O_3 -SiC-Ag multilayer structures

物理学报. 2024, 73(5): 054201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231534>

连续变量Einstein-Podolsky-Rosen纠缠态光场在光纤信道中分发时纠缠的鲁棒性

Entanglement robustness of continuous variable Einstein-Podolsky-Rosen-entangled state distributed over optical fiber channel

物理学报. 2022, 71(9): 094202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212380>

基于石墨烯光力系统的非线性光学效应及非线性光学质量传感

Nonlinear optical effect and nonlinear optical mass sensor based on graphene optomechanical system

物理学报. 2020, 69(13): 134203 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191745>

具有弱依赖组的复杂网络上的级联失效

Cascading failures on complex networks with weak interdependency groups

物理学报. 2022, 71(11): 110505 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210850>

高压IGBT雪崩鲁棒性的研究

Study on avalanche ruggedness of high voltage IGBTs

物理学报. 2023, 72(7): 078501 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222248>

三量子比特Dicke模型中的两体和三体纠缠动力学

The dynamics of the bipartite and tripartite entanglement in the three-qubit Dicke model

物理学报. 2021, 70(4): 040301 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201602>