

激光与光电子学进展

基于二维光子晶体高对比度的快速全光 4×2 编码器

蔡昶, 姜宗丹, 李培丽*

南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院, 江苏 南京 210023

摘要 基于二维光子晶体波导与微腔的耦合特性, 提出了一种全光 4×2 编码器。该编码器通过在 Y 型波导中引入微腔实现了高对比度的快速编码功能。利用平面波展开法(PWM)和时域有限差分(FDTD)法对所提 4×2 编码器性能进行了研究。研究表明, 所提编码器在 1.55 μm 的工作波长下, 对比度高达 24.55 dB, 响应时间不超过 1.11 ps, 数据传输速率不低于 0.90 Tbit/s, 尺寸约为 147.45 μm²。所提编码器结构简单、对比度高、响应速度快、集成容易, 有望在光通信和集成光路领域发挥重要作用。

关键词 激光器; 全光编码器; 光子晶体; 波导; 微腔

中图分类号 TN256

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0114004

Fast All-Optical 4×2 Encoder with High Contrast Based on Two-Dimensional Photonic Crystal

Cai Chang, Jiang Zongdan, Li Peili*

College of Electronic and Optical Engineering & College of Microelectronics,
Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract Based on the coupling characteristics of waveguide and microcavity in two-dimensional photonic crystals, an all-optical 4×2 encoder is proposed. The encoder realizes a high-contrast fast encoding function by introducing a microcavity into the Y-shaped waveguide. The performance of the proposed 4×2 encoder is studied by using plane wave method (PWM) and finite-difference time-domain (FDTD) method. The results show that the proposed encoder has a contrast ratio up to 24.55 dB, a response time not exceeding 1.11 ps, a data transmission rate not less than 0.90 Tbit/s, and a size of about 147.45 μm² at a working wavelength of 1.55 μm. The proposed encoder has simple structure, high contrast, fast response speed, and easy integration, which is expected to play an important role in the fields of optical communications and integrated optical circuits.

Key words lasers; all-optical encoder; photonic crystal; waveguide; microcavity

1 引言

全光编码器是光通信和光信号处理需要的重要光学逻辑器件^[1], 主要功能是通过 2ⁿ 个输入端口生成 n 位的二进制码^[2]。相比于光电编码器, 全光

编码器避免了光/电转换的复杂性高和速度限制的问题^[3], 可以应用于无线光纤收发器^[4]、光鼠标、高速计数模块、可编程逻辑控制器^[5]等器件中。近些年来, 光子晶体凭借体积小、操控光传播方向容易和结构简单的优势^[6-8], 在全光器件的设计领域具有

收稿日期: 2021-03-31; 修回日期: 2021-04-10; 录用日期: 2021-04-15

通信作者: *lipi@njupt.edu.cn

重要的应用价值。利用光子晶体设计的全光编码器具有制作容易、损耗低、响应速度快、热稳定性高等优点^[9]。

目前,光子晶体全光 4×2 编码器主要利用自准直效应、克尔非线性效应、点缺陷与线缺陷耦合等原理实现编码功能。2016 年, Alipour-Banaei 等^[10] 基于二维光子晶体的自准直效应,提出了一种尺寸约为 $174.24 \mu\text{m}^2$ 、响应时间约为 1.4 ps 的全光 4×2 编码器。2017 年, Gholamnejad 等^[11] 设计了由 8 个波导和 2 个非线性谐振腔组成的全光 4×2 编码器,该编码器时间延迟约为 1 ps ,具有响应速度快的优点,但因为使用了非线性材料,所以需要高强度的光。2018 年, Seif-Dargahi^[12] 在输入与输出端口设置 4 个线性环形谐振腔,提出了工作波长为 1555 nm 的全光 4×2 编码器,该编码器时间延迟约为 1.8 ps ,对比度约为 9.2 dB 。2019 年, Parandin^[13] 基于二维光子晶体点缺陷和线缺陷的耦合作用,提出了工作波长为 1550 nm 的全光 4×2 编码器,该编码器对比度约为 16.5 dB ,延迟时间小于 0.1 ps 。2020 年, Rajasekar 等^[14] 基于干扰和共振效应,提出了一种全光 4×2 编码器,该编码器响应时间约为 369.3 fs ,尺寸约为 $13.2 \mu\text{m} \times 13.2 \mu\text{m}$,具有功耗低、数据传输速率高和体积小的优点。

本文通过在二维三角晶格光子晶体中引入波导,设计了一种 Y 型 1×2 分束器,并在 Y 型波导中引入微腔,提高了分束器的总透过率;利用有微腔

的 Y 型 1×2 分束器总透过率高的优势,设计了一种高对比度的全光 4×2 编码器。使用 Rsoft 软件,结合平面波展开法(PWM)和时域有限差分(FDTD)法,对所提编码器的对比度和响应时间等性能进行了仿真研究。

2 二维光子晶体 Y 型 1×2 分束器

2.1 结构设计与优化

图 1 是二维光子晶体无微腔和有微腔的 Y 型 1×2 分束器结构图。在空气中以三角晶格形式排列 16×15 个圆形硅介质柱,折射率 n 为 3.46 ,半径 R 为 $0.2a$,晶格常数 a 为 $0.64 \mu\text{m}$ 。通过在完整的三角晶格光子晶体中移除若干个介质柱,形成一个输入波导和两个输出波导,将输入波导与输出波导连接,形成 Y 型波导结构。图 1(a) 为无微腔的 Y 型 1×2 分束器,光从输入端口 A1 入射,经分束后,分别从输出端口 B1 和 C1 出射。

光子晶体微腔有较高的品质因子和较小的模式体积,能够增加局域场的光子密度,提高光与物质间的相互作用^[15]。通过在图 1(a) 分束器的 Y 型波导中间引入微腔,设计了有微腔的 Y 型 1×2 分束器,如图 1(b) 所示。微腔由 1 个半径 r_a 为 $0.12a$ 和 5 个半径 r_b 为 $0.16a$ 的硅介质柱构成。光从输入端口 A2 入射,经输入波导耦合进微腔,再由微腔耦合进 2 个输出波导,分别从输出端口 B2 和 C2 出射。

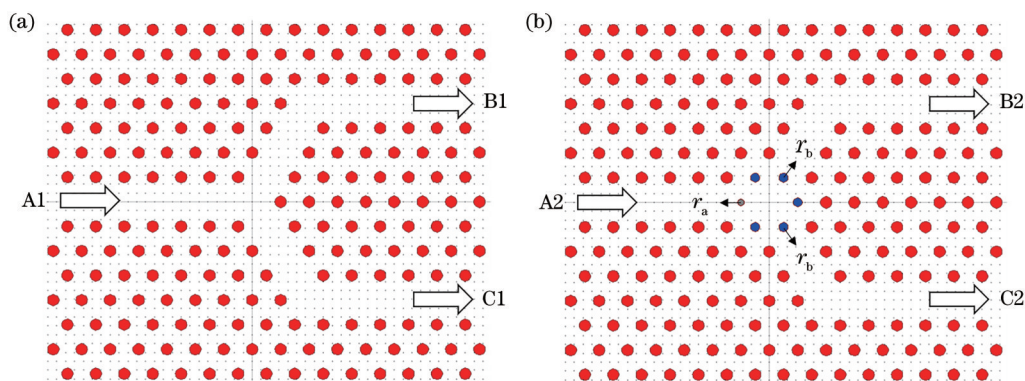


图 1 二维光子晶体 Y 型 1×2 分束器结构图。(a) 无微腔; (b) 有微腔

Fig. 1 Structure of Y-type 1×2 beam splitter of two-dimensional photonic crystal. (a) Without microcavity; (b) with microcavity

2.2 仿真结果与分析

PWM 可以计算出完整光子晶体的能带结构。图 2 为没有引入缺陷的完整光子晶体 TE 模和 TM 模能带图。从图 2 中可以看出, TE 模式下光子禁带归一化频率 a/λ 范围为 $0.2750 \sim 0.4460$ 和 $0.5616 \sim$

0.5938 。入射光选择归一化频率 a/λ 范围较大的光子禁带,即 $0.2750 \sim 0.4460$, 对应波长为 $1.4350 \sim 2.3273 \mu\text{m}$ 。频率(波长)在光子禁带范围内的光无法在完整的光子晶体中传播。

总透过率和附加损耗是光子晶体分束器主要的

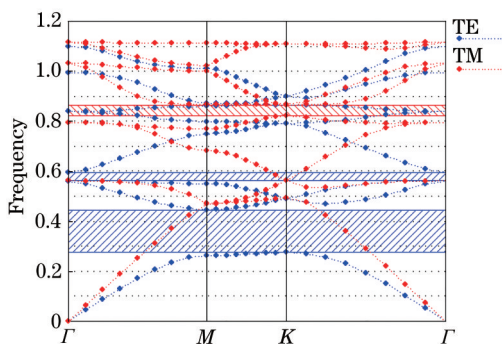


图2 完整光子晶体结构 TE 模和 TM 模能带结构图
Fig. 2 TE mode and TM mode band diagram of complete photonic crystal

性能指标。总透过率为分束器所有输出端口的透过

率之和。附加损耗(LE)^[16]是分束器所有输出端口的光功率总和相对于全部输入光功率的损耗,表达式为

$$L_E = -10 \lg \left(\sum \frac{P_{out}}{P_{in}} \right), \quad (1)$$

式中: P_{out} 为输出光功率; P_{in} 为输入光功率。

利用时域有限差分法分析工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的无微腔和有微腔的 Y 型 1×2 分束器的分束性能。无微腔 Y 型 1×2 分束器的稳态场强分布和时域稳态响应如图 3 所示。从图 3(a)中可以看出,光从输入端口 A1 入射时,经 Y 型波导分束后,从输出端口 B1 和 C1 出射。从图 3(b)中可以看出,输出端口 B1 和 C1 的透过率均为 43.82%,输出端的总透过率为 87.64%,附加损耗为 0.573 dB。

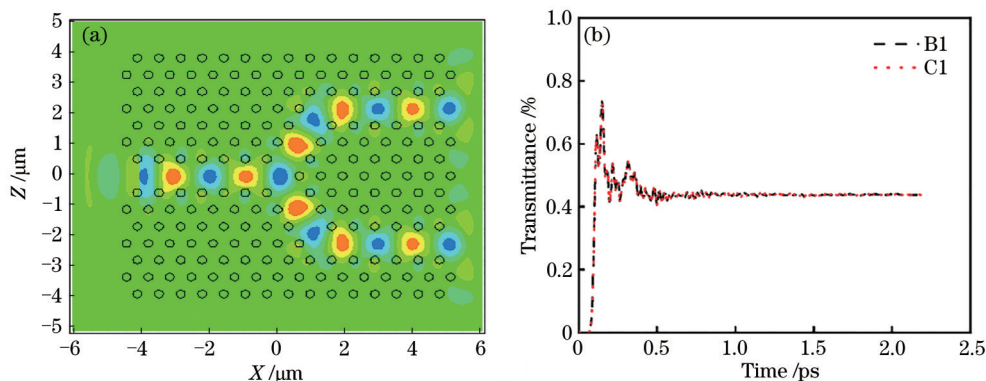


图3 无微腔 Y 型 1×2 分束器的编码性能。(a) 稳态场强分布; (b) 时域稳态响应
Fig. 3 Encoding performance of Y-type 1×2 beam splitter without microcavity. (a) Steady-state field intensity distribution; (b) time-domain steady-state response

有微腔 Y 型 1×2 分束器的稳态场强分布和时域稳态响应如图 4 所示。从图 4(a)中可以看出,光从输入端口 A2 入射时,先耦合进微腔中,经微腔增强后,分别耦合进 2 个输出波导,从输出端口 B2 和

C2 出射。从图 4(b)中可以看出,输出端口 B2 和 C2 的透过率均为 49.58%,输出端的总透过率为 99.16%,附加损耗为 0.037 dB。对比有微腔与无微腔的 Y 型 1×2 分束器总透过率可以发现,微腔的

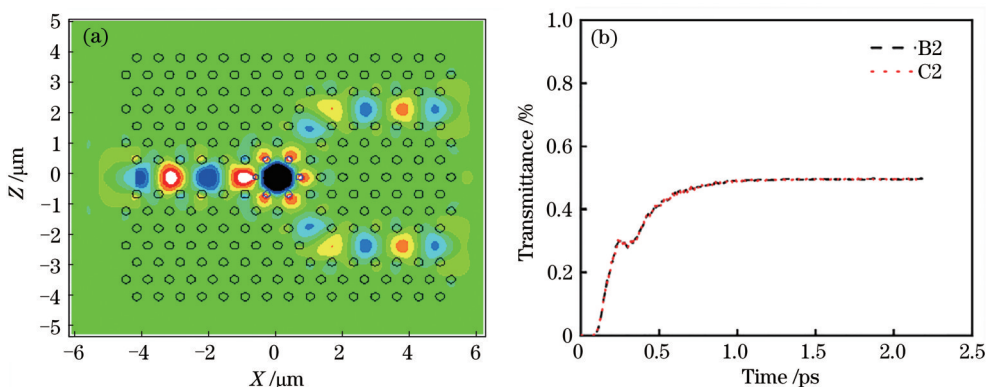


图4 有微腔 Y 型 1×2 分束器的编码性能。(a) 稳态场强分布; (b) 时域稳态响应
Fig. 4 Encoding performance of Y type 1×2 beam splitter with microcavity. (a) Steady-state field intensity distribution; (b) time-domain steady-state response

加入能够明显地提高 1×2 分束器的总透过率, 很大

3 二维光子晶体全光 4×2 编码器

3.1 结构设计

利用有微腔 Y 型 1×2 分束器总透过率高的优势, 设计的一种新型全光 4×2 编码器如图 5 所示。在空气中以三角晶格形式排列 16×28 个圆形硅介质柱, 半径 R 和晶格常数 a 与 2.1 节一致。该编码器由 4 个输入端口 (I0、I1、I2、I3)、2 个输出端口 (O1、O2) 和 1 个额外输出端口 (V) 组成。通过在完整的三角晶格光子晶体中移除若干个介质柱, 形成直波导 (W1、W5、W6)、弯曲波导 (W2、W4) 和带微腔的 Y 型波导 (W3), 微腔结构与 2.1 节一致。直波导 W1 连接输入端口 I0 和额外输出端口 V; 弯曲波导 W2 和直波导 W5 连接输入端口 I1 和输出端口 O1; 弯曲波导 W4 和直波导 W6 连接输入端口 I2 和输出端口 O2; 带微腔的 Y 型波导 W3 分别连接直波导 W5 和 W6, 使得输入端口 I3 同时连接输出端口 O1 和 O2, 形成有微腔的 Y 型 1×2 分束结构。

对比度和响应时间是光子晶体编码器主要的

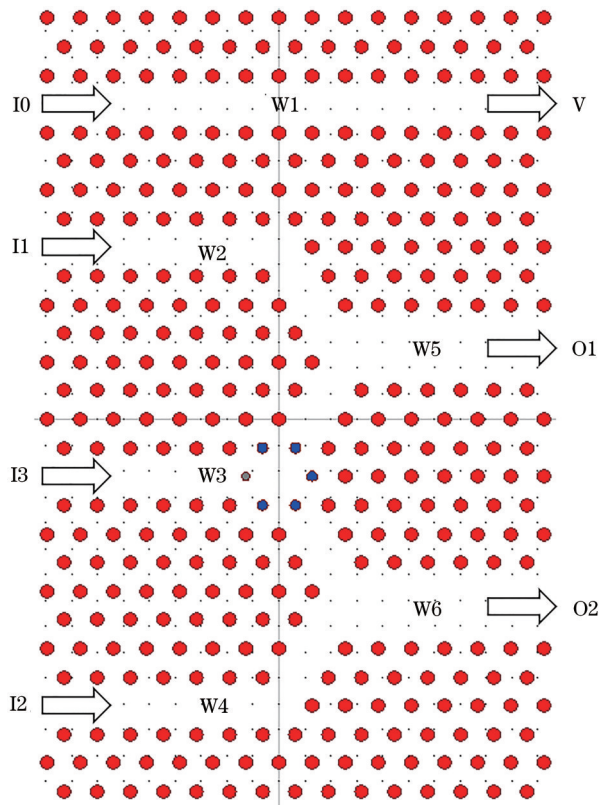


图 5 二维光子晶体全光 4×2 编码器结构图

Fig. 5 Structure of two-dimensional photonic crystal all-optical 4×2 encoder

程度上降低了附加损耗。

性能指标。对比度 (CR)^[17] 是输出为逻辑“1”和逻辑“0”时的输出能量比, 表达式为

$$R_{CR} = 10 \lg \frac{P_1}{P_0}, \quad (2)$$

式中: P_1 是编码器输出为逻辑“1”时的最小输出功率; P_0 是输出为逻辑“0”时的最大输出功率。

响应时间 (T)^[18] 由三个部分组成, 分别为延迟时间 (T_d)、上升时间 (T_r) 和下降时间 (T_f)。输出功率从 0 上升到稳定值的 0.1% 所经历的时间为延迟时间; 从稳定值的 0.1% 上升到稳定值的 90% 所经历的时间为上升时间; 从稳定值下降到稳定值的 10% 所经历的时间为下降时间。因为线性材料的下降时间与上升时间近似相等, 所以总的响应时间表达式为

$$T = T_d + 2T_r. \quad (3)$$

3.2 仿真结果与分析

利用时域有限差分法, 分析工作波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时全光 4×2 编码器的性能。当 I0 输入 1, I1、I2、I3 均输入 0 时, 稳态场强分布与时域稳态响应如图 6 所示。从图 6(a) 中可以看出, 光从输入端口 I0 入射时, 经直波导 W1 传播后, 从额外输出端口 V 出射。从图 6(b) 中可以看出, 输出端口 V、O1、O2 的透过率分别为 97.71%、0.02%、0.14%, 响应时间为 0.16 ps。

当 I1 输入 1, I0、I2、I3 均输入 0 时, 稳态场强分布与时域稳态响应如图 7 所示。从图 7(a) 中可以看出, 光从输入端口 I1 入射时, 经弯曲波导 W2 和直波导 W5 传播后, 从输出端口 O1 出射。从图 7(b) 中可以看出, 输出端口 V、O1、O2 的透过率分别为 0.01%、66.24%、0.17%, 响应时间为 0.14 ps。

当 I2 输入 1, I0、I1、I3 均输入 0 时, 稳态场强分布与时域稳态响应如图 8 所示。从图 8(a) 中可以看出, 光从输入端口 I2 入射时, 经弯曲波导 W4 和直波导 W6 传播后, 从输出端口 O2 出射。从图 8(b) 中可以看出, 输出端口 V、O1、O2 的透过率分别为 0.02%、0.16%、64.64%, 响应时间为 0.14 ps。

当 I3 输入 1, I0、I1、I2 均输入 0 时, 稳态场强分布与时域稳态响应如图 9 所示。从图 9(a) 中可以看出, 光从输入端口 I3 入射时, 经带微腔的 Y 型波导 W3 和两个直波导 (W5 和 W6) 传播后, 分别从输出端口 O1 和 O2 出射。从图 9(b) 中可以看出, 输出端口 V 透过率为 0.08%, 经过 Y 型波导中微腔的增强, 输出端口 O1 和 O2 的透过率为 48.89% 和

48.44%, 响应时间为 1.11 ps。

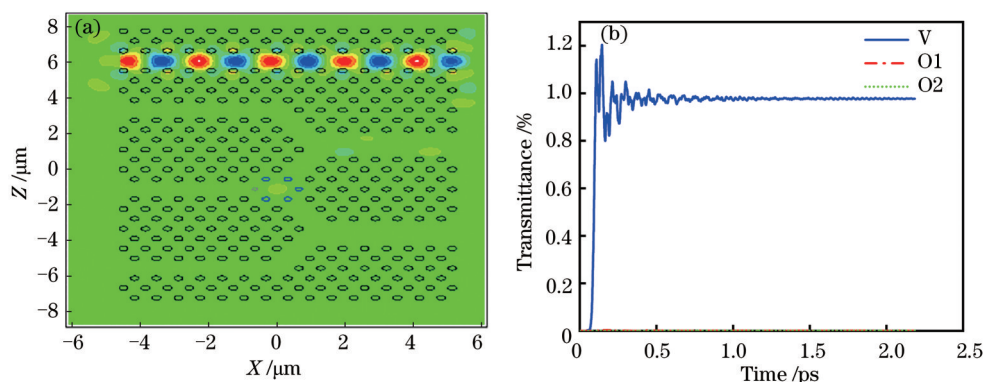


图 6 I₀输入 1, I₁、I₂、I₃均输入 0 时的编码性能。(a) 稳态场强分布; (b) 时域稳态响应

Fig. 6 Encoding performance when 1 is input for I₀ and 0 is input for I₀, I₁, and I₃. (a) Steady-state field intensity distribution; (b) time-domain steady-state response

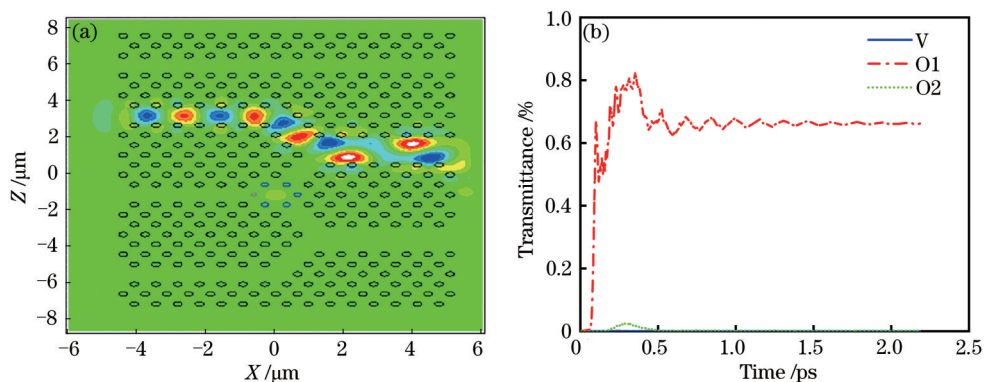


图 7 I₁输入 1, I₀、I₂、I₃均输入 0 时的编码性能。(a) 稳态场强分布; (b) 时域稳态响应

Fig. 7 Encoding performance when 1 is input for I₁ and 0 is input for I₀, I₂, and I₃. (a) Steady-state field intensity distribution; (b) time-domain steady-state response

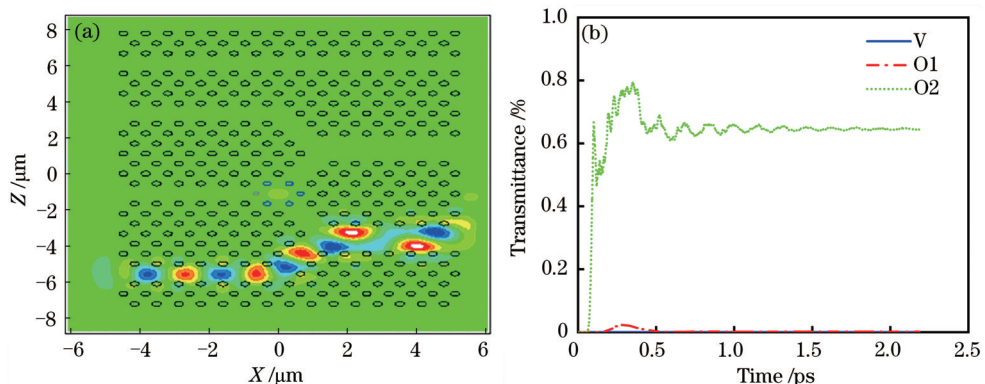


图 8 I₂输入 1, I₀、I₁、I₃均输入 0 时的编码性能。(a) 稳态场强分布; (b) 时域稳态响应

Fig. 8 Encoding performance when 1 is input for I₂ and 0 is input for I₀, I₁, and I₃. (a) Steady-state field intensity distribution; (b) time-domain steady-state response

将全光 4×2 编码器出射光的透过率小于等于 0.5% 设定为逻辑“0”，大于等于 45.0% 设定为逻辑“1”。该编码器的真值表数据和性能参数如表 1 所示。由表 1 可知，该编码器输入为“1000”

“0100”“0010”“0001”时，对应输出为“00”“10”“01”“11”，实现了 4×2 的二进制编码功能。由于 Y 型波导中微腔的引入，逻辑“1”的最小值提高为 48.44%，逻辑“0”的最大值为 0.17%，该编码

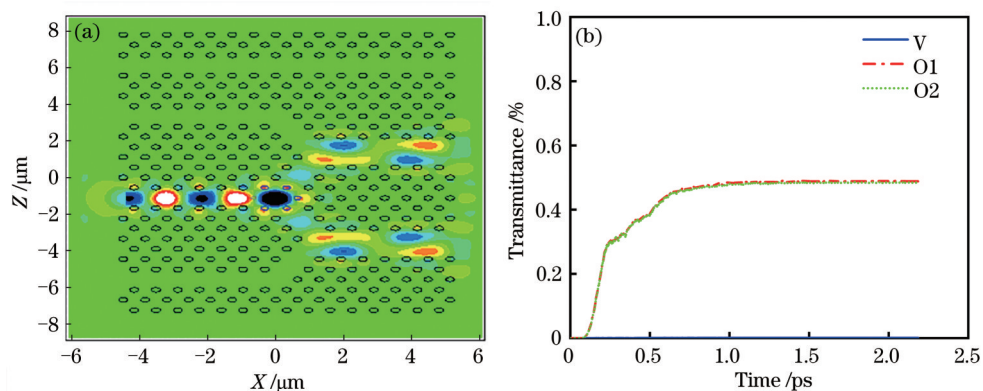


图 9 I3 输入 1, I0、I1、I2 均输入 0 时的编码性能。(a) 稳态场强分布; (b) 时域稳态响应

Fig. 9 Encoding performance when 1 is input for I3 and 0 is input for I0, I1, and I2. (a) Steady-state field intensity distribution; (b) time-domain steady-state response

器的对比度高达 24.55 dB, 响应时间不超过 1.11 ps。数据传输速率约等于响应时间的倒数^[14], 因此该编码器的数据传输速率不低于 0.90 Tbit/s。

表 1 全光 4×2 编码器的真值表数据和性能参数

Table 1 Truth table data and performance parameters of all-optical 4×2 encoder

I0	I1	I2	I3	Transmittance / %			Response time / ps	Contrast ratio / dB
				V	O1	O2		
1	0	0	0	97.71	0.02	0.14	0.16	24.55
0	1	0	0	0.01	66.24	0.17	0.14	
0	0	1	0	0.02	0.16	64.64	0.14	
0	0	0	1	0.08	48.89	48.44	1.11	

4 结 论

提出了一种基于二维光子晶体的带微腔 Y 型 1×2 分束器, 并在此结构基础上, 设计了全光 4×2 编码器。该编码器通过引入波导实现二进制编码功能, 并加入微腔优化性能。研究表明, 该编码器在工作波长为 1.55 μm 时, 对比度高达 24.55 dB, 响应时间不超过 1.11 ps, 数据传输速率不低于 0.90 Tbit/s, 尺寸约为 147.45 μm²。所提编码器结构简单、体积小、对比度高和响应速度快, 有望在光通信和集成光路领域中发挥重要作用。

参 考 文 献

[1] Rajasekar R, Latha R, Robinson S. Ultra-contrast ratio optical encoder using photonic crystal waveguide [J]. Materials Letters, 2019, 251: 144-147.
 [2] Hassangholizadeh-Kashtiban M, Sabbaghi-Nadooshan R, Alipour-Banaei H. A novel all optical reversible 4×2 encoder based on photonic crystals[J]. Optik, 2015, 126(20): 2368-2372.
 [3] Ouahab I, Naoum R. A novel all optical 4×2

encoder switch based on photonic crystal ring resonators[J]. Optik, 2016, 127(19): 7835-7841.

[4] Ribeiro R M, Lucarz F, Fracasso B. Proposal and design of an all-optical encoder for digitising radio-over-fibre transceivers[C]//Proceedings of the 2013 18th European Conference on Network and Optical Communications & 2013 8th Conference on Optical Cabling and Infrastructure (NOC-OC&I), July 10-12, 2013, Graz, Austria. New York: IEEE Press, 2013: 35-42.
 [5] Lee K Y, Yang Y C, Lin Y J, et al. The designs of 4×2 encoder based on photonic crystals[J]. Proceedings of SPIE, 2009, 7630: 76300I.
 [6] Xu G Y, Chen Y, Li P L. Three-input all-optical AND gate based on two-dimensional photonic crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1013002. 徐光跃, 陈莹, 李培丽. 基于二维光子晶体的三输入全光逻辑与门[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1013002.
 [7] Liu Z, Wu R, Yan Q B, et al. Design and simulation of two-dimensional photonic crystal all-optical logic gates[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(18): 182301.

- 刘振, 吴蓉, 严清博, 等. 二维光子晶体全光逻辑门的设计与仿真[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(18): 182301.
- [8] Wu R, Liu Z, Yan Q B, et al. Eight-channel photonic-crystal wavelength-division multiplexer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(9): 091302.
吴蓉, 刘振, 严清博, 等. 光子晶体八通道波分复用器研究[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(9): 091302.
- [9] Joannopoulos J D, Meade R D, Winn J N, et al. Photonic crystals: modeling of flow of light[M]. Princeton: Princeton University Press, 1995.
- [10] Alipour-Banaei H, Rabati M G, Abdollahzadeh-Badelbou P, et al. Application of self-collimated beams to realization of all optical photonic crystal encoder[J]. Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures, 2016, 75: 77-85.
- [11] Gholamnejad S, Zavvari M. Design and analysis of all-optical 4-2 binary encoder based on photonic crystal[J]. Optical and Quantum Electronics, 2017, 49(9): 1-12.
- [12] Seif-Dargahi H. Ultra-fast all-optical encoder using photonic crystal-based ring resonators[J]. Photonic Network Communications, 2018, 36(2): 272-277.
- [13] Parandin F. High contrast ratio all-optical 4×2 encoder based on two-dimensional photonic crystals[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 447-452.
- [14] Rajasekar R, Thavasi Raja G, Jayabarathan J K, et al. High speed nano-optical encoder using photonic crystal ring resonator[J]. Photonic Network Communications, 2020, 40(1): 31-39.
- [15] Zhou J. Sensor array properties research based on the integration of high-performance beam-splitter and photonic crystal microcavity[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecom, 2019.
周健. 基于高性能分束器与光子晶体微腔集成的传感复用性能研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [16] Jiang Z D, Li P L, Zhang Y F. Light-control splitting ratio tunable Y-type terahertz waves to beam splitter based on two-dimensional photonic crystal[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2020, 39(5): 561-566.
姜宗丹, 李培丽, 张元方. 基于二维光子晶体的光控分光比可调 Y 型太赫兹波分束器[J]. 红外与毫米波学报, 2020, 39(5): 561-566.
- [17] Mohebzadeh-Bahabady A, Olyaei S. All-optical NOT and XOR logic gates using photonic crystal nano-resonator and based on an interference effect[J]. IET Optoelectronics, 2018, 12(4): 191-195.
- [18] Mostafa T S, Mohammed N A, El-Rabaie E S M. Ultra-High bit rate all-optical AND/OR logic gates based on photonic crystal with multi-wavelength simultaneous operation[J]. Journal of Modern Optics, 2019, 66(9): 1005-1016.