

# 二维光子晶体全光逻辑门的设计与仿真

刘振<sup>1,2</sup>, 吴蓉<sup>1</sup>, 严清博<sup>1</sup>, 吴小所<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>兰州交通大学电子与信息工程学院, 甘肃 兰州 730070;

<sup>2</sup>兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 基于线性干涉效应和环形谐振器,提出了一种二维光子晶体全光逻辑门的设计方法。通过在环形腔中引入光程差,产生相应的相位差,从而导致光波发生相长干涉或相消干涉,实现了或、与、异或、非、或非和与非等光学逻辑门。利用平面波展开法和时域有限差分法对逻辑器件进行模拟分析,对逻辑功能进行验证,结果表明:所设计的器件不仅物理尺寸小,而且透射率、对比度高,响应周期快,均在 218 fs 以内,在集成光学领域具有潜在的应用前景。

**关键词** 光学器件;全光逻辑门;时域有限差分法;光子晶体

中图分类号 TN256

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.182301

## Design and Simulation of Two-Dimensional Photonic Crystal All-Optical Logic Gates

Liu Zhen<sup>1,2</sup>, Wu Rong<sup>1</sup>, Yan Qingbo<sup>1</sup>, Wu Xiaosuo<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

<sup>2</sup> Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China

**Abstract** We propose a method to design two-dimensional photonic crystal all-optical logic gates based on the linear interference effect and ring resonators. The phase difference is generated by introducing the optical path difference in the ring cavity, which leads to the constructive or destructive interference of light waves. Thus, optical logic gates, such as OR, AND, XOR, NOT, NOR, and NAND, are realized. The plane-wave expansion and time-domain finite-difference methods are used to simulate the logic devices and verify the logic functions. The results demonstrate that small-sized devices can be realized. In addition, the devices have a high transmittance rate, high contrast ratio, and fast response time (less than 218 fs). The design has potential application in the field of integrated optics.

**Key words** optical devices; all-optical logic gates; finite-difference time-domain method; photonic crystal

**OCIS codes** 230.3750; 230.5298; 160.5293

## 1 引言

光子晶体是介电常数不同的几种材料在空间中按一定规律排列的人工合成材料,具有光子禁带和光子局域两大特性<sup>[1-2]</sup>。依据这些特性设计了许多应用价值很高的通信器件,如光开关<sup>[3]</sup>、光分束

器<sup>[4]</sup>、光波分复用器<sup>[5]</sup>和光纤传感器<sup>[6]</sup>等,其制作工艺简单、易于集成,具有很好的应用价值。

全光集成电路由于在光计算机、高速数据处理和光网络等方面的突出性能,近年来越来越受到人们的重视<sup>[7]</sup>。光子晶体对光集成电路中的光逻辑门的小型化起着重要作用。目前,基于光子晶体实现逻辑门

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-03-30; 录用日期: 2019-04-09

基金项目: 甘肃省自然科学基金(1610RJZA046)、光电技术与智能控制教育部重点实验室(兰州交通大学)开放课题(KFKT2018-11)

\* E-mail: wuxs\_laser@mail.lzjtu.cn

的主要方法有自准直效应<sup>[8-9]</sup>、多模干涉效应<sup>[10-11]</sup>和非线性效应<sup>[12-13]</sup>等技术。自准直光束门需要在门的输入端设置一个移相器来实现逻辑运算,这将导致器件尺寸较大;多模干涉逻辑门对于不同的逻辑门,耦合长度不同且都需要精确的控制,故其结构变得复杂,增大了工艺难度<sup>[14]</sup>;基于非线性材料的光子晶体逻辑门具有逻辑“1”和逻辑“0”的高对比度,但因为功耗高、相互作用时间长等限制了其应用。

本文利用二维光子晶体环形腔与微腔的耦合特性,设计了几种二维光子晶体全光逻辑门器件。通过引入两束输入光波在耦合腔内的光程差,产生相应的相位差,从而导致光的相长干涉和相消干涉,实现了与、或、非、异或等逻辑功能。用平面波展开法和时域有限差分法分析讨论器件的能带结构和场分布情况,通过光信号功率表示逻辑值并对其逻辑功能进行验证,结果显示,所设计的器件不仅物理尺寸小,而且响应快,在集成光学领域具有潜在的应用前景。

## 2 理论与工作原理

基于光子晶体逻辑门的工作原理为干扰效应的利用。在空气中填充正方晶格排列的硅介质柱以构成二维光子晶体结构,介质柱折射率  $n=3.4$ ,晶格常数  $a=0.55 \mu\text{m}$ ,介质柱半径  $r=0.182a$ 。利用平面波展开法得到完整光子晶体的带隙结构,频率处于光子带隙的光将在光子晶体中禁止传播,但在完美周期结构中引入缺陷可使这些频率的光波通过。因此,去掉几排适当的介质柱构成线性波导和环形谐振腔,控制不同输入端口使输入信号在耦合腔内的光程不同,产生不同的相位差,得到不同的逻辑功能。

根据光波导理论,如果两束光波之间的相位差为  $2m\pi$  ( $m=0,1,2,\dots$ ) 时,则存在相长干涉,输出信号将被增强,输出端将得到与逻辑“1”相对应的高功率;当相位差为  $(2m+1)\pi$  时,会产生相消干涉,从而得到接近于零的输出,这与逻辑状态“0”相对应。为了研究器件的工作频率范围,使用平面波展开法得到如图 1 所示的能带结构,其中  $\Gamma$ 、 $X$ 、 $M$  分别为布里渊区倒格空间的三个坐标。结果表明,只有在 TM 模式下存在两条禁带,频率范围分别为  $0.302(a/\lambda)\sim 0.443(a/\lambda)$  和  $0.744(a/\lambda)\sim 0.763(a/\lambda)$ ,其中,  $a$  为晶格常数,  $\lambda$  为波长。因为禁带越宽,设计的器件性能越好,因此主要选取宽的一条禁带进行器件设计,对应波长为  $1.24\sim 1.82 \mu\text{m}$ 。

为了获得光的传输情况,用时域有限差分法对设计的逻辑门结构进行模拟分析,采用 TM 模式的

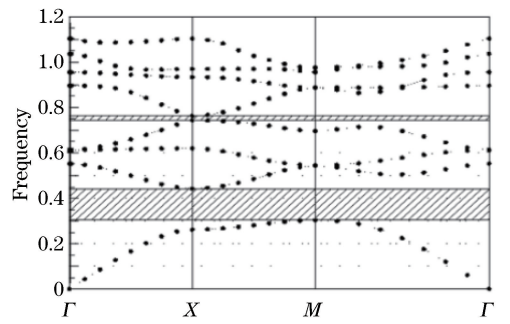


图 1 完整光子晶体能带图

Fig. 1 Energy band structure of complete photonic crystal

高斯光源入射,宽度为  $1.2 \mu\text{m}$ ,工作波长范围为  $1.3\sim 1.7 \mu\text{m}$ ,为保证仿真精度和减小数值色散,网格尺寸大小需小于  $\lambda/10$ ,因此设置网格大小为  $0.05 \mu\text{m}$  可以满足条件。吸收边界采用完全匹配边界层(PML),便可得到其场分布情况和功率大小。光逻辑门的性能可以通过分析对比度( $CR, C_R$ )来研究,其中  $C_R=10\lg(T_1/T_0)$ ,  $T_1$  为输出端输出逻辑“1”时的透射率,  $T_0$  为输出逻辑“0”时的透射率。在所有的模拟仿真中,都以功率为  $P_i$  的光源入射,如果在输出端口检测到的透射率小于或等于 0.3,则输出结果被视为逻辑“0”,如果检测到的透射率大于或等于 0.4,则输出结果被视为逻辑“1”。

## 3 结构与仿真分析

### 3.1 或门(OR)

为了设计基于光子晶体的光逻辑或门,在完整光子晶体中通过直接移除介质柱制作 2 条输入波导、1 条输出波导、1 个  $3\times 3$  的环形腔和 1 个微腔,微腔半径  $r_c=0.06a$ ,结构如图 2 所示,该器件的尺寸为  $9.35 \mu\text{m}\times 9.35 \mu\text{m}$ 。利用 Lumerical 软件对其结构进行扫描分析,得到图 3 所示的场分布图和图 4 所示的输出端透射率分布图。结果显示,当端口 A、B 均有光入射时,其输入信号分别用  $I_A$ 、 $I_B$  表

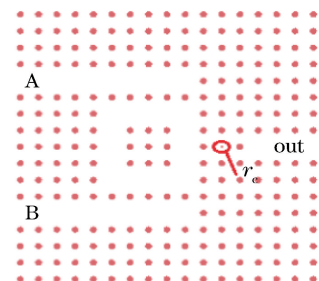


图 2 光子晶体或门结构

Fig. 2 Structure of OR gate of photonic crystal

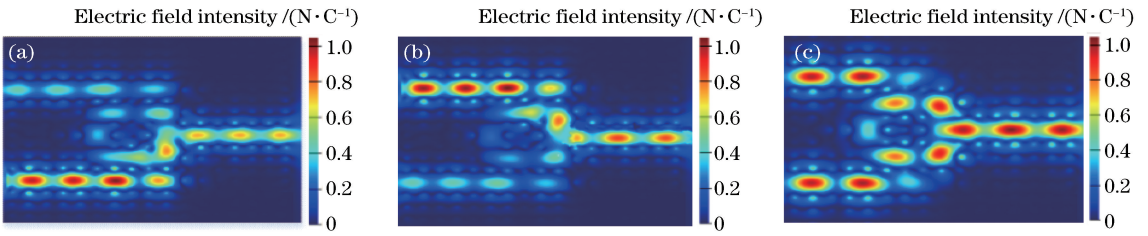


图3 或门的模拟场分布图。(a)  $I_A=0, I_B=1$ ; (b)  $I_A=1, I_B=0$ ; (c)  $I_A=1, I_B=1$

Fig. 3 Simulated field distributions of OR gate. (a)  $I_A=0, I_B=1$ ; (b)  $I_A=1, I_B=0$ ; (c)  $I_A=1, I_B=1$

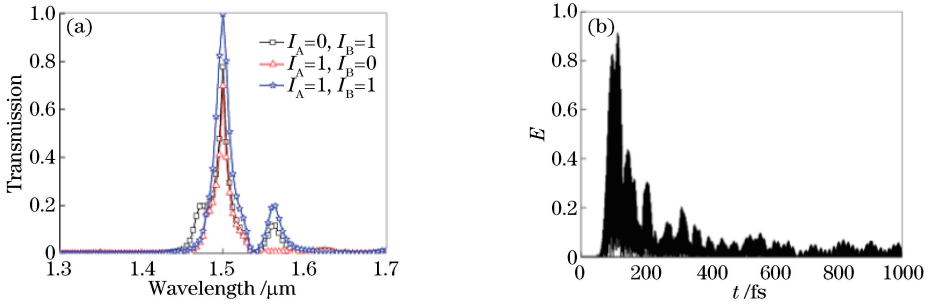


图4 或门的性能变化图。(a)输出端透射率分布;(b)时间响应曲线

Fig. 4 Performance variations of OR gate. (a) Transmittance of out port; (b) curve of time response

示,与环形腔耦合频率相同的光波将被耦合进入谐振腔内,一条在环形腔中沿顺时针方向运动,另一条沿逆时针方向运动,因为两束光经过的路径相同,因此相位也相同,这样这两束光波在输出端产生相长干涉,从而实现逻辑“1”输出;当只有一个端口有光入射时,一部分沿顺时针方向传播,一部分沿逆时针方向传播,最终在输出端相遇,由于顺时针和逆时针之间光程差为  $2a$ ,为偶数倍  $\pi$  的相位差,从而发生相长干涉,因此输出端实现逻辑“1”输出。其输出时间响应为 98 fs。从表 1 可以看出,只要有一个信号从输入端输入,则输出端透射率大于 0.4,输出逻辑“1”,符合或门的逻辑功能。

表 1 或门真值表

Table 1 Truth table of OR gate

$I_A$	$I_B$	Output logic	Transmittance
0	0	0	0
0	1	1	0.7714
1	0	1	0.6976
1	1	1	0.9969

### 3.2 与门(AND)

设计的逻辑与门结构如图 5 所示,由一个三角形的环形腔和微腔组成,以提高输出端的信号强度,微腔半径  $r_c=0.0982a$ ,其器件尺寸为  $11 \mu\text{m} \times 11.55 \mu\text{m}$ 。采用时域有限差分法对其结构进行模拟分析,得到如图 6 所示特定波长下的场分布图和图 7 所示的透射率分布图。结果显示,当 A、B 端口

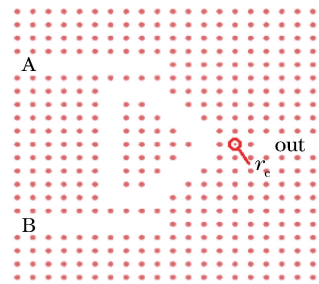


图5 光子晶体与门结构

Fig. 5 Structure of AND gate of photonic crystal

只有一束光入射时,被耦合进入谐振腔内的信号分成两部分在顺时针方向和逆时针方向传播,由于顺时针方向和逆时针方向路径之间存在路径差异,导致部分相消干涉,信号在输出端被减弱,输出逻辑“0”;当端口 A 和 B 同时有光波入射时,每个信号在谐振腔中都有顺时针部分和逆时针部分,由于从 A 和 B 到输出端的路径长度相同,因此在输出端口入口处产生相长性干涉,因此在输出端口检测到的信号是逻辑“1”。其时间响应为 85 fs,从表 2 真值表可以看出,与门的对比度为 8.72 dB。

### 3.3 异或门(XOR)

对与门结构采用非对称结构进行改进,得到异或门,其尺寸约为  $14.3 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$ 。因为从数字电路异或真值表中得到,如果两个输入信号都存在,则输出逻辑“0”,这意味着两个输入信号应该发生相消的干扰,可通过控制端口 A 和 B 分别到输出端的路

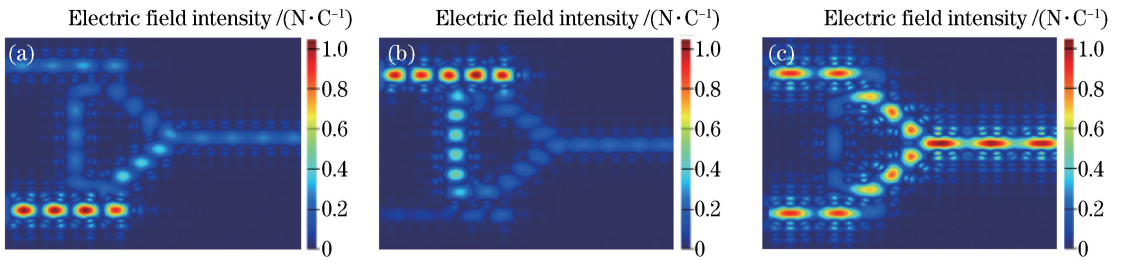


图 6 与门的模拟场分布图。(a)  $I_A=0, I_B=1$ ; (b)  $I_A=1, I_B=0$ ; (c)  $I_A=1, I_B=1$

Fig. 6 Simulated field distributions for AND gate. (a)  $I_A=0, I_B=1$ ; (b)  $I_A=1, I_B=0$ ; (c)  $I_A=1, I_B=1$

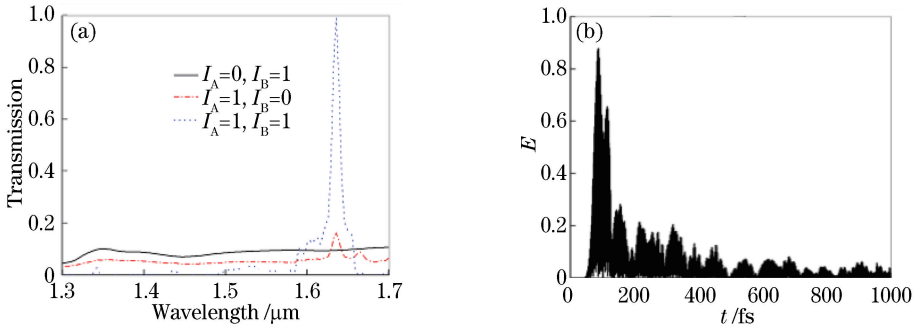


图 7 与门的性能变化图。(a) 输出端透射率分布; (b) 时间响应曲线

Fig. 7 Performance variations of AND gate. (a) Transmittance of out port; (b) curve of time response

表 2 与门真值表

Table 2 Truth table of AND gate

$I_A$	$I_B$	Output logic	Transmittance
0	0	0	0
0	1	0	0.1330
1	0	0	0.1621
1	1	1	0.9895

径长度不同来实现。设计的异或门结构如图 8 所示,谐振腔是非对称结构。利用时域有限差分法对其结构进行模拟分析,得到如图 9 所示的场分布图和图 10 所示的透射率分布图,只有一个端口有信号入射时,与谐振腔耦合的信号部分沿顺时针方向传播,部分沿逆时针方向传播,顺时针和逆时针相位差很小,产生相长干涉,因此在输出端口检测到逻辑

“1”;如果同时在 A、B 端口发射信号,则在谐振腔中引入的路径差在输出端口产生相消干涉,从而实现输出端的逻辑“0”。输出端时间响应为 130 fs,根据表 3 所示的真值表,对比度为 9.14 dB。

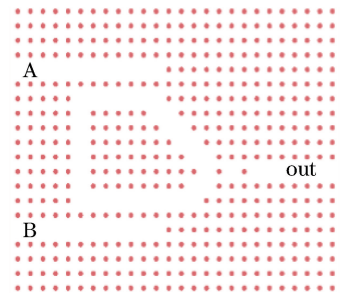


图 8 光子晶体异或门结构

Fig. 8 Structure of XOR gate of photonic crystal

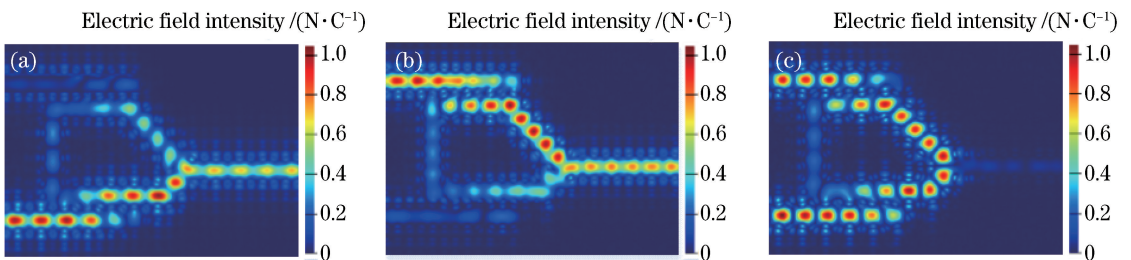


图 9 异或门的模拟场分布图。(a)  $I_A=0, I_B=1$ ; (b)  $I_A=1, I_B=0$ ; (c)  $I_A=1, I_B=1$

Fig. 9 Simulated field distributions of XOR gate. (a)  $I_A=0, I_B=1$ ; (b)  $I_A=1, I_B=0$ ; (c)  $I_A=1, I_B=1$



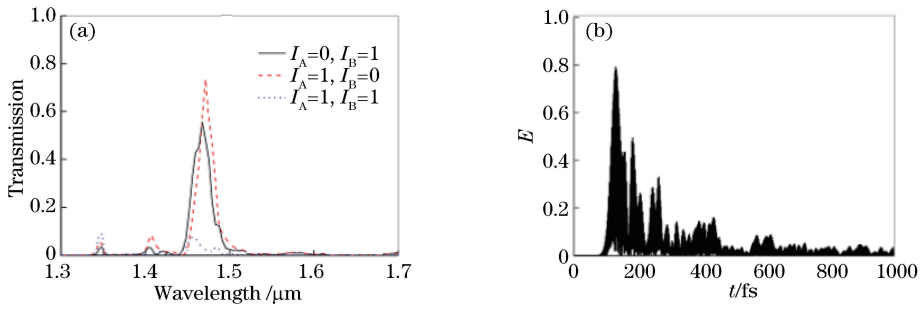


图 10 异或门的性能变化图。(a)输出端透射率分布;(b)时间响应曲线

Fig. 10 Performance variations of XOR gate. (a) Transmittance of out port; (b) curve of time response

表 3 异或门真值表

Table 3 Truth table of XOR gate

$I_A$	$I_B$	Output logic	Transmittance
0	0	0	0
0	1	1	0.5571
1	0	1	0.7349
1	1	0	0.0895

在异或门基础上,将端口 B 作为控制端口且一束光以逻辑“1”入射,若端口 A 无光信号输入,则输出端检测到逻辑“1”;若端口 A 有光信号输入,则输出端检测到逻辑“0”,即实现了非门的逻辑功能。

### 3.4 或非门(NOR)

或非门的设计,主要根据非门的思想,通过在异或门的一个输入端级联一个或门,另一个输入端接入一个参考控制信号(Ref)逻辑“1”控制,其逻辑过程为

$$Y = \overline{I_A + I_B} \cdot 1 + (I_A + I_B) \cdot \overline{1} = \overline{I_A + I_B}, \quad (1)$$

式中,Y 为输出端口信号,变量上方横线指对其变量取反。得到或非门结构如图 11 所示,其尺寸为  $19.8 \mu\text{m} \times 15.4 \mu\text{m}$ 。

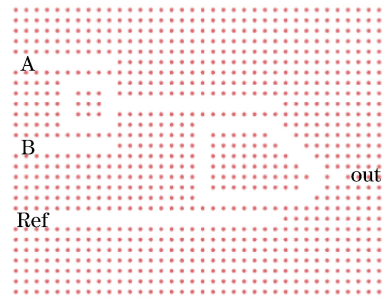


图 11 光子晶体或非门结构

Fig. 11 Structure of NOR gate of photonic crystal

利用时域有限差分法对其结构进行模拟分析,得到如图 12 所示的场分布图和图 13 所示的透射率分布图。两端口都没有光波输入时,输出端检测到逻辑“1”;A、B端口只要有一个端口有光波输入,则

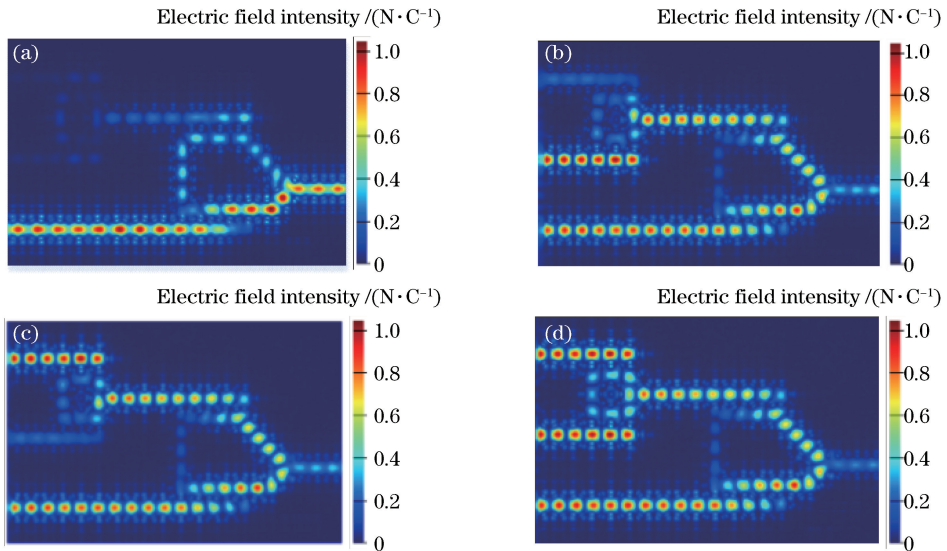


图 12 或非门的模拟场分布图。(a)  $I_A=0, I_B=0$ ;(b)  $I_A=0, I_B=1$ ;(c)  $I_A=1, I_B=0$ ;(d)  $I_A=1, I_B=1$

Fig. 12 Simulated field distributions of NOR gate. (a)  $I_A=0, I_B=0$ ; (b)  $I_A=0, I_B=1$ ; (c)  $I_A=1, I_B=0$ ; (d)  $I_A=1, I_B=1$

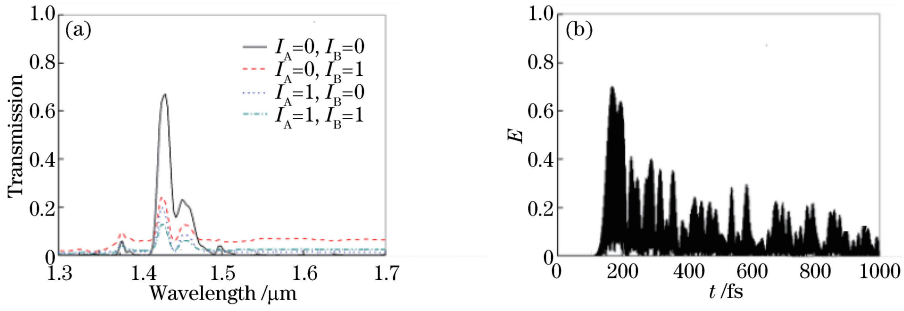


图 13 或非门的性能变化图。(a)输出端透射率分布;(b)时间响应曲线

Fig. 13 Performance variations of NOR gate. (a) Transmittance of out port; (b) curve of time response

输出端检测逻辑“0”。输出端时间响应为160 fs,从表 4 真值表可以看出,其对比度为 7.3 dB。

表 4 或非门真值表

Table 4 Truth table of NOR gate

$I_A$	$I_B$	Output logic	Transmittance
0	0	1	0.6897
0	1	0	0.2420
1	0	0	0.1969
1	1	0	0.1284

### 3.5 与非门(NAND)

图 14 为设计的与非门结构,由两个并联的异或门的输出端分别接到或门的输入端构成,其微腔半径  $r_c=0.06a$ ,尺寸约为  $21.45 \mu\text{m} \times 20.35 \mu\text{m}$ 。而每个异或门的一个输入端由一个值为逻辑“1”的参考信号(Ref)控制,另一个端口作为输入端。

其逻辑过程为

$$Y = (\overline{I_A} \cdot 1 + I_A \cdot \overline{1}) + (\overline{I_B} \cdot 1 + I_B \cdot \overline{1}) = \overline{I_A} + \overline{I_B} = \overline{I_A I_B} \quad (2)$$

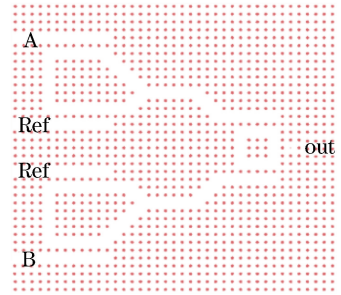


图 14 光子晶体与非门结构

Fig. 14 Structure of NAND gate of photonic crystal

其场分布如图 15 所示,透射率分布如图 16 所示。当不存在输入信号时,参考信号分别从上、下两个异或门输入,以逻辑“1”输出再经过或门的输入,最终

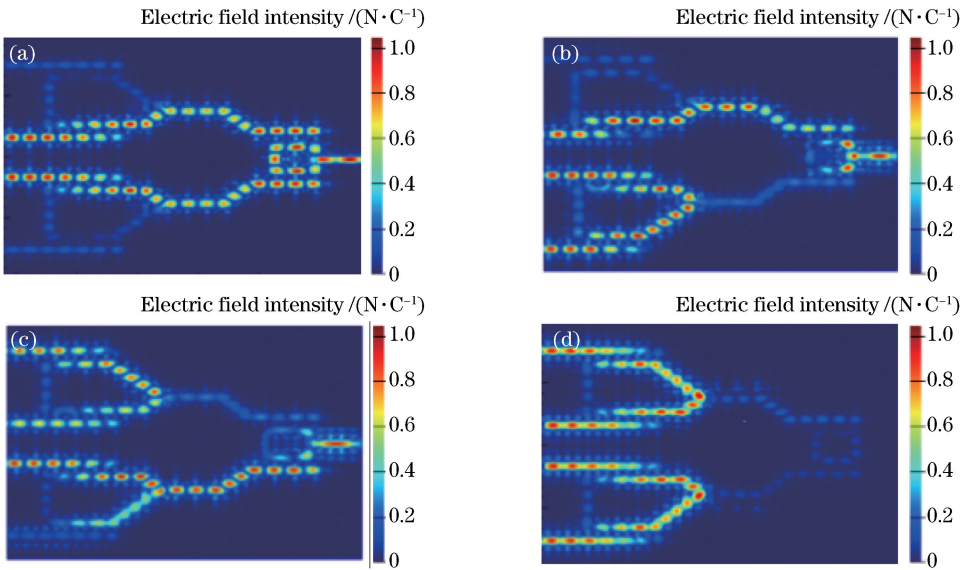


图 15 与非门的模拟场分布图。(a)  $I_A=0, I_B=0$ ;(b)  $I_A=0, I_B=1$ ;(c)  $I_A=1, I_B=0$ ;(d)  $I_A=1, I_B=1$

Fig. 15 Simulated field distributions of NAND gate. (a)  $I_A=0, I_B=0$ ; (b)  $I_A=0, I_B=1$ ;

(c)  $I_A=1, I_B=0$ ; (d)  $I_A=1, I_B=1$

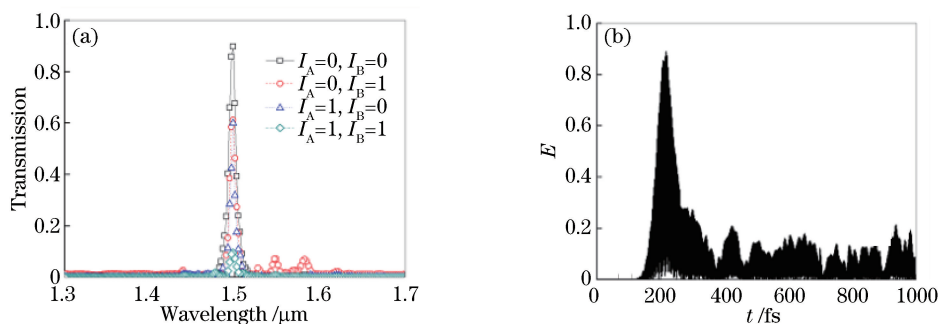


图 16 与非门的性能变化图。(a)输出端透射率分布;(b)时间响应曲线

Fig. 16 Performance variations of NAND gate. (a) Transmittance of out port; (b) curve of time response

在输出端检测到逻辑“1”;如果 A 和 B 只有一个端口有光信号输入,其中一个异或门给出逻辑“1”,另一个异或门给出逻辑“0”,则或门的输入为“1”和“0”,在输出端将给出逻辑“1”;如果 A 和 B 同时都有信号输入,则两个异或门都给出逻辑“0”,则或门无信号输入,因此在输出端检测到逻辑“0”,输出端时间响应为 218 fs。从表 5 真值表可以看出,其最大对比度为 8.89 dB,最小对比度为 8 dB。

表 5 与非门真值表

Table 5 Truth table of NAND gate

$I_A$	$I_B$	Output logic	Transmittance
0	0	1	0.5989
0	1	1	0.6488
1	0	1	0.7349
1	1	0	0.0950

## 4 结 论

提出一种新的全光逻辑门的设计方法,利用光子晶体的光子禁带特性,与环形谐振器相结合,引入光程差,并对其精确控制,导致信号产生不同的相位而发生相长干涉和相消干涉,大大提高了器件的时间响应速度。用平面波展开法分析完整光子晶体的能带结构,并用时域有限差分法分析特定频率的传输情况和场分布情况,对其逻辑功能进行验证。模拟分析结果表明,各逻辑器件对比度高,均在 7.3 dB 以上,且器件尺寸小,时间响应快,均在 218 fs 以内,在集成光器件领域具有潜在的应用价值。

## 参 考 文 献

- [1] Panoiu N C, Bahl M, Osgood R M, Jr. All-optical tunability of a nonlinear photonic crystal channel drop filter[J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1605-1610.
- [2] Liu J P, Li H B, Meng X D, *et al.* Eigenfield distribution of two-dimensional functional photonic

crystals with point defects [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0803001.

刘继平, 李海波, 孟祥东, 等. 含点缺陷二维函数光子晶体的本征场分布[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0803001.

- [3] Liang L X, Zhang X J, Wu X S, *et al.* Terahertz filter and optical switch based on magnetic-photonic crystals [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(5): 0513002.

梁龙学, 张晓金, 吴小所, 等. 基于磁光子晶体的太赫兹滤波器 and 光开关[J]. *光学学报*, 2018, 38(5): 0513002.

- [4] Li X Y, Xu Z L, Liu P, *et al.* Short polarization splitter based on dual-core photonic crystal fiber with ultra-high extinction ratio [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0605006.

李绪友, 许振龙, 刘攀, 等. 短长度超高消光比双芯光子晶体光纤偏振分束器[J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0605006.

- [5] Li X, Le Z C. The design and simulation of wavelength division demultiplexer based on photonic crystal micro-cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(s1): 0123003.

李旭, 乐孜纯. 光子晶体微腔稀疏波分解复用器的设计与模拟[J]. *光子学报*, 2014, 43(s1): 0123003.

- [6] Li J H, Pei L, Wang J S, *et al.* Temperature and magnetic field sensor based on photonic crystal fiber and surface plasmon resonance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0210002.

李佳欢, 裴丽, 王建帅, 等. 基于光子晶体光纤表面等离子体共振的温度和磁场双参量传感器[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0210002.

- [7] Zhang Y, Chen M X, Li Y Y, *et al.* Application and development prospects of optical micro-resonators [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(4): 040002.

张莹, 陈梅雄, 李莹颖, 等. 光学微腔的应用和发展

- 前景 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 040002.
- [8] Zhang Y L, Zhang Y, Li B J. Optical switches and logic gates based on self-collimated beams in two-dimensional photonic crystals [J]. Optics Express, 2007, 15(15): 9287-9292.
- [9] Xavier S C, Arunachalam K, Caroline E, *et al.* Design of two-dimensional photonic crystal-based all-optical binary adder [J]. Optical Engineering, 2013, 52(2): 025201.
- [10] Liu W J, Yang D Q, Shen G S, *et al.* Design of ultra compact all-optical XOR, XNOR, NAND and OR gates using photonic crystal multi-mode interference waveguides [J]. Optics & Laser Technology, 2013, 50: 55-64.
- [11] haq Shaik E, Rangaswamy N. Multi-mode interference-based photonic crystal logic gates with simple structure and improved contrast ratio [J]. Photonic Network Communications, 2017, 34(1): 140-148.
- [12] Notomi M, Shinya A, Mitsugi S, *et al.* Optical bistable switching action of Si high-Q photonic-crystal nanocavities [J]. Optics Express, 2005, 13(7): 2678-2687.
- [13] Serajmohammadi S, Absalan H. All optical NAND gate based on nonlinear photonic crystal ring resonator [J]. Information Processing in Agriculture, 2016, 3(2): 119-123.
- [14] Zhang X J, Liang L X, Wu X S, *et al.* Design and study of whole optical XOR logic gate of two dimensional photonic crystals [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(12): 1772-1777.  
张晓金, 梁龙学, 吴小所, 等. 二维光子晶体全光异或门的设计及研究 [J]. 发光学报, 2018, 39(12): 1772-1777.