

文章编号 1004-924X(2012)12-2626-07

基于自准直效应的硅基光子晶体 1×4 光复用器

陈胜钰^{1*}, 庄冬霞², 强则焯², 陈曦曜^{1,2}

(1. 闽江学院 物理学与电子信息工程系, 福建 福州 350108;

2. 福建师范大学 光电与信息工程学院, 福建 福州 350007)

摘要:利用光子晶体的自准直效应进行光束的控制, 实现了基于自准直效应的二维光子晶体 1×4 光复用器(OMUX)。在结构中放置两个腔长不同的马赫-曾德干涉仪, 利用光束干涉原理推导出光复用器各个出口的透射谱理论公式, 然后利用时域有限差分软件对其进行数值模拟。结果显示: 模拟结果与理论分析一致, 实现了 1×4 光复用器的功能。当工作波长为 1 550 nm 时, OMUX 的自由光谱区为 34.1 nm, 覆盖了整个光通信 C 波段。由于结构大小只有 $40 \sim 35 \mu\text{m}$, 并且有较高的输出功率, 该光复用器在光集成电路中有潜在的应用价值。

关键词:光子晶体; 自准直; 马赫-曾德干涉仪; 光复用器

中图分类号: TN915.05 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122012.2626

1×4 optical multiplexer based on self-collimation effect in silicon photonic crystals

CHEN Sheng-yu¹, ZHUANG Dong-xia², QIANG Ze-xuan², CHEN Xi-yao^{1,2}

(1. *Department of Physics and Electronic Information Engineering,*

Minjiang University, Fuzhou 350108, China;

2. School of Physics and Optoelectronics Technology,

Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

** Corresponding author, E-mail: chensy73@163.com*

Abstract: An 1×4 Optical Multiplexer (OMUX) based on the self-collimation effect of a two-dimensional photonic crystal was proposed and its performance was numerically demonstrated. Two Mach-Zehnder Interferometers (MZIs) with different cavity lengths were placed in the structure. Firstly, the theoretical transmission spectra at different output ports of the cascaded MZI were analyzed with the theory of light interference, then they were investigated with the Finite-difference Time-domain (FDTD) simulation technique. The simulation results agree well with the theoretical prediction, so the cascaded Mach-Zehnder interferometer can work as a 1×4 optical multiplexer. When the wavelength is 1 550 nm, the free spectral range of the OMUX is about 34.1 nm, which almost covers the whole optical communication C-band window. The presented device shows a compact size within $40 \sim 35 \mu\text{m}$ and a high output efficiency, and has potential application values to photonic

收稿日期: 2012-10-19; 修订日期: 2012-11-02.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目 (No. 2011J01017)

integrated circuits.

Key words: photonic crystal; self-collimation; Mach-Zehnder interferometer; optical multiplexer

1 引言

光子晶体是一种介电常数成周期性分布的人工电介质结构,也是一个优良的纳米光电器件制造平台。光子晶体的一个非常特殊的性质为自准直效应,该效应自 1999 年被 Kosaka^[1]发现以来受到了人们的广泛关注,其相关研究也取得了很大进展^[2-6]。自准直效应提供了一种新的控制光束在光子晶体中传播的方法^[1,7-11],它可以使一定频率的光波在光子晶体中沿某个方向无展宽传输。因此,基于光子晶体自准直效应的光器件在高集成电路中有潜在的应用价值,目前已经有多种基于自准直效应的纳米光器件得到应用,如法布里-珀罗腔^[12-14],马赫-曾德干涉仪^[4,15-17]等。

波分复用是将多种不同波长的光信号耦合到光线路的同一根光纤中进行传输的技术,它能够增加光纤的传输容量并且具有较强的灵活性。目前,基于硅基的波分复用由于低成本、高集成而越来越受到关注。在波分复用系统中,多路复用器扮演着非常重要的角色,目前已经报道了多种波分复用器件^[18-22]。基于二维硅基光子晶体自准直效应的光复用器,无需在晶体中引入缺陷即可对光束进行有效控制,具有尺寸小、成本低、输出功率高等优点。

本文提出了一种包含级联马赫-曾德干涉仪(Mach-Zehnder Interferometer, MZI)的二维硅基光子晶体 1×4 光复用器,它利用光子晶体的自准直效应进行光束控制,包括了两个腔长彼此不同的 MZI,两个腔长的差异决定着输出透射谱的周期性。最后利用时域有限差分软件对 1×4 OMUX 进行了数值模拟。

2 1×4 OMUX 的结构设计及数值模拟

2.1 二维空气孔光子晶体自准直频率范围

如图 1 所示,二维正方晶格空气孔型光子晶体以硅为背景材料,其介质常数 $\epsilon=12$;空气孔的

半径 r 等于 $0.33a$, a 为晶格常数。利用平面波展开法得到等频图(见图 1)和色散关系曲线(见图 2)(均为 TM 模式,第一能带),图中 k_x 和 k_y 分别表示光波矢空间的横坐标和纵坐标。由图 1 可以发现,在 $0.176c/a \sim 0.190c/a$ 频率内等频线的形状接近于直线,方向垂直于 ΓM 。其中, c 为真空中的光速。根据自准直效应,在该频率区间光可以在光子晶体内无展宽自准直传输。

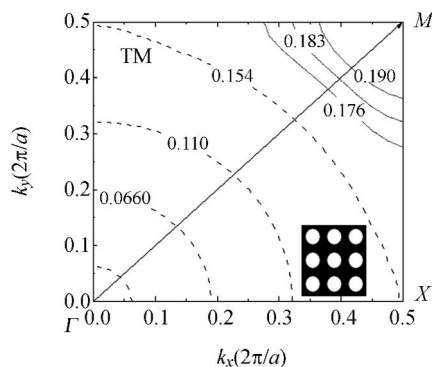


图 1 半径为 $0.33a$ 的孔状硅基光子晶体第一能带 TM 模式等频图

Fig. 1 Equal-frequency contours (EFCs) of first band in TM modes in silicon photonic crystal with air-hole radius of $0.33a$

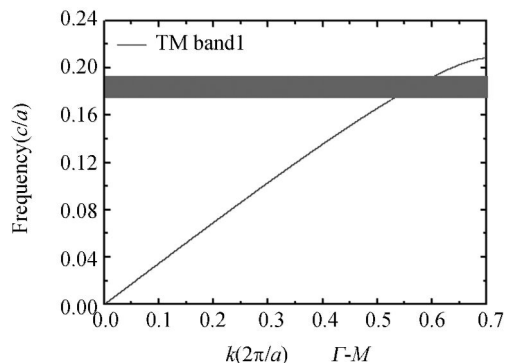


图 2 半径为 $0.33a$ 的孔状硅基光子晶体色散曲线图

Fig. 2 Dispersion curve in silicon photonic crystal with air-hole radius of $0.33a$

2.2 1×4 OMUX 结构设计

如图 3 所示,二维硅基光子晶体 1×4 光复用器包含两个 MZI,其由 5 个反射镜(M_1, M_2, M_3, M_4, M_5)和 4 个分束器(S_1, S_2, S_3, S_4)组成,每个

MZI 包含 2 个反射镜和 2 个分束器。其中,反射镜是用矩形的空气缺陷来制作,缺陷宽度为 5 排

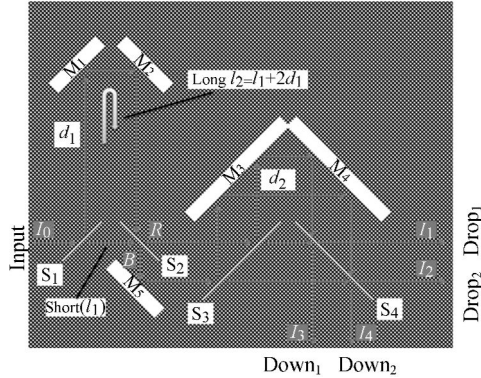


图 3 二维硅基光子晶体 1×4 光复用器

Fig. 3 Schematic of 1×4 optical multiplexer based on two-dimensional photonic crystal

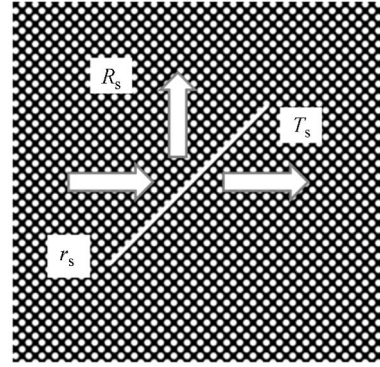
空气孔的宽度,每排长度包含 25 个空气孔。而分束器由沿 ΓX 方向插入一排半径为 $r_s = 0.41a$ 的空气柱来实现,如图 4(a)所示。该光复用器共有 4 个光输出口,包括 2 个 Down 端口(Down₁, Down₂), 2 个 Drop 端口(Drop₁, Drop₂)。

首先,光束入射到第一级 MZI 时,遇到分束器 S_1 被分裂为反射光和透射光两部分。反射光与透射光分别沿着光程不等的两个光路进行传播:两个光程分别为长光程(Long) l_2 ; 短光程(Short) l_1 。根据图 3 可知, $l_2 = l_1 + 2d_1$, 其中 d_1 表示分束器 S_1 和反射镜 M_1 之间的距离。当沿着长光程与短光程传播的两束光遇到分束器 S_2 时再一次进行分裂并产生干涉,出射光束分别从第一级 MZI 的两个出口(R, B)输出,其中,一束光直接进入 S_3 进入第二级 MZI; 而另一束则先经反射镜 M_5 反射后进入第二级 MZI。光束在第二级 MZI 中的传播情况与第一级相同,此时长短两束光之间的光程差为 $2d_2$, d_2 为分束器 S_3 与反射镜 M_3 之间的距离。各光束经过 S_4 的反射和透射后又形成干涉,最后出射光束分别从 4 个端口输出。

2.3 分束镜反射率与半径

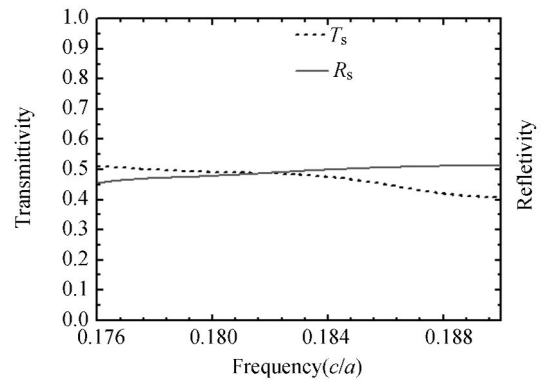
分束器为 1×4 OMUX 结构最基础的元件,本文首先用二维时域有限差分(Finite Difference Time Domain, FDTD)软件模拟了分束器的反射率与空气孔半径的关系,结果如图 4(b)所示。在自准直频率为 $0.176c/a \sim 0.19c/a$, TM 偏振模式半径为 $0.41a$ 时,分束器的反射率 R_s 与透射率

T_s 都在 50% 左右,反射率与透射率的比值约为 1:1。



(a) 光子晶体线缺陷构成自准直分束器

(a) Self-collimation beam splitter formed by line defect in photonic crystal with radius of $0.41a$



(b) 自准直范围内分束器半径为 $0.41a$ 的透射率和反射率

(b) Transmittivity and reflectivity of splitter with radius of $0.41a$ in self-collimation frequency range

图 4 光子晶体自准直分束器及其透射率和反射率

Fig. 4 Photonic crystal self-collimation beam splitter and its transmittivity and reflectivity

2.4 单个 MZI 透射谱分析

对于单个 MZI 来说,根据干涉原理,2 个出口的透射谱公式表示为:

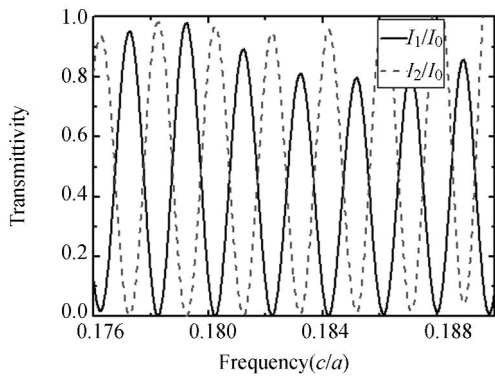
$$I_1/I_0 = 1 - 4T_s R_s \cos^2(kd + \theta), \quad (1)$$

$$I_2/I_0 = 4T_s R_s \cos^2(kd + \theta), \quad (2)$$

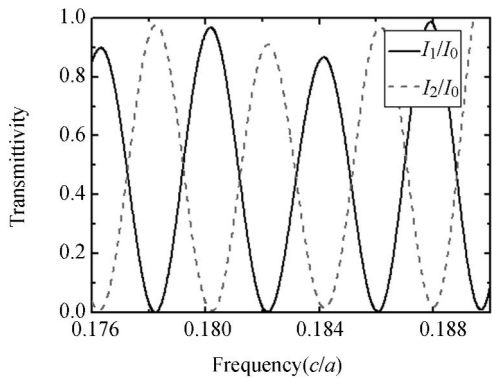
式中: R_s 和 T_s 分别是分束器的反射率与透射率; I_0 为入射自准直光束的光强, I_1 和 I_2 分别是 MZI 右端出口和下路出口的光强; k 为自准直传输的光波矢; d 是干涉仪中两个光路光程差的一半; θ 为两个光路通过分束器或反射镜时,产生的相位突变之差。这里假设各反射镜的反射率为

100%。

根据公式(1)和(2)可知,两个出口的透射谱刚好互补,因为 $I_1 + I_2 = I_0$ 。它们的振幅都为 $4R_s T_s$, I_1 出口的透射谱是 $[(1 - 4R_s T_s), 1]$, 而 I_2 出口的是 $[0, 4R_s T_s]$ 。当分束器的反射率与透射率都等于 0.5 时(此时 $4R_s T_s = 1$), I_1 出口和 I_2 出口的透射谱都处在 $[0, 1]$ 内,振幅均为 1。如果分束器的反射率 $R_s \neq 0.5$, 则 $4R_s T_s < 1$, 两个出口透射谱振幅均小于 1 且不在同一个范围内。



(a) $d_1 = 44\sqrt{2}a$ 时第一级 MZI 的 TM 模式透射谱
(a) Transmission spectra in TM modes for first MZI when $d_1 = 44\sqrt{2}a$



(b) $d_2 = 22\sqrt{2}a$ 时第二级 MZI 的 TM 模式透射谱
(b) Transmission spectra in TM modes for second MZI when $d_2 = 22\sqrt{2}a$

图 5 FDTD 模拟第一级和第二级 MZI 的透射谱
Fig. 5 Transmission spectra of first and second MZIs by FDTD simulation

为了验证上述理论,利用时域有限差分法计算了单个 MZI 的透射谱。图 5 所示为 $d_1 = 44\sqrt{2}a$ 和 $d_2 = 22\sqrt{2}a$ 时单个 MZI 的透射谱,在自

准直频率为 $0.176c/a \sim 0.190c/a$ 时,透射谱呈正弦型且在 $[0, 1]$ 内振荡,这与理论分析相吻合。通过对比图 5(a) 与 (b) 可以看出, $d_1 = 44\sqrt{2}a$ 和 $d_2 = 22\sqrt{2}a$ 的透射峰频率间隔为 1:2。

2.5 1×4 OMUX 理论分析与数值模拟

级联 MZI 结构包含一个光入射端口 (Input), 两个 Down 端口 ($Down_1, Down_2$), 两个 Drop 端口 ($Drop_1, Drop_2$), 利用光干涉原理可得到 4 个输出端口的理论透射谱公式:

$$I_1/I_0 = [1 - 4T_s R_s \cos^2(kd_1 + \theta_1)][1 - 4T_s R_s \cos^2(kd_2 + \theta_1)], \quad (3)$$

$$I_2/I_0 = 4T_s R_s \cos^2(kd_1 + \theta_1)[1 - 4T_s R_s \cos^2(kd_2 + \theta_2)], \quad (4)$$

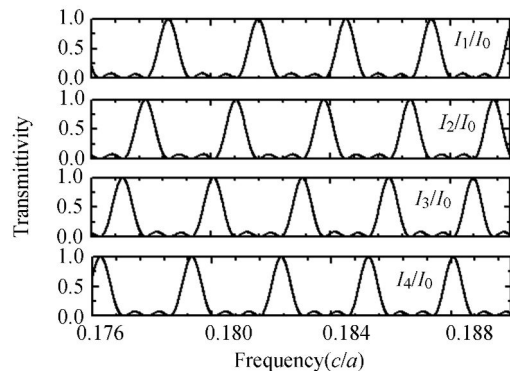
$$I_3/I_0 = [1 - 4T_s R_s \cos^2(kd_1 + \theta_1)]4T_s R_s \cos^2(kd_2 + \theta_1), \quad (5)$$

$$I_4/I_0 = 4T_s R_s \cos^2(kd_1 + \theta_1)4T_s R_s \cos^2(kd_2 + \theta_2), \quad (6)$$

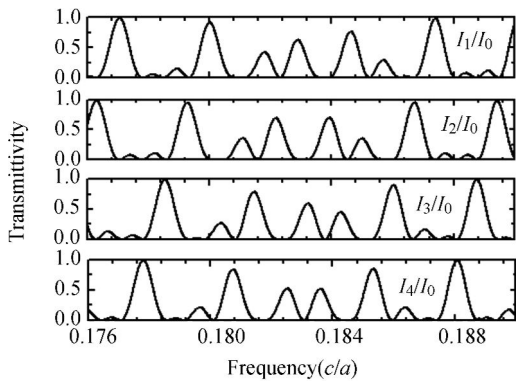
式中: I_1, I_2, I_3, I_4 分别为 4 个出口的光强; k 为自准直传输的光波矢; d_1 为是第一级 MZI 中分束器 S_1 和反射镜 M_1 之间的距离; d_2 为第二级 MZI 分束器 S_3 和反射镜 M_3 之间的距离。

为了实现级联 MZI 的二维光子晶体 1×4 光波复用的功能,首先根据公式(3)~(6)得出它的理论透射谱,如图 6 所示,对比图(a)和(b)可知,只有在 $d_1 = 2d_2$ 时 4 个出口的透射谱 $I_i (i=1, 2, 3, 4)$ 有相同的峰间距且峰值能达到最大。

根据上述分析,取级联 MZI 结构的第一级与第二级腔长满足 $d_1 = 2d_2$, 并用 FDTD 软件对其透射谱进行数值模拟。取频率在自准直范围内的高斯光束从结构的 Input 端口入射,光束在结构中传播之后在 4 个出口处形成干涉输出,入射光



(a) $d_1 = 2d_2, d_2 = 22\sqrt{2}a$



$$(b) d_1 \neq 2d_2, d_2 = 25\sqrt{2}a$$

图 6 级联 MZI 的理论透射谱

Fig. 6 Theoretical transmission spectra of cascaded MZI

强和出射光强分别由设置的 5 个光探测器探测。第一级 MZI 和第二级的腔长分别取为 $d_1 = 44\sqrt{2}a$ 和 $d_2 = 22\sqrt{2}a$ 。数值模拟结果如图 7 所示。

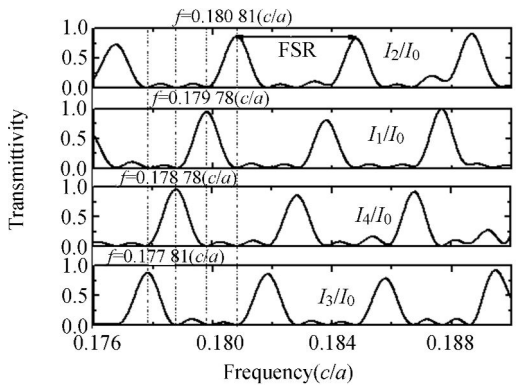
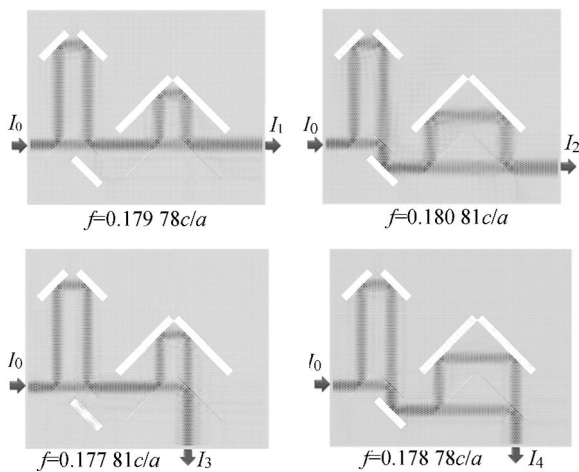
图 7 FDTD 模拟 1×4 OMUX 的 TM 模式的透射谱Fig. 7 Transmission spectra of 1×4 OMUX in TM modes by FDTD simulation

图 8 不同频率的稳态磁场强度分布

Fig. 8 Steady-state magnetic field distribution with different frequencies

在图 7 中,当频率为 $f=0.17978c/a$,输出端口 Drop₁ 的光强为 $I_1 = 0.95I_0$,其他输出端口的光强几乎为零;频率为 $f=0.18081c/a$ 时, I_2 达到最大值 $0.87I_0$,而另外 3 个出口的光强则为最小值。同样的情况发生在 Down₁、Down₂ 端口处,此时频率分别取 $0.17781c/a$ 和 $0.17878c/a$,它们的光强分别为 $0.88I_0$ 和 $0.96I_0$ 。表 1 为不同频率下相应端口的消光比。值得注意的是,理论分析中各个出口光强最大值应为 1,而模拟结果略小于理论值,这是由于光在自准直传播中有一定的损耗,但总体还是与理论分析结果相符的。图 8 为以不同频率入射的自准直光束的稳态磁场强度分布图,可以看出光能量全部从一个端口输出。当工作波长为 1550 nm 时,这个结构的晶格常数为 280.1 nm ,结构大小只有 $40\ \mu\text{m} \times 35\ \mu\text{m}$,自由光谱区等于 34.1 nm ,覆盖了整个光通信系统的 C 波段。

表 1 不同频率相应端口的消光比

Tab. 1 Polarization extinction ratios of corresponding ports with different frequencies

消光比	10 lg (I_f/I_1)	10 lg (I_f/I_2)	10 lg (I_f/I_3)	10 lg (I_f/I_4)
I_1	—	19.83	20.83	25.72
$f_1 = 0.17978c/a$				
I_2	23.43	—	22.42	22.64
$f_2 = 0.18081c/a$				
I_3	22.98	20.82	—	19
$f_3 = 0.17781c/a$				
I_4	34.76	24.47	28.03	—
$f_4 = 0.17878c/a$				

3 结 论

本文设计了一种基于自准直效应的光子晶体 1×4 光复用器,其结构包含两个马赫-曾德干涉仪。首先根据光干涉原理对其理论透射谱进行了分析,然后利用时域有限差分法进行数值模拟,模拟结果与理论分析结果相符。当工作波长为 1550 nm ,其结构大小仅在微米数量级,自由光谱区为 34.1 nm 。该复用器有望应用在光子集成芯片中。

参考文献:

- [1] KOSAKA H. Self-collimating phenomena in photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, 74(9):1212.
- [2] PRATHER D W, SHI S, MURAKOWSKI J, *et al.*. Self-collimation in photonic crystal structures: a new paradigm for applications and device development [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2007, 40(9):2635-2651.
- [3] YU X. Bends and splitters for self-collimated beams in photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(16):3251.
- [4] ZHAO D Y. Photonic crystal Mach-Zehnder interferometer based on self-collimation [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(23):231114.
- [5] ZABELIN V, DUNBAR L, LE T N, *et al.*. Self-collimating photonic crystal polarization beam splitter [J]. *Opt. Lett.*, 2007, 32(5):530-532.
- [6] CHEN X Y, QIANG Z X, ZHAO D Y, *et al.*. Polarization-independent drop filters based on photonic crystal self-collimation ring resonators [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(22):19808-19813.
- [7] KIM S H, KIM T T, OH S, *et al.*. Experimental demonstration of self-collimation of spoof surface plasmons [J]. *Physical Review B*, 2011, 83(16):165109.
- [8] PAKICH P T, DAHLEM M S, TANDON S, *et al.*. Achieving centimetre-scale supercollimation in a large-area two-dimensional photonic crystal [J]. *Nature Materials*, 2006, 5(2):93-6.
- [9] LU Z, SHI S, MURAKOWSKI J A, *et al.*. Experimental demonstration of self-collimation inside a three-dimensional photonic crystal [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(17):173902.
- [10] CHIGRIN D, ENOCH S, SOTOMAYOR T C, *et al.*. Self-guiding in two-dimensional photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 2003, 11(10):1203-1211.
- [11] LI Z, CHEN H, SONG Z, *et al.*. Finite-width waveguide and waveguide intersections for self-collimated beams in photonic crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85(21):4834-4836.
- [12] CHEN X Y, ZHAO D Y, QIANG Z X, *et al.*. Polarization-independent Fabry-Perot interferometer in a hole-type silicon photonic crystal [J]. *Appl. Opt.*, 2010, 49(30):5878-5881.
- [13] KIM T T, LEE S G, KIM S H, *et al.*. Ring-type Fabry-Pérot filter based on the self-collimation effect in a 2D photonic crystal [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(16):17106-17113.
- [14] WANG Y F. Transmission spectrum of Fabry-Perot interferometer based on photonic crystal [J]. *SPIE*, 2007, 6838(1):683804.
- [15] CHEN X Y, QIANG Z X, ZHAO D Y, *et al.*. Polarization beam splitter based on photonic crystal self-collimation Mach-Zehnder interferometer [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1):490-493.
- [16] CHEN X Y, LI H, QIU Y S, *et al.*. Tunable photonic crystal Mach-Zehnder interferometer based on self-collimation [J]. *Chinese Physics Letters*, 2008, 25(12):4307-4310.
- [17] KIM T T, LEE S G, PARK H Y, *et al.*. Asymmetric Mach-Zehnder filter based on self-collimation phenomenon in two-dimensional photonic crystals [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(6):5384-5389.
- [18] E CENTENO BG, FELBACQ D. Multiplexing and demultiplexing with photonic crystals [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 1999, 1(5):L10-L13.
- [19] KIM S, PARK I, LIM H, *et al.*. Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters of three-port system with reflection feedback [J]. *Opt. Express*, 2004, 12(22):5518-5525.
- [20] KOSHIBA M. Wavelength division multiplexing and demultiplexing with photonic crystal waveguide couplers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, 19(12):1970.
- [21] FAN S H, ZHANG D Z. Reflectionless multichannel wavelength demultiplexer in a transmission resonator configuration [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(1):160-165.
- [22] SHARKAWY A, SHI S, PRATHER DW. Multichannel wavelength division multiplexing with photonic crystals [J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(14):2247-2252.

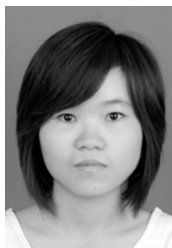
作者简介:



陈胜钰(1973—),女,福建福州人,讲师,1996年、2005年于福建师范大学分别获得学士、硕士学位,主要从事信息光学研究。E-mail: chensy73@163.com



强则焯(1975—),福建福州人,研究员,2004年于浙江大学获得博士学位,2005至2008年于美国德克萨斯州大学纳米制造中心从事研究工作,主要从事光子晶体的研究。E-mail: zx_qiang@yahoo.com.cn



庄冬霞(1988—),女,福建泉州人,研究生,2010年于漳州师范学院获得学士学位,主要从事光子晶体的研究。E-mail: 276875410@qq.com



陈曦曜(1964—),福建福州人,教授,1987年,2004年于中国科技大学分别获得学士、博士学位,1987~2001年任教于福建师范大学,主要研究领域为纳米光学。E-mail: Chenxy2628@yahoo.com.cn

● 下期预告

双频彩色光栅投影的不连续物体三维形貌测量

戴美玲,杨福俊,何小元

(江苏省工程力学分析重点实验室,江苏 南京 210096)

为减少多频条纹相移法三维形貌测量投影条纹数量、提高测量速度,采用双频4步相移彩色条纹投影技术准确测量了具有台阶状不连续或孤立物体表面的三维形貌。计算机将高低两种不同频率的正弦条纹分别输入彩色图像的红色和蓝色通道合成为彩色条纹,由数字视频投影仪将4步相移彩色条纹投影到被测物体,利用彩色CCD或CMOS相机采集4幅彩色条纹图存于计算机中。基于色彩分离技术得到8幅两种不同频率的四步相移条纹图和由图像灰度算术和方法获得1幅反映背景的灰度图像;由低频条纹确定台阶状的物体边缘,高频条纹用于计算物体的形貌;背景图像的二值化用于定位阴影和不连续区域。最终实现了仅用4幅彩色图像完成台阶状不连续或孤立物体三维形貌的准确测量。与现有的多频4步相移条纹投影形貌测量技术需要8~12幅图像相比,有效地减少了条纹投影与图像采集的数量。