

文章编号: 0258-7025(2007)05-0671-04

光子晶体波导可调光衰减器

殷建玲, 黄旭光*, 刘颂豪

(华南师范大学光子信息技术广东省高校重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要 提出一种直接用光子晶体(PC)波导实现的新型可调光衰减器(VOA)。基于填充液晶的光子晶体方向带隙的可调节性,通过调节液晶指向矢的旋转角实现对光子晶体波导衰减量进行控制。采用时域有限差分法(FDTD)对其原理和结构参量进行了分析。数值模拟结果表明,随着液晶旋转角从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 改变,填充液晶的光子晶体波导可以实现光通量在0.5~25.4 dB的动态衰减,它插入到普通光子晶体波导之间的额外损耗只有0.2 dB,尺寸仅为微米量级。

关键词 光通信;可调光衰减器;光子晶体波导;液晶

中图分类号 TN 253;TN 929.11 **文献标识码** A

A Variable Optical Attenuator Based on the Photonic Crystal Waveguide

YIN Jian-ling, HUANG Xu-guang, LIU Song-hao

(Laboratory of Photonic Information Technology,

South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract A novel variable optical attenuator (VOA) based on the photonic crystal (PC) waveguide infiltrated with liquid crystals is demonstrated. The PC waveguide decrement is controlled by adjusting rotation angle of the liquid crystals orientation vector. And the VOA properties are numerically investigated by using the finite difference time domain (FDTD) method. Numerical simulation shows that the attenuator in the PC waveguide can be changed based on the orientation of liquid crystals by adjusting the applied field. Furthermore, the attenuator lies in 0.5~25.4 dB with rotation angle of the liquid crystals varying from 0° to 90° , the insertion loss is less than 0.2 dB, and the size is in micron dimension.

Key words optical communication; variable optical attenuator; photonic crystal waveguide; liquid crystal

1 引言

可调光衰减器(VOA)是光纤通信系统中一种十分重要的光无源器件,其功能是对光功率进行一定动态范围内的自动调整或实时动态衰减。可调光衰减器的组件集成化、尺寸小型化、调节自动化是其发展趋势之一。二维光子晶体(PC)波导具有结构简单、尺寸小、易集成等优点^[1~4],如果用其实现可

调光衰减器,就可以实现可调光衰减器的小型化和集成化。利用光子晶体带隙结构的可调节性,通过控制某个频率范围的光在带隙的内外移动,就可以对穿过光子晶体波导的光通量进行控制,从而实现光子晶体波导型可调光衰减器。

光子晶体带隙可调性^[5~11]可以通过在光子晶体中填充功能性材料(如液晶),然后利用外界条件改变功能材料的折射率来实现。本文选用液晶作为

收稿日期:2006-10-16;收到修改稿日期:2006-12-15

基金项目:广东省自然科学基金(04010398),广东省自然科学基金重点项目(05100534)和国家教育部留学回国人员科研启动基金项目资助课题。

作者简介:殷建玲(1979—),河北邢台人,博士研究生,目前研究方向为光子晶体及其应用。

E-mail: yinjianling2002@163.com

导师简介:刘颂豪(1930—),男,广东人,中国科学院院士,目前研究方向为纳米材料、光通信新技术、激光加工及光子在生物学、医学上的应用等。E-mail: liush@sncu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: huangxg@sncu.edu.cn

填充材料,这是由于液晶双折射率差比较大,可以产生较大的带隙改变,且易于控制和实现。目前液晶的响应时间已达到 $100\ \mu\text{s}$ 的量级^[7],已基本可以满足部分器件对响应时间的要求,因此设计一种基于液晶的光子晶体波导型可调光衰减器不仅可行,而且结构简单、易于控制,对实际应用非常有意义。

本文采用时域有限差分法(FDTD)证实,利用光子晶体方向带隙的可调节性,可以用填充液晶的光子晶体波导来实现具有大衰减范围的可调光衰减器。

2 计算方法

光子晶体的一个重要特征是频率落在带隙范围内的光不能在光子晶体中传输,但如果在光子晶体中引入线缺陷后,处于原来对完整光子晶体带隙范围内的光就会沿着这个线缺陷传输,这就形成了光子晶体波导;相反,原来处于光子晶体带隙以外的光通过波导后大部分能量都会被散射和反射掉,到达波导另一端的能量很小。

当光子晶体波导中填充液晶后,电磁场在其中的传输要受到液晶旋转取向的影响,这时,可采用时域有限差分法来研究光在其中的传输特性。时域有限差分法是利用有限差分法对含时的麦克斯韦(Maxwell)方程进行直接求解,对于填充液晶的光子晶体波导,仅需将空气孔位置的介电张量函数换成液晶的介电张量函数。文中采用完美匹配层边界条件(perfectly matched layer boundary condition)和高斯脉冲光源。

3 数值模拟结果和讨论

3.1 基本结构和工作原理

图1给出位于 $x-z$ 平面的二维空气孔光子晶体

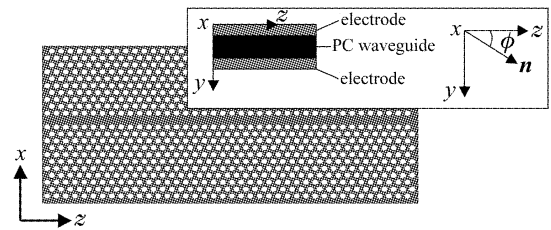


图1 二维空气孔光子晶体波导结构示意图
Fig.1 Schematic diagram of hexagonal lattice PC waveguide with liquid crystals

波导的结构示意图,空气孔中填充苯乙炔(phenylacetylene)类液晶,插图中的 n 代表液晶的指向矢,旋转角 ϕ 表示指向矢与 $x-z$ 平面的夹角。该波导的各参量取值为:晶格常数 $a = 0.3396\ \mu\text{m}$,基底的相对介电常数 $\epsilon = 11.56$,空气孔的半径 $r = 0.35a$,苯乙炔类液晶的正常折射率和反常折射率分别为 $n_{\text{IC}}^o = 1.590$ 和 $n_{\text{IC}}^e = 2.223$ ^[6]。对液晶指向矢方向的控制可以利用向列相液晶的电控双折射(ECB)效应^[12]来实现,见图1插图:先把两个氧化铟锡(ITO)层分别加在光子晶体波导的顶部和底部,然后,在这两个电极上加载电压就可以引入电场,进而控制液晶指向矢的方向。

对填充液晶的完整光子晶体,其带隙会随液晶旋转角的改变发生移动,见图2。图2给出液晶的旋转角分别为 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90° 时,完整光子晶体对TE模的方向带隙^[13,14]分别位于归一化频率 $0.212 \sim 0.222, 0.218 \sim 0.254$ 和 $0.220 \sim 0.272$ 之间。带隙随液晶旋转角的增大发生了移动,归一化频率 $0.212 \sim 0.219$ 从带隙以内逐渐移动到带隙以外,根据光子晶体的性质,这将使光子晶体波导对这个频率范围内的光的局域作用逐渐减弱,光延伸到光子晶体中较深范围,且被反射和散射的能量逐渐增多,因此,对

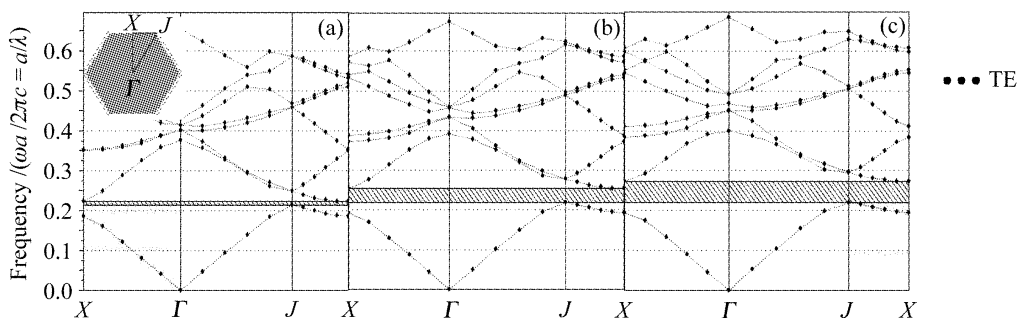


图2 填充苯乙炔液晶的光子晶体的能带结构示意图
(a)~(c)的液晶旋转角分别为 $0^\circ, 45^\circ$ 和 90°

Fig.2 Partial band gap of photonic crystals with phenylacetylene liquid crystals
(a)~(c) are at the angle of $0^\circ, 45^\circ$ and 90° , respectively

具有一定宽度的波导, 衰减量将随液晶旋转角的增大而增加, 从而用作可调光衰减器。

3.2 性能及具体工作状况分析

图 3 给出了液晶的旋转角 ϕ 从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 时, $1.55 \mu\text{m}$ 波长的 TE 模偏振光穿过该光子晶体波导后衰减量与液晶旋转角之间的关系。结果表明, 随着液晶旋转角的增大, 光穿过光子晶体波导后的衰减量逐渐增加。这是因为, 随着液晶旋转角的增加, 方向带隙发生移动, 导致波长 $1.55 \mu\text{m}$ (对应归一化频率 0.219) 逐渐从完整光子晶体方向带隙的中央移动到方向带隙以外所引起的, 见图 2。对比传统可调光衰减器的衰减曲线可知, 这个填充液晶的光子晶体波导可以看作由液晶旋转角控制的可调光衰减器, 且其衰减范围在 $0.5 \sim 25.4 \text{ dB}$ 之间。该可调光衰减器不仅适用于 $1.55 \mu\text{m}$ 的波长, 选择适当的晶格常数还可用于其他波长; 通过控制波导的长度还可对衰减范围进行控制。

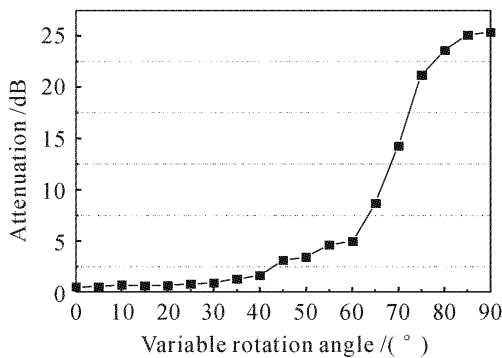


图 3 光子晶体波导的光衰减量随液晶旋转角的变化曲线

Fig. 3 Attenuation of PC waveguide with phenylacetylene liquid crystals versus variable rotation angle

实际应用中, 波导型可调光衰减器往往与普通光子晶体波导进行集成。因此, 集成情况下的具体工作状况和集成所带来的额外损耗也是其重要的性能指标。图 4(a) 给出两个普通的光子晶体波导与填充液晶的光子晶体波导集成的结构示意图, 其中, 中间填充液晶的光子晶体波导的各参量与 3.1 节相同; 两边未填充液晶的光子晶体波导的晶格常数 $a = 0.3750 \mu\text{m}$, 其余参量与中间波导相同。

图 4(b), (c) 和 (d) 给出了液晶的旋转角 ϕ 分别为 0° , 45° 和 90° 时, 波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 的光波在空间的分布。结果表明, 当液晶的旋转角 $\phi = 0^\circ$ 时, 绝大部分的能量都到达右边的波导; 当液晶的旋转角 $\phi = 45^\circ$ 时, 一部分能量到达右边波导, 另一部分能量则被局域在中间波导区域 (图 4(c) 中较亮的区域); 当

液晶的旋转角 $\phi = 90^\circ$ 时, 能量被局域在中间波导的入口处 (图 4(d) 中较亮的区域), 几乎没有能量到达右边波导。产生该现象的原因仍可从图 2 给出的能带结构进行分析: 当液晶的旋转角 $\phi = 0^\circ$ 时, 波长 $1.55 \mu\text{m}$ 的光 (归一化频率 0.219) 处于方向带隙内, 光只能被局域在线缺陷内传输, 因此, 能量几乎完全进入右边的波导。当液晶的旋转角 $\phi = 45^\circ$ 时, 波长 $1.55 \mu\text{m}$ 的光处于方向带隙的内边缘附近, 这时, 波导对能量的局域作用不够强, 光场延伸到光子晶体较深的位置, 因此, 能量很容易被位于接合区域较深位置的接合缺陷捕获, 在中间波导入口的两侧出现两片亮斑; 只有光场宽度与右边波导宽度匹配的那部分光才能进入右边的波导, 另一部分光被光子晶体反射后局域在中间波导位置, 形成一个较亮的区域。当液晶的旋转角 $\phi = 90^\circ$ 时, 波长 $1.55 \mu\text{m}$ 的光在布里渊区的 Γ -J 方向 (波导 z 方向) 处于带隙以外, 所以, 光沿波导方向不能传输; 而在布里渊区的 X - Γ 方向 (垂直于波导方向的 x 方向), 该波长仍位于带隙以内, 所以, 光沿此方向也被禁止传输, 不能进入光子晶体内部。因此, 波长 $1.55 \mu\text{m}$ 的光从左边波导中进入中间波导区域后, 沿各个方向均不能传输, 只能被局域在入口附近, 形成一个很亮的区域。

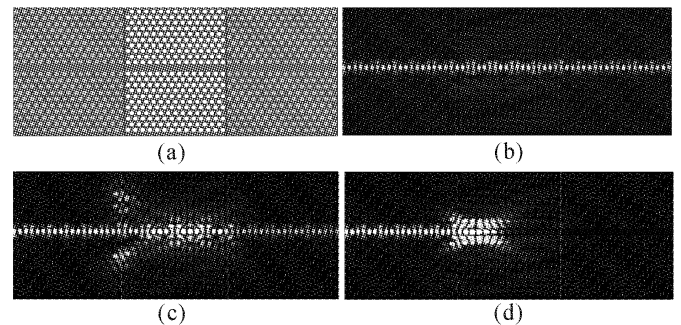


图 4

(a) 光子晶体波导与填充液晶的光子晶体波导的集成结构; (b)~(d) 分别对应液晶旋转角为 $\phi = 0^\circ$, 45° 和 90° 的光场分布

Fig. 4

(a) integration structure of the VOA with PC waveguides; (b)~(d) are electric field patterns observed in the integration structure at $\phi = 0^\circ$, 45° and 90° , respectively

模拟结果表明, 在集成的情况下, 本文所提出的填充液晶的波导结构仍能用作可调光衰减器, 即通过控制液晶的旋转角就可调节其衰减量, 而且衰减关系与图 2 基本一致, 但需考虑额外损耗的影响。因此, 进一步分析了该可调光衰减器插入到普通光子晶体波导之间的损耗, 结果表明, 集成所引起的额

外损耗仅为0.2 dB,该损耗基本可与目前最好的传统可调光衰减器的性能相比拟。

4 结 论

采用数值模拟方法证实,利用光子晶体方向带隙的可调节性,就可以通过控制液晶的旋转角对填充液晶的光子晶体波导的衰减量进行调节,从而实现可调光衰减器,衰减范围可达0.5~25.4 dB。相对于传统的可调光衰减器,该可调光衰减器具有损耗低(额外损耗只有0.2 dB)、尺寸小、结构简单、易于和其他光子晶体波导器件进行集成等优点。

参 考 文 献

- 1 A. Martinez, F. Cuesta, J. Marti. Ultrashort 2-D photonic crystal directional couplers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2003, **15**(5):694~696
- 2 Song Junfeng, Chang Yuchun, Wang Haisong *et al.*. Transmission characteristic of photonic crystal waveguide [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(8):711~713
宋俊峰,常玉春,王海嵩等. 光子晶体光波导传输特性研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(8):711~713
- 3 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Photonic crystal waveguide directional coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10):1237~1240
朱志宏,叶卫民,袁晓东等. 光子晶体波导定向耦合器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10):1237~1240
- 4 Lin Xubin, Liu Yukui, Li Baojun. Theoretical study of silicon-based two-dimensional photonic crystal coupler [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1157~1160
林旭彬,刘玉奎,李宝军. 硅基二维光子晶体耦合器理论研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1157~1160
- 5 Katsumi Yoshino, Yuki Shimoda, Yoshiaki Kawagishi *et al.*. Temperature tuning of the stop band in transmission spectra of liquid-crystal infiltrated synthetic opal as tunable photonic crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **75**(7):932~934
- 6 Hiroyuki Takeda, Katsumi Yoshino. Tunable photonic band schemes of opals and inverse opals infiltrated with liquid crystals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, **92**(10):5658~5662
- 7 Chen-Yang Liu, Lien-Wen Chen. Tunable field-sensitive polarizer using hybrid conventional waveguides and photonic crystal structures with nematic liquid crystals [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **256**(1-3):114~122
- 8 S. W. Leonard, J. P. Mondia, H. M. van Driel *et al.*. Tunable two-dimensional photonic crystals using liquid-crystal infiltration [J]. *Phys. Rev. B*, 2000, **61**(4):R2389~R2392
- 9 Hiroyuki Takeda, Katsumi Yoshino. Tunable refraction effects in two-dimensional photonic crystals utilizing liquid crystals [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(5):056607-1~056607-5
- 10 Hiroyuki Takeda, Katsumi Yoshino. Disappearances of uncoupled modes in two-dimensional photonic crystals due to anisotropies of liquid crystals [J]. *Phys. Rev. E*, 2003, **67**(5):056612-1~056612-5
- 11 Hiroyuki Takeda, Katsumi Yoshino. Tunable light propagation in Y-shaped waveguides in two-dimensional photonic crystals utilizing liquid crystals as linear defects [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, **67**(7):073106-1~073106-4
- 12 Wang Xinjiu. *Liquid Crystals Optics and Display* [M]. Beijing: Science Press, 2006. 92~93
王新久. *液晶光学和液晶显示* [M]. 北京:科学出版社, 2006. 92~93
- 13 Zhi-Yuan Li, Jian Wang, Ben-Yuan Gu. Creation of partial band gaps in anisotropic photonic-band-gap structures [J]. *Phys. Rev. B*, 1998, **58**(7):3721~3729
- 14 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao *et al.*. Photonic crystal field-sensitive polarizer and switch modulated by nematic liquid crystals [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(10):5268~5276
殷建玲,黄旭光,刘颂豪等. 液晶调制的光子晶体可控偏光片和光开关[J]. *物理学报*, 2006, **55**(10):5268~5276