

文章编号: 0253-2239(2007)11-2034-4

二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性*

刘 璟 郑志强 冯卓宏 黄志高

(福建师范大学物理与光电信息科技学院, 福州 350007)

摘要: 应用时域有限差分(FDTD)法,对光在二维异质结光子晶体中含两个近邻点缺陷直角弯曲波导的传输特性进行了数值模拟研究。计算结果表明,具有特定本征共振频率的光子晶体微腔(点缺陷),可在其邻近波导中传播的相同频率成分的光波“引入”到微腔中。“引入”的频率依赖于异质结光子晶体弯曲波导和微腔的参量,从而能够实现调变“引入”频率。通过改变点缺陷周围介质材料(液晶)的折射率或相关介质柱半径,可分别实现约 31 nm 或 12 nm 的波长调谐范围。计算结果为光通信中的调谐、上/下载滤波器,提供了一条新的设计思路和依据。

关键词: 导波光学; 可调谐光学滤波器; 时域有限差分法; 光子晶体; 异质结

中图分类号: O734 文献标识码: A

Tunable Optical Filter Based on Two-Dimensional Heterostructure Photonic Crystal with Neighboring Dot-Defects and Curved Waveguide

Liu Jing Zheng Zhiqiang Feng Zhuohong Huang Zhigao

(School of Physics and Opto-Electronics Technology, Fujian Normal University, Fuzhou 350007)

Abstract Tunable optical filter based on two-dimensional heterostructure photonic crystal is formed by curved waveguides and neighboring cavities when line and dot defects are introduced into heterostructure photonic crystal. Finite-difference time-domain (FDTD) method is used to analyze the filter. Results showed that the waves with certain frequencies in the waveguide could be introduced into the cavity when resonance coupling occurred. The introduced frequency depends on parameters of curved waveguide and cavities in the heterostructure photonic crystal. When the refractive indices of neighboring medium or radius of the rods were changed, a wide transmission region of 31 nm or 12 nm could be realized respectively. Our results provided a new design method and bases improving the efficiency of add/drop and realizing the tunability of filter.

Key words: guided-wave optics; tunable optical filter; finite-difference time-domain; photonic crystal; heterostructure

1 引 言

光子晶体^[1~4]具有光子频率禁带,频率处于禁带内的光波不能传输^[5,6]。通过在光子晶体中引进缺陷结构可以构筑波导,利用缺陷模可实现滤波^[7~9],这种光子晶体中利用缺陷模的滤波性能,远优于普通的光学滤波器。目前设计的光子晶体滤波器多为固定式,其滤波的频段和带宽都是恒定的。向列相液晶具有较大的介电各向异性和折射率,且对外

界参量(如温度、电场、压力)的变化敏感,是制作可调谐滤波器的理想材料^[10,11],为实现可调变滤波波长和多波长滤波功能提供了可能,满足密集波分复用(DWDM)技术迅速发展的需求。

Fan^[12]和 Qiu^[13]等分别实现了二维同质结光子晶体滤波器的设计, Song 等^[14]报道了二维异质结光子晶体中微腔的特性。David 等^[15]在二维同质结光子晶体的空气柱中填入液晶,实现了液晶光子晶

* 福建省自然科学基金(A0510014)和福建省科技厅(2006F5025)资助课题。

作者简介: 刘 璟(1982—),男,福建泉州人,硕士研究生,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: lj3011@163.com

导师简介: 郑志强(1963—),男,福建人,硕士生导师,主要从事信息光学方面的研究。E-mail: zqzheng@fjnu.edu.cn

收稿日期: 2007-02-08; 收到修改稿日期: 2007-04-02

体滤波器。但他们的结果都未能实现透射峰的调制。Ozaki^[16]在一维光子晶体中应用向列相液晶作为缺陷层,通过外加电场改变液晶分子的取向,导致其折射率改变,实现了对光子晶体滤波的调谐作用。

本文在二维异质结光子晶体中设计一种含直角弯曲波导(由线缺陷构成)和两个近邻点缺陷微腔的滤波器。应用时域有限差分方法(FDTD)进行数值模拟计算,结果表明异质结光子晶体中弯曲波导近邻的不同结构的微腔,能够“引入”不同频率成分的波。通过改变点缺陷周围介质材料(液晶)的折射率或相关介质柱半径,可获得约 31 nm 或 12 nm 的波长调谐范围的滤波。所设计的异质结光子晶体属于多晶体系,更有实用制备价值^[17,18]。

2 计算与分析

2.1 异质结光子晶体微腔的滤波分析

图 1(a)是由不同晶格常量的 PC_1 、 PC_2 、 PC_3 构成

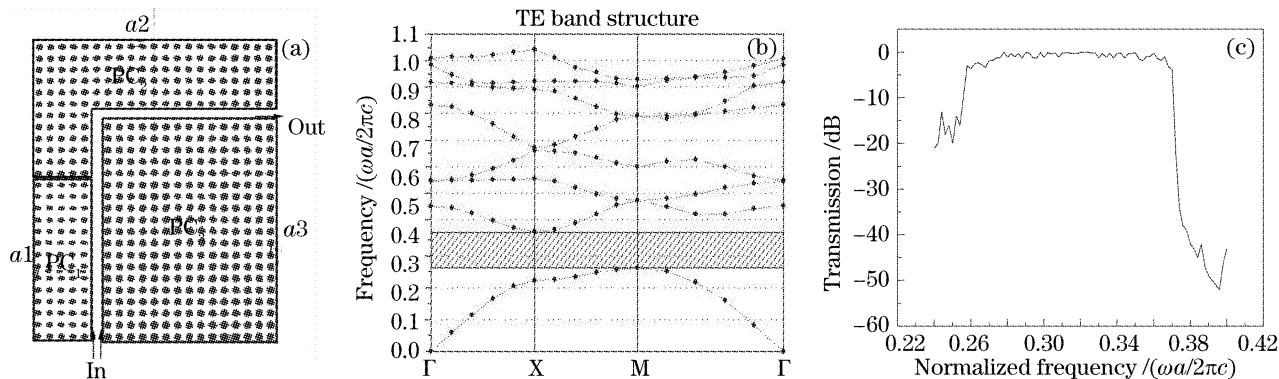


图 1 (a)包含线缺陷的二维方型异质结光子晶体俯视图(26×21 周期), (b) TE 模的能带结构图, (c)输出端的透射谱

Fig. 1 (a) Top view of a two-dimensional square lattice hetero structure photonic crystal with line defect (26×21),

(b) band structure of TE mode, (c) transmission spectrum near output port

在图 1(a)所示的异质结光子晶体的直角两边,分别取掉三个介质柱,形成一个既包含线缺陷又包含两个近邻点缺陷(点缺陷 1、点缺陷 2)的光子晶体,其中这两个近邻点缺陷是晶格常量不同的 PC_1 、 PC_2 中的微腔,其俯视图如图 2(a)所示,这时得到的共振频率处的电磁场瞬时分布图,如图 2(b)所示;图 2(c)和图 2(d)分别是图 2(a)输出处的透射谱和两个点缺陷里的电场振幅频率分布图。可以看出:脉冲中频率约为 0.3176 和 0.3335 的光波的能量分别被“引入”到两个点缺陷里面,这是因为点缺陷所形成的两个微腔和线缺陷中频率为 0.3176 和 0.3335 的光波发生共振,把其能量耦合到点缺陷中,由此也可知这两个微腔存在 0.3176 和 0.3335 的共振频率。

结果表明,二维异质结光子晶体弯曲波导中两

的二维直角线缺陷方型异质结光子晶体示意图,该异质结光子晶体参量如下:晶格常量为 $a(a_1, a_2, a_3)$, 基质为空气,介质柱半径为 $r(r_1, r_2, r_3)$,介电常数为 ϵ ;取 $r_i = 0.2a_i (i=1, 2, 3)$,其中 $a_1 = 0.54$, a_1 、 a_2 、 a_3 以 2.3% 递增,介质柱的相对介电常量为 3.4。图 1(b)是该异质结光子晶体在 TE 模的能带结构图,在 TE 模情况下该光子晶体存在一个相对带宽为 34.9% 的带隙,归一化频率范围是 $0.26 < \omega a / 2\pi c = a / \lambda < 0.37$ 。当 TE 模局域脉冲源沿图 1(a)中箭头位置和方向入射到光子晶体上时,用时域有限差分法可以得到输出端的透射谱,如图 1(c)所示。在 TE 模情况下如果光的频率在光子禁带范围之外,则在光子晶体波导与空气中,光散射(或衍射)都很强,到达输出端的能量只是很少的一部分^[19];当光的频率(归一化频率在 0.26~0.37 之间)在光子禁带范围之内时,在光子晶体中的光波只能沿着线缺陷传播,能量集中到达输出端。

个近邻点缺陷形成的微腔存在不同的共振频率;在共振频率处,微腔和附近的波导的耦合最强。波导中,频率在微腔共振频率附近的光波能量能被“引入”到对应的微腔里面。

2.2 改变相关介质柱的折射率实现滤波波长可调

液晶作为一种光学材料,其电控双折射特性使液晶的折射率可以随电压的变化而改变。因此将液晶作为光子晶体缺陷的周围物质,会得到具有分辨率好、边带抑制能力强、体积小、控制电压低、低功耗等优点的波长可调谐滤波器。

液晶盒为 BL-009 型向列相液晶($\Delta n = 0.283$),在室温 20 °C 下,当被施加占空比为 50%、频率 100 Hz 的方波交流电压时,液晶折射率变化量与电压存在着近似拟合的函数:

$$\Delta n = 0.03924 + 0.31926 \exp[-(v/3.70668)], \quad (1)$$

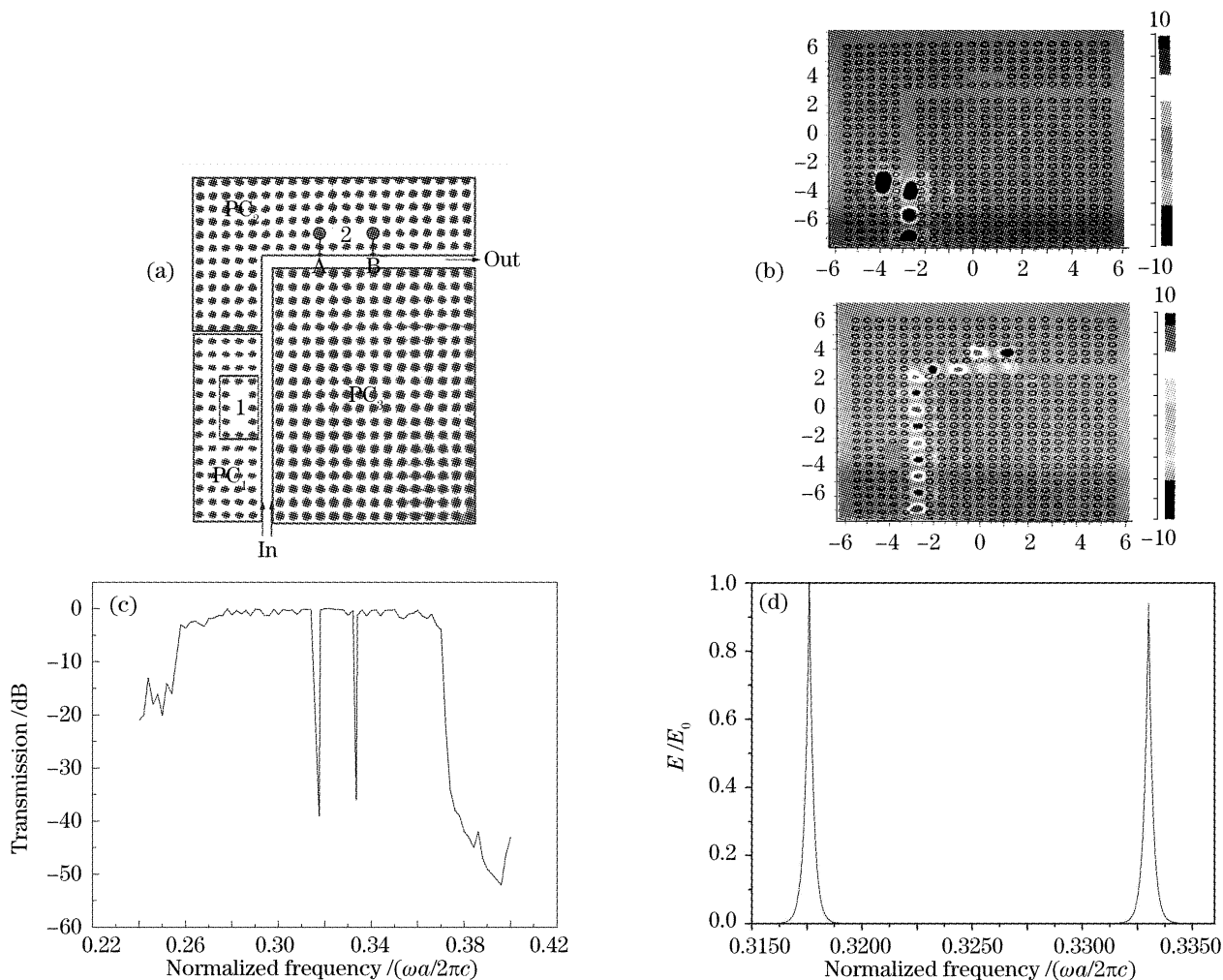


图 2 (a) 包含线缺陷点缺陷的二维方型异质结光子晶体俯视图, (b) 在共振频率处的电磁场瞬时分布图, (c) 图 2(a) 输出处透射谱, (d) 图 2(a) 中点缺陷 1 和点缺陷 2 的电场振幅频率分布

Fig. 2 (a) Top view of a two-dimensional square lattice heterostructure photonic crystal with line defect and dot defect (26×21), (b) snapshot of electromagnetic field distribution for hetero drop filter at resonant frequency, (c) transmission spectrum near output of Fig. 2(a), (d) amplitude of electric field versus normalized frequency of defect 1 and 2 of Fig. 2(a)

其中液晶折射率的改变量 $\Delta n = n_e - n_o$, n_e 随着外在电压改变而改变, n_o 不随外加电压的变化而改变^[20,21]。在文献[21]中, 液晶的阈值电压约为 0.8 V, 外加电压在 0.8~4 V 之间, Δn 随电压的增加下降较快, 且是连续变化, 拟合函数和实验曲线符合较好; 当外加电压大于 4 V 时, Δn 趋近于零, 这时液晶分子的力矩与外电场产生的力矩达到平衡, 液晶的指向矢已和外电场同向^[22]。

将最靠近微腔 1 的 12 个介质柱[如图 2(a)微腔 1 外被小黑框包围的介质柱]填充上向列液晶材料, 根据(1)式, 在一定范围里改变外加电压, Δn 发生改变, 对应的液晶折射率也发生改变, 利用时域有限差分法计算, 得到图 3 的结果, 可以看出, 外加电压由 0.8 V 增至 3.78 V 的情况下, 微腔 1 中透射峰的波长形成具有约 31 nm 的调谐范围, 实现滤波波长可调。同样在微腔 2 中也能得到类似的结论。

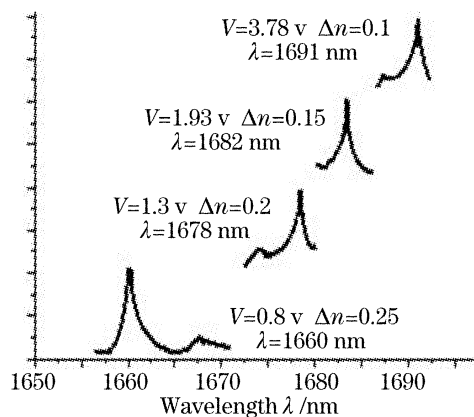


图 3 外加电压与微腔 1 透射峰波长的关系

Fig. 3 Function between transmission peak wavelength in microcavity 1 and external voltage

2.3 改变相关介质点的半径实现滤波波长可调

改变图 2(a)中微腔 2 周围的重要介质点 A、B 的半径, 也可以在一定的范围实现滤波波长可调。通过时域有限差分法模拟计算, 得到图 4, 从中可以看出,

A、B 的半径 r_2 由 $0.09a_2$ 增至 $0.29a_2$ 时, 微腔 2 中透射峰的波长形成具有约 12 nm 调谐范围的区域。

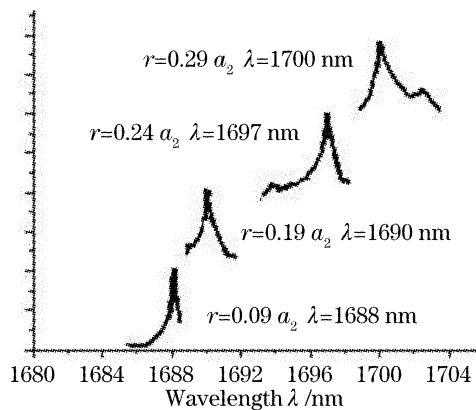


图 4 介质点 A、B 的半径大小与微腔 2 透射峰波长的关系
Fig. 4 Relation between radius of A, B and transmission peak wavelength in microcavity 2

3 结 论

将时域有限差分法用于二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性研究, 结果表明, 在共振频率处, 微腔和附近的波导耦合最强, 波导中频率在微腔共振频率附近的光波的能量能被“引入”到各自的微腔里面; “引入”的频率依赖于异质结光子晶体弯曲波导和微腔的参量, 从而能够实现调变“引入”频率, 通过改变点缺陷周围介质材料(液晶)的折射率或相关介质柱半径的方式, 分别获得波长范围约 31 nm 或 12 nm 的调谐。计算结果为光通信用的波长调谐、上/下载滤波器提供了一条新的设计思路和依据。

参 考 文 献

- Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- Lin Xubin, Chen Yujie, Li Baojun. Photonic crystal with absolute band gap in a two-dimensional quasi-honeycomb structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 126~130 (in Chinese)
林旭彬, 陈钰杰, 李宝军. 类蜂窝状结构完全带隙二维光子晶体[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 126~130
- Wang Qingyue, Hu Minglie, Chai Lu. Progress in nonlinear optics with photonic crystal fibers[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(1): 57~66 (in Chinese)
王清月, 胡明列, 柴路. 光子晶体光纤非线性光学研究新进展[J]. *中国激光*, 2006, **33**(1): 57~66
- Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong *et al.*. The transmission properties of photonic crystals without strict periodicity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 847~850 (in Chinese)
朱志宏, 叶卫民, 季家镛等. 光子晶体的非严格周期性对其传输特性的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 847~850
- Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong *et al.*. Transmission

- properties research of photonic crystals in the non-inertial frame using FDTD method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1415~1419 (in Chinese)
- 朱志宏, 叶卫民, 季家镛等. 用时域有限差分方法研究非惯性坐标系下光子晶体传输特性[J]. *光学学报*, 2005, **25**(10): 1415~1419
- Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen, Zhang Daozhong *et al.*. Investigations on multi-layer photonic-crystal optical-filters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 79~84 (in Chinese)
- 欧阳征标, 李景镇, 张道中等. 多层光子晶体滤波器研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 79~84
- Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong *et al.*. Analysis of photonic crystal filter[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6): 700~703 (in Chinese)
- 朱志宏, 叶卫民, 季家镛等. 光子晶体滤波特性分析[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6): 700~703
- Ouyang Zhengbiao, Liu Haishan, Li Jingzhen. Photonic crystal super narrow optical filters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2): 281~284 (in Chinese)
- 欧阳征标, 刘海山, 李景镇. 光子晶体超窄带滤波器[J]. *光子学报*, 2002, **31**(2): 281~284
- G. Pucker, A. Mezzetti, M. Crivellari *et al.*. Silicon-based near-infrared tunable filters filled with positive or negative dielectric anisotropic liquid crystals[J]. *J. Appl. Phys.*, 2004, **95**(2): 767~769
- Yuhua Huang, Thomas X. Wu, Shin-Tson Wu. Simulations of liquid crystal F-P etalons by an improved 4×4 matrix method[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(5): 2490~2495
- Shanhui Fan, P. R. Villeneuve, J. D. Joannopoulos *et al.*. Channel drop filters in photonic crystals[J]. *Opt. Exp.*, 1998, **3**(1): 4~11
- M. Qiu. Ultra-compact optical filter in two-dimensional photonic crystal[J]. *Electron. Lett.*, 2004, **40**(9): 539~540
- Bong-Shik Song, Takashi Asano, Yoshihiro Akahane *et al.*. Role of interfaces in heterophotonic crystals for manipulation of photons[J]. *Phys. Rev. B*, 2005, **71**(19): 195101-1~195101-5
- David M. Pustai, Dennis W. Prather. Techniques for tuning two-dimensional photonic crystal devices [C]. *Proc. SPIE*, 2003, **5213**: 49~62
- Ryotaro Ozaki, Tatsunosuke Matsui, Masanori Ozaki *et al.*. Electrically color-tunable defect mode lasing in one-dimensional photonic-band-gap system containing liquid crystal[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **82**(21): 3593~3595
- Lan-Lan Lin, Zhi-Yuan Li. Interface states in photonic crystal heterostructures[J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **63**(3): 033310-1~033310-4
- Yuan-Fong Chau, Tzong-Jer Yang, Ben-Yuan Gu *et al.*. Efficient mode coupling technique between photonic crystal heterostructure waveguide and silica waveguides? [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **253**(4~6): 308~314
- Zhu Zhihong, Ye Weimin, Ji Jiarong *et al.*. Transmission properties research of photonic crystals waveguide [J]. *Opt. Commun. Technol.*, 2003, **12**(1): 20~21 (in Chinese)
朱志宏, 叶卫民, 季家镛等. 光子晶体波导传输特性研究[J]. *通信技术*, 2003, **12**(1): 20~21
- Wang Ning, Li Guohua, Yun Maojin. Voltage-dependent birefringence measurements of liquid crystals [J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(10): 1064~1066 (in Chinese)
王宁, 李国华, 云茂金. 液晶电控双折射特性的研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(10): 1064~1066
- Yu Haixia. Design and performance analysis of tunable wavelength filter based on complex period photonic crystal[D]. Jilin: Jilin University, 2006. 42~44 (in Chinese)
于海霞. 基于复周期结构光子晶体波长可调谐滤波器的设计和性能分析[D]. 吉林大学硕士学位论文, 2006. 42~44
- Qian Xiangzhong. Study of tunable photonic crystals filter based on nematic liquid crystal defect [J]. *Chin. J. Sensors and Actuators*, 2002, **19**(1): 1064~1066 (in Chinese)
钱祥忠. 向列相液晶缺陷光子晶体可调谐滤波器的研究[J]. *传感技术学报*, 2002, **19**(1): 1064~1066