

文章编号: 0258-7025(2010)12-3112-04

加工误差对准晶光子晶体绝对带隙的影响

殷建玲¹ 黄旭光² 刘颂豪² 刘军¹

(¹ 军械工程学院光学与电子工程系光纤技术研究所, 河北 石家庄 050003)
² 华南师范大学光子信息技术实验室, 广东 广州 510006)

摘要 利用时域有限差分(FDTD)法,对 12 重准晶光子晶体(PQCs)的绝对带隙特性进行研究。主要讨论了加工过程中产生的尺寸误差和位置误差对 12 重 PQCs 绝对带隙的影响,并估算当前加工该带隙材料的能力。数值模拟结果表明,在相同误差条件下,尺寸误差大于位置误差对绝对带隙的影响;12 重 PQCs 绝对带隙特性主要受 TE 模对加工误差敏感程度的限制;绝对带隙宽度随晶格常数的减小而逐渐变窄,当晶格常数不小于 500 nm 时,加工误差对绝对带隙的影响可忽略,而当晶格常数小于 200 nm 时,绝对带隙甚至完全消失。

关键词 光电子学;光子晶体;绝对带隙;加工误差;准晶

中图分类号 O753⁺.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3112

Effect of Fabrication Error on the Absolute Bandgap of the Photonic Quasicrystals

Yin Jianling¹ Huang Xuguang² Liu Songhao² Liu Jun¹

¹ Institute of Fiber Technology, Department of Optical and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China
² Laboratory of Photonic Information Technology, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract Effect of fabrication error on the absolute bandgap of two-dimensional 12-fold photonic quasicrystals (PQCs) is numerically investigated by using the finite difference time domain (FDTD) method. Results indicate that, i) the effect of the size error is bigger than that of the position error; ii) the absolute bandgap is more sensitive to the bandgap of TE mode than its TM mode; iii) the bigger the fabrication error, the narrower the absolute bandgap of 12-fold PQCs is. In the current fabrication conditions, the effect of the fabrication error can be almost ignored for the 12-fold PQCs which lattice constant is bigger than 500 nm. However, if lattice constant of 12 PQCs is less than 200 nm, its absolute bandgap even disappear completely and cannot be used as absolute bandgap materials.

Key words optoelectronics; photonic crystal; absolute bandgap; fabrication error; quasicrystal

1 引言

传统意义上的光子晶体^[1,2]是指存在“光子带隙”(PBG)的周期性人工微结构,故光子晶体也被称为光子带隙材料。但是,许多研究表明,在具有准晶排列特征的人工微结构中也存在光子带隙^[3~7]。这些结构获得完全带隙的折射率阈值比周期性光子晶体低得多^[3],这使许多基于 PBG 的器件可能用普通光通

信材料(如硅)来实现,对发展与当前光纤器件的直接耦合非常重要。不仅如此,准晶光子晶体在实现亚波长远场成像^[8,9]、降低微腔激光器阈值^[10]和提高 LED 发光效率^[11]等性能上甚至还优于周期性光子晶体,具有广阔的应用前景,深入分析和讨论准晶光子晶体的带隙特性对于实际应用具有指导意义。

但是,受工艺水平和设备条件等因素限制,制备

收稿日期: 2010-03-29; 收到修改稿日期: 2010-06-22

基金项目: 广东省自然科学基金重点项目(05100534)资助课题。

作者简介: 殷建玲(1979—),女,讲师,主要从事光子学及其应用等方面的研究。E-mail: yinjianling2002@163.com

出的准晶光子晶体存在形状变形、结构无序等缺陷导致的随机误差,进而影响基于该结构的器件性能。Rockstuhl 等^[12]分析了无序对 5 重,6 重和 7 重准晶光子晶体的局域态密度的影响。Yin 等^[13,14]详细分析了结构无序对 8 重准晶光子晶体带隙特性的影响。实际上,12 重准晶光子晶体(12-PQCs)具有绝对带隙,而且无需缺陷即可产生“缺陷模”,是未来多种基于光子晶体结构器件的首选^[8~11]。因此,分析加工误差对 12 重准晶光子晶体带隙的影响对于提高加工成品率、降低加工次数具有现实意义。但是,目前还没有相关研究报道。本文采用时域有限差分(FDTD)法,研究了加工误差对二维 12 重准晶光子晶体绝对带隙的影响,并给出了实际加工条件对结构的限制。

2 数值方法

通常,计算光子晶体能带结构的方法主要是时域分析和频域分析。对于在传输方向具有周期性的晶体结构,采用平面波展开法可以在有限的时间内得到比较准确的能带结构,但是,这里所讨论的 12 重准晶光子晶体在传输方向上不是周期性结构,对于这种结构,如果再采用平面波展开法来计算,所需的计算时间和内存都非常大,很难在有限时间得到能带结构,而采用完美匹配层边界条件的 FDTD 法适用于各种计算^[15]。采用 FDTD 法来计算加工误差对准晶光子晶体带隙特性的影响,光源选用脉冲光源,带隙以透射率低于 -30 dB 为标准。

图 1 给出理想的二维 12 重准晶光子晶体结构示意图,其中晶格常数为 a ,深灰色部分为基底——空气,圆形代表介质柱,并假设无限长介质柱的介电常数为 $\epsilon=12.0$,半径 $r=0.35a$ 。

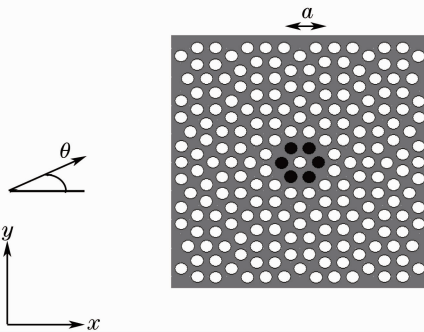


图 1 二维 12 重准晶结构的光子晶体的结构示意图

Fig.1 Schematic view of the two-dimensional

12-PQCs

3 数值结果与分析

理想情况下,每个介质柱都严格地排列在 12 重准晶光子晶体的格点上,且每个介质柱具有相同的尺寸,即半径相同。当 TM 和 TE 偏振光沿不同方向入射到图 1 所示的理想结构上时,可以采用 FDTD 法分别计算其透射谱线,如图 2 所示。从图 2 中可以清楚地看到,该结构在归一化频率 $0.569 \sim 0.601$ [$\omega/(2\pi c)$] 之间存在一个清晰的绝对带隙(TM 模和 TE 模的重叠部分),其中 ω 为角频率, c 为真空中的光速。相对带隙宽度 $\Delta\omega/\omega_g$ 为 5.5% ,其中 $\Delta\omega$ 为光子带隙的绝对宽度,定义为光子带隙右边沿和左边沿相对透射率为 -30 dB 处频率的差值; ω_g 是光子带隙的中心频率,它等于光子带隙右边沿和左边沿相对透射率为 -30 dB 处频率之和的二分之一。

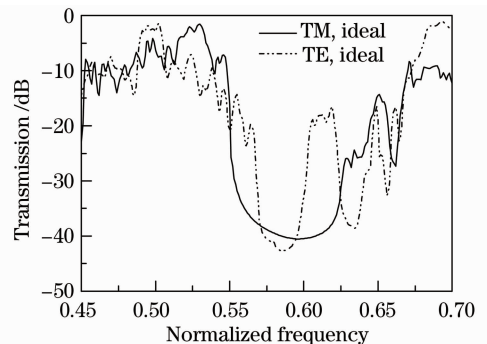


图 2 二维 12 重准晶光子晶体的透射谱线

($\epsilon=12.0, r=0.35a$)

Fig.2 Transmission spectra of the 12-PQCs

($\epsilon=12.0, r=0.35a$)

在实际加工过程中,受加工设备或工艺限制,各介质柱所处位置可能存在偏差,而不是严格排列在 12 重准晶结构的格点上,各介质柱的尺寸也可能不完全相等,甚至与理想情况(图 3 中黑色圆点)有较大的偏差。通常,前一种情况被称为位置误差[图 3(a)白色圆点],后一种情况被称为尺寸误差[图 3(b)白色圆点]。为简化问题,准晶光子晶体的这种无序可以被描述为一些特定的随机变量。对于位置误差,可以认为每个介质柱都具有相同的半径 r_0 ,而第 i 个介质柱偏离理想位置的距离 γ_x 和 γ_y 是在区间 $[-d_t, d_t]$ 上均匀分布的随机变量,其中 d_t 表示位置误差的大小。对于尺寸误差,可以认为第 i 个介质柱排列在晶格的原始位置上,其半径为 $r_i = r_0 + \gamma_r$,其中 γ_r 是在区间 $[-d_r, d_r]$ 上均匀分布的随机变量, d_r 表示尺寸误差的大小。

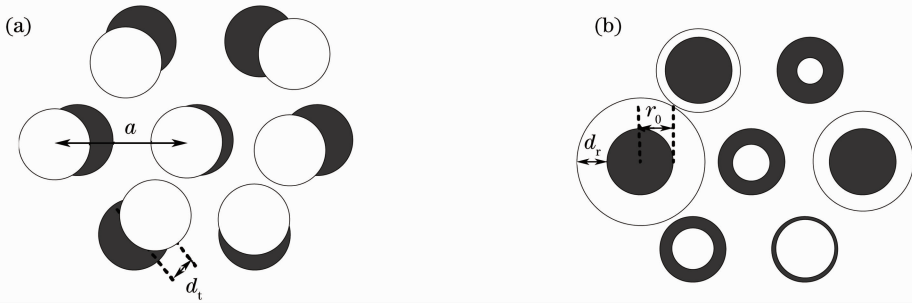


图3 12重准晶光子晶体的位置误差(a)和尺寸误差(b)

Fig. 3 Position (a) and size (b) errors for 12-PQCs

实际中,常用的加工波长约为 500 nm,半导体微加工技术的加工误差为 1%~2%。假设晶格常数取 $a = 500$ nm,相应的加工误差为 $0.01a \sim 0.02a$,即 5~10 nm。按照最大误差 $0.02a$ 对绝对带隙特性进行分析。图 4(a)和(b)分别给出尺寸误差和位置误差均为 $0.02a$ 时,12重准晶光子晶体的透射谱线。从图 4 可以看到,对于 $0.02a$ 的尺寸误差,绝对带隙位于 $0.566 \sim 0.598$ $[\omega/(2\pi c)]$ 之间,相对带隙宽度为 5.5%,相对于理想情况没有改变,但

中心频率明显向低频方向发生了移动;对于 $0.02a$ 的位置误差,绝对带隙位于 $0.569 \sim 0.600$ $[\omega/(2\pi c)]$,相对带隙宽度为 5.3%,带隙宽度略微变窄,但位置上与理想情况几乎重合。显然,对于相同大小的尺寸误差和位置误差,尺寸误差对带隙的影响更小。因此,在当前加工条件下,加工晶格常数大于或接近 500 nm 的 12重准晶光子晶体,其绝对带隙基本可满足使用需求。

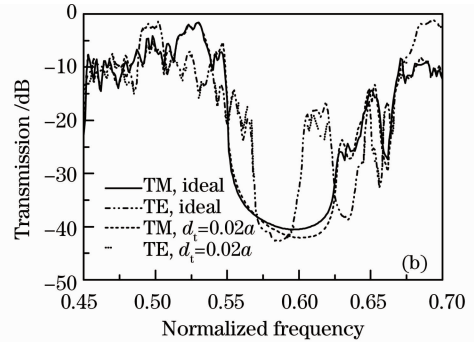
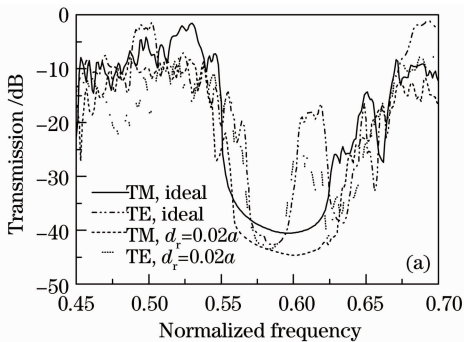


图4 尺寸误差(a)和位置误差(b)分别为 $0.02a$ 时,12重准晶光子晶体的透射谱线

Fig. 4 Transmission spectra of the 12-PQCs with position error (a) and size error (b) of $0.02a$

进一步的模拟结果表明,绝对带隙随晶格常数的减小而逐渐变窄,若当晶格常数为 $a = 200$ nm 时,绝对带隙甚至完全消失。图 5(a)和(b)分别给出尺寸误差和位置误差均为 $0.05a$ (对应加工误差

5~10 nm)时,晶格常数为 $a = 200$ nm 的 12重准晶光子晶体的透射谱线。从图 5 可以看出,尺寸误差比位置误差对带隙的影响大得多,当尺寸误差为 $0.05a$ 时,绝对带隙几乎完全消失,根本无法作为带

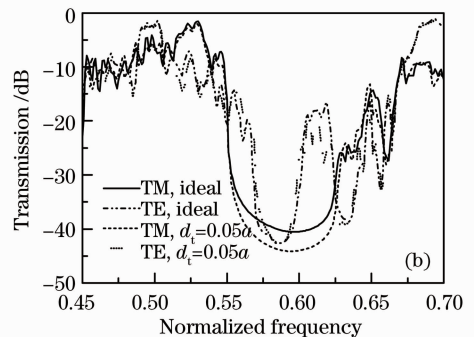
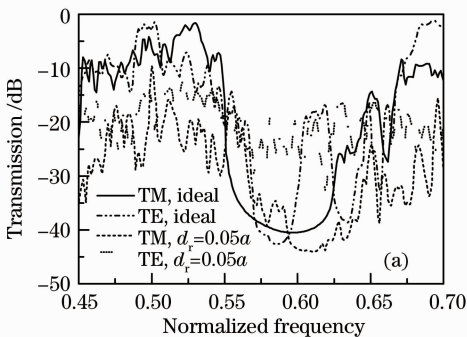


图5 尺寸误差(a)和位置误差(b)分别为 $0.05a$ 时,12重准晶光子晶体的透射谱线

Fig. 5 Transmission spectra of the 12-PQCs with position error (a) and size error (b) of $0.05a$

隙材料使用;而当位置误差为 $0.05a$ 时,绝对带隙位于归一化频率 $0.570\sim 0.598$ $[\omega/(2\pi c)]$ 之间,该带隙虽然向高频方向移动,但相对带隙宽度 $\Delta\omega/\omega_g$ 是理想情况时的 85.5%,仍能满足部分使用需求。由此可见,当晶格常数过小时,加工的精细度无法达到使用要求。另外,结合图 4,5 的结果不难看出,TE 模对应带隙比 TM 模对应带隙对加工误差更为敏感,所以,12 重 PQDs 绝对带隙特性主要受到 TE 模对加工误差敏感程度的限制。

4 结 论

采用 FDTD 法研究了制备过程中出现的加工误差对 12 重准晶光子晶体的绝对带隙特性的影响。相同程度的尺寸误差要大于位置误差对绝对带隙的影响。TE 模对应带隙比 TM 模对于加工误差更为敏感,故 12 重 PQC 绝对带隙特性主要受 TE 模对加工误差敏感程度的限制。随着晶格常数的减小,绝对带隙宽度逐渐变窄;当晶格常数不小于 500 nm 时,加工误差对绝对带隙的影响可忽略,而当晶格常数小于 200 nm 时,绝对带隙甚至完全消失,因此,要用作绝对带隙材料,当前加工的 12 重 PQC 晶格常数不能小于 200 nm。上述研究结果可为进一步设计和开发基于 PBG 的准晶光子晶体器件提供参考。

参 考 文 献

- 1 Li Zhiquan, Kang Lili, Su Fengyan *et al.*. Design on photonic crystal gain flatness filters[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 710~712
李志全, 康莉莉, 苏凤燕等. 光子晶体增益平坦滤波器的设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 710~712
- 2 Hu Minglie, Song Youjian, Liu Bowen *et al.*. Development and advanced applications of femtosecond photonic crystal fiber laser technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1660~1670
胡明列, 宋有建, 刘博文等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进

- 展及其前沿应用[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1660~1670
- 3 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao *et al.*. Effect of the structure shape on the 8-fold photonic quasicrystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(2): 567~571
殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪等. 介质柱形状对准晶光子晶体带隙特性的影响[J]. *中国激光*, 2010, **37**(2): 567~571
- 4 D. T. Roper, D. M. Beggs, M. A. Kaliteevski *et al.*. Properties of two-dimensional photonic crystals with octagonal quasicrystalline unit cells [J]. *J. Mod. Opt.*, 2006, **53**(3): 407~416
- 5 M. A. Kaliteevski, S. Brand, R. A. Abram *et al.*. Two-dimensional penrose-tiled photonic quasicrystals; diffraction of light and fractal density of modes [J]. *J. Mod. Opt.*, 2000, **47**(11): 1771~1778
- 6 M. E. Zoorob, M. D. B. Charlton, G. J. Parker *et al.*. Complete photonic bandgaps in 12-fold symmetric quasicrystals [J]. *Nature*, 2000, **404**(6779): 740~743
- 7 X. Zhang, Z. Q. Zhang, C. T. Chang. Absolute photonic band gaps in 12-fold symmetric photonic quasicrystals [J]. *Phys. Rev. B*, 2001, **63**(8): 081105(R)
- 8 Z. Feng, X. Zhang, Y. Q. Wang *et al.*. Negative refraction and imaging using 12-fold symmetry quasicrystals [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **94**(24): 247402
- 9 X. Zhang. Negative refraction and focusing of electromagnetic wave through two-dimensional photonic crystals [J]. *Front. Phys. China*, 2006, **1**(4): 396~404
- 10 K. Nozaki, T. Baba. Quasiperiodic photonic crystal microcavity lasers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **84**(24): 4875~4877
- 11 Z. S. Zhang, B. Zhang, J. Xu *et al.*. Effects of symmetry of GaN-based two-dimensional photonic crystal with quasicrystal lattices on enhancement of surface light extraction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **88**(17): 171103
- 12 C. Rockstuhl, F. Lederer. The effect of disorder on the local density of states in two-dimensional quasi-periodic photonic crystals [J]. *New J. Phys.*, 2006, **8**(9): 1~11
- 13 Jianling Yin, Xuguang Huang, Songhao Liu *et al.*. Photonic bandgap properties of 8-fold symmetric photonic quasicrystals [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**(2): 385~388
- 14 Yin Jianling, Huang Xuguang, Liu Songhao. Effect of structure disorder on band gap of eight-fold photonic quasicrystals [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(8): 1077~1080
殷建玲, 黄旭光, 刘颂豪. 结构无序对 8 重准晶光子晶体带隙特性的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(8): 1077~1080
- 15 A. Lavrinenko, P. Borel, L. Frandsen *et al.*. Comprehensive FDTD modelling of photonic crystal waveguide components [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(2): 234~248