

引用格式:李天宇,冯志芳. Woodpile 结构中锯齿波导的研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(4):110-115.

LI TianYu, FENG ZhiFang. Investigation of serration waveguides in a woodpile structure[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019,46(4):110-115.

Woodpile 结构中锯齿波导的研究

李天宇 冯志芳*

(北京化工大学 理学院, 北京 100029)

摘要:采用时域有限差分方法(FDTD),详细设计、模拟和分析了 woodpile 结构中锯齿波导的传输特性。模拟结果表明:通过改变波导中相邻锯齿的长度,可以有效控制波导的导带范围;且利用锯齿波导设计灵活的特性,可以设计沿任意方向传输的波导结构。利用导带范围受相邻锯齿长度调控这一特点,设计、模拟并分析了由锯齿型波导形成的 Y 型波分复用器,两输出通道中锯齿长度分别取 $0.3a - 0.5a$ 和 $0.3a - 0.8a$,模拟结果表明两输出通道导带范围完全不同,充分说明在器件设计中可以引入锯齿型波导,通过调节锯齿长度实现频率选择的特性。

关键词:波导;时域有限差分方法(FDTD);波分复用器

中图分类号: TN252 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.04.016

引言

Woodpile 结构是将简单的一维介质柱作为基本模块,沿 3 个方向层层排列堆叠形成的三维结构。大量的理论和实验研究表明,woodpile 结构具有许多重要的物理特性,同时可以实现光学器件在平面内和非平面内的集成化设计。如 woodpile 结构存在完全带隙,可以全方向抑制光的传输^[1-4]。Chang 等^[5]认为在简单螺旋形 woodpile 结构中有 Wely 点,在不改变空间群对称性的情况下,通过调节材料参数可以改变电荷分布。Chen 等^[6]证明 woodpile 结构通道中的手性导模不受插入通道中方形金属或者介质块的影响。Choi 等^[7]发现了红/绿/蓝光的滤波特性,设计了将 3 层(每层 3 个周期)不同折射率或不同晶格常数 woodpile 结构沿 z 方向堆叠的结构来实现对红、绿、蓝色波长带的选择性。Ho 等^[8]研究了光经过填充有液晶材料的 woodpile 结构时的传输特性。

波导是器件集成中的重要连接元件,波导结构

存在于各类光学器件中,关于 woodpile 结构中波导及其波导集成设计已有大量研究报道。Liu 等^[9]实验研究了微波波段 woodpile 结构中直角波导的传输特性,指出直角位置的镜面散射和腔共振效应会影响波导的传输效率。Tang 等^[10]在 woodpile 结构中设计了双异质结的波导结构,证明了通过一维或二维调节可以影响其导模。Chutinan 等^[11-12]实现了不同平面层波导的集成化设计。Kawashima 等^[13]设计构建了 L 型集成波导并观察到了具有特定偏振的近红外光的传输。

以上研究主要集中在波导结构及传输特性方面,而关于 woodpile 结构中锯齿型波导的传输特性鲜有报道。本文采用时域有限差分方法(FDTD),详细设计、模拟和分析了 woodpile 结构中锯齿波导的传输特性,并在此基础上设计了 Y 型波分复用器,研究了其传输特性,为锯齿波导的频率选择特性提供了有力的证明。

1 直锯齿波导的传输特性

本文设计了沿堆叠方向共 7 个周期、28 层的 woodpile 结构,其中介质柱的参数为 $0.3a \times 0.3a$ (a 为同层相邻介质柱之间的距离,模拟计算中取值 10 mm),介质柱(Al_2O_3)和背景材料(空气)的介电常数分别为 9.0 和 1.0。采用 FDTD 软件模拟计算了完整结构的带隙,其范围为 11.04 GHz ~ 13.35 GHz。

收稿日期:2018-10-18

基金项目:教育部留学回国人员科研启动基金(LXHG2014001);国家自然科学基金(61775244);北京化工大学学科建设基金(XK1702)

第一作者:男,1993年生,硕士生

*通信联系人

E-mail: fengzf@mail.buct.edu.cn

Liu 等^[14]研究了 woodpile 结构中 X 型、Y 型和 Z 型波导的传输特性。本文在 Y 型波导基础上设计研究了锯齿波导的传输特性,设计过程中充分考虑 woodpile 结构的特殊性,去掉了同一层相邻介质柱中不等长度的部分介质柱形成空气型锯齿波导,即相邻锯齿的长度是不相等的,结构如图 1 所示。这一结构具有两个显著的优点:①相邻锯齿的长度可以任意调节;②可以设计任意弯曲度和任意出射方向的锯齿波导。

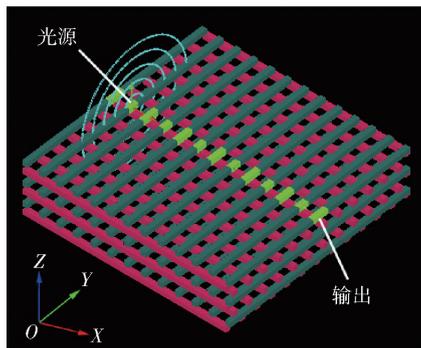


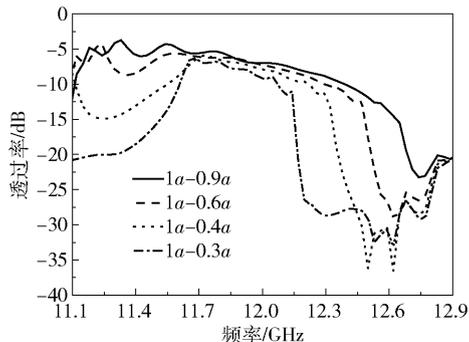
图 1 锯齿型波导结构图

Fig. 1 Structure of the serration waveguide

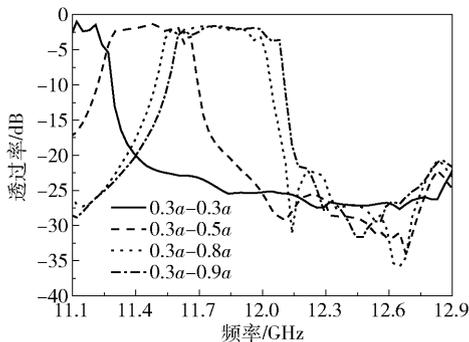
首先设计了相邻锯齿长度为 $1.0a - 0.9a$ 的波导,其入射光源为沿 X 轴正方向传输的高斯光源,该光源放置在波导内且距离样品边缘 $1a$ 的位置,在波导出射方向距离波导输出口 $1a$ 处设置记录点;然后通过 FDTD 软件模拟计算了该锯齿波导的透射谱(图 2(a)中实线),可以发现该波导具有较宽的导带范围($11.10 \text{ GHz} \sim 12.60 \text{ GHz}$)和良好的透过率(平均 -5 dB)。

分两种情况探讨相邻锯齿长度变化时波导的导带范围及其透过率的变化趋势。首先固定长锯齿长度为 $1a$,调节短锯齿的长度分别为 $1.0a - 0.6a$ 、 $1.0a - 0.4a$ 和 $1.0a - 0.3a$,模拟结果如图 2(a)所示。可以发现随着短锯齿长度逐渐减小,导带范围发生了明显的变化,高带边和低带边向相反方向移动,使得导带范围逐渐减小,如锯齿长度为 $1.0a - 0.3a$ 时,导带范围仅为 $11.55 \text{ GHz} \sim 12.06 \text{ GHz}$ 。模拟结果表明,通过调节相邻锯齿长度可以调节导带的范围,进一步影响锯齿波导的传输特性。

其次固定短锯齿长度为 $0.3a$,使长锯齿长度逐渐增加,研究导带变化是否与上述模拟结果具有相同的移动规律。对短锯齿长度分别为 $0.3a - 0.3a$ 、 $0.3a - 0.5a$ 、 $0.3a - 0.8a$ 和 $0.3a - 0.9a$ 的 4 种情况进行模拟计算,其透射谱如图 2(b)所示。可以发



(a) 固定长锯齿时的透射谱



(b) 固定短锯齿时的透射谱

图 2 不同锯齿长度的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra for different serration length

现, $0.3a - 0.3a$ 时波导透过率都很低,基本不存在导带;长锯齿长度增加到 $0.5a$ 时,该波导导带范围为 $11.22 \text{ GHz} \sim 11.70 \text{ GHz}$;增加到 $0.8a$ 时,导带整体向高频方向移动,其范围为 $11.49 \text{ GHz} \sim 12.06 \text{ GHz}$;增加到 $0.9a$ 时,导带继续向高频方向移动,其范围扩大到 $11.55 \text{ GHz} \sim 12.15 \text{ GHz}$ 。

综上所述,两种变化方法对导带范围的影响效果完全不同,后一种情况下锯齿波导的导带整体向高频方向移动;更重要的是,长锯齿长度的增加使导带范围重合区域逐渐减小。

为了进一步验证锯齿波导的传输特性,计算了图 2(b)中 $0.3a - 0.5a$ 、 $0.3a - 0.8a$ 和 $0.3a - 0.9a$ 3 种锯齿长度在 11.51 GHz 下的场分布,结果如图 3 所示。可以看出在 $0.3a - 0.5a$ 、 $0.3a - 0.8a$ 两种情况下,该频率的波局限在锯齿波导中传输;而在 $0.3a - 0.9a$ 时,波在锯齿波导中传输一段距离后逐渐衰减,无法实现传输。

以上模拟结果充分表明,通过调节相邻锯齿的长度可以有效控制锯齿波导的导带范围;同时随着锯齿长度的不断变化,锯齿波导的导带范围呈完全独立的趋势,这一特性为利用锯齿波导实现器件的频率选择提供了理论依据。

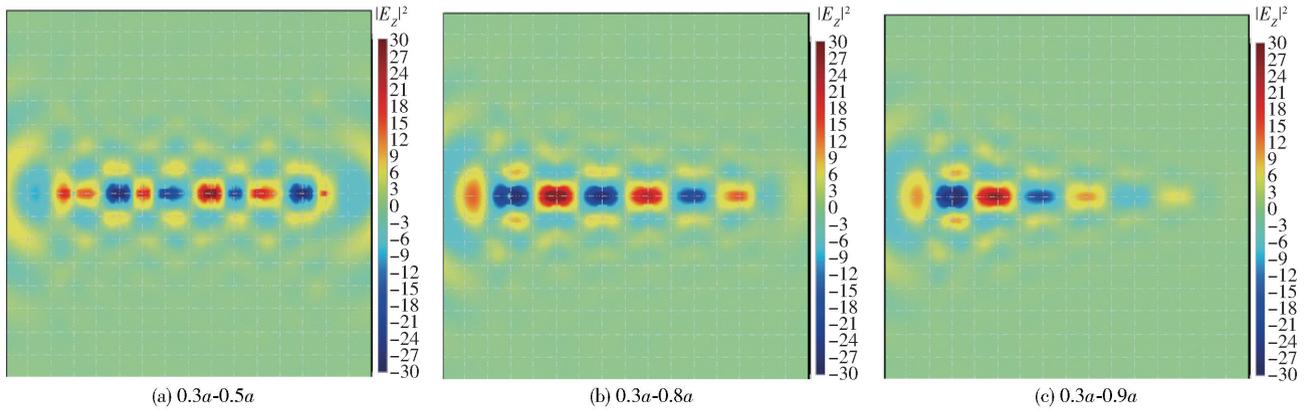


图3 不同锯齿长度下频率 11.51 GHz 时的场分布图

Fig. 3 Field distributions at 11.51 GHz for different serration lengths

2 任意弯曲的锯齿波导

第1节模拟获得了锯齿长度 $1.0a - 0.6a$ 的波导导带范围,在此基础上固定锯齿长度,研究不同弯曲程度波导的传输特性。设计了如图4所示的4种不同弯曲程度锯齿波导,并分别模拟计算其透射谱,结果如图5所示。可以发现,图5中实线所对应弯

曲程度较小的锯齿波导具有较宽的导带范围和良好的透过率;其余3种不同弯曲度的波导也都具有一定的导带范围,可以实现对一定波长的良好传输。与直锯齿波导相比,弯曲波导的导带宽度明显减小,且透过率也明显降低。这是由于随着弯曲程度的增加,相邻两个锯齿之间的距离逐渐加大,相邻两个微腔间的耦合降低,故而透过率也受到了一定的影响。

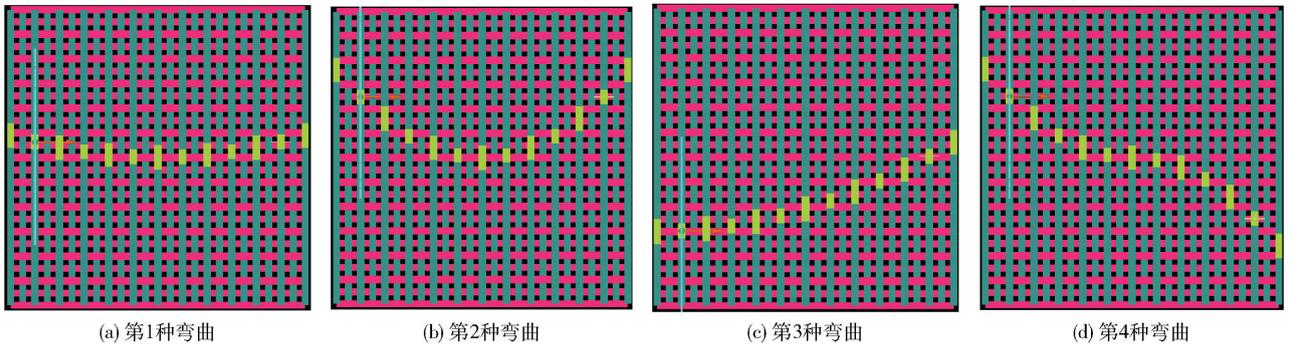


图4 4种不同弯曲锯齿波导的结构图

Fig. 4 The structures for the four bend waveguides

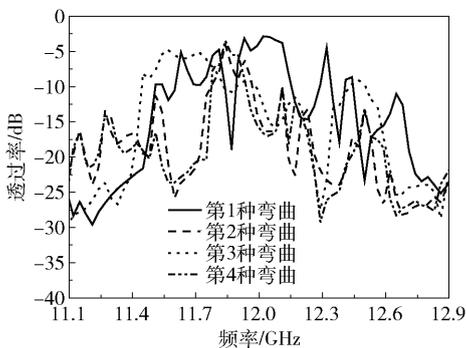


图5 4种不同弯曲锯齿形波导的透射谱

Fig. 5 Transmission spectra for the four bend waveguides

为了验证透射谱的传输准确性,模拟计算了各

弯曲波导在 $f = 11.64 \text{ GHz}$ 、 11.85 GHz 、 11.55 GHz 和 11.85 GHz 时的场分布,结果如图6所示。可以发现,对应频率的波均可局限在锯齿波导中传输,实现了波导的导波特性的。

此外设计了 90° 弯曲的非共面锯齿波导,结构如图7(a)所示,其输入波导(第14层)与输出波导(第13层)锯齿长度均为 $1a - 0.3a$,在拐角处设置一个 $1a \times 0.9a \times 0.6a$ 的立体微腔来改善两者在该处的耦合效率。模拟计算了其透射谱及场分布,结果如图7(b)、(c)、(d)所示。可以发现,该弯曲波导同样具有良好的传输效率,其导带范围为 $11.10 \text{ GHz} \sim 12.30 \text{ GHz}$,平均透过率为 -7.5 dB 。

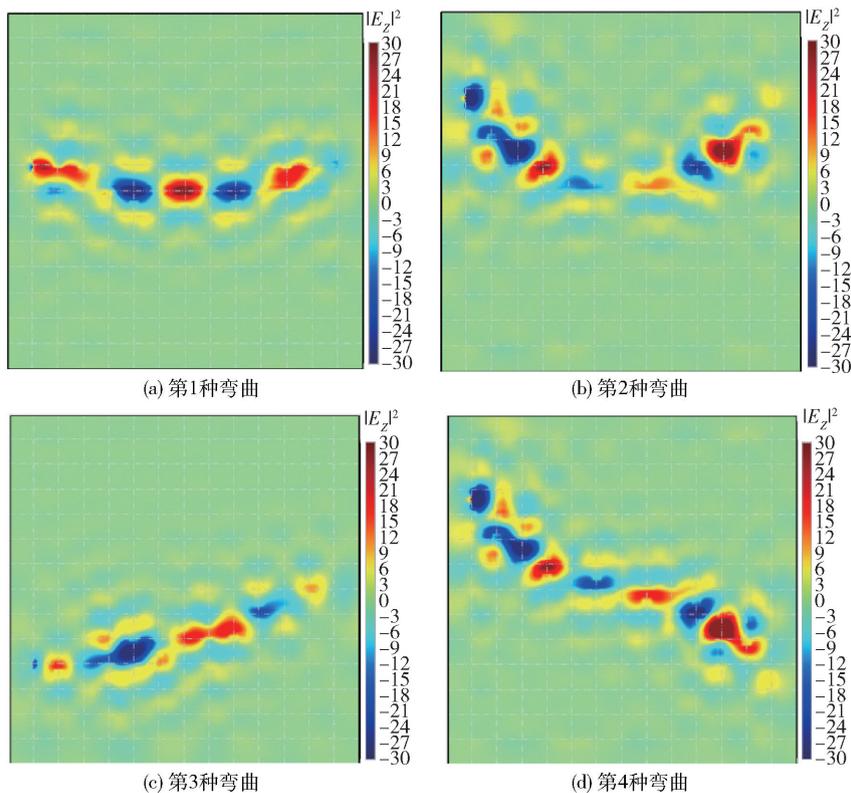
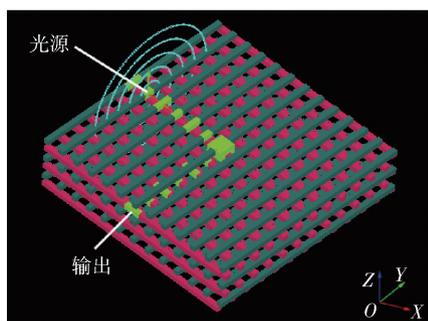
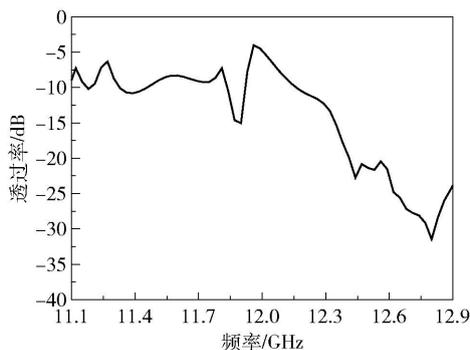


图 6 4 种弯曲锯齿波导的场分布图

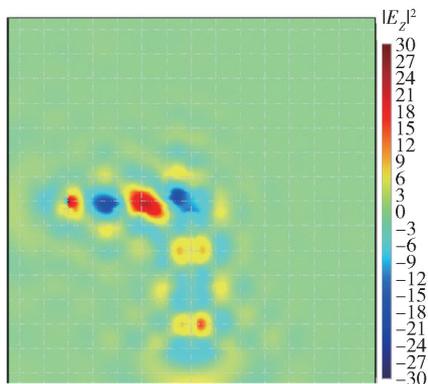
Fig. 6 Field distributions for the four bend waveguides



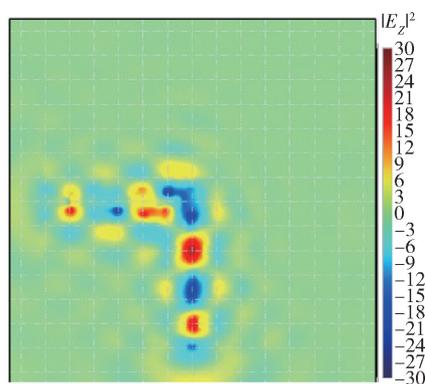
(a) 90°弯曲非平面锯齿波导结构



(b) 透射谱



(c) 输入波导场分布



(d) 输出波导场分布

图 7 90°弯曲非平面锯齿波导结构图、透射谱和场分布

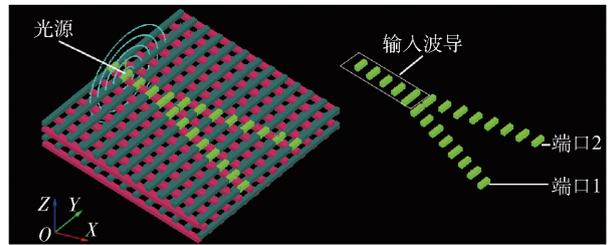
Fig. 7 The structure, transmission spectrum and field distribution for the 90° non-planar serration waveguide

3 波分复用器

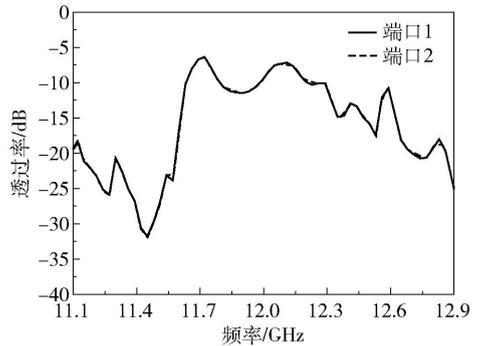
第1节的模拟计算已经证明,通过改变锯齿波导中相邻锯齿的长度可以很好地控制导带的范围,利用这一特点,设计了如图8(a)所示的Y型波分复用器。首先设输入、输出波导锯齿长度均为 $0.8a - 0.9a$,两输出端口相距 $5a$,模拟计算两个端口的透射谱,结果如图8(b)所示。可以发现,由于两个输出波导的锯齿长度相等,其透射谱完全重合,即两端口输出频率范围完全相同。

然后在输入波导参数不变的前提下,调整两个输出波导相邻锯齿的长度,研究其频率选择特性。根据第1节的模拟计算结果,设计两输出波导锯齿长度分别为 $0.3a - 0.5a$ 和 $0.3a - 0.8a$,模拟计算其不同端口的透射谱,结果如图9(a)所示。可以发现两个输出端口的透射谱都发生了变化,显示出明显的频率选择特性,如频率范围在 $12.16\text{ GHz} \sim 12.45\text{ GHz}$ 的波沿端口1输出,而频率范围在 $11.98\text{ GHz} \sim 12.13\text{ GHz}$ 的波沿端口2输出。由 $f=12.03\text{ GHz}$ 、 12.27 GHz 时的场分布(图9(b)、(c))可以发现,12.03 GHz时的波沿端口2输出,12.27 GHz时的波沿端口1输出,说明设计结构时不需要在波导中引

入空气微腔、共振环等装置,利用锯齿波导就可以实现波分复用器的频率选择特性。



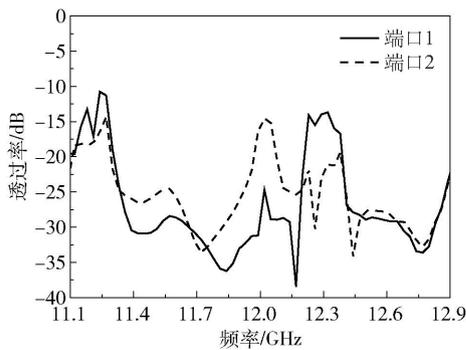
(a) Y型波分复用器结构



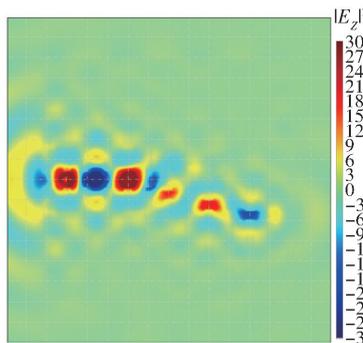
(b) 两输出端口的透射谱

图8 Y型波分复用器结构及其透射谱

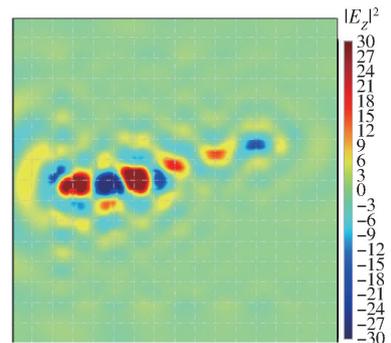
Fig. 8 The Y-type wavelength division multiplexer structure and associated transmission spectra



(a) 两输出端口的透射谱



(b) 端口1的场分布



(c) 端口2的场分布

图9 Y型波分复用器的透射谱及其场分布

Fig. 9 The transmission spectra and field distributions for the Y-type wavelength division multiplexer

4 结论

(1)随着相邻锯齿长度的变化,波导的导带范围会发生明显的变化,甚至可以出现导带范围完全独立的情况;锯齿波导设计灵活,可以实现任意弯曲、任意输出方向的锯齿波导的设计。

(2)利用不同锯齿长度对导带的调节作用,设计并研究了Y型波分复用器,发现通过控制输出波

导锯齿长度,可以较好地实现波分复用器的频率选择特性。

(3)锯齿波导具有的选频特性和设计灵活的特点,为其在选频器件和集成器件设计方面的应用提供了可能。

参考文献:

[1] ÖZBAY E, ABEYTA A, TUTTLE G, et al. Measure-

- ment of a three-dimensional photonic band gap in a crystal structure made of dielectric rods[J]. *Physical Review B*, 1994, 50(3): 1945–1948.
- [2] SAMUSEV K B, RYBIN M V, SAMUSEV A K, et al. Optical properties of woodpile photonic crystals produced by three-dimensional laser lithography[J]. *Physics of the Solid State*, 2015, 57(12): 2494–2501.
- [3] FREZZA F, PAJEWSKI L, PIUZZI E, et al. Radiation-enhancement properties of an X-band woodpile EBG and its application to a planar antenna[J/OL]. *International Journal of Antennas & Propagation*. (2014–01–21) [2018–10–01]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/729187>.
- [4] YIN M, TIAN X Y, WU L L, et al. A broadband and omnidirectional electromagnetic wave concentrator with gradient woodpile structure[J]. *Optics Express*, 2013, 21(16): 19082–19090.
- [5] CHANG M L, XIAO M, CHEN W J, et al. Multiple Weyl points and the sign change of their topological charges in woodpile photonic crystals[J]. *Physical Review B*, 2017, 95(12): 125316.
- [6] CHEN W J, HANG Z H, DONG J W, et al. Observation of backscattering-immune chiral electromagnetic modes without time reversal breaking[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(2): 023901.
- [7] CHOI H J, CHOI S, YOO Y E, et al. Transmission-type photonic crystal structures for color filters[J]. *Optics Express*, 2013, 21(15): 18317–18324.
- [8] HO C H, CHENG Y C, MAIGYTE L, et al. Controllable light diffraction in woodpile photonic crystals filled with liquid crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(2): 021113.
- [9] LIU R J, MING R, ZHOU F, et al. Waveguide bend designs in three-dimensional woodpile photonic crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(3): 034502.
- [10] TANG L L, YOSHIE T. Three-dimensional photonic crystal waveguides and resonators by unit cell size modulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 6901: 690118.
- [11] CHUTINAN A, JOHN S. Light localization for broadband integrated optics in three dimensions[J]. *Physical Review B*, 2005, 72(16): 161316.
- [12] CHUTINAN A, JOHN S. 3 + 1 dimensional integrated optics with localized light in a photonic band gap[J]. *Optics Express*, 2006, 14(3): 1266–1279.
- [13] KAWASHIMA S, ISHIZAKI K, NODA S. Light propagation in three-dimensional photonic crystals[J]. *Optics Express*, 2010, 18(1): 386–392.
- [14] LIU R J, LI Z Y, FENG Z F, et al. Channel-drop filters in three-dimensional woodpile photonic crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(9): 094514.

Investigation of serration waveguides in a woodpile structure

LI TianYu FENG ZhiFang*

(Faculty of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The propagation characteristics of serration waveguides in a woodpile structure have been simulated and analyzed in detail by the finite-difference time-domain method. The results show that the transmission spectra can be adjusted effectively by altering the lengths of the adjacent serration in the waveguide. Furthermore, the waveguide structure can be tailored because of the flexibility of the serration waveguide. According to the characteristics of the serration waveguides, a Y-shaped wavelength division multiplexer including different serration values has been designed, simulated and analyzed. The results show that the frequency selection characteristics for the different output ports can be obtained.

Key words: waveguide; finite-difference time-domain method(FDTD); wavelength division multiplexer

(责任编辑:汪 琴)