

文章编号: 1000-7032(2018)07-1036-06

Woodpile 结构三维光子晶体中的四端口通道下载滤波器

李文宇^{1,2,3}, 石泰峡⁴, 张一新⁴, 申艳艳⁴, 冯志芳⁵,
刘艳红^{1,2,3}, 石云龙^{1,2,3}, 董丽娟^{1,2,3*}

(1. 山西大同大学 固体物理研究所, 山西 大同 037009; 2. 微结构电磁功能材料省市共建山西省重点实验室, 山西 大同 037009;
3. 新型微结构功能材料山西省高等学校重点实验室, 山西 大同 037009;
4. 太原理工大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024; 5. 北京化工大学 理学院, 北京 100029)

摘要: 基于三维光子晶体空间完全带隙的特性, 本文在实验上构建了一种由非共面的两个波导和一个立体微腔组成的四端口通道下载滤波器。讨论了球体、正方体、长方体微腔滤波器的选频特性, 以及连续旋转长方体微腔时, 其输出频率的变化。研究表明, 无论是对称型还是非对称型微腔, 都可以较好地实现选频。提高微腔的不对称性, 共振输出频率随之发生移动, 说明改变微腔的对称性, 可以有效调节滤波器的选频特性。连续旋转非对称型长方体微腔, 输出频率会随之发生明显的移动, 如果引入有效调节机制, 可以产生连续调节输出频率的效果。该研究结果给多端口选择性输出空间滤波器的设计提供了新的思路, 为光学器件集成化的设计提供了重要的理论参考。

关键词: 光子晶体; Woodpile; 下载滤波器

中图分类号: O436 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20183907.1036

A Four-port Channel Drop Filter in The Three-dimensional Woodpile Photonic Crystal

LI Wen-yu^{1,2,3}, SHI Tai-xia⁴, ZHANG Yi-xin⁴, SHEN Yan-yan⁴,
FENG Zhi-fang⁵, LIU Yan-hong^{1,2,3}, SHI Yun-long^{1,2,3}, DONG Li-juan^{1,2,3*}

(1. Institute of Solid State Physics, Shanxi Datong University, Datong 037009, China;
2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Electromagnetic Functional Materials for Microstructure, Datong 037009, China;
3. Higher Education Key Laboratory of New Microstructure Function Materials in Shanxi Province, Datong 037009, China;
4. School of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
5. Faculty of Science, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

* Corresponding Author, E-mail: donglijuan_2012@163.com

Abstract: A compact non-planar four-port channel drop filter was developed experimentally in the three-dimensional Woodpile photonic crystal with a complete band gap. It consisted of two waveguides separated by a defect in different layers of the photonic crystal. The property of frequency selecting of channel drop filter with sphere cavity, cube cavity, cuboids cavity and cuboids cavity rotating was discussed experimentally. The results show that the property of frequency selecting of channel drop filter can be realized whatever the cavity is symmetric or non-symmetric in the Woodpile

收稿日期: 2018-01-25; 修订日期: 2018-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(11504210, 11504211, 11504212, 11604186); 山西省科技攻关项目(2015031002-2); 山西省应用基础研究项目(2016021029); 山西省研究生联合培养基地人才培养项目(2016JD08); 大同市科技攻关项目(2015015); 山西大同大学青年科研基金(2016Q6, 2017Q8)资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China(11504210, 11504211, 11504212, 11604186); Science and Technology Project of Shanxi Province(2015031002-2); Applicable fundamental Research Foundation of Shanxi Provincial(2016021029); Graduate Joint Training Base Personnel Training of Shanxi Province(2016JD08); Science and Technology Project of Datong, Shanxi Province(2015015); Youth Research Foundation of Shanxi Datong University(2016Q6, 2017Q8)

structure. It indicated the output frequency can be effectually regulated by changing the symmetric of non-planar cavity. For a non-symmetric cavity, the output frequency can be adjusted as the rotation of the cavity. If the effective regulation mechanism is introduced, the output frequency can be adjusted continuously. The results provide a new idea and an important theoretical reference for the design of optical integrated devices.

Key words: photonic crystal; Woodpile; drop filter

1 引言

光子晶体自 1987 年 John^[1] 和 Yablonovitch^[2] 提出以后得到了迅速的发展。它是一种介电常数周期性排列的人工微结构材料, 根据空间不同的排列方式分为一维、二维和三维结构, 光子带隙是其最显著的特点之一。由于光子带隙的存在, 使它作为光子集成电路的基本单元, 而光子晶体器件就是利用在光子晶体中引入点缺陷、微腔、线缺陷或波导构成的^[3-6], 比如光子晶体光纤、光开关、传感器、滤波器^[7-11]等。

目前实验上已经证实, 在二维结构中微腔可以俘获和发射光子^[12]。利用这一特点, 二维光子晶体滤波器的研究得到快速发展^[13-14]。Qiu 等^[15]报道了由三角气孔格构成的二维光子晶体中的通道下载滤波器。Takano 等^[16]提出了一种在平板上设计的二维光子晶体下载滤波器, 由输入/输出波导和一个点缺陷腔构成。但是, 二维结构最突出的缺陷是非平面损耗, 为了消除这种损耗, 人们选择在具有完全带隙结构的三维光子晶体中构建滤波器, 即在三维结构中引入微腔和波导, 通过波导和附近微腔的耦合作用实现频率的谐振输出。有关三维结构中的滤波器, 人们也作了一定的理论和实验报道^[17-18], 研究提出两波导之间的耦合频率取决于微腔的共振频率, 而微腔的尺寸大小和位置都会对其共振频率有影响^[19-21]。Kohli 等^[19]研究了一种二端口通道下载滤波器, 由一个输入波导、一个输出波导和一个微腔构成, 研究表明增大微腔尺寸, 共振频率会增加, 并且减少光子晶体的包覆层会降低共振模的品质因子。Stieler 等^[21]理论上实现了平面四端口通道下载滤波器, 由同一层内两个波导和一个微腔构成, 该微腔仅限于平面微腔(即同一层中打断一段介质柱作为微腔)。

本文在实验上研究了立体四端口通道下载滤波器, 设计了 Woodpile 结构三维光子晶体^[22]中不同层内波导和微腔结构, 且分别讨论了微腔为球腔、正方体腔、长方体腔时滤波器选频特性。通过改变微腔的空间对称性, 可以有效调节共振输出频率; 且当连续旋转长方体微腔时, 滤波器可以实现频率的不同端口连续输出。

2 实验设计

本文搭建了工作在微波波段的 Woodpile 结构三维光子晶体, 如图 1 所示。介质柱是介电常数为 9.0 的 Al_2O_3 , 其尺寸为 $3.0 \text{ mm} \times 3.0 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 空气作为背景材料。该结构在 Z 方向 4 层为 1 个周期($h = 12 \text{ mm}$), 共 20 层, 其中, 第三层平行于第一层, 相对于第一层移动半个周期($a = 10 \text{ mm}$), 第四层平行于第二层, 且相对于第二层平移半个晶格常数 a , X 和 Y 方向晶格常数相同, Z 方向一个周期内相邻两层互相垂直, 该结构填充率为 29%。

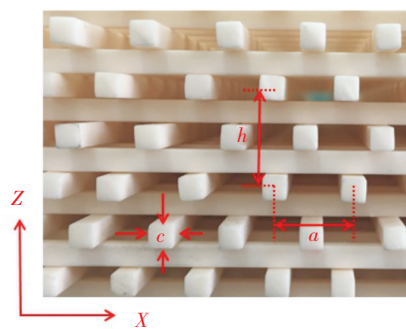


图 1 Woodpile 结构三维光子晶体示意图

Fig. 1 Diagram of the 3D photonic crystal with Woodpile structure.

本文所研究的立体空间通道下载滤波器由 2 个平行直波导和 1 个立体微腔构成, 平行直波导是通过在 Woodpile 结构中抽掉两根介质柱构成, 包括输入波导与输出波导, 分别是在堆叠结构 Z 方向的第 8 层和 12 层, 且两个波导在水平方向上平移

一个晶格常数,垂直方向上的距离为一个周期长度,如图 2(a)和(c)所示。其中,A 记为微波信号的输入端口,B、C 和 D 为 3 个输出端口。立体微腔的对称中心位于第 10 层,它是在结构中取掉一部分介质柱,放入介电常数为 1.05 的泡沫材料构成,如图 2(b)所示,且泡沫微腔的中心线与上、下两个波导的中心线对齐。实验用一对同轴电缆制成的单极天线连接 Agilent N5230G 矢量网络分析仪和各个端口,并由矢量网络分析仪分析给出数据。天线的最佳位置是以波导中心线为中心,伸进波导约一个晶格常数的位置处。由于这种半刚性的同轴电缆材料具有良好的机械稳定性,因此,可以通过细微调整其与端口的位置来优化波导和微腔的耦合效果。当测量开始时,一根天线固定在输入端口 A,另一根放置在其中一个输出端口,输入的微波信号通过波导与微腔之间的耦合作用,特定频率的波将由输出端口 B、C 或者 D 耦合输出。此外,在实验过程中,一定要确保天线在每个端口放置的位置相同。

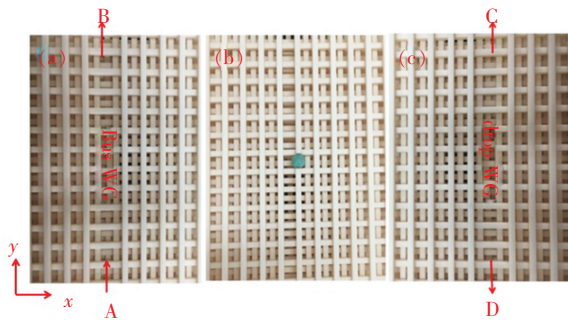


图 2 立体空间下载滤波器结构图。(a)位于第 8 层的总线波导;(b)位于第 10 层的球形微腔;(c)位于第 12 层的下载波导。

Fig. 2 Channel drop filter in Woodpile structure. (a) Bus waveguide in 8th layer. (b) Sphere cavity in 10th layer. (c) Drop waveguide in 12th layer.

3 实验结果与分析讨论

3.1 Woodpile 结构三维光子晶体完全带隙分析

由图 3 可以看出,实验测得的完整 Woodpile 结构三维光子晶体带隙范围大约分布在 12.0 ~ 13.8 GHz,带隙宽度约为 2 GHz,说明本文用 Al_2O_3 介质柱搭建的 Woodpile 结构三维光子晶体具有较宽的带隙,是设计立体空间滤波器的理想结构。

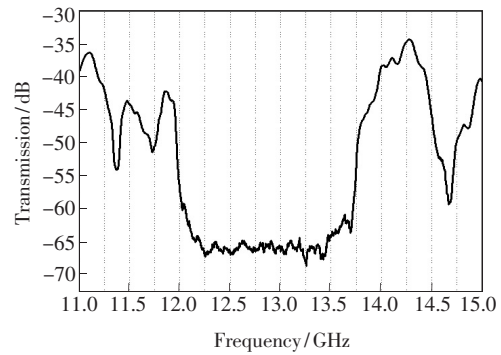


图 3 Woodpile 结构三维光子晶体的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra of 3D photonic crystal with Woodpile structure

3.2 微腔的空间对称性对选频特性的影响

本文首先选用半径为 4 mm 的泡沫球作为对称性缺陷微腔,研究介电常数关于对称中心对称性分布的球形微腔对空间下载滤波器选频特性的影响。实验测得的 3 个输出端口的透射曲线如图 4 所示,其中实线表示 B 端口的透射谱,点线表示 C 端口的透射谱,点横线表示 D 端口的透射谱。从透射曲线可以看出,由于微腔是立体微腔,B、C 和 D 3 个输出端口在频率为 12.2 ~ 13.8 GHz 范围具有一个较强的通带,说明该结构可以实现对较宽频率的选频。当频率为 12.45 GHz 时,B 端口的透射曲线出现一个尖锐的谷,且相对于 D 端口透射降低了大约 25 dB。这说明在该结构的立体空间滤波器的谐振系统中,上下两个波导充当光纤的作用,立体微腔可以看作是一个驻波谐振腔。当入射波频率为 12.45 GHz 时,这一频率刚好满足谐振腔的共振频率,此时入射波从输入波导耦合到立体微腔,后和 D 端输出波导发生共振输出,且 12.45 GHz 为半径为 4 mm 的球形对称

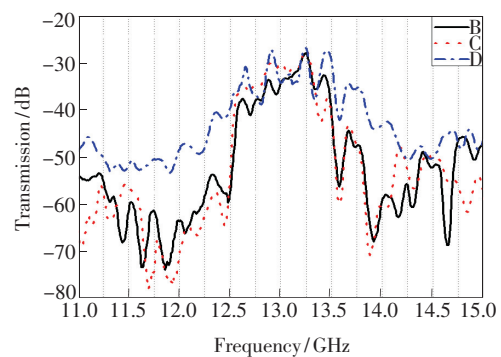


图 4 球形微腔通道下载滤波器的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of channel drop filter with sphere cavity

性立体微腔的共振频率。同时,可以看到,在频率为 13.72 GHz 处也在 D 端口有频率的共振输出。这一结果充分证明了利用立体微腔可以实现三维空间的选频。

进一步改变微腔的对称性特点,用正方体微腔代替球体微腔,边长为 8 mm,保持微腔位置不变,如图 5(a)所示。与球体微腔相比较,正方体结构微腔介电常数关于其对称中心不满足中心对称条件,即增加了微腔介电常数的非对称性分布。同样使用矢量网络分析仪,测得该结构滤波器所对应的各个输出端口的透射曲线,结果如图 5(b)所示,其中实线表示 B 端口的透射谱,点线表示 C 端口的透射谱,点横线表示 D 端口的透射谱。从透射谱中可以看出,B、C、D 端口同样都存在较宽范围的通带,也可以实现较宽频率的选频特性。另外,和球体微腔相比可以看到,D 端口的两处共振输出频率均发生了微小的移动。以上结果充分证明无论是对称型微腔还是非对称型微腔,都可以实现较宽频率的选频特性,此外,改变谐振系统

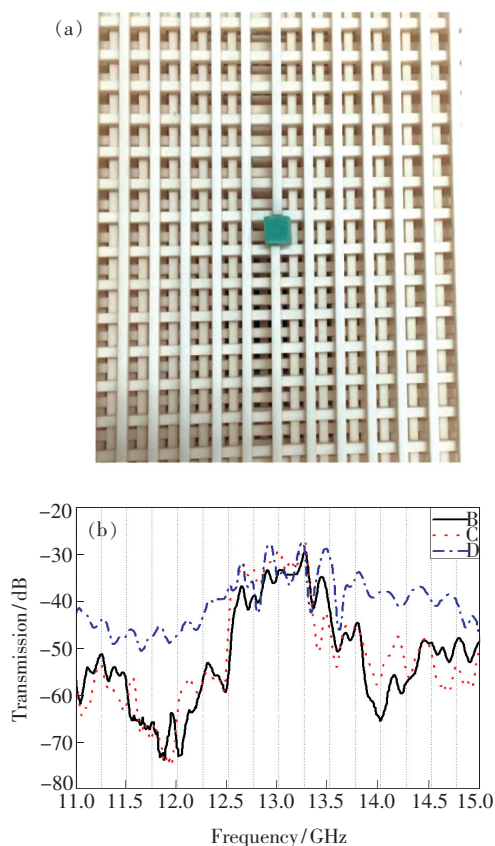


图 5 正方体微腔通道下载滤波器。(a) 结构图;(b) 透射谱。

Fig. 5 Transmission spectra of channel drop filter with cube cavity. (a) Structure picture. (b) Transmission spectra.

中微腔的对称性特点,对通道下载滤波器的共振频率有一定的影响。

3.3 连续可调的通道下载滤波器

上述实验结果已充分证明了微腔介电常数的非对称性可以有效调节滤波器的输出频率,在此基础上,进一步提高微腔的非对称性,即用长方体微腔(10 mm × 10 mm × 20 mm)代替正方体微腔。首先,研究长方体微腔的长轴方向沿着 Y 轴方向放置时的情况(与 Y 轴夹角 $\theta = 0^\circ$),微腔结构如图 6(a)所示,实验测得结果如图 7(a)所示。与上述两种结果相比,可以看出,随着微腔介电常数非对称性的提高,各个端口的透射曲线和共振输出频率均会发生明显的变化,进一步证明了谐振系统的非对称性对选频的重要影响。从图中也可以看到,增大了微腔尺寸,透射谱中会出现了多个共振膜,说明该结构的滤波器可以实现多频率选频输出。

下一步,将研究在连续调节长方体微腔的长轴方向与 Y 轴方向的夹角 θ 。在其他参数保持不变的情况下,当旋转长方体微腔时,谐振系统介电常数的分布情况也会随之发生变化。首先,沿逆时针方向旋转长方体微腔,使其与 Y 轴方向夹角 θ 分别为 15° 、 30° 、 45° 、 60° 、 90° ,图 6(b)和(c)分别给出了 $\theta = 45^\circ$ 和 $\theta = 90^\circ$ 时的结构图。实验测量分别得到不同夹角时滤波器各端口的透射谱,如图 7(b)和(c)所示。比较所有的透射曲线可以发现,改变两者之间夹角 θ ,每一旋转角度对应的各端口输出频率是不相同的,且输出端口也会发生变化。以夹角为 45° 的透射谱为例,在频率

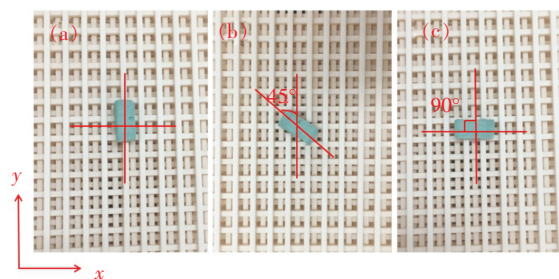


图 6 通道下载滤波器长方体微腔旋转时的结构图。(a) 微腔保持不变;(b) 微腔逆时针旋转 45° ;(c) 微腔逆时针旋转 90° 。

Fig. 6 Diagram of channel drop filter with cuboids cavity rotating. (a) Cuboids cavity remains. (b) Cuboids cavity rotate 45° counterclockwise. (c) Cuboids cavity rotate 90° counterclockwise.

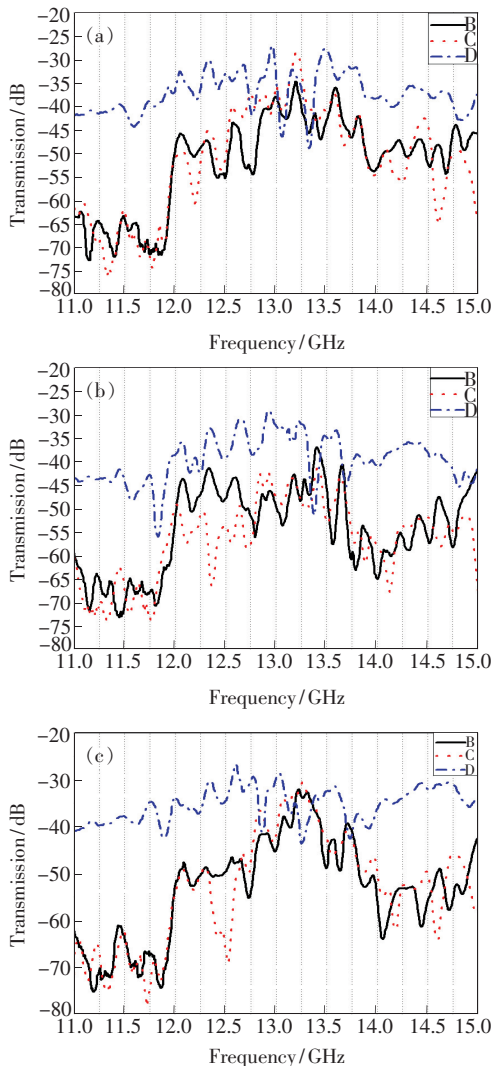


图 7 长方体微腔通道下载滤波器的透射谱。(a) 微腔保持不变;(b) 微腔逆时针旋转 45° ;(c) 微腔逆时针旋转 90° 。

Fig. 7 Transmission spectra of channel drop filter with cuboids cavity rotating. (a) Cuboids cavity remains. (b) Cuboids cavity rotate 45° counterclockwise. (c) Cuboids cavity rotate 90° counterclockwise.

为 13.09 GHz 时, B、C 端口的透射谱存在一个尖锐的低谷, 而 D 端的透射谱存在一个峰值, 且透

射相比 B、C 端口高出约 20 dB, 说明该频率的入射波将由 D 端口共振输出。而当夹角为 90° 时, 最强的输出频率出现在 12.52 GHz 处, 与夹角为 45° 相比, 输出频率发生了移动。同时从透射谱中还可以发现, 在频率为 13.25 GHz 处, 该频率的波在 D 端口存在一个明显的低谷, 而 C 端口有一个峰值, 故该频率的波不会从 D 端输出, 而是与 C 端口发生谐振输出, 说明改变两者之间的夹角时, 除了输出频率会发生变化, 对应的输出端口也会发生改变。以上分析表明, 如果在空间滤波器的谐振系统中引入连续旋转机制, 可以实现立体空间对频率的连续调节, 从而实现滤波器连续可调的选频特性。

4 结 论

本文通过在 Woodpile 结构三维光子晶体中构建不同堆叠层的四端口通道下载滤波器, 研究了立体微腔的对称性对滤波器选频特性的影响。研究表明, 无论是对称型还是非对称型微腔都有一个频率范围为 12.2 ~ 13.8 GHz 的较宽通带, 可以实现对较宽频率的选频特性。其次, 当选用球形对称型微腔时, 共振输出频率为 12.45 GHz 和 13.72 GHz。而改变微腔的对称性, 选用正方体微腔和长方体微腔时, 输出频率均发生了移动, 说明微腔的对称性对通道下载滤波器的选频特性有一定的影响。进一步连续改变非对称型长方体微腔长轴与 Y 轴的夹角 θ , 发现当 θ 为 45° 时, 频率为 13.09 GHz 的入射波将由 D 端口共振输出; 而改变夹角为 90° 时, 最强的输出频率出现在 12.52 GHz 处, 输出频率发生了明显移动。另外, 频率为 13.25 GHz 时, 该入射波的输出端口也发生变化, 从 C 端口谐振输出, 说明在空间滤波器的谐振系统中引入连续旋转机制, 可以实现连续调节输出频率的特性。该特性对提高滤波器的设计和应用范围具有重要的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(23):2486-2489.
- [2] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20):2059-2062.
- [3] SUBRAMANIA G, LIN S Y, WENDT J R, *et al.*. Tuning the microcavity resonant wavelength in a two-dimensional photonic crystal by modifying the cavity geometry [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83:4491-4494.
- [4] 毛强明, 李长红, 夏铮. 矩形孔光子晶体波导慢光特性 [J]. *光子学报*, 2016, 45(2):0223002.

- MAO Q M, LI C H, XIA Z. Investigation on slow light properties in rectangular holes photonic crystal waveguide [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2016, 45(2):0223002. (in Chinese)
- [5] SELL C, CHRISTENSEN C, MUEHLMEIER J, *et al.*. Waveguide networks in three-dimensional layer-by-layer photonic crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84:4605-4607.
- [6] KOHLI P, CHATTERTON J, STIELER D, *et al.*. Fine tuning resonant frequencies for a single cavity defect in three-dimensional layer-by-layer photonic crystal [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(24):19844-19849.
- [7] KIM S, PARK I., LIM H, *et al.*. Highly efficient photonic crystal-based multi-channel drop filters of three-port system with reflection feedback [J]. *Opt. Express*, 2004, 12(22):5518-5525.
- [8] 陈琦, 孔德鹏, 苗竞, 等. 太赫兹聚合物光子晶体光纤关键制备工艺研究 [J]. *光子学报*, 2017, 46(4):0406001. CHEN Q, KONG D P, MIAO J, *et al.*. Key fabrication technology of polymer photonic crystal fiber for terahertz transmission [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2017, 46(4):0406001. (in Chinese)
- [9] 刘艳红, 董丽娟, 刘丽想, 等. 基于各向异性光子晶体带隙的窄带通角度滤波器 [J]. *光学学报*, 2013, 33(8):0823001. LIU Y H, DONG L J, LIU L X, *et al.*. Narrow bandpass angular filter based on anisotropic photonic band gap [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2013, 33(8):0823001. (in Chinese)
- [10] 梁冠全, 韩鹏, 汪河洲. 空间与频率双性能的薄膜光学滤波器 [J]. *物理学报*, 2004, 53(7):2197-2200. LIANG G Q, HAN P, WANG H Z. Thin-film optical filters with both functions of incident angle and frequency [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2004, 53(7):2197-2200. (in Chinese)
- [11] 陈卫东, 董昕宇, 陈颖, 等. 对称双缺陷光子晶体的可调谐滤波特性分析 [J]. *物理学报*, 2014, 63(15):154207. CHEN W D, DONG X Y, CHEN Y, *et al.*. Analysis of the tunable filtering properties of a photonic crystal with symmetric dual defects [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2014, 63(15):154207. (in Chinese)
- [12] NODA S, CHUTINAN M, IMADA M. Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure [J]. *Nature*, 2000, 407:608-610.
- [13] JIANG C, REN H, WANG J, *et al.*. Photonic crystal channel drop filter with a wavelength-selective reflection micro-cavity [J]. *Opt. Express*, 2006, 14(6):2446.
- [14] DROUARD E, HATTORI H, GRILLET C, *et al.*. Directional channel-drop filter based on a slow Bloch mode photonic crystal waveguide section [J]. *Opt. Express*, 2005, 13(8):3037-3048.
- [15] QIU M, JASKORZYNSKA B. Design of a channel drop filter in a two-dimensional triangular photonic crystal [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(6):1074-1076.
- [16] TAKANO H, AKAHANE Y, ASANO T, *et al.*. In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(13):2226-2228.
- [17] OKANO M, KAKO S, NODA S. Coupling between a point-defect cavity and a line-defect waveguide in three-dimensional photonic crystal [J]. *Phys. Rev. B*, 2003, 68:235110.
- [18] BAYINDIR M, OZBAY E. Dropping of electromagnetic waves through localized modes in three-dimensional photonic band gap structures [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2002, 81(24):4514-4516.
- [19] KOHLI P, CHRISTENSEN C, MUEHLMEIER J. Add-drop filters in three-dimensional layer-by-layer photonic crystals using waveguides and resonant cavities [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 89(23):231103-1-3.
- [20] ZHIFANG F, DANDAN Z, YASIN AKHTAR RAJA M. Channel drop filters in Woodpile-heterostructures [J]. *J. Appl. Phys.*, 2014, 115(8):813.
- [21] STIELER D, BARSIC A, BISWAS R, *et al.*. A planar four-port channel drop filter in the three-dimensional Woodpile photonic crystal [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(8):6128.
- [22] OZBAY E, ABEYTA A, TUTTLE G, *et al.*. Measurement of a three-dimensional photonic band gap in a crystal structure made of dielectric rods [J]. *Phys. Rev. B*, 1994, 50(3):1945-1948.



李文宇(1989 -),女,山西吕梁人,硕士,助教,2015年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事光子晶体、特异材料等方面的研究。
E-mail: 1030384402@qq.com



董丽娟(1976 -),女,山西襄汾人,博士,教授,2009年于同济大学获得博士学位,主要从事人工微结构材料的研究。
E-mail: donglijuan_2012@163.com