

金属薄膜的缺陷模对一维光子晶体滤波特性的影响

刘圆圆¹, 李旭峰¹, 赵亚丽², 彭伟³, 杨雯¹

¹太原科技大学应用科学学院, 山西 太原 030024;

²中国电子科技集团公司第三十三研究所, 山西 太原 030024;

³大连理工大学物理学院, 辽宁 大连 116024

摘要 采用时域有限差分(FDTD)法,对由银-氧化铟锡(ITO)薄膜构成的一维光子晶体结构在 300~800 nm 波段范围内的滤波特性进行了研究。仿真研究了金属缺陷层厚度、入射角度和 ITO 膜厚度等对光子晶体滤波特性的影响。对不同参量下光子晶体结构的色散曲线也进行了仿真计算,并分析了色散机理。结果表明,改变缺陷层的厚度能够调制光子晶体的滤波范围及滤波波形;入射光线小角度范围($0^\circ\sim 20^\circ$)内的变化对该光子晶体滤波性能的影响甚微;随着 ITO 膜厚度的增加,滤波波谱呈周期性变化。

关键词 薄膜; 光子晶体; 滤波器; 缺陷; 时域有限差分法

中图分类号 O439 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.053103

Influence of Defect Modes of Metal Films on Filtering Characteristics of One-dimensional Photonic Crystals

Liu Yuanyuan¹, Li Xufeng¹, Zhao Yali², Peng Wei³, Yang Wen¹

¹School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

³School of Physics and Optoelectronic Technology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract The filtering characteristic of the one-dimensional photonic crystal structure composed of Ag-ITO thin films in the spectral range of 300-800 nm is investigated by the finite difference time domain method. The influences of metal defect layer thickness, incident angle, and ITO film thickness on filtering characteristics of photonic crystals are simulated. The dispersion relationships of the photonic crystal under different parameters are simulated and calculated, and the corresponding mechanisms are analyzed. The results indicate that, the filtering range and filtering waveform of the photonic crystal can be modulated by tuning defect layer thickness. The change of the incident light in the small angle range ($0^\circ\sim 20^\circ$) has little influence on the filtering performance of the photonic crystal. With the increase of ITO film thickness, the filtering spectrum shows a periodic change.

Key words thin films; photonic crystals; filter; defect; finite-difference time-domain method

OCIS codes 310.6628; 310.6805; 310.6860

收稿日期: 2017-11-14; 收到修改稿日期: 2017-11-20

基金项目: 山西省应用基础研究计划(201701D121007, 201701D121050)、山西省高等学校创新人才支持计划、山西省出国留学人员科研资助项目(2016-096)

作者简介: 刘圆圆(1990—),男,硕士研究生,主要从事光在微纳结构中的控制与传输方面的研究。

E-mail: 489385080@qq.com

导师简介: 李旭峰(1980—),男,副教授,硕士生导师,主要从事光波导理论与设计研究方面的研究。

E-mail: xfli@mail.dlut.edu.cn(通信联系人)

1 引言

光子晶体是由呈周期性排列的具有不同折射率的介质材料组合而成人工材料,其介电常数在空间某一或某几个方向上按一定周期变化^[1-3]。其工作原理与半导体晶格对电子波函数的调制原理类似,即电磁波在光子晶体中传播时受布拉格散射^[4-5]的作用,其能量会形成能带结构。光子晶体中存在光子带隙,因此其本身就是一个天然的滤波器^[6-9],在微波电路、天线以及全新光子器件设计等方面具有重要的应用价值。光子晶体理论最早由 Yablonovitch^[10-11]提出,此后经过近 20 年的发展,关于光子晶体的理论与实验研究已逐步从微波波段发展到红外、可见光波段,在制备和加工方面也取得了一定的进展^[12-13],目前对光子晶体滤波特性的研究已成为国内外微纳光学领域的热点问题之一。

大量研究表明,在光子晶体中引入缺陷结构可以直接制备光子晶体共振腔,即当外来入射波的频率和所引入的缺陷模的频率吻合时会发生共振。光子晶体滤波器就是利用了这一特性来实现传统滤波器所不具备的滤波功能。一方面,当光子晶体中的某些单元缺失而形成缺陷时,光子频率禁带内的某些频率会毫无损失地穿过光子晶体,利用光子晶体这一特性可以制备高品质的极窄带选频滤波器^[14-17]。另一方面,当在周期性排列的光子晶体基元介质薄膜之间合理地插入不同于基元介质的薄膜时也会形成缺陷,光传播到缺陷位置时被局域限制(即缺陷位置处的光场增强),自发辐射增强,这种增强的自发辐射导致透射能带谱中出现透射率很高且带宽很窄的缺陷模^[18-21]。通过引入缺陷来控制电磁波在光子晶体中传播的方法可广泛应用于光通信、光电子集成器件等领域^[22-23],因此,以不同的应用场合为背景,开展基于各类型缺陷材料的光子晶体滤波的机理研究具有重大意义。目前,大多数研究主要针对缺陷材料为电介质的情形,而缺陷材料为金属的研究鲜有报道^[24-28]。金属光子晶体能够在亚波长尺度上有效控制和约束光的传播,呈现出诸多突破光的衍射理论限制的奇特的光传输现象^[29],在纳米光子器件、高密度集成电路、数据存储、纳米光刻等领域具有巨大的应用潜力。利用金属光子晶体超构材料,可设计更符合实际应用要求的光子和电磁器件,因此近几年来备受关注意^[30-36]。

2 研究模型与方法

含有缺陷的一维光子晶体结构如图 1 所示,其中 TM 表示横磁。所计的光子晶体模型分为三个部分:衬底层、波导层和缺陷层。衬底材料为石英玻璃(SiO_2 , 折射率 $n_{\text{glass}} = 1.45$);波导层由氧化铟锡(ITO, 折射率 $n_{\text{ITO}} = 1.73$)薄膜和银(Ag)膜交替组成,其厚度分别为 d_A 和 d_B 。缺陷层材料为 Ag,厚度为 d_c 。采用二维的电磁场时域有限差分(FDTD)法进行仿真研究。根据 FDTD 算法的收敛准则,在 x - y 平面内将单元网格划分为 $2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$ 大小(该尺度远小于入射波长的十分之一),以确保计算结果的准确可靠。对计算边界进行如下处理:在 x 方向选用布洛赫边界条件, y 方向选用理想匹配层(PML)为吸收层条件,用于吸收向外散射的电磁波。计算采用平面横磁(TM)波,入射方向自上而下(图 1),在波长为 $300 \sim 800 \text{ nm}$ 的范围内,仅考虑金属 Ag 的色散(其余电介质的相对介电常数很小,可以忽略),其色散关系采用杜鲁德模型^[37-38]表示为

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \quad (1)$$

式中 ϵ 为 Ag 薄膜的介电常数; ϵ_{∞} 表征金属带间跃迁对介电常数的贡献,在远离带间跃迁频率时, ϵ_{∞} 为常数,Ag 膜的 ϵ_{∞} 为 5; Ag 的等离子频率 $\omega_p = 1.4497 \times 10^{16} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; 阻尼系数 $\gamma = 8.33689 \times 10^{13} \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

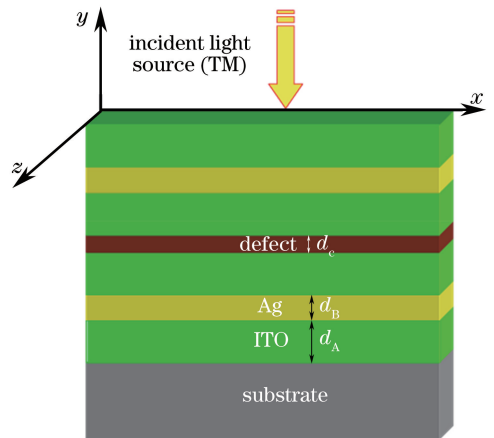


图 1 含有缺陷的一维光子晶体结构

Fig. 1 Structure of 1D photonic crystal with defects

3 结果与分析

取 Ag 膜厚度 $d_B = 25 \text{ nm}$, ITO 膜厚度 $d_A = 60 \text{ nm}$, 所得的光子晶体透射率随波长的变化关系如图 2 所示。由图 2(a)可知,改变缺陷的厚

度 d_c 不仅可以改变光子晶体透射共振峰的位置, 还可以改变其滤波的范围及滤波波形。一方面, 随着 d_c 的增大, 短波处的频谱透射率减小, 表明该光子晶体结构可对紫外光起到过滤的作用, 但当缺陷厚度太大(大于 80 nm)时, 金属膜的吸收作用会阻碍整个入射频谱的通过; 另一方面, 由

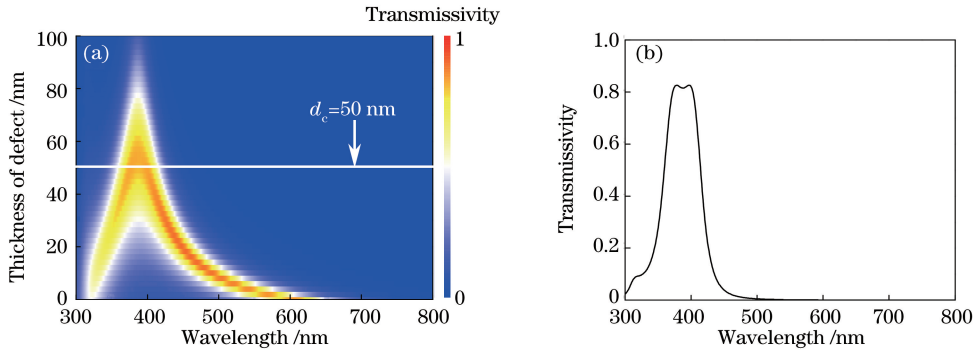


图 2 (a)透射率分布图;(b) $d_c = 50$ nm 时的透射谱

Fig. 2 (a) Transmissivity distribution; (b) transmission spectrum at $d_c = 50$ nm

根据布洛赫波的产生原理, 应用 Lumerical FDTD 仿真软件得出一维复合光子晶体结构的能带图, 如图 3 所示, 其中 f 为入射波频率, k_x 为布洛赫波 x 方向的波矢分量大小。根据布洛赫定律, 在 x 方向设置布洛赫边界条件, 并采用多偶极子激励下的峰值扫描检测法, 在 k_x 按一定步长逐步从 0 增加到 $5 \times 10^7 \text{ rad} \cdot \text{m}^{-1}$ 的过程中求出该模型结构的本征频率, 然后导出所有 k_x 对应的本征频率数据, 最终获得相应结构的能带图。现分别就三种缺陷厚度情况进行讨论: 当 $d_c = 20$ nm 时, 分别在频率 f 为 700 THz 和 900 THz 附近处出现了本征色散模式, 如图 3(a) 所示, 而从能带分析的角度来看, 该本征模式即所谓的导带模式。引入金属缺陷相当于是在光子晶体结构中形成共振腔, 当外来的入射电磁频率与该本征模式(由引入缺陷所构成的共振腔决定)频率相吻合时, 就会产生耦合共振, 使得入射波透射率增大, 从而在图 2(b)中出现两个增强透射峰。与缺陷为电介质的

图 2(b)可以看出, 随着缺陷厚度的增大, 长、短波方向上的两个共振峰逐步合拢, 当 $d_c = 50$ nm 时可获得一个通带带宽在 30 nm 左右的平稳滤波波形, 同时还保持约 82% 的高透射率。对这两方面的现象, 可以通过计算该光子晶体的色散、能带曲线来给出相应的物理解释。

情形不同, 当金属中存在自由电荷时, 受外电场的作用, 其中的自由电荷受到极化。随着金属缺陷厚度的增大, 其与上下两电介质界面处的极化电荷的耦合作用会逐渐减弱, 如图 3(b)所示, 当缺陷厚度 d_c 增大到 50 nm, 频率 f 为 780 THz 时, 850 THz 附近出现两个本征模。与图 3(a)相比, 这两个本征模式逐渐靠拢, 从而使得图 2(b)中的两波峰距离减小, 当缺陷厚度为 50 nm 时两个波峰将拟合成具有一定带宽的透射频谱, 这也就是通窄带滤波器形成的原因。当缺陷厚度 d_c 继续增大到 80 nm 时, 电荷之间的耦合作用进一步衰减, 以至于两个本征模式相互独立, 受光子晶体结构对称性的影响, 二者的本征频率最终趋于一致, 从而只有在 $f = 800$ THz 处出现近乎单一的本征色散模, 如图 3(c)所示。另外, 从图 3 还可以看出, 在 $f = 1500$ THz 处出现一条水平色散曲线, 它不随缺陷厚度的改变而改变, 对应波长为 200 nm, 即改变入射角度对 $f = 1500$ THz 处的透射谱线影响不大。

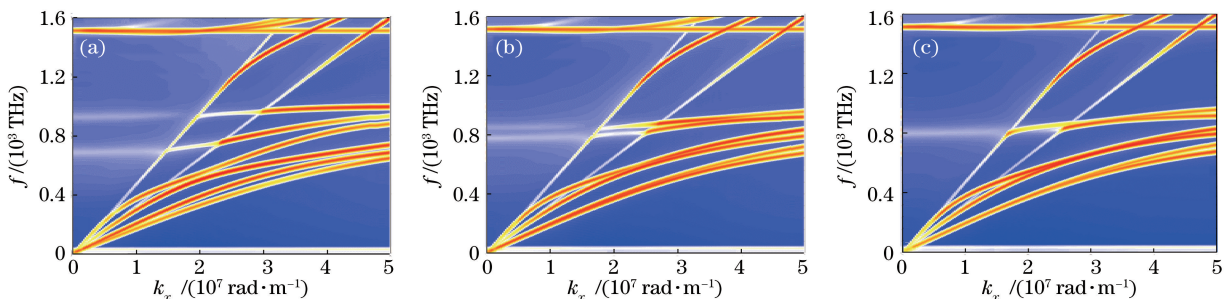


图 3 不同条件下光子晶体的色散曲线。(a) $d_c = 20$ nm; (b) $d_c = 50$ nm; (c) $d_c = 80$ nm

Fig. 3 Dispersion curves of photonic crystal under different conditions. (a) $d_c = 20$ nm; (b) $d_c = 50$ nm; (c) $d_c = 80$ nm

以上讨论均是针对光线正入射的情况,下面对光线斜入射的情形进行研究。当缺陷厚度 $d_c = 50 \text{ nm}$ 时,在不同入射角下光子晶体的透射率曲线如图 4 所示,其中 θ 为入射角。可以看出,在入射角由 0° 增大到 20° 的过程中,该光子晶体结构的透射率曲线几乎重合。结合图 3(b) 的色散曲线分析可知,在 $760 \sim 810 \text{ THz}$ 的频段内,随着 k_x 的变化,色散曲线几乎保持水平分布,表现为图 4 所示该光子晶体入射角小角度变化 ($0^\circ \sim 20^\circ$) 对带通滤波特性的影响甚微。

图 5(a) 所示为 ITO 膜厚度随入射波长的变化关系,其中缺陷厚度 $d_c = 50 \text{ nm}$ 。可以发现,通过增加 ITO 膜的厚度,可以使光子晶体滤波器的带通滤波位置发生红移。选取入射波长 $\lambda_0 = 400 \text{ nm}$,从图 5(a) 中对应虚线处读取数据可知,随 ITO 厚度的增加,入射波透射率曲线呈周期性变化,其周期 $P = 115 \text{ nm}$,如图 5(b) 所示。根据布拉格散射定律有

$$n\lambda_{\text{eff}} = 2d \sin \beta, \quad (2)$$

式中 n 为折射率, β 为散射角, λ_{eff} 为有效波长。令 $\beta = \pi/2$, $\lambda_{\text{eff}} = \lambda_0/n_{\text{ITO}}$, 则可得其周期为

$$P = d = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{2} = \frac{400}{1.73 \times 2} = 115.6 \text{ nm}, \quad (3)$$

仿真结果与理论计算结果完全一致。

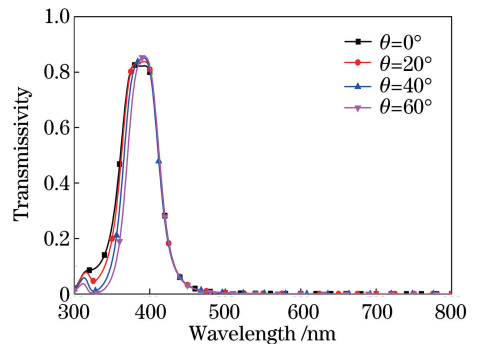


图 4 不同入射角度下光子晶体透射率与入射波长的关系
Fig. 4 Transmissivity of photonic crystal versus incident wavelength under different incident angles

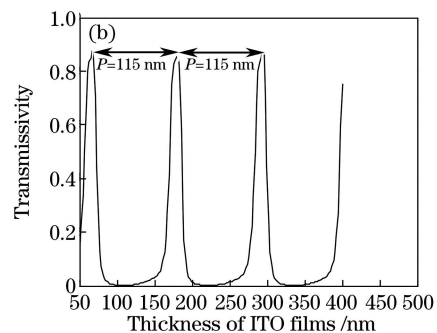
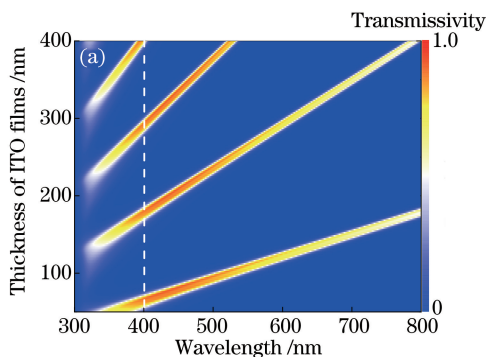


图 5 (a) ITO 膜厚度对光子晶体滤波器透射率的影响; (b) 波长为 400 nm 时透射率与 ITO 膜厚度的关系
Fig. 5 (a) Effect of ITO film thickness on transmissivity of photonic crystal; (b) relationship between transmissivity and ITO film thickness at 400 nm wavelength

4 结 论

采用 FDTD 法对含有金属缺陷的一维光子晶体的滤波特性进行了仿真研究,并计算了与之对应的光子晶体色散曲线,分析了色散机理。改变缺陷厚度不仅可以改变光子晶体透射共振峰的位置,还可以改变其滤波的范围及滤波波形,同时通过能带理论对上述现象作出了初步的解释说明。入射光线在小角度 ($0^\circ \sim 20^\circ$) 变化的情况下,入射角度对滤波器滤波波峰位置的影响甚微,这有利于扩大光子晶体的应用领域。增大 ITO 膜的厚度,光子晶体的透射波峰向长波方向移动,同时该光子晶体滤波性能呈现周期性变化,变化周期为 115 nm ,这与理论计算的结果 (115.6 nm) 相吻合。该研究结果为光子晶

体滤波器的设计和应用提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Joannopoulos J D, Johnson S G, Winn J N, *et al.* Photonic crystals: Molding the flow of light [M]. Princeton: Princeton University Press, 1995: 38-47.
- [2] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. Science, 2007, 24(12): 4729-4749.
- [3] Gu G C, Li H Q. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. Acta Optica Sinica, 2000, 20(6): 728-734.
顾国昌, 李宏强. 一维光子晶体材料中的光学传输特性[J]. 光学学报, 2000, 20(6): 728-734.
- [4] Du B, Zhu J, Mao Y, *et al.* A design method based on photonic crystal theory for Bragg concave diffraction grating [J]. Optics Communications,

- 2017, 385: 92-96.
- [5] Wang B. Plasmon Bragg reflectors and nanocavities on flat metallic surfaces[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(1): 013107.
- [6] David A, Benisty H, Weisbuch C. Photonic crystal light-emitting sources[J]. Reports on Progress in Physics, 2012, 75(12): 1-68.
- [7] Xu Q, Peng C. The properties of two-dimensional photonic crystals bandgap structure with rhombus lattice[J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2014, 125(1): 104-106.
- [8] Wen J H, Zhang Y, Yang Y B, *et al.* Photonic crystal tunable optical filter based on air defect layer[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(8): 0823001.
温建华, 张杨, 杨毅彪, 等. 基于空气缺陷的光子晶体可调谐滤波器[J]. 光子学报, 2015, 44(8): 0823001.
- [9] Wang H S, Han K, Sun W, *et al.* Design and experimental investigation of triple-band metamaterial broadband bandpass filter[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(6): 0623001.
王昊深, 韩奎, 孙威, 等. 三波段超材料宽带带通滤波器的设计及实验研究[J]. 光学学报, 2017, 37(6): 0623001.
- [10] Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 841-844.
- [11] Yablonovitch E. How to be truly photonic [J]. Science, 2000, 289(5479): 557-559.
- [12] Guo H X, Fan J J, Zhao X P. Research progress on photonic crystals and the ways of preparation [J]. Journal of Functional Materials, 2003, 34(1): 5-8.
郭红霞, 范吉军, 赵晓鹏. 光子晶体及其制备方法研究进展[J]. 功能材料, 2003, 34(1): 5-8.
- [13] Xu X S, Xiong Z G, Sun Z H, *et al.* Optical properties of semiconductor quantum-well material using photonic crystal fabricated by micro-fabrication machine [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 55(3): 1248-1252.
许兴胜, 熊志刚, 孙增辉, 等. 半导体量子阱材料微加工光子晶体的光学特性[J]. 物理学报, 2006, 55(3): 1248-1252.
- [14] Markoš P. Photonic crystal with left-handed components[J]. Optics Communications, 2015, 361: 65-72.
- [15] Gu P F, Chen H X, Qin X Y, *et al.* Design of polarization band-pass filters based on the theory of thin-film photonic crystal superlattice [J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(2): 773-776.
顾培夫, 陈海星, 秦小芸, 等. 基于薄膜光子晶体超晶格理论的偏振带通滤波器[J]. 物理学报, 2005, 54(2): 773-776.
- [16] 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 Physica Sinica, 2014, 63(15): 154207.
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.
- [17] Liu J T, Zhou Y S, Wang F H, *et al.* Theory of ultra-narrow bandwidth optical filter consisting of anomalous dispersion photonic crystal [J]. Acta Physica Sinica, 2004, 53(10): 3336-3340.
刘江涛, 周云松, 王福合, 等. 光子晶体反常色散超窄带滤波理论[J]. 物理学报, 2004, 53(10): 3336-3340.
- [18] He J, Song L T, Guo T, *et al.* Optical characteristics of one-dimensional photonic crystals with two element compound defect layers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 031602.
何杰, 宋立涛, 郭涛, 等. 二元复合缺陷对一维光子晶体光学特性的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 031602.
- [19] Chen X F, Jiang M P, Shen X M, *et al.* The defect modes in one-dimensional photonic crystal with multiple defects [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(9): 5709-5712.
陈宪锋, 蒋美萍, 沈小明, 等. 一维多缺陷光子晶体的缺陷模[J]. 物理学报, 2008, 57(9): 5709-5712.
- [20] Liu Q H, Hu D S, Yin X G, *et al.* Defect mode in one-dimensional photonic crystal consisting of single-negative materials with an impurity layer[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(9): 301-306.
刘其海, 胡冬生, 尹小刚, 等. 由单负材料组成的含有缺陷层的一维光子晶体结构中的缺陷模[J]. 物理学报, 2011, 60(9): 301-306.
- [21] Wei J J, Sun A, Tang X F, *et al.* Modulation effect of defect on filter properties of one-dimensional photonic crystal[J]. Infrared & Laser Engineering, 2015, 44(S1): 168-172.
韦吉爵, 苏安, 唐秀福, 等. 缺陷对一维光子晶体滤波性能的调制[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S1): 168-172.
- [22] Liu Y F, Liu B, Chen J, *et al.* Study on filtering characteristics based on tooth-shaped photonic crystal waveguide[J]. Laser Technology, 2016, 40(2): 237-

240.
刘云凤, 刘彬, 陈佳, 等. 光子晶体齿状波导的滤波特性研究[J]. 激光技术, 2016, 40(2): 237-240.
- [23] Wang J Z, Xiong Y Q, Wang D S, *et al.* Filtering characteristics and application of defect mode of one-dimensional photonic crystal[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(10): 2914-2919.
王济洲, 熊玉卿, 王多书, 等. 一维光子晶体缺陷模的滤波特性及应用研究[J]. 光学学报, 2009, 29(10): 2914-2919.
- [24] He Y R, Zhang Y F, Wu J W. Research on defect mode of $(AB)^N ab(BA)^N ba$ one-dimensional crystal [J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(3): 27-29.
何亚融, 张翼飞, 吴建伟. $(AB)^N ab(BA)^N ba$ 型一维光子晶体缺陷模特征研究[J]. 光通信技术, 2017, 41(3): 27-29.
- [25] Wang R, Liang B M, Zhang L C, *et al.* Tunable optical power splitter based on the point defects of two-dimensional photonic crystal [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0123001.
王荣, 梁斌明, 张礼朝, 等. 基于二维光子晶体点缺陷可调谐光功率分配器[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0123001.
- [26] Han P D, Zhang L, Wang C, *et al.* Doped modes of $SiO_2/CdSe$ one-dimensional photonic crystal with $LiTaO_3$ in visible region[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(1): 76-79.
韩培德, 张璐, 王灿, 等. 可见光波段 $SiO_2/CdSe$ 一维光子晶体及缺陷模的研究[J]. 光子学报, 2010, 39(1): 76-79.
- [27] Gavartin E, Braive R, Sagnes I, *et al.* Optomechanical coupling in a two-dimensional photonic crystal defect cavity [J]. Physical Review Letters, 2011, 106(20): 203902.
- [28] Gunyakov V A, Krakhalev M N, Zyryanov V Y, *et al.* Modulation of defect modes intensity by controlled light scattering in photonic crystal with liquid crystal domain structure [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2016, 178: 152-157.
- [29] Barnes W, Dereux A, Ebbesen T. Surface plasmons subwavelength optics[J]. Nature, 2003, 424(6950): 424-830.
- [30] Zong Y X, Xia J B, Wu H B. Photonic band structure and state density of dielectric/dielectric and metal/dielectric photonic crystals [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 031602.
宗易昕, 夏建白, 武海斌. 介质/介质和金属/介质光子晶体的光子能带和光子态密度[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 031602
- [31] Shen H, Wang Z, Wu Y, *et al.* One-dimensional photonic crystals: Fabrication, responsiveness and emerging applications in 3D construction [J]. RSC Advances, 2016, 6(6): 4505-4520.
- [32] Moslemi F, Jamshidi-Chaleh K. Electrically tunable optical bistability based on one-dimensional photonic crystals with nonlinear nanocomposite materials[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(9): 093101.
- [33] Xiao X, Wang W, Li S, *et al.* Investigation of defect modes with Al_2O_3 and TiO_2 in one-dimensional photonic crystals [J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(1): 135-138.
- [34] Deglieredi I, Sipe J E, Vermeulen N. TE-polarized graphene modes sustained by photonic crystal structures[J]. Optics Letters, 2015, 40(9): 2076-2079.
- [35] Luo Z, Chen M, Deng J, *et al.* Low-pass spatial filters with small angle-domain bandwidth based on one-dimensional metamaterial photonic crystals [J]. Optik—International Journal for Light and Electron Optics, 2016, 127(1): 259-262.
- [36] Liu Y, Qi X, Lu Y, *et al.* Observation of beam deflection in one-dimensional photonic lattice in $LiNbO_3$ crystal accompanied with self-focusing and self-defocusing nonlinearities[J]. Physics Letters A, 2016, 380(1/2): 322-325.
- [37] Marković M I, Rakić A D. Determination of optical properties of aluminium including electron reradiation in the Lorentz-Drude model [J]. Optics & Laser Technology, 1990, 22(6): 394-398.
- [38] Wang F, Jordan K D. A Drude-model approach to dispersion interactions in dipole-bound anions [J]. Journal of Chemical Physics, 2001, 114(24): 10717-10724.