

doi:10.3788/gzxb20154408.0823001

基于空气缺陷的光子晶体可调谐滤波器

温建华, 张杨, 杨毅彪, 邓霄, 费宏明, 陈智辉

(太原理工大学 物理与光电工程学院; 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 太原 030024)

摘 要:采用传输矩阵法分别模拟了缺陷层厚度、入射角度和膜厚微扰的变化对含空气缺陷的一维光子晶体滤波特性的影响. 研究表明:对于空气厚度可调结构,在考虑色散的情况下,空气厚度每增加 2 nm 透射波长相应向长波方向移动约 2 nm,二者基本呈 1 : 1 的线性关系;对于入射角度可调结构,与正入射相比较,入射角度从 0°到 89°变化时,其全角度禁带分别减小了 105 nm(TE 模)、600 nm(TM 模),TM 模禁带受角度的变化影响较大;入射角从 0°分别变化到 16.9°(TE 模)、17.0°(TM 模)时实现 C 波段的可调滤波.同一周期内,两种材料的膜厚误差的相互弥补,能够实现小范围的膜厚扰动不敏感,缩小实际滤过峰值与理论值的偏差,可降低制备光子晶体的难度.

关键词:一维光子晶体;传输矩阵法;可调谐光滤波器;膜厚微扰;光子禁带;透射谱

中图分类号:O472.3; O481.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)08-0823001-8

Photonic Crystal Tunable Optical Filter Based on Air Defect Layer

WEN Jian-hua, ZHANG Yang, YANG Yi-biao, DENG Xiao, FEI Hong-ming, CHEN Zhi-hui

(Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education, Department of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024 China)

Abstract: The filtering characteristics of one-dimensional photonic crystal with an air defect layer were investigated using transfer matrix method as the thickness of defect, incident angle and thickness perturbation changing. The studies suggest: For air thickness adjustable structure, considering the dispersion of the materials, the increase of 2 nm for the air thickness makes the transmission peak shift about 2 nm to the long-wave direction, which shows a linear relationship of 1 : 1; For incident angle adjustable structure, compared with the normal incidence, when the incident angle change from 0° to 89°, the omnidirectional photonic bandgap decrease 105 nm (TE mode), 600 nm (TM mode) respectively; which shows that TM mode band gap are greatly influenced by the change of incident angle; it can realize the tunable filter in C band when the incident angle varies from 0° to 16.9° (TE mode) and 17.0° (TM mode) respectively. In the same period, the mutual remedying of thickness error of two materials can realize insensitivity to thickness perturbation in small range, which can narrow the deviation between the actual peaks and theoretical peaks to reduce the difficulty of the fabrication of photonic crystal.

Key words: One-dimensional photonic crystal; Transfer matrix method; Tunable optical filter; Thickness perturbation; Photonic bandgap; Transmittance spectra

OCIS Codes: 230.5298; 160.2598; 160.5293; 050.5298; 350.42380

0 引言

随着社会对信息服务需求的日益增长,大容量、高速率的光纤通信网络得到不断的发展.密集波分复用

(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)技术以其巨大的容量和高效的宽带利用在光纤通信中得到了广泛的应用,同时也对网络安全高效运行的保障提出更高的要求.因此,需要光通道性能检测仪

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61340053, 61307069)、山西省自然科学基金(No. 2013011007-1)和北京邮电大学基金(No. IPOC2013A001)资助

第一作者:温建华(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为一维光子晶体能带特性. Email: wjhforever1990@163.com

导师(通讯作者):杨毅彪(1967-),男,教授,博士,主要研究方向为光子晶体能带结构及在光电器件中的应用. Email: yangyibiao_tyut@sohu.com

收稿日期:2015-04-28; **录用日期:**2015-06-17

<http://www.photon.ac.cn>

(Optical Performance Monitor, OPM)对光网络性能进行检测与实时分析. 目前, 针对 OPM 的研究主要集中在对光色散、光信噪比、极化模色散的监测和补偿等方面^[1-3], 而对器件中的滤波器却研究甚少. OPM 模块中广泛采用衍射光栅作为光滤波器^[4], 这需要同时有若干个探测器去探测各衍射波长; 然而对于通道数目较多的系统(如光通信 C 波段 50GHz 间隔有 80 个通道), 如果采用可调谐光滤波器(Tunable Optical Filter, TOF)代替传统的衍射光栅可以大大减少探测器的数目, 从而减小 OPM 模块的体积和成本. 另外, TOF 作为核心的光学器件, 其体积的微量化也是近年来研究的热点之一^[5-7]. 光子晶体^[8-12]因其光损耗低, 尺寸小, 适合制作微型集成光器件, 特别适合 DWDM 系统中 OPM 高分辨滤波. 光子晶体中引入缺陷, 禁带中出现窄带透射窗口, 随着缺陷震荡空间增加, 缺陷态共振频率会发生移动, 能够实现可调谐滤波; 通过磁光^[13]、电光^[14-15]和热光效应^[16]等改变介质材料的光学参量实现光子晶体可调谐滤波已成为研究人员关注的课题. 但是在光子晶体中引入磁光或电光材料作为缺陷层, 并利用外加磁场、电场和热场改变材料的光学参量实现滤波的方法存在着调谐线性较差、可控性较差、透射峰宽、调谐范围窄等缺点, 而透射峰移动时不能保持半高宽稳定. 此外, 人们对滤波器大禁带和超窄带滤波等的追求往往使得滤波器结构更加复杂, 并且大多不考虑材料色散效应^[17], 对实际的制备工艺要求很高. 因此, 制备体积微小、调谐简便、结构简单的超窄带 TOF 是未来发展的趋势.

本文基于光子晶体的光子禁带和光子局域特性设计了一种工作在近红外波段含空气缺陷层的 TOF 结构 $(\text{CaF}_2/\text{Si})_n/\text{Air}/(\text{CaF}_2/\text{Si})_n$. 含空气缺陷层的光子晶体结构可以采用微机械技术调节两侧周期性光子晶体结构的距离, 实现对空气厚度的调节, 这种方式不破坏光子晶体结构, 还具有调节范围宽、连续可调、调节速率快等优点^[18-19]. 通过改变缺陷层的厚度和入射角度两种方式实现了可调滤波, 解决了利用外场作用实现可调谐滤波中可控性较差、透射峰宽、调谐范围窄等问题. 运用传输矩阵法对两种调谐方式的滤波特性进行了分析, 对比了两种模式(TE、TM 模)下的滤波特性, 最后研究了介质膜层厚度扰动对滤波器光学特性的影响.

1 结构模型和计算方法

所设计的含空气缺陷的一维光子晶体滤波器结构为 $(\text{CaF}_2/\text{Si})_n/\text{Air}/(\text{CaF}_2/\text{Si})_n$, 如图 1. 图中 L 和 H 分别代表低折射率材料 CaF_2 (折射率为 1.4260) 和高折射率材料 Si (折射率为 3.4779), 二者在 z 方向呈周期性排列, 层厚度分别为 d_1 和 d_2 , 对应的取值为 272 nm

和 111 nm, D 代表空气缺陷层, 折射率为 1, 其层厚度为 d_3 . 为了使光子晶体的光子禁带落在近红外波段, 在计算时取晶格常量 $a = d_1 + d_2 = 383$ nm; 而对于两种介质材料的选择则充分考虑了所选的 CaF_2 和 Si 在毫米级具有较好的透过率^[20-21]. 本文讨论的结构可分为两类, 即厚度可调滤波器和旋转可调滤波器, 光均从左侧射入, 滤过波从右侧射出.

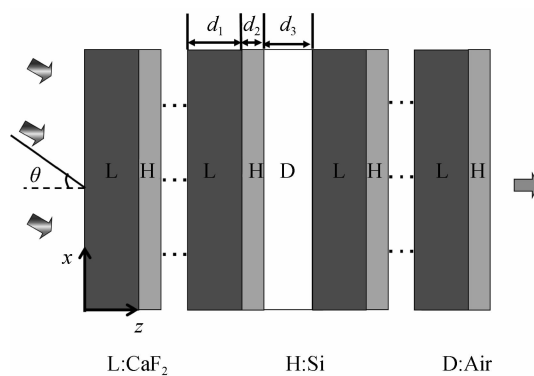


图 1 一维光子晶体滤波器结构

Fig. 1 The structure of the one-dimensional photonic crystal filter

利用传输矩阵法^[22]模拟计算了 TE 和 TM 两种偏振模式下含缺陷的一维光子晶体结构的透射率. 当平面波入射到光子晶体中, 光波经过逐层传播后在反射区与透射区相干叠加形成反射光和透射光. 由于入射光的偏振特性与入射时的角度有关, 因此光波在 TE 模式和 TM 模式下的传输矩阵是不同的. TE 模式下, 光波在每一个层界面处均发生反射和折射, 对于每一层的电磁波都是前一个界面上的透射波与后一个界面上的反射波相叠加的结果, 同时根据电磁场强度的切向分量在分界面处连续可得到光子晶体中任意第 j 层的传输矩阵为

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}$$

式中 $\delta_j = k_0 n_j d_j \cos \theta_j$, $\eta_j = \sqrt{\epsilon_j / \mu_j} \cos \theta_j$ (TE 模式), $\eta_j = \sqrt{\mu_j / \epsilon_j} \cos \theta_j$ (TM 模式); k_0 是真空中波矢, n_j 、 d_j 、 θ_j 、 η_j 、 ϵ_j 、 μ_j 分别是第 j 层介质的折射率、厚度、入射角度、光学导纳、介电常量和磁导率. 所以 N 个周期下的传输矩阵表达式为

$$M = \prod_{j=1}^N M_j = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$$

带入相应的参量, 得出透射系数 t 的表达式为

$$t = \frac{2\eta_c}{(m_{11} + m_{12}\eta_c)\eta_c + (m_{21} + m_{22}\eta_c)}$$

透射率的表达式为

$$T = \frac{\eta_c}{\eta_c} t t^*$$

η_c 、 η_c 为光子晶体左右两侧介质的光学导纳, 在本文中

光子晶体的左右两侧介质都是空气.

2 结果与讨论

2.1 滤波器的透射谱

光垂直入射到晶体表面,结构中的周期数 n 分别取 4、5、6,空气厚度 d_3 取值为 388.3 nm 时的透射谱如图 2.

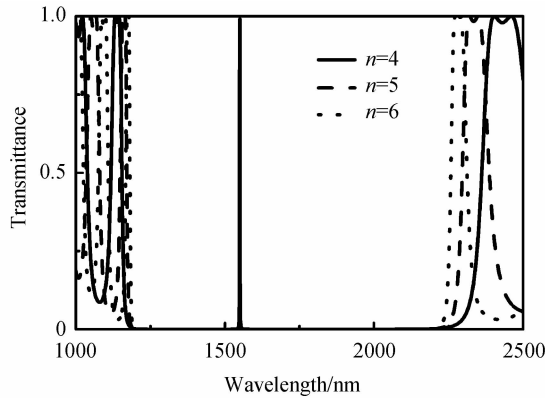


图 2 周期数 n 分别为 4、5、6,空气层厚度 d_3 取 388.3 nm 时滤波器的透射谱
Fig. 2 Transmittance spectra of the filter with thickness of 388.3 nm for the air layer when cycles n is 4, 5, and 6 respectively

从图中可看出,各周期数 n 下透射峰值波长均处于 1 550 nm,透过率接近 1,禁带宽度介于 1 200~

2 200 nm 之间,覆盖了光通信 S、C、L 波段,所以该结构可以有效避免滤波器在工作时的杂波混入.同时,从图中还可以看出,周期数 n 在一定程度上取值越大,禁带边缘的截止度相对越好.

2.2 空气厚度可调滤波器

从图 1 可知,所设计的光子晶体滤波器 $(\text{CaF}_2/\text{Si})_n/\text{Air}/(\text{CaF}_2/\text{Si})_n$ 实际是由两个完全相同的子光子晶体 $(\text{CaF}_2/\text{Si})_n$ 和夹在二者之间的空气层组成,将其中一个子光子晶体固定在超微线性马达的定子上,另一个子光子晶体固定在转子上,通过转子在定子上的滑动来改变两个一维子光子晶体间空气层的厚度,可以实现空气厚度可调的滤波器功能.

采用传输矩阵法模拟计算了滤波器在光正入射下近红外波段的透射率情况,如图 3 中(a)、(b)、(c).在实际应用时存在材料色散效应,虽然 CaF_2 、 Si 两种材料的折射率在 C 波段随波长的变化不大,但是这些微小的变化,会使透射峰的位置发生偏移,所以在模拟过程中将材料色散考虑在内,随波长变化的折射率值取自 Ref. [23](波长从 1 530 nm~1 565 nm 变化时, CaF_2 的折射率由 1.426 1 变化到 1.426 0, Si 的折射率由 3.479 4 变化到 3.476 5).由于 TE 模式和 TM 模式在光正入射时的透射结果相同,故图中只显示了 TM 模式下的透射谱.图 3(a)、(b)、(c) 分别是结构周期数 n 分别为 4、5、6 时空气层厚度从 372.3 nm 到

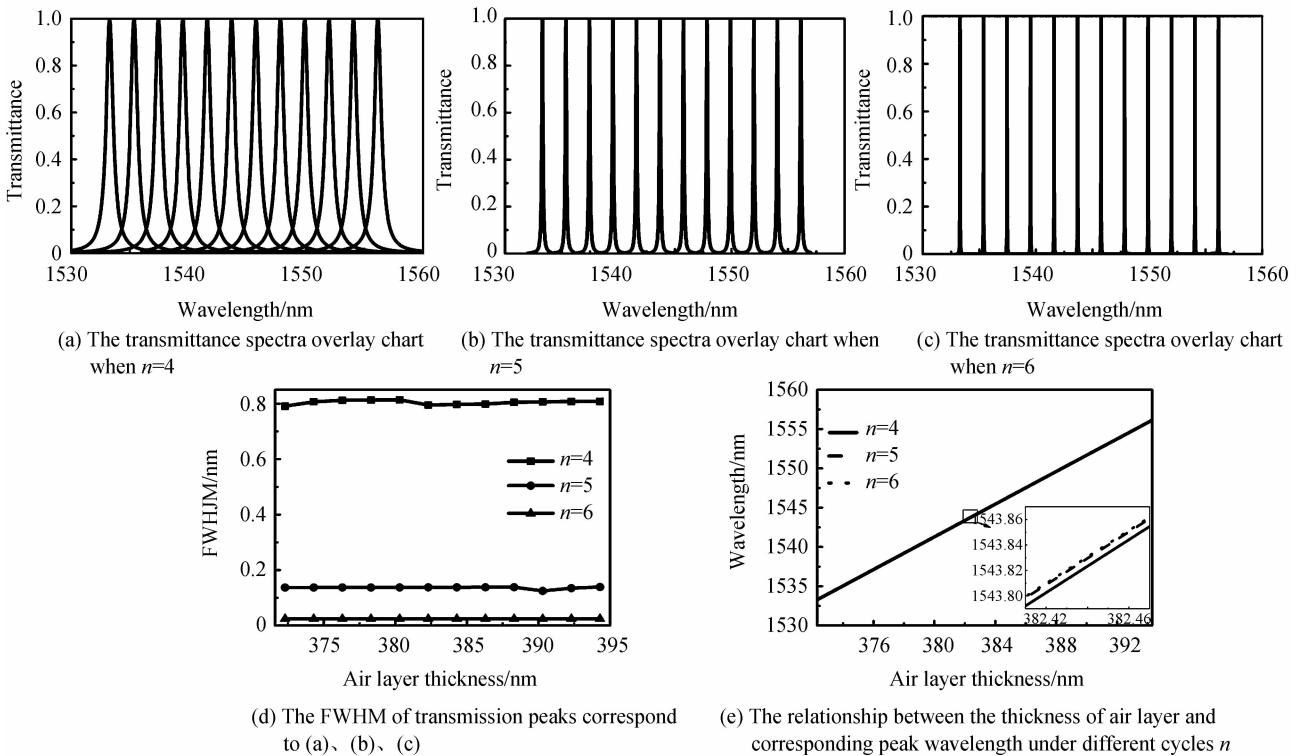


图 3 空气层厚度从 372.3 nm 到 394.3 nm 每变化 2 nm 时,结构的滤波特性
Fig. 3 The filtering characteristics of structure with the thickness of air layer changing every two nanometers from 372.3 nm to 394.3 nm

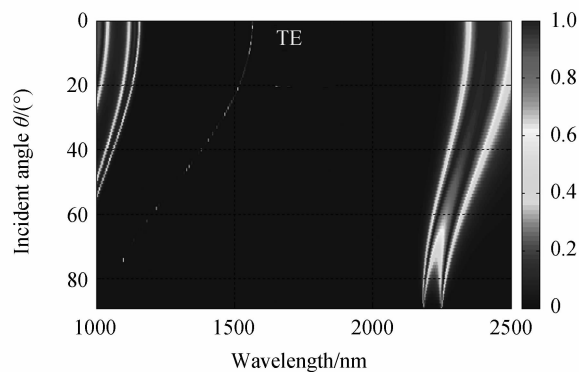
394.3 nm每变化 2 nm 时的 TM 模的透射谱叠加图. 从图中可以看出, 对于每一个周期数下, 随着空气层厚度的增加, 透射波长均匀的增大, 且空气层厚度每增加 2 nm, 透射峰也相应向右移动约 2 nm. 当 n 为 4 时, 透射峰波长从 1 533.75 nm 移动到 1 556.03 nm; n 为 5 时, 透射峰波长从 1 533.76 nm 移动到 1 556.03 nm; n 为 6 时, 透射峰波长从 1 533.77 nm 移动到 1 556.03 nm. 图 3(d) 为对应 (a)、(b)、(c) 中不同周期数下各透射峰的半高宽值, 从图中可以看出, 三条线基本水平, 同一周期数下的滤过峰带宽均匀, 在 4、5 和 6 的周期数下, 其平均半高宽分别为 0.8 nm, 0.14 nm 和 0.024 nm, 该结果完全符合 DWDM 对于波长间隔 (0.2~1.2 nm 左右) 的要求, 可适用于不同信道间隔的波分复用系统. 图 3(e) 为 (a)、(b)、(c) 中不同周期数下透射峰中心波长与不同空气层厚度的变化关系. 可以看出, 当厚度增加 2 nm, 透射峰也向右移动 2 nm, 空气层厚度的变化与透射峰位置的移动基本符合 1:1 的线性关系. 所设计的滤波器具有良好的滤波特性以及优异的可控性.

2.3 旋转可调滤波器

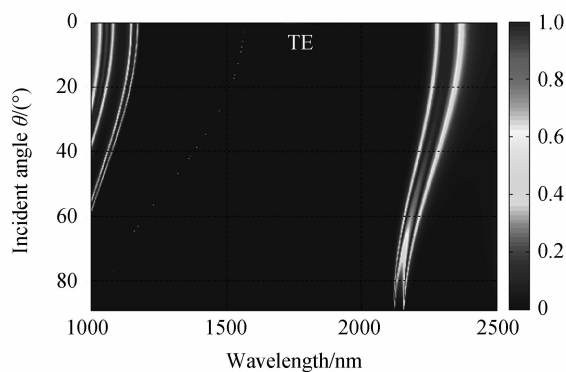
固定空气缺陷层厚度不变, 在光子晶体底部 (XZ 平面) 连接用于承载和调控的旋转驱动装置, 以 y 方向作为旋转轴转动滤波器, 从而达到入射角可调的目的.

为了使最终调谐范围能够覆盖光通信 C 波段, 本结构的空气层厚度取 403 nm. 同样采用传输矩阵法计算了不同周期数下的入射角度与透射峰波长的关系, 结果如图 4 (与图 2 一致, 横轴波长均为 1 000 nm 到 2 500 nm).

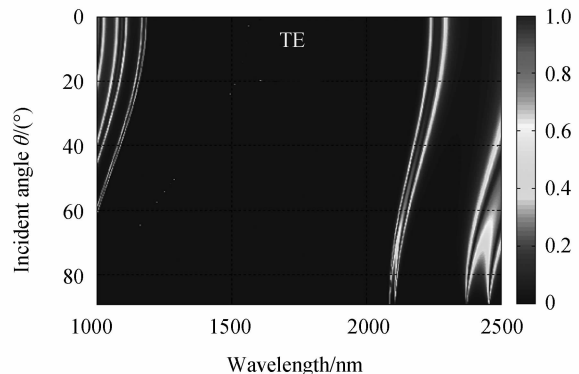
图 4(a)、(b)、(c) 分别是 TE 模式下入射角从 0° 变化到 89° , 周期数 n 为 4、5、6 时的透射谱; (d)、(e)、(f) 分别是 TM 模式下入射角从 0° 变化到 89° , 周期数 n 为 4、5、6 时的透射谱. 从图 4 中可以看出, 对于 TE 模式, 随着入射角度的增大, 光子禁带边缘向短波方向移动, 但是光子禁带的范围没有发生明显的改变; 周期数为 4、5、6 的透射峰均从 1 565 nm 移动到 1 019 nm, 三者共同的全角度禁带为 1 200 nm~2 095 nm, 与正入射时相比较, 禁带减小了 105 nm; 对于 TM 模式, 随着入射角度的增大, 光子禁带边缘向短波方向移动, 光子禁带范围急剧的减小, 与 TE 模光子禁带有明显的区别; $n=4$ 的透射峰从 1 565 nm 移动到 1 093 nm; $n=5$ 的透射峰从 1 565 nm 移动到 1 099 nm; $n=6$ 的透射峰从 1 565 nm 移动到 1 102 nm, 其中三者共同的全角度禁带为 1 200 nm~1 600 nm, 与正入射时相比较, 禁带减小了 600 nm, 远大于 TE 模光子禁带的变化. 显然, TE 模禁带的移动较 TM 模对入射角度不敏感, 而 TM 模式的全角度禁带比 TE 模式小, 因此 TM 模式作为角度可调滤波器较 TE 模有更大的局限性, 但并不影响 C



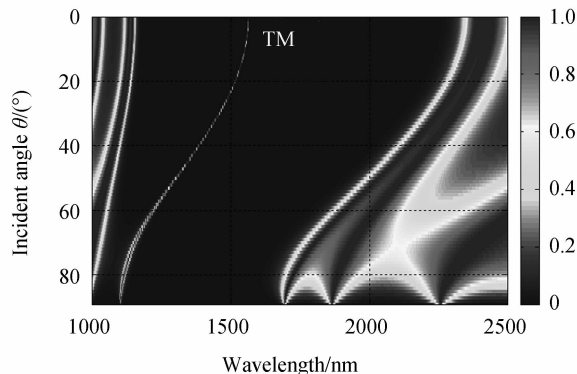
(a) The transmittance spectra with incident angle varies from 0° to 89° of TE mode when $n=4$



(b) The transmittance spectra of TE mode when $n=5$



(c) The transmittance spectra of TE mode when $n=6$



(d) The transmittance spectra with incident angle varies from 0° to 89° for TM mode when $n=6$

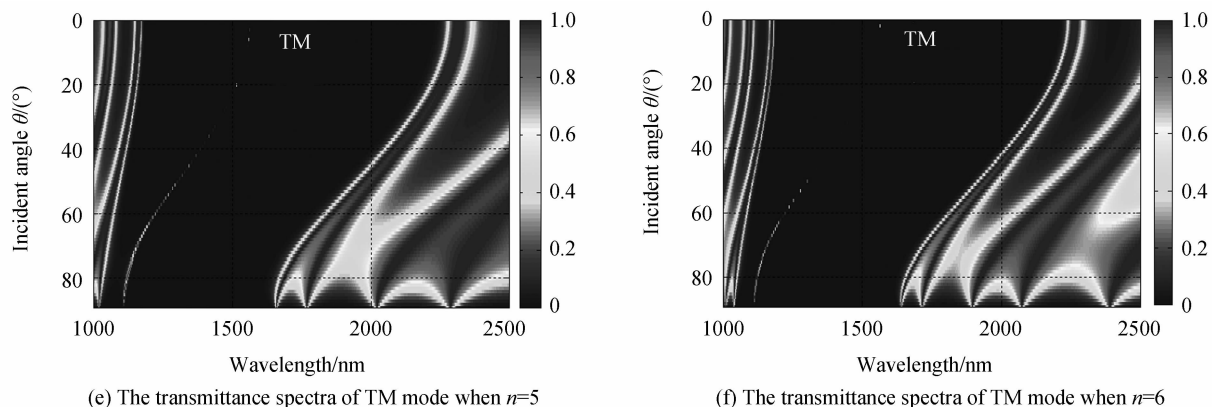


图4 周期数 n 分别为 4、5、6 时,入射角从 0° 变化到 89° 时的透射谱

Fig. 4 The transmittance spectra with incident angle varies from 0° to 89° when cycles n is 4, 5 and 6 respectively

波段的滤波。

图 5(a)、(b)、(c) 分别是 TE 模式下入射角从 0°

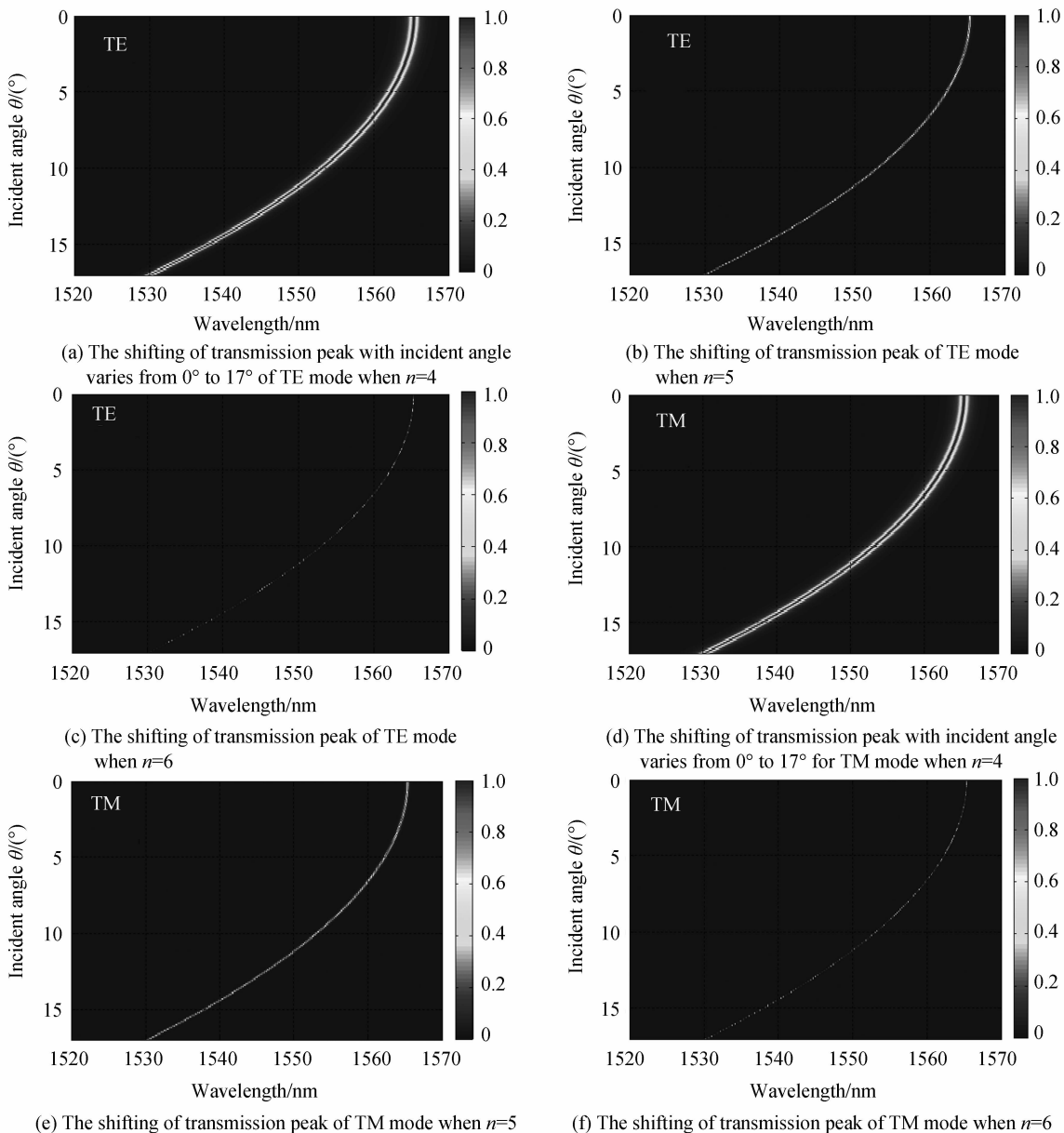


图 5 周期数 n 分别为 4、5、6 时,入射角从 0° 变化到 17° 时透射峰的移动

Fig. 5 The shifting of transmission peak with incident angle varies from 0° to 17° when cycles n is 4, 5 and 6 respectively

变化到 17° , 周期数 n 为 4、5、6 时透射峰的移动; 图 (d)、(e)、(f) 分别是 TM 模式下入射角从 0° 变化到 17° , 周期数 n 为 4、5、6 时透射峰的移动. 从图 5 中可以看出光子晶体的禁带范围覆盖了整个 C 波段, 当入射角从 0° 增加到 16.9° (TE 模) 和 17.0° (TM 模) 时, 透射峰从 1565 nm 移动到 1530 nm , 实现光通信 C 波段的可调谐滤波. 随着周期数从 4 增加至 6, 透射率在降低, 滤波器的透射率逐渐降低, 其原因是由于随着空气缺陷层两边的周期数增多, 缺陷层破坏光子晶体周期性的作用相对减弱, 使得缺陷态密度降低, 导致透射率的减小.

图 6(a)~(c) 为不同周期数下两种模式在入射角为 12° 时透射峰的比较. 可以看出, $n=4$ 的 TE 模和 TM 模的透射峰基本重合, $n=5$ 的 TE 模和 TM 模的透射峰峰值波长差为 0.02 nm , 而 $n=6$ 时的 TE 模和 TM 模的透射峰已经完全分离. 另外, 在相同入射角度下, 周期数越大透射峰越窄, 从而导致两峰分离越快.

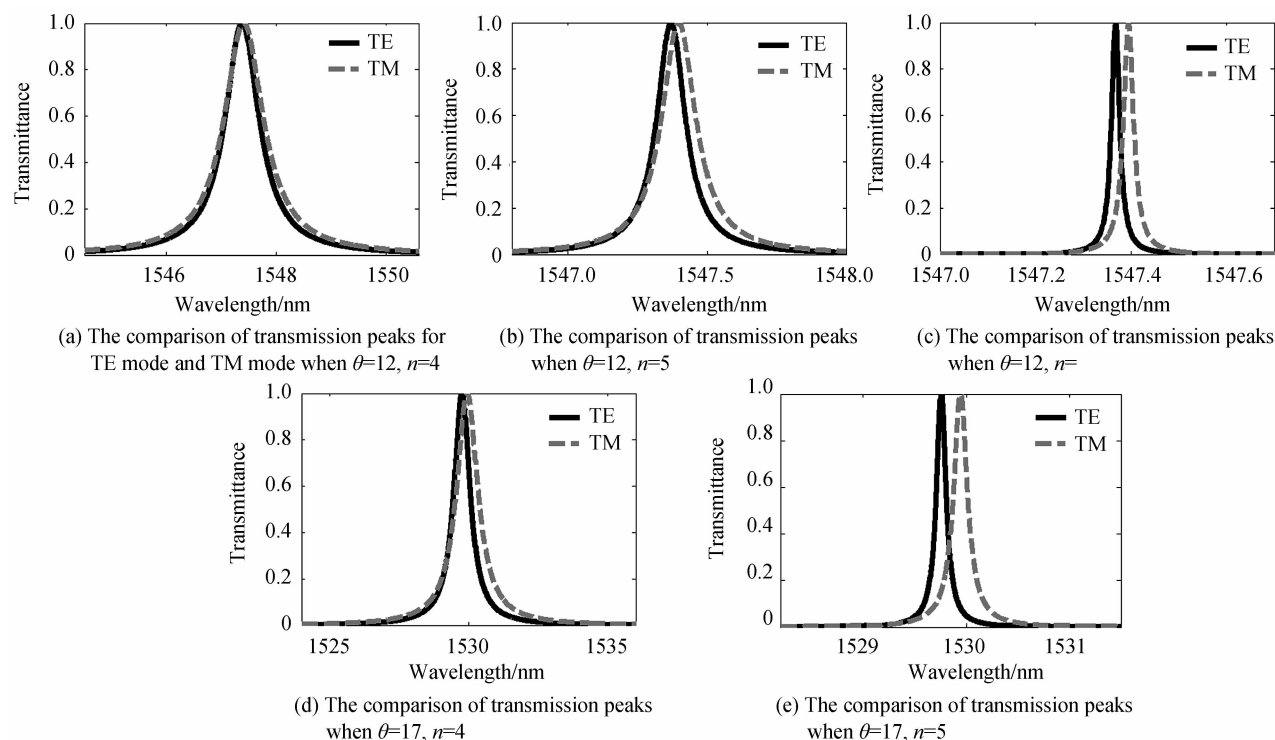


图 6 入射角分别为 12° 和 17° 时, 不同周期数下 TE、TM 两种模式透射峰的比较

Fig. 6 The comparison of transmission peaks for TE mode and TM mode under different cycles n when incident angle is 12° and 17° respectively

2.4 膜厚微扰对透射率的影响

考虑到在光子晶体的实验制备过程中, 每层膜的厚度可能会发生微小的变化, 所以对所设计滤波器结构的抗微扰性能进行了初步研究, 结果如图 7. 计算时设定空气层厚度为 388.3 nm , Si 层与 CaF_2 层的膜厚微扰范围取 $-0.2 \sim +0.2\text{ nm}$ ^[24-25]. 从图 7 中可以看出, 随着周期数从 4 增加至 6, 较高透射率范围依次变窄. 当 $n=4$ 时, 两种介质材料膜层厚度的允许误差在

图 6(d) 和 (e) 是入射角为 17° 时, n 分别取 4 和 5 的两种模式透射峰的比较, 可以看出, $n=4$ 的 TE 模和 TM 模透射峰的峰值波长差为 0.18 nm , 相对于其 0.8 nm 的半高宽几乎没有分开, 二者共同完成了 C 波段的滤波; 而当 $n=5$ 时, 其 TE 模和 TM 模的透射峰已经分离. 对比数据说明, 当光子晶体周期数目较大的时候, 在低入射角度时就可以实现 TE、TM 模的分离; 但光子晶体周期数目小的时候, 选取较高的入射角度时可实现 TE、TM 模的分离; 若对普通光实现角度可调谐滤波, 需要选择较低周期数的光子晶体结构, 同时入射角度也不能过大; 若实现 TE、TM 两种模式的滤波, 就选取光子晶体周期数目较大和入射角度较高结构; 这样的结构虽然与厚度可调谐滤波相比具有一定的局限性, 但是通过旋转方式改变入射角度相比改变空气厚度要更加方便和准确, 因此角度可调滤波器更适合应用于偏振光的传输.

$\pm 0.15\text{ nm}$ 之间时可以保证透射率在 0.5 以上; $n=5$ 时, 材料膜厚误差在 $\pm 0.05\text{ nm}$ 之间才能保证器件具有良好的透过率; 而当 $n=6$ 时较高透射率的范围则变得非常窄, 整个宽度不足 0.01 nm . 结果表明, 光子晶体的周期数越大, 在实验上的制备难度也会相应提高, 但从图中 Si 层与 CaF_2 层厚度的增加量对透射率的影响关系可以看出, 当 Si 层和 CaF_2 层以相似幅度的一增一减时, 滤波器具有较高透射率. 这样在相同周期

内,两种材料厚度误差的相互弥补可以实现小范围的膜厚扰动不敏感,缩小实际滤过峰值与理论值的偏差,在一定程度上,可降低制备光子晶体的难度.此外周期

数越大对实验制备准确度要求越高,因此尽可能降低光子晶体结构周期数,减小膜层总数可以提高制备成功率.

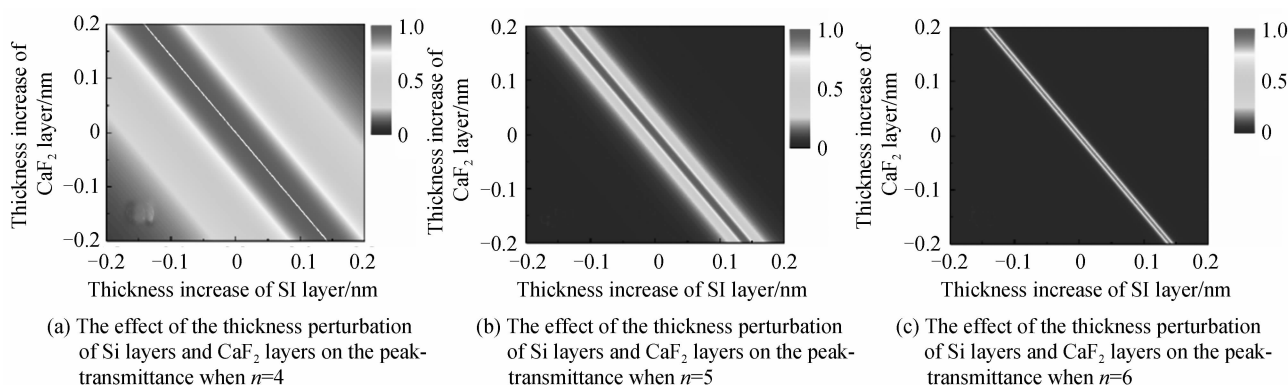


图7 Si层与CaF₂层厚度微扰对峰值透射率的影响

Fig. 7 The effect of the thickness perturbation of Si layers and CaF₂ layers on the peak-transmittance

3 结论

利用传输矩阵法计算了(CaF₂/Si)_n/Air/(CaF₂/Si)_n结构的一维光子晶体可调谐光滤波器分别在空气厚度和入射角度两种调谐方式下的透射率.结果表明:对于正入射下的空气厚度可调结构,波长的移动距离与空气厚度的增加量基本相等,符合1:1的线性关系,TE模式和TM模式在任何缺陷厚度下都重合,该方式适用于各种形式的传输光;对于斜入射下的入射角度可调结构,当入射角度从0°变化到16.9°(TE模)和17.0°(TM模)时可以完成C波段的可调滤波,由于TE模式和TM模式移动不同步,当入射角大于一定角度时二者将完全分开.这种结构虽然对于普通光的调谐具有局限性,但其调谐方式更为简便,更适用于偏振光的传输.此外对滤波器膜层厚度的扰动与透射率的相互关系做了分析,结果表明,该光子晶体结构中Si层与CaF₂层厚度的增加量对透射率的影响是线性的,即在相同周期内,通过两种材料厚度误差的相互弥补,能够小范围地实现膜厚扰动不敏感,缩小实际滤过峰值与理论值的偏差,在某种程度上可以降低制备工艺的难度.所设计的滤波器结构简单,调谐简便,滤波带窄,便于制备,在DWDM系统中对滤波器滤波性能的提高有潜在应用.

参考文献

- [1] KOZICKI B, MARUTA A, KITAYAMA K. Experimental demonstration of optical performance monitoring for RZ-DPSK signals using delay-tap sampling method[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(6): 3566-3576.
- [2] SHEN T S R, LAU A P T, YU C Y. Simultaneous and independent multi-parameter monitoring with fault localization for DSP-based coherent communication systems[J]. *Optics Express*, 2010, **18**(23): 23608-23619.
- [3] HOU L X, SHI Q, LU Y M, *et al.* Adaptive fibre nonlinearity precompensation based on optical performance monitoring in coherent optical OFDM transmission systems [J]. *Optik*, 2013, **124**(1): 71-73.
- [4] HE Jun, YANG Ming, LIU Ming-rui, *et al.* In-line optical performance monitors for DWDM systems [J]. *Study on Optical Communications*, 2006, **32**(1): 48-51.
何俊, 杨明, 刘明睿, 等. DWDM系统光通道性能在线监控模块[J]. *光通信研究*, 2006, **32**(1): 48-51.
- [5] ROSTAMI A, HADDADPOUR A, NAZARI F, *et al.* Proposal for an ultracompact? tunable? wavelength-division-multiplexing optical filter based on quasi-2D photonic crystals [J]. *Journal of Optics*, 2010, **12**(1): 015405.
- [6] ZHANG Huai-dong, MUHAMMAD A, LUO Jun, *et al.* Electrically tunable infrared filter based on the liquid crystal Fabry-Perot structure for spectral imaging detection [J]. *Applied Optics*, 2014, **53**(25): 5632-5639.
- [7] NIYAZI M, AMIRKHANI A, MOSAVI M R. Investigation and simulation of a two-channel drop filter with tunable double optical resonators [J]. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2014, **27**: 827-834.
- [8] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric snperlattices[J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(23): 2486-2489.
- [9] YABLONVITCH E. Inhibited spontaneons emission in solid-state physics and electronics [J]. *Physical Review Letters*, 1987, **58**(20): 2059-2062.
- [10] SHEN Yi-chen, YE De-xin, CELANOVIC I, *et al.* Optical broadband angular selectivity[J]. *Science*, 2014, **343**(6178): 1499-1501.
- [11] ZHANG Juan. The maximum photonic bandgap extension of omni-directional reflectors based on cascaded one-dimensional photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(10): 1023001.
张娟. 级联一维光子晶体全方位反射器的带宽最大化[J]. *光子学报*, 2014, **43**(10): 1023001.
- [12] WANG Jing-jing, OUYANG Zheng-biao, WEN Guo-hua, *et al.* 2D square-lattice photonic crystal based on circular-ring cylinders and thin cross plates suitable for optical integrated circuits[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 0423002.
王晶晶, 欧阳征标, 文国华, 等. 圆环杆与平板连杆的适合光路集成的二维正方晶格光子晶体[J]. *光子学报*, 2015, **44**(4): 0423002.
- [13] WANG Hong, WANG Guang-jun, HAN Yan-ling, *et al.* Tunable double-channel filter based on defect mode splitting

- of one-dimensional magnetic photonic crystal[J]. *Optics Communications*, 2012, **285**(s21-22): 4558-4561.
- [14] WANG H T, TIMOFEEV I V, CHANG K, *et al.* Tunable narrow-bandpass filter based on an asymmetric photonic bandgap structure with a dual-mode liquid crystal[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(12): 15097-15103.
- [15] LU Hui-hui, BAIDA F I, ULLIAC G, *et al.* Lithium niobate photonic crystal wire cavity: Realization of a compact electro-optically tunable filter[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(15): 151117.
- [16] EXNER A T, PAVLICHENKO I, LOTSCH B V, *et al.* Low-cost thermo-optic imaging sensors: a detection principle based on tunable one-dimensional photonic crystals[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, **5**(5): 1575-1582.
- [17] CHEN Wei-dong, DONG Xin-yu, CHEN Ying, *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.
- [18] LIU Qi-neng. Theoretical study of multi-channel polarization tunable filter of photonic crystal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(2): 305-309.
刘启能. 光子晶体多通道可调谐偏振滤波器的理论研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(2): 305-309.
- [19] SHU Jing. An air-slot cavity based on width-modulated line defect photonic crystal slab[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(4): 442-445.
疏静. 基于宽度可调节的线缺陷平板型光子晶体的空气槽微腔[J]. *光子学报*, 2012, **41**(4): 442-445.
- [20] XU J Q, FAN H Q, LIU W G, *et al.* Large-area uniform hydrogen-free diamond-like carbon films prepared by unbalanced magnetron sputtering for infrared anti-reflection coatings[J]. *Diamond and Related Materials*, 2008, **17**(2): 194-198.
- [21] XU Jia-yue, SHI Min-li, LU Bao-liang, *et al.* Bridgman growth and characterization of calcium fluoride crystals[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2006, **292**: 391-394.
- [22] PENDRY J B, MACKINNOND A. Calculation of photon dispersion relations[J]. *Physical Review Letters*, 1992, **69**(19): 2772-2775.
- [23] WEBER M J. Handbook of optical materials section 1: crystalline materials[M]. America: The CRC Press. 2002: p77, p84.
- [24] ZAMANI M, GHANAATSHOAR M, ALISAF AEE H. Compact one-dimensional magnetophotonic crystals with simultaneous large Faraday rotation and high transmittance[J]. *Journal of Modern Optics*, 2012, **59**(2): 126-130.
- [25] ZAMANI M, GHANAATSHOAR M. Adjustable magneto-optical isolators with flat-top responses[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(22): 24524-24535.