

基于一维光子晶体理论的平顶偏振滤波器设计

张娟 于帅 郭森 李雪

(上海大学通信与信息工程学院特种光纤与光接入网省部共建教育部重点实验室, 上海 200072)

摘要 基于一维光子晶体理论,提出了一种级联薄膜玻璃腔结构的平顶偏振滤波器。给出了具体的设计实例,透射窗口处 P 偏振光的透射率的最小值大于 99.6%,S 偏振光的透射率最大在 0.1%左右,且 P 偏振光的各透射窗口的中心频率符合国际电信联盟(ITU)标准。在此基础上,系统研究了该结构各介质膜层参数(包括固体介质腔)以及入射角对透射谱性能,如矩形度、占空比和频率间隔等的影响。该滤波器不但结构简单,易于实现,且在高透射 P 偏振光的同时能很好地截止 S 偏振光,在波分复用系统中有一定的应用价值。

关键词 光纤通信;一维光子晶体;密集波分复用;偏振;滤波器;平顶

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0105005

Design of Flat-Top Polarization Filters Based on One-Dimensional Photonic Crystal Theory

Zhang Juan Yu Shuai Guo Sen Li Xue

(Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks,

School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract Based on the theory of one-dimensional photonic crystal (1DPC), a flat-top polarization filter composed of cascaded thin-film glass cavities is proposed. A detailed design example is also given. The value of transmittance of P polarized light at transmittance window is higher than 99.6% and the maximum value of transmittance of S polarized light is about 0.1%. The center-frequency of transmittance windows for P polarized light accords with the ITU standard. On this basis, the influence of structural parameters of each reflecting film (including glass cavity) and incident angle on spectral performance such as rectangle degree, duty cycle and frequency spacing are investigated systematically. The proposed filter structure not only is very simple and easy to accomplish but also has high transmittance for P polarized light and good cut-off characteristic for S polarized light. It will have some applications in wavelength division multiplexing systems.

Key words fiber communications; one-dimensional photonic crystal; dense wavelength-division multiplexing; polarization; optical filter; flat-top

OCIS codes 060.2330; 230.5298; 230.7408

1 引言

波分复用技术是满足人们带宽需求和提高通信容量的一种有效解决方法,而滤波技术在波分复用中有着举足轻重的作用^[1~3]。由于一维光子晶体(1DPC)具有结构简单、可靠性好、便于集成和插入损耗小等优点,近年来利用一维光子晶体结构实现光信号的滤波功能越来越引起人们的关注^[4~11]。不过,基

于一维光子晶体理论设计的偏振滤波器报道的较少。偏振滤波器在波分复用系统中对偏振模色散补偿等起着重要作用,其光谱特性要求透射的偏振光有较高的透射率,对截止的偏振分量有较高的隔离度,且两种偏振分量的透射带彼此分离。在目前报道的几种基于一维光子晶体理论的偏振滤波器中,均是透射 P 偏振分量而反射 S 偏振分量。顾培夫等^[12]基于光子

收稿日期: 2010-04-09; **收到修改稿日期**: 2010-05-19

基金项目: 国家自然科学基金(10804070)、上海市教委科研创新项目(09YZ06)和上海市重点学科和科委重点实验室项目(S30108,08DZ2231100)资助课题。

作者简介: 张娟(1976—),女,博士,副教授,主要从事光通信无源器件、光信号处理、光子晶体和晶体光学等方面的研究。E-mail: juanzhang@staff.shu.edu.cn

晶体超晶格理论设计了少数几个平顶偏振透射峰的滤波器,其结构至少需要 120 层薄膜。刘启能^[13]设计了可调谐的三通道尖顶偏振滤波器,但其对所要隔离的 S 偏振光仍有 30% 以上的透射率。张文富等^[14]基于一维光子晶体异质结构设计了单个平顶的偏振带通滤波器,其至少也需要 60 层薄膜来实现。目前能够应用于密集波分复用(DWDM)的较小频率间隔的平顶偏振滤波器还罕见相关报道。

本文基于一维光子晶体理论,提出了一种级联薄膜玻璃腔结构的平顶偏振滤波器。该滤波器只需 18 层光学薄膜和 3 层玻璃介质,即可在高透射 P 偏振光的同时很好地截止 S 偏振光。给出了具体的设计实例,P 偏振光的透射率在 99.6% 以上,S 偏振光的透射率最大在 0.1% 左右,且 P 偏振光的各透射窗口的中心频率符合国际电信联盟(ITU)标准。在此基础上,研究了该结构各介质膜层参数(包括固体介质腔)以及入射角对 P 偏振光透射谱性能,如矩形度、占空比和频率间隔等的影响。

2 模型及原理

一维光子晶体模型结构为 $A(BA)^{10}$,其中 A,B 是折射率不同的两种光学薄膜,其光学厚度为 $\lambda_0/4$ (λ_0 为禁带的中心波长, $\lambda_0=1550$ nm)。取薄膜 A 的折射率为 $n_a=1.30$ (氟化钠),薄膜 B 的折射率为

$n_b=3.23$ (砷化镓)。按照传输矩阵理论^[15]计算可知,该模型结构的光子晶体会产生一个大的光子禁带,因而常通过引入缺陷来实现滤波的功能。缺陷的引入使光子晶体原有的周期性受到破坏,会在光子禁带中引入新的电磁波局域化模式,通过改变光子晶体结构参数来控制禁带的位置、宽度和禁带中缺陷模的形式而实现滤波。此外,由于光线正入射时 P 和 S 两种偏振态光的特征矩阵相同,则两种偏振光的透射谱重合不分离,因此,为得到偏振滤波器,入射光应以一定角度斜入射光子晶体表面。

在原结构中心和最外两侧引入缺陷 C 来实现滤波。将 A,B 薄膜的光学厚度用 nd (即 $\lambda_0/4=387.5$ nm) 来表示,缺陷 C 的光学厚度用 $k \cdot nd$ 来表示。图 1 给出了 $\theta=1.45$ rad 时, k 取不同值时透射谱的变化情况。由图 1 可知,在禁带中心附近,P 偏振光的透射峰个数随缺陷 C 的光学厚度的增大而增加,S 偏振光始终保持截止,因而要得到频率间隔较小的光滤波器应用于 DWDM 系统,C 缺陷介质的光学厚度要足够大。对一个光谱频率间隔在 100 GHz 大小的光滤波器,C 缺陷介质的光学厚度常在毫米量级。为了在实际中便于获得,考虑到玻璃的种类繁多和折射率大小可选择的特点,缺陷 C 可选为各向同性的玻璃介质。为了优化透射窗口的波纹度,得到平坦透射特性的光滤波器,在该结构中

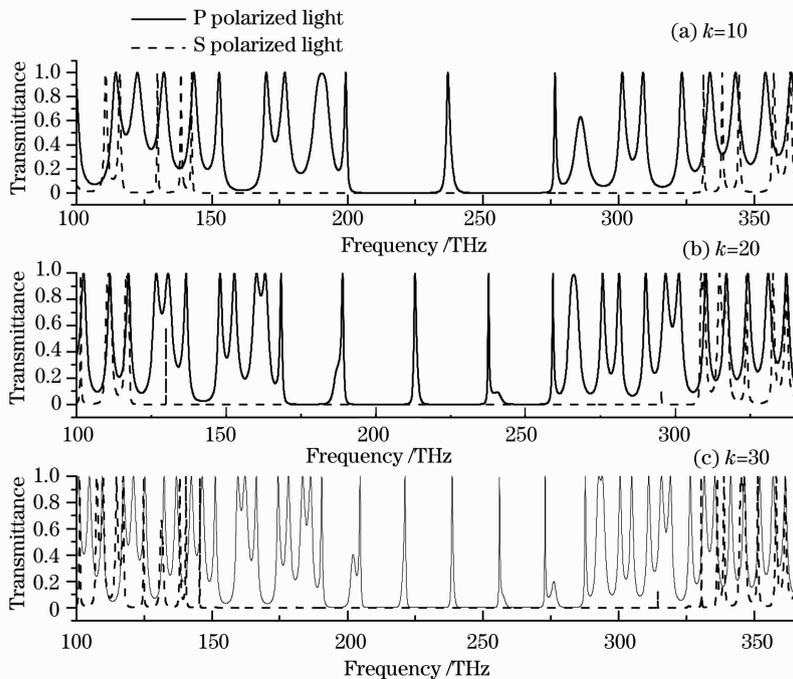


图 1 k 为不同值时一维光子晶体滤波器结构为 $C(BA)^4BCB(AB)^4C$ 的透射谱

Fig. 1 Transmission spectra of 1DPC filter with structure of $C(BA)^4BCB(AB)^4C$ for different values of k

间缺陷 C 的左右两侧均引入缺陷 D,即以两层 D 薄膜来取代 B 薄膜,通过合理选择 D 薄膜层的折射率来优化透射窗口的波纹度。修正后的滤波器结构如

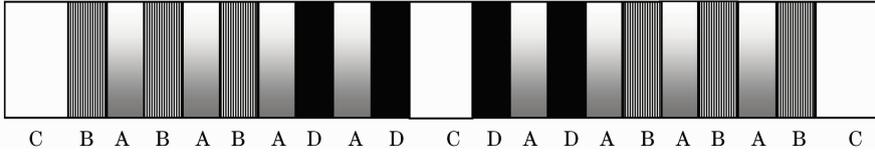


图 2 优化的光子晶体偏振滤波器的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of optimized photonic crystal polarized filter

3 设计实例

介质层 A, B 和 D 分别为氟化钠、砷化镓和铍化铅薄膜,其折射率分别为 $n_a = 1.3$, $n_b = 3.23$ 和 $n_d = 4.1$ 。介质层 C 为轻火石玻璃,其折射率为 $n_c = 1.62$ 。

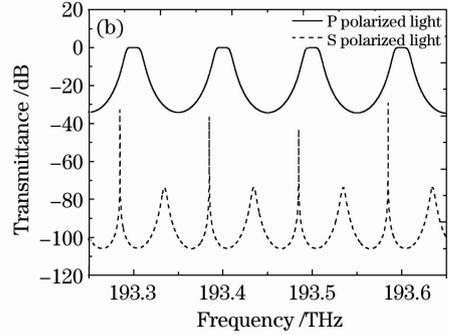
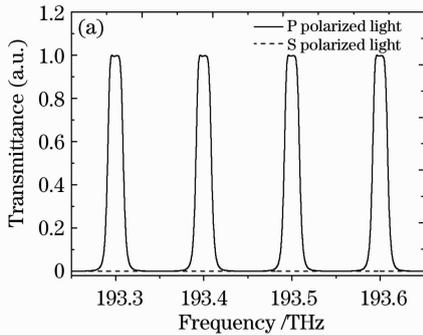


图 3 设计实例的光谱透射率。(a)任意单位,(b)dB 为单位

Fig. 3 Transmission spectra of design example. (a) in arbitrary unit, (b) in dB unit

由图 3(a)可以看出,P 偏振光的透射窗口平坦,频率间隔为 100 GHz,窗口中心位置符合 ITU 标准。S 偏振光的透射谱近似于一条纵坐标值为 0 的直线。从图 3(b)中还可知,S 偏振光的透射谱实际上也是呈起伏变化的,其透射率的最大值小于 -37 dB,最小值可达 -108 dB,而 P 偏振光的隔离度约为 -37.7 dB,S 偏振光的波峰与 P 偏振光的波峰位置并不重合。

4 结构参数对透射谱的影响

为了精确描述透射谱波形的光谱特性,引入矩形度的概念来描述透射谱波形逼近理想方波的程度。矩形度定义为

$$R = \frac{\delta F_t}{\delta F_s}, \quad (1)$$

式中 δF_t 为透射率大于 90% 的单个透射峰的宽度, δF_s 为透射峰单侧透射率范围为大于 10%, 小于 90% 的过渡带宽度,具体定义如图 4 所示。矩形度越大则波形越逼近理想方波。

图 2 所示。通过选择合适的入射角、光学薄膜和玻璃的折射率及玻璃介质的厚度即可实现所需设计要求的平顶偏振滤波器。

参考波长 $\lambda_0 = 1550$ nm,即 A, B, D 层薄膜的光学厚度为 $\lambda_0/4 = 387.5$ nm。C 层介质的光学厚度为 1.894 mm,因此 C 介质层可看作为一个玻璃介质腔。当入射角 $\theta = 1.446$ rad 时,透射谱如图 3 所示。

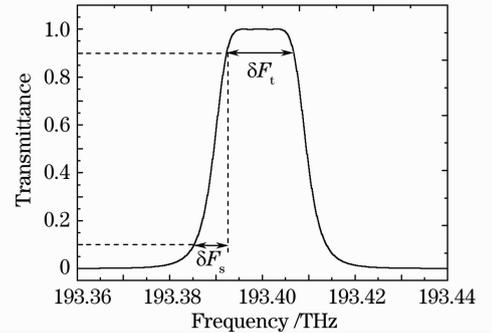


图 4 单个平顶的透射窗口

Fig. 4 A single flat-top transmission window

各介质层的折射率、光学厚度和入射角是该结构光子晶体滤波器的关键参数,因此讨论这些参数对透射率波形的影响是非常重要的。由于 S 偏振光已经被隔离,下面以 3 节设计实例为对象,研究各介质层材料折射率、光学厚度以及入射角偏离理想情况时 P 偏振光透射谱波形特性的变化。

4.1 各层介质的折射率对透射谱的影响

图 5 为在近似保持平坦特性的条件下,介质 A,

B,C,D层的折射率偏离理想情况时透射率波形矩形度的变化。从图5可见,矩形度随4种介质折射率的增大均减小。相比较而言,A层薄膜的折射率发生变化对矩形度的影响最大, n_a 的折射率仅改变0.05,矩形度就可从2.7剧降为1.3,而玻璃腔的折

射率对矩形度的影响最小,当其折射率改变0.3,矩形度的变化仅约为0.15。对于A,B,C介质,矩形度随折射率的变化近似为线性,而对D介质,当折射率大于4.1时矩形度的变化明显大于折射率小于4.1时的变化。

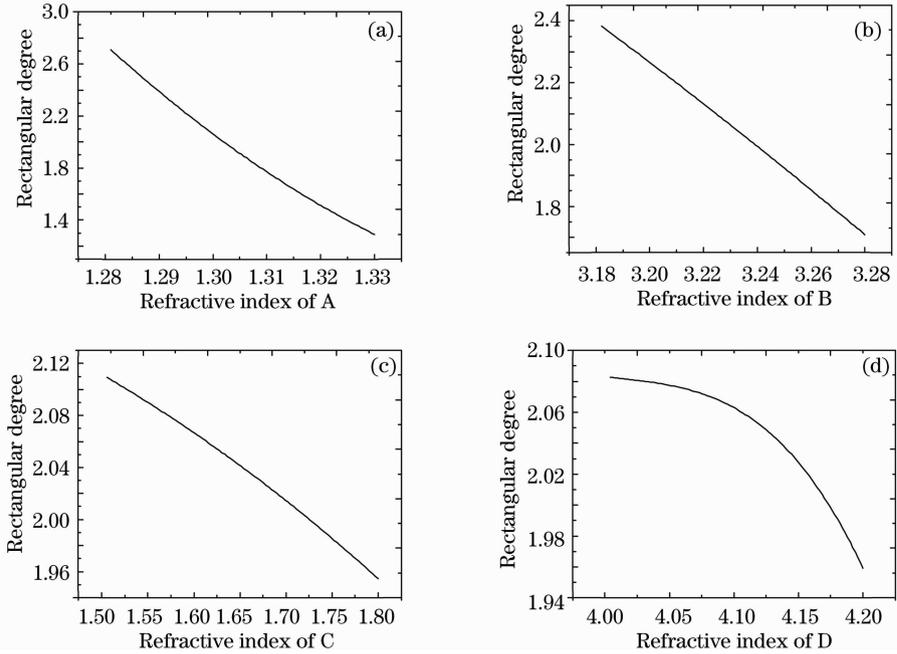


图5 矩形度随各层介质折射率的变化

Fig. 5 Influence of refractive index of each medium layer on rectangular degree

将占空比(即光谱透射率波形中通带宽度与周期之比)表示为 $1:N$,图6为在近似保持平坦特性的条件下,介质A,B,C,D层的折射率偏离理想情况

时占空比对应的 N 值的变化情况。从图6可知,各介质层折射率偏离理想情况时占空比对应的 N 值均呈近似线性变化。 N 随A,B,D层光学薄膜折射

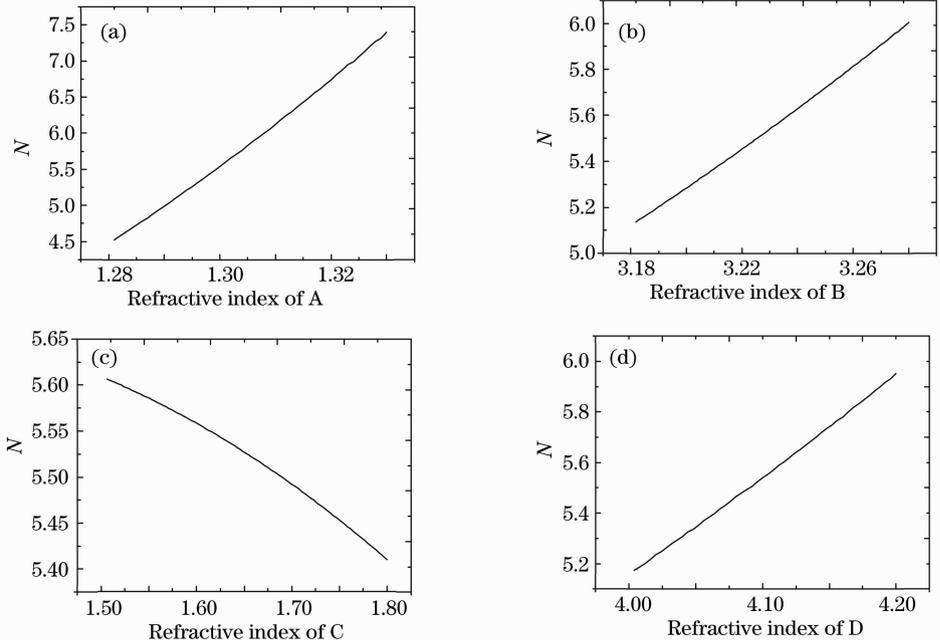


图6 N 随各层介质折射率的变化

Fig. 6 Influence of refractive index of each medium layer on N

率的增大而增大,随 C 介质(玻璃腔)折射率的增大而减小。各层介质对 N 值影响程度是不同的。相比而言,A 层介质膜的折射率对 N 值的影响最大,当 n_a 仅变化 0.05(即 1.28~1.33), N 值就可从 4.5 变为 7.4。故只需灵活选取 A 介质的折射率,就可以容易地设计出其他占空比的平顶偏振滤波器,如 n_a 分别为 1.291,1.309,1.325 时,对应的 N 值分别为 5,6,7,也即占空比分别为 1:5,1:6,1:7。

当各介质层折射率偏离理想情况时,P 偏振光透射谱对应的隔离度的变化与占空比类似,即也呈近似线性变化,且隔离度随 A,B,D 层光学薄膜折射率的增大而升高,随 C 介质(玻璃腔)折射率的增大而降低(这里不一一画出)。

研究还发现,与光垂直入射时 A,B,C,D 介质层的折射率发生变化对透射谱的频率间隔均无影响不同,光斜入射时光学薄膜 A,B,D 层的折射率发生变化会对透射谱的频率间隔产生一定的影响,但该影响相比 C 介质层的折射率发生变化时频率间隔的变化要小得多。如对图 6 所示的近似保持平坦

特性条件下的各介质层的折射率的变化范围而言,A,B,D 介质层折射率发生变化时频率间隔的变化均小于 0.5 GHz,而 C 介质层的折射率发生变化时频率间隔的变化大小为 10 GHz。

4.2 各介质腔厚度对透射谱的影响

相比各介质层的折射率,C 介质层(即介质腔)的厚度发生变化对频率间隔的影响要大得多,频率间隔和介质腔的厚度之间近似成反比关系。这和 3 节设计实例中为了得到应用于频率间隔较小的 DWDM 系统的光滤波器,C 介质层的厚度需达到较高的毫米量级是一致的。3 个介质腔厚度偏离设计值时对透射谱的矩形度和占空比均没有明显影响。图 7 分别给出了当第 1 个介质腔光学厚度正向偏离 0.1% [图 7(a)]、第 2 个介质腔光学厚度正向偏离 0.05% [图 7(b)]、第 3 个介质腔光学厚度正向偏离 0.1% [图 7(c)] 及第 1 个介质腔光学厚度正向偏离 0.1% 且同时第 3 个介质腔光学厚度反向偏离 0.1% 时 [图 7(d)] 的透射谱(S 偏振光的透射谱也一同画出,以虚线表示)。

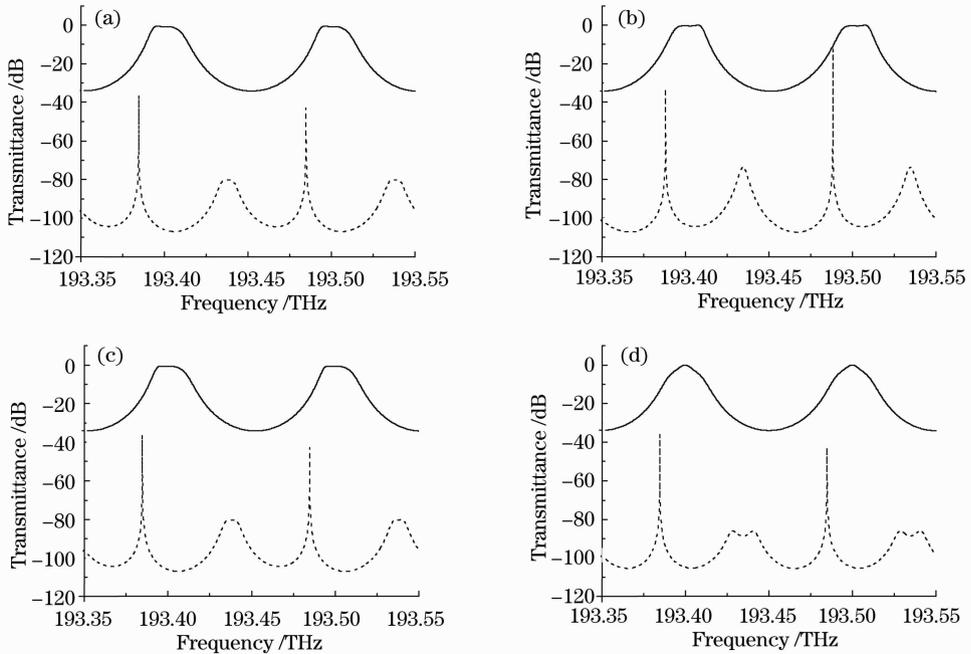


图 7 3 个介质腔厚度单独偏离设计值及 3 个介质腔厚度变化不一致时的透射谱。光学厚度的变化率 $\delta D_i/D_i$ ($i=1,2,3$) 分别为 (a) $\delta D_1/D_1 = +0.1\%$, (b) $\delta D_2/D_2 = +0.05\%$, (c) $\delta D_3/D_3 = +0.1\%$, (d) $\delta D_1/D_1 = +0.1\%$, $\delta D_2/D_2 = 0$, $\delta D_3/D_3 = -0.1\%$

Fig. 7 Transmission spectra when the thickness of the three medium cavities is respectively deviated from ideal value and not identical. The change rate of optical thickness $\delta D_i/D_i$ ($i=1,2,3$) (a) $\delta D_1/D_1 = +0.1\%$, (b) $\delta D_2/D_2 = +0.05\%$, (c) $\delta D_3/D_3 = +0.1\%$, (d) $\delta D_1/D_1 = +0.1\%$, $\delta D_2/D_2 = 0$, $\delta D_3/D_3 = -0.1\%$

由图 7 可见,相比而言,3 个介质腔厚度单独变化时,透射谱对中间的介质腔的变化要更敏感。也就是说,中间介质腔的厚度误差比两侧的介质腔更

严格。当 3 个介质腔厚度变化不一致时,透射谱的变化要比介质腔厚度单独变化时明显。为了较好地实现滤波功能,3 个介质腔的厚度误差需控制在微

米量级。这样的误差精度可通过表面精加工技术实现。

4.3 入射角对透射谱的影响

图 8 为入射角分别为 1.445, 1.446 和 1.447 rad 时的透射谱图。可见光谱透射率对入射角非常敏感, 入射角仅改变了 0.001 rad, 透射谱已发生明显的平移。且随着入射角的增大, 透射峰将会向高频段平移。

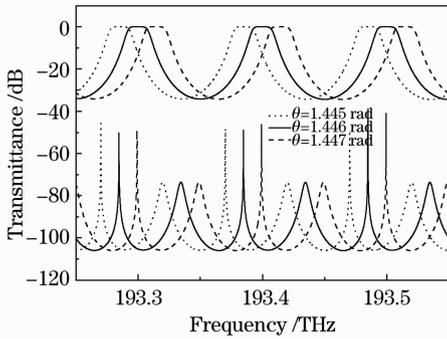
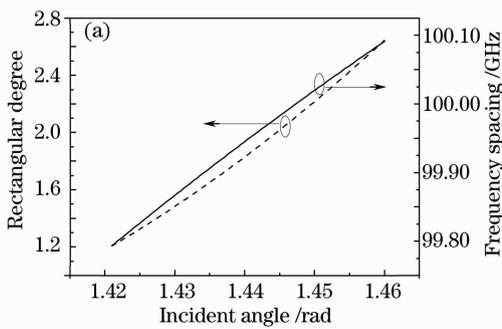


图 8 入射角分别为 1.445, 1.446 和 1.447 rad 时两偏振光的透射谱图。图形上、下半部分的曲线分别对应于 P 和 S 偏振光的情况

Fig. 8 Transmission spectra for incident angle of 1.445, 1.446 and 1.447 rad respectively. The curves in the upper half part and lower half part are corresponding to P and S polarized light respectively

为了便于观察, 图 9 给出了入射角分别为 1.0 rad 和 1.3 rad 时的两种偏振光的透射谱图。由图 9 可



知, 随着入射角的增大, P 偏振光的半峰全宽明显变大, S 偏振光和 P 偏振光的透射峰分离越大, 且 P 偏振光的隔离度越小, S 偏振光的隔离度越大。此外 P 偏振光隔离度的变化较 S 偏振光要快。当入射角增大到一定角度(如 1.446 rad)时 P 偏振光的透射峰开始变为平顶。

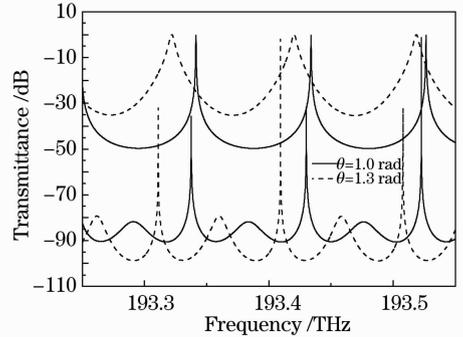


图 9 入射角分别为 1.0 rad 和 1.3 rad 时的两偏振光的透射谱图。图形上、下半部分的曲线分别对应于 P 和 S 偏振光的情况

Fig. 9 Transmission spectra for incident angle of 1.0 and 1.3 rad respectively. The curves in the upper half part and lower half part are corresponding to P and S polarized light respectively

入射角偏离理想情况时透射谱的矩形度、频率间隔、占空比等的变化如图 10 所示。由图 10 可知, 入射角偏离对频率间隔的影响不大, 而对矩形度和占空比的影响较为明显。入射角越大, 矩形度越大, 隔离度越高, N 值越小, 即占空比越大。

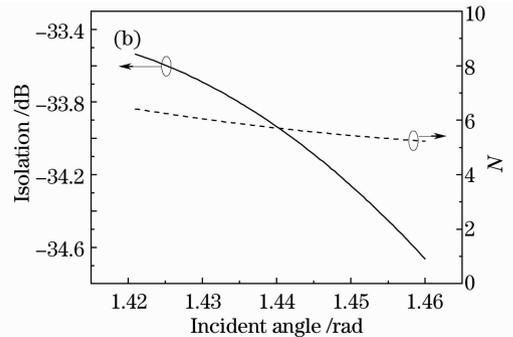


图 10 矩形度和频率间隔(a)以及隔离度和 N (b) 随入射角的变化

Fig. 10 Rectangular degree and frequency spacing (a) and isolation and N (b) changing with different incident angles

5 结 论

从简单的一维光子晶体理论出发, 提出了一种结构非常简单的平顶偏振滤波器。其仅需 18 层光学薄膜和 3 层玻璃介质, 即可在高透射 P 偏振光的同时很好地截止 S 偏振光, 且透射谱的中心频率符合 ITU 标准。在给出具体设计实例的基础上研究

发现, P 偏振光透射谱的矩形度、占空比和隔离度主要由 4 种介质层的折射率决定, 而介质腔的厚度对矩形度、占空比等没有影响, 但直接决定着频率间隔, 和其近似成反比关系。此外, 4 种介质层的折射率变化也会对频率间隔产生稍许影响。相比其他 3 种薄膜介质, C 玻璃介质的折射率变化对频率间隔

的影响较大。P 偏振光的透射率对入射角非常敏感,入射角小角度变化时,可实现 P 偏振透射光的中心频率的调谐,而频率间隔的变化很小,可视为不变。随着入射角的不断增大,矩形度和占空比的影响较为明显。入射角越大,矩形度越大,隔离度越高, N 值越小,即占空比越大。灵活选取 A 介质的折射率,还可以简便地设计其他占空比的平顶偏振滤波器。

参 考 文 献

- Hongfei Jiao, Xinbin Cheng, Tao Ding *et al.*. Narrowband multi-channel filters [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(s1): 192~195
- Zhang Juan, Wang Chang, Yang Xiaowei. Odd and even periodic characteristics analysis of interleaver based on Michelson-Gires-Tournois interferometer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 587~591
张娟,王昌,杨小伟. 迈克耳孙 Gires-Tournois 干涉仪型梳状滤波器的奇偶周期特性分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(3): 587~591
- Wu Shudong, Chen Lian, Fan Jianqiang *et al.*. Asymmetrical optical interleavers filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 31~35
伍树东,陈莲,范建强等. 非对称型光学交错梳状滤波器[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 31~35
- G. Alagappan, X. W. Sun, P. Shum *et al.*. One-dimensional anisotropic photonic crystal with a tunable bandgap [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, **23**(1): 159~167
- Q. Zhu, Y. Zhang. Defect modes and wavelength tuning of one-dimensional photonic crystal with lithium niobate [J]. *Optik*, 2009, **120**(4): 195~198
- Ignacio Del Villar, Ignacio R. Matias, Francisco J. Arregui. Analysis of one-dimensional photonic band gap structures with a liquid crystal defect towards development of fiber-optic tunable wavelength filters [J]. *Opt. Express*, 2003, **11**(5): 430~435
- X. Gu, X. F. Chen, Y. P. Chen *et al.*. Narrowband multiple wavelengths filter in aperiodic optical superlattice [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **237**(1): 53~58
- Wenyuan Rao, Yanjun Song, Chongjun Jin. Design of multichannel filters with each channel wavelength and bandwidth adjustable independently [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2010, **27**(1): 10~15
- Z. Luo, Z. Tang, Y. Xiang *et al.*. Polarization-independent low-pass spatial filters based on one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials [J]. *Appl. Phys. B*, 2009, **94**(4): 641~646
- Tian Guoxun, Wu Yonggang, Wang Zhanshan *et al.*. Design and modification of double channel of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(5): 661~664
田国勋,吴永刚,王占山等. 一维光子晶体的双通道位置设计及调整 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 661~664
- Wang Jizhou, Xiong Yuqing, Wang Duoshu *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
- Gu Peifu, Chen Haixing, Qin Xiaoyun *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
- Liu Qineng. 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
- Wenfu Zhang, Jihong Liu, Weiping Huang *et al.*. Polarization bandpass filter based on one-dimensional photonic crystal heterostructures [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2009, **26**(10): 1845~1851
- M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Beijing: Science Press, 1978
波恩,沃耳夫. 光学原理[M]. 北京:科学出版社,1978