

应用于波分复用的复周期结构光子晶体滤波器的设计

李萍 杨静波* 梁高峰

河南科技大学医学技术与工程学院, 河南 洛阳 471003

摘要 基于光子晶体的禁带特性,设计出一种复周期结构的一维光子晶体多通道滤波器。利用传输矩阵法,并通过 Matlab 编程仿真,甄选出两种最合适的光子晶体材料,并确定其结构参数。仿真结果表明,所设计的一维光子晶体多通道滤波器,在目前主要通信波长范围内可得到多个高透射窗口,且通过调节可以得到需要数量的信道。

关键词 光学器件;光子晶体;多通道滤波器;复周期结构;波分复用技术

中图分类号 O431 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.110601

Design of Photonic Crystal Filter with a Comlicated Periodic Structure Applied in Wavelength Division Multiplexing

Li Ping Yang Jingbo Liang Gaofeng

College of Medical Technology and Engineering, Henan University of Science and Technology,
Luoyang, Henan 471003, China

Abstract Based on the bandgap properties of photonic crystals, an one-dimensional photonic crystals multi-channel filter with a comlicated periodic structure is designed. Using transfer matrix method, and through the Matlab simulation, two appropriate photonic crystal materials are selected and its structural parameters are determined. Simulation results show that the filter can obtain multiple high-emitting windows in the current main communication wavelength range, and the required number of channels be regulated.

Key words optical devices; photonic crystals; multi-channel filter; comlicated periodic structure; wavelength division multiplexing technology

OCIS codes 060.4510; 230.5298; 230.7408

1 引言

随着科学技术的不断发展,需要传输的信息量不断增加,通信系统面临急需扩容的问题。现代光通信器件朝大宽带、集成化、大容量、小型化的方向发展,波分复用^[1](WDM)技术的迅速实用化,为高速率、大容量信息的长距离运输提供了易于实现的方式。光波分复用技术是能将不同波长的光信号组合起来传输(即合波),又可以将光纤中组合传输的光信号分开(即分波)送入不同通信终端或指定光纤的光学技术^[2],目前实现光信号的 WDM 技术有很多,如光纤布拉格光栅型分波器、干涉型滤波器等。但这些方法或者系统复杂且体积较大,或者性能不理想,难以满足迅速发展的 WDM 技术要求。

1987年 Yablonovich^[3]和 John^[4]提出了光子晶体的概念,1998年和2006年 Science 杂志先后两次将它列为未来六大研究热点之一。光子晶体是一种介电常量呈周期性分布的人工介质结构,具有光子带隙。近年来这种新型的光子晶体材料引起了人们的广泛兴趣。本文将前沿的光子晶体理论引入波分复用专用滤波器的设计,设计出高低两种折射率介质交替分布的复周期结构的光子晶体多通道滤波器。相比起通常波分复用技术用到的器件^[5],此滤波器结构更为简单,体积更为小巧,滤波性能更优越。仿真分析发现,这种结构的滤波器可以在目前主要通信波段得到多个高透射窗口并且各透射峰的透射率均接近 100%。另外,适当调

收稿日期: 2015-04-14; 收到修改稿日期: 2015-06-02; 网络出版日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(U1404824)

作者简介: 李萍(1972—),女,博士,副教授,主要从事光子晶体、生物医学工程、自动控制等方面的研究。

E-mail: pingli818@163.com

*通信联系人。E-mail: solo_perhaps@163.com

节各层的厚度参数以及复周期个数,可以得到任意所需通道滤波器^[6],这一性能改进意味着可以极为方便地拓展信道,大大满足波分复用技术对器件的需求。相比起传统光通信滤波器的滤波性能差,对光信号的损失较大这一缺点,本滤波器具有明显的理想滤波器性能,对通过的光信号几乎没有损失;相对于二维光子晶体滤波器在两个方向上存在介电常数而造成性能不稳定的缺点,本滤波器性能稳定,无机械运动,易与全光网络匹配,能有效地对通信系统进行扩容;相对于二维光子晶体波导器件需要引入合适的缺陷层这一制作难题,本滤波器结构简单,设计难度小,更加轻便且灵活性强。因此这种滤波器有望在光学信息精密测量和光通信超密度波分复用技术等技术中广泛应用^[7]。

2 传输矩阵法

常用的一维光子晶体分析方法是传输矩阵法(TMM),它的基本思想是用传输矩阵表征光波在多层膜结构中每层膜的传播特性,多层膜的总的传输矩阵为每层膜传输矩阵的乘积。一维光子晶体的结构如图1所示,由多层不同介质周期排列组成,因此可逐层应用于单介质层传输方程分析^[8]。

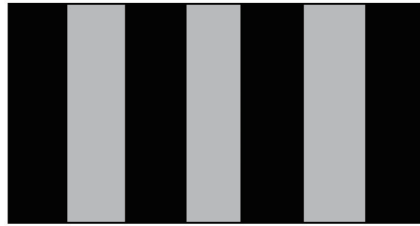


图1 一维光子晶体的结构图

Fig.1 One-dimensional photonic crystal structure

若设 θ 代表入射方向与介质表面法线的夹角,对于 TE 波,其特征矩阵为

$$\mathbf{M}(z) = \begin{Bmatrix} \cos[\phi(z)], & -(i/p)\sin[\phi(z)] \\ -ip \sin[\phi(z)], & \cos[\phi(z)] \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中 $p = \sqrt{\varepsilon/u} \cos \theta$, $\phi(z) = k_0 n z \cos \theta$, $k_0 = \omega/c$ 。 ω 是入射波频率, c 是真空中光速, z 是波的传播距离。此外,在均匀介质膜内部, ε, u 和 $n = \sqrt{\varepsilon u}$ 都是常量。

多层介质的特征矩阵为

$$\mathbf{M}(z_n) = \mathbf{M}_1(z_1) \mathbf{M}_2(z_2 - z_1) \cdots \mathbf{M}_N(z_N - z_{N-1}) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

设 ε_1, u_1 和 ε_i, u_i 为第一介质与最后一个介质的介电常量和磁导率,设 θ_i 是入射波方向与介质表面法线之间的夹角, θ_t 是透射波方向分别与介质表面法线之间的夹角,进一步可以写出整个结构的反射系数 r 和透射系数 t 为

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12} p_t) p_1 - (m_{21} + m_{22} p_t)}{(m_{11} + m_{12} p_t) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_t)}, \quad (3)$$

$$t = \frac{2p_1}{(m_{11} + m_{12} p_t) p_1 + (m_{21} + m_{22} p_t)}, \quad (4)$$

式中 $p = \sqrt{\varepsilon/u} \cos \theta$, p_1 表示该结构左侧接触的外界环境的系数, p_t 为该结构右侧接触的外界环境的系数。而其反射率 R 和透射率 T ^[9] 可以写为

$$R = |r|^2, T = (p_t/p_1) |t|^2. \quad (5)$$

据此便可以对滤波器进行传输特性和光子能带特性的数值研究。类似的,如果取横磁波(TM波)^[10],只需一个简单的代换,同样可以得出其透射率和反射率,这里不再一一赘述。为便于下面的研究,假设每种介质各向同性且上下两边都是空气($n_0 = 1$),即 $\varepsilon_1 = \varepsilon_t = 1$, $u_1 = u_t = 1$,并且研究的介质都是非磁性材料。

3 一维光子晶体多通道滤波器的设计

3.1 周期结构设计

一维光子晶体与二维、三维光子晶体相比,它的禁带结构和外形构造相对比较简单,更容易制得,因而

一维光子晶体具有较高的研究意义和应用价值^[11]。

本次设计的一维光子晶体多通道滤波器具体应用到波分复用系统中时,可用做解复用器件:注入到单端口入射端的光波信号,分别按其波长传输到对应的出射端(N 个出射端口之一)。由于不同的工作波长其输出端口是不同的,所以希望 N 个输出端之间对该输入信号有理想的隔离效果,即:滤波器具有良好的滤波性能并能有效地进行多通道的光学滤波。为满足上述要求,将高折射率(折射率为 n_1)的介质与低折射率(折射率为 n_2)的介质厚度不均匀的交替分布两次组成一个复周期,然后将复周期结构进行重复排布,构成一维光子晶体多通道滤波器。选取的光子晶体模型如图2所示:第一单元为高折射率介质 n_1 ,将其厚度设计为 a_1 ;第二单元为低折射率介质 n_2 ,其厚度设计为 b_1 ;第三单元为高折射率介质 n_1 ,其厚度设计为 a_2 ;第四单元为低折射率介质 n_2 ,其厚度设计为 b_2 ,以这四个单元构成一个复周期,之后便可进行复周期的重复排布。

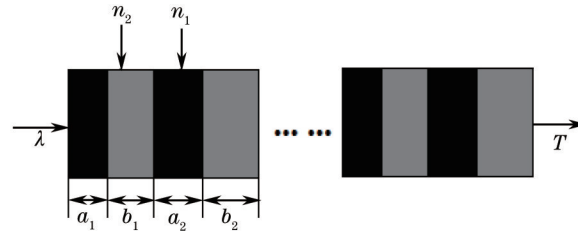


图2 复周期光子晶体模型

Fig.2 Complicated periodic photonic crystal model

3.2 光子晶体材料和参数的选择

根据上述模型便可选择两种非均匀交替的材料和具体厚度。利用光在光子晶体内的传播方程组得到光信号的传输矩阵,由此计算得到整个多层介质的反射系数和透射系数,从而初步得到本设计中所需的多层周期性交替排列介质的折射率,再将初始数据通过多次 Matlab 仿真微调直到出现最合适的仿真图形,优选出最佳交替介质材料和厚度参数。最终选定最佳高折射率介质材料为二氧化钛(TiO_2), $n_1=2.35$;低折射率介质为氟化镁(MgF_2), $n_2=1.38$;厚度设计分别为 $a_1=190\text{ nm}$, $b_1=240\text{ nm}$, $a_2=261\text{ nm}$, $b_2=404\text{ nm}$ 。

4 仿真设计

目前光通信的频率范围为 $1.67 \times 10^{14} \sim 3.75 \times 10^{14}\text{ Hz}$ (对应波长范围为 $800 \sim 1700\text{ nm}$),主要的光通信波段为 1310 nm 和 1550 nm 。其中 1310 nm 波段窗口的低损耗区波长约为 $1260 \sim 1360\text{ nm}$; 1550 nm 窗口的低损耗区波长为 $1480 \sim 1600\text{ nm}$ 。而现在的WDM技术一般指在 1550 nm 窗口附近波长的复用,这样可以保证通信信号的有效处理,即通信信号最大程度的利用而不引起浪费。于是选择在 $1350 \sim 1700\text{ nm}$ 波长范围内进行实验仿真。根据以上对一维光子晶体多通道滤波器的设计,通过传输矩阵法的理论计算,在 Matlab 中编程仿真,结果如表1、图3和图4所示。

表1 8个透射峰及其透射率

Table 1 8 Transmission peaks and their transmittivities

Parameter	Value							
λ / nm	1360	1399	1445	1497	1550	1606	1652	1689
$T / \%$	99.902	99.864	99.856	99.910	99.995	99.804	99.744	99.927

表1和图3的结果显示入射波长在 $1360 \sim 1700\text{ nm}$ 范围总计出现8个高透射窗口,且各透射峰的透射率接近100%,几乎对光信号没有损失。因此这一结构可以应用到8通道的波分复用滤波器。图4的结果显示,将复周期个数改为17层后,入射波长在 $1353 \sim 1700\text{ nm}$ 范围共出现16个高透射窗口,这一结构可以应用到16通道的波分复用滤波器。经多次 Matlab 仿真分析后发现通道的个数和复周期数之间有着密不可分的关系:即复周期数减1便可得到需要的通道个数。比如选取17层的复周期,可获得16通道的滤波器;选取33层的复周期,可获得32通道的滤波器,以此类推。考虑到具体在波分复用系统中对滤波性能的要求和对信道数的要求,此结构滤波器具有理想滤波器性能,并可以适当调节结构周期数和各层的厚度参数后得到需要的通道数。这种优势有望在光通信超密度波分复用技术和光学信息精密测量等技术中获得广泛应用。

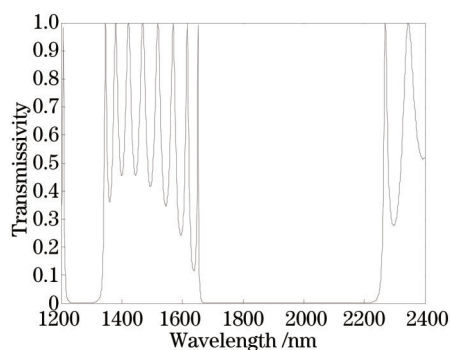


图3 8通道滤波器传输特性仿真结果

Fig.3 Simulation results 8-channel filter transmission characteristics

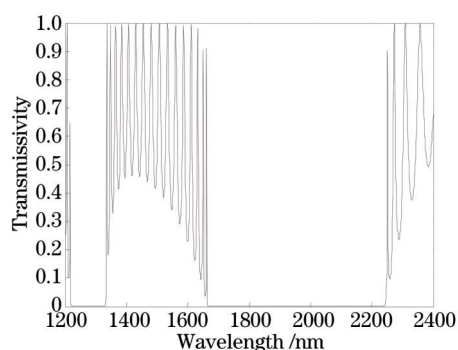


图4 16通道滤波器传输特性仿真结果

Fig.4 Simulation results 16-channel filter transmission characteristics

5 结 论

利用光子晶体的禁带特性,根据传输矩阵法和 Matlab 仿真,设计了一种应用于波分复用技术的一维光子晶体多通道滤波器。甄选出组成该滤波器的高折射率介质二氧化钛(TiO_2)、低折射率介质氟化镁(MgF_2),以此两种高低折射率的介质交替分布,并将两种独立的单元合并为一层复周期结构。适当调节复周期的个数和各层的厚度参数可得到需要通道数量的滤波器,各透射峰的透射率几乎全部接近 100%。将该滤波器连接在波分复用系统中,可整体设计出波分复用系统专用的光子晶体多通道滤波器,其滤波性能优秀,操作灵活方便,能有效满足波分复用系统中对光学器件的要求。

参 考 文 献

- 1 Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D, *et al.*. Channel drop tunneling through localized states[J]. *Phys Rev Lett*, 2000, 80(5): 960-963.
- 2 Liu Haishan, Ouyang Zhengbiao, Li Jingzhen, *et al.*. Photonic crystal WDM filters[J]. *J Optoelectronics · Laser*, 2002, 13(2): 145-146.
刘海山, 欧阳征标, 李景镇, 等. 用于波分复用的光子晶体滤波器[J]. *光电子·激光*, 2002, 13(2): 145-146.
- 3 E Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 4 S John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(23): 2486-2489.
- 5 Ning Xiangping, Zhao Chunliu, Lang Tingting, *et al.*. Photonic crystal polarizer based on coupling[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 060601.
宁向平, 赵春柳, 郎婷婷, 等. 基于谐振耦合原理的光子晶体光纤偏振器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 060601.
- 6 Song Litao, He Jie, Wang Hualei, *et al.*. Optical performance of photonic crystal filter with liquid crystal layer[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(11): 2834-2837.
宋立涛, 何杰, 王华磊, 等. 液晶缺陷光子晶体滤波器的光学特性[J]. *中国激光*, 2010, 37(11): 2834-2837.
- 7 Li Pingxue, Yang Chun, Zhao Ziqiang, *et al.*. 1027 nm large-mode-area double-cladding photonic crystal fiber mode-locked laser based on SESAM[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0502007.
李平雪, 杨春, 赵自强, 等. 1027 nm 大模场双包层光子晶体光纤半导体可饱和吸收镜锁模激光器[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0502007.
- 8 Wang Qingcai, Wang Yan, Wang Guanghuai, *et al.*. Bandgap properties of photonic crystals with one-dimensional function theory[J]. *Journal of Jishou University: Natural Science Edition*, 2012, 33(1): 36-40.
王清才, 王岩, 王光怀, 等. 一维函数光子晶体的禁带特性理论[J]. *吉首大学学报: 自然科学版*, 2012, 33(1): 36-40.
- 9 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): 2915-2918.
王济州, 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): 2915-2918.
- 10 Zhou Xingping, Shu Jing. Novel 1×3 splitter based on photonic crystal self-collimation effect[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0423002.
周兴平, 疏静. 基于光子晶体自准直效应的新型 1×3 分束器[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0423002.
- 11 Yoshida H, Lee C H, Fujii A, *et al.*. Tunable chiral photonic defect modes in locally polymerized cholesteric liquid crystals[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2007, 477(1): 255-262.

栏目编辑: 王晓琰