

光子晶体超窄带滤波器

欧阳征标 刘海山 李景镇

(深圳大学科技研究院固态光子研究室, 深圳 518060)

E-mail: szuzhouyang@china.com

摘 要 本文利用光学传输矩阵法研究了一种类似于谐振腔结构的光子晶体. 研究发现在这种光子晶体的光子带隙的中央存在一个极窄的透光窗口, 窗口的宽度在红外波段 1500nm 附近可以做到 0.0001nm 以下, 窗口内的透光率峰值可以接近 100%, 窗口以外的区域的透光率可以做到 0.01% 以下. 通过改变所研究结构中的周期厚度、中间夹层厚度、两边光子晶体的周期重复数和波的入射角可以改变窄带透过窗口的位置和窄带的宽度. 这种光子晶体可以用来制作超窄带滤波器, 有望在光通信超密度波分复用技术和光学信息精密测量技术当中获得应用.

关键词 超窄带滤波器; 光子带隙; 超密度波分复用; 光学精密测量

0 引言

光子晶体的概念是在 1987 年由当时在美国 Bell 实验室做研究工作的 E. Yablonovitch 提出来的^[1]. 经过十几年的发展, 光子晶体已成为人们非常关注的领域. 所谓光子晶体, 是一种介电常量呈周期性分布的人工介质结构, 它具有光子禁带. 频率和能量处于禁带内的光子无法进入光子晶体内部, 在光子晶体内部完全被禁止存在. 光子禁带的存在使得光子晶体成为光子技术中的一个基础性的材料, 具有广泛的应用价值. 例如, 利用光子晶体可以控制原子的自发辐射, 可以制作宽频带、低损耗的光反射镜, 可以制作零阈值的激光器, 可以制作高效率的发光二极管, 可以制作光滤波器、光开关、光混频器、光倍频器和光存储器等^[2~6].

在光学精密测量、光波分复用、发光二极管和激光发射腔等应用技术中通常都希望在一个比较宽的光子禁带区内出现一个或几个狭窄的透过带. 因此, 禁带区内的窄带滤波特性是一个人们很感兴趣的课题. 近年来, 随着大容量、高密度光通信技术的发展人们希望能够研制出通带非常窄的窄

带光滤波器. 同时在光学精密测量方面也不断希望有更窄的窄带滤波技术. 因此发展超窄带滤波技术对国民经济和科学研究都具有重要意义.

本文研究了一种具有缺陷的光子晶体. 它的光子带隙中具有缺陷态. 利用这种缺陷态就可以获得窄带滤波特性. 我们利用光学传输矩阵方法对这种结构进行了数值模拟计算, 在 1500nm 附近获得了通带小于 0.0001nm 的窄带滤波特性.

通常人们希望在通带内的光的透过率越高越好, 而在通带以外的区域光应该是完全被阻断的. 光子晶体的突出优点是, 它由纯介质构成, 因而对光几乎无损耗. 我们设计的光子晶体超窄带滤波器在通带内的光的透过率理论上达 99.9% 以上. 而在窄通带以外的很宽的波段内是光子禁带, 光的透过率小于 0.01%.

1 理论模型

本文研究的结构如图 1 所示, 它由三种介质 (n_1, n_2, n_3) 构成, 左右两边为对称的两种均匀介质 (n_1, n_2) 膜交替分布的周期结构, 中间为一层不同

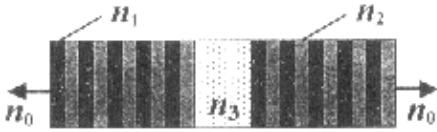


图 1 光子晶体窄带滤波器的结构示意图
Fig. 1 The schematic of the resonator-like photonic crystal narrow pass band filter

的介质膜(n_3)。这是一种具有缺陷的光子晶体。根据光子晶体的理论可知,在缺陷态光子晶体的光子带隙区会出现一些窄的透过窗口。本文将利用这一点来发展超窄带滤波器。

本文使用的理论方法是光学传输矩阵法^[7]。在均匀介质膜的内部, ϵ, μ 和 $n = \sqrt{\epsilon\mu}$ 都是常量。如果以 θ 代表波入射方向和介质表面法线的夹角,对于 IE 波,可以写出其特征矩阵为

$$M(z) = \begin{bmatrix} \cos(\phi(z)) & -(i/p)\sin(\phi(z)) \\ -ip\sin(\phi(z)) & \cos(\phi(z)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $p = \sqrt{\epsilon/\mu}\cos\theta, \phi(z) = k_0nz\cos\theta, k_0 = \omega/c, \omega$ 为入射波的频率, c 为真空中的光速, z 为波的传播距离。

进而可写出多层介质的特性矩阵为
 $M(z_N) = M_1(z_1)M_2(z_2 - z_1)$

$$\dots\dots M_N(z_N - z_{N-1}) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

设 ϵ_1, μ_1 和 ϵ_l, μ_l 为第一媒质和最后一个媒质的介电常量和磁导率,并设 θ_1 和 θ_l 为入射波方向和透射波方向分别与介质表面法线之间的夹角,则我们进一步可以写出整个结构的反射系数和透射系数为

$$\left. \begin{aligned} r &= \frac{(m_{11} + m_{12}p_l)p_1 - (m_{21} + m_{22}p_l)}{(m_{11} + m_{12}p_l)p_1 + (m_{21} + m_{22}p_l)} \\ t &= \frac{2p_1}{(m_{11} + m_{12}p_l)p_1 + (m_{21} + m_{22}p_l)} \end{aligned} \right\}$$

$\theta_l, p_l = \sqrt{\epsilon_l/\mu_l}\cos\theta_l$. 而其反射率和透射率可以写为

$$R = |r|^2, T = (p_l/p_1) |t|^2 \quad (4)$$

根据式(3)和(4)我们就可以对图 1 所示结构的传输特性和光子能带特性进行数值研究。在本文下面的研究中,我们假设所研究的介质都是非磁性的,每种介质都是各向同性的,且两边都是空气($n_0 = 1.0$),即 $\epsilon_1 = \epsilon_l = 1.0, \mu_1 = \mu_l = 1.0$,并且假设波垂直于介质表面入射,入射波的波长落在红外通信波段($1.55\mu\text{m}$)及其附近。另外,本文以下的分析中高折射率介质均选为砷化镓(取 $n_1 = 3.23$),而低折射率介质均选为冰晶石(取 $n_2 = 1.35$)。本文只讨论 TE 波的情况。

2 数值研究结果和讨论

根据以上给出的理论模型,我们对图 1 所示的结构进行了数值模拟计算。图 2(a)给出了一个典型的计算结果,其中左右两边均匀周期区的周期数均为 5,每个周期的光学厚度均为 $0.74\mu\text{m}$ 每个周期内部的高低折射率介质层的光学厚度之比为 1,中间夹层的光学厚度为 $0.8\mu\text{m}$ 其它参量在上一节中已经给出过。由图 2(a)可以看出,这种结构存在一个光子禁带区,在光子禁带区的中间存在一个很窄的透过窗口,其半功率带宽(即 3dB 带宽)为 0.097nm 。因此所研究的结构确实可以作为窄带滤波器使用。

图 2(b)和(c)分别给出了周期厚度对窄带滤波特性的影响情况,其中 2(b)和(c)对应的每个周期的光学厚度分别为 $1.04\mu\text{m}$ 和 $0.34\mu\text{m}$,其他参量与图 2(a)中的相同。从图 2 可以看出,当每个周期的厚度增加时窄带透过窗口向长波区移动,而当每个周期的厚度减少时窄带透过窗口向短波区移动。另外我们还研究了图 1 中的中间夹层的厚度变化对窄带透过窗口的影响情况,发现夹层的厚度变大时窄带透过窗口向长波区移动,而当中间夹层的厚度变小时窄带透过窗口向短波

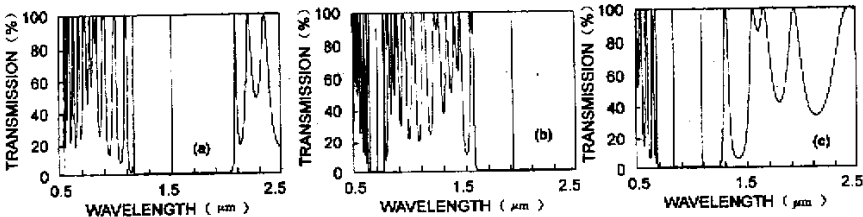


图 2 图 1 所示结构的窄带滤波特性以及周期光学长度对它的影响
Fig. 2 The narrow pass band filtering for Fig. 1 and the influence of the optical length of periods

区移动. 这种现象的物理解释是, 在周期厚度增加的同时增加入射波的波长, 波动方程解的形式不变, 这是电磁场Maxwell方程的特性所决定的.

图 3 给出了图 1 所示结构中两边的光子晶体的周期重复个数对窄带滤波特性的影响. 其中图 3(a)、(b)和(c)所对应的周期重复数分别为 5, 7 和 9, 其它参量与图 2(a)中的相同. 从图 3 可以看出, 重复周期数越多则窄带透过窗口的宽度越

小, 而窄带位置保持不变. 图 3 对应的窄带滤波特性的 3dB 带宽为 0.00009nm . 从物理上可以这样来解释这种现象: 图 1 所示的结构从本质上来讲是一个带有缺陷的光子晶体, 当两边的重复周期数越多时, 该晶体越接近于一个理想的光子晶体, 则该光子晶体的缺陷模的宽度, 即窄带透过窗口的宽度就应该越小.

我们还研究了波的入射角对窄带滤波特性的

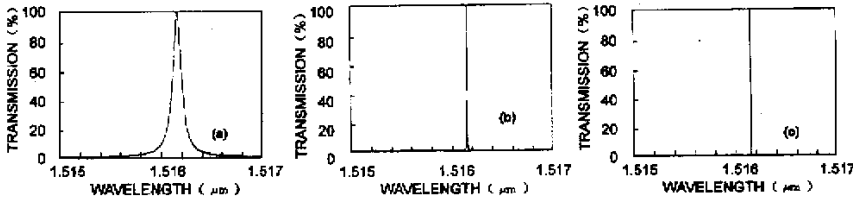


图 3 周期数对图 1 所示结构的窄带滤波特性的影响

Fig. 3 The influence of the number of periods on the narrow pass band filtering for Fig. 1

影响情况, 发现入射角越大则窄带透过窗口越向短波区移动. 这种移动的物理原因是由于在斜入射情况下, 入射角越大则介质的有效介电常量减少⁸, 从而导致整个频率特性向短波区移动.

3 结论

本文提出了一种谐振腔结构的光子晶体, 并对此进行了研究分析, 结果发现, 此种结构光子晶体的光子带隙中央存在一个极窄的透光窗口, 窗

口的宽度在红外波段可以在 0.0001nm 以下, 窗口内的透光率峰值可以接近 100% , 窗口以外的区域透光率可以做到 0.01% 以下. 通过改变所研究结构中的周期厚度、中间夹层厚度、两边光子晶体的周期重复数和波的入射角可以改变窄带透过窗口的位置和窄带的宽度. 这种结构可以用制作带宽小于 0.0001nm (在红外波段) 的超窄带滤波器, 对于发展超高密度波分复用光通信技术和超高精度光学信息测量仪器具有重要应用价值.

感谢北京物理所的杨国桢院士和张道中研究员对本工作的支持.

参考文献

- 1 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059~2061
- 2 Fan S, Villeneuve P R, Joannopoulos J D. High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals. Phys Rev Lett, 1997, 78(17): 3294~3297
- 3 Tran P. Optical limiting and switching of short pulses by use of a nonlinear photonic bandgap structure with a defect. J Opt Soc Am(B), 1997, 14(10): 2589~2595
- 4 Trull J, Martorell J, Vilaseca R. Angular dependence of phase-matched second-harmonic generation in a photonic crystal. J Opt Soc Am(B), 1998, 15(10): 2581~2585
- 5 Sievenpiper D F, Lam C F, Yablonovitch E. Two-dimensional photonic-crystal vertical-cavity array for nonlinear optical image processing. Appl Opt, 1998, 37(11): 2074~2078
- 6 Kosaka H, Kawashima T, Tomita A, et al. Superprism phenomena in photonic crystal: Toward microscale lightwave circuits. J Lightwave Technol, 1999, 17(11): 2032~2038
- 7 波恩, 沃耳夫. 光学原理. 北京: 科学出版社, 1978: 77~103
- 8 唐晋发. 光学中的固体薄膜. 北京: 科学出版社, 1987: 51~52

PHOTONIC CRYSTAL SUPER NARROW OPTICAL FILTERS

Ouyang Zhengbiao, Liu Haishan, Li Jingzhen

Solid State Photonics Laboratory, College of Scientific Researches, Shenzhen University, Shenzhen 518060

E-mail: szzhouyang@china.com

Received date: 2001-07-17

Abstract Authors present a photonic crystal super narrow band optical filter. It is a kind of photonic crystal with defect. The defect is so designed that a narrow pass band is opened in the photonic band gap region. Optical transmission matrix method is used to simulate the filter, Authors numerical investigation shows that the structure investigated can be served as a super narrow pass band optical filter. The pass band obtained can be less than 0.0001nm near the infrared 1500nm. In ideal cases, the optical transmission in the pass band is higher than 99.99%. This means a very low insert energy loss. It is greatly superior to other kind narrow band optical filters. This kind of photonic crystal super narrow band optical filter may find applications in super dense wavelength division multiplexing (SDWDM) for optical communications and precise optical measurement.

Keywords Supper narrow band optical filters; Photonic band gaps; Super dense wavelength division multiplexing; Precise optical measurement

Ouyang Zhengbiao was born in Dongkou, Hunan Province on Feb. 20, 1963. He received his Ph. D in eletron physics and devices from the University of Electronic Sciences and Techonlogies of China in 1998. At present, he is an associate professor and the director of the Solid-State Photonics Laboratory of Shenzhen University. In recent years his research interests include photonic materials, quantum optics, laser diode and nonlinear optics. He has published about 30 academic papers.

光子晶体超窄带滤波器

作者：[欧阳征标](#)，[刘海山](#)，[李景镇](#)

作者单位：[深圳大学科技研究院固态光子研究室, 深圳, 518060](#)

刊名：[光子学报](#)[ISTIC](#)[PKU](#)

英文刊名：[ACTA PHOTONICA SINICA](#)

年，卷(期)：2002, 31 (3)

被引用次数：40次

参考文献(8条)

1.[Yablonovitch E](#) [Inhibited spontaneous emission in soild-state physics and electronics](#) 1987(20)

2.[Fan S;Villeneuve P R;Joannopoulos J D](#) [High extraction efficiency of spontaneous emission from slabs of photonic crystals](#) 1997(17)

3.[Tran P](#) [Optical limiting and switching of short pulses by use of a nonlinear photonic bandgap structure with a defect](#) 1997(10)

4.[Trull J;Martorell J;Vilaseca R](#) [Angular dependence of phase-matched second-harmonic generation in a photonic crystal](#)[外文期刊] 1998(10)

5.[Sievenpiper D F;Lam C F;Yablonovitch E](#) [Two-dimensional photonic-crystal vertical-cavity array for nonlinear optical image processing](#)[外文期刊] 1998(11)

6.[Kosaka H;Kawashima T;Tomita A](#) [Superprism phenomena in photonic crystal:Toward microscale lightwave circuits](#)[外文期刊] 1999(11)

7.[波恩;沃耳夫](#) [光学原理](#) 1978

8.[唐晋发](#) [光学中的固体薄膜](#) 1987

本文读者也读过(9条)

1.[刘碧蕊](#),[伏振兴](#),[LIU Bi-mi](#),[FU Zhen-xing](#) [用于光通信的超窄带光子晶体滤波器的设计及特性研究](#)[期刊论文]-[北京联合大学学报（自然科学版）](#) 2008, 22 (1)

2.[郑慧茹](#),[周骏](#),[薛春华](#),[赵峰](#),[ZHENG Hui-ru](#),[ZHOU Jun](#),[XUE Chun-hua](#),[ZHAO Feng](#) [超窄带和梳状多通道光子晶体滤波器设计](#)[期刊论文]-[强激光与粒子束](#)2006, 18(11)

3.[王玉玲](#),[高英俊](#),[王娜](#),[WANG Yu-ling](#),[GAO Ying-jun](#),[WANG Na](#) [含缺陷模一维光子晶体的超窄带滤波特性分析](#)[期刊论文]-[广西科学](#)2007, 14 (1)

4.[张玉萍](#),[张会云](#),[郑义](#),[王鹏](#),[姚建铨](#) [超窄带和多通道窄带光子晶体滤波器](#)[期刊论文]-[量子光学学报](#) 2004, 10 (4)

5.[汤炳书](#),[王刚](#),[沈廷根](#),[TANG Bing-shu](#),[WANG gang](#),[SHEN Ting-gen](#) [负折射激活介质一维光子晶体超窄带滤波器研究](#)[期刊论文]-[激光与红外](#)2008, 38 (1)

6.[刘江涛](#),[周云松](#),[王福合](#),[顾本源](#) [光子晶体反常色散超窄带滤波理论](#)[期刊论文]-[物理学报](#)2004, 53 (10)

7.[易明芳](#) [光子晶体及其在微波滤波器件中的应用研究](#)[学位论文]2006

8.[罗仁华](#),[梁瑞生](#),[韦中超](#),[杨广](#),[刘颂豪](#),[LUO Ren-hua](#),[LIANG Rui-sheng](#),[WEI Zhong-chao](#),[YANG Guang](#),[LIU Song-hao](#) [对称型正负交替一维光子晶体超窄带滤波器](#)[期刊论文]-[激光与红外](#)2008, 38 (10)

9.[王慧琴](#),[刘正东](#),[谢应茂](#),[WANG Hui-qin](#),[LIU Zheng-dong](#),[XIE Ying-mao](#) [用于DWDM的一类光子晶体滤波器](#)[期刊论文]-[光电子·激光](#)2006, 17 (1)

引证文献(40条)

微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

更多专业培训课程:

- HFSS 视频培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- CST 视频培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- 天线设计专业培训课程

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>