

文章编号: 0253-2239(2010)10-2879-05

# 基于光子晶体波导的光码分多址编解码实现研究

李传起<sup>1,2</sup> 陈 晖<sup>2\*</sup> 周 谔<sup>2</sup> 赵立龙<sup>2</sup> 宋 标<sup>2</sup> 孙婷婷<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 广西师范大学电子工程学院, 广西 桂林 541004; <sup>2</sup> 南京信息工程大学数理学院, 江苏 南京 210044)

**摘要** 讨论了一种新型光功能器件——光子晶体滤波器的工作机理,以带阻和带通滤波器构造多信道光子晶体滤波器,提出了能够用于光码分多址(OCDMA)系统编解码的基本原理。根据耦合模理论,缺陷谐振腔把光信号分成多个码片,完成对用户信号的频域编码。设计出中心波长分别为1527.70,1551.10和1570.00 nm的三通道滤波器作为OCDMA波导编解码器。为了保证码片的透射比,在主波导侧面附加缺陷介质构成带阻滤波器,使第二个码片透射比达到95%。谱宽为0.3 nm,信号基本上不会出现干扰,保证了用户发送和接收信号的准确性。该器件在整个编码过程中损耗的能量极少,这对于实现远距离通信很重要。

**关键词** 光通信;光子晶体;光码分多址编解码器;光子晶体滤波器;缺陷模

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103010.2879

## The Research on OCDMA Encoder/Decoder Based on Photonic Crystal Waveguides

Li Chuanqi<sup>1,2</sup> Chen Hui<sup>2</sup> Zhou Xu<sup>2</sup> Zhao Lilong<sup>2</sup> Song Biao<sup>2</sup> Sun Tingting<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Electronic Engineering College, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China*  
<sup>2</sup> *College of Mathematics and Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China*

**Abstract** The mechanism of a new optical function device—photonic crystal (PC) filter is discussed. Subsequently, the basic theory for encoder/decoder in optical code division multiple access (OCDMA) system based on multiple channel PC filter consisting of band-pass filter and band-stop filter is proposed. Light signals are divided into several chips by the defect resonate cavity to encode/decode the user signals in frequency domain, according to the coupled-mode theory. Thus, the decoder in 2D-OCDMA can be performed. A waveguide decoder/encoder in OCDMA system consisting of three-channel photonic crystal filter, whose wavelength centered at 1527.70, 1551.10, 1570.00 nm is designed. To elevate the transmission efficiency, an extra defect is attached in at the sideway of the bus waveguide. As a results, the efficiency of the second chip is up to 95%. In emulation, the full width at half maximum is 0.3 nm, so there won't be interference between signals in each channel. Also, energy loss in the process of decoding/encoding by PC waveguide encoder/decoder is small, which plays an important part in remote communication.

**Key words** optical communication; photonic crystal; encoder/decoder in OCDMA; photonic crystals filter; defect mode

## 1 引 言

光子晶体(PC)由于其独特的禁带<sup>[1~3]</sup>控光特性,可以全新原理或以前所不能制作的高性能光学器件——光子晶体光纤<sup>[4]</sup>、微腔<sup>[5]</sup>和滤波器<sup>[6]</sup>等,因此在

通讯上有重要的应用前景。选频是光子晶体应用在通讯领域的典型用途之一,应用较广泛的是布拉格光纤光栅(FBG),例如最有可能实现下一代全光网络的光码分多址(OCDMA)技术<sup>[7]</sup>,其核心部件编解码器就是级

收稿日期: 2009-10-30; 收到修改稿日期: 2010-02-05

基金项目: 江苏省高校自然科学基金面上项目(BK2008437)、江苏省自然科学基金面上项目(07KJB510066)和南京信息工程大学科研基金(20080287)资助课题。

作者简介: 李传起(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤通信光码分多址方面的研究。E-mail: leecq@nuist.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: ch19861986@163.com

联 FBGs<sup>[8,9]</sup>,它是一种一维的光子晶体。目前光子晶体的应用研究已经从一维推广到二维情况,并从理论上研究了高效多通道可调谐二维光子晶体滤波器<sup>[10~13]</sup>及其性能。基于此,二维光子晶体为 OCDMA 高效可调谐编解码器的设计制造提供了新的可能,在光纤通信的其他方面也有广阔的应用前景。

本文重点研究了光子晶体在 OCDMA 系统编解码器中的应用。以 PC 的缺陷模理论<sup>[14]</sup>为基础,把光子晶体光波导加以改进,利用其窄带滤波性能提出了一种不同于光纤布拉格光栅编解码器的编解码方案。利用光子晶体带阻滤波器和带通滤波器,对携带用户信号进行滤波筛选,一个 OCDMA 的地址码( $\lambda_0 00\lambda_1 00\lambda_2 00$ )对应于一个编码器,波长位置对应于各个下载通道及透射波长,“0”表示没有信号,起到延迟线的作用,从而完成二维编码过程。从实验仿真所得结果看来,所设计的结构符合 OCDMA 对编解码器的性能要求。

## 2 光子晶体及基本理论

光子晶体实际上就是一种将不同介电常数的介质在空间中按一定周期排列而形成的人造光学微结

构晶体,该排列周期为光波长量级。由于光子晶体的周期性介质结构,使得光子的能量呈带状结构,带与带之间可能存在间隙——即光子带隙<sup>[15]</sup>。在光子晶体中引入某种程度的缺陷,将会在光子禁带中引入新的电磁波模式,与缺陷态频率吻合的光子有可能被局限在缺陷位置。利用该缺陷模理论,在其中引入缺陷就可以设计光子晶体滤波器,如图 1 所示。当光信号由光子晶体下方传入时,由于禁带效应,相应频率的光是不能通过光子晶体的,但在光子晶体中间引入一个点缺陷时,与点缺陷频率相应的光就可以通过该结构光子晶体,从而达到窄带滤波功能。

图 2(a)所示是光子晶体带通滤波器,S+1 和 S+2 分别是两个入射波在波导中传播,中间圆形表示点缺陷谐振腔。当波长与中间的介质谐振腔频率相同时,由耦合模理论,该频率的光将通过谐振腔的耦合作用被耦合到另一条波导中传播,S-1 和 S-2 分别表示相应的传播光;图 2(b)所示是带阻滤波器,入射光 S+3 频率与介质谐振腔频率吻合时,它将被该谐振腔反射,将沿着原路返回,S-3 表示反射光。仿真参量设计如表 1 所示。

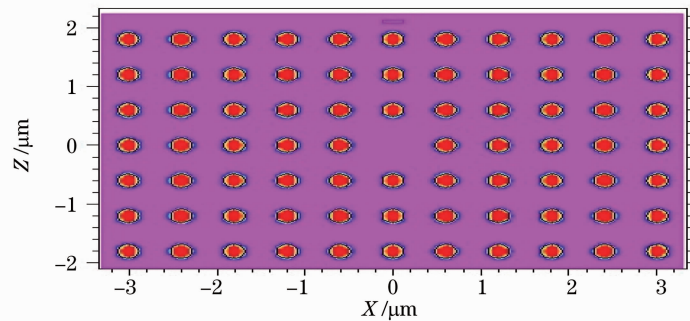


图 1 光子晶体缺陷滤波器截面图

Fig. 1 Profile of filter designed by PC with defect

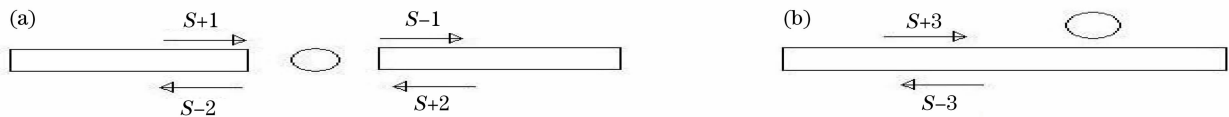


图 2 (a)带通滤波器,(b)带阻滤波器

Fig. 2 (a)Band-pass filter, (b) band-stop filter

表 1 仿真参量设计

Table 1 Parameters designed in the simulation

Substrate material	Shape of dielectric	Lattice type	Index of dielectric cylinder( $n$ )	Lattice constant / $\mu\text{m}$	Radius of dielectric cylinder( $R$ )	Defect
air	cylindrical	square	2.983	$a$	$0.2 \times a$	Dielectric cylinder lost in the center

仿真所得结果如表 2 和图 3 所示。图 1 是点缺陷光子晶体滤波器示意图,在正中间位置缺失一根介质柱,形成一个点缺陷,圆圈表示介质周期性排列

在空气中。图 3(a)是仿真所得的结果,在禁带 1340.80~2192.70 nm 区域出现了一个传播模,中心透射波长是 1527.70 nm,与缺陷的频率相吻合。

表 2 仿真所得结果

Table 2 Results of the simulation

Lattice constant( $a$ ) / $\mu\text{m}$	Center frequency $\omega a / 2 \pi c$	Center wavelength $\lambda$ /nm	Spectrum width $\Delta \lambda$ /nm	Quality factor(Q)	Transmittance /%
0.602	0.39407	1527.70	0.3	5100	99.69

图 3(b)表示高斯信号通过点缺陷光子晶体的透射谱,透射率高达 99%,谱宽也较窄,为 0.3 nm,

Q 值也高达 5100,表明该结构光子晶体适用于制作窄带滤波器。

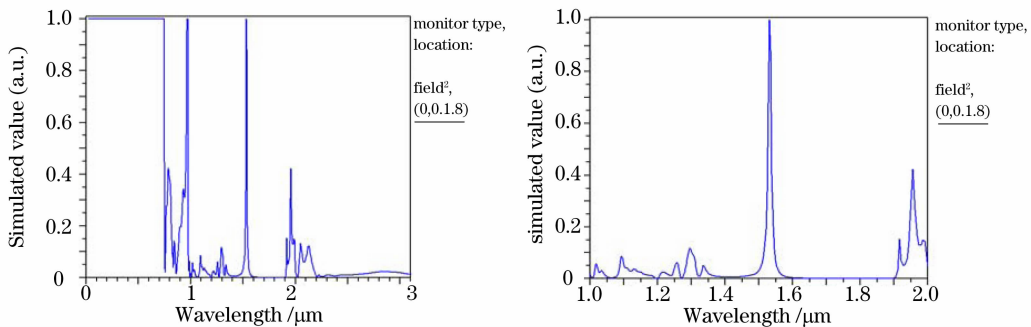


图 3 (a) 仿真结果,(b)光子晶体滤波器透射谱

Fig. 3 (a) Results of the simulation, (b) transmission spectrum of PC filter

### 3 光子晶体波导编解码器设计

基于光子晶体的窄带滤波性能,将用户信号按地址码编码成连串的单脉冲光信号,各缺陷对应单频率的光子(光波长),可完成 OCDMA 频域的编码;而在光子晶体中同时引入多个缺陷,各缺陷间间距可完成 OCDMA 时域的编码。这样就可以利用

光子晶体制成二维的 OCDMA 编解码器。设计的基本原理就是基于第 2 节所述的带阻滤波器和带通滤波器,通过对他们的合理混合使用达成编码和解码。

设计的参量及结果如表 2, 3 所示,晶格常数  $a=0.602 \mu\text{m}$ 。

表 3 仿真参量和结果

Table 3 Parameters and results of the simulation

Channel	Radius of the defect / $\mu\text{m}$	Central wavelength $\lambda$ /nm	Central frequency $\omega a / 2 \pi c$	Spectrum width $\Delta \lambda$ / nm	transmittance /%
1	0.178R	1551.10	0.38805	0.3	95.77
2	0.265R	1570.00	0.38350	0.3	99.59
3	0	1527.70	0.39407	0.3	99.70

图 4 表示光子晶体编解码器的设计图。光信号从下方主波导输入,在各缺陷处由于谐振腔的耦合作用,光信号被相应频率的缺陷分别分割成三个码片,完成对用户信号的编码。在主波导下方引入一个点缺陷(dot defect 4)是为了形成一个带阻滤波器反射镜,使与通道 2 相应的光反射到通道 2 的缺陷中,以提高利用率。

图 5 是仿真得到的结果,在光子禁带中三个缺陷把主波导中的信号分割成三种频率的光,即从地址码  $(\lambda_0 00 \lambda_1 00 \lambda_2 00)$  中筛选识别出  $\lambda_0, \lambda_1$  和  $\lambda_2$  三个波长的

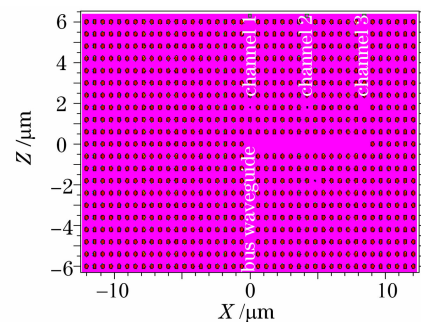


图 4 编码器截面图

Fig. 4 Profile of the encoder

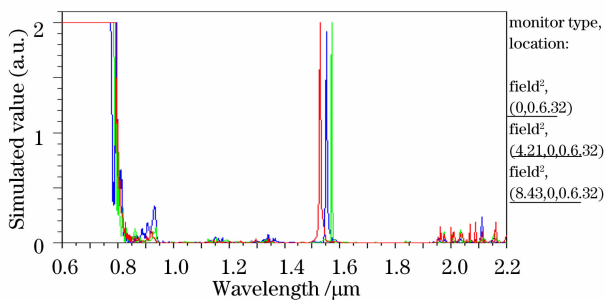


图 5 仿真结果图

Fig. 5 Results of the simulation

信号,完成编码。

如图 6 是放大后的编码信号,从图中可以看出,携带用户数据信号的光都通过光子晶体编码器完成编码,整个过程中耗损的能量极少,相比光经过 FBG 和光环形器后的损耗小了很多。三个码片的中心波长分别是 1527.70,1551.10 和 1570.00 nm,分别对应于  $\lambda_0, \lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,间隔约为 20 nm,在其中也可以加入中间缺陷的介质,使间隔更小,从而提高信道的利用率。仿真所得结果的谱宽是 0.3 nm,品质因子大于 5000。由于慢光效应,严格控制好各缺陷间的距离,可以达到光纤延迟线相同的效果,这样光子晶体就可以用于设计 2D-OCDMA 编解码器。

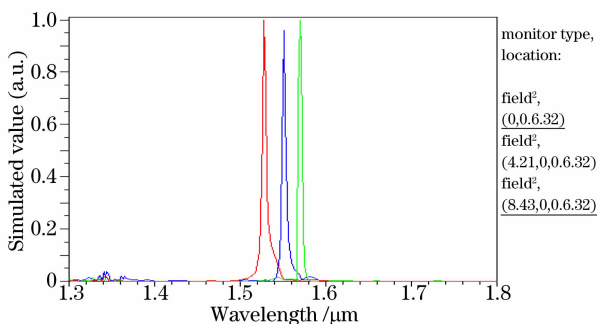


图 6 编码信号

Fig. 6 Encoded signals

图 7 是完整的光子晶体编码器,表示光信号在其中的传播和编码过程。光信号从下方主波导进入编码器,三个单频率点缺陷相当于谱片,对输入信号进行切谱后形成编码后的信号,完成编码的过程。

## 4 结 论

以光子晶体窄带滤波性能为基础,通过应用光子晶体带通滤波器和带阻滤波器,设计出基于光子晶体波导的透射型 OCDMA 系统编解码器,三个谱片对应的中心透射波长分别是 1527.70,1551.10 和

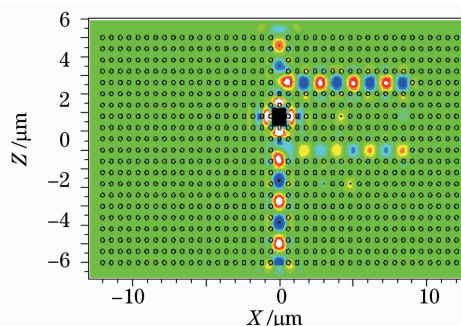


图 7 光在波导编解码器中的传输过程

Fig. 7 Process of electromagnetic transmission in the waveguide encoder

1570.00 nm,对所得结果进行分析后得出该设计的结构符合 OCDMA 系统对编解码器的性能要求。改变缺陷介质半径的大小或缺陷的折射率可以达到改变对应谱片中心透射波长的效果,这为实现可调谐 OCDMA 编解码器提供了理论基础。由于该结构中光信号是透射经过编解码器,故可以减少光环形器的使用,从而减少光传输过程中的损耗。而且该结构还可以在现有的基础上缩小缺陷半径的间距大小,以提高对信道的利用率。

## 参 考 文 献

- 1 Sajeew John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 2 Thomas F. Krauss. Two-dimensional photonic-bandgap structures operating at near-infrared wavelengths[J]. *Nature*, 1996, **383**(6602): 699~702
- 3 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 4 Yao Yuhong, Li Yanfeng, Liu Bowen *et al.*. Analysis of real photonic crystal fibers by finite difference frequency domain method combined with digital image process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1384~1389  
姚宇宏, 栗岩峰, 刘博文等. 基于图像处理的频域有限差分法用于实际光子晶体光纤的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1384~1389
- 5 Chen Libai, Guo Zhenning, Lin Jieben. Study on application of one-dimensional photonic crystal microcavity to luminescence of silicon-based material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1793~1797  
陈丽白, 郭震宁, 林介本. 一维光子晶体微腔在硅基材料发光中的应用研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1793~1797
- 6 Sangin Kim, Ikmo Park, Hanjo Lim. Highly efficient photonic crystal-based multi-channel drop filters of three-port system with reflection feedback[J]. *Opt. Express.*, 2004, **12**(22): 5518~5525
- 7 Li Chuanqi, Sun Xiaohan. Signal Code Theory for OCDMA System[M]. Anhui: University of Science and Technology of China Press, 2005  
李传起, 孙小茜. OCDMA 系统地址码理论[M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社, 2005.
- 8 Zhou Xu, Li Chuanqi, Zhu Yingchun. Investigation on optical

- code-division multiple access en/decoder and optical threshold devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(S1): 17~21
- 周 谓, 李传起, 朱迎春. 光码分多址中编解码器和阈值器件的研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(S1): 17~21
- 9 Li Chuanqi, Zhu Yingchun, Zhou Xu. Tunable encoder/decoder for optical code division multiple access networks [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1901~1905
- 李传起, 朱迎春, 周 谓. 光码分多址系统可调谐编/解码器研究[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1901~1905
- 10 Liu Jing, Zheng Zhiqiang, Feng Zhuohong *et al.*. Tunable optical filter based on two-dimensional heterostructure photonic crystal with neighboring dot-defects and curved waveguide [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 2034~2037
- 刘 璟, 郑志强, 冯卓宏等. 二维异质结光子晶体中含近邻点缺陷的弯曲波导的可调谐滤波特性[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 2034~2037
- 11 Zhen Cui, Tian Huiping, Li Changhong *et al.*. Band gap structure and filter properties of photonic crystals with GCLM defect[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(1): 101~105
- 郑 翠, 田慧平, 李长红等. GCLM 缺陷光子晶体带隙结构及滤波特性[J]. *光子学报*, 2008, **37**(1): 101~105
- 12 Wu Bin, Wang Qingkang. Highly efficient photonic crystal-based multichannel drop filters with reflection feedback[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(8): 1208~1214
- 吴 斌, 王庆康. 带反射回馈的高效光子晶体多路滤波器件[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(8): 1208~1214
- 13 Yang Guang, Liang Ruisheng, Luo Renhua *et al.*. Design of multi-channel narrow band filter with gain [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1105~1110
- 杨 广, 梁瑞生, 罗仁华等. 一种具有放大功能的多通道窄带滤波器设计[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1105~1110
- 14 Li Zhiquan, Kang Lili, Su Fengyan. Defect mode in one-dimensional photonic crystal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(5): 767~769
- 李志全, 康莉莉, 苏风燕. 1 维光子晶体缺陷模[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(5): 767~769
- 15 Cheng Xupan, Cao Quanxi. Study of complete bandgap of two-dimensional columnar photonic crystal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5): 3249~3253
- 程旭攀, 曹全喜. 二维圆柱形光子晶体的完全禁带研究[J]. *物理学报*, 2008, **57**(5): 3249~3253