

文章编号: 0253-2239(2010)s100204

基于光子晶体的二维光码分多址编解码实现研究

陈 晖¹ 李传起^{1,2} 周燕燕¹ 孙婷婷¹ 宋 标¹ 申志国¹

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

摘要 以光子晶体缺陷模理论和慢光效应为基础, 提出了一种基于光子晶体的多通道滤波器结构用于二维光码分多址(2D-OCDMA)系统编解码的方案, 并分析其编码性能。根据耦合模理论, 通过缺陷谐振腔的滤波作用, 用户光信号按地址码序列切割成多个脉冲序列, 完成对用户信号的谱域编码。由于光子晶体波导的慢光效应, 微米量级编码器结构的时延可以达到纳米量级, 达到正确编解码的标准。设计的 2D-OCDMA 三码片编码器中心波长分别为 1545.00, 1555.30 和 1570.60 nm, 缺陷间隔时延为 0.4 ns。由于透射谱几乎不存在旁瓣, 所以解码时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。

关键词 光学器件; 光子晶体; 二维光码分多址编解码器; 慢光效应; 缺陷模

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100204

Research on 2D-OCDMA Encoder/Decoder Based on Photonic Crystal

Chen Hui¹ Li Chuanqi^{1,2} Zhou Yanyan¹ Sun Tingting¹ Song Biao¹ Shen Zhiguo¹

(¹College of Mathematics and Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)
(²Electronic Engineering College, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract Based on defect mode theory and slow light effects, a new scheme of encoder/decoder in 2D-opticalcode division multiple access (2D-OCDMA) which uses multi-channel photonic crystal (PC) filter is proposed. According to couple-mode theory, user signals were cut into several pulses in accordance with the address code sequence due to the defect resonator. Then, the frequency encoded of user signal in 2D-OCDMA can be performed. Because of the slow light effects of PC waveguide, the time delay of the structure in micron magnitude is up to nanometer magnitude, which comes up to the standard of correct encoding and decoding. The centre wavelength of the three-channel encoder of 2D-OCDMA are 1545.00, 1555.30 and 1570.60 nm respectively, and the time delay between dot defects is 0.4 ns. Without sidelobe in the transmission spectrum, there is no interference in decoding, which ensures the accuracy in the process of encoding and decoding.

Key words optical devices; photonic crystal; encoder/decoder in 2D-OCDMA; slow light effect; defect mode

OCIS codes 050.5298; 060.2330; 060.2340

1 引 言

光子晶体(PC)由于其独特的控光特性^[1,2], 被认为是最有可能实现集成光路的材料。光子晶体的研究及应用主要集中于光功能器件方面, 如光子晶

体光纤^[3], 光纤布拉格光栅(FBG)等, 广泛应用于光纤通信领域。正是基于一维光子晶体的 FBG 为光码分多址^[4,5](OCDMA)的核心器件——编解码器^[6,7]提供了发展机遇, 从而使 OCDMA 成为实现

收稿日期: 2010-07-22; 收到修改稿日期: 2010-08-11

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校科研基金(20080287)资助课题。

作者简介: 陈 晖(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事光子晶体和光纤通信光码分多址方面的研究。

E-mail: ch19861986@163.com

导师简介: 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

全光网络的主流技术之一。

本文重点研究了光子晶体在 OCDMA 系统编解码器中的应用。以光子晶体的缺陷模理论^[8,9]和慢光效应^[10~12]为基础,利用光子晶体的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。根据实验所采用的自行设计的二维光正交码(OOC)码^[4,5] $(19 \times 19, 3, 1, 1)$ 中的一个码字 $\{(5, 10)(9, 11)(16, 12)\}$, 设计一个由多个光子晶体带通滤波器和利用其间距组成的编码器, 对携带用户信号进行滤波筛选, 分别在谱域和时域进行波长分割编码。相应的在切片 10, 11, 12 上设计滤波波长为 $\lambda_5, \lambda_9, \lambda_{16}$ 的点缺陷态窄带带通滤波器, 实现谱域的切割编码。各点缺陷的间距相当于切片, 在慢光效应的基础上实现时域的编码, 缺陷的个数由地址码的码重决定。由各滤波通道输出的窄带码片系列经星型耦合器分别在时域谱域二维叠加, 形成叠加信号。接收端用户收到叠加信号后, 若要恢复某个用户的数据, 用与该用户地址码匹配的二维解码器对叠加信号进行解码。仿真结果表明, 所设计的结构符合编解码器的性能要求。

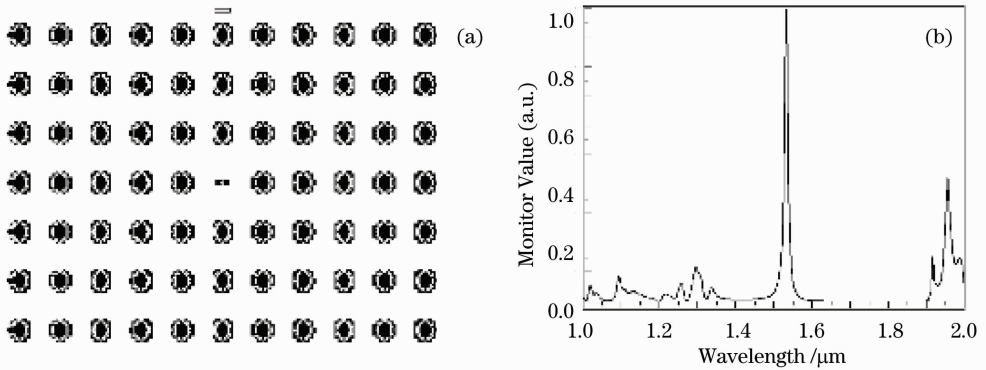


图 1 (a)光子晶体缺陷滤波器截面图; (b)光子晶体滤波器透射谱

Fig. 1 (a) Profile of filter designed by PC with defect; (b) Transmission spectrum of PC filter

表 1 仿真参量设计

Table 1 Parameters designed in the simulation

Substrates material	Shape of dielectric	Lattice type	Index of dielectric cylinder(n)	Lattice constant	Radius of dielectric cylinder(R)	Defect
air	cylindrical	square	2.983	a	$0.2 a$	Dielectric cylinder lost in the center

2.2 光子晶体波导谱域编码

基于光子晶体的窄带滤波功能,按地址序列码在相应的切片处(即 1 的位置)将用户信号切割成一系列脉冲,即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 谱域的切割编码;而在光子晶体中同时引入多个缺陷,各缺

2 光子晶体波导谱域编码

光子晶体的周期性介质分布导致禁带^[13,14]的产生,当周期性被破坏时,则会在禁带中引入相应的电磁波模式,与缺陷态频率吻合的光子有可能被局域在缺陷位置。

2.1 光子晶体滤波原理

当光在光子晶体中传播时,由于禁带效应,频率落在禁带的光是不能通过光子晶体的。改变光子晶体周期结构中某个介质柱的半径大小或折射率,就相当于在其中引入点缺陷,与点缺陷频率对应的电磁波可以通过该结构的光子晶体,从而能实现滤波功能^[14~17]。如图 1(a)所示,周期结构的中心丢失一根介质,形成点缺陷,从而在光子禁带中引入新的电磁波模式。当光信号由光子晶体下方传入时,与点缺陷频率相应的光可以通过该结构光子晶体。图 1(b)是仿真所得透射谱,透射率达到 99% 以上。由图可以看出,该结构可以实现滤波功能。表 1 是仿真所采用的参数。

陷间距可完成 OCDMA 时域的编码。解码器结构为编码器的复共轭结构^[4,5],即交换各点缺陷所在的位置。根据实验所采用的自行设计的二维 OOC 码 $(19 \times 19, 3, 1, 1)$ 中的一个码字 $\{(5, 10)(9, 11)(16, 12)\}$ 作为用户的地址码,在 3 个连续的时间切片 10, 11, 12 上把用户信号切割成 3 个中心波长为

$\lambda_5, \lambda_9, \lambda_{16}$ 的码片,经过星型耦合器后形成叠加信号,完成二维 $\lambda-t$ 的切割编码。

图 2 为光子晶体谱域编码器的设计图。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切片,完成对用户信号的切割编码。其中缺陷的位置由地址码中 1 的位置决定,缺陷个数由码重决定。设计的参量及结果如表 1,表 2 和图 3 所示,晶格常数 $a=0.602$;

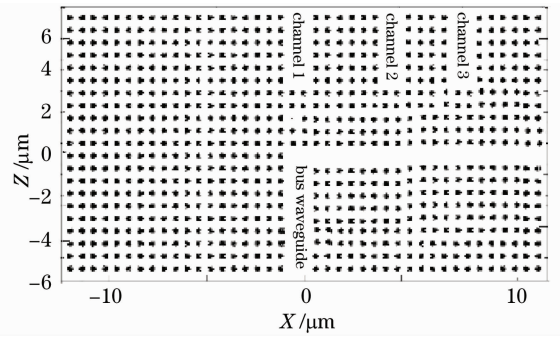


图 2 编码器截面图

Fig. 2 Profile of the encoder

表 2 仿真参量和结果

Table 2 Parameters and results of the simulation

Channel	Radius of the defect / μm	Center wavelength λ /nm	Center frequency $\omega a / (2\pi c)$	Spectrum width $\Delta\lambda$ /nm	transmittance /%
1	0.168 R	1545.00	0.38964	0.6	99.88
2	0.188 R	1555.30	0.38707	0.4	96.52
3	0.265 R	1570.60	0.38329	0.5	99.69

图 3 是仿真观测得到的结果,图中从左到右分别对应 channel 1~3。用户信号被 channel 1~3 切割成三个单独的脉冲,再经过星型耦合器后,完成谱域的编码。相比 FBGs,由于此编码器不经过环形器,且透射谱几乎没有旁瓣,所以能量损耗较少,干扰较少。在接收端,解码器必须对不同波长的光脉冲进行相匹配的延时,从而将不同波长的光脉冲耦合,恢复出用户数据信息,所以解码器只需要将各缺陷的位置进行调换,形成共轭结构即可实现正确的解码。

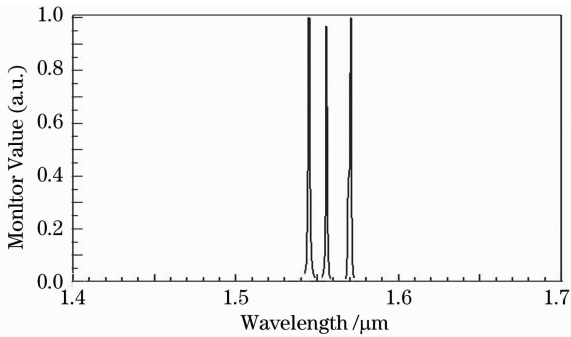


图 3 编码信号

Fig. 3 Encoded signals

3 基于慢光效应的时域编码

3.1 慢光效应

光子晶体可以通过改变结构参数实现对光子态密度和色散曲线的调制。在二维光子晶体中移除一系列介质柱,形成光子晶体线缺陷波导,禁带中产生的

平坦导模就会产生较小的群速度,即慢光。

缺陷波导中导模的群速度可以由色散曲线计算得到

$$\mathbf{v}_g = d\omega/d\mathbf{k} = c/n_g,$$

其中 \mathbf{k} 是沿波导方向的波矢, c 是真空中光速, n_g 是色散材料的群折射率。仿真采用的是平面波展开法(PWE)方法计算获得色散关系曲线 $\omega(\mathbf{k})$, 对其进行微分运算即可得到群速度 \mathbf{v}_g 。根据该式,禁带中的导模越平坦,群速度越小。

图 4(a)是带缺陷的能带结构图,图 4(b)是缺陷波导中的色散曲线图,横坐标为波矢 $k a / (2\pi)$,纵坐标表示归一化频率 $\omega a / (2\pi c)$ 。由于缺陷改变了介质的周期性结构,所以在归一化频率为 0.32~0.44 的光子禁带范围内出现了新的导模。从图中可以看出,该导模较为平坦,说明电磁波在波导结构中的传播速度比真空中光速要慢很多。

色散曲线的导数即为导模的群速度,如图 5 所示。从群速度曲线图中可以看出,在布里渊区内出现的导模光速远低于真空中的光速,在导模与布里渊区边界处,光速逐渐趋于 0,符合光子晶体的禁带理论。正是不同频率成分的光在中心为空气的光子晶体波导中传播的速度不同,造成了光子晶体波导的色散效应。光子晶体慢光效应的产生,也为基于光子晶体的各种慢光器件的应用提供了一定的理论基础,如全光通信中的光信号处理,数据缓存技术,光学传感器和全光开关等。

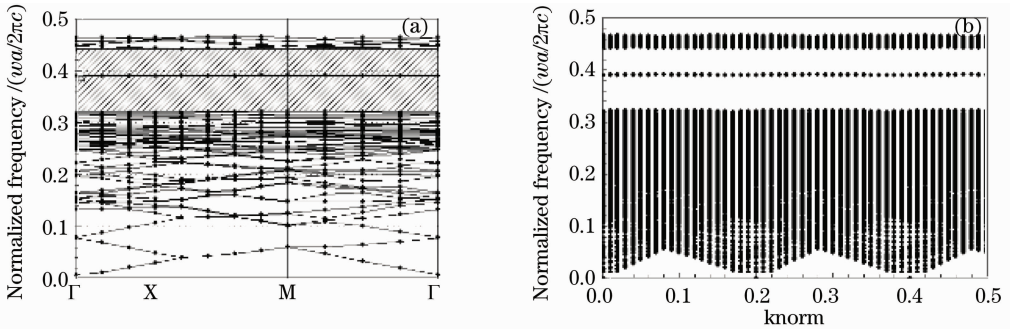


图 4 (a)能带结构; (b)色散曲线

Fig. 4 (a)Band structure; (b) Dispersion curve

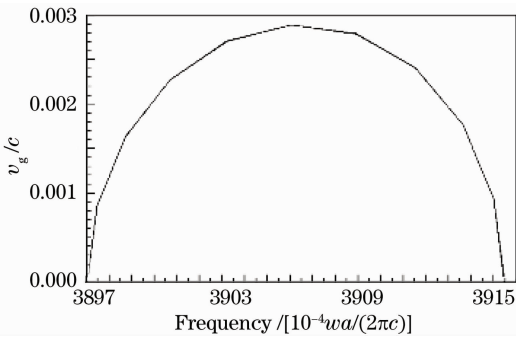


图 5 群速度曲线

Fig. 5 Group velocity curve

3.2 时域编码分析

由于光子晶体波导的慢光效应,虽然光子晶体编码器的尺寸在微米量级,但经过重复原胞单元和切割编码后的时延可以达到纳米量级,达到 OCDMA 编解码器正确编解码的时延效果。图 5 是 channel 1 的群速度曲线,要达到理想的时域编码效果,设计的编码器滤波通道的间距应该较大。图 2 所示编码器结构采用的原胞是 7×7 的结构,两个滤波编码结构之间没有重复的原胞,实际上为了达到波形不重叠的效果,仿真时切割编码结构之间还有 9 个重复的原胞。经过仿真和计算后,各个通道的具体的时延如表 3 所示。

表 3 时延结果

Table 3 Time delay

Channel	1	2	3
Time /ns	0.4	0.8	1.2
Time delay /ns	0.4	0.4	

综合以上可得,三个滤波通道间距的时延都是 0.4 ns,正好符合地址码序列 $\{(5,10)(9,11)(16,12)\}$ 中时间片的比例 1:1,其中在切片 10,11,12 处的波长 $\lambda_5, \lambda_9, \lambda_{16}$ 分别为 1545.00, 1555.30 和 1570.60 nm,切片间时延为 0.4 ns。由此亦可看出,此设计结构符合 2D-OCDMA 编解码的性能要求。本文仿真以

二维 OOC 码 $(19 \times 19, 3, 1, 1)$ 为例,说明了基于光子晶体波导和慢光效应的二维 OCDMA 编解码器是可行的,其中缺陷对应于码字中“1”的位置,缺陷个数相当于码重。当用户的地址码改变时,可以相应的改变该结构中缺陷的个数(必要时可增加原胞个数)和缺陷位置,从而满足多用户的需要。

4 结 论

以光子晶体缺陷模理论和慢光效应为基础,设计出透射型基于光子晶体波导的 2D-OCDMA 系统编解码器,三个谱片对应的中心透射波长分别是 1545.00, 1555.30 和 1570.60 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。由于该结构中光信号是透射经过编解码器,因此可以减少光环形器的使用,从而减少光传输过程中的损耗。只需要改变缺陷介质半径的大小,对应谱片的中心透射波长也将随之改变,也可以改变缺陷的折射率从而达到改变中心透射波长的效果。为实现可调谐的 2D-OCDMA 编解码器,一种方法是引入微机电系统(MEMS),通过改变缺陷介质的位置和半径来实现时域和谱域的可调谐二维编解码。另外,由于液晶在加上外电场时会导致其折射率发生改变,利用此特性可以利用液晶材料制作成周期性排列的液晶光子晶体结构,通过改变外加电场来改变某部分液晶的折射率,形成折射率改变的缺陷,以此来完成时域和谱域的可调谐二维编码,增强 OCDMA 系统编解码的可变址能力。

参 考 文 献

- 1 Sajeev John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(23): 2486~2489
- 2 Eli Yablonovitch. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, **58**(20): 2059~2062
- 3 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, 栗岩锋, 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
- 4 Li Chuanqi, Sun Xiaohan. Signal Code Theory for OCDMA System [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005
- 李传起, 孙小茜. OCDMA 系统地址码理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2005
- 5 Li Chuanqi, Li Xiaobin. OCDMA in Optical Fiber Communication System [M]. Beijing: Science Press, 2007
- 李传起, 李晓滨. 光纤通信 OCDMA 系统[M]. 北京: 科学出版社, 2007
- 6 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**(6): 17~21
- 周 谔, 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**(6): 17~21
- 7 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 谔. 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
- 8 Li Zhiqian, 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. 一维光子晶体缺陷模[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(5): 767~769
- 9 Chen Libai, Guo Zhengning, 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
- 10 Lu Hui, Tian Huiping, Li Changhong *et al.*. Research on new type of slow light structure based on 2D photonic crystal coupled cavity waveguide [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(3): 2049~2055
- 鲁 辉, 田慧平, 李长红等. 基于二维光子晶体耦合腔导的新型慢光结构研究[J]. *物理学报*, 2009, **58**(3): 2049~2055
- 11 Du Xiaoyu, Zheng Wanhua, Zhang Yejin *et al.*. High transmission of slow light in the photonic crystal waveguide bends [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(11): 7005~7011
- 杜晓宇, 郑婉华, 张冶金等. 慢光在光子晶体弯折波导中的高透射传播[J]. *物理学报*, 2008, **57**(11): 7005~7011
- 12 Zhang Man. Study on the Properties of Band Gap and Waveguide Slow Light in Two Dimensional Photonic Crystal[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009, 33~42
- 张 曼. 二维光子晶体带隙及波导慢光特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009, 33~42
- 13 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
- 14 Zhen Cui, Tian Huiping, Li Changhong. 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
- 15 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
- 16 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
- 17 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