

# 光子晶体光纤及其应用\*

赵玲慧 魏志义†

(中国科学院物理研究所 中国科学院光物理重点实验室 北京 100080)

**摘要** 光子晶体作为一种新兴的材料,将会对整个光子学和光子产业领域产生深远的影响,而其最重要的应用之一——光子晶体光纤已经在很多科研技术领域得到了应用.文章综述了光子晶体光纤的研究进展,给出其分类,并重点介绍了光子晶体光纤在超短脉冲、光频测量、光纤通信等科研领域的重要应用以及未来的发展前景.

**关键词** 光子晶体光纤,飞秒激光,超边疆光谱

## Photonic crystal fiber and its applications

ZHAO Ling-Hui WEI Zhi-Yi†

(Key Laboratory of Optics Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** As an important new material photonic crystals will have a great impact on the entire photonic industry. Photonic crystal fiber( PCF ) has already found application in many scientific and technological research fields. We review the development of PCF and its different types ,focussing on its important applications in ultrashort pulse lasers ,optical frequency metrology and fiber communications ,as well as future prospects.

**Key words** photonic crystal fiber , femto-second pulse , super-continuum spectrum

### 1 引言

自1987年John和Eyblovitch等人提出光子晶体(photonic crystal)的概念以来<sup>[1,2]</sup>,有关这个领域的研究得到了越来越多的关注.正如同半导体材料在晶格结点周期性的出现离子分布一样,光子晶体是指在光波尺度下人为地由高折射率材料(比如SiO<sub>2</sub>)的某些位置上制造周期性分布的低折射率材料(比如空气孔)而形成的晶体,通过人为控制高低折射率材料的不同结构分布可以产生不同的类似于半导体禁带光子频率禁带(photonic band gap, PBG)宽度,从而对入射光波进行选择性的传输.

光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)是基于光子晶体技术发展起来的新一代传输光纤.由于光子晶体光纤结构的可控性可以满足人们对于不同信号传输特性的PCF的需要,因此引起了很多相关

科研领域的极大兴趣.光子晶体光纤的概念最早是由Russell St J P等人于1992年提出的.作为创始人,他们当初是在如何通过光纤将光子晶体技术与光子能带技术联系起来的奇思妙想中引发研究兴趣的;“那简直是一种令人无法想象的困难,几乎没有人认为这是可能的,因为你要在微米的尺度上营造出多孔结构,但是,最终我们取得了成功”,1996年Russell St J P和他的组员Knight J C<sup>[3]</sup>等人首次在实验室成功制作出光子晶体光纤,随后各种不同结构的光子晶体光纤相继产生.

相对于传统光纤而言,光子晶体光纤开创了完全不同的光波传播原理,并且其性能也有很大的不同.它利用光子晶体所具有的光子频率禁带特性将特定频率的光波强烈地束缚在纤芯内进行传导,光

\* 国家自然科学基金(批准号60225005,10227401)资助项目

2003-05-20收到初稿 2003-12-15修回

† 通讯联系人. E-mail: zywei@aphy. iphy. ac. cn

纤弯曲或折叠状态对传输光波的影响非常小<sup>[4]</sup>,并且在几乎所有的传播波长处都能够保持单模运转<sup>[5]</sup>,且其零色散波长从传统光纤的红外波段移到了可见光波段<sup>[4]</sup>,这对于光纤通信领域而言无疑是一种莫大的福音.另一方面,利用光子晶体光纤的非线性效应在低于传统光纤三个量级的脉冲峰值功率下就可以产生光谱覆盖紫外到红外的超连续光,这在光频率测量、极短脉冲的产生、抽运探测光谱学等领域的研究中有极其重要的作用.

## 2 光子晶体光纤

### 2.1 光子晶体光纤的工作原理及制作工艺

我们知道,传统的光纤是以高折射率材料作为纤芯,以低折射率材料作为包层,利用高低折射率介质间形成的全反射原理而将光局限在高折射率介质中进行传播,因此光的能量传递、色散效应、可弯曲程度等都会因为光源的色散品质而受到限制.

光子晶体光纤属于带有线缺陷的二维光子晶体,它与传统光纤有着完全不同的结构与传输机理.光子晶体光纤一般是以 SiO<sub>2</sub>-空气孔呈周期性排列的光子晶体作为光纤包层,人为引入打破周期排列的缺陷(SiO<sub>2</sub>或空气孔)作为纤芯,这样,光波从纤芯耦合进光纤,由于包层光子频率禁带的存在,落入其中的光波频率被完全反射回来,只能在纤芯附近传播,从而没有额外的能量损失.图1给出了传统光纤与光子晶体光纤的结构示意对比图.图2为两种不同导向机制结构的光子晶体光纤,具体的导光原理可参阅文献[6].

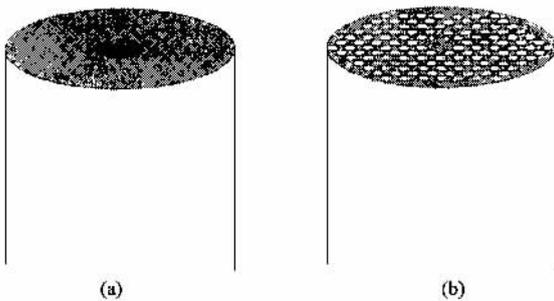


图1 传统光纤与光子晶体光纤的结构对比 (a)传统光纤;(b)光子晶体光纤

由于目前二维光子晶体的制作已经相当成熟,因此光子晶体光纤的制作工艺也并不困难.一般是按照预先设计的结构参数,在一定尺寸的石英套管内排入毛细管(空心石英柱)作为包层,中心用实心

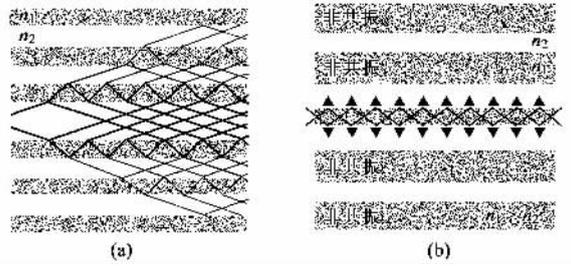


图2 两种不同导向机制结构的光子晶体光纤 (a)受损隧道PBG效应导向型光子晶体光纤 (b)布拉格PBG效应导向型光子晶体光纤

的 SiO<sub>2</sub> 棒或者抽去几根毛细管作为纤芯制成预制棒,然后用制作普通光纤的拉丝机在 2000℃ 左右的温度下拉丝成型.对不同结构参数的光子晶体光纤应设定不同温度,以保证结构形状不变形.

### 2.2 光子晶体光纤的性能

光子晶体光纤的结构决定了其与传统光纤有着不同的性能.首先,光子频率禁带的传输机理使得光纤的传输损耗大大降低.贝尔实验室的研究人员已经证实,光子晶体光纤的弯曲对损耗的影响极小,即使在弯曲直径为 0.5cm 的状态下对短于 1600nm 的波长损耗也完全可以忽略<sup>[4]</sup>.

其次,光子晶体光纤的截止波长很短,可在 300—1600nm 的波长范围内维持单模运转,而传统单模光纤的截止波长都在 1000nm 以上,并且带宽很窄.这样,对于采用波分复用技术的光纤通信系统而言,光子晶体光纤替代普通单模光纤必将成为未来发展的趋势.

第三,光子晶体光纤将反常色散区域从红外波段拓宽到了可见光波段,可以实现 500—1300nm 波段的零色散波长运转,这也是传统光纤所无法企及的(如图3所示).实验证明,增加空气孔在包层周期性结构中的占有比例或者改变纤芯的尺寸,就可以使零色散波长向短波方向移动.这样,结合当今通用的锁模 Ti:sapphire 激光器输出的飞秒脉冲,就可以实现中心波长在 800nm 左右的光孤子传输. Wadsworth 等人于 2000 年在长达 3.1m 的光子晶体光纤中观测到了 850nm 的光孤子输出<sup>[7]</sup>.图4为他们的实验结果.其输入的脉冲宽度为 200fs,在输入功率较低的情况下,群速色散效应将占主导地位,将脉冲展宽到 800fs 左右,随着输入功率的增高,自相位调制效应的作用明显表现出来,在与群速色散效应相互平衡的过程中,140fs 的孤子脉冲产生并从光子晶体光纤输出.如果继续增加输入脉冲的功率,即在非

线性自相位调制效应大于群速色散效应的情况下,输入脉冲在传播过程中会经历先变窄后加宽再复原的过程,这正是高阶孤子的传输特性.图4中内嵌图像的宽脉冲是输入脉冲功率为0.11mW时的输出脉冲,窄脉冲是输入功率为1.35mW时的输出脉冲.

第四,光子晶体光纤的全波段单模运转并不受传统光纤的单模运转对芯径的要求,也就是说,光子晶体光纤可以在大模面积的芯径下维持单模运转.英国南安普顿大学和 Bath 大学制作的一种光子晶体光纤的芯径已经达到 22.5 $\mu\text{m}$ ,这几乎是传统单模光纤芯径的 10 倍!但是光纤仍然可在大于 458nm 的波长范围内保持单模运转.很明显,这样大的芯径可以实现高功率传输而不易导致传输信号发生畸变.

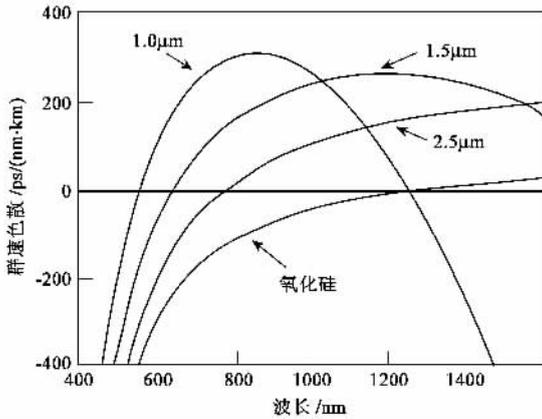


图3 不同芯径尺寸的光子晶体光纤对应不同零色散波长

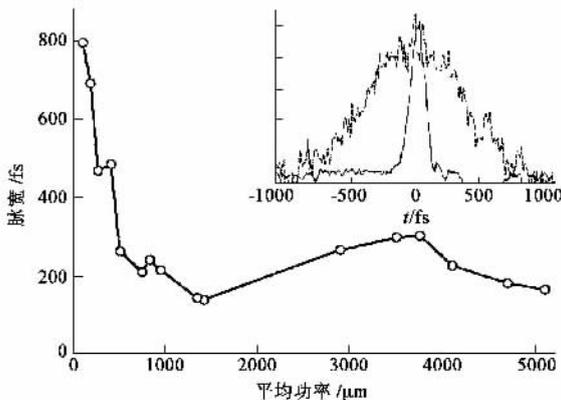


图4 光子晶体光纤输出光孤子示意图

### 2.3 光子晶体光纤的分类

#### 2.3.1 全反射导入式光子晶体光纤

这种光纤是光子晶体光纤发展的第一种类型<sup>[5]</sup>,是目前研制最为成功的一种.其结构类似于

传统光纤,只是包层结构做了改变.光纤的纤芯是没有空气孔的二氧化硅棒,光纤横截面上的空气孔周期性分布为三角形或蜂窝状结构,这样空气孔空缺陷形成线缺陷,落入光子禁带的光波将被束缚在这里进行传导.因为纤芯的折射率仍然大于包层,所以这种光纤的导光方式仍然是传统的反射式.

尽管这种光子晶体光纤在结构上与传统光纤极为接近,但仍然表现出了极为不同的性能.如果将其纤芯尺寸做得足够小(一般都在 2 $\mu\text{m}$ 左右),超短脉冲在传播过程中将与纤芯相互作用表现出非常明显的非线性现象,许多非线性效应如光孤子的产生<sup>[8]</sup>、拉曼散射<sup>[9]</sup>、自陡峭现象<sup>[10]</sup>都已经被观察到.无疑,这为研究非线性过程创造了一个良好的研究对象.

不过,到目前为止,这种光纤最引人注目的应用还是超宽带连续光的产生<sup>[11-14]</sup>.通常采用传统单模光纤产生这种超连续光需要兆瓦级(10<sup>6</sup>W)的脉冲峰值功率或毫焦量级(10<sup>-3</sup>J)的脉冲能量,但是对于光子晶体光纤而言,微焦耳量级(10<sup>-6</sup>J)的能量就足以在其中产生自相位调制、四波混频、二次谐波以及拉曼放大等非线性效应.一束能量仅为 nJ 的飞秒光脉冲在光子晶体中传播一定长度就能够产生波长分布范围达 400—1600nm 的超宽平坦光谱(如图 5 所示).3 个量级的差别对于超短脉冲激光系统的简化是不言而喻的.这样将钛宝石谐振腔输出的飞秒脉冲直接耦合入光子晶体光纤就可以产生超连续光谱.

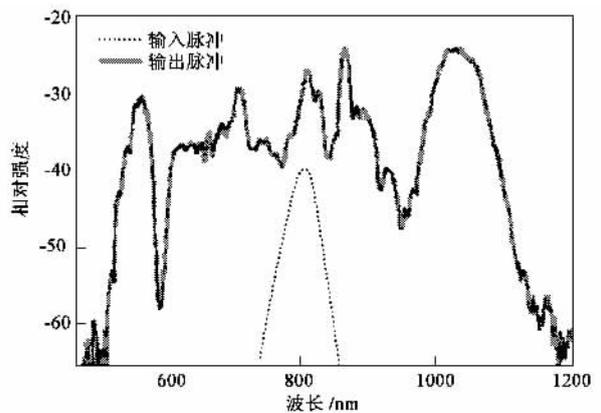


图5 光子晶体光纤产生的超连续光谱

#### 2.3.2 PBG 效应导入式光子晶体光纤

PBG 效应即为光子禁带效应.在光子晶体光纤的发展中,真正利用 PBG 效应实现光导入是在 1998 年由 Knight 等人完成的<sup>[15]</sup>,这也是光子晶体光纤发

展的第二种类型,其结构如图6所示.这种光纤与全反射式光子晶体光纤最大的不同就是纤芯引入了折射率低于包层材料的空气孔缺陷,因此光的导入就不可能利用全反射原理,而必须完全借助于光子禁带效应.不同于传统光纤,在这里光是在空气孔中而非石英中传播.特定频率的光场以各不相同的角度进入光纤遇到光子禁带时无法穿越而被反射回来,因此只能沿着空气通道前进.

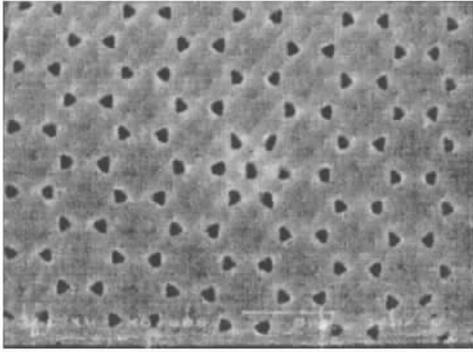


图6 PBG效应导入式光子晶体光纤

很明显,从理论上讲这种空心光纤的结构克服了传统单模光纤传输光脉冲的缺陷.由于光脉冲是在空气孔中传输,则作为材料属性的吸收、色散,以及非线性效应已经不复存在,这样,光纤对于传输信号的损耗以及失真的影响都非常小,这对于光纤通信研究领域无疑是一种福音.但是由于制作工艺上的原因,这种结构目前被证实还存在较高的损耗并且传播的带宽非常窄.

1999年,Cregan等人在Knight的基础上,设计了另外一种结构的光子光纤<sup>[16]</sup>.他们将一堆外径为1mm的空心玻璃柱绑在一起,然后在整体的堆积中心省去7根玻璃柱,形成很大的空气孔缺陷作为光通道.其结构如图7所示.这种结构决定了光波更容易耦合入光纤,而且导入光与纤芯材料的相互作用受到压制,与传统光纤相比,传递功率则有大幅度提高且无色散效应,这对于光纤通信系统中信号强度以及真度的保证是非常重要的.

可以看出,这两种不同类型的光子晶体光纤是互补存在的.全反射导入式光纤对于非线性过程的研究提供了一个很好的对象,而PBG效应导入式光纤则是弱化了非线性过程,对于光纤通信领域的研究是非常重要的.

### 3 光子晶体光纤的应用

#### 3.1 极短光脉冲的产生

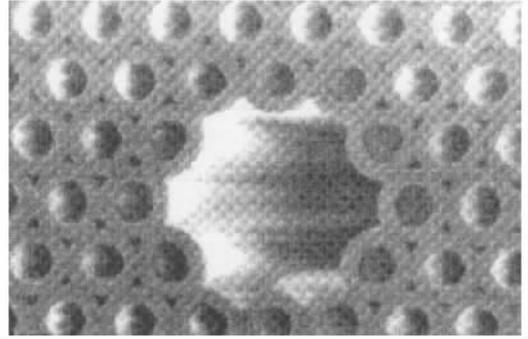


图7 改进式PBG效应导入式光子晶体光纤

光子晶体光纤最直接的应用是扩展飞秒激光的光谱.根据傅里叶变换关系,越宽的频谱分布将支持越短的脉冲宽度.如果能将利用光子晶体光纤产生的超连续光谱的相位完全补偿,则在理论上可以支持短至将近1fs( $10^{-15}$ s)的超短脉冲激光!但是,由于其复杂的光谱展宽过程导致了脉冲相位的紊乱,实现相位的完全补偿仍然需要更为深入的研究.不言而喻,如果这一技术得到突破,这种极短脉冲的获得又将给飞秒激光领域带来新的冲击.

#### 3.2 相干光断层成像术

相干光断层成像术(optical coherence tomography, OCT)是一种应用在生物或者医学上的对于微米量级的生物组织的横截面进行观测记录的新型成像技术.由于OCT对物体的纵向分辨率反比于探测光脉冲的光谱宽度,因而利用光子晶体光纤获得的超宽带连续光谱就可以提供很高的分辨率.标准的以超发光二极管作为光源的OCT系统的纵向分辨率只有10—15 $\mu$ m,而采用了光子晶体光纤获得的超宽带连续光谱作为光源的纵向分辨率可以达到1 $\mu$ m左右<sup>[17]</sup>.2000年,Hartl等人利用锁模钛宝石激光脉冲通过光子晶体光纤产生的超连续光谱作为OCT的光源,对生物组织的纵向分辨率达到了2 $\mu$ m<sup>[18]</sup>,这使得人类对于生物的观测认知水平提高了很多.

#### 3.3 光频测量

光子晶体产生的超连续光谱在光频测量上有着极其重要的应用<sup>[19—22]</sup>,可以毫不夸张地说,正是光子晶体光纤所产生的倍频程(包含基频和倍频)宽度的超连续光谱在飞秒激光相干控制方面的重要应用,从而引发了光频标历史上最具革命性的研究进展.在此之前的光频测量中,需要借助于数目繁多且庞杂的频率链的分布将光频转化到微波频段才可以进行测量.以光子晶体光纤为基础的飞秒频率梳可以将光频与微波频标直接联系起来,从而使光频测

量系统得到了前所未有的简化.此外,由于光波的频率高于微波频率5个数量级,因此利用光频标可以得到高于微波标准的时间精度.

### 3.4 光纤通信

如前所述,光子晶体光纤在通信领域的应用是非常有前途的,尤其是对于长途通信系统.其特殊的结构所带来的优越性是传统光纤所不能比拟的:极低的损耗保证了信号的长距离传输;极低的非线性效应保证了信号的真度;全波段的单模运转为波分复用系统提供了充足的信道资源;零色散波长的人为控制避免了信号的相互串扰.

应该说,对于大规模使用光子晶体光纤而言,这种适合于通信系统的PBG效应导入式光子晶体光纤应该更有研究价值.但是因为理论与实际工艺的差别,目前使得这种光纤的传输损耗比普通单模光纤还要高,1.55 $\mu\text{m}$ 和1.38 $\mu\text{m}$ 波长的损耗分别为1dB/km和2dB/km.损耗的主要原因是瑞利散射和OH<sup>-</sup>吸收.相对而言,全反射导入式光子晶体光纤的传输损耗却已经达到很低的水平,1.55 $\mu\text{m}$ 波长的损耗已经达到0.7 dB/km.但是无论怎样,PBG效应导入式光子晶体光纤对于光纤通信领域仍然具有极强的吸引力,只是还有一段路要走.

## 4 结语

光子晶体的诞生,预言了光子时代的到来,已经引起了学术界的广泛重视.光子晶体光纤作为光子晶体最重要的应用,其拥有的传统光纤所不具备的特性更预示了它广泛的应用前景.作为新兴的技术,PCF正处于迅速发展之中,许多设想要成为现实还

需要克服很大的困难,但是我们相信,在不远的将来,光子晶体光纤对于科学技术乃至整个社会生活的进步都将做出有意义的贡献.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] John S. Phys. Rev. Lett. ,1987 58 2486
- [ 2 ] Yablonovitch E. Phys. Rev. Lett. ,1987 58 2059
- [ 3 ] Knight J C , Birks T A *et al.* Optics Lett. ,1996 21 1547
- [ 4 ] Ranka J K , Windeler R S *et al.* Optics Lett. ,2000 25 796
- [ 5 ] Birks T A , Knight J C *et al.* Optics Lett. ,1997 22 961
- [ 6 ] 刘思敏,陈晓虎,汪大云等.物理,2001,30 :675[ Liu S M , Chen X H , Wang D Y *et al.* Wuli( Physics ) ,2001 30 :675 ( in Chinese )]
- [ 7 ] Wadsworth W J *et al.* Electron. Lett. ,2000 36 53
- [ 8 ] Husakou A V , Herrmann J. Physics. Rev. Lett. ,2001 87 : 203901-1
- [ 9 ] Coen S. Chau A H L *et al.* J. Opt. Soc. Am. B ,2002 ,19 : 753
- [ 10 ] Ranka J K , Windeler R S *et al.* Optics Lett. ,2000 25 25
- [ 11 ] Herrmann J , Griebner U *et al.* Phys. Rev. Lett. ,2002 ,88 : 173901
- [ 12 ] Jinendra K R. Optics & Photonics News 2000 8 21
- [ 13 ] Dudley J M *et al.* J. Opt. Soc. Am. B 2002 ,19 765
- [ 14 ] Wadsworth W J , Blanch A O *et al.* J. Opt. Soc. Am. B , 2002 ,19 2148
- [ 15 ] Knight J C , Broeng J *et al.* Science ,1998 282 1476
- [ 16 ] Cregan R F , Mangan B J *et al.* Science ,1999 285 1537
- [ 17 ] Drexler W , Morgner U *et al.* Opt. Lett. ,1999 24 1221
- [ 18 ] Hartl I , Li X D *et al.* Opt. Lett. ,2001 26 608
- [ 19 ] Jone D J , Diddams S A *et al.* Science 2000 288 635
- [ 20 ] Diddams S A , Udem T *et al.* Science 2001 293 862
- [ 21 ] Diddams S A , Jone D J *et al.* Physics. Rev. Lett. ,2000 84 : 5102
- [ 22 ] Holzwarth R , Udem T *et al.* Phys. Rev. Lett. 2000 85 2264

## 封 面 说 明

具有一定能量的飞秒脉冲激光通过透明介质时,由于自相位调制效应,将会产生光谱展宽.近年来,将能量不到nJ的飞秒掺钛蓝宝石激光脉冲耦合到多孔结构的光子晶体光纤中,同样可以产生覆盖可见光波段的宽带超连续光谱.这种效应主要得益于光子晶体光纤近亚微米的芯径和与入射激光相近的零色散波长.我们在采用钛宝石激光实现超连续展宽的基础上,将锁模波长1250nm的飞秒Cr:Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>激光耦合进零色散波长与其完全不同的光子晶体光纤后,观察到非连续的超宽光谱.封面的彩图显示了钛宝石激光(彩色图)和Cr:Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>激光(蓝色图)经同样的光子晶体光纤后的光谱照片和光束照片,后者同时也显映出了光子晶体光纤中心的结构(左面的方图为实际结构的放大照片).坐标图为Cr:Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>激光展宽后的相应光谱曲线,在较强的几个谱带中,除了中心波长短于种子光的宽带1163nm光谱外,还伴随有三条满足亚谐波关系的窄带光谱,其中心波长分别为459nm( $\omega$ )、918nm( $\omega/2$ )及1373nm( $\omega/3$ ),这表明除了自相位调制外,还存在拉着拉曼效应、参量、倍频等多种需要进一步深入研究的非线性过程.

(中国科学院物理研究所 魏志义)