

# 光子晶体光纤非线性特性的研究\*

王清月<sup>†</sup> 栗岩锋 胡明列 柴路

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室 光电信息技术科学教育部重点实验室 天津 300072)

**摘要** 光子晶体光纤是近年来出现的一种通常由单一介质构成,并由波长量级的空气孔构成微结构包层的新型光纤.文章介绍了光子晶体光纤的制作工艺、工作原理、基本特性、目前的研究重点和进展情况,重点评述了光子晶体光纤非线性特性方面的研究,特别是在超连续光谱的产生、光孤子效应以及频率变换等方面的实验和理论成果以及潜在的应用.

**关键词** 光子晶体光纤,微结构光纤,多孔光纤,非线性,超短脉冲

## Nonlinear properties of photonic crystal fibers

WANG Ching-Yue<sup>†</sup> LI Yan-Feng HU Ming-Lie CHAI Lu

(Ultrafast Laser Laboratory, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Key Laboratory of Opto-electronics Information and Technical Science (Tianjin University) Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Photonic crystal fibers are a new class of single-material optical fibers with wavelength-scale air holes running down the entire length. The manufacture, principle of operation, basic properties and applications of photonic crystal fibers are briefly described. A detailed review of nonlinear effects in photonic crystal fibers is presented, with emphasis on supercontinuum generation, the soliton effect and frequency conversion, as well as the possible applications of these effects.

**Key Words** photonic crystal fiber, holey fiber, microstructured optical fiber, nonlinear effects, ultrashort light pulses

### 1 引言

光子晶体光纤<sup>[1]</sup>( photonic crystal fiber, PCF )是近年来出现的一种通常由单一介质构成(常用熔融硅或聚合物),并由在二维方向上紧密排列(常为周期性六角形)而在第三维方向(光纤的轴向)保持不变的波长量级的空气孔构成微结构包层的新型光纤.

光子晶体光纤的概念源自于光子晶体( photonic crystal ),目前研究上已经取得了很多进展<sup>[2-4]</sup>.光子晶体的概念最早由 Yablonovitch<sup>[5]</sup>和 John<sup>[6]</sup>于1987年分别提出.光子晶体与半导体领域的晶体性质类似<sup>[7]</sup>.晶体中原子的有序排列形成了周期势场,当电子在周期势场中传播时,由于受到势场的

布拉格散射而产生能带结构,在带与带之间可能存在着带隙.如果电子波的能量落在带隙中,则不能传播.能带及带隙结构控制着电子或空穴的运动.光子晶体就是将不同介电常数的介质材料在一维、二维或三维空间内组成具有光波长量级的周期结构,使得在其中传播的光子形成光子带隙( photonic bandgap ),频率落于此带隙中的光子将被禁止在光子晶体中传播.如果任何偏振的光都不能在带隙中传播,那么此带隙就称为完全光子带隙.当在光子晶体中引入缺陷使其周期性结构遭到破坏时,光子带

\* 国家自然科学基金(批准号 60278003)、国家重点基础研究发展计划(批准号 2003CB314904)和国家高技术研究发展计划(批准号 2003AA311010)资助项目

2004-06-11 收到初稿 2004-08-11 修回

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: chywang@tju.edu.cn

隙就形成了具有一定频宽的缺陷态或局域态,而具有特定频率的光波可以在这个缺陷区域中传播,因此光子晶体就可以控制光在其中的传播行为.同样,倒格子、布里渊区、布洛赫原理等同样能够引入光子晶体理论中.

光子晶体自提出以来,就成为国际上研究的热点,并取得了许多研究成果,但是在可见光和近红外波段实现光子带隙需要亚微米的晶格长度<sup>[7]</sup>,对制备工艺提出了严格要求.此外,在二维光子晶体研究中,人们常常关注电磁波在周期结构的平面内(in-plane)传播时的光子带隙情况,此时在六角形晶格中产生完全光子带隙的两种介质的折射率之比不低于 $2.66^{[8]}$ .英国 Bath 大学的 Russell 小组研究发现,当考虑到电磁波在垂直于二维光子晶体平面的方向(out-of-plane)上有一传播常数 $\beta$ 时,如果 $\beta$ 足够大,采用空气孔嵌在熔石英( $\text{SiO}_2$ )的六角形晶格就能够产生完全的光子带隙<sup>[9]</sup>.据此,他们在 1996 年报道了第一根光子晶体光纤<sup>[1]</sup>,光纤的结构和模式花样分别如图 1(a)(b)所示.

光子晶体光纤通常采用的制作工艺是所谓的堆拉法(stack-and-draw)<sup>[1]</sup>.首先按照设计结构制作预制棒.将石英管外壁磨成六角形状,抛光后按照预先设计尺寸要求拉丝,然后规则排列毛细管,同时中心用 $\text{SiO}_2$ 棒或者抽去一根或几根毛细管来形成纤芯.然后将预制棒采用一步或两步拉制成光纤,并涂覆保护层.

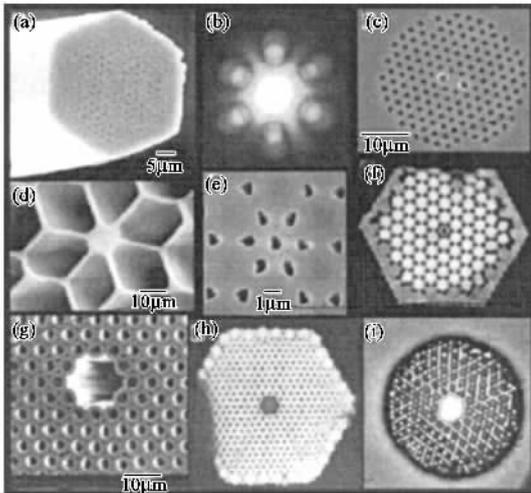


图 1 不同结构的光子晶体光纤<sup>[2]</sup>

实验发现第一根报道的光子晶体光纤并没有期望的光子带隙效应,实现光传输的原理被解释为全内反射<sup>[1]</sup>.传统光纤通过掺杂使得纤芯折射率高于

包层的折射率从而实现全内反射,而实芯的光子晶体光纤仅由一种材料构成,包层为空气孔和熔石英所形成的微结构,其有效折射率<sup>[10]</sup>低于纤芯的折射率,因而能够满足全内反射原理[图 2(c)].这种新的机理被称为改进的全内反射(modified total internal reflection)<sup>[2]</sup>.相应的光纤也被称为折射率引导型光子晶体光纤(index-guiding PCF)或全内反射光子晶体光纤(TIR-PCF).与空芯波导不存在全内反射[图 2(a)]不同的是,理论上具有光子带隙效应的光子晶体光纤能够在低折射率的纤芯内实现低损耗的光传输[图 2(b)],这种光纤也称为光子带隙光纤(photonic bandgap fiber).为了实现真正的光子带隙效应,Broeng 等理论研究<sup>[12]</sup>发现,采用图 1(c)中的蜂巢结构能够极大地增加光子带隙的宽度,并报道了第一根依赖光子带隙效应实现光传输的光子晶体光纤<sup>[13]</sup>,而且因为带隙的存在,当用白光入射时出射的模式呈现彩色[图 1(f)].蜂巢结构的光子晶体光纤的光场并不分布在纤芯中的空气孔缺陷中,而是分布在其周围的熔石英区域.通过抽去六角形结构光子晶体光纤中心的 7 根毛细管来形成纤芯,实现了真正的在空气芯中传输的光子带隙光纤[图 1(g)]<sup>[14]</sup>,图 1(h)是在白光入射时的光纤模式.

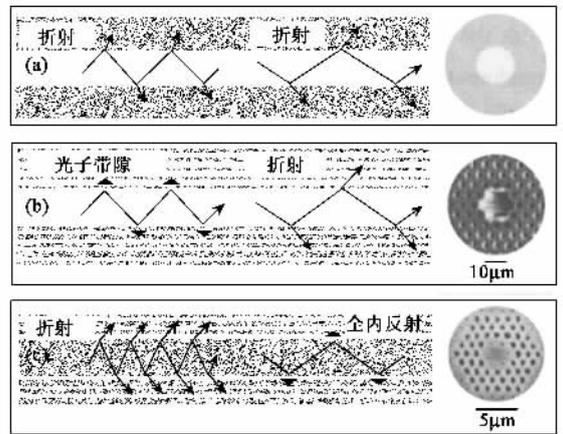


图 2 光传输的几种机理<sup>[11]</sup>

英国 Bath 大学和丹麦工业大学等早期开展的光子晶体光纤的研究工作在理论和实验上都获得了巨大成功,而且以这两所大学的研究小组为依托分别成立的 Blazephotonics 和 Crystal-fibre 公司已有产品上市.在最近三四年间,随着国际上更多的公司和研究小组加入到这一热点课题的研究中,新的研究成果不断涌现,光子晶体光纤的内容更加丰富.同

时,国内有很多单位也加入到光子晶体光纤的研究中.天津大学与燕山大学<sup>[15-18]</sup>和清华大学与北京玻璃研究院<sup>[19]</sup>拉制的光纤及其特性的研究已见报道.

光子晶体光纤通常由单一材料构成及包层中的空气孔微结构已经超出了传统光纤光学<sup>[20,21]</sup>的范畴,同时也具有不同于甚至优于传统光纤的特性,为克服传统光纤发展中的一些技术障碍提供了可能的解决途径.这些特性主要包括<sup>[2-4]</sup>:宽带单模<sup>[10]</sup>、可见光波段具有反常色散<sup>[22]</sup>、可控的模式面积<sup>[23]</sup>、高双折射<sup>[24]</sup> [如图 1(c)]、容易拉制多芯结构<sup>[25]</sup>等.目前,光子晶体光纤的研究内容非常丰富,主要包括对光子晶体光纤本身模式特征的进一步研究和认识;光子晶体光纤各种材料和晶格结构 [如图 1(f)的 Kagomé 晶格] 的研究;光子晶体光纤器件方面的研究;光子晶体光纤作为传输介质的线性和非线性效应的研究等.光子晶体光纤一些新颖的应用研究包括在空芯光子晶体光纤中利用激光束悬浮和操纵微粒<sup>[26]</sup>,在光子晶体光纤包层空气孔中填入聚合物、液晶或液体等构成的可调器件<sup>[27,28]</sup>,利用两根光子带隙光纤构成光学二极管<sup>[29]</sup>等.

特别需要指出的是,研究发现折射率引导型光子晶体光纤包层中空气孔的周期排列不是必要的,随机排列足够多的空气孔也能够有效降低包层的折射率,实现改进的全内反射<sup>[30]</sup>.因此,这种光纤已经不同于早期提出的空气孔周期排列的光子晶体光纤,为了突出包层中排列有波长量级的空气孔的这一特征,折射率引导型光子晶体光纤也被称为多孔光纤 (holey fiber) 或微结构光纤 (microstructured optical fiber).

光子晶体光纤可以称为第三代非线性光学介质.第一代非线性光学材料只解决了在高功率密度激光的作用下产生光学非线性效应,但相互作用距离很短.传统光纤成为第二代非线性光学介质,它使相互作用距离扩展到几十米,但是光脉冲在光纤中的色散使其脉冲变宽,光功率密度下降.光子晶体光纤既能够保持激光的高功率密度和相互作用长度,又能够保持脉冲宽度不变,成为最理想的第三代非线性光学介质.因此,光子晶体光纤当前研究的另一个热点是非线性效应,实验和理论成果已大大丰富了原有非线性光纤光学的内容<sup>[31]</sup>.

通过减小光子晶体光纤的模式面积 [如图 1(d)] ,可以极大地增强光纤中的非线性效应<sup>[23]</sup>,同时熔石英和空气极大的折射率差增强了波导色散的

作用,因而使得光子晶体光纤零色散点可以移到 1.3 μm 以下<sup>[22]</sup>,这是传统光纤不能实现的.如果光子晶体光纤的零色散点移到常用的掺钛蓝宝石 (Ti : sapphire) 飞秒激光器的工作波长 800 nm 附近,那么飞秒激光器产生的超短脉冲在很短的光子晶体光纤中传输时能够保持极高的峰值功率,产生丰富的非线性效应.本文侧重介绍以超连续光谱的产生、光孤子效应以及频率变换为代表的非线性光子晶体光纤非线性特性方面的研究进展以及这些非线性效应的潜在应用.

## 2 光子晶体光纤非线性特性的研究

### 2.1 超连续光谱的产生

超连续光谱 (supercontinuum) 产生是指激光脉冲在非线性和介质中传输时光谱急剧加宽的一种物理现象. Ranka 等<sup>[32]</sup>首次报道用能量小于 1 nJ、脉宽 100 fs 的脉冲,在 75 cm 长的可见光区呈现反常色散特性的光子晶体光纤中,产生 2 个倍频程 (octave) (400—1600 nm) 的超连续光谱 (如图 3 所示,其中底部曲线为入射脉冲的光谱,顶部曲线为产生的超连续光谱).此后,在光子晶体光纤中产生超连续光谱便成为一个新的研究热点<sup>[33]</sup>,而且超连续光谱在飞秒激光脉冲的相位稳定、光学频率测量、光学相干层析 (OCT) 等方面已经带来重要突破.

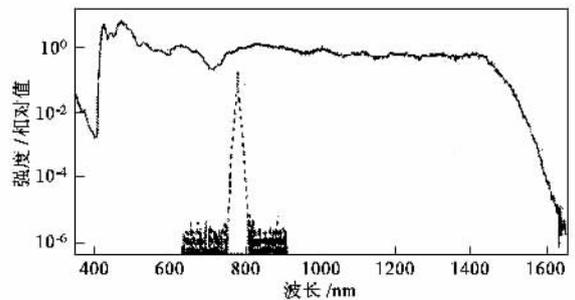


图 3 在光子晶体光纤中产生的 2 个倍频程的超连续光谱<sup>[32]</sup>

目前人们除对结构比较规则的光子晶体光纤进行研究外<sup>[31]</sup>,对如图 1(d)所示的蛛网式 (cobweb) 光子晶体光纤、光子-分子蛛网式结构的光子晶体光纤、软玻璃 (SF6) 光子晶体光纤、空气孔无规则排列的光子晶体光纤<sup>[15-18]</sup>中超连续光谱的产生都有研究.同时,除常采用钛宝石激光器等产生的 fs 量级的超短脉冲<sup>[15-18]</sup>外,采用 ps 或 ns 量级的脉冲在光子晶体光纤中产生超连续光谱的实验也有报道.实验中产生的超连续光谱的宽度依赖于光子晶体光

纤的结构、脉冲宽度和功率等具体参数,但是大量的理论和实验研究已经揭示了光子晶体光纤超连续光谱产生过程中各种效应的影响。

传统光纤主要依赖自相位调制效应产生在中心频率两侧对称分布的钟形超连续光谱,而在光子晶体光纤中自相位调制、高阶孤子、群速度色散、三阶色散、四波混频、交叉相位调制、双折射以及自陡峭等诸多效应对超连续光谱的形成都有贡献<sup>[34]</sup>。Coen等<sup>[35]</sup>将入射脉冲宽度为 ps 量级时的超连续光谱的主要产生机理解释为受激拉曼散射和参量四波混频,而自相位调制的作用可以忽略,而受激拉曼散射和四波混频效应明显依赖于入射脉冲中心波长相对于光子晶体光纤零色散波长的位置<sup>[36]</sup>。Gaeta<sup>[37]</sup>采用对应于 Ranka 等实验<sup>[32]</sup>中的参数进行了数值计算,结果表明,当入射脉冲波长在靠近零色散点的反常色散区时,光谱包络主要由高阶色散决定;三阶色散和自相位调制的相互作用决定了光谱短波方向的宽度,同时限制了长波方向的相对展宽。此外,由于光子晶体光纤拉制中不可避免地产生或者特意引入的双折射,沿光纤两个主轴方向的偏振模式的零色散波长有偏移,因而入射脉冲的偏振态也会影响产生的超连续光谱的宽度和偏振态<sup>[18]</sup>。图4就是我们在实验中观察到的超连续光在非均匀结构的双折射光子晶体光纤中传输时出现的拍频现象(箭头所指为同一色光的泄漏处)。此外,入射脉冲的啁啾对超连续光谱的产生也有影响<sup>[38]</sup>。

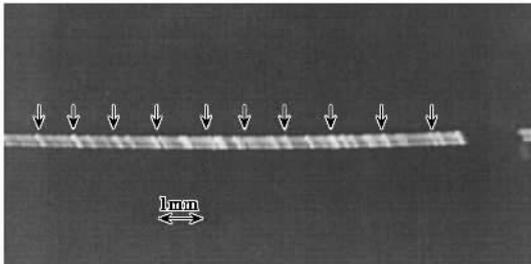


图4 超连续光传输时的拍频现象

Husakou 与 Herrmann<sup>[39]</sup>提出了光子晶体光纤中超连续光谱产生的一个新的机理——高阶孤子裂变(fission)效应,并得到了实验上的证实<sup>[40]</sup>。当入射的 fs 脉冲位于光子晶体光纤的反常色散区时,在同样脉冲强度下,宽脉冲比窄脉冲产生的超连续光谱可以更宽。这是因为在脉宽较宽时,孤子的阶数更大, $N$ 阶孤子会裂变为  $N$  个脉冲,同时每个脉冲发出对应的蓝移而且相位匹配的非孤子波,这  $N$  个脉

冲最终稳定并形成  $N$  个红移的且中心波长不同的一阶孤子。简并的四波混频最终将光谱加宽。图5是波长为 842 nm 时在零色散波长为 806 nm 的光子晶体光纤中不同的输出功率下的光谱曲线<sup>[41]</sup>,它明显地反映了上述过程。数值计算表明,利用高阶孤子裂变效应在高非线性材料的光子晶体光纤中可以产生 3 个倍频程的超连续光谱<sup>[42]</sup>。

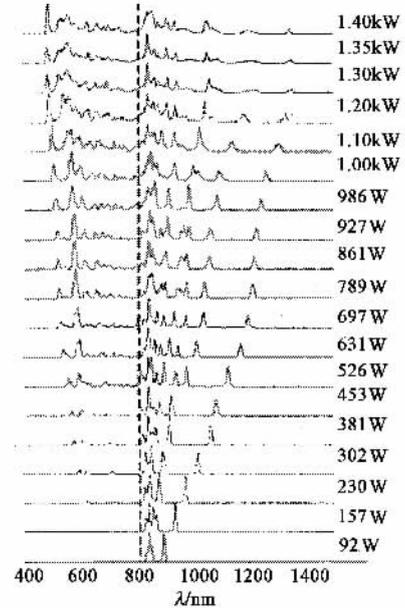


图5 光子晶体光纤中不同的输出功率下的光谱<sup>[41]</sup>

光子晶体光纤中产生的一个倍频程和高功率的超连续光谱不但在飞秒激光脉冲的相位稳定、光学频率测量、光学相干层析(OCT)等方面的研究已经带来重要突破,而且在超短脉冲压缩、光通信、拉曼光谱学等领域都有潜在的应用。

利用频域稳频技术能够稳定飞秒激光脉冲的载波包络相位,从而锁定激光器的绝对频率,达到通过稳定的微波或射频时钟来测量光学频率的目的,其中的关键是采用自参考(self-referenced)的从光子晶体光纤中产生的一个倍频程的锁模激光频率梳<sup>[43]</sup>。光子晶体光纤中作为产生一个倍频程的锁模激光频率梳的有效手段已经大量用于光学频率测量。

利用从 PCF 中产生的超连续光谱可以实现高分辨率的光学相干断层成像技术(OCT)。Hartl等<sup>[44]</sup>利用在中心频率为 1.3 μm、带宽为 370 nm 的光谱实现了宽带 OCT,纵向分辨率在空气和生物组织中分别为 2.5 μm 和 2.0 μm,这是在该波段已经达到的最高分辨率。

光子晶体光纤中产生的一个倍频程的超连续光谱,为进一步压缩产生更短的脉冲提供了可能性。但是同在光学频率测量中应用一样,输入脉冲的噪声会引起超连续光谱光谱幅度和相位的起伏,进而破坏超连续光谱的相干性,甚至观察到热效应也会引起超连续光谱的有规律振荡。因此,目前已经在超连续光谱特性的测量、噪声对超连续光谱产生的影响、采用偏振效应或两个零色散波长优化超连续光谱等方面开展了深入研究。此外,在  $1.5\mu\text{m}$  附近产生的超连续光谱是潜在的 WDM 通信光源。

## 2.2 光孤子效应

在光纤的反常色散区,由于色散和非线性效应的相互作用,可产生光孤子效应。光孤子是一种特殊的波包,它可以传播很长距离而不变形<sup>[31]</sup>。光子晶体光纤的零色散点能够移到传统光纤不能达到的可见光区,因而极大地扩展了能够产生光孤子效应的波段。

Wadsworth 等报道,采用中心波长为  $850\text{ nm}$ 、脉宽为  $200\text{ fs}$  的超短脉冲,在零色散波长为  $740\text{ nm}$  的光子晶体光纤中观察到了孤子效应<sup>[45]</sup>。Washburn 等采用掺钛蓝宝石激光器输出的  $110\text{ fs}$  的超短脉冲,在光子晶体光纤产生了从  $850\text{—}1050\text{ nm}$  可调的孤子<sup>[46]</sup>。Reid 等报道了用波长为  $810\text{ nm}$  的掺钛蓝宝石激光器泵浦光子晶体光纤,产生了频移至  $1260\text{ nm}$  处的光孤子<sup>[47]</sup>。Liu 等在文献 [48] 中,报道在仅为  $15\text{ cm}$  长的拉锥后的光子晶体光纤中,观察到了超过光学频率  $20\%$  的孤子频移。通过改变输入的波长为  $1.3\mu\text{m}$ 、宽度为  $200\text{ fs}$  的入射脉冲的能量,可以产生从  $1.3\text{—}1.6\mu\text{m}$  可调的脉宽低于  $100\text{ fs}$  的孤子。目前,在  $0.78\text{—}1.0\mu\text{m}$ <sup>[49]</sup>、 $1.0\text{—}1.3\mu\text{m}$ <sup>[50]</sup>、 $1.56\text{—}1.677\mu\text{m}$ <sup>[51]</sup> 等波段的可调谐的孤子效应都有报道。图 6 是在不同功率下光子晶体光纤的输出光谱<sup>[51]</sup>,从中可以看到明显的孤子频移效应。

值得注意的是,由于空气或者填充气体的非线性效应很弱,光子带隙型光纤能够支持高功率的孤子传输<sup>[52]</sup>。空气芯的光子带隙型光纤能够支持峰值功率为  $2\text{ MW}$  的孤子,在填充了氙气后,可以支持  $5.5\text{ MW}$  的孤子,将光纤中能够传输的孤子功率提高了 2 个数量级。

由于色散的可调性,从光子晶体光纤中产生的光孤子覆盖了传统光纤不能够达到的波段,在光通信、超短脉冲传输等方面都具有极大的应用潜力。

## 2.3 频率变换效应

同传统光纤一样,光子晶体光纤中一个重要的

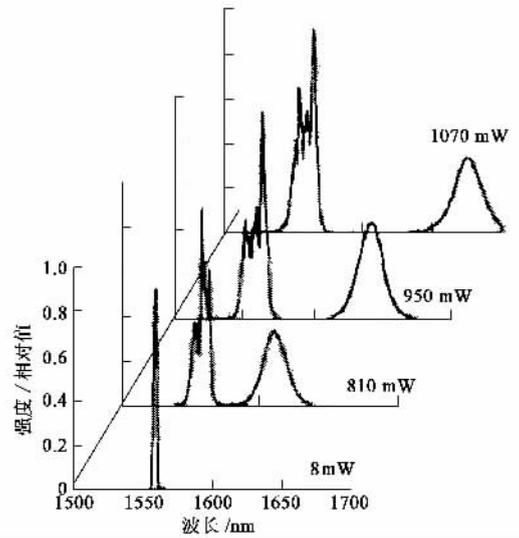


图 6 不同功率下光子晶体光纤的孤子频移光谱<sup>[51]</sup>

非线性效应是四波混频。四波混频是一个光子或几个光子湮灭同时产生几个不同频率新光子的过程<sup>[31]</sup>。Sharping 等首次报道从实验上证实了光子晶体光纤中非兼并的四波混频<sup>[53]</sup>。光子晶体光纤纤芯面积小导致了非线性系数  $\chi^{(3)}$  的提高。他们在零色散波长 ( $\approx 750\text{ nm}$ ) 附近实现了相位匹配,而且泵浦峰值功率仅为  $6\text{ W}$  时就在  $6.1\text{ m}$  长的光纤中观察到了超过  $13\text{ dB}$  的参量增益。通过相位匹配,四波混频产生的斯托克斯和反斯托克斯分量能够加宽光谱<sup>[54,55]</sup>,而且能够高效地产生三次谐波<sup>[56]</sup>和高次谐波<sup>[57]</sup>,成为频率变换的有效手段。

四波混频的相位匹配中往往需要高阶模式的参与<sup>[56,57]</sup>,图 7 中给出了光子晶体光纤中三次谐波的远场光斑花样<sup>[56]</sup>,其中顶部各图为理论计算结果,底部各图为实验结果。此外,相位匹配条件还与入射脉冲偏振态有关<sup>[54,55]</sup>,因而改变入射脉冲的偏振态就能够改变斯托克斯和反斯托克斯分量的波长甚至光斑模式,图 8 就是我们在实验中获得的入射脉冲在不同偏振态下光子晶体光纤输出的反斯托克斯分量的光谱及模式近场花样,其中 A、B 分别对应于入射脉冲偏振方向平行于光纤的快轴和慢轴。

光子晶体光纤作为频率变换的有效手段,产生的斯托克斯和反斯托克斯分量在光致变色效应<sup>[59]</sup>、拉曼光谱学<sup>[60]</sup>等领域有着潜在的应用。

## 3 结束语

包层中空气孔构成的微结构使得光子晶体光纤

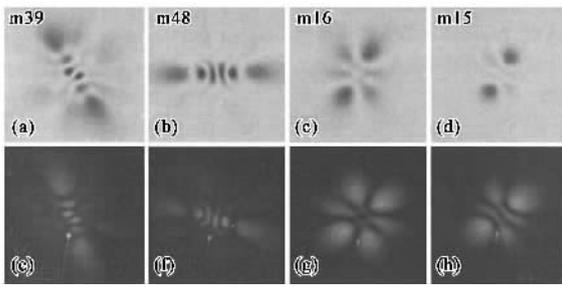


图7 光子晶体光纤中三次谐波的远场光斑花样<sup>[56]</sup>

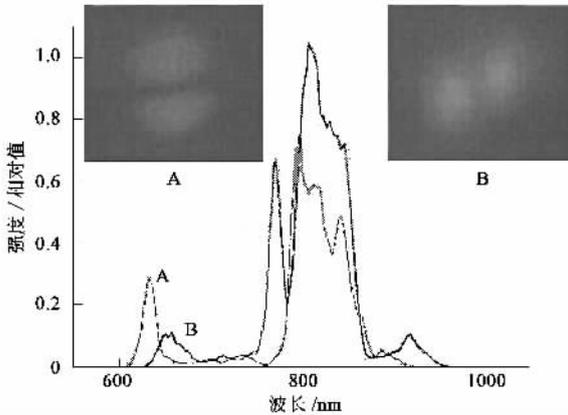


图8 不同偏振态下光子晶体光纤输出的反斯托克斯分量及模式近场花样

具有不同于而且优于传统光纤的很多特性,以超连续光谱的产生、光孤子效应、频率变换为代表的非线性特性的研究构成了当前光子晶体光纤研究领域的一大热点.可以预料,随着对光子晶体光纤本身的各种特性以及非线性效应的更加深入研究,光子晶体光纤将展示出传统光纤无法比拟的优越性,而这些非线性效应也将会有更加广泛深入的应用.

### 参 考 文 献

[ 1 ] Knight J C , Birks T A , Russell P St J *et al.* *Opt. Lett.* , 1996 , 21( 19 ) :1547  
 [ 2 ] Russell P. *Science* , 2003 , 299( 5605 ) :358  
 [ 3 ] Knight J C. *Nature* , 2003 , 424( 6950 ) :847  
 [ 4 ] 赵玲慧,魏志义. *物理* , 2004 , 33( 5 ) :335 [ Zhao L H , Wei Z Y. *Wuli( Physics)* , 2004 , 33( 5 ) :335 ( in Chinese ) ]  
 [ 5 ] Yablonovitch E. *Phys. Rev. Lett.* , 1987 , 58( 20 ) :2059  
 [ 6 ] John S. *Phys. Rev. Lett.* , 1987 , 58( 23 ) :2486  
 [ 7 ] Joannopoulos J D , Meade R D , Winn J N. *Photonic Crystals : Molding the Flow of Light*. Princeton : Princeton University Press , 1995  
 [ 8 ] Villeneuve P R , Piché M. *Phys. Rev. B* , 1992 , 46( 8 ) :4969  
 [ 9 ] Birks T A , Roberts P J , Russell P St J *et al.* *Electron. Lett.* , 1995 , 31( 22 ) :1941

[ 10 ] Birks T A , Knight J C , Russell P St J. *Opt. Lett.* , 1997 , 22 ( 13 ) :961  
 [ 11 ] Knight J C , Russell P St J. *Science* , 2002 , 296( 5566 ) :276  
 [ 12 ] Broeng J , Barkou S E , Bjarklev A *et al.* *Opt. Commun.* , 1998 , 156( 4 - 6 ) :240  
 [ 13 ] Knight J C , Broeng J , Birks T A *et al.* *Science* , 1998 , 282 ( 5393 ) :1476  
 [ 14 ] Cregan R F , Mangan B F , Knight J C *et al.* *Science* , 1999 , 285( 5433 ) :1537  
 [ 15 ] Li S G , Hou L T , Ji Y L *et al.* *Chin. Phys. Lett.* , 2003 , 20 ( 8 ) :1300  
 [ 16 ] 李曙光,冀玉领,周桂耀等. *物理学报* , 2004 , 53( 2 ) :478 [ Li S G , Ji Y L , Zhou G Y *et al.* *Acta Physica Sinica* , 2004 , 53( 2 ) :478 ( in Chinese ) ]  
 [ 17 ] 胡明列,王清月,栗岩锋等. *中国激光* , 2004 , 31( 5 ) :567 [ Hu M L , Wang Q Y , Li Y F *et al.* *Chin. J. Lasers* , 2004 , 31( 5 ) :567 ( in Chinese ) ]  
 [ 18 ] Hu M L , Wang C Y , Li Y F *et al.* *Laser Phys.* , 2004 , 14 ( 5 ) :776  
 [ 19 ] 倪屹,彭江得,柯亚杰等. *中国激光* , 2003 , 30( 10 ) :901 [ Ni Y , Peng J D , Ke Y J *et al.* *Chin. J. Lasers* , 2003 , 30 ( 10 ) :901 ( in Chinese ) ]  
 [ 20 ] Snyder A W , Lovelace J D. *Optical Waveguide Theory*. London : Chapman and Hall , 1983  
 [ 21 ] Hecht J. *Understanding Fiber Optics*. Beijing : Publishing House of Electronics Industry , 2003  
 [ 22 ] Knight J C , Arriaga J , Birks T A *et al.* *IEEE Photon. Technol. Lett.* , 2000 , 12( 7 ) :807  
 [ 23 ] Broderick N G R , Monro T M , Bennett P J *et al.* *Opt. Lett.* , 1999 , 24( 20 ) :1395  
 [ 24 ] Kawanishi S , Yamamoto T , Kubota T *et al.* *IEICE Trans. Electron.* , 2004 , E87 - C( 3 ) :336  
 [ 25 ] Blanchard P M , Burnett J G , Erry G R G *et al.* *Smart Mater. Struct.* , 2000 , 9( 2 ) :132  
 [ 26 ] Benabid F , Knight J C , Russell P St J. *Opt. Express* , 2002 , 10( 21 ) :1195  
 [ 27 ] Eggleton B J , Ahuja A K , Feder K S *et al.* *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.* , 2001 , 7( 3 ) :409  
 [ 28 ] Kerbage C , Eggleton B J. *Opt. Fiber Technol.* , 2004 , 10 ( 2 ) :133  
 [ 29 ] Konorov S O , Sidorov - biryukov D A , Bugar I *et al.* *Appl. Phys. B* , 2004 , 78( 5 ) :547  
 [ 30 ] Monro T M , Bennett P J , Broderick N G R *et al.* *Opt. Lett.* , 2000 , 25( 4 ) :206  
 [ 31 ] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics* ( 2nd ed. ) San Diego : Academic Press , 1995  
 [ 32 ] Ranka J K , Windeler R S , Stentz A. *J. Opt. Lett.* , 2000 , 25 ( 1 ) :25  
 [ 33 ] 栗岩锋,胡明列,王清月. *光电子·激光* , 2003 , 14( 11 ) :1240 [ Li Y F , Hu M L , Wang Q Y. *J. Opto. Laser* , 2003 , 14 ( 11 ) :1240 ( in Chinese ) ]  
 [ 34 ] Apolonski A , Povazay B , Unterhuber A *et al.* *J. Opt. Soc. Am. B* , 2002 , 19( 9 ) :2165

- [ 35 ] Coen S , Chau A H L , Leonhardt R *et al.* J. Opt. Soc. Am. B , 2002 , 19 ( 4 ) 753
- [ 36 ] Wadsworth W J , Joly N , Knight J C *et al.* Opt. Express , 2004 , 12 ( 2 ) 299
- [ 37 ] Gaeta A L. Opt. Lett. , 2002 , 27 ( 11 ) 924
- [ 38 ] Zhu Z , Brown T G. Opt. Express , 2004 , 12 ( 4 ) 689
- [ 39 ] Husakou A V , Herrmann J. Phys. Rev. Lett. , 2001 , 87 ( 20 ) 203901
- [ 40 ] Herrmann J , Griebner U , Zhavoronkov N *et al.* Phys. Rev. Lett. , 2002 , 88 ( 17 ) 173901
- [ 41 ] Ortigosa-Blanch A , Knight J C , Russell P St J. J. Opt. Soc. Am. B , 2002 , 19 ( 11 ) 2567
- [ 42 ] Husakou A V , Herrmann J. Appl. Phys. B , 2003 , 77 ( 2 3 ) : 227
- [ 43 ] Jones D J , Diddams S A , Ranka J K *et al.* Science , 2000 , 288 ( 5466 ) 635
- [ 44 ] Hartl I , Li X D , Chudoba C *et al.* Opt. Lett. , 2001 , 26 ( 9 ) 608
- [ 45 ] Wadsworth W J , Ortigosa-Blanch A , Knight J C *et al.* Electron. Lett. , 2000 , 36 ( 1 ) 53
- [ 46 ] Washburn B R , Ralph S E , Lacourt P A *et al.* Electron. Lett. , 2001 , 37 ( 25 ) 1510
- [ 47 ] Reid D T , Cormack I G , Wadsworth W J *et al.* J. Mod. Opt. , 2002 , 49 ( 5 6 ) 757
- [ 48 ] Liu X , Xu C , Knox W H *et al.* Opt. Lett. , 2001 , 26 ( 6 ) : 358
- [ 49 ] Nishizawa N , Ito Y , Goto T. Jpn. J. Appl. Phys. , 2003 , 42 ( 2A ) : 449
- [ 50 ] Druon F , Sanner N , Lucas - Leclin G *et al.* Appl. Opt. , 2003 , 42 ( 33 ) 6768
- [ 51 ] Abedin K S , Kubota F. Opt. Lett. , 2003 , 28 ( 19 ) 1760
- [ 52 ] Ouzounov D G , Ahmad F R , Müller D *et al.* Science , 2003 , 301 ( 5640 ) 1702
- [ 53 ] Sharping S E , Fiorentino M , Coker A *et al.* Opt. Lett. , 2001 , 26 ( 14 ) 1048
- [ 54 ] Hu M L , Wang C Y , Chai L *et al.* Opt. Express , 2004 , 12 ( 9 ) 1932
- [ 55 ] Hu M L , Wang C Y , Chai L *et al.* Laser Phys. Lett. , 2004 , 1 ( 6 ) 299
- [ 56 ] Efimov A , Taylor A J , Omenetto F G *et al.* Opt. Express , 2003 , 11 ( 20 ) 2567
- [ 57 ] Efimov A , Taylor A J , Omenetto F G *et al.* Opt. Express , 2003 , 11 ( 8 ) : 910
- [ 59 ] Konorov S O , Zheltikov A M. Opt. Express. , 2003 , 11 ( 19 ) : 2440
- [ 60 ] Fedotov A B , Zhou P , Tarasevitch A P *et al.* J. Raman Spectro. , 2002 , 33 ( 11 , 12 ) 888

**BSOE** 北京晨辉日升光电技术有限公司  
 BEIJING SUNRISE OPTOELECTRONICS CO., LTD.  
 ——专业激光及光电产品代理商

**德国 Radiant Dyes 公司**

**连续可调谐环型腔激光器**

调谐范围: 570-610nm (R6G, 可选其它染料), 700-970nm (Ti:Sa);  
 线宽: 1MHz; 频率漂移: 100MHz/小时; 扫描范围: 30GHz;  
 模式: TEM<sub>00</sub>。

**驻波染料激光器**

调谐范围 560-650nm (可选其它染料), 线宽: <200GHz (单双折射滤光片), <40GHz (多双折射滤光片)。

**荷兰 Avantes 公司**

**AvaSpec 系列微型光纤光谱仪**

波长范围 200nm-1100nm-2200nm, 分辨率 0.04-20nm, 还有多种光源、光纤探头及附件, 是性价比高的在线检测和科学分析用微型光谱仪。可应用于颜色测量、吸收率测量、发光测量、LED 测量、薄膜厚度测量、镀膜过程监控、氧含量测量、宝石成分检测、喇曼光谱、无损血液成分分析、颜色混合及匹配等领域。



欲了解我公司产品详细信息, 请参阅我公司网站: [www.bjlaser.com](http://www.bjlaser.com)

公司地址: 中国北京市朝阳区望京新城 A5 区 422 楼 806 室 邮编: 100102

电话: 010-84718152

传真: 010-64740680

电子邮件: [zzw512@vip.sina.com](mailto:zzw512@vip.sina.com)