

光子晶体光纤中超连续谱的研究进展与应用*

李曙光^{1,2,†} 姚艳艳¹ 付博¹ 张磊¹ 郑义² 侯蓝田¹

(¹ 燕山大学理学院 亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室 秦皇岛 066004)

(² 北京交通大学理学院 北京 100044)

摘要 利用光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)产生超连续光谱是目前光通信光电子器件领域的一个研究热点,文章系统地介绍了石英光子晶体光纤和非石英软玻璃光子晶体光纤中产生超连续谱的理论和实验研究成果.对于石英光子晶体光纤主要介绍了实芯光子晶体光纤、空芯填充光子晶体光纤和锥形光子晶体光纤产生超连续谱的研究成果,分类介绍了其超连续谱产生的特点.对于非石英光子晶体光纤主要介绍了某些铅硅酸盐玻璃和亚碲酸盐玻璃光子晶体光纤超连续谱产生的特点.最后介绍了超连续谱的应用和发展前景.

关键词 光子晶体光纤,超连续谱,石英材料,非石英材料

Development and application of supercontinuum generation in photonic crystal fibers

LI Shu-Guang^{1,2,†} YAO Yan-Yan¹ FU Bo¹ ZHANG Lei¹ ZHENG Yi² HOU Lan-Tian¹

(¹ Key Laboratory of Metastable Materials Science and Technology, College of Science, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

(² School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract The study of supercontinuum (SC) generation in photonic crystal fiber (PCF) has become an important research subject in fiber communication and photoelectron device development. A review is presented of the experimental and theoretical results of SC generation in silica and nonsilica PCF. For silica PCF, we describe the SC properties in solid-core, hollow-core, and tapered PCF. For nonsilica PCF, the SC properties in some lead silicate glass PCF and tellurite glass PCF are given. To conclude, the applications and prospects of SC generation are discussed.

Keywords photonic crystal fiber, supercontinuum, silica material, nonsilica material

1 引言

超连续谱(supercontinuum, SC)是指当一束高强度的超短激光脉冲通过非线性材料后,由于非线性效应,如光学介质中的自聚焦(self-focusing)、自相位调制(self-phase modulation, SPM)、交叉相位调制(cross-phase modulation, XPM)、四波混频(four wave mixing, FWM)和受激拉曼散射(stimulated raman scattering, SRS)等作用^[1,2],使得出射光谱中产生许多新的频率成分,频谱得到极大展宽.1970年,Alfano

和Shapiro^[3]利用倍频锁模钕玻璃皮秒激光脉冲泵浦BK7光学玻璃,首次获得400—700nm的超连续谱,从此宣告超连续谱研究的开始.虽然利用非线性介质及普通光纤可以得到超连续谱,但是这样产生的超连续谱的波长范围较窄,仅为300nm左右,并且所需要

* 国家自然科学基金(批准号:10874145)、高等学校博士点专项基金(批准号:20091333110010)、河北自然科学基金(批准号:F200900481)、中国博士后科学基金(批准号:20080440014;200902046)资助项目
2010-03-15收到

† 通讯联系人·Email:shuguangli@ysu.edu.cn

的初始脉冲的功率较高,均为吉瓦或兆瓦量级,光子晶体光纤(photonic crystal fiber, PCF)的诞生弥补了这个不足^[4].

PCF 具有许多普通光纤所没有的奇异特性^[5,6],这些特殊的性能可以通过改变光纤中的二维结构或者材料来实现.通过设计,这类光纤可以实现大数值孔径、小模式面积,增大了单位面积的光功率密度,可极大地提高光学非线性作用的效率;它还能够很宽的谱带范围内支持低损耗单模传输,将反常色散区移至可见光波段等.这些特性满足了宽带超连续谱的产生对非线性系数和色散要求,因此 PCF 是产生超连续谱最为突出的一种非线性介质,被广泛用于产生超连续谱的研究.本文对石英 PCF 和非石英软玻璃 PCF 中超连续谱的产生进行综述.

2 石英 PCF 中超连续谱的产生

PCF 的概念最早由 Russell 等人^[4]于 1996 年提出,这种光纤与普通单模光纤不同,是由周期性排有空气孔的单一石英材料构成,又被称为多孔光纤(holey fiber, HF)或微结构光纤(microstructure optical fiber, MOF).根据材料的不同,PCF 分为石英 PCF 和软玻璃 PCF.按光纤结构,目前研究的石英 PCF 又可分为实芯石英 PCF、空芯石英 PCF 和锥形石英 PCF.

2.1 实芯石英 PCF 中超连续谱的产生

实芯石英 PCF 也称折射率引导或全内反射光子晶体光纤(TIR-PCF),其导光机制与传统光纤类似.由于芯区折射率高于包层平均折射率而且相差很大,光波主要依靠全内反射传播.这类光纤按照纤芯形状以及纤芯周围空气孔分布满足二重对称性的程度,又分为保偏 PCF 和非保偏 PCF.目前,在这两种 PCF 中均有很多关于超连续谱的报道.

2000 年,Ranka 等人^[7]采用钛宝石激光器输出 100fs 的激光脉冲,经过一段 75cm 长的 PCF 后,首次观察到 400—1600nm 的超连续谱,实验中其频谱范围已经扩展到红外波段,完全覆盖了可见光区域.此后越来越多的报道显示,PCF 在超连续谱产生方面具有良好的应用前景.

2002 年,英国 Bath 大学的 Ortigosa-Blanch 等人^[8]用 200fs 的泵浦脉冲在双折射 PCF 中产生了 400—1200nm 的超连续谱. Lehtonen 等人^[9]研究了激光脉冲的偏振态和波长对超连续谱的影响,产生了 400—1700nm 的超连续谱.

2003 年,中国科学院物理研究所魏志义课题组将单脉冲能量约为 2.5nJ、脉宽为 25fs、对应峰值功率为 0.1MW 的 800nm 钛宝石激光耦合到长为 10mm、芯径为 1.8 μ m 的光子晶体光纤中,产生了谱宽覆盖可见光及近红外波段的超连续光谱^[10].同年,李曙光等人^[11]报道了利用 800nm 飞秒激光脉冲,在包层由无序填充气线组成的多孔 PCF 中产生超连续谱的现象,超连续谱展宽范围为 440—890nm. Schreiber 等人^[12]报道了掺 Yb 的 PCF 中产生高平均功率的波长从 500—1800nm 的平坦超连续谱实验,并利用广义非线性薛定谔方程数值模拟了超连续谱的产生.日本电报电话公共公司的 Yamamoto 等人^[13]用波长 1562nm、脉宽 2.2ps、重复频率 40GHz 的光脉冲注入到 200m 长的色散平坦保偏 PCF 中,首次在 1550nm 通信波段区域产生了超过 40nm 宽的均匀超连续谱.同年,深圳大学闫培光等人^[14]采用钛宝石超快飞秒激光器泵浦 2m 长的 PCF 产生了 420—959nm 的超连续谱,研究了不同输入功率下超连续谱的演变过程.

2004 年, Genty 等^[15]研究了双零色散 PCF 位于红外区的零色散波长和正常色散区的色散波对超连续谱的影响,实验得到了 390—1800nm 的超连续谱.胡明列等人^[16]对 PCF 产生超连续谱的现象和机理做了实验研究,得到了 500—1100nm 的超连续谱,分析了超连续谱产生的机制.研究发现,在脉宽确定时,单脉冲能量越高,超连续谱光谱趋向更宽、更平坦,输入脉冲的中心波长在负色散区越偏离零色散点,光谱展宽就越强.在较高平均功率的脉冲作用下,初始正负啁啾对光谱展宽的影响不大,这是因为强烈的非线性效应产生的啁啾很快补偿了初始啁啾的影响.同年,成纯富等人^[17]采用分步傅里叶方法数值模拟了飞秒光脉冲在 PCF 中的非线性传输和超连续谱的产生,分析了高阶色散和非线性效应对超连续谱形状和带宽的影响.

2005 年, Schreiber 等人^[18]研究了脉冲在双零色散 PCF 中传输时,交叉相位调制效应对超连续谱产生的影响,实验得到了 400—1900nm 的超连续谱.同年,李曙光在分步傅里叶方法的基础上,提出了利用自适应分步傅里叶方法求解广义非线性薛定谔方程^[19],模拟 PCF 中超短脉冲传输及其超连续谱的产生.研究发现,在发生显著孤子峰值频移且微结构光纤的色散和非线性参数随频率显著变化的情况下,采用自适应分步傅里叶方法对超短脉冲在光纤中传输进行模拟是很必要的,这种方法可以合理地

考虑脉冲演化过程中微结构光纤特性参数随峰值功率所对应的波长的变化,从而更精确地模拟超短脉冲在微结构光纤中的传输.

2008年,李曙光等人^[20]利用自制的微结构光纤进行飞秒激光脉冲传输实验.输入脉冲中心波长为800nm,位于光纤的正常色散区,当平均功率增大到一定程度时,光谱不再展宽,从而揭示了飞秒脉冲在微结构光纤正常色散区传输时的功率饱和效应,实现了波长从560—960nm的20dB展宽谱.Xiong等人^[21]通过增加纤芯中两个空气孔尺寸,制成双折射PCF,当入射脉冲中心波长为1064nm,脉宽为0.6ns,平均功率为30mW时,产生了450—1750nm的平坦超连续谱.Travers等人^[22]报道了连续波光纤激光器产生的1070nm的光在PCF中传输产生了1060—2200nm的超连续谱,如图1所示.这是到目前为止,在实芯PCF中产生的红外波段波长最长的超连续谱.

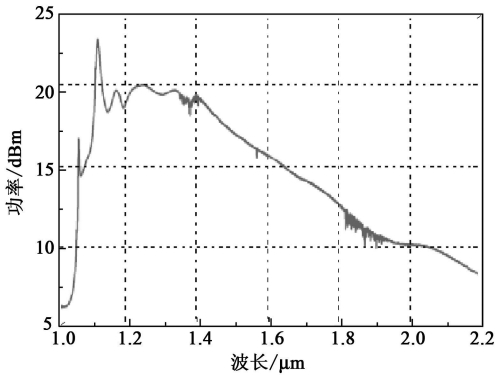


图1 连续波光纤激光器产生的1070nm的光在PCF中传输产生的超连续谱^[22]

2009年,武汉科技大学的季玲玲等人^[23]利用单脉冲能量为亚纳焦量级、脉冲宽度为100fs的激光脉冲,在双折射PCF中进行实验,获得了450—1050nm的,具有明显分立峰状结构的超连续谱(如图2所示),并在论文中用高阶孤子分裂伴随的拉曼自频移效应和色散波的产生来解释光谱分立峰状结构,这一结果对多波长变换,孤子分裂产生超连续谱的研究有一定的意义.

2.2 锥形PCF中超连续谱的产生

锥形光子晶体光纤(tapered photonic crystal fibers, TPCFs)是在PCF的基础上进行二次拉锥处理得到的,它的外径沿轴向逐渐变化,变化趋势可以是线性的,也可以是凹型或者凸型的.与PCF不同,锥形PCF的色散不仅是波长的函数,而且沿轴向是不断变化的.用锥形PCF能够得到超宽和平坦的超连续谱,源于锥形PCF中非线性系数随着传输

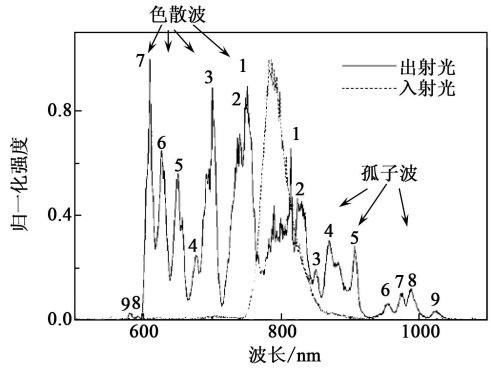


图2 中心波长为787nm,脉宽为100fs,光纤长度为10m,输出功率为16mW时的入射及出射光谱^[23]

距离不断增加,即沿锥形PCF的轴向其非线性作用越来越强,从而促使频谱极大地展宽.

2000年,Birks等人^[24]在锥形光纤中发现超连续谱的产生,由此拉开了在锥形光纤中产生超连续谱的序幕.锥形光纤能够将不同直径光纤的输入输出模式耦合,人们结合锥形光纤和PCF的优点,将PCF经过二次处理得到锥形PCF.

2004年,Leon-Saval等人^[25]利用普通的拉锥技术将PCF拉锥形成锥形PCF,其截面如图3所示,并且首次在纤芯直径小于1μm的锥形PCF中产生超连续谱,频谱扩展到紫外350nm,如图4所示.从图中可以看出,小纤芯的锥形PCF产生的超连续谱更宽.同年,Foster^[26]将纤芯直径为2.3μm的PCF拉锥形成两种锥形PCF,纤芯的平均直径分别为650nm和675nm,输入中心波长800nm、脉宽25fs的脉冲,只需要皮焦耳量级的入射脉冲能量(比非锥型PCF需要的脉冲能量低一个数量级)就产生了超过一个倍频程的超连续谱,这大大降低了连续泵浦高能量脉冲对光纤造成的损害.

2005年,Falk等人^[27]从理论上研究了双零色散锥形PCF中超连续谱的产生,频谱范围在600—1100nm.研究发现,当锥形PCF的锥强度(光纤始端气孔间距与末端气孔间距之比)增加时,产生的近红外波中心波长蓝移.

2006年,Kudlinski等人^[28]报道了用脉宽3ps、重复频率51MHz、中心波长1064nm的脉冲,在零色散波长随光纤长度减小的锥形PCF中,产生了扩展到紫外的超连续谱,光谱范围372—1750nm.

2008年,Cascante-Vindas等人^[29]用熔拉法制作出一种锥形PCF,该光纤的第一个零色散点在532nm附近,在波长532nm处泵浦脉宽7ns的脉冲,产生了380—800nm的超连续谱,光谱扩展到正常和反常色散区.

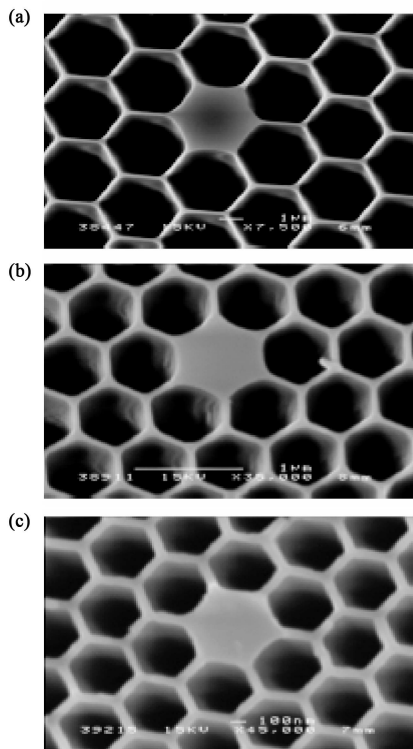


图 3 PCF 截面图 (a)未拉锥的 PCF, 纤芯直径为 $3.1\mu\text{m}$; (b)锥形 PCF, 纤芯直径为 $0.7\mu\text{m}$; (c)锥形 PCF, 纤芯直径为 $0.5\mu\text{m}$ ^[25]

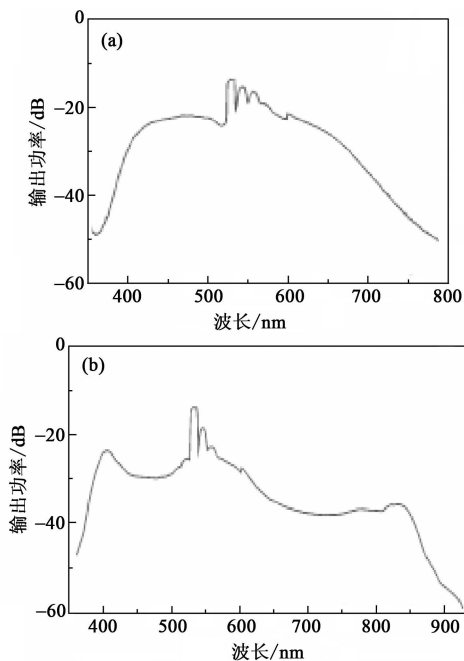


图 4 中心波长 532nm , 平均功率 1.7mW , 光纤长度 90mm 时产生的超连续谱 (a) 纤芯直径 700nm ; (b) 纤芯直径 500nm ^[25]

2009 年, Xu 等人^[30]在色散平坦的锥形 PCF 中数值模拟超连续谱的产生, 随着传输距离的增加, 该光纤在波长 1550nm 处的色散逐渐从反常色散区移到正常色散区, 用皮秒脉冲泵浦 0.2km 的光纤, 在

通信窗口得到平坦高效的超连续谱. 如图 5 所示, 超连续谱范围包含了 S 波段 ($1460-1530\text{nm}$), C 波段 ($1530-1565\text{nm}$) 以及 L 波段 ($1565-1625\text{nm}$), 最后又研究了光纤长度和脉宽对超连续谱产生的影响. 这些研究结果对锥形 PCF 中超连续谱的产生有一定的指导意义. 同年, Travers 等人发现, 相对于非锥 PCF, 色散波的孤子俘获效应在锥形 PCF 中得到明显增强^[31]. 因为产生俘获现象的前提就是孤子必须减速, 在非锥 PCF 中, 孤子减速的原因是低色散区导致谱展宽的拉曼散射, 但是在锥形 PCF 中, 孤子减速不再依赖于拉曼增益, 而取决于随传输距离变化的色散, 这就解释了锥形 PCF 中超连续谱展宽过程中增强的蓝移谱扩展的原因, 从实验事实可以证明, 锥形石英 PCF 更易于将连续谱扩展到紫外波段.

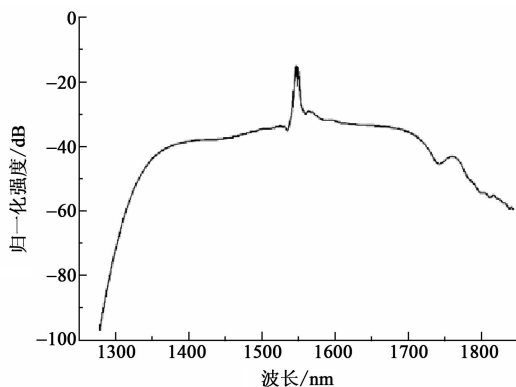


图 5 数值模拟锥形 PCF 中超连续谱的产生^[30]

2.3 空芯填充 PCF 中超连续谱的产生

空芯 PCF 的导光机制与传统光纤不同, 光能量主要被局域在空芯缺陷中传输, 所以光在纤芯中传输时的非线性效应低, 可用来传输高能量脉冲. 同时, 也可以在这种光纤的空芯中填充气体、蒸汽或者低折射率液体来改变纤芯的折射率^[32,33]. 在传导模式中, 这些介质与光有强烈的相互作用, 可以改变非线性和损耗, 用于气体传感检测、拉曼器件、全光开关、四波混频器件, 也可用于研究材料的非线性光学性质和光谱学等领域.

由于超连续谱的产生需要很高的非线性系数, 所以长期以来人们一直致力于研制高非线性 PCF. 到目前为止, 这些方法包括减小纤芯直径, 增加空气填充比等. 一种新的方法是在空芯 PCF 中填充高非线性液体, 如 CS_2 、硝基苯、水等. 2006 年, Zhang 等人^[32]数值模拟了在空芯 PCF 的纤芯中注入 CS_2 和硝基苯, 使其在 1550nm 处非线性系数达到

$2.4\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$, 获得了从 $700\text{--}2500\text{nm}$ 的超连续谱. 2008 年, Alexandre 等人^[33] 首次用实验在 5cm 长的填充水空芯 PCF 中得到超过 500nm 的超连续谱, 如图 6 所示, 这为在填充液体的空芯 PCF 中实现超连续谱的产生提供了重要的依据.

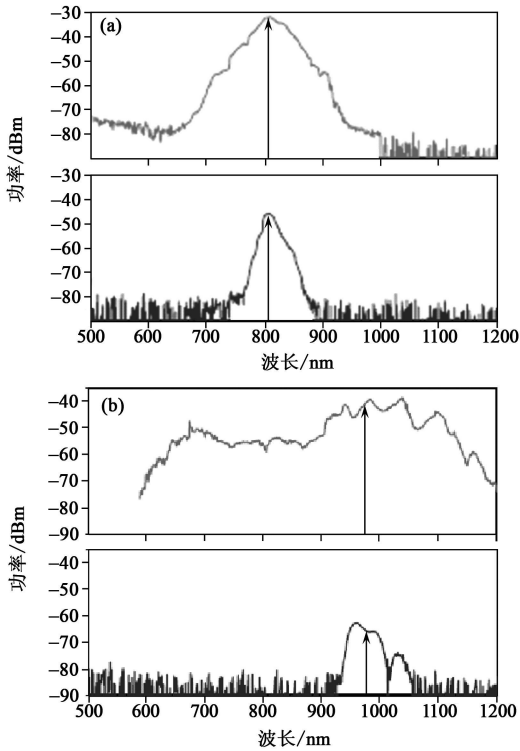


图 6 空芯 PCF 中填充水产生超连续谱 (a) 中心波长 800nm , 输入脉冲峰值功率 0.94MW ; (b) 中心波长 980nm , 输入脉冲峰值功率 1.45MW , 上图为通过填充水的空芯光纤产生的超连续谱, 下图为通过等长度的水样品的光谱^[33]

3 非石英 PCF 中超连续谱的产生

超连续谱产生的必要条件之一就是高非线性光

纤, 由于石英玻璃的非线性折射率 n_2 仅为 $2.2 \times 10^{-20}\text{m}^2/\text{W}$, 这大大限制了光纤非线性系数的提高. 另外, 石英玻璃在超过 $3\mu\text{m}$ 的波长处是不透明的, 在这个波段处产生超连续谱很困难. 表 1 是几种非石英玻璃的参数特性^[34-38], 某些非石英玻璃 (例如亚碲酸盐玻璃、硫属化物玻璃等) 在中红外波段是透明的, 并且非线性折射率 n_2 比石英玻璃至少要高一个数量级, 因此利用非石英 PCF 产生超连续谱已经成为近年来国际上研究热点之一.

2002 年, Kumar 等人^[39] 报道了铅硅酸盐玻璃 (SF6) PCF 的制作, 并用 1550nm 的泵浦源产生从 $350\text{--}2200\text{nm}$ 的超连续谱. 2003 年, Hundertmark 等人^[40] 报道了利用挤压法制作的 SF6 PCF, 输入中心波长为 1560nm 、脉宽为 110fs 、重复频率为 80MHz 的脉冲, 产生了从 $400\text{--}1750\text{nm}$ 的宽带超连续谱. 2006 年, Omenetto 等人^[41] 在 5.7mm 长的 SF6 PCF 中产生了如图 7 所示的超宽带平坦超连续谱, 谱范围从 $350\text{--}3000\text{nm}$, 这是迄今为止利用 SF6 PCF 产生光谱最宽的超连续谱. 实验中所用光纤的纤芯直径为 $2.6\mu\text{m}$, 零色散波长为 1300nm . 研究发现, 当光纤长度远小于色散长度时, 孤子传输对超连续谱的产生影响不大, 但由于自相位调制会产生对称的超连续谱, 当光纤长度较长时, 由于拉曼孤子自频移, 同样会产生较宽的超连续谱. 2009 年, Hundertmark 等人^[42] 用单脉冲能量低于 20pJ , 中心波长为 1060nm 的锁模光纤激光器泵浦 4cm 长的 SF6 PCF, 产生了一个倍频程 ($600\text{--}1450\text{nm}$) 的超连续谱, 这是目前为止报道过的, 产生一个倍频程超连续谱所需脉冲能量最小的实验.

2006 年, Leong 等人^[34] 制作出 SF57 (主要成分 PbO-SiO_2) PCF, 该光纤在 1550nm 处非线性系数达

表 1 几种典型的非石英玻璃的参数特性

玻璃类型	代号	主要成分	线性折射率 n_0	非线性折射率 $n_2 \times 10^{-20} (\text{m}^2/\text{W})$
铅硅酸盐玻璃	SF57	PbO-SiO_2	1.81	$41^{[34]}$ (1550nm)
	SF59	$\text{SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3\text{-PbO}$	1.91	$68^{[35]}$ (1550nm)
	SF6	高浓度铅硅酸盐玻璃	1.76	$22^{[36]}$ (1550nm)
亚碲酸盐玻璃	ZnTe	$75\text{TeO}_2\text{-}20\text{ZnO}\text{-}5\text{Na}_2\text{O}, \text{mol}\%$	2.03	$59^{[37]}$ (1064nm)
氟化物玻璃	ZBLAN	$\text{ZrF}_4\text{-BaF}_2$	1.50	$3.3^{[35]}$ (1064nm)
硫属化物玻璃	AsS	As_2S_3	2.44	$200^{[35]}$ (1550nm)
	GLS	$65\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-}32\text{La}_2\text{S}_3\text{-}3\text{La}_2\text{O}_3, \text{mol}\%$	2.41	$216^{[35]}$ (1550nm)
	GLSO	$\text{Ga}_2\text{S}_3\text{-La}_2\text{O}_3$	2.25	$177^{[35]}$ (1550nm)
铋氧化物玻璃	Bi	Bi_2O_3	2.02	$32^{[38]}$ (1550nm)

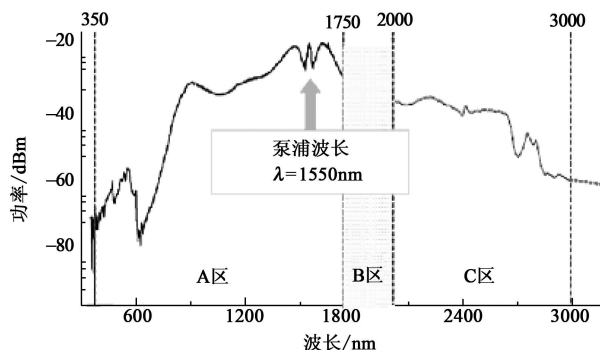


图7 中心波长为 1550nm, 脉宽为 110fs, 重复频率为 80MHz, 平均功率为 70mW 的脉冲通过 5.7mm 长的 SF6 PCF 产生的超连续谱^[41](图中 A 区对应于光谱分析仪探测到的区域, B 区为本实验中未探测到的区域, C 区是由 HgCdTe 探测器探测到的区域)

$1.86\text{W}^{-1}\text{m}^{-1}$, 零色散点在 $1\mu\text{m}$ 附近, 在 1060nm 处产生超过一个倍频程的超连续谱 (750–1500nm). 2009 年, Miret 等人^[43] 数值模拟在 SF57 PCF 中产生宽带 (1000–2500nm) 平坦超连续谱的过程, 与以往其他在非石英光纤中产生超连续谱不同的是, 该仿真是在正常色散区泵浦脉冲, 并且对比了平坦色散和非平坦色散光纤中产生超连续谱的不同, 得出结论是, 在平坦色散光纤中产生的超连续谱宽度要宽, 而且平坦性要好.

亚碲酸盐 (Tellurite) 玻璃拥有许多石英玻璃不具备的优点, 例如高折射率、高非线性、较好的红外透过性以及比氟化物玻璃更稳定、相对硫化物玻璃具有更高的稀土元素溶解性等, 这些特性使得利用亚碲酸盐玻璃制成 PCF 成为可能. 2008 年, 美国 Tufts 大学的 Domachuk 和英国 Bath 大学的 Cordeiro 等人^[44] 在长为 8mm 的高非线性亚碲酸盐玻璃 (主要成分 $75\text{TeO}_2\text{-}20\text{ZnO}\text{-}5\text{Na}_2\text{O}$, mol%) PCF 中产生了 4080nm 宽的超连续谱, 在中红外波段谱范围从 790nm 一直拓展到 4870nm, 这是迄今为止报道的最宽的超连续谱, 图 8 给出了光纤截面图, 图 9 给出了相应的输出光谱图. 同年, 南安普顿大学 (The University of Southampton) 的 Feng 等人^[45] 成功制备了大模面积 ($3000\mu\text{m}^2$) 的单模亚碲酸盐玻璃 PCF, 并在 9cm 长的光纤中产生了谱范围从 900–2500nm 的超连续谱. 2009 年, 英国南安普顿大学的 Liao 等人^[46] 通过精确控制拉丝过程的温度成功制备出纤芯为 $1\mu\text{m}$ 的六角芯亚碲酸盐玻璃 PCF, 在 1064nm 处泵浦 15ps 脉冲, 得到了 800–1600nm 的超连续谱. 同年, Liao 等人^[37] 制备出四层空气孔, 纤芯为 $1.8\mu\text{m}$ 的亚碲酸盐玻璃的 PCF, 这是迄今为止首次制备出的非石英复杂结构 PCF, 光

纤截面如图 10 所示. 该光纤比普通实芯 PCF 拥有更平坦的色散, 入射脉冲中心波长为 1557nm, 脉宽 400fs, 光纤长度 30cm, 尽管中心波长远离零色散波长, 仍然产生了从 400–2400nm 的超连续谱.

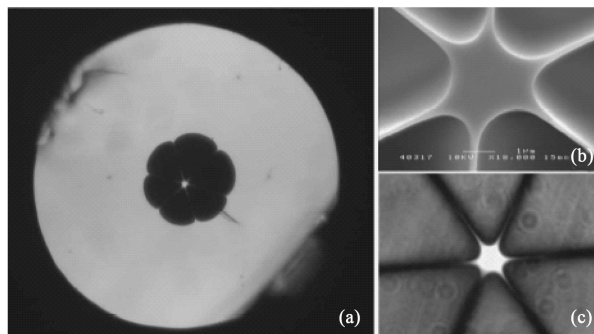


图8 亚碲酸盐玻璃 PCF 截面图^[44]

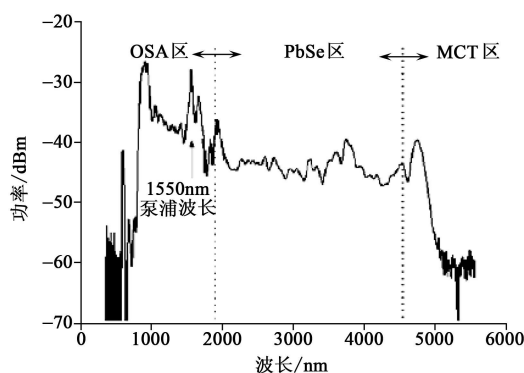


图9 中心波长 1550nm、脉宽 110fs、重复频率 80MHz、平均功率 250mW 的脉冲激光在亚碲酸盐玻璃 PCF 中产生的超连续谱^[44](图中 OSA 区对应于光谱分析仪探测到的区域, PbSe 区对应于硒化铅探测器探测到的区域, MCT 区为对应于碲镉汞探测器探测到的区域)

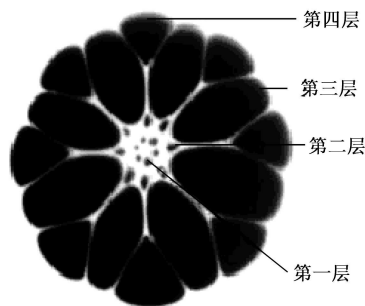


图10 复杂结构小纤芯亚碲酸盐玻璃 PCF 截面图^[37]

除了上述提到的非石英玻璃 PCF 外, 2007 年, Jonathan^[35] 在铋氧化物 (bismuth) 玻璃 PCF 中数值模拟产生了从 2–5 μm 的近红外超连续谱. 2009 年, Tomblaine 等人^[47] 报道了一种新型 PCF, 该光纤纤芯由 70mol%SiO₂, 20mol%Al₂O₃ 和 10mol%La₂O₃ 玻璃制成, 非线性折射率 n_2 能达到 $7\times 10^{-20}\text{m}^2/\text{W}$, 在 1064nm 处泵浦 650ps 脉冲, 在光纤中传输 2.15m 后产生了 500–2220nm 的超连续谱. 可见, 非石英软玻璃 PCF 非

常适合于产生超连续谱,特别适合于产生中红外波段的连续谱.

虽然非石英 PCF 在超连续谱产生方面有很多优于石英 PCF 的地方,但是它制作起来相对要困难得多.首先,软玻璃的粘滞系数对温度特别敏感,这就导致在光纤拉丝过程中,只能将温度控制在一个很窄的范围内,例如,亚碲酸盐玻璃的拉丝温度范围比石英玻璃的十分之一还要小,因此,在拉丝过程中温度的轻微改变就会导致光纤结构的明显形变或者气孔塌陷.其次,空气的导热系数比玻璃的导热系数要低一个数量级,所以包层中的空气孔也破坏了预制棒的温度平衡.高非线性光纤的纤芯直径比较小,通常为几微米甚至更小,因此它的制作更加困难.对于复杂结构的多层气孔光纤,在拉丝过程中由于表面张力产生的额外压力与气孔大小成反比,因此气孔会变形甚至塌陷.由于这些困难,目前报道制备出的非石英 PCF 比较少,特别是结构较为复杂的多层气孔结构很难制作.

4 超连续谱的应用及前景

超连续谱对于非线性光学中超短脉冲的产生、光谱分析、光学相干层析、光计量学、光通信、光学频率梳等许多方面都有非常重要的意义.随着超连续谱技术的逐步完善,其应用领域不断扩大,主要有下面几个方面.

4.1 波形和群速度色散测量

随着超高速光通信的发展,提高光波测量的时间分辨率变得尤为重要.利用基于非线性效应的光取样方法(如交叉相位调制、四波混频)可获得较短的响应时间,很引人注目.Takara 等^[48]用 5nm 的光带通滤波器(OBPF)对带宽超过 200nm 的超连续谱进行滤波,获得波长为 1559nm、带宽为 4.6nm 的取样脉冲,成功地对 100Gbit/s 的光脉冲序列进行了测量,时间分辨率提高到 0.6ps.若增大超连续谱光纤后的带通滤波器的带宽,可进一步提高时间分辨率.另外,此法可望用于几百个 Gbit/s 的波形测量.

单模光纤和光学设备的群速度色散在设计高速光通信网络中是很重要的.到目前为止,主要有干涉仪法、相移法等报道,但这些方法在测量长光纤时比较困难.Mori 等人^[49]报道了一种新的群速度色散测量方法,他们以锁模激光器作为泵浦光源,以 450m 保偏光纤来获得超连续谱脉冲,用来测量群速度色散.用此方案可对 1200—1395nm 的连续谱

进行群速度色散测量,优点是误差小,尤其是对高阶色散的测量,而且测量范围容易扩展到 1550nm 的波段.

4.2 超高速通信光源和全光解复用

为提高通信容量,波分复用技术(WDM)与光时分复用技术(OTDM)的结合是必然的,其中宽带、低噪声光源起着重要的作用.超连续谱脉冲源是这种 OTDM/WDM 光源较理想的对象,是产生用于 OTDM/WDM 宽带、多通道短脉冲的有效方法.用带宽可调的 AWG 滤波器,对宽带超连续谱滤波,可获得低噪声、脉宽可调的 ps、fs 脉冲.1994 年, Morioka 等^[50]以超连续谱脉冲产生为基础,实现了从 1535—1560nm 范围的 2.5ps、6.3Gbit/s 的脉冲序列到 1440—1640nm 的波长变换.此方法可为 WDM 网提供调谐范围 200nm、脉宽从 ps 到 fs 可变的波长信道输出.

作为高速光信号处理应用的一个分支,全光解复用技术涉及半导体、非线性光学等多方面的问题,是实现高速 OTDM 系统的关键技术之一. Morioka 等^[51]用抖动小于 100fs 的低噪声超连续短脉冲作为泵浦源,利用一段 300m 的保偏光纤的四波混频(FWM),成功地对 500Gbit/s 的信号进行了无误码的全光解复用.若利用带宽达到 45nm 的宽带掺铒光纤放大器和脉宽小于 0.5ps 的超短脉冲,有望对 Tbit/s 的信号实现解复用.

4.3 脉冲压缩

当入射脉冲位于 PCF 的反常色散区时,调制不稳定性及孤子自频移的共同作用引起了多孤子碰撞可以产生超短脉冲.脉冲压缩是产生超短脉冲的一种重要方法.Südmeyer 等人^[52]用 PCF 和一对消除啁啾的棱镜获得了 33fs 的脉冲.Schenkel 等人^[53]用 SPI-DER 技术在 PCF 中得到了 5.5fs 的超短脉冲.

4.4 光学相干层析技术(OCT)

光学相干层析技术(OCT)是将光学相干技术与激光扫描共焦技术相结合的一种新技术.OCT 可以直接检查生物体内的器官,也可以分析被切除的组织样本,用于研究人体视网膜、皮肤病、肠胃疾病以及癌细胞.早期的 OCT 成像系统采用二极管作为光源,它发出的光所提供的轴向分辨率约为 10—15 μ m.经过优化,拥有较短相干长度的飞秒脉冲激光器可以将轴向分辨率提高近 10 倍,缩短至 2 μ m 以下.轴向分辨率还取决于光源的频率范围,频率范围越宽,分辨率就越高.超连续谱光源是能够实现相干长度最短、频率范围最宽的飞秒光源,

因此成了高分辨率 OCT 成像系统的理想光源。

利用从 PCF 中产生的超连续谱可以实现高分辨率的 OCT。Hartl 等^[54]利用中心波长为 1300nm、带宽为 370nm 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 2500nm 和 2000nm,这是目前在该波段达到的最高分辨率。

4.5 超连续谱激光

对于超连续谱激光,可以用“白炽灯的光谱宽度,激光的亮度”来加以描述^[55]。作为常规光源的白炽灯和荧光灯是由钨、卤素或者 Xe 气制成的,这类光源的光谱非常宽,通常为 400—1700nm,但是灯丝的质量或气体激发的效率限制了其发光强度。此外,由于发出的光不是相干光,所以发出的光亮度低,光束质量较差,难于耦合入光纤。激光虽然具有很好的空间相干性和很高的亮度,能够很好地耦合入光纤,且具有良好的单模光束质量,但激光通常是单色的,因此如果同时需要多种波长的光,就需要使用多种激光器,使发出的光覆盖较宽的光谱。超连续谱激光光源能很好地解决上述问题。这种光源可以发出超宽的白光光谱,同时还具有单模光束特性和良好的方向性,以及可以与激光相媲美的亮度。

4.6 光学频率梳

光学频率梳是 2005 年诺贝尔物理学奖的重要内容,中国科学院物理研究所的魏志义研究员和北京大学的陈徐宗教授对其重要意义进行了详细的评述^[56,57]。2001 年, Holzwarth 等^[58]将 Cr:LiSAF 激光器产生的中心波长为 894nm 的飞秒激光通过光子晶体光纤产生了白光频率梳。2005 年,魏志义课题组^[59]在利用光子晶体光纤扩展飞秒钛宝石激光振荡器光谱的研究基础上,通过自参考技术测量并优化了该激光输出脉冲的载波包络相移所引起的拍频信号,实现了飞秒激光脉冲载波包络相移测量。2007 年,该课题组在自建的重复频率为 90MHz 的飞秒钛宝石激光器的基础上,首先采用光子晶体光纤将其光谱展宽到一个光学倍频程,接着利用锁相环技术分别将重复频率和载波包络相移同时高精度地锁定到一台稳定度为 6×10^{-14} 的 Cs 钟上,进而得到了稳定度相同的飞秒光学频率梳^[60]。2008 年,北京大学的陈徐宗课题组使用两段光子晶体光纤产生超连续谱,使得光学拍频的信噪比得到提高^[61]。

5 结束语

超连续谱广泛的应用前景促使国内外学者对它

的研究工作产生了浓厚的兴趣,而 PCF 所具有的高非线性等各种特性使得 PCF 不需要很高的泵浦峰值功率就可以产生超宽的超连续谱。从目前对 PCF 中产生超连续谱的现状可以看出,产生超连续谱的研究工作主要集中在以下几方面:一是利用不同种类的材料,特别是高非线性软玻璃材料 PCF 产生超连续谱,寻找最利于产生宽波段超连续谱的途径和方法;二是在不同条件下研究超连续谱的产生机制,通过调节光纤的结构和脉冲的参数控制超连续谱的产生;三是研究超连续谱性质,包括平坦性、相干性以及噪声特性等。

总之,PCF 中超连续谱的产生涉及一系列极其复杂的非线性光学过程,是一个多参数优化组合的过程。目前,利用 PCF 产生超连续谱的内在机理尚无十分透彻的认识,实验控制和理论解释还不很完善,超连续谱技术正处于迅速发展中,许多实际应用的设想还处于探索阶段,要想使之成为现实尚有大量的研究工作要做。我们相信,随着基础研究和技术的进步,超连续谱的实验控制和理论研究将会更完善,从而使得超连续谱光源具有更广泛的应用前景。

参考文献

- [1] Mori K, Takara H, Kawanishi S *et al.* *Electron. Lett.*, 1997, 33, 1086
- [2] Islam M N, Sucha G, Barjoseph I *et al.* *Opt. Lett.*, 1989, 14, 370
- [3] Alfano P R, Shapiro S L. *Phys. Rev. Lett.*, 1970, 24, 584
- [4] Knight J C, Birks T A, Russell P St J *et al.* *Opt. Lett.*, 1996, 21, 1547
- [5] 赵玲慧, 魏志义. *物理*, 2004, 33, 335 [Zhao L H, Wei Z Y. *Wuli (Physics)*, 2004, 33, 335 (in Chinese)]
- [6] 王清月, 栗岩峰, 胡明列等. *物理*, 2005, 34, 43 [Wang Q Y, Li Y F, Hu M L *et al.* *Wuli (Physics)*, 2005, 34, 43 (in Chinese)]
- [7] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J. *Opt. Lett.*, 2000, 25, 25
- [8] Ortigosa-Blanch A, Knight J C, Russell P St J. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, 19, 2567
- [9] M. Lehtonen, G. Genty, H. Ludvigsen *et al.* *Precision Electromagnetic Measurements Conference Digest*, 2002, 214—215
- [10] 张军, 魏志义, 王兆华等. *光学学报*, 2003, 23, 511 [Zhang J, Wei Z Y, Wang Z H *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2003, 23, 511 (in Chinese)]
- [11] Li S G, Hou L T, Ji Y L *et al.* *Chin. Phys. Lett.*, 2003, 20, 1300
- [12] Schreiber T, Limpert J, Zellmer H. *Opt. Commun.*, 2003, 228, 71

- [13] Yamamoto T, Kubota H, Kawanishi S. *Opt. Express*, 2003, 11, 1537
- [14] 闫培光, 阮双琛, 杜晨林等. 光子学报, 2003, 32, 1299 [Yan P G, Ruan S S, Du C L *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32, 1299 (in Chinese)]
- [15] Genty G, Lehtonen M, Ludvigsen H *et al.* *Opt. Express*, 2004, 12, 3471
- [16] 胡明列, 王清月, 栗岩峰等. 物理学报, 2004, 53, 4243 [Hu M L, Wang Q Y, Li Y F *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2004, 53, 4243 (in Chinese)]
- [17] 成纯富, 王晓方, 鲁波. 物理学报, 2004, 53, 1826 [Cheng C F, Wang X F, Lu B. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53, 1826 (in Chinese)]
- [18] Schreiber T, Andersen T V, Schimpf D *et al.* *Opt. Express*, 2005, 13, 9556
- [19] 李曙光, 周桂耀, 邢光龙等. 物理学报, 2005, 54, 1599 [Li S G, Zhou G Y, Xing G L *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2005, 54, 1599 (in Chinese)]
- [20] 李曙光, 程同蕾, 张焕平等. 中国激光, 2008, 35, 1041 [Li S G, Cheng T L, Zhang H P *et al.* *Chin. J. Lasers*, 2008, 35, 1041 (in Chinese)]
- [21] Xiong C, Wadsworth W J. *Opt. Express*, 2008, 16, 2438
- [22] Travers J C, Rulkov A B, Cumberland B A *et al.* *Opt. Express*, 2008, 16, 14435
- [23] 季玲玲, 陈伟, 曹迎春等. 物理学报, 2009, 58, 5462 [Ji L L, Chen W, Cao Y C *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2009, 58, 5462 (in Chinese)]
- [24] Birks T A, Wadsworth W J, Russel P St J. *Opt. Lett.*, 2000, 25, 1415
- [25] Leon-saval S G, Birks T A, Wadsworth W J *et al.* *Opt. Express*, 2004, 12, 2864
- [26] Foster M A, Gaeta A L. *Opt. Express*, 2004, 12, 3137
- [27] Falk P, Frosz M H, Bang O. *Opt. Express*, 2005, 13, 7535
- [28] Kudlinski A, George A K, Knight J C *et al.* *Opt. Express*, 2004, 14, 5715
- [29] Cascante-Vindas J, Diez A, Cruz J L *et al.* *Optics Communications*, 2008, 281, 433
- [30] Xu Y Z, Chen Z X, Li H T *et al.* *Front. Optoelectron.*, 2009, 2, 293
- [31] Travers J C, Taylor J R. *Opt. Lett.*, 2009, 34, 115
- [32] Zhang R, Teipel J, Giessen H. *Opt. Express*, 2006, 14, 6800
- [33] Alexandre B, Christiano J S, Cristiano M B C *et al.* *Opt. Express*, 2008, 16, 9671
- [34] Leong J Y Y, Petropoulos P, Price J H V *et al.* *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24, 183
- [35] Jonathan H V P. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2007, 13, 738
- [36] Data sheet for N-SF6. Schott Glass Company, 2001
- [37] Liao M S, Yan X, Qin G S *et al.* *Opt. Express*, 2009, 17, 15481
- [38] Ebendorff-Heidepriem H, Petropoulos P, Asimakis S *et al.* *Opt. Express*, 2004, 12, 5082
- [39] Kumar V V R K, George A K, Reeves W H *et al.* *Opt. Express*, 2002, 10, 1520
- [40] Hundertmark H, Kracht D, Wandt D *et al.* *Opt. Express*, 2003, 11, 3196
- [41] Omenetto F G, Wolchover N A. *Opt. Express*, 2006, 14, 4928
- [42] Hundertmark H, Rammler S, Wilken T *et al.* *Opt. Express*, 2009, 17, 1919
- [43] Miret J J, Silvestre E, Andrés P. *Opt. Express*, 2009, 17, 9197
- [44] Domachuk P, Wolchover N A, Cronin-Golomb M *et al.* *Opt. Express*, 2008, 16, 7161
- [45] Feng X, Wei H L, Joanne C F *et al.* *Opt. Express*, 2008, 16, 13651
- [46] Liao M S, Chaudhari C, Qin G S *et al.* *Opt. Express*, 2009, 17, 12174
- [47] Tombelaine V, Labruyère A, Kobelke J *et al.* *Opt. Express*, 2009, 17, 15392
- [48] Takara H, Kawanishi S, Morioka T *et al.* *Electron. Lett.*, 1994, 30, 1152
- [49] Mori K, Morioka T, Saruwatari M. *Electron. Lett.*, 1993, 29, 987
- [50] Morioka T, Mori K, Kawanishi S *et al.* *Electron. Lett.*, 1994, 30, 1152
- [51] Morioka T, Takara H, Kawanishi S *et al.* *Electron. Lett.*, 1996, 32, 833
- [52] Südmeyer T, Brunner F, Innerhofer E *et al.* *Opt. Lett.*, 2003, 28, 1951
- [53] Schenkel B, Paschotta R, Keller U. *J. Opt. Sov. Am. B*, 2005, 22, 687
- [54] Hartl T, Li X D, Chudoba C *et al.* *Opt. Lett.*, 2001, 26, 608
- [55] 张星. 激光技术与应用, 2008, (2), 21 [Zhang X. *Laser Technology & Applications*, 2008, (2), 21 (in Chinese)]
- [56] 魏志义. 物理, 2006, 35, 213 [Wei Z Y. *Wuli (Physics)*, 2006, 35, 213 (in Chinese)]
- [57] 陈徐宗. 物理, 2006, 35, 207 [Chen X Z. *Wuli (Physics)*, 2006, 35, 207 (in Chinese)]
- [58] Holzwarth R, Zimmermann M, Udem Th *et al.* *Opt. Lett.*, 2001, 26, 1376
- [59] 韩海年, 魏志义, 张军等. 物理学报, 2005, 54, 155 [Han H N, Wei Z Y, Zhang J *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2005, 54, 155 (in Chinese)]
- [60] 韩海年, 张炜, 王鹏等. 物理学报, 2007, 56, 2760 [Han H N, Zhang W, Wang P *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2007, 56, 2760 (in Chinese)]
- [61] Yi L, Qi X H, Chen W L *et al.* *Optics Communications*, 2008, 281, 4081