

基于光子晶体光纤和拉锥式单模光纤的超连续光谱产生的实验研究*

张龙¹⁾ 韩海年^{1)†} 侯磊¹⁾ 于子蛟¹⁾ 朱政²⁾ 贾玉磊²⁾ 魏志义¹⁾

1) (中国科学院物理研究所, 光物理重点实验室, 北京 100190)

2) (中国石油大学(华东), 理学院, 青岛 266580)

(2014年3月23日收到; 2014年4月22日收到修改稿)

本文使用重复频率为250 MHz、脉冲宽度为135 fs、最大功率为2.2 W的锁模掺镱光纤激光作为种子源, 利用光子晶体光纤和自制的拉锥式单模光纤两种高非线性光纤研究了超连续光谱的产生特性, 通过对比两种光纤的结构、色散等特性, 分析了拉曼孤子、色散波及其他非线性效应对产生的超连续谱形状的影响, 并均得到了大于一个倍频程的超连续光谱, 特别是拉锥式单模光纤产生的超连续光谱, 耦合效率达到60%, 这为众多研究领域, 尤其是光学频率梳的建立提供了实用的超连续光源。

关键词: 超连续光谱, 光子晶体光纤, 非线性光学, 飞秒激光

PACS: 42.72.Ai, 42.55.Tv, 42.65.-k, 42.65.Re

DOI: 10.7498/aps.63.194208

1 引言

宽带超连续谱光源由于具有良好的光学相干性、高亮度和超宽带光谱等特性, 已广泛的应用于众多研究领域^[1-3]. 目前, 产生超连续谱最简单而有效的技术方案是通过注入高强度的种子激光到光子晶体光纤 (photonic crystal fiber, PCF) 中, 由于PCF较强的非线性系数, 注入激光在其芯径内传播时会产生很强的非线性效应, 如自相位调制、四波混频、受激拉曼散射等, 这些效应导致激光光谱的调制和加宽, 最终形成宽光谱的超连续相干激光输出. 其中, 注入光纤的激光可以是连续激光, 也可以是脉冲激光, 由于激光光谱的展宽强烈地依赖于峰值功率强度, 因此利用连续激光超连续光谱的产生对其功率、PCF的长度以及光纤端面或熔接处理的技术等都十分苛刻^[4,5]. 相比之下, 脉冲激光由于具有较高的峰值功率, 可以保证在低平均功率及较短的PCF的条件下, 有效展宽光谱, 因

此利用脉冲激光, 特别是超短脉冲激光成为超连续光谱产生的最主要方式. 2000年, Ranka等首次使用飞秒掺钛蓝宝石激光, 将所输出的激光脉冲耦合到75 cm长的PCF后, 成功得到了谱宽为550 THz的超连续激光输出^[6], 并被应用到光学频率梳的研究中^[7]. 随着PCF研究技术的成熟, 超连续光谱的产生方式及输出参数等得到了多方面的发展和提高^[8-13], 并进一步扩展应用到其他领域.

与PCF类似, 通过拉锥技术得到的极细芯径的单模光纤也是产生超连续光谱的重要介质. 制作该光纤的技术工艺通常是在高温火焰下将普通单模光纤的包层从百微米量级拉至几个微米, 这不仅在很大程度上增强了非线性效应, 而且能改变传输波长的色散参数, 从而有效地展宽入射激光脉冲的光谱. 2000年, Birks等使用自制的光纤拉锥设备研制了芯径为2 μm 的拉锥式单模光纤, 并以此作为高非线性展宽介质, 分别在耦合输入飞秒钛宝石和镁橄榄石脉冲激光的情况下, 产生了超过两个倍频程的超宽带光谱^[14,15], 首次证明了拉锥式单

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB821304) 和国家自然科学基金 (批准号: 11078022, 61378040) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hnhan@iphy.ac.cn.

模光纤也能支持宽带超连续谱的输出. 随后, 德国波恩大学的研究人员利用高功率皮秒脉冲激光注入多种芯径级联的拉锥式单模光纤, 产生了功率为 4.2 W、谱宽达 1120 nm 的宽带超连续光谱^[16]. 进一步的研究表明, 当拉锥式光纤的芯径拉锥到小于 1.5 μm 时, 光纤的零色散波长会逐渐蓝移至可见光波段, 这为白光超连续的产生提供了有利条件^[17].

相比于得到广泛研究的 PCF, 基于拉锥式单模光纤超连续谱产生的研究多年来鲜有报道. 本文利用重复频率为 250 MHz、中心波长为 1040 nm、脉冲宽度为 135 fs 的锁模掺镜光纤激光为光源, 分别注入两种不同类型的高非线性光纤——光子晶体光纤和拉锥式单模光纤中, 比较研究了超连续光谱产生的特性, 并通过超连续谱间的比对, 分析讨论了光谱平坦度、拉曼孤子及色散波产生等方面的特性, 最终利用这两种光纤都获得了平均功率为瓦量级、光谱宽度超过一个倍频程的宽带超连续光谱输出. 其中, 拉锥式单模光纤具有光纤参数可变、制备简易以及长时间耦合稳定等特性, 为白光超连续产生、四波混频、光学频率梳等研究提供一种实际可行的技术方案.

2 实验装置

整个实验装置如图 1 所示, 激光光源使用的是一台商用的锁模掺镜光纤振荡器, 锁模机理使用非线性偏振旋转的方式, 锁模激光由腔内偏振分光棱镜导出, 输出激光的重复频率为 250 MHz, 中心波长为 1050 nm, 光谱如图 2(a) 上图所示. 输出激光空间耦合到光纤中并分成三路, 其中一路经过光纤隔离器进入两级光纤放大器中进行光纤放大, 两级光纤放大分别采用芯泵的单模光纤放大和高功率双包层放大的方式, 将近 30 mW 的种子脉冲放大至最高 3.5 W, 放大后的光谱如图 2(a) 下图所示, 经过放大后光谱具有明显的窄化效应, 光谱宽度大约为 13 nm. 由于放大后的脉冲含有较多的正色散, 需要经过脉冲压缩器进行脉冲压缩, 其中脉冲压缩器是由透射光栅对组成, 透射光栅的刻线密度为 1250 mm⁻¹, 经过压缩后的激光脉冲输出功率为 2.2 W, 其强度自相关曲线由图 2(b) 给出, 当假设输出脉冲为双曲正割型时, 压缩脉宽约为 135 fs. 压缩后的脉冲经过非球面透镜耦合到高非线性光纤中展宽光谱, 耦合之前使用半波片来控制激光的

偏振状态.

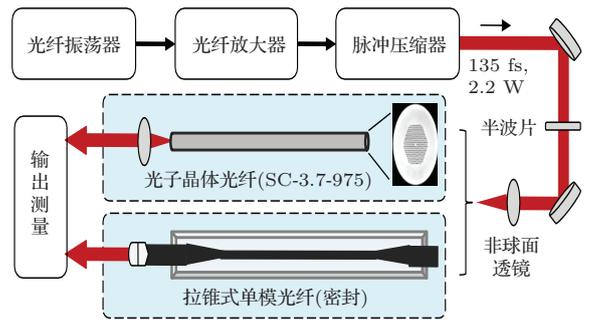


图 1 基于两种类型高非线性光纤超连续产生实验装置图

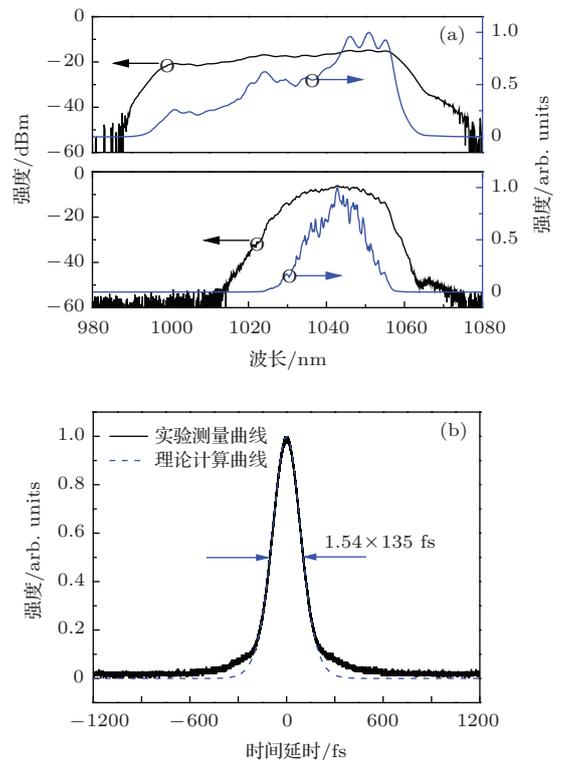


图 2 (网刊彩色) (a) 振荡器 (上图) 和放大器 (下图) 输出光谱图; (b) 压缩脉冲脉宽图, 黑色实线表示实验测量曲线, 蓝色虚线表示理论脉宽为 135 fs 的自相关曲线 (假设 sech² 型脉冲)

实验中利用了两种类型的高非线性光纤产生超连续光谱, 其分别是商业的 PCF 以及自制的拉锥式单模光纤, 商业 PCF 是由 NKT 公司生产的 SC-3.7-975, 其结构为中心导光的石英纤芯被周围类蜂窝芯的空气孔所包围, 增强了光场的局域作用从而增大了非线性系数, 它的芯径为 $3.7 \pm 0.2 \mu\text{m}$, 零色散波长在 975 nm 左右, 非线性系数大约为 $18 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$; 而拉锥式单模光纤是将标准单模光纤 (SMF-28) 的 125 μm 包层拉锥到直径仅有 3 μm 的

量级, 拉锥的长度大约是 9 cm, 拉锥部分的两端通过过渡区与未拉锥处理的部分相连, 为了保护较细的拉锥光纤以及保证激光低损耗地在拉锥光纤中传输, 拉锥式单模光纤必须要无接触地密封在特制盒子中, 当光脉冲经过过渡区传输至拉锥光纤时, 其物理结构及光纤与空气间较大的折射率差, 使光脉冲被限制在拉锥光纤中传输, 因此实现了对光场的紧局域, 从而增大非线性效应. 经过相关计算的分析 [15,18,19], 芯径为 3 μm 的拉锥式单模光纤的零色散波长在 850 nm 左右, 非线性系数大约为 $52.7 \text{ W}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. 而且通过简单地压缩拉锥式光纤的芯径, 可以进一步减小零色散波长以及增大非线性系数, 相对 PCF 复杂的设计和控制技术来说, 拉锥式单模光纤则具有较大的便宜性和低廉的成本.

3 实验结果与讨论

3.1 PCF 产生超连续光谱

首先, 利用 PCF (光纤型号为 SC-3.7-975) 产生超连续光谱, 光纤长度为 20 cm, 实验上使用焦距为 6.24 mm 的非球面透镜将压缩后的脉冲空间耦合到 PCF 中, 输出端利用显微物镜准直产生的超连续激光, 最终实验得到超连续激光输出功率大于 1.1 W, 图 3(a) 中的黑线表示利用 PCF 产生的超连续输出功率随入射功率的变化曲线, 由图可知 PCF 的耦合效率约为 50%. 图 3(b) 为利用 PCF 产生的超连续光谱图, 在高功率输出下, 整个超连续光谱覆盖宽度从 580 nm 到 1650 nm. 根据脉冲演化过程可知 [20], 光脉冲在 PCF 中传输时, 孤子裂变首先占据着主要的地位而相继产生高阶孤子, 由于拉曼散射的影响, 产生的高阶孤子会连续地红移, 在图 3(b) 中可以看到在 1400 nm 和 1600 nm 处形成的拉曼峰; 同时由于相位匹配和四波混频的作用, 短波范围的色散波也会逐渐产生并丰富整个频谱成分, 但由于可见光范围的光谱成分远离于光纤的零色散波长, 较大的群速度色散和高阶色散使脉冲宽度增加, 从而降低脉冲的峰值功率, 光谱展宽的效果将被严重削弱, 最终超连续光谱的最短波长扩展到 580 nm 处. 从整个光谱曲线中, 我们还可以观察到更短波长也可以产生, 可能的原因是超连续光谱中某些成分的谐波, 例如, 实验中我们可以明显地看到紫外光的产生, 而由于光谱仪测量范围的限制, 我们只能看到超连续在 400 nm 波段处的辐射

峰, 这可能是由较强的 700—800 nm 范围的二次谐波辐射; 图中也可以看到光谱在 480 nm 左右也具有很窄的光谱辐射峰, 该峰则是由高功率光纤放大中剩余抽运光的二次谐波产生的.

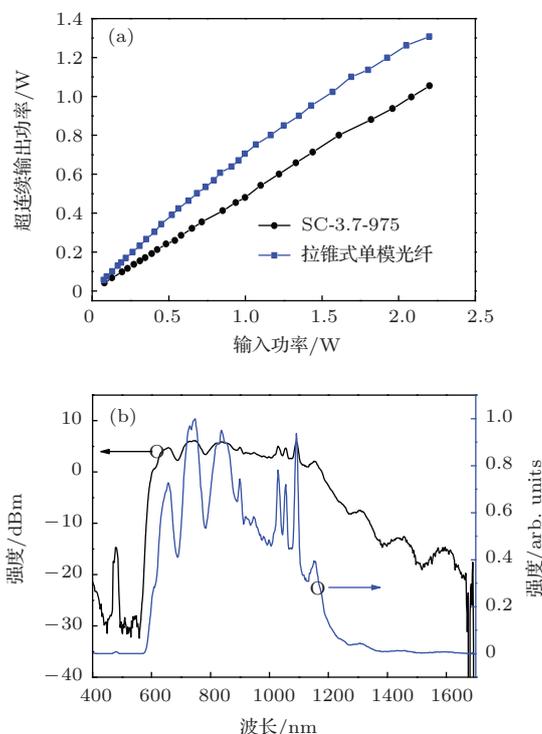


图 3 (网刊彩色) (a) 利用 PCF 和拉锥式单模光纤产生超连续光谱的耦合效率曲线; (b) 利用 PCF 产生的超连续光谱曲线

3.2 拉锥式单模光纤产生超连续光谱

其次是利用自制的拉锥式单模光纤进行超连续光谱产生的实验, 拉锥式单模光纤的详细参数如上文所述, 实验上使用焦距为 6.24 mm 的非球面透镜将抽运光空间耦合至光纤中, 输出端通过焊接一个集成 FC/APC 接头的准直器准直输出超连续激光, 由于拉锥式单模光纤的输入端是未经拉锥处理的标准单模光纤, 不具有类似于 PCF 的蜂窝芯结构, 因此可以实现高效率的耦合并长久保持. 图 3(a) 中的蓝线表示利用拉锥式单模光纤产生的超连续输出功率随输入功率的变化趋势, 其中在低功率耦合下, 耦合效率高于 70%, 当超连续功率输出大于 1 W 时, 耦合效率可能会由于功率泄漏的问题而降低, 最终输出的超连续激光功率超过 1.3 W, 相应的耦合效率将近 60%. 图 4 给出了利用拉锥式单模光纤产生超连续的光谱曲线, 由图可知, 超连续谱中的 1000 nm 到 1200 nm 近红外波段辐射明显较强, 这主要是由于输入脉冲具有较高的单脉冲

能量和峰值功率密度, 在拉锥式单模光纤传输过程中, 脉冲会产生严重的孤子裂变而产生的高阶孤子, 并较多地集中在入射脉冲波长的周围, 而且入射脉冲的波长距离拉锥式光纤的零色散波长较远, 并且位于负色散较大的区域, 这进一步加剧了高阶孤子的堆积, 最终使得入射脉冲波段附近的超连续强度较高. 由孤子裂变产生的高阶孤子中, 很少一部分受到拉曼作用而产生自频移, 最终超连续谱的长波长最大为1400 nm左右. 与此同时, 位于可见光范围的色散波由于相位匹配的作用而产生, 并随着超连续激光耦合功率的增加而蓝移, 在最大输出功率下, 可见光波段最短可达到550 nm左右, 而且我们可以很明显的看到光谱在600 nm左右产生较强的辐射峰, 其中原因与上述PCF情况类似, 脉冲在可见光波段传输时会严重地展宽激光脉宽而造成峰值功率的降低, 造成了光谱成分过多地积累在600 nm左右. 由于受到四波混频等效应的影响, 光谱在600 nm到1 μm 之间的成分也逐渐产生, 但是光谱的强度和平坦性较差, 其主要原因也是零色散波长与入射脉冲波长间存在较大的间隔, 相位匹配作用会使新的光谱成分在短于零色散波长的位置产生, 这就造成了超连续光谱在600 nm到1 μm 之间的强度凹陷. 若不考虑光谱平坦性, 实验最终产生的超连续谱宽度也超过一个倍频程的范围, 波长覆盖从550 nm到1400 nm.

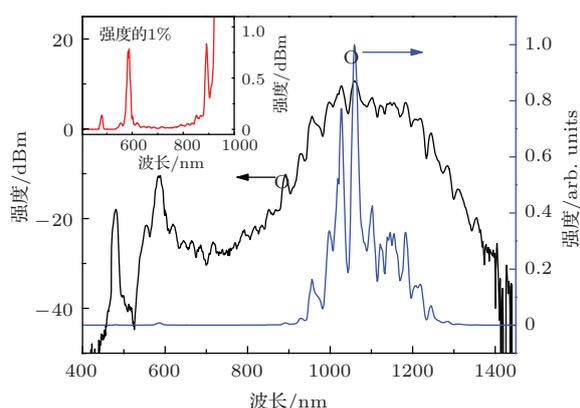


图4 利用长度为9 cm的拉锥式单模光纤产生超连续光谱(插图中给出400—1000 nm范围的归一化强度光谱(强度减小到1%))

尽管上述两种高非线性光纤都可以产生覆盖倍频程波段的超连续光谱, 但由于光纤结构和零色散波长等光纤参数的不同, 产生的超连续光谱也各有特点. 其中零色散波长与入射脉冲波长的相对位置对超连续光谱的产生影响较大^[21], 实验中使

用PCF的零色散波长略小于入射脉冲波长, 因此孤子裂变产生的高阶孤子可以较少的受到色散的影响而尽可能的红移, 拉曼效应也充分地参与脉冲演化和光谱扩展; 在短于入射脉冲的波段范围内, 光谱的平坦性也相对较好, 色散波随着入射脉冲功率的增加而蓝移, 最终在580 nm到1000 nm的光谱范围内形成较平坦的宽光谱辐射. 然而, 拉锥式单模光纤的零色散波长为850 nm左右, 偏离入射脉冲的波长较远, 即入射脉冲的波长范围位于拉锥式单模光纤的负色散较大的区域, 因此在脉冲演化过程中, 孤子裂变占据着主导地位, 新产生的高阶孤子中仅有少部分因拉曼作用产生自频移, 而且从图4中可以看出长波段的拉曼频移没有PCF的效果明显, 长波范围仅扩展到1400 nm左右. 同时, 短波的光谱特性也与PCF产生的光谱具有较大的差异, 首先, 在600 nm到900 nm范围内光谱的强度下降较严重, 这使整个范围的超连续谱变得不再平坦; 其次, 基于拉锥式单模光纤超连续光谱中, 产生的色散波偏向更短的波长, 造成这两种情况的原因除了光纤结构的差异之外, 更重要的还是零色散波长对脉冲演化的影响. 鉴于色散波的产生需满足相位匹配的关系的原因, 零色散波长越小且越远离入射脉冲波长, 产生的色散波的波长也会越短, 但这会导致色散波与入射脉冲之间的频谱成分具有较差的光谱平坦性. 因此, 实验上若产生相干的可见光波长而不要求光谱平坦性的超连续光源, 可以通过调节高非线性光纤的零色散波长来匹配入射脉冲波长来实现, 与PCF相比较来说, 拉锥式单模光纤仅通过改变拉锥光纤的芯径大小就可以较容易实现

4 结 论

本文报道了采用重复频率为250 MHz、脉冲宽度为135 fs、功率为2.2 W的锁模掺镜光纤激光, 分别注入到两种高非线性光纤中产生倍频程超连续光谱, 其中利用PCF产生的光谱覆盖从580 nm到1650 nm近两个倍频程的范围, 而利用拉锥式单模光纤可以产生功率大于1.3 W, 光谱覆盖550 nm到1400 nm的超连续谱输出. 实验中通过比对不同超连续谱的产生特性, 表明在零色散波长较大地偏离入射脉冲波长的情况下, 产生的超连续光谱平坦度较差, 但脉冲演化过程产生的色散波会更偏向短

波, 从而增加超连续光谱在可见光部分的带宽. 鉴于光纤拉制的便利性和参数的可调节性, 拉锥式单模光纤可以作为光谱展宽的非线性介质应用于超连续产生, 频率扩展及频率测量等领域的研究.

感谢中国科学院物理研究所的丁伟老师和北京大学的赵妍英博士对超连续光谱产生的有益讨论.

参考文献

- [1] Morioka T, Takara H, Kawanishi S, Kamatani O, Takiguchi K, Uchiyama K, Saruwatari M, Takahashi H, Yamada M, Kanamori T, Ono H 1996 *Elect. Lett.* **32** 906
- [2] Hartl I, Li X D, Chudoba C, Ghanta R K, Ko T H, Fujimoto J G, Ranka J K, Windeler R S 2001 *Opt. Lett.* **26** 608
- [3] Hassan M Th, Wirth A, Grguraš I, Moulet A, Luu T T, Gagnon J, Pervak V, Goulielmakis E 2012 *Rev. Sci. Instrum.* **83** 111301
- [4] Travers J C, Rulkov A B, Cumberland B A, Popov S V, Taylor J R 2008 *Opt. Express* **16** 14435
- [5] Chen Z, Xiong C, Xiao L M, Wadsworth W J, Birks T A 2009 *Opt. Lett.* **34** 2240
- [6] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J 2000 *Opt. Lett.* **25** 25
- [7] Jones D J, Diddams S A, Ranka J K, Stentz A, Windeler R S, Hall J L, Cundiff S T 2000 *Science* **288** 635
- [8] Zhao X F, Yang Y F, Zhou H B, Lou C Y, Gao Y Z 2007 *Chin. Phys.* **16** 1672
- [9] Zhou G Y, Li S G, Hou L T, Yuan J H, Sang X Z, Yu C X, Xin X J, Shen X W, Zhang J L 2011 *Chin. Phys. B* **20** 054210
- [10] Wang X Y, Li S G, Liu S, Yin G B, Li J S 2012 *Chin. Phys. B* **21** 054220
- [11] Jiang T, Wang G, Zhang W, Li C, Wang A, Zhang Z 2013 *Opt. Lett.* **38** 443
- [12] Chen H, Guo L, Jing A, Chen S, Hou J, Lu Q 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 154207 (in Chinese) [湛鸿伟, 郭良, 靳爱军, 陈胜平, 侯静, 陆启生 2013 物理学报 **62** 154207]
- [13] Yang W Q, Zhang B, Hou J, Yin K, Liu Z J 2014 *Chin. Phys. B* **23** 054208
- [14] Birks T A, Wadsworth W J, Russell P St J 2000 *Opt. Lett.* **25** 1415
- [15] Akimov D A, Ivanov A A, A Ifimov M V, Bagayev S N, Birks T A, Wadsworth W J, Russell P St J, Fedotov A B, Pivtsov V S, Podshivalov A A, Zheltikov A M 2002 *Appl. Phys. B* **74** 307
- [16] Teipel J, Türke D, Giessen H, Zintl A, Braun B 2005 *Opt. Express* **13** 1734
- [17] Rusu M, Kivistö S, Gawith C B E, Okhotnikov O G 2005 *Opt. Express* **13** 8547
- [18] Snyder A W, Love J D 1983 *Optical Waveguide Theory* 1st Edition (London New York: Chapman and Hall Ltd)
- [19] Tong L, Lou J, Mazur E 2004 *Opt. Express* **12** 1025
- [20] Dudley J M, Genty G, Coen S 2006 *Rev. Mod. Phys.* **78** 1135
- [21] Hu M, Wang Q, Li Y, Wang Z, Zhang Z, Chai L, Zhang R 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 4243 (in Chinese) [胡明列, 王清月, 栗岩峰, 王专, 张志刚, 柴路, 章若冰 2004 物理学报 **53** 4243]

Supercontinuum generation in photonic crystal fiber and tapered single-mode fiber*

Zhang Long¹⁾ Han Hai-Nian^{1)†} Hou Lei¹⁾ Yu Zi-Jiao¹⁾ Zhu Zheng²⁾
Jia Yu-Lei²⁾ Wei Zhi-Yi¹⁾

1) (*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Optical Physics, Beijing 100190, China*)

2) (*China University of Petroleum, College of Science, Qingdao 266580, China*)

(Received 23 March 2014; revised manuscript received 22 April 2014)

Abstract

Supercontinuum generation has received extensive attention because of the innovation of high nonlinear fiber, which makes the supercontinuum system more simple, compact, and efficient. Nonlinear effects are enhanced greatly during the strong interaction between the light and matter in high nonlinear fiber, and the spectrum will be broadened effectively. In this paper, we demonstrate the supercontinuum generation in a photonic crystal fiber and a conventional tapered single-mode fiber pumped by the mode-locked Yb fiber laser. Through the experimental comparison of the supercontinuum spectrum between two kinds of the high nonlinear fibers, the spectral flatness, Raman perturbation, and dispersion wave radiation are discussed for studying the characteristics of supercontinuum generation. Finally, the octave supercontinuum-based both kinds of high nonlinear fibers could be achieved. In particular, the employment of tapered single-mode fiber is proven to be an appropriate candidate for supercontinuum generation and further application.

Keywords: supercontinuum generation, highly nonlinear fiber, nonlinear optics, femtosecond laser,

PACS: 42.72.Ai, 42.55.Tv, 42.65.-k, 42.65.Re

DOI: [10.7498/aps.63.194208](https://doi.org/10.7498/aps.63.194208)

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB821304), and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11078022, 61378040).

† Corresponding author. E-mail: hnhan@iphy.ac.cn.