

doi: 10.3788/gzxb20164508.0832002

低脉冲能量红外泵浦的宽带超连续光谱产生

吴元杰^{1,2,3}, 邹璞⁴, 叶慧琪^{1,2}, 韩建^{1,2}, 傅凌统⁴, 肖东^{1,2}

(1 中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 南京 210042)

(2 中国科学院天文光学技术重点实验室, 南京 210042)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

(4 Menlo Systems GmbH, Am Klopferspitz 19a, 82152 Martinsried, Germany)

摘要:以重复频率为 250 MHz、脉冲宽度为 140 fs 的锁模掺镱光纤激光器作为泵浦源, 用拉锥光子晶体光纤产生超连续光谱。优化光纤拉锥直径后, 在泵浦光脉冲能量达到 0.36 nJ 时, 产生的超连续光在 -20 dB 水平的光谱覆盖范围为 470~1 620 nm; 继续增加泵浦光脉冲能量, 光谱范围在可见光区已无显著增大。超连续光谱产生的数值模拟结果与实验符合良好, 且模拟中超连续光谱产生的部位为光纤靠近入射端的过渡段, 与实验中观察到的现象吻合。以 25 GHz 高重复频率脉冲激光作为泵浦源, 保持 0.36 nJ 脉冲能量, 用优化后的光纤进行超连续光谱产生, 得到光谱在 -20 dB 水平上覆盖可见光区的范围为 450~700 nm, 超过 12 h 的光谱演化测试表明了超连续光的长期稳定性。

关键词:非线性光学; 超连续谱产生; 光子晶体光纤; 飞秒脉冲; 非线性薛定谔方程

中图分类号: O437

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)08-0832002-6

Broadband Supercontinuum Generation from Low Pulse Energy Infrared Pumps

WU Yuan-jie^{1,2,3}, ZOU Pu⁴, YE Hui-qi^{1,2}, HAN Jian^{1,2}, FU Ling-tong⁴, XIAO Dong^{1,2}

(1 National Astronomical Observatories / Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

(2 Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(4 Menlo Systems GmbH, Am Klopferspitz 19a, 82152 Martinsried, Germany)

Abstract: By using an ytterbium fiber laser with a repetition rate of 250 MHz and a pulse duration of 140 fs as the pump source, the experiments of broadband supercontinuum generation were conducted with tapered Photonic Crystal Fibers (PCFs). After optimizing the waist diameter of the PCF tapers, when the pulse energy of the pump source is up to 0.36 nJ, a broadband spectrum was generated in the range from 470 nm to 1 620 nm at the level of -20 dB. After reaching up to 0.36 nJ, further increasing the pulse energy of the pump does not strongly benefit the spectral bandwidth in the visible range. The supercontinuum generation is verified by the simulation. In the simulation, the supercontinuum is generated in the input transition section, which is also observed in the experiments. By keeping the pulse energy of 0.36 nJ, this fiber survives with the high repetition rate pulses of 25 GHz, and obtains the -20 dB level spectral range from 450 nm to 700 nm in the visible range. A more than 12 h spectral evolution measurement shows the stability of the generated supercontinuum.

Key words: Nonlinear optics; Supercontinuum generation; Photonic crystal fibers; Femtosecond pulses;

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 11373051)、国家自然科学基金青年基金 (Nos. 11403069, 11303067) 和江苏省青年基金 (Nos. BK20131061, BK20141062) 资助

第一作者: 吴元杰 (1987-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为激光光谱。Email: yjwu@niaot.ac.cn

导师 (通讯作者): 肖东 (1967-), 男, 研究员, 博士, 主要研究方向为激光光谱。Email: dxiao@niaot.ac.cn

收稿日期: 2016-02-01; 录用日期: 2016-04-25

<http://www.photon.ac.cn>

Nonlinear Schrodinger equation

OCIS Codes: 320.6629; 190.4370; 060.5295; 140.3615

0 引言

具有宽带超连续光谱的相干光源在精密光谱学、生物医学等领域有着广泛应用^[1-2]. 光纤具有纤芯直径小的特点, 有利于高能量密度的产生以激发非线性效应, 因而被广泛应用于超连续光谱的产生^[3]. 通过对光纤进行拉锥处理, 可以改变光纤原有的色散能力, 使用较短长度的光纤即可产生超连续光谱. 文献[4]于2000年报道了对传统通信光纤进行拉锥可产生超连续光谱. 光子晶体光纤更具有色散可设计特性, 因此成为产生超连续光谱最有效的器件^[5-7]. 文献[8]于2000年报道了使用长为75 cm的光子晶体光纤产生超连续光谱. 文献[9]使用重复频率为7 kHz、脉冲宽度为600 ps、中心波长为1 064 nm的泵浦源, 当脉冲能量达到8.6 μJ 时, 得到了范围为400~2 450 nm的极宽超连续光谱. 对光子晶体光纤拉锥, 即对光子晶体光纤的色散进行再设计, 已成为广泛使用的超连续光谱产生技术^[10-11].

目前, 使用红外泵浦源, 通过拉锥光纤产生可见光区和红外光区的超连续光谱, 均需要较高的脉冲能量. 文献[12]采用中心波长为1 040 nm、脉冲宽度为135 fs、重复频率为250 MHz的泵浦光, 在光功率为2 W时(相应脉冲能量为8 nJ), 由拉锥单模光纤得到范围为550~1 400 nm的展宽光谱. 文献[13]使用中心波长为800 nm、脉冲宽度为130 fs的泵浦源, 当脉冲能量为5 nJ时, 由拉锥光子晶体光纤产生的超连续光谱范围为280~1 400 nm. 文献[14]使用中心波长为1 050 nm、脉冲宽度为98 fs、重复频率为100 MHz的脉冲光源, 当泵浦光功率为100 mW(相应脉冲能量1 nJ)时, 由拉锥光子晶体光纤得到范围为350~700 nm的可见光区超连续光谱.

尽管高功率泵浦光有利于产生高功率输出光, 但由于大量光子照射带来的玻璃材料损伤, 导致光纤在高功率泵浦光下展宽能力随时间变弱. 文献[15]讨论了玻璃色心的产生对光纤超连续光谱产生能力的破坏. 在作为天文光谱仪高精度定标源的天文光学频率梳中^[16-17], 对重复频率超过10 GHz的飞秒脉冲光源进行光谱展宽时发现: 由拉锥光子晶体光纤产生的超连续光经过一段稳定期, 随着色心的形成, 展宽带宽变窄, 且光谱结构不断变化, 即光子晶体光纤存在光谱展宽寿命问题, 通常绿光泵浦下光子晶体光纤的寿命在1 h以下^[18].

影响色心形成的因素有泵浦光单脉冲能量、光子能量等^[18]. 泵浦光单脉冲能量越高或光子能量越高, 色心产生速度越快, 光纤的光谱展宽寿命越短. 超连续

光的产生效果同样强烈依赖于泵浦光的单脉冲能量, 脉冲能量不足时无法实现光谱展宽. 因此, 期望通过优化拉锥光子晶体光纤, 在低脉冲能量下获得宽带超连续光谱, 更有效地利用泵浦光, 有利于光谱展宽寿命的延长. 对于天文光学频率梳, 将光谱展宽由绿光泵浦改变为红外光泵浦, 降低了泵浦光的光子能量, 同样有利于获得更长的光纤使用寿命.

本文使用重复频率为250 MHz的红外泵浦光, 在低脉冲能量条件下, 通过改变光子晶体光纤拉锥形状优化光谱展宽效果. 将优化后的光纤应用于重复频率为25 GHz天文光学频率梳中进行可见光区宽带超连续光谱产生实验, 并通过记录光谱的演化来测试超连续光的长期稳定性.

1 光子晶体光纤的拉锥优化

选用较高占空比的光子晶体光纤, 可使光纤的群折射率曲线U形结构的右臂蓝移, 更有利于宽带超连续光谱的产生^[9]. 如文献[13]选用纤芯直径5.4 μm 的光子晶体光纤, 占空比达到85%. 本文中, 期望光子晶体光纤可以在高重复频率泵浦下安全使用, 假如选用的占空比过高, 光纤的气孔微结构容易被高能量密度泵浦光破坏. 因此选用的光子晶体光纤的占空比为80%, 纤芯直径为1.88 μm , 初始双零色散波长位于745 nm和1 780 nm, 光纤去掉塑料保护层后外径为125 μm .

拉锥时使用二硅化钼棒加热炉, 炉内温度通过红外温度传感器实时测量. 硅钼棒两端所加电压保持不变, 对电流进行控制, 进而精确控制加热炉内温度. 炉内温度应足够高以使玻璃软化, 避免拉制时光纤被拉断; 温度应低于一定阈值, 避免光纤的气孔结构在高温下被破坏. 因此, 选定的光纤拉制温度为1 400 $^{\circ}\text{C}$. 控制时, 光纤的一端固定, 另一端被持续拉伸. 加热炉沿着光纤扫动, 光纤的拉锥形状可以通过控制加热炉与光纤的相对运动而改变. 光纤拉锥后过渡段外形应尽量平滑, 根据文献[19]所述, 选择过渡段外形参量 α 值为-0.5, 该参量表征了加热区间在光纤拉制过程中的变化, 当取-0.5时, 意味着光纤拉锥过渡段斜率为常量.

光谱展宽效果受单脉冲能量的影响, 光纤拉锥引起的光能泄露会导致光谱展宽效果退化. 设计拉锥光纤的过渡段不宜过短, 以避免整体斜率过大导致的光能泄露; 拉锥时, 增加加热炉往返运动次数, 可增加光纤过渡段的局部平滑度, 减少因局部斜率过大引起的光能泄露. 在本文的实验中, 拉锥光纤过渡段长度保持在60 mm左右, 加热炉扫过光纤的运动次数达到70

次,拉锥光纤的过渡段外形模拟数据如图 1,斜率的变化量基本保持在 $1 \mu\text{m}/\text{mm}$ 范围内。

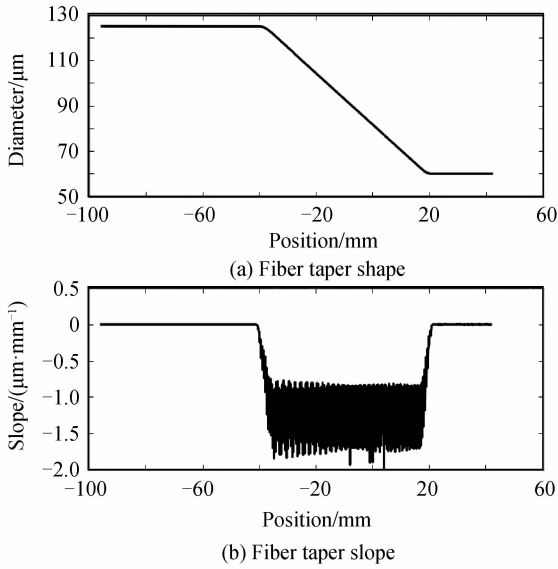


图 1 拉锥光子晶体光纤过渡段外形模拟

Fig. 1 Simulations of the transition shape of the photonic crystal fiber taper

对光子晶体光纤进行拉锥后,其色散特性将发生改变.在过渡段中,光纤直径不断减小,纤芯直径随之减小,光纤的两个初始零色散波长均发生蓝移.短波长区的零色散波长主要受材料色散的影响,对纤芯直径的变化不敏感;长波长区的零色散波长主要受波导色散的影响,随纤芯的减小快速蓝移.这样位于长波长区的零色散波长蓝移速率高于位于短波长区的零色散波长蓝移速率,两个零色散波长间距不断变小^[11].光纤色散曲线变化的同时,泵浦光能量密度不断增加,强烈激发光纤的非线性效应^[13].通过改变拉锥直径改变光纤过渡段的外形,影响了光谱的演化过程,可实现光谱展宽效果的优化。

测量选用的泵浦光源为飞秒掺镱光纤激光器,中心波长为 $1\ 040\ \text{nm}$,脉冲宽度为 $140\ \text{fs}$,重复频率为 $250\ \text{MHz}$,光功率可由一台放大器控制.拉锥光子晶体光纤产生的光谱经由多模光纤传输,由光谱分析仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)测量。

在使用光纤时应尽量减小非拉伸段对入射脉冲的色散作用,因此保留入射端非拉伸段长度大约为 $20\ \text{mm}$.光子晶体光纤的数值孔径主要由纤芯直径决定,通过在低光功率下(此时光谱尚未展宽或展宽效果较弱)测试一系列不同数值孔径的耦合透镜,比较耦合效率,寻找配合选定光子晶体光纤数值孔径的最优透镜.优化后,最佳透镜的焦距为 $4.55\ \text{mm}$,数值孔径为 0.55 .

拉锥至不同直径的光子晶体光纤超连续光产生效果如图 2,测量使用的泵浦光脉冲能量均为 $0.36\ \text{nJ}$ (相应光功率为 $90\ \text{mW}$).在可见光区,拉锥直径为 $80\ \mu\text{m}$

的光纤仅产生窄带蓝光.拉锥光纤至更小直径,该窄带蓝光向长波长方向生长扩展,同时红光光谱不断展宽,直至覆盖从蓝光至泵浦光的整个范围.当减小拉锥直径至 $60\ \mu\text{m}$ 时,超连续光谱的带宽达到最大值.继续减小拉锥直径至 $55\ \mu\text{m}$,可见光区光谱带宽不再发生明显变化,而红外光区光谱带宽稍有减小,原因是光纤拉锥直径过小,红外光区的超连续光过多的泄露出纤芯.因此,拉锥该光纤至 $60\ \mu\text{m}$ 时,得到了最好的超连续光谱产生效果。

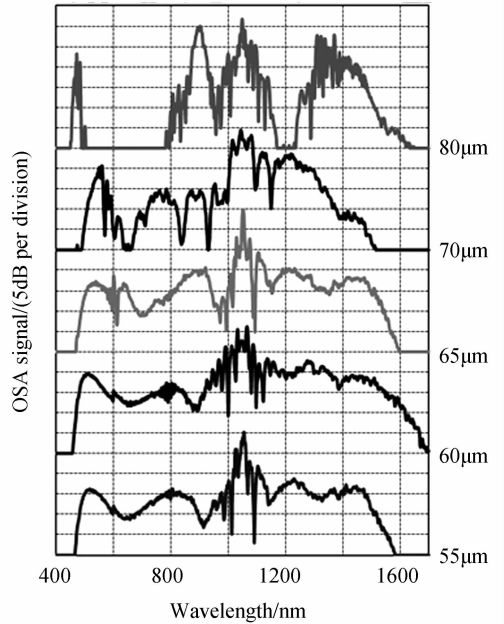


图 2 光子晶体光纤拉锥至不同直径时产生的超连续光谱

Fig. 2 Supercontinua generated by tapered photonic crystal fibers with different waist diameters

2 250 MHz 泵浦光超连续光谱产生效果测量

使用重复频率为 $250\ \text{MHz}$ 的红外泵浦源,在不同泵浦光功率下,拉锥至 $60\ \mu\text{m}$ 的光子晶体光纤产生的超连续光谱如图 3.在泵浦光功率为 $32.5\ \text{mW}$ 时,光谱展宽较弱,此时测得出射光功率为 $18.4\ \text{mW}$,得到该拉锥光纤的效率为 56% .随着泵浦光功率由 $32.5\ \text{mW}$ 增强至 $90\ \text{mW}$,超连续光谱带宽显著增加.泵浦光功率达到 $90\ \text{mW}$ (相应脉冲能量为 $0.36\ \text{nJ}$)时,在 $-20\ \text{dB}$ 水平上,超连续光谱覆盖范围为 $470\ \text{nm}\sim 1\ 620\ \text{nm}$,可见该光纤在低脉冲能量泵浦下实现了较好的光谱展宽效果.继续增加泵浦光脉冲能量,展宽光谱的覆盖范围在红外光区仍可进一步增加,但在可见光区已无显著变化.当泵浦光功率为 $400\ \text{mW}$ (相应脉冲能量 $1.6\ \text{nJ}$)时,得到的超连续光功率为 $220\ \text{mW}$.如将光谱平滑至 $-20\ \text{dB}$ 水平^[20],起伏结构可基本被消除,光谱覆盖范围超过 $1\ 200\ \text{nm}$,因此该光纤也可在高脉冲能量下实现高功率超连续光的产生。

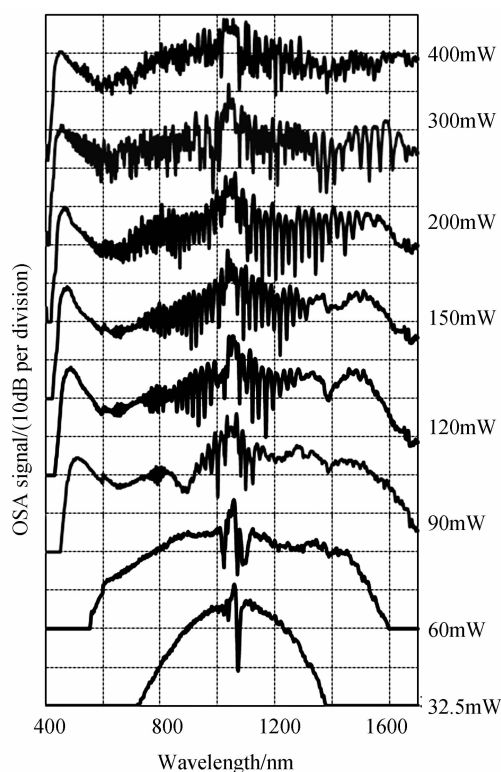


图3 拉锥光子晶体光纤在不同泵浦光功率下产生的超连续光谱

Fig. 3 Supercontinua generated by the tapered photonic crystal fiber with different pump powers

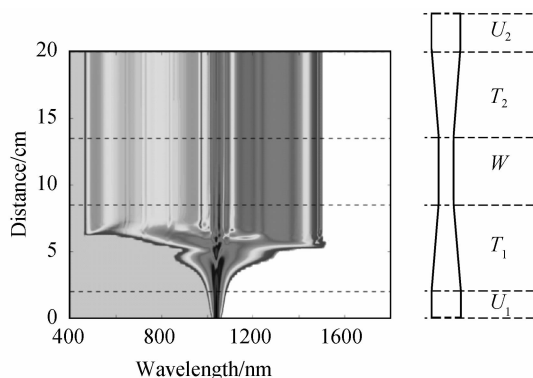
3 数值模拟

使用非线性薛定谔方程对该光纤的超连续光谱产生过程进行数值模拟^[1-13],模拟结果如图4(a).拉锥外形示意图4(b)直观地表示了图4(a)中虚线标出的拉锥过渡段起始位置.

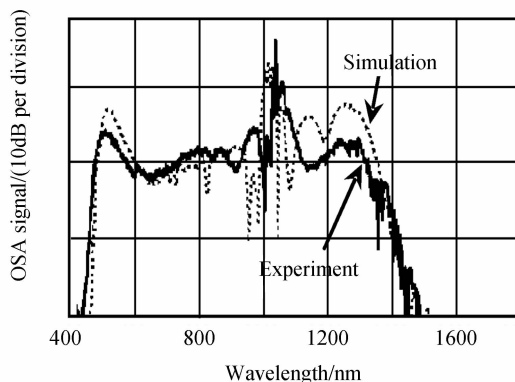
模拟中设定泵浦光重复频率为250 MHz,脉冲宽度为140 fs,中心波长为1 040 nm,功率为100 mW(相应脉冲能量为0.4 nJ).由光纤的初始双零色散波长位置可知,在保留的非拉伸段,泵浦光位于光纤的反常色散区内,光谱由于自相位调制作用被轻微对称展宽.接着脉冲进入 T_1 段,光纤直径不断减小,纤芯直径随之减小,驱使光纤的色散曲线变化,同时泵浦光能量密度升高,高阶孤子产生并随之发生孤子呼吸等过程^[3],最终在 T_1 段中,光谱带宽达到最大值,这与实验观察到的超连续光在光纤中产生的部位相同.

光谱展宽达到最佳效果后,光谱各波长分量的光能量密度较低,且两个零色散波长曲线靠近并最终相交,反常色散区消失,孤子产生效应随之消失^[21].光谱在 T_1 段的后半段与 W 、 T_2 、 U_2 段中均保持宽度和结构的相对稳定,这与实验中观察到的现象基本符合.

数值模拟得到的超连续光谱与实际在泵浦光功率为100 mW时测量得到的超连续光谱对比如图4(c),二者具有较高吻合度.



(a) Simulated spectral propagation (b) Fiber taper sections



(c) Comparison of simulation and experiment

图4 超连续光谱产生模拟

Fig. 4 Supercontinuum generation simulation

4 25 GHz 泵浦光超连续光谱产生

使用法布里-珀罗腔(FPC),将重复频率为250 MHz的飞秒锁模掺铒光纤激光器的模式进行滤波,可得到重复频率为25 GHz的脉冲光.由此形成的大模式间隔光学频率梳,可以应用于高分辨率天文光谱仪的定标.天文光谱仪通常工作于可见光波段,需要将滤波后光梳的光谱从红外波段展宽至可见光波段.

在频域内,将光学频率梳的模式间隔从250 MHz滤波至25 GHz,意味着每100个模式中仅有1个模式被保留.使用不同重复频率泵浦源得到相同的展宽效果,需要满足相同脉冲能量的条件.计算可知维持脉冲能量为0.36 nJ不变时,25 GHz脉冲光的功率需要达到9 W.高功率红外光经过透镜聚焦,在焦点处能量密度极高,因此需要对光子晶体光纤进行保护处理,方法是将光纤入射端和出射端的气孔封闭.封闭气孔有多种优点,不仅避免了气孔污染对光纤色散特性的影响,并且避免了光镊作用等导致的光纤纤芯截面污染,同时将入射光的聚焦位置从空气-玻璃界面移至光纤内部,避免焦点处的高能量密度对光纤截面的破坏.

实验中发现,光纤非倾斜入射端面或出射端面会导致光在空气-玻璃界面发生反射,强的反射光会损毁置于光子晶体光纤之前的某些敏感光学元件.因此对光纤加装了光纤接头并进行了端面倾斜研磨处理.

经以上方法处理后的光纤,置于如图 5 的重复频率为 25 GHz 的天文光学频率梳中,可以在的高功率泵浦光下安全使用,进行超连续光谱产生实验,泵浦光中心波长为 1 040 nm,脉冲宽度为 140 fs. 由于光谱平滑单元限制,仅测量到可见光波长区的超连续光谱,其与从重复频率为 250 MHz 脉冲光源得到的超连续光

谱对比如图 6. 可见在相同的 0.36 nJ 脉冲能量下,得到的超连续光谱在可见光区带宽基本相同. 在天文光学频率梳中产生的超连续光在可见光区较为平滑,没有细微起伏结构,使用基于低分辨率空间光调制器的光谱平滑装置,可以得到顶部平坦的光谱用于天文光谱仪的波长定标^[20].

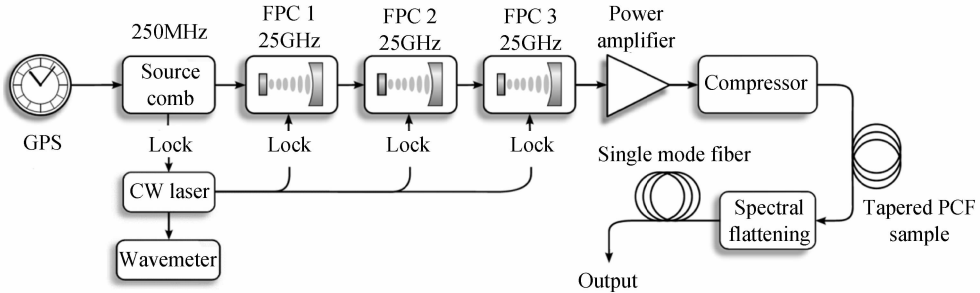


图 5 基于 25 GHz 天文光学频率梳的拉锥光子晶体光纤测试系统

Fig. 5 Testing system of tapered PCF sample consists in a 25 GHz astro-comb

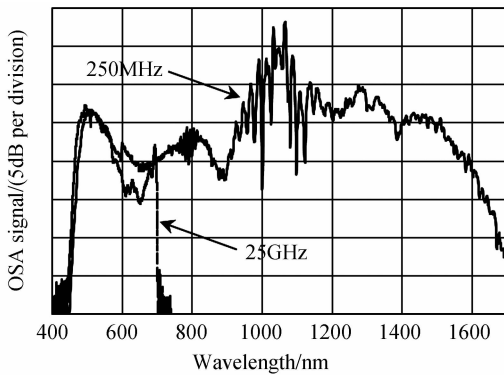


图 6 相同脉冲能量,不同重复频率泵浦光展宽效果对比
Fig. 6 Broadened spectra with the same pulse energy but different repetition rates

为测试该光纤在高功率泵浦光源下产生超连续光的稳定性,进行了超过 12 h 的可见光区光谱演化测试,泵浦光脉冲能量保持为 0.36 nJ(相应功率为 9 W). 实验中使用了 TEM 公司的 fiberlock 保证入射光光能耦合的稳定. 实验结果如图 7,该超连续光谱在测试时间范围内带宽保持稳定,同时光谱结构未发生明显变化,证明了该光纤在高功率泵浦光下长期可靠的超连

续光产生能力.

5 结论

本文利用拉锥光子晶体光纤,使用飞秒掺镱光纤激光器作为光源,在低脉冲能量红外泵浦下产生了宽带超连续光谱. 使用重复频率为 250 MHz 的脉冲激光作为泵浦光,优化光纤拉锥直径,在泵浦功率为 90 mW(相应脉冲能量为 0.36 nJ)时,产生的超连续光谱覆盖宽度已可达到 1 150 nm. 增强泵浦光功率,该光纤也可提供相应的高功率宽带超连续光谱. 通过数值模拟得到了光谱在光纤中的演化过程,并确认了超连续光谱产生于光纤入射端过渡段中. 使用重复频率为 25 GHz 的脉冲激光作为泵浦光,对光纤进行保护处理后,保证了光纤在 9W 光功率(相应脉冲能量为 0.36 nJ)下的安全使用,实验得到的超连续光谱覆盖可见光区的范围达到 76% 以上. 通过 12 h 测试,证明该光纤可提供长时间稳定的宽带超连续光谱.

参考文献

- [1] DUDLEY J M, GENTY G, COEN S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, **78**(4): 1135-1184.
- [2] COURVOISIER C, MUSSOT A, BENDOULA R, et al. Broadband supercontinuum in a microchip-laser-pumped conventional fiber: Toward biomedical applications[J]. *Laser Physics-Lawrence*, 2004, **14**(4): 507-514.
- [3] DUDLEY J M, TAYLOR J R. Supercontinuum generation in optical fibers [M]. Cambridge University Press, 2010.
- [4] BIRKS T, WADSWORTH W, RUSSELL P S J. Supercontinuum generation in tapered fibers[J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(19): 1415-1417.
- [5] RUSSELL P S J. Photonic-crystal fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, **24**(12): 4729-4749.
- [6] LI Xiao-qing, ZHANG Shu-min, LI Dan, et al. Experimental and numerical study of supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(9): 1805-

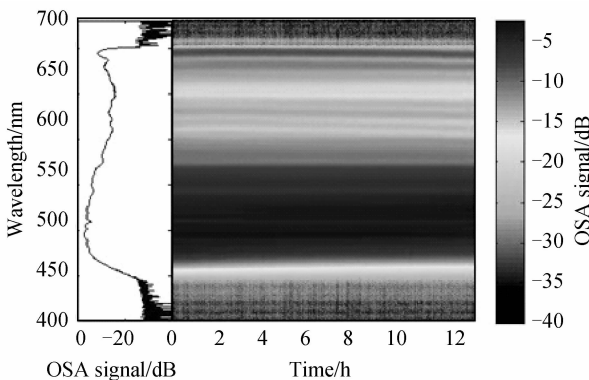


图 7 光谱展宽效果长期稳定性测试

Fig. 7 Long-term measurement of broadened spectrum

1809.
 李晓青, 张书敏, 李丹, 等. 光子晶体光纤中超连续谱产生的理论与实验研究[J]. 光子学报, 2008, **37**(9):1805-1809.
- [7] ZHANG Hui, WANG Yi, CHANG Sheng-jiang. Blue-shifted spectra of supercontinuum generation in photonic crystal fibers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(11): 1938-1942.
 张会, 王伟, 常胜江. 光子晶体光纤中超连续谱产生的蓝移光谱分析[J]. 光子学报, 2010, **39**(11):1938-1942.
- [8] RANKA J K, WINDELER R S, STENTZ A J. Visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm [J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(1): 25-27.
- [9] STONE J M, KNIGHT J C. Visibly "white" light generation in uniform photonic crystal fiber using a microchip laser[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(4): 2670-2675.
- [10] HUMBERT G, WADSWORTH W, LEON-SAVAL S, *et al.* Supercontinuum generation system for optical coherence tomography based on tapered photonic crystal fibre [J]. *Optics Express*, 2006, **14**(4): 1596-1603.
- [11] STARK S, STEINMETZ T, PROBST R A, *et al.* 14 GHz visible supercontinuum generation; calibration sources for astronomical spectrographs [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(17): 15690-15695.
- [12] ZHANG Long, HAN Hai-nian, HOU Lei, *et al.* Supercontinuum generation in photonic crystal fiber and tapered single-mode fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, **63**(19): 194208-1-194208-6.
 张龙, 韩海年, 侯磊, 等. 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[J]. 物理学报, 2014, **63**(19):194208-1-194208-6.
- [13] STARK S, TRAVERS J, RUSSELL P S J. Extreme supercontinuum generation to the deep UV [J]. *Optics Letters*, 2012, **37**(5): 770-772.
- [14] JIANG T, WANG A, NIU F, *et al.* Transition profile control for broadband visible supercontinuum generation in tapered PCF[C]. CLEO, 2015: 1-2.
- [15] STONE J, WADSWORTH W, KNIGHT J. 1064 nm laser-induced defects in pure SiO₂ fibers[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(15): 2717-2719.
- [16] PROBST R A, CURTO G L, AVILA G, *et al.* A laser frequency comb featuring sub-cm/s precision for routine operation on HARPS[C]. SPIE, 2014, 91471C: H2.
- [17] STARK S, STEINMETZ T, PROBST R A, *et al.* 14 GHz visible supercontinuum generation; calibration sources for astronomical spectrographs [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(17): 15690-15695.
- [18] WU Y, PROBST R A, STARK S P, *et al.* Photoinduced damage of tapered photonic crystal fibers in green astro-comb [J]. To be published.
- [19] BIRKS T, LI Y W. The shape of fiber tapers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1992, **10**(4): 432-428.
- [20] PROBST R A, STEINMETZ T, WILKEN T, *et al.* Spectral flattening of supercontinua with a spatial light modulator[C]. SPIE, 2013, **88641Z**: 1-8.
- [21] AGRAWAL G P. Nonlinear fiber optics [M]. Academic press, 2007.