

拉锥光子晶体光纤光谱展宽性能退化的分析与改进

吴元杰^{1,2}, 叶慧琪^{1,2}, 韩建^{1,2}, 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, 江苏 南京 210042;

²中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042

摘要 利用光谱展宽演化监测系统, 观察光纤出射光的偏振消光比与光谱展宽的相关性。通过测量、比较和分析三根拉锥光子晶体光纤的寿命, 可知光纤纤芯中存在对抽运光的四光子吸收过程, 验证了拉锥光子晶体光纤光谱展宽性能退化是由光纤纤芯中多光子吸收效应产生的色心缺陷导致的。提出改用低光子能量的光源以大幅减缓多光子吸收效应的方案, 并通过实验证实了使用 1040 nm 波长的抽运光可以有效延长拉锥光子晶体光纤的光谱展宽寿命。

关键词 光纤光学; 光子晶体光纤; 飞秒脉冲激光; 光谱演化; 多光子吸收

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1106006

Analysis and Improvement of Photonic Crystal Fiber Tapers for Spectral Broadening Degradation

Wu Yuanjie^{1,2}, Ye Huiqi^{1,2}, Han Jian^{1,2}, Xiao Dong^{1,2*}

¹Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

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

Abstract Herein, using a spectral broadening evolution testing setup, the relationship between the polarization-extinction ratio (PER) of the photonic crystal fiber (PCF) output light and spectral broadening evolution is observed. By measuring, comparing, and analyzing the lifetimes of the three tapered PCFs, we find that the tapered PCFs experience four-photon absorption processes at the pump light wavelength. The reason for the spectral broadening performance degradation of the tapered PCF is that the multiphoton absorption in the fiber core results in the color-center defect. A light source with low photon energy is proposed to reduce the multiphoton absorption. The experiment verifies that using the pump light with wavelength of 1040 nm can effectively prolong the spectral broadening lifetime of the tapered PCF.

Key words fiber optics; photonic crystal fibers; femtosecond pulse lasers; spectral evolution; multiphoton absorption

OCIS codes 060.5295; 140.3510; 320.6629

1 引 言

光子晶体光纤的发明为宽带超连续光谱的产生提供了强有力的技术支撑^[1-2]。光纤拉锥技术增大了光纤色散再设计的可能性, 使得纤芯中传输的光能密度更大, 更有利于非线性效应的产生。对商用单模光纤(Corning SMF-28)进行拉锥, 已经可以得到宽带的超连续光谱^[3]; 后续对光子晶体光纤进行

拉锥处理, 得到了更加广泛的应用^[4-7]。

理论上, 当激光光源的中心波长、脉冲长度、啁啾等参数固定时, 利用某一光子晶体光纤进行光谱展宽, 光谱展宽的效果决定于光源的单脉冲能量^[1-2]。这意味着为得到相同的光谱展宽效果, 在其他参数不变情况下, 激光光源的重复频率增加一定倍数时, 光纤承受的平均功率也需同样增加相同倍数。在某些应用中, 由于激光光源工作在高重复频

收稿日期: 2019-06-19; 修回日期: 2019-07-03; 录用日期: 2019-07-24

基金项目: 国家自然科学基金(11673046, 11727806, 11773044, 11873071)

* E-mail: dxiao@niaot.ac.cn

率(GHz 量级)频段,此时需要极高平均功率的抽运光才能利用光子晶体光纤实现带宽 10^2 nm 量级的光谱展宽^[8]。文献[9]中,利用拉锥光子晶体光纤对 14 GHz 重复频率、530 nm 中心波长、100 fs 脉冲宽度的激光源进行光谱展宽。通过改变拉锥段直径对光纤的光谱展宽效果进行优化,在脉冲能量达到 5 pJ 时(相应耦合进光纤的平均功率为 120 mW),得到了带宽为 235 nm 的超连续光。

拉锥光子晶体光纤在正常工作一段时间后会发 生光谱展宽效果退化现象,暴露出光纤存在光谱展宽寿命问题。拉锥光子晶体光纤使用寿命问题在国内外文献中鲜有讨论,原因在于仅当光纤工作于 GHz 及以上高重复频率抽运光条件下,其光谱的退化现象才较为显著。文献[10]通过一系列实验发现了光纤光谱展宽性能退化现象,证明了光纤存在特征吸收谱线且具有退火特性,得出光纤光谱展宽性能的退化是由于光纤纤芯经历多光子吸收效应产生色心的假设。该文献虽然提出诸多延长光纤光谱展

宽寿命的方法,但这些方法取得的超连续光谱足够带宽的预期效果未有提及,同时该文献并未通过实验验证多光子吸收过程。

本文首先通过使用一套光谱展宽演化监测系统,观察拉锥光子晶体光纤出射光偏振态与光谱带宽变化的关系;然后利用对比实验观察光纤对抽运光的多光子吸收效应并确认其阶数,为使用低光子能量抽运光进行光谱展宽以延长光纤寿命的方案提供理论基础;最后通过实验,证实了利用该方案延长拉锥光子晶体光纤使用寿命的可行性。

2 拉锥光子晶体光纤光谱展宽性能退化测量系统与实验

2.1 测量系统

要实现拉锥光子晶体光纤光谱展宽寿命的测量,首先需对光谱变化进行连续观测。由于光谱展宽效果的好坏取决于抽运光的偏振态^[10],因此也需对出射光偏振消光比进行连续测量,测量系统如图 1 所示。

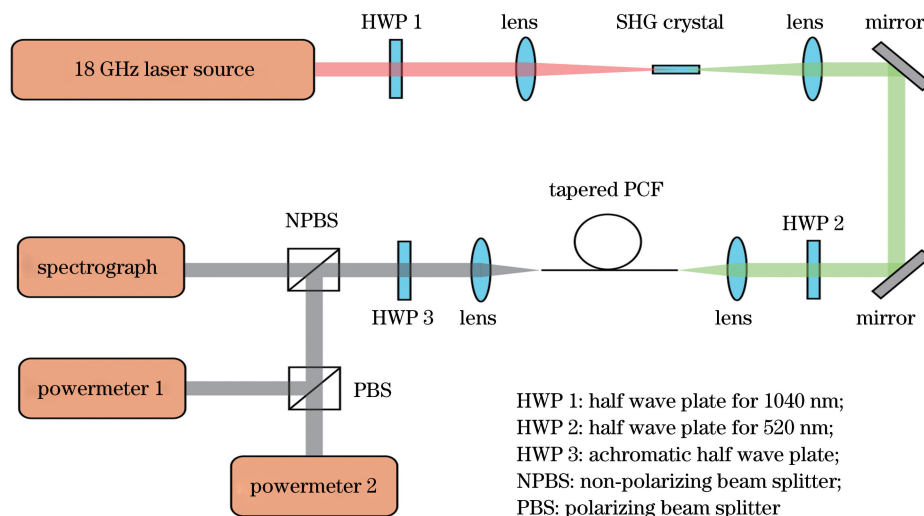


图 1 拉锥光子晶体光纤光谱展宽性能测量系统

Fig. 1 Test system for spectral broadening evolution of tapered PCFs

系统中,抽运源选用了掺镱光纤飞秒脉冲激光器,其中心波长为 1040 nm、重复频率为 18 GHz。经过三硼酸锂晶体倍频后,得到中心波长 520 nm、脉冲宽度 100 fs 的绿光。将该绿光耦合进拉锥光子晶体光纤,产生超连续光谱。系统中的光谱仪利用等时间间隔记录光纤出射光光谱;功率计 1 和功率计 2 分别持续记录光纤出射光两个偏振方向上的光功率,分别记为 P_1 与 P_2 ,偏振消光比可以通过 $10 \times \lg(P_1/P_2)$ 计算得出。

2.2 典型测量结果

测试的光子晶体光纤(本文中称为光子晶体光

纤 A)为纯熔融石英制作,原始外径为 $129 \mu\text{m}$ 。拉锥处理前,其气孔结构如图 2 所示,其中气孔占空比为 80%,而纤芯为固态,直径为 $3.33 \mu\text{m} \times 5.30 \mu\text{m}$,椭圆率为 37.2%,因此该光纤具有一定的保偏特性。优化拉锥直径能得到具有最佳光谱展宽效果^[9],此时拉锥段直径为 $31.2 \mu\text{m}$,拉锥段长度为 30 cm。

使用图 1 所示系统,对上述拉锥光纤进行测试,测量结果如图 3 所示。初始情况下拉锥光纤的耦合光功率为 230 mW,光谱带宽达到 140 nm;测量开始后,拉锥光纤出射光的消光比经历略微增大后持续减小的过程,同时光谱带宽不断减小;消光比在

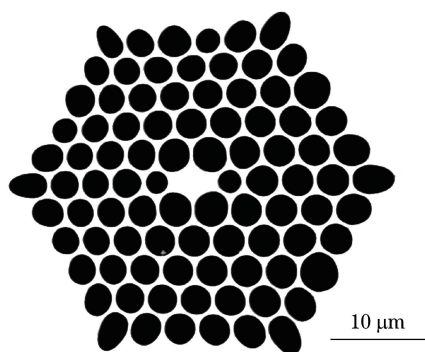


图2 光子晶体光纤 A 的气孔结构
Fig. 2 Air hole structure of PCF A

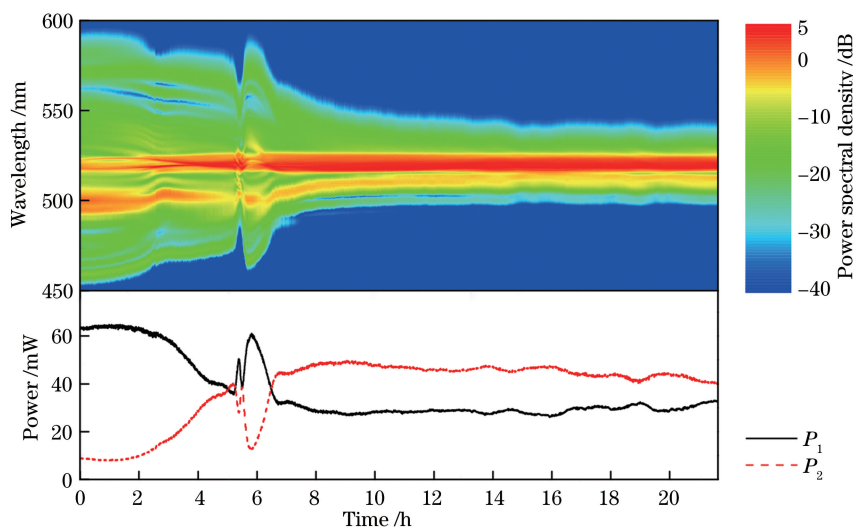


图3 光谱展宽性能演化典型测量结果
Fig. 3 Typical test results of spectral broadening evolution

为量化拉锥光子晶体光纤的光谱展宽能力持续时间,定义光纤自开始使用至其出射光消光比首次降为0的时间段为光纤的光谱展宽寿命,因此可得图3中的光纤的寿命为5 h。

展宽性能与出射光的偏振特性有密切的关系。文献[11]报道了将连续可见光入射到掺铈光纤时能够发生类似的出射光偏振态演化现象。该文献认为光纤材料受光子照射,经由多光子吸收过程产生色心,色心进而引起玻璃双折射特性的变化,最终导致出射光的偏振态不断变化。

光子晶体光纤的纤芯材料是熔融石英。相对掺铈材料,在熔融石英中产生色心更为困难^[10]。然而熔融石英材料中存在着某些非常规的键角,相应的硅氧化学键易断裂。熔融石英的硅氧键吸收光子后断裂时,会出现两种主要的色心:硅原子失去一个电子,形成悬空硅原子,通常称为缺氧色心;氧原子得到一个电子,形成悬空氧原子,通常称为非桥氧色心^[12-14]。类似于掺铈光纤中的过程,拉锥光子晶体

光纤的纤芯可能经历光子辐照而产生色心,色心改变了熔融石英材料的双折射特性,改变了抽运光在纤芯中传播时的偏振态。当抽运光的偏振方向与光纤的特征轴不再匹配时,光纤产生的超连续光谱将发生变化^[10]。因此,分析导致色心产生的多光子吸收过程是研究拉锥光子晶体光纤光谱展宽性能退化的关键。

2.3 测量结果讨论

上述实验结果证明,拉锥光子晶体光纤的光谱

展宽性能退化的关键。

3 拉锥光子晶体光纤中多光子吸收过程的验证

多光子吸收过程的一个重要特点是, N 阶光子吸收的发生概率与光强的 N 次方呈正比关系^[15-16]。相对于光纤中产生的超连续光中的各波长成分,抽运光具有光强度极大的优势,因此抽运光最可能激发多光子吸收效应。根据光纤光谱展宽寿命的定义,能够从时间维度量化光纤光谱展宽性能的变化趋势。据此,可以通过测量拉锥光子晶体光纤的抽运光光强与光谱展宽寿命的关系,验证是否有多光

子吸收效应发生,并确定其阶数。

由于光子晶体光纤 A 在大拉锥直径条件下光纤寿命过长,达数十小时,不便于比较测量,因此使用占空比为 85% 的纯熔融石英制作的固态纤芯光子晶体光纤(本文中称为光子晶体光纤 B),其气孔结构如图 4 所示,中心对称纤芯直径为 $2.6 \mu\text{m}$ 。选择较大拉锥直径为 $75 \mu\text{m}$,拉锥段长度为 30 cm ,拉制三根具有相同参数的光纤。大的拉锥直径使得该光纤无法产生宽带超连续光谱,因此能最大程度上减小抽运光外其他波长的光对实验的影响。将光纤分别置于不同的耦合光功率下测试,结果如图 5 所示。实验中,光纤耦合光功率从左至右依次为 80,

120,150 mW,展宽光谱的带宽均不宽于 60 nm。

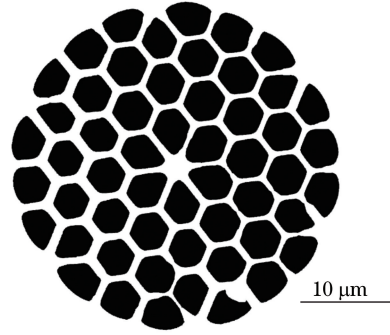


图 4 光子晶体光纤 B 的气孔结构
Fig. 4 Air hole structure of PCF B

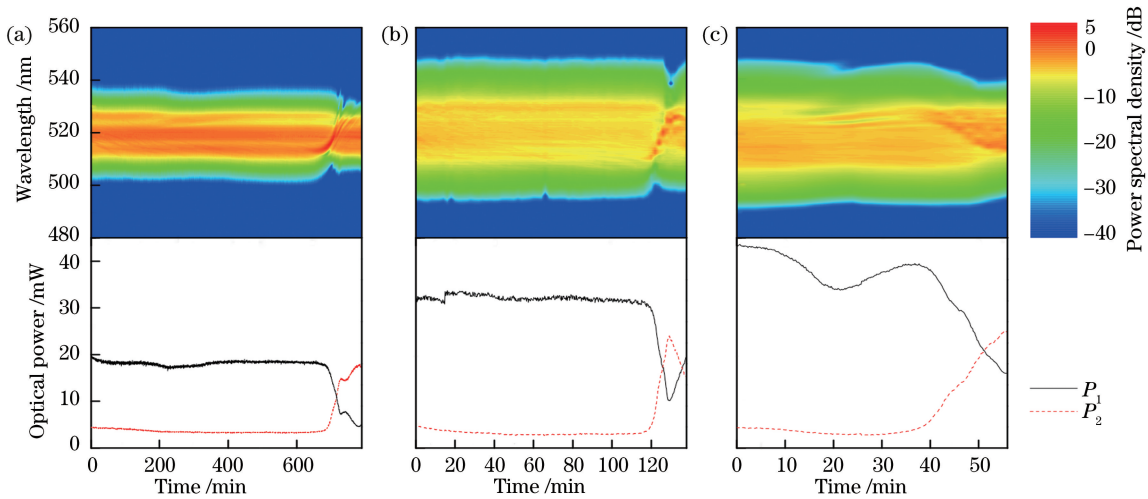


图 5 拉锥光纤在不同耦合光功率下光纤寿命测试
Fig. 5 Lifetime tests of tapered PCF under different coupling powers

实验结果显示,尽管光纤并未产生宽带超连续光,其光谱在一段时间内相对稳定,之后发生退化,出射光的偏振消光比也发生相关变化。可以确定,抽运光对光纤产生了伤害。根据光纤光谱展宽寿命的定义,本组实验得到的 3 根光纤的寿命分别为 720,120,50 min。

对 3 根光纤的光纤寿命和耦合光功率进行比较计算,分别得到

$$\left(\frac{120 \text{ mW}}{80 \text{ mW}}\right)^{4.42} = \left(\frac{720 \text{ min}}{120 \text{ min}}\right), \quad (1)$$

$$\left(\frac{150 \text{ mW}}{120 \text{ mW}}\right)^{3.92} = \left(\frac{120 \text{ min}}{50 \text{ min}}\right), \quad (2)$$

$$\left(\frac{150 \text{ mW}}{80 \text{ mW}}\right)^{4.24} = \left(\frac{720 \text{ min}}{50 \text{ min}}\right). \quad (3)$$

可知光纤寿命与耦合光功率存在 4 次方的关系。理论上,熔融石英硅氧键的键能约为 8 eV,520 nm 波长光的单光子能量为 2.38 eV,因此打断硅氧键需要 4 个光子。结合四光子吸收的概率与光

强的四次方呈正比例关系的理论^[15-16],可以确认观察到光纤纤芯经历了对 520 nm 抽运光的四光子吸收过程。

4 延长拉锥光子晶体光纤的光谱展宽寿命

上述实验已经证明,当拉锥光子晶体光纤的光谱展宽效果不良时,使用 520 nm 抽运光,光纤纤芯将经历四光子吸收过程,产生光谱展宽效果的退化。当光纤的拉锥参数优化后,虽然可以产生宽带光谱,但是相对光谱展宽后的各波长分量,抽运光仍具有更高的功率,仍将容易引发多光子吸收过程,造成光谱展宽效果的持续退化。因此,为延长光纤的光谱展宽寿命,需要抑制多光子吸收效应的产生,尤其是抑制抽运光导致的多光子吸收效应。

最直接的方案便是降低抽运光功率,但这将直接导致光纤的光谱展宽效果下降。当需要获得理想

光谱展宽效果时,该方案难以实施。

多篇文献讨论了通过掺杂来抑制熔融石英中的多光子吸收效应,如氢氧根掺杂^[17-18]、氢元素掺杂^[18-19]可以优化某些因键角不规则而易被破坏的硅氧键,或可迅速恢复已被破坏的硅氧键;氟元素掺杂^[20]可以在熔融石英中形成硅氟键和氧氟键,这两种键的键能相对硅氧键高,不易被破坏。但将这些掺杂的方法应用于拉锥光子晶体光纤时,未能保证光谱带宽同时产生良好的光纤寿命延长效果^[10]。结合本文验证的多光子吸收过程,可以将掺杂后效果不佳原因归结为新形成的化学键强度不够高。例如,4个波长520 nm的光子总能量为9.52 eV,只有当新化学键强度相对8 eV的硅氧键键能提高至少19%时,才能有效抑制四光子吸收过程的发生。

单光子的能量随波长的增长而减弱,因此改用长波长的抽运光是切实可行的方案。如图1所示,使用的520 nm光源是通过晶体倍频得到的。可以尝试跳过倍频过程,直接使用中心波长1040 nm的18 GHz抽运源进行光谱展宽。理论上1040 nm近红外光光子的光子能量是520 nm绿光光子能量的一半,为1.19 eV,因此可以将多光子吸收过程的阶数提高至8阶,其发生概率将大幅降低。

改用长波长抽运光的实验结果如图6所示。拉锥光子晶体光纤产生的超连续光在可见光区的覆盖范围为450~750 nm,光谱宽度达到了300 nm,优于文献^[9]中的报道。同时,光谱在超过25 h的时间范围内保持稳定,可见通过改用长波长抽运光的方法,在保证宽带光谱展宽效果的基础上实现了多光子吸收过程的有效抑制,达到了延长光纤寿命的效果。目前该方案已在实际天文光谱的定标应用中^[21-23]提供稳定的宽带光谱。此类应用中,一个观测夜晚里,宽带激光光谱的使用时间仅为几分钟,因此25 h的光纤寿命可以保证数月的使用。

实验发现,25 h后该光纤产生的超连续光谱仍将经历退化过程。但该退化过程呈现的特征与使用520 nm抽运光时的现象明显不同,进一步的研究仍在进行中。

5 结 论

利用光谱展宽性能测量系统,观察到拉锥光子晶体光纤在520 nm抽运光下的光谱展宽效果退化现象;通过分析观察到的光谱展宽效果退化与出射光偏振态的关系,引出了光纤纤芯中产生了色心的理论;为进一步验证色心产生的理论,使用520 nm

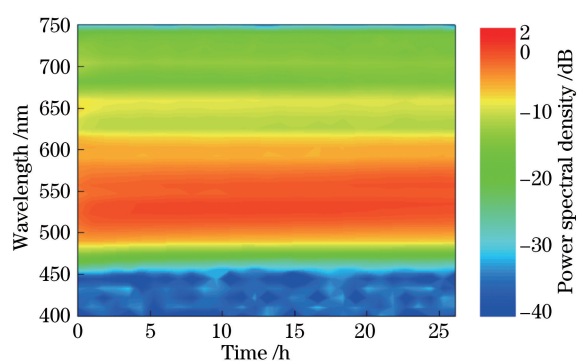


图6 拉锥光纤在使用1040 nm抽运光时的光纤寿命测试
Fig. 6 Lifetime test of tapered PCF with 1040 nm pump light
抽运光测量3根相同参数的拉锥光子晶体光纤在不同耦合光功率下的寿命,观察到光纤纤芯经历了对抽运光的四光子吸收过程;最后通过实验,证实了改用长波长抽运源进行光谱展宽是延长拉锥光子晶体光纤寿命的可行方案。

参 考 文 献

- [1] Agrawal G P. Nonlinear fiber optics & applications of nonlinear fiber optics[M]. Jia D F, Yu Z H, Tan B, *et al.*, Transl. Beijing: Electronic Industry Press, 2002: 41-121.
阿戈沃. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 谈斌, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 41-121.
- [2] Dudley J M, Genty G, Coen S. Supercontinuum generation in photonic crystal fiber[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135-1184.
- [3] Birks T A, Wadsworth W J, Russell P S J. Supercontinuum generation in tapered fibers [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(19): 1415-1417.
- [4] Wadsworth W J, Ortigosa-Blanch A, Knight J C, *et al.* Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers: a novel light source [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2002, 19(9): 2148-2155.
- [5] Barclay P E, Srinivasan K, Painter O. Nonlinear response of silicon photonic crystal microresonators excited via an integrated waveguide and fiber taper [J]. *Optics Express*, 2005, 13(3): 801-820.
- [6] Zhao Y, Xia F, Li J. Sensitivity-enhanced photonic crystal fiber refractive index sensor with two waist-broadened tapers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(4): 1373-1379.
- [7] Sørensen S T, Larsen C, Jakobsen C, *et al.* Single-mode pumped high air-fill fraction photonic crystal fiber taper for high-power deep-blue supercontinuum sources [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(4): 1097-

- 1100.
- [8] Wu Y J, Ye H Q, Han J, *et al.* Astronomical laser frequency comb for high resolution spectrograph of a 2.16-m telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0614001.
吴元杰, 叶慧琪, 韩建, 等. 2.16 m 望远镜高分辨率光谱仪的天文光学频率梳[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0614001.
- [9] Stark S P, 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.
- [10] Probst R A. Laser frequency combs for astronomy [D]. München: Ludwig Maximilian University of München, 2015: 43-61.
- [11] Bardal S, Kamal A, Russell P S J. Photoinduced birefringence in optical fibers: a comparative study of low-birefringence and high-birefringence fibers [J]. *Optics Letters*, 1992, 17(6): 411-413.
- [12] Hosono H, Ikuta Y, Kinoshita T, *et al.* Physical disorder and optical properties in the vacuum ultraviolet region of amorphous SiO₂ [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(17): 175501.
- [13] Stone J M, Wadsworth W J, Knight J C. 1064 nm laser-induced defects in pure SiO₂ fibers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(15): 2717-2719.
- [14] Shikama T, Kakuta T, Shamoto N, *et al.* Behavior of developed radiation-resistant silica-core optical fibers under fission reactor irradiation [J]. *Fusion Engineering and Design*, 2000, 51/52: 179-183.
- [15] Shim H, Liu M G, Hwangbo C, *et al.* Four-photon absorption in the single-crystal polymer bis (paratoluene) sulfonate[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(6): 430-432.
- [16] Hanczyc P, Samoc M, Norden B. Multiphoton absorption in amyloid protein fibres [J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(12): 969-972.
- [17] Leclerc N, Pfeleiderer C, Hitzler H, *et al.* Transient 210-nm absorption in fused silica induced by high-power UV laser irradiation[J]. *Optics Letters*, 1991, 16(12): 940-942.
- [18] Kajihara K. Improvement of vacuum-ultraviolet transparency of silica glass by modification of point defects (review) [J]. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 2007, 115(1338): 85-91.
- [19] Colombe Y, Slichter D H, Wilson A C, *et al.* Single-mode optical fiber for high-power, low-loss UV transmission [J]. *Optics Express*, 2014, 22(16): 19783-19793.
- [20] Hosono H, Mizuguchi M, Skuja L, *et al.* Fluorine-doped SiO₂ glasses for F₂ excimer laser optics: fluorine content and color-center formation [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(22): 1549-1551.
- [21] Wu Y J, Zou P, Ye H Q, *et al.* Broadband supercontinuum generation from low pulse energy infrared pumps[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(8): 0832002.
吴元杰, 邹璞, 叶慧琪, 等. 低脉冲能量红外泵浦的宽带超连续光谱产生[J]. *光子学报*, 2016, 45(8): 0832002.
- [22] Ye H Q, Han J, Wu Y J, *et al.* Working status of Chinese astro-comb and fiber-noise suppression [J]. *Progress in Astronomy*, 2016, 34(Suppl): 128-133.
叶慧琪, 韩建, 吴元杰, 等. 天文激光频率梳的运行状况及光纤噪声的抑制 [J]. *天文学进展*, 2016, 34(增刊): 128-133.
- [23] Hao Z B, Ye H Q, Han J, *et al.* Calibration tests of a 25-GHz mode-spacing broadband astro-comb on the fiber-fed high resolution spectrograph (HRS) of the Chinese 2.16-m telescope [J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2018, 130(994): 125001.