

1 040 nm 泵浦的光子晶体光纤超连续光谱产生性能退化研究

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 光子晶体光纤已经被广泛应用于由飞秒脉冲激光源产生超连续光谱。当激光源的重复频率较低时,由光子晶体光纤产生的超连续光谱随时间的变化过程较为缓慢,通常不被注意到。而在天文光谱仪定标等应用中,需要使用 GHz 至几十 GHz 量级的高重复频率激光源。此时,可观察到光子晶体光纤的超连续光谱产生性能在有限时间内产生显著的退化。在 1 040 nm 飞秒激光泵浦条件下,通过测试三种不同气孔占空比的光子晶体光纤的超连续光谱产生性能演化,发现超连续光谱的退化进程随光纤气孔占空比的增大而加速。观察发生光谱退化后的光子晶体光纤样品,发现在光纤上超连续光被产生的区段出现多个不同颜色的亮点,呈现有方向性的光泄露现象。针对光泄露现象,通过测量光纤的吸收光谱线,证实了实验中超连续光谱退化的主因并非是光纤熔融石英材料中大量非桥氧心产生。针对光泄露具有方向性这一特征,提出了经由多光子吸收作用在光纤纤芯中形成长周期光栅的理论。为探究影响光子晶体光纤超连续光谱产生性能的退化的因素,以达到光谱退化抑制的目的,首先通过改变了光纤的拉锥参数,期望增强光纤熔融石英材料的光子耐受性。实验结果证实了该方法的有效性较为有限。其次,从保持激光源的平均功率,降低激光脉冲的峰值功率和保持激光脉冲的峰值功率,降低激光源平均功率两个方面入手,对激光源进行调制。实验结果证明,光纤单位时间内接受的高峰值功率脉冲总量是影响其超连续光谱产生性能的最重要因素。在天文光谱仪定标的应用中,对超连续光谱光功率的需求并不高,使用斩波器降低光子晶体光纤入射光的平均功率是减缓超连续光谱产生性能退化过程的有效且简单可行的方法。

关键词 光子晶体光纤; 飞秒脉冲激光; 超连续光谱产生; 光谱演化

中图分类号: O433.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)11-3588-07

引言

随着光子晶体光纤应用于飞秒脉冲激光的光谱展宽,从单一激光源产生的超连续光谱已可覆盖一个乃至多个倍频程。这成为了从锁模飞秒激光器产生激光频率梳的关键技术,也极大扩大了激光频率梳的频率工作范围^[1-4]。在天文光谱仪定标等应用中,需要对高重复频率的激光源进行光谱展宽。利用光子晶体光纤,使用中心波长 520 nm 的 14 GHz 飞秒激光源,实现了带宽 235 nm 的超连续光产生^[5];使用中心波长 807 nm 的 1 GHz 飞秒激光源,产生了波长范围 550~890 nm 的光谱^[6]。得益于光子晶体光纤拉锥技术,使用中心波长 850 nm 的 1 GHz 飞秒激光源,得到了 500~900 nm 的波长覆盖范围^[7];使用中心波长 1 050 nm 的 18 GHz

飞秒激光源,更实现了 470~1 620 nm 的大于倍频程的光谱展宽^[8]。

光子晶体光纤在进行超连续光产生工作中,其光谱展宽性能的退化通常不被注意到。这是因为通常使用的飞秒激光源具有较低的重复频率,为几十 MHz 至几百 MHz 数量级。这种情况下,单位时间内进入光纤的脉冲数较少。而当对 GHz 量级重复频率的飞秒激光源进行光谱展宽时,为保持良好的光谱展宽效果,需保持激光的飞秒单脉冲能量不变。这意味着激光源的平均功率需大幅度提升,单位时间内进入光纤的脉冲数相应增多,极大加快了光谱展宽性能的退化^[9]。因此,在高重复频率激光源上实现宽带超连续光谱的产生后,光子晶体光纤是否可以长时间稳定工作,成为了其可否投入实际应用乃至商品化的关键因素。

文献[9-10]中已经报道,当使用重复频率 18 GHz,中心

收稿日期: 2020-10-14, 修订日期: 2021-02-18

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

作者简介: 吴元杰, 1987 年生, 中国科学院南京天文光学技术研究所博士研究生 e-mail: yjwu@niaot.ac.cn

* 通讯作者 e-mail: dxiao@niaot.ac.cn

波长 520 nm 的飞秒激光源时, 光子晶体光纤的光谱展宽效果在几分钟至几小时内出现明显的退化。其退化产生的原因在于制作光纤纤芯的熔融石英材料经历多光子吸收过程, 产生色心, 扰乱了光在光纤纤芯中传输时的偏振态, 进而导致光谱展宽效果的减弱。文献[9]报道了通过改用更长中心波长的 1 040 nm 飞秒激光源进行光谱展宽的方法, 对色心的产生进行了有效的抑制。使用 80% 占空比的拉锥光子晶体光纤, 产生的光谱在 25 小时时间范围内保持相对稳定。光谱覆盖范围为 450~750 nm。文献[11]报道了使用氢或其同位素注入的方法延长光纤的使用寿命, 但其主要涉及技术方法, 对于原理等没有深入讨论。

本文中, 选用三种不同占空比的光纤样品进行光谱展宽效果的演化测试。通过对比其退化的过程, 对退化的原因进行探讨。为实现光谱展宽寿命的延长, 利用改变光子晶体光纤的拉锥处理方式和调制激光源参数的方法进行对比实验, 观察测试光纤光谱展宽寿命与实验参数变化的关系。

1 实验部分

1.1 光纤光谱展宽效果演化测试实验设计

研究光纤光谱展宽效果演化所使用的测试光路如图 1 所示。

实验选用输出参数为中心波长 1 040 nm, 重复频率 25 GHz, 脉冲宽度 130 fs 的激光源。脉冲宽度可通过脉冲压缩装置调节。输出功率可通过控制光纤放大器的泵浦强度调节, 最高平均输出功率为 15 W^[12]。

为避免由于光纤光功率耦合效率的下降而引起光谱带宽的退化。拉锥光子晶体光纤样品均制备成裸纤跳线, 即在光纤两端加装了光纤接头。使用带压电陶瓷的反射镜支架与位于光纤出射端的光电二极管构成反馈系统, 保证光纤的光功率耦合效率始终维持在最高水平。光纤出射光经由 90:10 非偏振分束器分束。光纤产生的光谱由光谱分析仪等时间间隔持续记录。由于在拉锥光子晶体光纤与光谱分析仪间使用

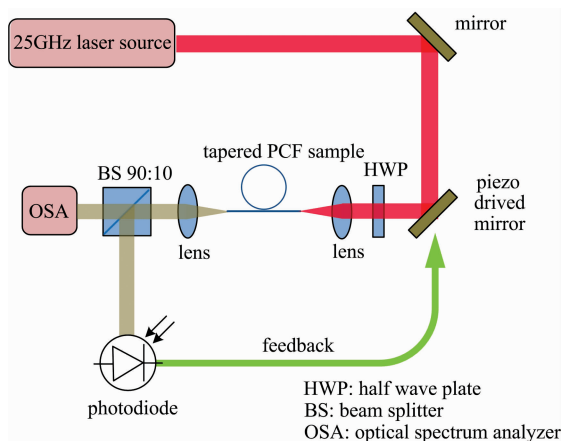


图 1 拉锥光子晶体光纤样品光谱展宽效果演化测试实验装置

Fig. 1 Experimental setup for spectral broadening evolution test of tapered PCF samples

了 Nufern S405-XP 光纤进行光传导(图 1 中并未画出), 记录光谱的长波长端截止波长为 700 nm。

1.2 光子晶体光纤的选择和拉锥样品制备

选用 A, B, C 三种光子晶体光纤样品, 气孔结构分别如图 2 所示。其占空比依次为 57%, 80% 和 90%。三个光纤样品的制作材料均为熔融石英。光纤 A 与光纤 B 使用相同的预制棒制成。由于使用该预制棒难以制备 80% 以上占空比的光纤, 因此光纤 C 具有与光纤 A 和光纤 B 不同的气孔结构。三个样品的光纤包层外径均为 125 μm 。纤芯均为椭圆形, 均具有光传输的保偏特性。光谱展宽使用的入射光偏振方向均为沿光纤纤芯长轴方向。三个样品的纤芯长轴尺寸依次为 4.05, 3.28 和 4.70 μm 。选择 4 μm 左右的纤芯长轴尺寸使得光纤对实验所选用的激光源具有良好的耦合效率, 均可达到 85% 以上。

使用文献[8]的方法对三个样品分别进行拉锥形状优化。拉锥时使用温度均为 1 400 $^{\circ}\text{C}$, 该温度下的光纤被足够软化以便拉锥, 同时气孔在拉锥过程中不会因为温度过高而收缩乃至闭合。这样, 光纤拉锥后的气孔与纤芯尺寸基本与光纤外径呈等比例变化。

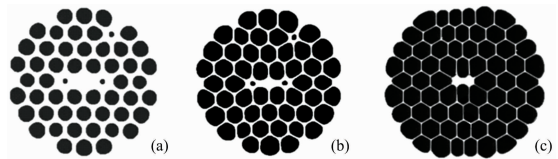


图 2 光子晶体光纤样品气孔结构

Fig. 2 Air-holes structures of PCF samples

优化拉锥形状后的三个光纤样品所产生的光谱展宽效果如图 3 所示。入射光单脉冲能量均为 0.36 nJ。在谱线峰值下 -20 dB 水平上, 三个光纤样品产生光谱短波长边缘可达到截止波长分别为 495, 450 和 430 nm。可见, 选用更高占空比的光子晶体光纤达到了光谱展宽加宽的效果。

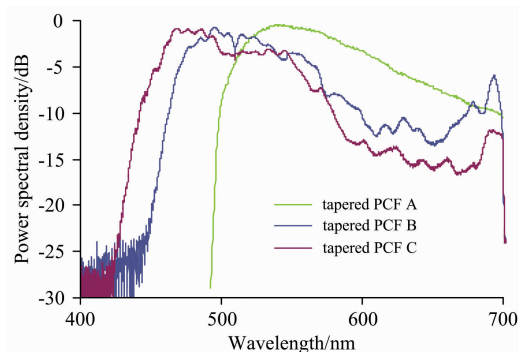


图 3 光子晶体光纤拉锥样品光谱展宽效果

Fig. 3 Spectral broadenings of tapered PCF samples

2 结果与讨论

2.1 光纤 A, B, C 的光谱演化测量结果

从光子晶体光纤 A 拉锥样品得到的展宽光谱演化如图 4 所示。在 600 h 的测试时间段内, 光谱结构基本稳定, 光谱

宽度未发生退化。在 600 h 至测量结束时间段内, 尽管光谱的短波长边缘截止波长并未发生明显改变, 然而光谱的谱线结构随时间发生连续无规则变化, 该变化不具有明显周期性。虽然可以通过光谱平坦系统^[12]对结构不断变化的光谱进行实时光谱整形, 但是光谱的变化反映着光纤内部物理性的变化是显著的。

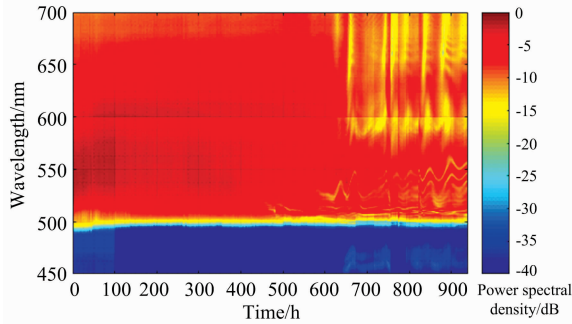


图 4 光子晶体光纤 A 拉锥样品光谱展宽效果演化
Fig. 4 Spectral broadening evolution of tapered PCF A

从光子晶体光纤 B 拉锥样品得到的展宽光谱演化如图 5 所示。在 20 h 的测试时间段内, 光谱结构基本稳定, 光谱宽度未发生退化。在 20 小时后, 光谱结构开始发生变化。首先在 650 nm 处出现谱线缺口。之后在第 21 小时至 26 小时时间段内, 650 nm 处缺口愈合。从第 26 小时起, 伴随着 650 nm 处缺口的复现与再度愈合, 在 540 nm 处出现了长期存在的谱线缺口。同时, 光谱短波长边缘截止波长呈现快速退化。直至第 50 小时, 光谱各频段的强度均发生强烈弱化。自此, 光纤已经无法正常提供高功率的宽带光谱输出。

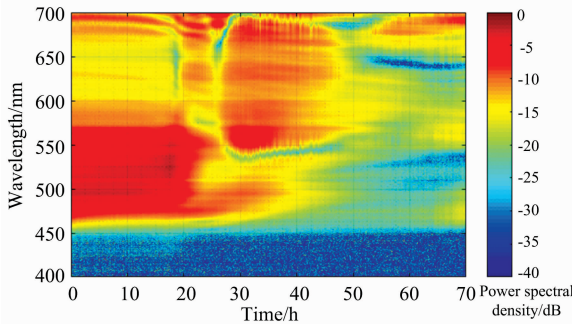


图 5 光子晶体光纤 B 拉锥样品光谱展宽效果演化
Fig. 5 Spectral broadening evolution of tapered PCF B

从光子晶体光纤 C 拉锥样品得到的展宽光谱演化如图 6 所示。可见, 光谱短波长边缘截止波长并未出现较稳定的时期, 而是从测试开始便发生退化, 并伴随着光谱结构的不断改变。第 5 小时后, 光谱各频段的强度弱化严重, 已无法提供高功率的宽带光谱输出。

观察经过 10 h 测试后的光子晶体光纤 C 拉锥样品, 发现光纤上在光谱展宽发生的区段出现多个不同颜色的亮点。这意味着在光纤上, 有不同波长的光从光纤纤芯泄露进入光纤包层, 进而耦合出光纤。由于在光谱展宽发生的区段, 光纤具有最小的拉锥直径, 因此光纤的损伤集中于该区域不难

理解。同时观察到泄露的光具有较强的方向性, 表现为沿着光纤中光的传输方向上最为强烈。在垂直光纤轴的方向上放置白板, 观察到明显的彩色同心光环。类似的现象在光子晶体光纤 A 和 B 拉锥样品的测试中也被观察到。相比之下, 光子晶体光纤 C 拉锥样品的光谱展宽退化最为严重, 亮点最为明显, 泄露光的强度也最强。

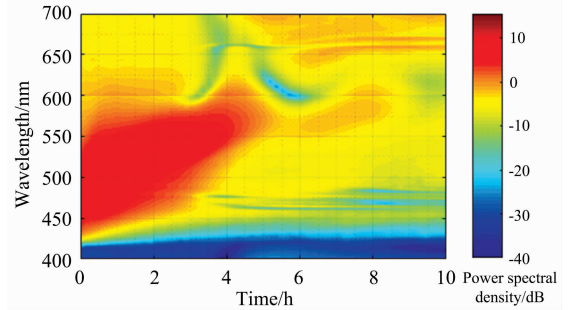


图 6 光子晶体光纤 C 拉锥样品光谱展宽效果演化
Fig. 6 Spectral broadening evolution of tapered PCF C

2.2 光谱退化现象的讨论

文献[9-10]中讨论了光子晶体光纤在光谱展宽使用过程中色心的产生。其重要特点之一便是光纤上的色心聚集处呈现亮点, 亮点发光不具有方向性。文献[10]中测量到光纤入射与出射光谱的差异, 通过 610 nm 处的强吸收证实了非桥氧色心的产生。对光子晶体光纤 C 拉锥样品进行吸收谱线的测量, 将是验证色心是否大量出现的简单有效的方法。

将经过 10 h 测试后的光子晶体光纤 C 拉锥样品使用方向调转, 即原出射端改为入射端。这样, 光纤未发生损伤的区段仍可产生完整光谱。经过损伤段的传输, 可观察出射光中光谱组分的缺失。测量得到的结果如图 7 所示, 图中蓝色曲线为全新光纤产生的可见光光谱; 红色曲线为经过 10 小时使用后的光纤, 将入射端与反射端交换后测量得到的可见光谱线。观察到光谱组分缺失集中出现在 480 和 680 nm, 而在 610 nm 处并未出现明显的光谱组分缺失。因此, 光纤损伤的主要原因并非大量的非桥氧色心的产生。

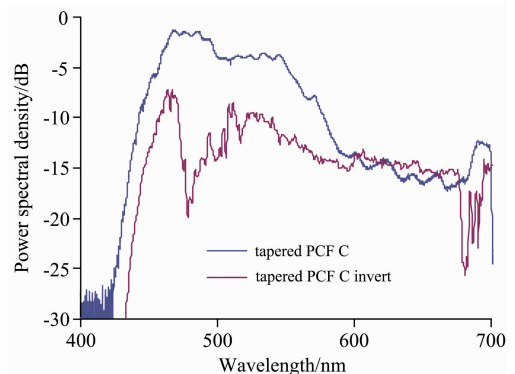


图 7 光子晶体光纤 C 拉锥样品使用后吸收谱线测试
Fig. 7 Spectral absorption test of tapered PCF C after damage

前文已经提及, 光子晶体光纤 C 拉锥样品上亮点处泄露

的光具有较强的方向性。针对这一特点,一个合理的解释是亮点处的光纤纤芯内形成了长周期光栅结构^[13-16]。长周期光栅的产生在光子晶体光纤和高非线性光纤中均有报道,其形成过程类似于全息图的写入^[14-15]。当达到相位匹配条件时,形成的长周期光栅可将光纤纤芯中传输的光耦合出纤芯,进入光纤包层,导致光纤出射光中某些光谱组分的缺失^[13]。泄露光的波长与长光栅的周期有关。当由于光纤拉锥段拉锥直径变化等原因造成光纤纤芯中不同区域产生的光栅周期存在差异时,光泄露现象可以发生在多个波长处。这样,长周期光栅形成的理论可以解释观察到的泄露光的方向性和光纤出射光光谱组分的缺失。

对比三根光子晶体光纤拉锥样品,观察到光纤光谱展宽寿命随着光纤占空比的增加而急剧缩短。长周期光栅结构形成可能经历的多光子吸收过程的速率主要取决于入射光的强度和产生的短波长的高能量光子。由于三次测试选择的入射光强度相同,因此产生的短波长光子是最可能的造成光纤产生损伤的因素。图 3 中明显可见,在入射光强度相对不变的条件下,当光纤占空比增大,光纤的光谱展宽效果增强,产生更多短波长的光子。这些高能量的短波长光子破坏了制作光纤纤芯的熔融石英中的硅氧键,导致长周期光栅的写入效率提高,加快了光纤光谱展宽性能的退化。

本文的实验中,对光纤进行测试时需要使用光耦合凝胶覆盖整个光纤,将光纤包层中的光耦合出光纤,以保证光纤在使用高平均功率的激光源的安全工作。进行完光谱演化测试后,难以对凝胶进行完全清理。因此目前受技术因素所限,未能通过显微镜直接观察到光纤纤芯中的折射率周期性变化结构,也难以直接测量亮点处泄露光的光谱。对长周期光栅产生理论的验证仍需更深入的研究。

图 6 所示的光纤 C 的光谱退化进程较快,过程特征较为明显,有利于与改变参数后的实验结果进行对比,可将该退化过程作为参考标准。为便于量化,将从测量开始至光谱显著高峰消失的时间段作为光纤的光谱展宽寿命。这样,参考标准实验中光纤的光谱展宽寿命为 5 h。

2.3 拉锥温度对光谱退化的影响

文献[10]与文献[17]中提到了熔融石英内部存在着一些不规则的硅氧键,这些硅氧键的键能低于规则的硅氧键,在接受光子辐照时,更容易发生光子吸收效应而产生断裂。不规则硅氧键的形成和数量比例与制造光纤时的光纤冷却条件有关。因此,尝试改变光纤拉锥时使用的温度,可能影响熔融石英中的硅氧键结构组成,进而影响光纤的光谱展宽演化。文献[10]中,将拉锥温度由 1 467 °C 提高到 1 529 °C,在使用 520 nm 绿光激光源时,光纤的光谱展宽寿命由 12 min 提高到了 1 050 min 以上。

首先,将参考标准实验中使用的光纤拉锥温度 1 400 °C 提高到 1 480 °C。对拉锥光纤进行测试,得到的光谱展宽效果演化如图 8 所示。整体上的光谱的退化过程与参考实验结果类似。根据上文定义,光纤的光谱展宽寿命为 10 h。相对参考实验,取得了光纤光谱展宽寿命延长的效果。

进一步提高拉锥温度至 1 540 °C。发现光纤在拉锥后的光传输效率变为 0,这意味着拉锥温度过高,气孔在高温下

被封闭。因此在拉锥过程中对气孔进行了施压处理以抵御气孔的收缩效应。得到的拉锥光纤光谱展宽演化测试结果如图 9 所示。光纤的光谱展宽寿命大致为 14 h,寿命相对拉锥温度 1 480 °C 的光纤再次略有延长。

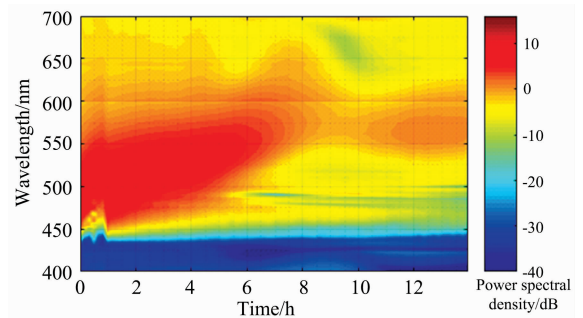


图 8 拉锥温度 1 480 °C 的光子晶体光纤拉锥样品光谱展宽效果演化

Fig. 8 Spectral broadening evolution of tapered PCF with 1 480 °C tapering temperature

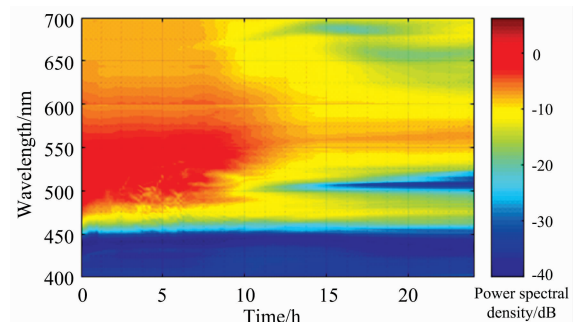


图 9 拉锥温度 1 540 °C 的光子晶体光纤拉锥样品光谱展宽效果演化

Fig. 9 Spectral broadening evolution of tapered PCF with 1 540 °C tapering temperature

综上所述,拉锥温度的提升使得光纤的光谱展宽寿命在一定程度上得以延长。但同时需注意到,拉锥温度的提升导致了光纤的初始光谱展宽效果稍有减弱,即光谱宽度窄化。这可能来自于高温导致的气孔形变。因此总体上,提高拉锥温度对延长光纤的光谱展宽寿命作用不佳。

2.4 光纤气孔氩气填充对光谱退化的影响

氢氧根 OH 在熔融石英中的出现可造成材料对某些波长的吸收已经被广泛研究^[18-19]。OH 在 1 400 nm 处造成的光谱吸收较为显著,可能导致在吸收强烈的光纤局部形成高温,通过应力腐蚀^[20]等作用改变熔融石英材料结构,影响光纤的光谱展宽效果。文献[10]中对不同 OH 掺杂浓度材料的光子晶体光纤进行了 520 nm 绿光泵浦的光谱展宽寿命对比,但并未得到明确的对比实验结果。

首先对作为参考标准的光纤样品进行测试,观察 1 400 nm 处的光谱吸收情况。作为参考标准的光纤在储存、拉锥、测试等步骤中始终处在空气氛围中,因此气孔内的气体环境为湿度 50% 左右的空气。对比试验中,将光纤样品的气孔一

端注入氩气，并在拉锥过程中保持氩气的注入。拉锥过程结束后，使用电弧放电的方法迅速对光纤两端的气孔进行封闭，尽量降低光纤气孔中空气的残留。两个样品产生的超连续光在 1 400 nm 左右的谱线如图 10 所示。可见，经过氩气注入过程，光纤中的 OH 含量被显著降低。

测量氩气注入处理光纤的光谱展宽效果演化，结果如图 11 所示。相对参考实验，光谱退化过程略有不同，主要表现为在测量开始后的 1 小时内，光谱短波长边缘截止波长基本保持不变。随着进一步的光谱演化，光纤的光谱展宽寿命截止于 3 h。因此，降低光纤材料中 OH 的含量无法有效延长光纤光谱展宽寿命。

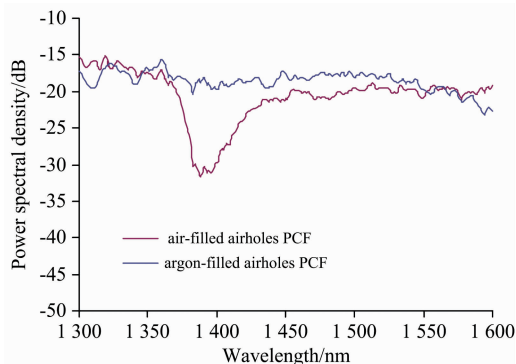


图 10 光纤样品在 1 400 nm 处的光谱吸收
Fig. 10 Spectral absorptions of tapered PCFs

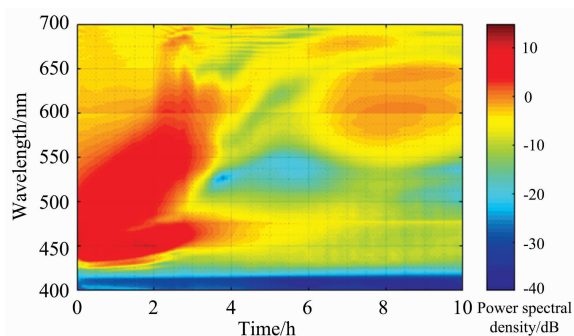


图 11 氩气注入的光纤样品光谱展宽效果演化
Fig. 11 Spectral broadening evolution of tapered PCF with argon-filled airholes

2.5 保持激光器的平均功率，降低激光器脉冲的峰值功率对光谱退化的影响

使光纤产生宽带光谱展宽的必要条件是激光器具有较高的脉冲峰值功率。调节激光器中的脉冲压缩装置，可以加宽脉冲宽度，降低激光器脉冲的峰值功率，并保持平均功率不变。实验中证实，适当调节脉冲压缩装置，可以使拉锥光纤的展宽光谱不出现在可见光区。令一根全新的拉锥光纤样品工作在低脉冲峰值功率条件下，每 10 min 进行脉冲宽度优化、记录光谱、脉冲宽度还原操作，每次该三步操作耗时约 20 s。得到的光谱演化如图 12 所示。可见，光谱仍然出现了退化，但退化速度大大减缓。光纤的损伤极可能只发生在光纤每次短暂产生宽带可见光区光谱时。可以得出结论，光纤

损伤的必要条件是光纤接收高峰值功率脉冲，产生可见光区的宽带光谱展宽。

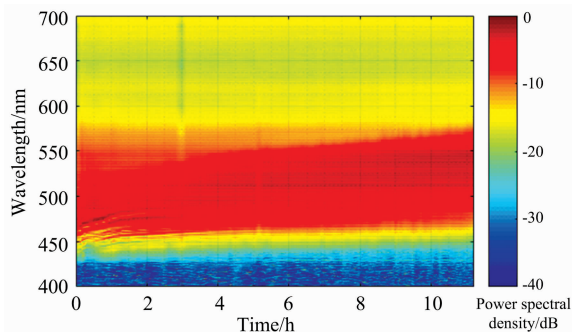


图 12 工作于低峰值功率脉冲的光纤样品光谱展宽效果演化

Fig. 12 Spectral broadening evolution of tapered PCF with low peak power of pump

2.6 保持激光器的峰值功率，降低激光器脉冲的平均功率对光谱退化的影响

上一小节证明了高峰值功率脉冲对光纤光谱展宽效果的伤害，那么减少单位时间内光纤接受的高峰值功率脉冲的数量将是有效的延长光纤寿命的方法。选择使用斩波器，斩波器不同的占空比可使激光器的平均功率以相应比例降低，同时不改变单脉冲的峰值功率，使得光纤的光谱展宽效果得以保持。相应的，光纤的出射光平均功率也按比例降低。

使用占空比为 50% 的斩波器工作于激光器与光纤之间，得到的拉锥光纤光谱展宽效果演化如图 13 所示。可见，拉锥光纤的光谱展宽寿命被延长到了 12 h，相当于参考标准实验中光纤寿命的两倍。

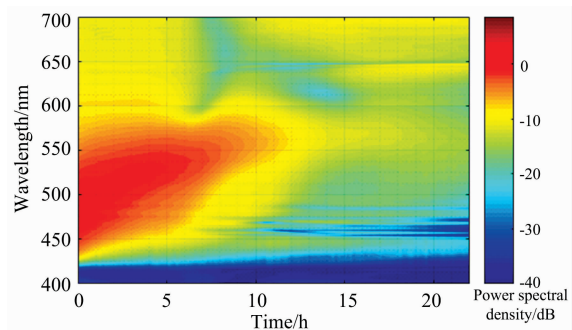


图 13 使用 50% 占空比的斩波器时光纤样品光谱展宽效果演化

Fig. 13 Spectral broadening evolution of tapered PCF with 50% duty cycle chopper

使用占空比为 25% 的斩波器，得到的光谱展宽效果演化如图 14 所示。拉锥光纤的光谱展宽寿命再次被延长，达到了 25 h，相当于参考标准实验中光纤寿命的四倍。

以上两个实验结果说明，在对光纤的输出平均功率要求不高的前提下，可以通过选择一定占空比的斩波器以延长光纤的光谱展宽寿命。该实验也证明了，光纤的损伤效果决定于光纤接收的高峰值功率的脉冲总数。

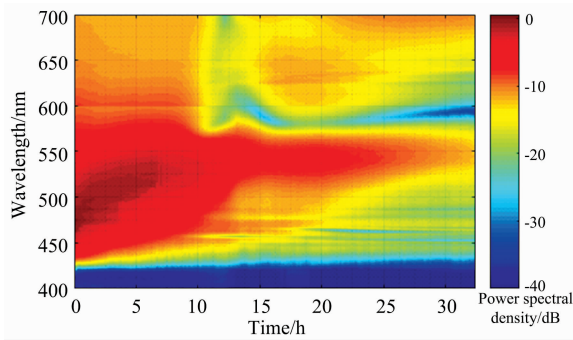


图 14 使用 25% 占空比的斩波器时光纤样品光谱展宽效果演化

Fig. 14 Spectral broadening evolution of tapered PCF with 25% duty cycle chopper

3 结 论

使用三个具有不同占空比的光子晶体光纤拉锥样品, 测量得到光纤的光谱展宽寿命随占空比的增大而缩短。实验中观察到大占空比光纤可以产生的短波长光子数量更多, 即高能量的光子更多, 加剧了对光纤纤芯材料的破坏。通过测量分析光纤在长时间使用后的表现, 排除了光纤中非桥氧色心的大量产生, 推测光纤中被写入了长周期光栅。通过四组对比实验, 分别通过改变光子晶体光纤的拉锥处理方式和调制激光源参数两个途径, 研究对拉锥光子晶体光纤光谱展宽寿命的影响。实验结果表明, 为实现光纤光谱展宽寿命的延长, 使用斩波器是较为可行的方法。光纤寿命延长的效果与斩波器的占空比有直接关系。这一实验也证实了光纤接受的高峰值功率脉冲总量是影响拉锥光纤损伤程度的重要因素。该结论对光纤光谱展宽寿命的研究具有重要意义。

References

- [1] Dudley J M, Genty G, Coen S. *Reviews of Modern Physics*, 2006, 78(4): 1135.
- [2] Diddams S A, Jones D J, Ye J, et al. *Physical Review Letters*, 2000, 84(22): 5102.
- [3] Hao Z B, Ye H Q, Han J, et al. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2018, 130(994): 125001.
- [4] YANG Jian-ju, HAN Ying, WANG Wei, et al(杨建菊, 韩颖, 王伟, 等). *Spectroscopy and Spectral Analyses(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(4): 1215.
- [5] Stark S P, Steinmetz T, Probst R A, et al. *Optics Express*, 2011, 19(17): 15690.
- [6] McCracken R A, Depagne E, Kuhn R B, et al. *Optics Express*, 2017, 25(6): 6450.
- [7] Li C H, Glenday A G, Philips D F, et al. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8446: 84468X.
- [8] WU Yuan-jie, ZOU Pu, YE Hui-qi, et al(吴元杰, 邹璞, 叶慧琪, 等). *Acta Photonica Sinica(光子学报)*, 2016, 45(8): 0832002.
- [9] WU Yuan-jie, YE Hui-qi, HAN Jian, et al(吴元杰, 叶慧琪, 韩建, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2019, 39(11): 1106006.
- [10] Probst R A. Munich: Ludwig Maximilian University of Munich, 2015, 47.
- [11] Thomsen C L. U. S. Patent 10, 474, 003, 2019.
- [12] WU Yuan-jie, YE Hui-qi, HAN Jian, et al(吴元杰, 叶慧琪, 韩建, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2016, 36(6): 0614001.
- [13] Gouveia C A, Baptista J M, Jorge P A. *InTech*, 2013, 345.
- [14] Tu H, Liang X, Marks D L, et al. *Optics Letters*, 2009, 34(5): 668.
- [15] Tu H, Marks D L, Jiang Z, et al. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(6): 061104.
- [16] Zoubir A, Rivero C, Grodsky R, et al. *Physical Review B*, 2006, 73(22): 224117.
- [17] Oto M, Kikugawa S, Sarukura N, et al. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, 13(9): 978.
- [18] Nürnberg F, Kühn B, Langner A, et al. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9632: 96321R.
- [19] Humbach O, Fabian H, Grzesik U, et al. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 1996, 203: 19.
- [20] Xu J, Wang C, Wang T, et al. *RSC Advances*, 2018, 8(21): 11528.

Supercontinuum Generation Degradation of 1 040 nm Laser Pumped Photonic Crystal Fibers

WU Yuan-jie^{1,2}, YE Hui-qi^{1,2}, HAN Jian^{1,2}, XIAO Dong^{1,2*}

1. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, 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

Abstract Photonic crystal fibers have been widely used in the supercontinuum generation of femtosecond pulse laser sources. When the repetition rate of a laser source is low, the evolution of supercontinuum over time is slow, which is usually not noticed. In applications such as calibrations of astronomical spectrometers, high repetition rate laser sources of the order of gigahertz to tens of gigahertz are required. In this case, the supercontinuum degradation is significant within a limited time period. Using 1040nm femtosecond laser as the pump source, by testing the evolutions of supercontinua of three photonic crystal fibers with different air-filling fractions, it is found that the degradation process accelerates with the increase of the air-filling fraction. Accompanying the degradation of supercontinuum, multiple bright spots of different colors appear in the section where the supercontinuum is generated on the fiber. It implies a directional light leakage phenomenon. Observing the spectral absorption of the spectrally degraded fiber confirmed that the main reason for the degradation is not the generation of massive non-bridged oxygen color centers in the fused silica material. Based on the directional characteristic of the light leakage, a theory that a long-period grating formation in the fiber core by multiphoton absorption is proposed. In order to search for the factors that affect the supercontinuum generations of the photonic crystal fibers, so that the goal of suppressing the degradation can be achieved, firstly, parameters of the fiber tapering are changed. It is expected that the photon tolerance of the fused silica material of the fibers can be enhanced. The experimental results show that the effectiveness is scant. Then, experiments are carried out with maintaining the average power of the laser source, reducing the peak power of the laser pulse and maintaining the peak power of the laser pulse, reducing the average power of the laser source. It is shown that the total amount of high peak power pulses coupled into the optical fiber in a certain time period is the most important factor affecting the supercontinuum degradation. In the application of astronomical spectrometer calibration, the demand for optical power of supercontinuum is not high. Using a chopper to reduce the average power of the incident light of the photonic crystal fiber is an effective, simple and feasible method to slow down the supercontinuum degradation.

Keywords Photonic crystal fibers; Femtosecond pulse lasers; Supercontinuum generation; Spectral evolution

(Received Oct. 14, 2020; accepted Feb. 18, 2021)

* Corresponding author