

基于高掺锗石英光纤的中红外超连续谱产生

朱 磊^{1,2} 王鹿鹿^{1,2} 董新永^{1,3} 沈 平² 苏海斌³

¹中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018

²南洋理工大学电气电子工程学院, 新加坡 639798

³南洋理工大学材料科学与工程学院, 新加坡 639798

摘要 采用波长为 2 μm 、脉冲宽度为 50 ns 的掺铥光纤调 Q 激光器作为抽运光源, 纤芯掺锗浓度为 75% 的石英光纤为非线性介质, 进行了中红外超连续谱产生的研究。实验过程中在掺锗石英光纤的抽运光输入端熔接一截 100~200 μm 长的多模光纤以提高光纤的空间耦合效率和损毁阈值, 通过优化掺锗石英光纤的长度, 最终在 1.9 μm (受光谱仪测量范围限制)~2.9 μm 范围内获得了较平坦的超连续谱输出, 10 dB 带宽和 20 dB 带宽分别达到 950 nm 和 980 nm, 而且其长波限接近目前报道的基于同类光纤的超连续谱的最大长波限。

关键词 非线性光学; 光纤; 超连续谱产生; 掺锗光纤; 中红外光源

中图分类号 TN25

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0319001

Mid-Infrared Supercontinuum Generation with Highly Germanium-Doped Silica Fiber

Zhu Lei^{1,2} Wang Lulu^{1,2} Dong Xinyong^{1,3} Shen Ping² Su Haibin³

¹Institute of Optoelectronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, 639798, Singapore

³School of Materials Science and Engineering, Nanyang Technological University, 639798, Singapore

Abstract Mid-infrared supercontinuum generation is demonstrated by using a 75 % germanium-doped silica fiber pumped by a 2 μm Q-switched thulium-doped fiber laser with pulse width of 50 ns. The free space coupling efficiency from the pump laser to the germanium-doped fiber is enhanced by fusion-splicing a 100~200 μm long multimode fiber. Length of germanium-doped fiber is optimized. Broadband supercontinuum generation ranging from 1.9 μm to 2.9 μm with 10 dB and 20 dB bandwidths of 950 nm and 980 nm, respectively. The 2.9 μm long wavelength limit is close to the record reported so far for highly germanium-doped fiber based supercontinuum generation sources.

Key words nonlinear optics; fiber; supercontinuum generation; germanium-doped fibers; mid-infrared source

OCIS codes 190.4370; 060.4370; 060.2290; 230.0680

1 引言

光纤超连续谱光源具有宽而稳定的输出光谱, 因此在医学诊断、光学成像和光谱学研究等领域具有广泛的应用^[1-4]。在从紫外到远红外的整个光谱范围中, 中红外波段由于包含了大气透明窗口和大部分分子的吸收谱线波长, 因此在化学和生物检测中都有着非常重要的应用^[5]。为了获得基于光纤的中红外超连续谱, 研究人员通常采用具有高非线性效应的光纤, 如基于氟化物^[6]、亚碲酸盐^[7]和硫属化合物^[5, 8-9]的特种光纤, 和

收稿日期: 2015-08-24; 收到修改稿日期: 2015-10-14

基金项目: 国家自然科学基金(61475147)、浙江省自然科学基金(Z13F050003)、Singapore A*STAR “Advanced Optics in Engineering” Program(1223600006)

作者简介: 朱 磊(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤激光器方面的研究。E-mail: rsdyl12742@sina.com

导师简介: 董新永(1975—), 男, 研究员, 主要从事光纤激光器与光纤传感等方面的研究。

E-mail: xydong@cjlu.edu.cn(通信联系人)

波长接近其零色散点的脉冲激光抽运^[8],利用光纤中的自相位调制、交叉相位调制、四波混频等非线性效应,产生超连续谱输出。然而,这些光纤与石英光纤相比,在化学稳定性、机械强度和抗热冲击能力上存在较大差距,而且很难以普通的熔接技术与石英光纤连接。而掺锗石英光纤具有与普通石英光纤相似的特性,可以利用常规熔接技术与普通石英光纤连接,并同时具有高非线性效应、高拉曼散射系数等特点,因此在中红外光纤超连续谱产生的研究中获得较多关注^[10-13]。由于超短脉冲激光的峰值功率比较高,作为抽运源更容易获得宽的超连续谱,因此绝大多数的报道中都采用了价格昂贵的飞秒或皮秒脉冲激光器作为抽运源^[11-13]。然而,使用飞秒或皮秒脉冲抽运光并不是产生超连续谱的必要条件,在足够高功率的前提下,纳秒脉冲甚至连续光也可以产生超连续谱。在这种情况下,调制不稳定性为其提供了种子注入,产生了四波混频边带,在自相位调制、交叉相位调制和拉曼散射增益等非线性效应的共同作用下,产生了超连续谱。2012年,Kamynin等^[14]采用波长为 $1.59\ \mu\text{m}$ 、脉冲宽度为 $35\ \text{ns}$ 的调 Q 掺铒光纤激光器作为抽运源,在长度为 $7\ \text{m}$ 的 65% 掺锗石英光纤中获得了波长范围为 $1.6\sim 2.7\ \mu\text{m}$ 的超连续谱输出。

本文利用波长为 $2\ \mu\text{m}$ 、脉冲宽度为 $50\ \text{ns}$ 的调 Q 掺铒光纤激光器抽运高浓度掺锗石英光纤,通过优化掺锗石英光纤的长度,并在掺锗石英光纤的输入端熔接一截 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 长的多模光纤以提高抽运光的空间耦合效率和光纤的损毁阈值,最终在 $1.9\sim 2.9\ \mu\text{m}$ 范围内获得了较平坦的超连续谱输出, $10\ \text{dB}$ 带宽和 $20\ \text{dB}$ 带宽分别达到 $950\ \text{nm}$ 和 $980\ \text{nm}$,而且其长波限接近目前已报道的基于同类光纤的超连续谱产生的最大值^[11-12]。

2 实验装置

超连续谱产生的实验装置如图1所示。其中,抽运激光器为输出波长为 $1999\ \text{nm}$ 的高功率调 Q 掺铒光纤激光器,输出端为直径 $5\ \text{mm}$ 的准直器,光斑直径为 $4\ \text{mm}$,最高峰值功率为 $1\ \text{kW}$,脉冲频率为 $10\ \text{kHz}$,脉冲宽度为 $50\ \text{ns}$,其输出光谱如图2所示。空间耦合装置由两个反射镜和一个焦距为 $10\ \text{mm}$ 的多维可调的会聚透镜组成,抽运光最后被会聚到光纤端面的中心。在输出端利用光谱仪(OSA, YOKOGAWA AQ6375L)测量输出谱,可测光谱范围是 $1900\sim 3400\ \text{nm}$ 。

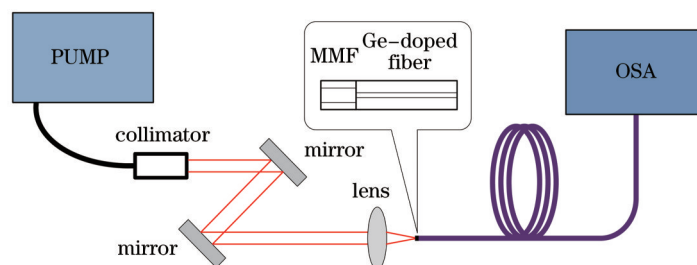


图1 光纤超连续谱产生的实验装置图

Fig.1 Experimental setup for optical fiber supercontinuum generation

实验中采用的掺锗石英光纤的纤芯直径为 $4\ \mu\text{m}$,纤芯中有 75% 的二氧化锗掺杂。高浓度的掺杂和小的模场直径(约 $5\ \mu\text{m}$)使该光纤具有比普通单模光纤(SMF)高3倍的克尔非线性系数和高9倍的拉曼散射系数^[10]。该光纤在通信波段的损耗远高于普通通信光纤,但是当波长大于 $1.8\ \mu\text{m}$ 时,其损耗变得小于普通单模光纤,二者的损耗曲线如图3所示。该掺锗石英光纤的零色散波长在 $1.9\ \mu\text{m}$ 附近, $2\ \mu\text{m}$ 的抽运激光处于其靠近零色散波长的反常色散区内,有利于超连续谱的产生。

由于耦合过程中抽运激光的能量会聚在几微米直径的光纤纤芯端面时会产生高温,而二氧化锗的玻璃化转变温度仅为 $513\ \text{C}\sim 650\ \text{C}$ ^[10],远低于二氧化硅的转变温度,当抽运激光功率较高时,掺锗石英光纤的端面会损坏,降低耦合效率。为提高光纤端面耦合的效率和损毁阈值,在掺锗石英光纤端面之前熔接一截长度仅为 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 的 $62.5/125\ \mu\text{m}$ 多模光纤(MMF),如图1所示,避免了将掺锗石英光纤直接暴露在抽运激光的焦点处。由于多模光纤纤芯的掺锗浓度远低于高掺锗光纤,所以其热损毁阈值温度高于高掺锗光纤,因此能承接更高功率的抽运激光。与此同时,多模光纤大的纤芯直径也十分有利于光的收集,对提高耦合效率有很好的帮助。经过反复实验发现:在熔接多模光纤之前,光纤耦合端面最多可以承受平均功率 $350\ \text{mW}$ 的抽运光,耦合效率为 50% 左右;加入多模光纤之后,耦合端面可以承受平均功率超过 $700\ \text{mW}$ 的抽运激光,耦合效率也提

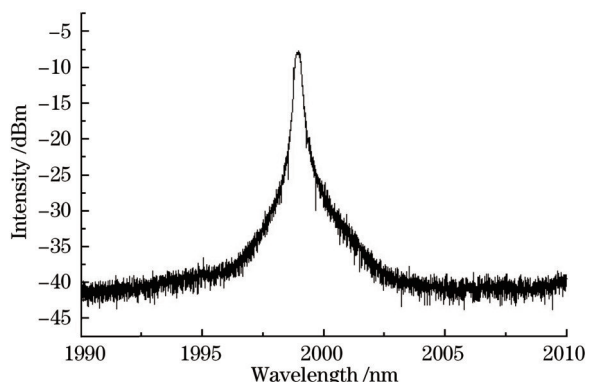


图2 调Q掺铥光纤抽运激光器的输出光谱

Fig.2 Output spectra of Q-switched thulium-doped fiber laser

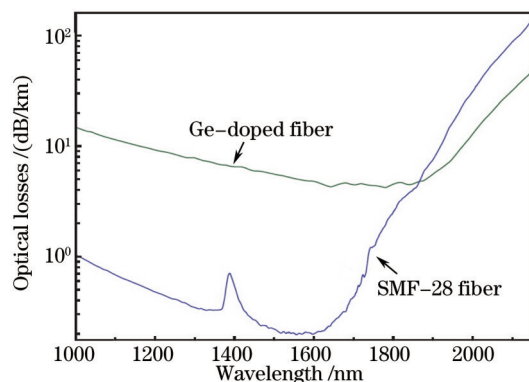


图3 掺锗石英光纤与普通单模光纤的损耗谱对比

Fig.3 Optical loss spectra of the germanium-doped fiber and normal single-mode fiber

高到70%左右。

3 实验结果与讨论

非线性光纤的长度会影响超连续谱的产生,这是因为光纤的长度会对非线性效应的产生和传输损耗产生影响。若光纤长度过短,则不能进行充分的非线性波长转换;而如果光纤过长,则会由于长波长范围处较高的损耗使光谱展宽宽度受限^[4]。因此在固定抽运激光输出功率的情况下,利用不同长度的掺锗石英光纤来进行对比实验,以找到产生超连续谱的最优光纤长度。实验在抽运激光器平均输出功率为500 mW情况下,采用长度为2.6~4.8 m的掺锗石英光纤,获得的实验结果如图4所示。获得的超连续谱从1.9 μm(受光谱仪测量范围限制)可扩展到2.9 μm,展宽相对于抽运波长很不对称,但平坦度很好,仅在抽运光两侧观测到几个对称分布的小的波峰。由于高掺锗光纤具有较高的非线性系数,在纳秒脉冲准连续光抽运时,调制不稳定性将抽运光转变为皮秒脉冲序列,从而产生了四波混频边带(对应于抽运光两侧间隔相等的两对波峰),在自相位调制、交叉相位调制和拉曼散射增益等非线性效应的共同作用下,产生了频谱展宽,其不对称性是由于受激拉曼散射效应对长波长分量的选择性放大造成的。在2180 nm附近可观察到明显的波峰,对应于光纤的一阶拉曼散射的斯托克斯分量。

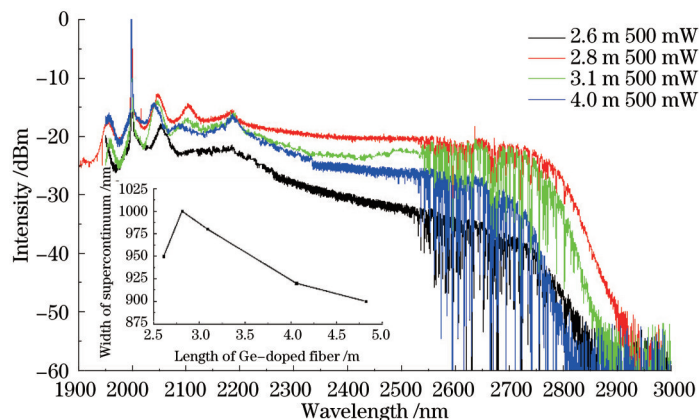


图4 不同长度掺锗石英光纤产生的超连续谱

Fig.4 Supercontinuum generation by using different lengths of germanium-doped fiber

由图4可见,在平均功率为500 mW的抽运情况下,高掺锗光纤的最优长度约为2.8 m,产生的超连续谱覆盖范围宽达1000 nm,长波限达到了2.9 μm,是目前采用纳秒脉冲激光抽运掺锗石英光纤所产生的最大长波限,而采用飞秒脉冲激光抽运掺锗石英光纤产生的超连续谱的长波限也只在3 μm左右^[11-12]。在长度为2.6 m的掺锗石英光纤产生的超连续谱中,长波部分的强度明显减弱,因为较短的光纤在长波侧无法提供足够的支持进行充分的波长转换。而当长度超过2.8 m后,产生的超连续谱的长波限随光纤长度增加出现明显的收缩,应该与较长的光纤所带来的较高的传输损耗相关,因为光纤的损耗随波长快速增长(如图3所示),

其在 $2.8 \mu\text{m}$ 波长处的损耗估计在 3 dB/m 以上, 远高于短波侧的损耗, 因此长波限受光纤长度的影响最明显。超连续谱谱宽随掺锗石英光纤长度的变化关系如图 4 插图所示。

图 5 为 2.8 m 掺锗石英光纤在不同抽运功率下产生的超连续谱。当抽运功率相对较低时, 随着抽运光功率的增大, 产生的超连续谱迅速展宽, 平坦度逐渐提升, 强度也快速增加; 当抽运功率超过 300 mW 后, 超连续谱的强度依然有所提升, 但是宽度几乎没有变化。由此可以看出, 随着抽运功率的提升, 超连续谱展宽到一定程度后, 继续提高抽运功率并不能产生更宽的超连续谱。在超连续谱的 $2.6\sim 2.7 \mu\text{m}$ 波段, 有很多细的吸收线出现, 这是由空气中的水蒸气分子和石英中的 OH^- 离子的吸收造成的^[15]。

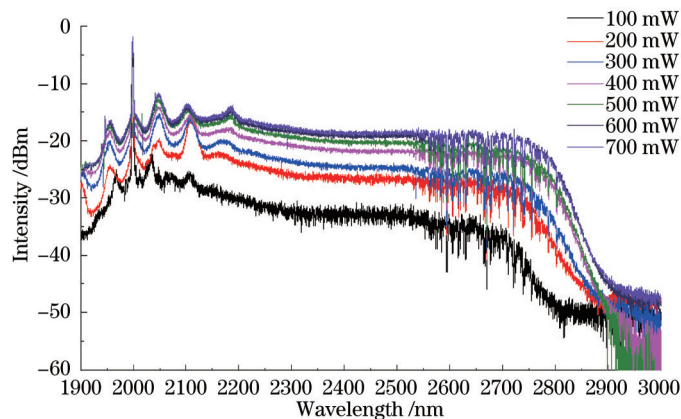


图 5 长度为 2.8 m 的掺锗石英光纤在不同抽运功率下产生的超连续谱

Fig.5 Supercontinuum generation with 2.8 m germanium-doped fiber under different pump powers

4 结 论

利用波长为 $2 \mu\text{m}$ 的纳秒脉冲掺铋光纤激光器抽运 75% 掺锗石英光纤, 获得了中红外超连续谱输出。实验过程中通过优化掺锗石英光纤的长度, 及在掺锗石英光纤的输入端熔接一截短的多模光纤以提高抽运光的空间耦合效率和损毁阈值, 最终在 $1.9\sim 2.9 \mu\text{m}$ 范围内获得了较平坦的超连续谱输出, 10 dB 带宽和 20 dB 带宽分别达到 950 nm 和 980 nm , 其长波限接近目前报道的基于同类光纤的超连续谱的最大长波限。由于掺锗石英光纤具有比其他产生中红外超连续谱的特种光纤(如氟化物光纤、硫属化合物光纤等)更高的化学稳定性、机械强度和抗热冲击能力, 而且可以采用常规的熔接技术与普通光纤连接, 同时具有高的非线性效应和拉曼散射系数等优点, 这种基于高掺锗光纤的超连续谱光源可望在未来获得广泛的应用。

参 考 文 献

- 1 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]. Opt Lett, 2000, 25(1): 25-27.
- 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 Jia Dongfang, Ge Chunfeng, Hu Zhiyong, *et al.*. Studies on supercontinuum generation in dispersion shifted fiber by using mode-locked fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 746-750.
贾东方, 葛春风, 胡智勇, 等. 利用锁模光纤激光器在色散位移光纤中产生超连续谱的研究[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 746-750.
- 4 Li Min, Huo Li, Wang Dong, *et al.*. Supercontinuum generation based on dual-wavelength coherent ultrashort pulses[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0406001.
李 旻, 霍 力, 王 东, 等. 基于双波长相干超短脉冲光源的超连续谱产生[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0406001.
- 5 Sanghera J S, Shaw L B, Aggarwal I D. Chalcogenide glass-fiber-based mid-IR sources and applications[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2009, 15(1): 114-119.
- 6 Qin G, Yan X, Kito C, *et al.*. Supercontinuum generation spanning over three octaves from UV to $3.85 \mu\text{m}$ in a fluoride fiber[J]. Opt Lett, 2009, 34(13): 2015-2017.
- 7 Qin G, Yan X, Liao M, *et al.*. Wideband supercontinuum generation in tapered tellurite microstructured fibers[J]. Laser Physics, 2011,

- 21(6): 1115–1121.
- 8 Mouawad O, Amrani F, Kibler B, *et al.*. Impact of optical and structural aging in As_2S_3 microstructured optical fibers on mid-infrared supercontinuum generation[J]. *Opt Express*, 2014, 22(20): 23912–23919.
- 9 Gao W, El Amraoui M, Liao M, *et al.*. Mid-infrared supercontinuum generation in a suspended-core As_2S_3 chalcogenide microstructured optical fiber[J]. *Opt Express*, 2013, 21(8): 9573–9583.
- 10 Dianov E M, Mashinsky V M. Germanium-based core optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(11): 3500–3508.
- 11 Anashkina E A, Andrianov A V, Koptev M Y, *et al.*. Generating tunable optical pulses over the ultrabroad range of 1.6–2.5 μm in GeO_2 -doped silica fibers with an Er: fiber laser source[J]. *Opt Express*, 2012, 20(24): 27102–27107.
- 12 Anashkina E A, Andrianov A V, Koptev M Y, *et al.*. Towards mid-infrared supercontinuum generation with germano-silicate fibers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(5): 7600608.
- 13 Zhang M, Kelleher E J R, Runcorn T H, *et al.*. Mid-infrared Raman-soliton continuum pumped by a nanotube-mode-locked sub-picosecond Tm-doped MOPFA[J]. *Opt Express*, 2013, 21(20): 23261–23271.
- 14 Kamynin V A, Kurkov A S, Mashinsky V M. Supercontinuum generation up to 2.7 μm in the germanate-glass-core and silica-glass-cladding fiber[J]. *Laser Physics Letters*, 2012, 9(3): 219–222.
- 15 Plotnichenko V G, Sokolov V O, Mashinskii V M, *et al.*. Hydroxyl groups in GeO_2 glass[J]. *Inorganic Materials*, 2002, 38(7): 738–745.

栏目编辑: 史 敏