

一种超连续谱蓝宝石光纤激光器研究

谭 勇^{1,2}, 刘 博¹, 郑 权², 金光勇¹, 邓 岩²

¹长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;

²长春新产业光电技术有限公司, 吉林 长春 130103

摘要 超连续谱激光是超快激光光源出现后的新方向,是多种非线性光学效应的集中体现,可应用于光谱探测、显微测量和化学传感等领域。利用可调谐飞秒激光器的不同波长输出抽运蓝宝石光纤,获取光纤两端面输出的超连续谱。根据这些连续谱特征,建立了一套以光纤前端面和半导体可饱和吸收镜(SESAM)反射面构成的较强谐振腔结构的超连续谱激光系统,输出了中心波长为 640 nm,半峰全宽大于 250 nm 的超连续谱激光。结果表明,SESAM 谐振腔结构能够减弱噪声并输出时谱一致的宽光谱激光。

关键词 激光器;超连续谱;半导体可饱和吸收镜;蓝宝石光纤

中图分类号 O433.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0901002

A Supercontinuum Sapphire Fiber Laser

Tan Yong^{1,2}, Liu Bo¹, Zheng Quan², Jin Guangyong¹, Deng Yan²

¹College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Changchun New Industries Optoelectronics Technology Co., Ltd., Changchun, Jilin 130103, China

Abstract Supercontinuum laser is a new direction after the emergence of super-fast laser source and also a concentrated expression of multiple nonlinear optical effects. It can be used in the fields of spectral detection, microscopic measurement, chemical sensing and so on. The supercontinuum output of both ends of the fiber is obtained by using the tunable femtosecond laser at different wavelengths output to pump the sapphire fiber. Based on the characteristics of the continuous spectrum, the supercontinuum laser system is set up taking the ensemble of an optical fiber front end and semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) reflector as the strong resonant cavity. The center wavelength of the final output is 640 nm with the full width at half maximum more than 250 nm. The results show that the SESAM cavity can weaken noise and output consistent wide-spectrum laser.

Key words lasers; supercontinuum; semiconductor saturable absorber mirror; sapphire fiber

OCIS codes 140.3510; 140.7090; 140.4480

1 引 言

2000 年,Ranka 等^[1]首次采用于光子晶体光纤产生超连续谱,引起了超连续谱激光光源研究热潮,其成果可应用于光谱探测^[2]、显微测量^[3]和化学传感^[4]等领域。

超连续谱源于自相位调制^[5]、交叉相位调制^[6]、四波混频^[7-8]、孤子分裂^[9]、拉曼频移^[10]和色散波蓝移^[11]等共同作用下的展宽效应。目前,有多种方法获取超连续谱,其中利用特种光纤获取是最为有效的方式,如光子晶体光纤、氟化物光纤、硫系玻璃光纤、蓝宝石光纤和拉锥式单模光纤等。2008 年,Yina 等^[12]采用超短飞秒脉冲抽运单晶蓝宝石光纤,得到了超连续谱。文章指出单晶蓝宝石光纤具有高激光损伤阈值、高红外透过率和宽光谱范围内的低色散特征,是产生中红外超连续谱的理想材料。2011 年,Nakaema 等^[13]采用脉宽为 430 fs(800 nm)的激光抽运 5 cm 长的单晶蓝宝石光纤得到了 400~1000 nm 的展宽。2015 年,李旻等^[14]提出,在 1550 nm 波段采用双波长相干超短脉冲光源抽运高非线性光纤获得超连续谱。利用基于脉冲切割

收稿日期: 2017-03-23; 收到修改稿日期: 2017-04-25

作者简介: 谭 勇(1975—),男,博士,副教授,主要从事激光与物质相互作用、非线性光学方面的研究。

E-mail: laser95111@126.com

器和 Mamyshev 再生器的 25 GHz 双波长相干超短脉冲光源,获得了 130 nm 宽度的超连续谱。2016 年,李思源等^[15]报道了一种产生超连续谱输出的方法,获得了带宽为 440~1700 nm,平均功率为 102 mW 的超连续谱输出,光-光转化率为 5%。2016 年,殷科等^[16]采用超连续谱种子激光抽运 3 m 长的大模场双包层掺铥光纤,获得了超高亮度平坦型的超连续谱激光光源。超连续谱种子激光波长范围为 1.9~2.1 μm,输出宽度达到 1990~2535 nm,3 dB 带宽为 545 nm,最大输出功率为 203.4 W,光-光转化效率为 39.3%。2016 年,Ouyang 等^[17]采用纳秒脉冲掺铥光纤激光器抽运氟化物光纤,获得了高强度超连续谱激光,其光谱范围为 1930~3500 nm,平均输出功率为 5.23 W。

本文利用可调谐飞秒激光器抽运蓝宝石晶体光纤,产生超连续谱,并设计了一种基于半导体可饱和吸收镜(SESAM)的谐振腔,获得了较强的超连续谱可见-近红外激光。

2 实验方法与装置

实验使用脉宽为 50 fs 的超短脉冲飞秒激光器 Liber-HE,通过光参量放大系统放大飞秒脉冲能量并实现波长可调谐。抽运光经过衰减器来控制脉冲能量,再经聚焦耦合进入单晶蓝宝石非线性光纤(Photran Sapphire-425,Photran,美国),光纤直径为 425 μm,长度为 90 mm,光纤两端经抛光形成弱谐振腔结构。实验中输出连续激光方式之一为在聚焦镜前面放置格兰棱镜即光纤前端输出镜,通过聚焦透镜传输到测试装置;光纤后端输出测量时,可将前端测量装置移送到后端测试(如图 1 中黑色虚线框中所示)。输出方式之二为紧接着光纤末端安装 SESAM,形成光纤前端面和 SESAM 吸收面的平平谐振腔结构。通过组合光纤前端面和格兰棱镜,从而输出较强的超连续谱激光。实验测量装置包括近红外光谱仪(NIRQuest 256,Ocean Optics,美国)和可见-近红外光谱仪(QEPro65,Ocean Optics,美国)。

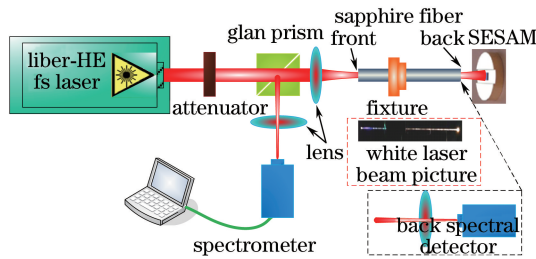


图 1 超连续谱光纤激光示意图

Fig. 1 Diagram of supercontinuum fiber laser

使用计算机控制可调谐输出抽运激光波长分别为 1200,1300,1400,1500 nm 档值,如图 2 所示。相应的中心波长分别为 1202.6,1286.9,1383.4,1488.0 nm,半峰全宽(FWHM)分别为 78.3,52.1,52.2,65.2 nm。实验中尽可能控制衰减器,使四个波长的激光能量相近。从图 2 中还可以看出,1300 nm 档在中心波长 2072.1 nm 处还有一个次峰,其 FWHM 为 95.7 nm,强度约为主波长的 20%。

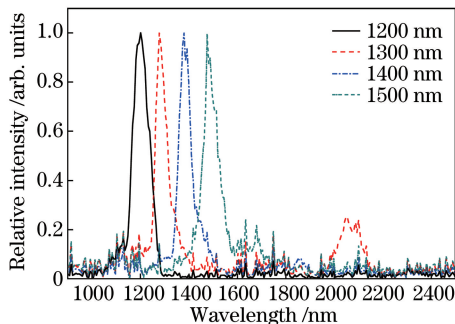


图 2 抽运激光输出结果图

Fig. 2 Output of the pump laser

3 实验结果与分析

实验中光纤两端面形成弱谐振腔时,其后端输出的红外波段(900~2500 nm)光谱如图 3(a)所示,其前端、后端及其两者之和输出的可见-近红外波段(200~1100 nm)分别如图 3(b)~(e)中黑色虚线、红色点划线和蓝色双点划线表示;而由光纤前端面和 SESAM 吸收面构成较强谐振腔时,光纤前端与格兰棱镜输出的可见-近红外超连续谱如图 3(b)~(e)中青色实线表示,超连续谱可见光波段演变如图 1 中蓝宝石光纤下面所示,光束沿着光纤前端到后端发生紫、蓝、绿、白的颜色演变,体现了非线性效应的演化过程。从图 3 中提取波段范围、FWHM 和中心波长数据,统计结果如表 1 所示。

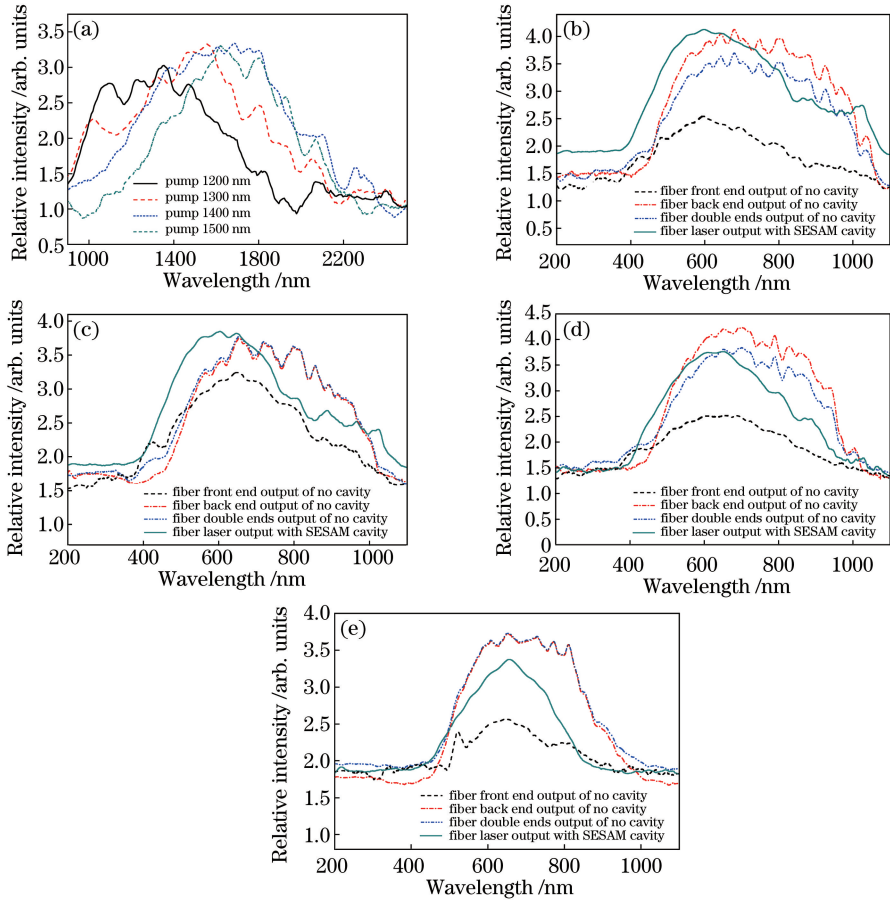


图 3 不同波长的 50 fs 激光抽运蓝宝石光纤可见-近红外超连续谱。(a) 光纤后端输出红外光谱;
(b) 1200 nm; (c) 1300 nm; (d) 1400 nm; (e) 1500 nm

Fig. 3 Sapphire fiber visible and near-infrared supercontinuum pumped by different wavelengths of 50 fs laser.
(a) Infrared spectra output of the back end; (b) 1200 nm; (c) 1300 nm; (d) 1400 nm; (e) 1500 nm

由实验结果可知,在无 SESAM 谐振腔结构时,光谱曲线上有许多分裂的小峰。光纤后端输出的红外光谱及其中心波长随着抽运光波长的增加而发生红移,输出的可见-近红外光谱中心波长反而蓝移。光纤前端输出的可见-近红外光谱中心波长随着抽运光波长增加也呈现增加趋势,而红外光谱太弱,其输出被忽略。在可见-近红外波段范围,光纤双端输出的总强度接近光纤后端输出强度。当带有 SESAM 腔结构时,输出波型趋于高斯线型,小峰减少,即平滑效果好,且 4 种抽运光的中心波长都在 640 nm 附近。与无 SESAM 谐振腔光纤前端的测量结果比较,其波段范围变窄,FWHM 变小,中心波长发生了少许蓝移。另外,如图 3(a) 红色实线所示,1300 nm 档抽运光输出的红外光谱波段在 1000 nm 附件还出现了一个小尖峰,与其他档抽运光的输出结果比较(见表 1 相应数值),在红外波段的 FWHM 最大;在可见-近红外波段,FWHM 不但小于 1200 nm 档,也小于 1400 nm 档的输出结果。

表 1 50 fs 激光抽运蓝宝石光纤可见-近红外超连续谱性能统计表

Table 1 Performances of sapphire fiber visible and near-infrared supercontinuum pumped by 50 fs laser nm

Output			Pump wavelength band			
			1200	1300	1400	1500
Back ended output	Infrared	Range	968.4-1697.6	986.3-1844.0	1232.6-1965.4	1360.6-1971.8
		FWHM	729.2	858.7	732.8	611.2
		Center wavelength	1332.9	1415.6	1599.0	1666.2
	Visible & near infrared	Range	496.9-989.4	518.9-936.3	505.1-938.6	513.4-866.1
		FWHM	492.5	417.4	433.5	352.7
		Center wavelength	743.1	727.6	721.8	689.7
Front ended output	Visible & near infrared	Range	460.5-828.4	491.1-833.0	467.8-841.5	564.5-800.6
		FWHM	367.9	341.9	373.7	236.1
		Center wavelength	644.4	662.0	654.6	682.5
Double ended output	Visible & near infrared	Range	501.1-968.1	509.5-963.8	507.4-916.9	513.9-863.6
		FWHM	467.0	454.3	409.5	349.7
		Center wavelength	734.6	736.6	712.1	688.7
Output with SESAM cavity	Visible & near infrared	Range	460.8-821.9	463.4-796.4	466.1-833.7	521.9-776.0
		FWHM	361.1	333.0	367.6	254.1
		Center wavelength	640.9	629.9	649.9	648.9

蓝宝石晶体光纤在 $0.8\sim 4\ \mu\text{m}$ 范围内色散低,零色散波长约为 $1310\ \text{nm}^{[18]}$,刚好位于 $1300\ \text{nm}$ 档抽运光(中心波长为 $1286.9\ \text{nm}$,FWHM 为 $52.1\ \text{nm}$)的长波边缘; $1200\ \text{nm}$ 档抽运光在正常色散区, $1400\ \text{nm}$ 和 $1500\ \text{nm}$ 档抽运光位于反常色散区。光纤的群速度色散在初始阶段对光谱展宽,理论上零色散区域展宽少。但是, $1300\ \text{nm}$ 档抽运光还存在次峰,且其波长大于主峰波长约 $770\ \text{nm}$,在多个抽运波长档总能量接近一致的情况下,反而降低了主峰的能量。所以主次峰各自产生的非线性光谱在红外长波部分叠加,增大了红移,同时导致图 3(a) $1000\ \text{nm}$ 处小尖峰出现;而在可见短波部分不能完全叠加,减小了蓝移。故导致在红外波段 FWHM 变大,而可见-近红外波段受次峰影响小,FWHM 遵循正常的展宽规律,小于其他档抽运光的结果。对于带有 SESAM 反射镜腔输出的可见-近红外宽光谱激光,不仅 FWHM 小,而且中心波长也小(蓝移量大)。随着蓝宝石晶体光纤中脉冲传输距离增加,自相位调制感应的频率啁啾导致频谱展宽,产生脉冲前沿附近的红移分量和脉冲后沿附近的蓝移分量,导致频谱同时向两端展宽,表现为无 SESAM 时光谱曲线上的多峰结构。这种多峰在光纤的反常色散区更加明显,如图 3(a)中波长大于 $1300\ \text{nm}$ 区域的光谱线型所示。此区域受到高阶色散、受激拉曼散射和四波混频的影响,脉冲分裂为多个基阶孤子,在脉冲内拉曼散射的作用下,该基阶孤子以更大的群速度和较高的能量移向长波方向,导致光纤后端输出的红外光谱及其中心波长随着抽运光波长的增加而发生红移,同时光谱平坦度和时间一致性也较差^[19]。带有 SESAM 腔结构的光纤前端输出的可见-近红外超连续谱激光波型趋于高斯线型,小峰减少,即平滑效果好,这是因为一方面可见-近红外光谱在蓝宝石晶体光纤的正常色散区传输,抽运脉冲分裂少,调制不稳定性受到一定限制,时间一致性较好;另一方面,谐振腔后腔镜 SESAM 将光脉冲前沿吸收,随后的布拉格光栅反射脉冲较强部分,经过光纤后端逆向传输,在光纤中与前向传输的光脉冲形成以 $640\ \text{nm}$ 为中心的驻波场,即抽运光波长的差异不会导致输出中心波长的变化,中心波长值主要由光纤前端和 SESAM 反射面构成的腔的驻波场决定,起到压缩频谱宽度的作用,并且导致了 FWHM 变小,也进一步提高了时间一致性。光纤前端输出红外光谱太弱,这是由于光纤后端面红外反射率低而 SESAM 镜吸收了一部分,导致光谱仪探测不到光纤出射的红外光谱。

4 结 论

搭建了超连续谱激光器,由光纤两端面构成弱谐振腔,利用不同波长的飞秒激光依次抽运,得到了光纤后端输出的红外超连续光谱、可见-近红外超连续光谱和光纤前端输出的可见-近红外超连续光谱,分析了超连续光谱波长、FWHM 和强度特征。然后根据超连续光谱特征,搭建了以光纤前端面和 SESAM 反射面构成谐振腔、飞秒激光抽运的超连续谱激光器,该激光器输出光谱范围在蓝宝石光纤的正常色散区,光谱线型

平滑,中心波长不随抽运光波长增加而改变,并且谐振腔具有选频功能,输出时谱一致性好、效率高。这种超连续谱激光器能够满足光纤传感和自由宽光谱通信等光源需求。

参 考 文 献

- [1] Ranka J K, Windeler R S, Stentz A J. Efficient visible continuum generation in air-silica microstructure optical fibers with anomalous dispersion at 800 nm[J]. *Optics Letters*, 2000, 25(1): 25-27.
- [2] Alexander V V, Kulkarni O P, Kumar M, *et al.* Modulation instability initiated high power all-fiber supercontinuum lasers and their applications[J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(5): 349-374.
- [3] Dupont S, Petersen C, Thøgersen J, *et al.* IR microscopy utilizing intense supercontinuum light source[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 4887-4892.
- [4] Kaminski C F, Watt R S, Elder A D, *et al.* Supercontinuum radiation for applications in chemical sensing and microscopy[J]. *Applied Physics B-Laser and Optics*, 2008, 92(3): 367-378.
- [5] Heidt A M, Hartung A, Bosman G W, *et al.* Coherent octave spanning near-infrared and visible supercontinuum generation in all-normal dispersion photonic crystal fibers[J]. *Optics Express*, 2011, 19(4): 3775-3787.
- [6] Hooper L E, Mosley P J, Muir A C, *et al.* Coherent supercontinuum generation in photonic crystal fiber with all-normal group velocity dispersion[J]. *Optics Express*, 2011, 19(6): 4902-4907.
- [7] Wang Y B, Xiong C L, Hou J, *et al.* Continuous wave, dual-wavelength-pumped supercontinuum generation in an all-fiber device[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(17): 2752-2758.
- [8] Xiong C, Wang Y, Hou J, *et al.* Modeling of dual-wavelength-pumped supercontinuum generation in an all-fiber device [C]. *Proceedings of 15th Optoelectronics and Communications Conference*, 2010: 496-497.
- [9] Skryabin D V, Luan F, Knight J C, *et al.* Soliton self-frequency shift cancellation in photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2003, 301(5640): 1705-1708.
- [10] Mitschke F M, Mollenauer L F. Discovery of the soliton self-frequency shift[J]. *Optics Letters*, 1986, 11(10): 659-661.
- [11] Akhmediev N, Karlsson M. Cherenkov radiation emitted by solitons in optical fibers[J]. *Physical Review A*, 1995, 51(3): 2602-2607.
- [12] Yina S S, Kima J H, Zhan C, *et al.* Supercontinuum generation in single crystal sapphire fibers [J]. *Optics Communications*, 2008, 281(5): 1113-1117.
- [13] Nakaema W M, Hao Z, Rohwetter P, *et al.* Supercontinuum generation in a sapphire fiber and comparison with a compact PCF based light source[C]. *Proceedings of 2011 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, 2011: JThB97.
- [14] 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.
- [15] Li Siyuan, Ge Tingwu, Sun Chang, *et al.* Supercontinuum generation using resonator cavity of Q-switched fiber laser [J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(2): 0202005.
李思源, 葛廷武, 孙 畅, 等. 利用调Q的谐振腔直接输出超连续谱[J]. *中国激光*, 2016, 43(2): 0202005.
- [16] 殷 科, 张 斌, 刘广琛, 等. 203 W 2~2.5 μm 光谱平坦型超连续谱激光光源 [J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0615003.
- [17] Ouyang D Q, Zhao J Q, Zheng Z J, *et al.* Mid-infrared spectral intensity enhanced supercontinuum generation based on nanosecond Thulium-doped fiber laser[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(3): 1-10.
- [18] Yu J, Mondelai D, Kasparian J, *et al.* Sonographic probing of laser filaments in air[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(36): 7117-7120.
- [19] Liu Shuanglong, Chen Danni, Liu Wei, *et al.* Supercontinuum generation based on all normal dispersion photonic crystal fiber[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(18): 184210.
刘双龙, 陈丹妮, 刘 伟, 等. 基于全正色散光子晶体光纤的超连续谱光源[J]. *物理学报*, 2013, 62(18): 184210.