

· 光电器件与材料 ·

## 飞秒激光作用蓝宝石光纤产生超连续谱的研究

吕良, 谭勇

(长春理工大学 理学院, 长春 130022)

**摘要:**对飞秒激光作用蓝宝石光纤产生超连续谱进行了实验研究。选用脉冲宽度为50 fs的飞秒激光器作为泵浦光, 9 cm蓝宝石光纤为非线性介质; 当激光器中心波长分别为1 200 nm、1 300 nm、1 400 nm、1 500 nm时, 在蓝宝石光纤输出端均可获得红外和可见波段的超连续光源; 为了寻求可见波段更好的超连续光源输出, 在实验装置中加入半导体可饱和吸收体(SESAM), 利用光纤端面 and SASEM 构成谐振腔, 通过 SESAM 的反馈实现多次作用光纤。结果表明, 在可见波段内能够获得460~780 nm平坦稳定的超连续光源输出。

**关键词:**蓝宝石光纤; 超连续光源; SESAM

中图分类号: O433.5

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-01-0022-04

## Research on Super-continuous Spectrum in Sapphire Fiber Acted by Femto-second Laser

LV Liang, TAN Yong

(College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** Super-continuous spectrum in sapphire fiber acted by femto-second lasers is researched. A femto-second laser with 50 fs pulse width is chosen as a pumping light source and a 9 cm sapphire fiber as nonlinear medium. The super-continuous light sources in Infrared and visible band can be obtained at sapphire fiber output terminal when laser center wavelength is 1 200 nm, 1 300 nm, 1 400 nm and 1 500 nm respectively. Semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is added to experimental devices to get better super-continuous light source output in visible band. A resonator is made up of fiber terminal surface and SESAM. And multi-acted fiber is realized by SESAM feedback. The results show that 460~780 nm flat and stable super-continuous light source output in visible band is obtained.

**Key words:** sapphire fiber; super continuous light source; semiconductor saturable absorber mirror (SESAM)

飞秒激光作用非线性介质产生的超连续谱作为光源基于它较宽的频谱范围, 使它在光学相干摄影、光度量等多种时间分辨光谱技术和探测技术中拥有极其重要的应用。它被作为新光源应用在日常科研、生活中, 它改变了人们传统的认知, 具有区别于单一波长激光器特定优势, 在复杂体系的探测、鉴别等技术中扮演着十分重要的角色。同时在可见波段范围内的超连续光源在新一代激光显示等领域具有很好的发展前景。

2007年, Shizhou Yin等人<sup>[1]</sup>首先研究了使用单晶体蓝宝石光纤产生超连续辐射的研究。首先, 理论分析了使用蓝宝石光纤的主要优点, 然后通过实验证实了使用蓝宝石光纤可以得到更好的超连续谱。最后指出, 使用蓝宝石光纤所得到更好的超连续谱将会对超连续辐射的应用有重要作用。2010年, W M Nakaema等人<sup>[2]</sup>使用超短脉冲激光分别在5 cm蓝宝石光纤和光子晶体光纤得到了超连续辐射。实验结果表明, 虽然光子晶体光纤得到了更宽

的光谱,但是在可见光和近红外部分,蓝宝石光纤得到的超连续谱具有更大的强度,最后讨论了使用从蓝宝石光纤得到的超连续谱在多波长光纤衰荡光谱技术中的应用。

基于蓝宝石光纤能够产生较好的超连续谱,利用飞秒激光作用蓝宝石光纤,在光纤输出端加入 SESAM,通过对比分析了有无 SESAM 对产生超连续谱的影响。

### 1 实验装置

实验选用型号为 Liber-HE 的超短脉冲飞秒激光器,其脉宽为 50 fs,通过 OPA 系统实现波长的可调节。蓝宝石光纤是美国 PHOTRAN 公司所生产的单晶体蓝宝石光纤,其直径为 425 μm。实验所用的蓝宝石光纤均为人工端面抛光,进行端面抛光的打磨工具也是从 PHOTRAN 所购。SESAM<sup>[3]</sup>是一种可饱和吸收体结合它自身的特性能够区别于普通反射镜反射窄带波长的激光,SESAM 能够反射较宽的频谱范围内激光,同时它在腔内还能启动锁模,实现对脉冲的压缩得到稳定的输出,这也为得到稳定超连续光源输出提供了条件。针对实验的输出光谱范围,光谱仪采用近红外光谱仪由海洋公司的 NIR-Quest256-2.5,测量范围为 900~2 500 nm。还有同样由海洋公司生产的可见光谱仪 H-R4000,测量范围 200~1 100 nm。采集数据的软件是海洋公司的 SpectraSuite。

实验过程中,先不加入 SESAM,利用飞秒激光直接作用蓝宝石光纤,在光纤后段采用可见光谱仪和红外光谱仪分别探测;然后在光纤后端加入 SESAM,在光纤前段加入格兰棱镜分光,通过利用光纤端面和 SESAM 构成谐振腔,在光纤前段用可见光谱

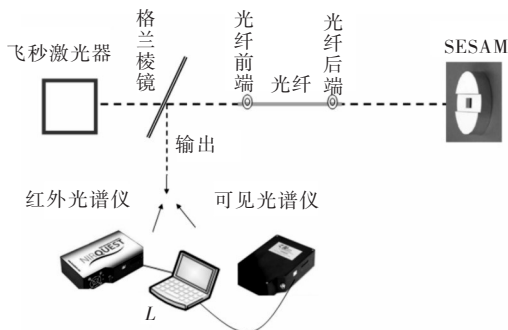


图1 实验装置图

仪和红外光谱仪探测,研究有无 SESAM 对产生超连续谱的影响。实验装置图如图 1 所示。飞秒激光器输出波长选定分别为 1 200 nm、1 300 nm、1 400 nm、1 500 nm。通过选用四种飞秒激光器中心波长进行实验研究。飞秒激光作用蓝宝石光纤实物图如图 2。

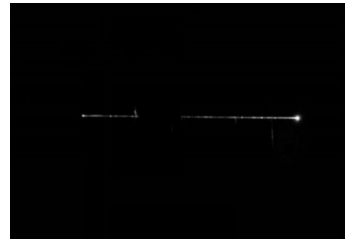
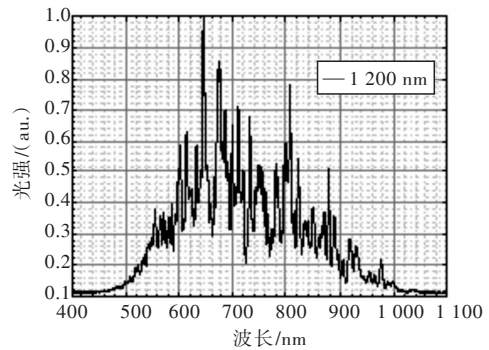


图2 飞秒激光脉冲作用蓝宝石光纤实物图

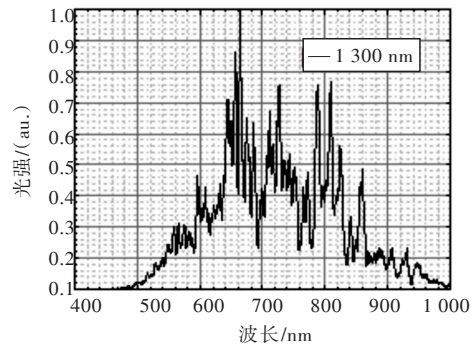
### 2 实验结果与讨论

#### 2.1 无 SESAM 时光纤后端可见光谱仪探测

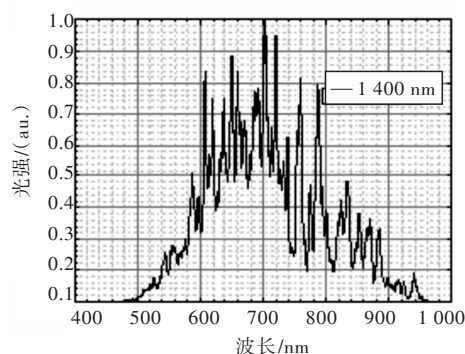
在不加入 SESAM 时,在光纤后端直接探测,飞秒激光器中心波长 1 200~1 500 nm 时可见光谱仪得到光谱图如图 3a~图 3d 所示。



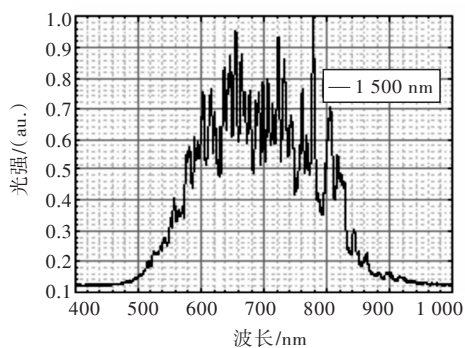
(a)无 SESAM, 光纤后端可见光谱仪



(b)无 SESAM, 光纤后端可见光谱仪



(c)无 SESAM, 光纤后端可见光谱仪



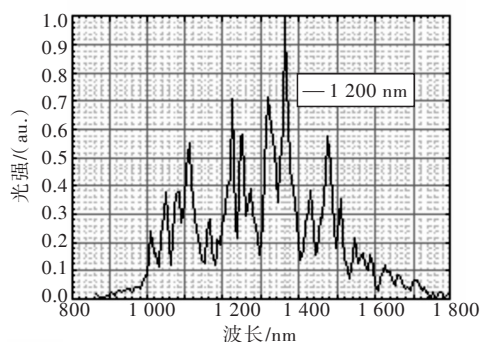
(d)无 SESAM, 光纤后端可见光谱仪

图3 飞秒激光器中心波长为1 200~1 500 nm时, 光纤后端探测可见光谱仪得到光谱图

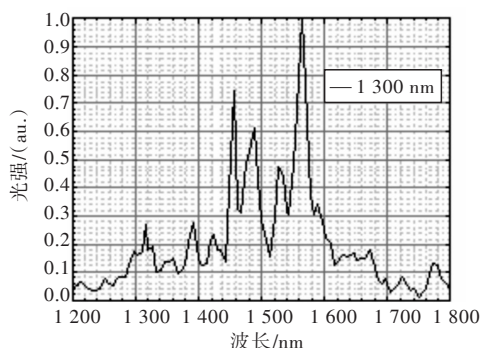
从图3a~图3d中可以看出,脉冲激光在可见波长范围内均得到了较宽的超连续光谱。可见波段的超连续谱形成是由于飞秒激光脉冲在作用蓝宝石光纤时,产生了自相位调制等非线性现象所引起的<sup>[4-6]</sup>。当超短脉冲强光场作用光纤时,光纤的折射率会随着超短脉冲的不断作用而引起变化,这也造成了脉冲自身的相位产生变化;由于不同脉冲分量之间的群速度是不同的,光脉冲在传输过程中引起了不同的相移,这造成了光脉冲的频谱得到展宽。这种瞬时变化的非线性效应不单与光强有关,还与时间有关。激光脉冲会随着时间的不断变化,脉冲自身的前沿、后沿会出现瞬时频移,是自相位调制引起的频率啁啾,频率啁啾也会随着传输距离的变化产生相应的变化,证明了在这个过程中不断有新的频率分量产生,并使得输出的频谱得到了展宽。

## 2.2 无 SESAM 时光纤后端红外光谱仪探测

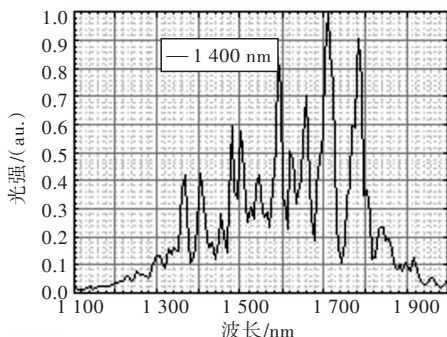
在不加入 SESAM 时,在光纤后端直接探测,飞秒激光器中心波长为 1 200~1 500 nm 时红外光谱仪得到光谱图如图 4a~图 4d 所示。



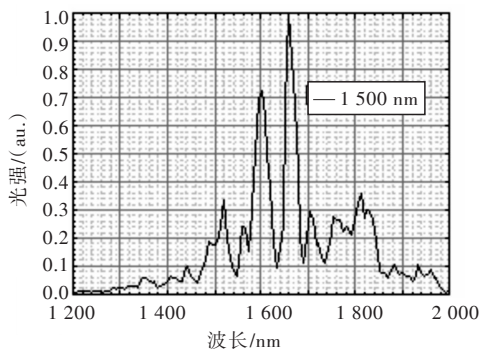
(a)无 SESAM, 光纤后端红外光谱仪



(b)无 SESAM, 光纤后端红外光谱仪



(c)无 SESAM, 光纤后端红外光谱仪



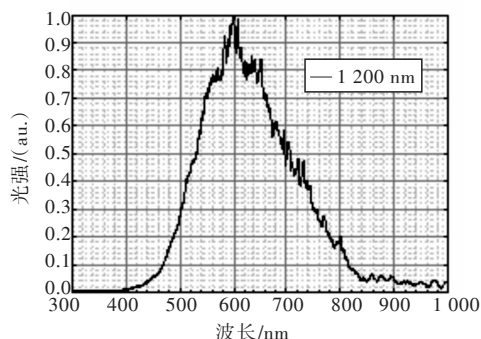
(d)无 SESAM, 光纤后端红外光谱仪

图4 飞秒激光器中心波长为1 200~1 500 nm时, 光纤后端探测红外光谱仪得到光谱图

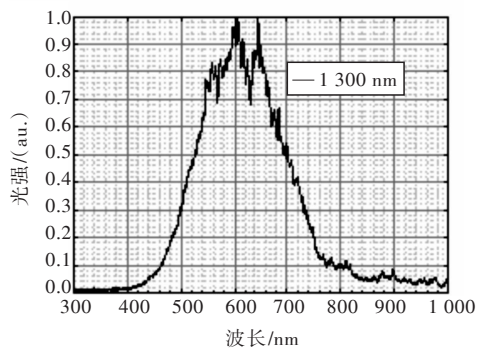
从图4a~图4d中可以看出,在红外波段,飞秒脉冲激光对光纤的作用同样得到了频谱的展宽,在这一阶段飞秒脉冲作用光纤基于受激拉曼散射和受激克尔效应等非线性作用,使得入射光子的频率发生了变化,得到了新频率的光子,并且得到了在红外阶段类拉曼光谱图。

### 2.3 有 SESAM 时,在光纤前端可见光谱仪探测

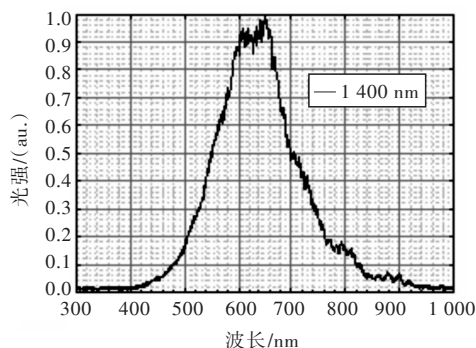
根据2.1节的实验结果,在可见波段获得了较宽的超连续谱,为了寻求更好的超连续光源,在光纤后端中加入 SESAM,利用 SESAM 与光纤端面构成谐振腔,在光纤前段探测,飞秒激光器中心波长为 1 200~1 500 nm 时得到的超连续谱如图 5a~图 5d 所示。



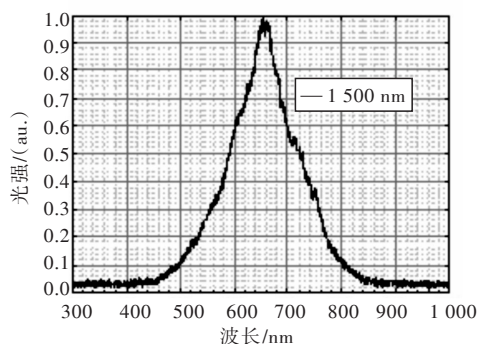
(a)有 SESAM, 光纤前端可见光谱仪



(b)有 SESAM, 光纤前端可见光谱仪



(c)有 SESAM, 光纤前端可见光谱仪



(d)有 SESAM, 光纤前端可见光谱仪

图5 飞秒激光器中心波长为 1 200~1 500 nm 时, 在光纤前端探测得到超连续谱

实验通过在光纤后端加入半导体可饱和吸收体 (SESAM) 反馈<sup>[7-8]</sup>, 入射的激光脉冲经过 SESAM 反射完成激光振荡, 通过多次作用, 光纤得到的超连续谱更加稳定平滑, 在可见部分得到了 460~780 nm 的超连续谱。对比 2.1 节中飞秒激光直接作用蓝宝石光纤实验得到的超连续谱输出频谱范围更宽、更稳定, 主要原因是在超短激光脉冲经 SESAM 反射后又一次作用在蓝宝石光纤上, 在多次作用过程中不仅有放大作用还使超短激光脉冲再次发生自相位调制<sup>[9-10]</sup>等非线性现象, 所以得到的频谱相比之前得到的频谱展宽效果更好。在红外阶段没有探测到光谱图, 主要原因是由于 SESAM 对波长的反射具有选择性, 因此一部分红外波段频率的光子没有得到反射; 同时还有一部分红外波段频率的光子由于光纤的多次作用, 再一次产生的非线性现象演变为可见波段的新频率光子, 这也是频谱相比之前 2.1 节中飞秒激光直接作用蓝宝石光纤实验的频谱更宽的原因之一。

### 3 结 论

通过飞秒激光作用蓝宝石光纤, 在光纤后端加入半导体可饱和吸收体 SESAM, 利用光纤端面与 SESAM 构成谐振腔, 通过 SESAM 的反馈作用, 实现激光脉冲与光纤的多次作用, 引起了自相位调制等非线性效应, 产生了新频率的光子, 在改变飞秒激光器中心波长 1 200~1 500 nm 时均得到了在可见波段 460~780 nm 平坦稳定的超连续光源。相比较于没有 SESAM 实验, 在可见波段得到输出更加稳定、

(下转第 31 页)

- [10] ZHANG Ning, LIU Cang-li, SUN Cheng-wei. The thermal-coupling effect of CW COIL beam on composites[R]. AIAA, 95-1930.

- [11] 杨世铭,陶文铨.传热学[M]. 4版. 北京:高等教育出版社, 2005:44-45.

(上接第21页)

现,用一级点时,调节频率过程中会有二倍、四倍、六倍谱的出现。在调节声波频率的过程中,可以看出,频谱仪上对应的谱线频率有 98.250 000 MHz、196.500 000 MHz、98.298 156 MHz、197.266 666 MHz、296.200 000 MHz,基本符合二倍,四倍,六倍的规律,与理论吻合。

#### 参考文献

- [1] 李明,李冠成.声光效应实验研究[J].应用光学, 2005, 26(6):23-27.
- [2] 李武军,王晓颖.声光 Naman-Nath 衍射特性的研究[J].大学物理, 2009, 28(9):25-27.
- [3] 刘闯.声光脉冲延时自外差拍频实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
- [4] Kohanzadeh Y, Auston D H. Measurement of low-absorption coefficients using the beat frequency shift between transverse modes of a laser[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1970, QE-6(7):475-477.

- [5] Weksler M, Vager Z, Neumann G. Measurement of a very high displacement sensitivity of the beat frequency in an He-Ne laser[J]. IEEE J. Quantum Electron, 1980, QE-16(7):785-790.
- [6] Jettappa, Richard Rodrigues, Sharma Seshadri. Frequency error estimation in nonlinear systems using beats[J]. ASME Des Eng Div Publ DE. 1991, 37:91-96.
- [7] Pelusi M D, Liu H F, Novak D. THz optical beat frequency generation from a single mode locked semiconductor laser[J]. Appl. Phys. Lett, 1997, 71(4):449-451.
- [8] Strand O T, Berzins L V, Goosman D R, et al. Veloeimetry using heterodyne techniques[J]. Proc. SPIE, 2005, 5580:593-599.
- [9] 程乃平.声光信号处理及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2004:195.
- [10] 李港.驻波型声光调制器的理论研究[J].北京:北京工业大学学报, 1998, 24(1):49-54.

(上接第25页)

频谱覆盖范围更宽的超连续光源,这为白光激光的研究提供了帮助,可见波段内的超连续光源将会在激光显示等新一代显示技术中发挥巨大的作用,同时对于可见波段内的多种复杂体系的探测分析也提供了理论和实验的研究基础。

#### 参考文献

- [1] Yin S S, Kim J H, Zhan C, et al. Supercontinuum generation in single crystal sapphire fibers[J]. Optics Communications, 2008, 281(5): 1113-1117.
- [2] 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]//CLEO: Science and Innovations. Optical Society of America, 2011: JThB97.
- [3] Wang Q, Geng J, Luo et al. T. Mode-locked 2  $\mu\text{m}$  laser with highly thulium-doped silicate fiber [J]. Opt. Lett., 2009, 34

- (23):3616-3618.
- [4] Alexander Sell, Günther Krauss, Rüdiger Scheu, et al. 8-fs pulses from a compact Er: fiber system: quantitative modeling and experimental implementation[J]. Optics Express, 17(2).
- [5] 阮双琛,闫培光,郭春雨.光子晶体光纤超连续谱光源[J].深圳大学学报:理工版, 2011, 28(4):295-301.
- [6] 刘双龙,陈丹妮,刘伟.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):184210-1-184210-7.
- [7] 冀翔,王小林,周朴.声光调Q纳秒脉冲全光纤超连续谱光源[J].强激光与粒子束, 2013, 25(1):119-122.
- [8] 谭方舟,刘江,孙若愚.基于多模干涉效应的全正色散被动锁模掺镱光纤激光器[J].中国激光, 2013, 40(4).
- [9] 沈君凤,罗风光.光子晶体光纤产生的超连续谱[J].光子学报, 2014, 43(1):0106007-1-0106007-4
- [10] 李超,朱启华,赵磊.中红外超连续谱在氟化物光纤中的产生[J].强激光与粒子束, 2014, 26(10):101005-1-101005-3.