

掺镱硼酸钙氧钇飞秒激光器及在拉锥光纤中产生跨倍频程超连续光

贾玉磊 朱政 韩海年 田文龙 谢阳 张龙 魏志义

Generation of octave-spanning super-continuum in tapered single mode fibre pumped by femtosecond Yb:YCOB laser

Jia Yu-Lei Zhu Zheng Han Hai-Nian Tian Wen-Long Xie Yang Zhang Long Wei Zhi-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 054206 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.054206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.054206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

28.2 W 波长锁定 878.6 nm 激光二极管共振抽运双晶体 1064 nm 激光器

A 28.2-W wave-locked 878.6 nm diode-laser-pumped multi-segmented Nd:YVO<sub>4</sub> laser operating at 1064 nm

物理学报.2014, 63(21): 214206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.214206>

用于光生毫米波的双频微片激光器热致频差特性研究

Thermally induced frequency difference characteristics of dual-frequency microchip laser used optical generation millimeter-wave

物理学报.2013, 62(20): 204205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.204205>

角抽运 Nd:YAG 复合板条 946 nm 连续运转激光器

Corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab continuous-wave 946 nm laser

物理学报.2013, 62(14): 144205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.144205>

端抽运 Yb<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> 激光准三能级理论模型研究

The modeling of end pumping Yb<sup>3+</sup>:YVO<sub>4</sub> quasi-three-level laser

物理学报.2013, 62(11): 114206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.114206>

激光二极管抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的三维热效应分析

Three-dimensional thermal effects of the diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab

物理学报.2013, 62(2): 024210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.024210>

# 掺镱硼酸钙氧钇飞秒激光器及在拉锥光纤中产生跨倍频程超连续光\*

贾玉磊<sup>1)</sup> 朱政<sup>1)2)</sup> 韩海年<sup>2)†</sup> 田文龙<sup>2)3)</sup> 谢阳<sup>2)3)</sup> 张龙<sup>2)</sup> 魏志义<sup>2)‡</sup>

1) (中国石油大学(华东), 理学院, 青岛 266580)

2) (中国科学院物理研究所, 北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190)

3) (西安电子科技大学, 光电工程与物理院, 西安 710071)

(2014年9月22日收到; 2014年10月12日收到修改稿)

跨倍频程超连续光谱的产生是光学频率梳系统中测量载波包络相移频率的关键. 本文采用拉锥单模光纤作为非线性光谱展宽介质, 将半导体激光(LD)抽运的掺镱硼酸钙氧钇(Yb:YCOB)振荡器输出的飞秒激光耦合到该拉锥光纤中, 通过飞秒激光在光纤中发生的相位调制、四波混频等非线性效应将光谱展宽至超过倍频程的范围. 振荡器输出的飞秒激光脉冲宽度为130 fs, 中心波长为1052 nm, 重复频率为76.8 MHz, 平均功率为620 mW, 耦合进单模拉锥光纤后获得了光谱覆盖范围从550 nm至1350 nm的跨倍频程超连续光谱, 最大输出平均功率为323 mW, 耦合效率达到52%. 为进一步实现全固态飞秒激光光学频率梳提供了重要基础.

**关键词:** 掺镱硼酸钙氧钇, 全固态飞秒激光振荡器, 拉锥光纤, 超连续光谱

**PACS:** 42.55.Xi, 42.81.Cn, 43.58.Kr

**DOI:** 10.7498/aps.64.054206

## 1 引言

飞秒光学频率梳在光钟构成、激光绝对频率测量、频率标准传递及精密光谱测量等多个领域有着重要而广泛的应用<sup>[1-3]</sup>. 跨倍频程超连续光谱的产生是建成稳定光学频率梳的重要环节, 飞秒光梳载波包络相移频率测量需要利用超连续光谱中低频成分的倍频和光谱高频成分拍频得到. 目前国际上产生跨倍频程超连续光谱的飞秒光学频率梳主要有三种, 即钛宝石光梳、光纤光梳和全固态光梳. 钛宝石飞秒激光器因窄脉宽、低噪声等优点最先实现了超连续光谱产生并建成频率稳定的钛宝石光梳<sup>[4,5]</sup>. 光纤激光器具有结构紧凑、抽运效率高且造价较低等特点, 但缺点是锁模输出脉冲宽度较宽以及输出功率较低, 一般需要腔外放大系统来放大

到足够的功率, 然后再入射到高非线性光纤中产生超连续谱, 现成熟的光纤光梳有掺铒光纤光梳和掺镱光纤光梳等<sup>[6,7]</sup>. 相比钛宝石和光纤光梳, 二极管抽运的全固态飞秒激光器虽然刚开始没有广泛应用在光学频率梳系统上<sup>[8,9]</sup>, 但是近年来, 随着半导体激光性能的提升, 半导体抽运的全固态激光器的峰值功率越来越高, 光束质量也变得更好, 出现了许多以不同晶体作增益介质的全固态飞秒激光器直接产生百飞秒量级和百毫瓦量级的平均功率的报道. 这些激光器的峰值功率可达几十千瓦量级, 完全可以满足在各种非线性光纤里产生超连续光谱的要求.

目前报道的已产生超连续光谱的全固态激光器有掺铬氟铝酸镱锂(Cr:LiSAF)激光器<sup>[10]</sup>、掺镱钨酸钪钾(Yb:KYW)激光器<sup>[11]</sup>、铟镱共

\* 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2012CB821304)、国家自然科学基金(批准号: 61378040)和中央高校基本科研业务费专项基金(批准号: R1310023A)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hnhan@iphy.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zywei@iphy.ac.cn

掺玻璃(Er:Yb:glass)激光器<sup>[12]</sup>及掺钨钼酸镱钾(Yb:KGW)<sup>[13]</sup>等. 在2001年, 亨施等使用红外半导体抽运Cr:LiSAF晶体, 经克尔透镜效应锁模后, 振荡器可以输出平均功率为150 mW、重复频率为93 MHz、脉冲宽度为40 fs的脉冲激光, 将光耦合进长度为20 cm、芯径为1  $\mu\text{m}$ 的光子晶体光纤(PCF)中得到了超连续光谱, 谱宽从500 nm至1200 nm, 覆盖了一个光学倍频程, 但是超连续光的功率只有42 mW, 转化效率较低. 2008年美国国家标准技术实验室报道了使用Yb:KYW飞秒激光器产生超连续光谱, 使用半导体可饱和体吸收镜(SESAM)被动锁模的振荡器输出的飞秒激光脉宽为290 fs, 重复频率为160 MHz, 最大平均输出功率为240 mW, 由于峰值功率过低和脉冲宽度过宽, 振荡器的光谱不能直接在非线性光纤里展宽至可跨一个倍频程, 因此需要经过腔外光纤放大器放大, 再经压缩后得到脉宽80 fs的脉冲, 将脉冲耦合到微结构非线性光纤中, 得到的超连续光谱范围涵盖了680 nm和1360 nm, 超过了一个倍频程. 后来瑞士联邦理工大学的凯勒等也成功报道了SESAM被动锁模的Er:Yb:glass, Yb:KGW等性能优异的全固态锁模激光器, 这些振荡器输出的飞秒激光不仅脉冲宽度窄而且平均功率足够高, 使用这些振荡器也直接在光子晶体光纤中产生了超连续光.

本文我们详细介绍基于Yb:YCOB飞秒激光器在单模拉锥光纤中产生跨倍频程的超连续光谱的研究, 这是首次使用Yb:YCOB飞秒激光器和单模拉锥光纤产生跨倍频程的超连续光谱. 我们搭建的Yb:YCOB振荡器采用干涉镜(GTi)色散控制技术, SESAM的饱和吸收实现自动连续锁模, 可以输出飞秒脉冲宽度为130 fs, 平均功率达到620 mW, 重复频率是76.8 MHz. 峰值功率达到了62.3 kW, 这在已有的百飞秒量级的全固态激光器报道中峰值功率是最高的. 将飞秒激光脉冲直接耦合进芯径约3  $\mu\text{m}$ 、长度20 cm的拉锥单模光纤中, 产生了波长范围从550 nm至1350 nm跨倍频程的超连续光谱, 耦合效率为52%, 超连续光功率达到323 mW. 这为进一步发展Yb:YCOB飞秒激光频率梳奠定了坚实的基础.

## 2 实验装置

我们搭建的Yb:YCOB飞秒振荡器内部光路如图1所示. 采用中心波长976 nm最大可输出

10 W的半导体激光器作为抽运源. 抽运光经过一对透镜组成的准直聚焦系统后聚焦到一块尺寸为3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  3 mm, 镱离子掺杂浓度为30%的Yb:YCOB正方体晶体上, 晶体是由山东大学晶体研究所提供. Yb:YCOB晶体的两个通光面镀有900—1100 nm宽带高透膜. 为了消除热猝灭需要保证晶体工作时温度恒定, 我们在晶体非通光表面包裹一层铝箔, 并通过固定夹具安装, 采用水冷装置进行循环水冷. 振荡器腔型是典型的X折叠驻波腔, 由长臂端和短臂端组成, 总腔长约为1.95 m. 短臂端是输出耦合端, 由平面镜 $L_1$ 、凹面镜 $M_2$ 及输出耦合镜OC组成, 其中 $L_1$ 是一块双色平面镜, 一面镀有976 nm高透膜, 另一面则是1040 nm高反膜.  $M_2$ 是曲率半径为200 mm的凹面镜, 表面镀有1000—1100 nm宽带高反膜, OC是透过率为2.5%的输出镜. 长臂端由 $M_1$ , GTi,  $M_3$ ,  $M_4$ , SESAM组成, 其中 $M_1$ 和 $M_2$ 一样, 都是表面镀有1000—1100 nm宽带高反膜、曲率半径为200 mm的凹面镜, GTi用来补偿腔内Yb:YCOB晶体引入的正群速色散, 一次反射可以补偿-1000 fs<sup>2</sup>,  $M_3$ 是一块平面高反镜反射激光,  $M_4$ 是曲率半径为300 mm的凹面镜, 将激光聚焦在SESAM上. SESAM在1064 nm处的调制深度为0.4%, 饱和通量为90  $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ , 弛豫时间小于500 fs.

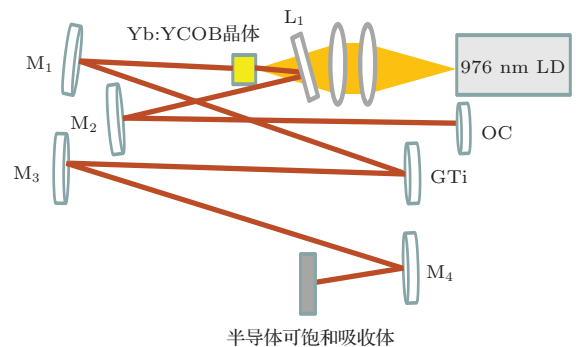


图1 Yb:YCOB飞秒振荡器结构示意图

这里采用单模拉锥光纤<sup>[14]</sup>作为产生超连续谱的高非线性介质. 单模拉锥光纤相比光子晶体光纤(PCF)的优势在于单模光纤成本较低, 结构简单, 另一个重要优点在于可以极大降低将激光耦合进光纤的难度, 同时提高耦合效率. 因为相比PCF从入射到出射都保持相同的极细芯径来说, 拉锥光纤的入射端和出射端和普通单模光纤一样. 单模光纤是康宁公司生产的普通SMF-28光纤, 剥去涂覆层

后, 外径为 125  $\mu\text{m}$ , 纤芯直径为 6  $\mu\text{m}$ . 在做拉锥处理时, 将光纤两端固定在可移动的长程电动平移台上, 中部设置高温火焰加热光纤, 随着平移台慢慢移动拉伸, 光纤中部会在火焰加热下被拉长, 从而形成中部的细芯径拉锥区域. 处理后的拉锥光纤结构如图 2 所示, 主要分为 3 部分, 原始区域, 过渡区域和腰锥区域. 我们使用的拉锥光纤总长度为 20 cm, 其中腰锥区域长度为 10 cm, 拉锥后芯径变为 3  $\mu\text{m}$ .



图 2 拉锥光纤的结构示意图

利用以上搭建的 Yb:YCOB 激光器及自制的拉锥单模光纤我们进行了产生超连续的实验研究, 整体实验装置如图 3 所示. 首先采用焦距为 11 mm 的非球面透镜对 Yb:YCOB 激光器输出的飞秒激光脉冲聚焦. 为了将聚焦后的激光耦合进单模拉锥光纤中, 需要对拉锥光纤做一些技术处理, 首先是封装技术, 这里我们将 20 cm 的拉锥光纤放进中部镂出长方体空心结构的有机玻璃内, 两头各留出 5 cm 长的光纤用来耦合. 另外一个耦合装置, 为了达到最大耦合效率, 需要精细调节入射激光耦合角度和焦距, 因此我们将封装好的单模拉锥光纤固定在一个高精度的三维平移台上, 通过调整光纤的三维位置, 保证激光的高效率耦合. 在拉锥单模光纤后端接上 FC/APC 转接器可以直接连接到光谱仪上探测超连续光谱.



图 3 超连续光的产生和探测装置示意图

### 3 实验结果与讨论

当 LD 抽运功率达到 9 W 时, 通过精密调节 SESAM 的位置与角度, Yb:YCOB 振荡器可以输出稳定的飞秒激光, 最大输出功率达到 620 mW. 我们测量了输出激光脉冲的强度自相关曲线, 光谱曲线和频谱曲线. 自相关曲线如图 4(a) 所示, 假设脉冲为双曲正割型, 通过理论模拟得到自相关曲线如图中红线所示, 实际测量的强度自相关曲线如图中黑线所示, 半高全宽大约 130 fs, 可以看出实际

测量值几乎与理论模拟曲线完全符合, 说明我们所搭建的 Yb:YCOB 振荡器腔内色散补偿比较充分接近零色散. 我们使用光谱仪 (Yokogawa AQ6370) 测量出振荡器相应的光谱曲线图如图 4(b) 所示, 光谱半高全宽 9.4 nm, 中心波长在 1052 nm.

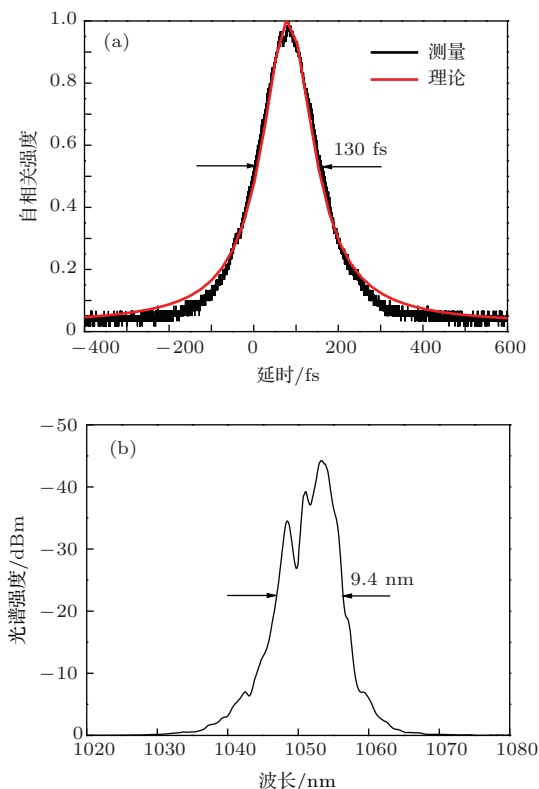


图 4 (a) Yb:YCOB 飞秒振荡器输出脉冲的强度自相关曲线 (黑色为自相关仪采样曲线, 红色为 sech2 理论模拟); (b) 飞秒脉冲的光谱 (半峰全宽是 9.4 nm)

振荡器输出的激光经频谱仪采集信号后如图 5 所示. 图 5(a) 是从 0 Hz 到 1 GHz 范围内重复频率及其高次谐波信号, 表明这台振荡器锁模相当稳定, 图 5(b) 为此振荡器重复频率基频信号的频谱曲线, 在 300 Hz 分辨率下信噪比可达 76 dBc. Yb:YCOB 飞秒振荡器锁模运转时可以稳定的输出 620 mW, 130 fs, 76.8 MHz 的飞秒激光脉冲, 对应的峰值功率约为 62.3 kW, 这已经足够激发光纤中的非线性效应从而展宽光谱并产生超连续谱并且一旦锁模启动后, 可以稳定锁模长达十几个小时. 因此我们没有继续加大抽运功率, 而是保持这一状态继续进行后续的单模拉锥光纤的耦合产生倍频超连续光谱实验.

我们控制的芯径 3  $\mu\text{m}$  的拉锥单模光纤的零色散波长在 832 nm, Yb:YCOB 飞秒振荡器输出的波长为 1050 nm, 位于拉锥光纤的反常色散区, 理论上



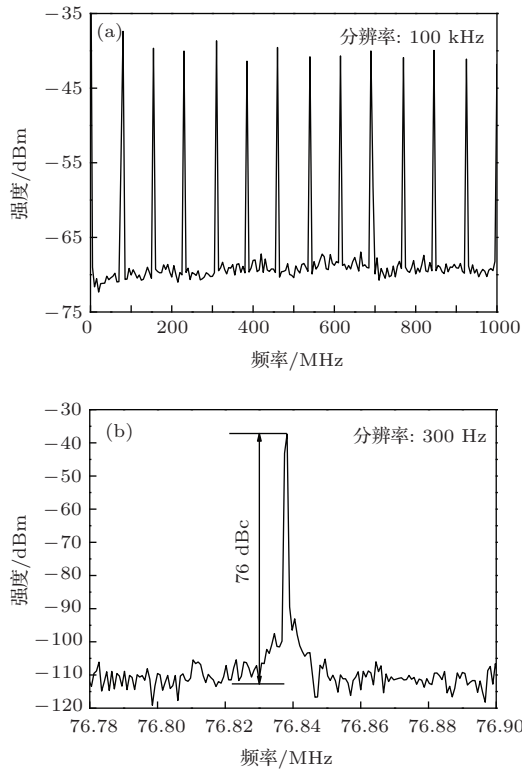


图5 Yb:YCOB飞秒振荡器脉冲串的频率谱 (a) 0至1 GHz宽频范围的频谱图; (b) 振荡器基频的频谱图(分辨率为300 Hz)



图6 产生的超连续白光照射在板上

这有利于光谱向短波方向扩展. 实验中, 将620 mW的激光通过精密三维平移台耦合系统导入拉锥光纤, 随着焦距的精细调整, 飞秒激光脉冲超强的峰值功率激发了拉锥光纤内自相位调制, 交叉相位调制, 受激拉曼散射等一系列非线性效应, 从而将光谱同时向短波和长波方向展宽, 同时可以看到黄光从拉锥光纤中慢慢泄露出来, 随着焦距位置的调整, 黄光转变为白光产生很强的超连续光. 在拉锥光纤后测量到超连续光的功率, 可达323 mW, 耦合效率达到52%, 这比一般PCF的耦合效率高

将近20个百分点, 而且超连续功率非常高. 图6所示为拉锥光纤出射的超连续白光打在荧光板上显示的光斑, 可以看到超连续光斑是非常圆的基模. 图7是光谱仪测量的超连续光谱分布曲线, 输出的超连续光谱范围从550 nm至1350 nm, 超过了一个倍频程. 在这些频率成分中, 832 nm为零色散波长, 故强度最小, 在580 nm和1160 nm有两处强度峰值, 可以选用作为飞秒脉冲载波包络相移频率拍频信号探测.

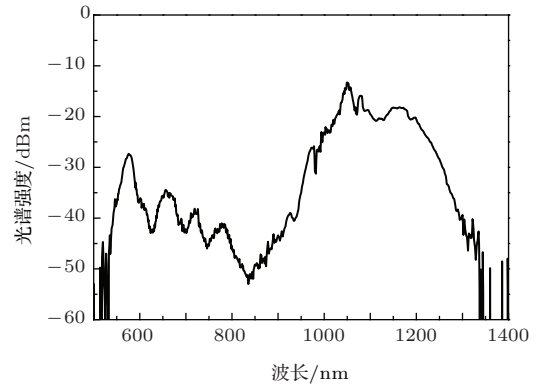


图7 Yb:YCOB飞秒激光抽运光纤产生的跨倍频程超连续光谱图

## 4 结 论

我们自主搭建了二极管抽运的Yb:YCOB激光器, 采用GTi镜控制色散和SESAM被动锁模技术实现了飞秒激光锁模运转, 可输出最大功率620 mW、脉冲宽度130 fs、重复频率76.8 MHz的稳定飞秒激光脉冲. 将这样飞秒激光不经过任何放大和脉冲压缩, 通过一个精密的耦合系统直接导入一个拉锥处理后的普通单模光纤中, 获得了跨倍频程的超连续光谱, 光谱覆盖的范围从550 nm至1350 nm, 超连续光的功率达到了323 mW. 使用SESAM被动锁模的Yb:YCOB激光器并通过拉锥单模光纤产生超连续光谱的实验结果是首次发表, 后续我们将在此实验基础上继续研究相位锁定等技术, 开发全新高稳定全固态光学频率梳.

## 参考文献

- [1] Brabec T, Krausz F 2000 *Rev. Mod. Phys.* **72** 545
- [2] Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W, Knight J C, Wadsworth W J, Russell P S J 2000 *Phys. Rev. E* **85** 2264
- [3] Udem T, Reichert J, Holzwarth R H, Hansch T W 1999 *Phys. Rev. Lett.* **82** 3568

- [4] Ye J, Yoon T H, Hall J L, Madej A A, Bernard J E, Siemsen K J, Marnet L 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 3797
- [5] Udem T, Reichert J, Hansch T W, Kourogi M 2000 *Phys. Rev. A* **62** 031801
- [6] Washburn B R, Diddams S A, Newbury N R, Nicholson J W, Yan M F, Jørgensen C G 2004 *Opt. Lett.* **29** 250
- [7] Diddams S A, Jones D J, Ye J, Cundiff S T, Hall J L, Ranka J K, Windeler R S, Holzwarth R, Udem T, Hänsch T W 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 5102
- [8] Yan R P, Yu X, Chen D Y, Chen F, Li X D, Ma Y F, Yu J H 2012 *Chin. Phys. B* **21** 024208
- [9] Wang Y Y, Xu D G, Liu C M, Wang W P, Yao J Q 2012 *Chin. Phys. B* **21** 094212
- [10] Holzwarth R, Zimmermann M, Udem T, Hänsch T W, Russbüldt P, Gäbel K, Poprawe R, Knight J C, Wadsworth W J, Russell P 2001 *Opt. Lett.* **26** 1376
- [11] Meyer S A, Squier J A, Diddams S A 2008 *Eur. Phys. J. D* **48** 19
- [12] Pekarek S, Südmeyer T, Lecomte S, Kundermann S, Dudley J M, Kelle U 2011 *Opt. Express* **19** 16491
- [13] Klenner A, Golling M, Keller U 2013 *Opt. Express* **21** 10351
- [14] Birks T A, Wadsworth W J, Russell P S J 2000 *Opt. Lett.* **25** 1415

## Generation of octave-spanning super-continuum in tapered single mode fibre pumped by femtosecond Yb:YCOB laser\*

Jia Yu-Lei<sup>1)</sup> Zhu Zheng<sup>1)2)</sup> Han Hai-Nian<sup>2)†</sup> Tian Wen-Long<sup>2)3)</sup> Xie Yang<sup>2)3)</sup>  
Zhang Long<sup>2)</sup> Wei Zhi-Yi<sup>2)‡</sup>

1) (College of Science, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

2) (Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

3) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

( Received 22 September 2014; revised manuscript received 12 October 2014 )

### Abstract

It is a pivotal step in the measurement of carrier-envelope phase offset frequency in optical femtosecond frequency combs that a stable octave-spanning super-continuum spectrum is generated. In this paper, a home-made Yb:YCOB femtosecond laser pulse is led into a tapered fiber in which some nonlinear effects like self pulse modulation are generated and the four-wave mixing is made to broaden a spectrum to more than one octave-spanning. A Yb:YCOB oscillator emits 130 fs, 620 mW and 76.8 MHz laser pulses, the center wavelength at 1052 nm. Such pulses are focused into a tapered single-mode fiber, and then more than one octave-spanning supercontinuum from 550 nm to 1350 nm has been produced. The coupling efficiency can reach 52% when 323 mW SC laser pulses are detected. Based on the experimental result, a new optical comb will be built with the Yb:YCOB solid state laser as the light source.

**Keywords:** Yb:YCOB crystal, solid state femtosecond laser, tapered single mode fiber, supercontinuum

**PACS:** 42.55.Xi, 42.81.Cn, 43.58.Kr

**DOI:** 10.7498/aps.64.054206

\* Project supported by the the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB821304), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61378040), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of Ministry of Education of China (Grant No. R1310023A).

† Corresponding author. E-mail: [hnhan@iphy.ac.cn](mailto:hnhan@iphy.ac.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [zywei@iphy.ac.cn](mailto:zywei@iphy.ac.cn)