

直接从钛宝石激光器获得超连续光谱*

王 专 王清月 韩英魁 曹士英 张志刚 柴 路

(天津大学精密仪器与光电子工程学院超快激光研究室, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2004 年 1 月 17 日收到, 2004 年 2 月 19 日收到修改稿)

采用啁啾镜和棱镜对相结合补偿色散的方法在自调 Q 自锁模钛宝石激光器腔内直接产生了超过一个倍频程的超连续光谱, 光谱范围从 460nm 到 1000nm, 这是飞秒激光器输出光谱在短波段第一次突破 500nm. 这将使得脉冲的载波包络偏移频率的测量装置得到大大简化, 同时也提高了光频测量的稳定性.

关键词: 超连续光谱, 啁啾镜, 自调 Q 自锁模, 钛宝石激光器

PACC: 4265J, 4280W

1. 引 言

飞秒激光的出现大大简化了光频率的测量和合成. 一台飞秒锁模激光器的输出光谱是由许多个频率成分组合而成的频率梳, 每个频率成分可由两个可以探测的微波频率确定, 它们分别是激光器输出脉冲的重复频率 f_r 和脉冲的载波包络偏移频率 f_{CEO} ^[1]. 这个偏移频率可以通过测量超过一个光倍频程光谱的近红外成分的倍频信号与光谱蓝边成分之间的拍频信号而很容易获得^[2].

尽管现在可以利用飞秒激光器输出的飞秒脉冲耦合到微结构光纤^[3]中产生覆盖可见光到近红外波段的超过一个光倍频程的光谱, 但是这种实验装置相对复杂, 将飞秒激光准确地耦合到微结构光纤的纤芯里比较困难, 而且经过一段时间后光纤的输入和输出端面特别容易受到损害, 同时随着输入脉冲能量的增大, 就会出现宽带振幅噪声, 从而影响到频率测量的稳定性^[4]. 近年来相继有文献报道钛宝石激光器腔内直接产生超连续光谱^[5-7, 9], 这使得 f_{CEO} 的测量得到大大的简化, 同时也提高了光频测量的稳定性^[8, 9].

Likforman 等人于 1998 年发现运转在自调 Q 自锁模状态下的钛宝石激光器腔内产生连续谱的现象, 光谱范围从 560nm 到 1000nm, 但是光谱没有超过一个倍频程^[5]; 2001 年 Ell 等人在腔内加入非线性

性介质 BK₇, 增加腔内的自相位调制 (self-phase modulation, SPM) 作用从而得到了超过一个倍频程的光谱, 光谱范围 600—1200nm^[6]; 2002 年 Bartels 等人利用环形腔钛宝石激光器, 通过将其中一个平面镜改为凸面镜增加脉冲在腔内的自振幅调制 (self-amplitude modulation, SAM) 作用, 得到了一个倍频程的超连续光谱, 560—1150nm^[7]; 2003 年 Fortier 等人从克尔透镜锁模状态下的钛宝石激光器得到了超过一个倍频程的光谱, 570—1280nm^[9]. 综合起来看, 以上几种产生连续谱的实验中其可见光部分波长都大于 560nm, 本文的钛宝石激光器运转在自调 Q 自锁模状态下得到了超过一个倍频程的光谱, 其光谱仪 (Ocean Optics, SD2000) 可探测到的短波延伸至 460nm 尚属首次报道.

2. 实验装置

实验中使用的钛宝石激光器为 X 型腔结构, 如图 1 所示. 抽运源采用半导体抽运的倍频钷酸钷激光器 (Millennia VS, Spectra-Physics), 抽运功率 4W, 通过焦距为 100mm 的透镜聚焦在晶体表面. 钛宝石晶体布儒斯特角切割, 长 2mm (通光长度 2.3mm), 置于曲率半径 100mm 的两个凹面镜 (Newport-05BV10UF. 20) 之间. 实验中采用的啁啾镜 (Layertec, Germany, M3-F080137, M4-F080136) 单次反射提供 -60fs^2 色散, 熔石英棱镜对 P_1, P_2 之间距离 24cm 置于另一

* 国家重点基础研究项目 (批准号: G1999075201) 资助的课题.

臂,含有啁啾镜的一臂长 82 cm,含有棱镜对的一臂长 58cm.激光器棱镜对一臂端镜为全反镜(Newport-05B20UF.20)啁啾镜一臂端镜为透射率为 3.5% 的输出镜.

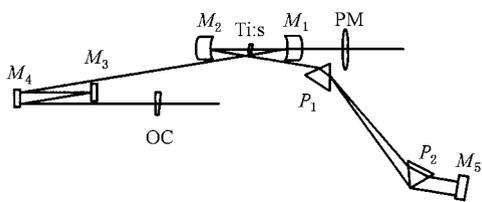
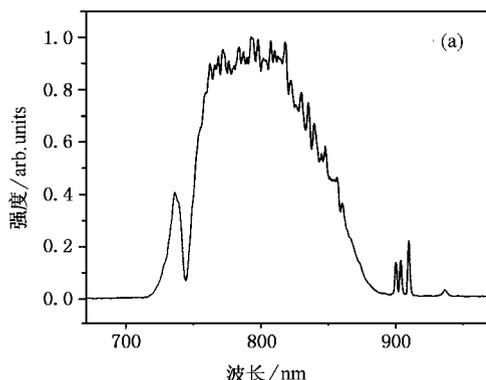


图 1 钛宝石激光器示意图(PM 抽运聚焦镜, M_1, M_2 双色镜, M_3, M_4 啁啾镜, M_5 高反镜, OC 输出镜, Ti:s 钛宝石晶体, P_1, P_2 熔石英棱镜)

钛宝石晶体既是激光器的增益介质同时又产生正色散,为了获得飞秒脉冲必须加入色散补偿元件.通常采用熔融石英棱镜对来补偿色散.由于棱镜对不能在很宽的光谱范围内提供平坦的色散,所以通常使用啁啾镜作为色散补偿元件来克服色散带宽的问题.图 2 给出了本文实验中使用的钛宝石晶体、棱镜对(间距 24 cm,插入量 4mm)、啁啾镜的色散曲线,同时也给出了腔内所有色散元件的综合色散.通过调整棱镜对的插入量可以调整腔内总的色散量从而改变产生脉冲的宽度.图 2 同时也给出了只有棱镜对补偿色散情况下腔内总色散曲线(钛宝石晶体通光长度 2.3mm,棱镜对间距 45mm,插入量 5mm),



可以看出,加入啁啾反射镜后,在短波波段,腔内总色散有了极大的改善.

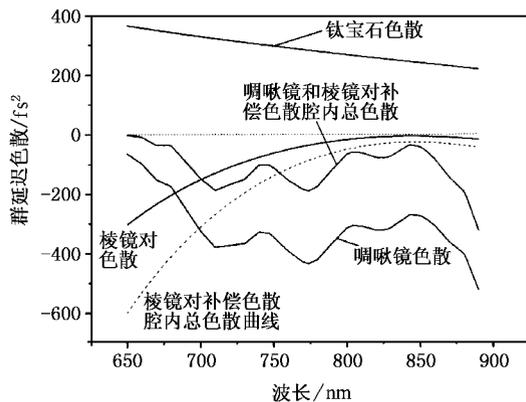


图 2 腔内元件的二阶色散及腔内总色散

3. 实验及结果分析

激光器的工作点选在下稳区的上边缘^[10],此时可以得到稳定的克尔透镜锁模脉冲序列,重复频率 100MHz,光谱图如图 3(a)所示,中心波长 798nm,光谱半高宽 77nm.在腔外用间距为 44cm 的棱镜对补偿输出出色散.脉冲两次经过棱镜对,用半导体二极管相关器测得相关曲线如图 3(b)所示,由图可得脉冲宽度 16fs.

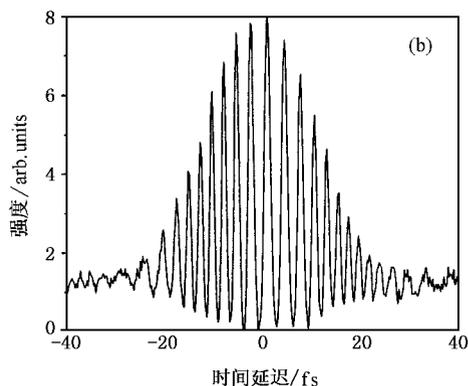


图 3 (a)激光器克尔透镜锁模状态下输出光谱图(b)对应的相关曲线

在激光器运转在克尔透镜锁模的基础上调整钛宝石晶体以及腔镜 M_2 的位置,同时调节棱镜对的插入量,可以在啁啾镜的一臂得到稳定的连续光谱输出,如图 4 所示.由图 4 可知,激光器输出光谱超过一个倍频程,短波延伸至 460nm,长波方向延伸至

1000nm.用快速响应二极管探测输出光脉冲可知激光器运转在自调 Q 自锁模状态,这与文献[5]的结果一致.但不同的是文献[5]的脉冲重复频率为 200kHz,而本文的为 100MHz.为了分析其来源,我们用光栅衍射输出光谱,使不同光谱成分呈空间分布,

用二极管探测不同波长的脉冲分布情况,得到如图 5 所示的脉冲序列,其中(a)波长 800nm 的锁模脉冲序列 (b)600—700nm 可见光谱的脉冲序列.文献 [5] 观测到的连续谱中的脉冲重复频率较低,平均值约为 200kHz,其结论是每个调 Q 周期内只有 1 个脉冲达到了产生超连续光谱的阈值.而本文实验中观测到的是超连续光谱可见光部分的脉冲序列与 800nm 光谱的脉冲序列的重复频率均为 100MHz,这说明调 Q 包络的所有脉冲均达到超连续谱的阈值.

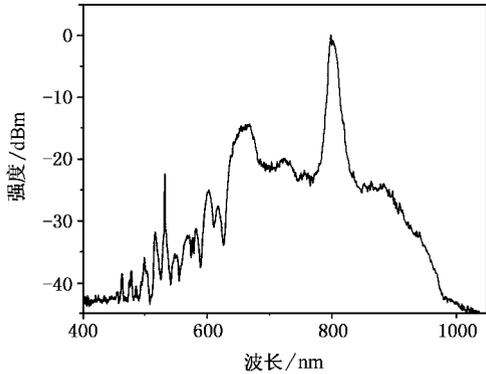


图 4 激光器输出光谱

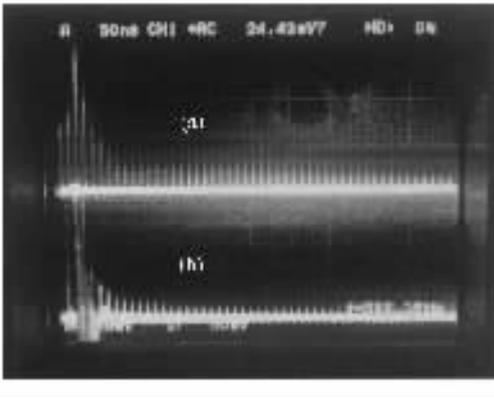


图 5 快速响应二极管探测脉冲光谱不同部分的脉冲序列图.(a)二极管监测波长 800nm 处的脉冲序列 (b) 波长 650nm 处脉冲序列

为了初步研究超连续光谱产生的机理,我们在

第二个棱镜 P_2 和端镜 M_5 之间放置一个刀口,当刀口把 800nm 以上波长的光谱切掉,此时轻推第二个棱镜,激光器只能稳定得运转在克尔透镜锁模状态,自调 Q 自锁模状态消失,此时输出光谱如图 6 所示,波长范围 675—830nm,与图 4 的实验结果相比较,可知超连续光谱 800nm 以上光谱的消失伴随着 460—670nm 波长范围可见光的消失,由此可见 460—670nm 波长范围可见光的产生与长波 800nm 以上的近红外光有着直接的关系,至于其具体关系还有待进一步研究.

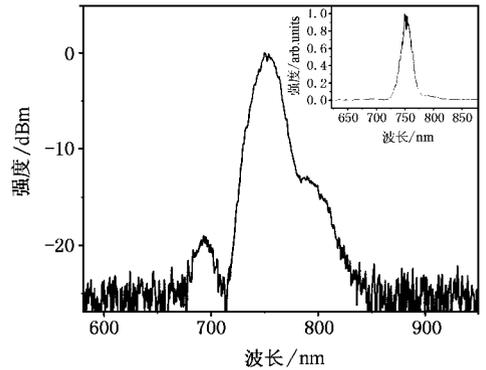


图 6 切掉腔内 800nm 波长以上光谱成分后,激光器克尔透镜锁模输出光谱(纵坐标单位 dBm) 右上角为线性坐标下光谱图

4. 结 论

我们直接从飞秒钛宝石激光器腔内得到了超连续光谱,其光谱范围为 460—1000nm,这是飞秒激光器输出光谱在短波波段第一次突破 500nm.从实验现象可以初步认定,超连续谱的短波波段并不是直接由自相位调制效应造成的,而是由与长波波段相关联的某些物理机理(如四波混频等)造成的,该机理尚需进一步研究.这个实验研究为获得简单低价的超连续光谱源提供了新方向;使得脉冲的载波包络偏移频率 f_{CEO} 的测量装置得到了大大的简化,同时也提高了光频测量的稳定性.

[1] Reichert J et al 1999 *Opt. Comm.* **172** 59

[2] Jones D J et al 2000 *Science* **288** 635

[3] Li S G et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2811 (in Chinese) [李曙光等 2003 物理学报 **52** 2811]

[4] Corwin K L et al 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 113904

[5] Likforman J P et al 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 2257

[6] Ell R et al 2001 *Opt. Lett.* **26** 373

[7] Bartels A et al 2002 *Opt. Lett.* **27** 1839

[8] Ramond T M et al 2002 *Opt. Lett.* **27** 1842

[9] Fortier T M et al 2003 *Opt. Lett.* **28** 2198

[10] Sun J H *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1272 (in Chinese) [孙敬

华等 2002 物理学报 **51** 1272]

Octave-spanning spectrum generation in Ti : sapphire oscillator^{*}

Wang Zhuan Wang Qing-Yue Han Ying-Kui Cao Shi-Ying Zhang Zhi-Gang Chai Lu

(*Key Laboratory of Optoelectronic Information Technical Science , Ministry of Education , China ;*

Ultrafast Laser Laboratory , College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Tianjin University , Tianjin 300072 , China)

(Received 17 January 2004 ; revised manuscript received 19 February 2004)

Abstract

A Ti : sapphire oscillator emitting an octave-spanning spectrum that ranges from 460nm to 1000nm is demonstrated. To our knowledge , it is the first time that a supercontinuum extending beyond 500nm in the blue end is generated from a femtosecond oscillator. The self-Q-switched and self-modelocked Ti : sapphire oscillator uses chirped mirrors and a prism pair for dispersion compensation. These results will make the measurement of carrier-envelope offset frequency simpler and improve the stability of optical frequency metrology at the same time.

Keywords : supercontinuum , chirped mirror , self-Q-switching and self-modelocking , Ti : sapphire oscillator

PACC : 4265J , 4280W

^{*} Project supported by the National Key Basic Research Special Foundation of China (Grant No. G1999075201).