

飞秒与皮秒激光脉冲的主动同步及和频产生 宽带超短激光的研究*

王 鹏 赵 环 王兆华 李德华 魏志义†

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

(2005 年 12 月 21 日收到 2006 年 4 月 21 日收到修改稿)

利用主动同步方式实现了飞秒钛宝石激光器与皮秒 Nd:YVO₄ 激光器的同步, 得到了时间抖动低于 1 ps 的同步精度. 在此基础上进行了两束激光的和频实验研究, 产生了波长为 460 nm 的宽带蓝光飞秒脉冲激光. 这一技术不仅代表了实现不同波长、不同脉冲宽度激光同步的一般方法, 而且也证明了通过和频、差频两束不同激光产生新波长超短脉冲激光的一种全新技术方案.

关键词: 主动同步, 超短脉冲, 和频, 差频

PACC: 4260, 4265F

1. 引 言

扩展超短激光(皮秒或飞秒激光)的波段是超短脉冲激光研究的重要内容之一. 由于常用的飞秒、皮秒激光器所能产生的激光波长仅限制在为数不多的几个固定波长, 远不能满足无处不在的超短脉冲激光的应用需求, 因此人们往往采用光学参量振荡(OPO)和光学参量放大(OPA)等技术以扩展其波长范围. 虽然 OPO, OPA 技术在最近 10 年的时间里取得了长足的发展, 但在技术成本、稳定可靠性等方面并不具备优势^[1]. 尽管直接倍频法可以获得可靠性与超短脉冲激光源类似的二次谐波^[2], 但这样产生的超短脉冲激光波长受基波光源的限制, 所能得到的波长也是极其有限的. 近年来, 不同波长的超短脉冲激光高精度同步技术的出现和发展^[3-5], 为我们通过和频及差频技术得到新波长的超短脉冲激光提供了一种新的可行方案. 2002 年, 魏志义等^[6]在被动同步飞秒钛宝石激光和掺铬镁橄榄石激光的基础上, 通过相关测量中的和频过程, 得到了 500 nm 波长的飞秒脉冲激光. 实际上, 除了和频及倍频过程可产生比同步的两基波波长更短的新波长外, 差频两同步激光还能得到波长更长的新波长超短脉冲激光, 甚至太赫兹辐射. 这样通过组合同步不同的激

光, 有可能使我们得到转换效率、可靠性能、技术成本甚至覆盖波长都优于 OPO, OPA 的超短激光新技术.

超短脉冲激光的同步可分为被动同步与主动同步两种技术. 被动同步通常是通过一块强克尔效应晶体腔内耦合两锁模激光脉冲实现, 它的优点是同步精度高, 但光路复杂, 不易于调节, 且两台激光器在空间上不能独立. 主动同步则是利用电子锁相环(PLL)反馈控制激光器的重复频率实现同步, 它虽能克服被动同步的那些不利因素, 但同步精度却相对较低. 最近随着飞秒激光载波包络相位及频率梳研究的发展, 主动同步激光的同步精度已达到了与被动同步相近的结果^[7], 这为高精度同步任意波长、任意脉冲宽度的超短脉冲激光提供了可行的技术途径.

本文中, 我们在利用被动同步方式高精度同步两台飞秒钛宝石激光器的基础上^[8], 采用一台全固态皮秒 Nd:YVO₄ 激光器和一台自建的飞秒钛宝石激光器, 开展了不同脉冲宽度、不同波长的超短脉冲激光的高精度同步研究. 并以此为基础, 通过和频上述两束同步激光, 实现了波长为 460 nm 的宽带超短脉冲激光输出. 这一技术不仅代表了实现不同波长、不同脉冲宽度的激光同步的一般方法, 而且也证明了通过和频、差频两种不同激光产生新波长超短脉冲激光的一种全新技术方案.

* 国家自然科学基金(批准号: 60225005, 60490280, 60321003)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: wzhy@aphy.iphy.ac.cn

2. 实验装置

图 1 是我们采用的实验装置框图,其中皮秒激光器为奥地利 High-Q 公司生产的半导体饱和吸收反射镜作锁模启动元件的被动锁模 Nd:YVO₄ 激光器,其输出的锁模激光脉冲的中心波长为 1064 nm,脉冲的半高宽(FWHM)为 6.83 ps,重复频率为 68 MHz.实验中该皮秒激光器保持自由运行,腔长及重复频率不受控制.所用的飞秒激光器为我们自建的三棱镜对补偿腔内色散的钛宝石激光振荡器,中心波长为 810 nm,脉冲宽度小于 50 fs,腔长预设到 2.2 m,以保持与皮秒激光相近的重复频率.为了实时锁定飞秒激光的重复频率,激光器的一全反端镜固定在一压电促动器(PZT)上,PZT的另一端固定在镜架上.这样通过反馈驱动 PZT 即可实现激光器的腔长控制,亦即重复频率的锁定.为了借助 PZT 实现激光器腔长的高精度锁定,我们采用的全反端镜的直径仅 8 mm、厚度仅 2 mm.固定 PZT 的镜架安装在一电动平移台上,利用计算机控制电动平移台的位移可微调飞秒激光器的腔长.从两台激光器输出的激光经一定的光程后通过各自的凸透镜聚焦到 BBO 晶体中,其中飞秒激光的光程可以进行一定范围的调节.两个相同的高速光电探测器分别接收两台激光器输出的脉冲激光,并将它们转化为高速电脉冲序列,然后同时输入到两套不同的 PLL 中,它们都输出反馈电压信号,其中之一加载到 PZT 上,用来锁定飞秒振荡器的腔长.

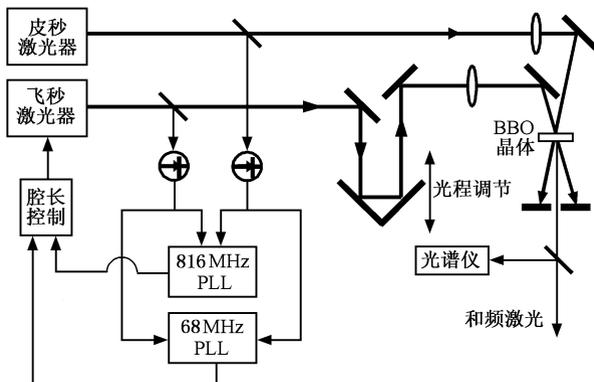


图 1 实验装置框图

3. 主动同步

为了使从两台独立激光器输出的激光脉冲保持

高精度的同步,实验中我们使用了两套不同的 PLL 电路,如图 1 所示,其重复频率分别为 68 和 816 MHz.它们同时对比两台激光器的脉冲重复频率,都会产生驱动 PZT 的电压信号,但同一时间只会有一种信号加载在 PZT 上,用于同步两台激光器的输出激光脉冲.这两套 PLL 所实现的同步精度有很大的差别,在该实验中起着不同的作用.

图 2 是 68 MHz PLL 的基本原理框图,从两个光电探测器接收到的皮秒和飞秒激光的电脉冲序列,分别经过两个相同的带通放大器,只放大其中的 68 MHz 基频信号,放大后的信号都经过 256 次分频转变为 265.6 kHz 的低频方波信号,其中来自皮秒激光的那一路信号经过一个可调延时器,输出信号与来自飞秒激光的信号同时输入到数字鉴相器中,从它输出的误差信号经过二阶滤波电路后积分放大,最后加载到飞秒振荡器的 PZT 上.可以看出,鉴相器对比的只是脉冲重复频率分频 256 后的频率信号,所以它的输出信号所包含的两台激光器的脉冲重复频率的误差信息相对较少.因此用该 PLL 控制激光器的同步,精度较低,激光脉冲之间的相对时间抖动约上百皮秒,这样的同步精度并不能用来进行两束脉冲激光的和频实验.但该 PLL 有一个优点,就是当用它驱动 PZT 实现两台激光器的同步后,调节环路中的可调延时器,可以改变飞秒和皮秒激光脉冲的相对时间位置,调节范围可达几十纳秒.而且每当利用该 PLL 启动同步后,两种激光脉冲之间的相对时间位置基本上是固定的.这对于和频实验是非常有利的,因为实验过程中需要调节两束激光脉冲的相对时间位置.

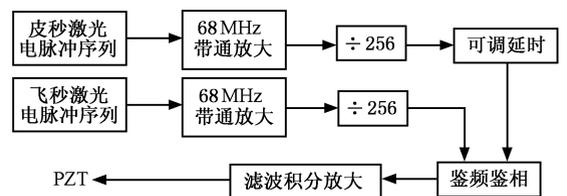


图 2 68 MHz PLL 原理框图

图 3 是 816 MHz PLL 的基本原理框图.高速光电探测器接收的皮秒激光的电脉冲序列,经过一带通滤波器,将其第 12 次谐波($12 \times 68 \text{ MHz} = 816 \text{ MHz}$)信号提取出来,输入到混频器的射频端.同时 816 MHz 标准频率信号输入到该混频器的本振端,从中频端输出 300 kHz 左右的低频信号,该信号经过带通放大后作为参考信号输入数字鉴相器.另一

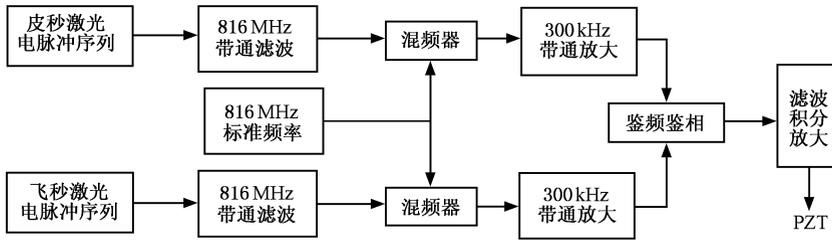


图 3 816 MHz PLL 原理框图

高速光电探测器接收的飞秒激光的电脉冲序列经过同样的信号处理过程后也输入到鉴相器中,鉴相器输出的误差信号再经过二阶滤波电路后积分放大,最后加载到 PZT 上.可以看出,该 PLL 中的鉴相器对比的是激光脉冲重复频率的第 12 次谐波频率信号,所以它的输出信号中包含有更多的重复频率误差信息,因而用它驱动 PZT 锁定飞秒振荡器的腔长后,两台激光器输出的激光脉冲之间的同步精度提高了很多^[9],相对时间抖动已远低于 1 ps.因为皮秒激光的脉冲宽度为 6.83 ps,所以这个同步精度足可以保证两束脉冲激光和频实验的顺利进行.不过,该 PLL 虽然具有较高的同步精度,但是它却存在一个缺点,就是每次利用它驱动 PZT 起动两台激光器的同步后,两台激光器输出激光脉冲之间的相对时间位置是不确定的,这样必然会给和频的调节带来一定的困难.

两套 PLL 各有优缺点,在实验中应该结合使用.我们发现,如果先用 68 MHz PLL 驱动 PZT,在同步启动后,迅速切换 PZT 的驱动信号到 816 MHz PLL 上,同步再次启动后,两束激光脉冲的相对时间位置在 PZT 上的驱动电压切换前后几乎不会发生改变(用采样频率为 5 GHz 的示波器观测不到变化).因此在进行和频实验时,就可以先用 68 MHz PLL 来确定两束激光脉冲之间的相对时间位置,再用 816 MHz PLL 来维持脉冲之间的高精度同步.

4. 和频产生

由于两束激光脉冲的波长不同,用一块凸透镜会有不同的焦点位置,因此需用两块凸透镜对光束分别聚焦,微调光线方向以及凸透镜位置,确定两束激光的焦点都出现在 BBO 晶体中,并且重合在一起.用一光电探测器同时接收两束脉冲激光来观测它们在 BBO 晶体中时间重合情况.两套 PLL 同时开启,先用 68 MHz PLL 驱动 PZT,同步启动后,示波器

上将会出现如图 4 所示的波形,高低波形序列分别代表两束激光的电脉冲信号,若两脉冲没有重合,则调节该 PLL 中的延时器,直至示波器上两列脉冲的波形重合为止.尔后,迅速切换 PZT 上的驱动电压到 816 MHz PLL 上,同步再次启动后,示波器上的两列脉冲仍会保持重合.最后调节飞秒激光的光程和频激光将会产生.

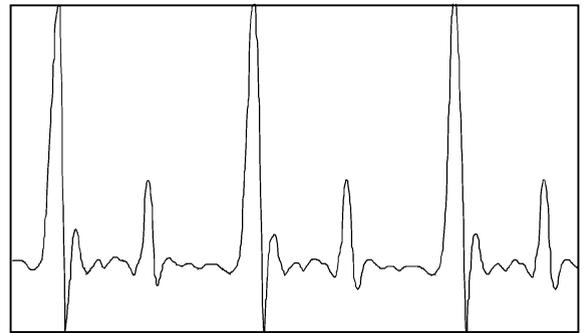


图 4 示波器采集到的同步波形

实验中,我们使用的和频晶体是 2 mm 厚的 BBO 晶体,一类相位匹配,它按照 800 nm 激光倍频的相位匹配角 29.2° 切割,而 810 与 1064 nm 激光在 BBO 晶体中和频时,一类相位匹配角为 25.4° .因此和频实验时,BBO 晶体应旋转 3.8° ,但因晶体相对较厚和频光对此角度差并不十分敏感,实验中也证实了这一点.飞秒和皮秒激光均以 o 光入射,和频激光以 e 光射出,图 5 是我们拍摄的激光光斑照片.图 5(a) 是直接从 BBO 晶体中出射的三束激光的光斑:中间是 460 nm 和频激光,两侧分别是 810 nm 飞秒激光和 1064 nm 皮秒激光的基频和倍频光(基频光和倍频光重叠在一起,未分开).将这三束激光经过高色散三棱镜折射后,将会得到图 5(b) 所示的 5 个光斑,从左到右对应的激光波长(中心波长)分别是:1064, 810, 532, 460 和 405 nm,可以看出和频激光比 532 和 405 nm 等倍频激光都强得多.



图 5 激光光斑图片 (a)从 BBO 晶体出射的光斑 (b)经高色散三棱镜折射后的光斑

飞秒激光的光谱宽度(FWHM)约为 22 nm,而皮秒激光的光谱却不足 0.5 nm,两者的和频可以看作是宽带激光与点频激光的非线性作用^[10],结果是使得飞秒激光脉冲的所有频率成分均上升一个常数值 $\Omega = 2\pi c/\lambda_p$ (其中 c 为光速, λ_p 是皮秒激光的中心波长),假定飞秒激光脉冲的光谱函数是 $E_f(\omega)$ (其中 ω 为角频率),则和频激光的光谱函数应为 $E_s(\omega) = E_f(\omega - \Omega)$.图 6 是飞秒激光的光谱强度曲线.利用此数据,根据上述推断的和频激光的光谱函数,通过计算可得到图 7 中的虚线图形,这是我们通过假设计算得到的和频激光的光谱强度曲线,它的 FWHM 为 7.1 nm.图 7 中的实线是我们利用光谱仪实际测量到的强度曲线,可见和频激光的光谱宽度为 5.5 nm,比理论值窄 1.6 nm.一个可能的原因是我们理论计算的结果并非完全准确,另一个更可能的原因是 2 mm 厚的 BBO 晶体的匹配带宽限制了和频激光的光谱宽度^[11],不过这个谱宽基本上是可以接受的,而且从图 7 可以看出,和频激光的光谱强度

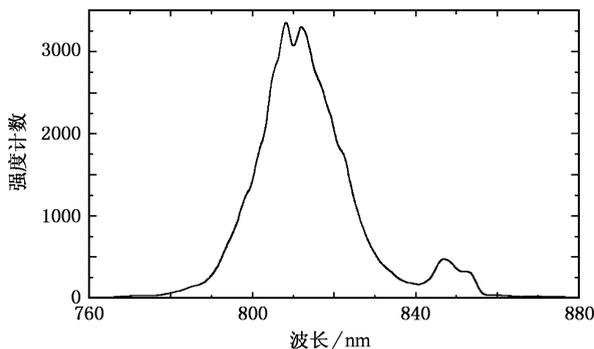


图 6 飞秒激光的光谱强度曲线

相对于 810 nm 飞秒激光的光谱更为光滑.

实验过程中,我们用计算机时刻监视着两台激光器的相对腔长变化,通过精确控制电动平移台的

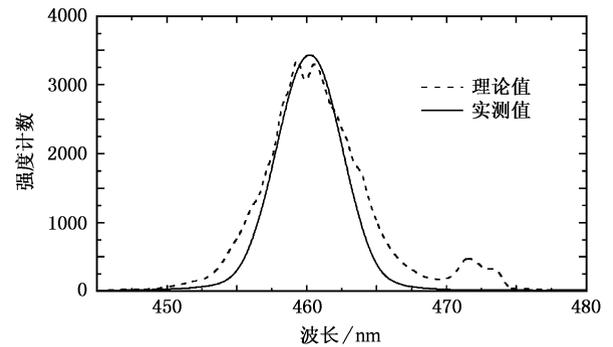


图 7 和频激光的光谱强度曲线

位移随时补偿因外界环境变化等因素造成的激光器腔长的改变,所以同步一旦启动,两台激光器将会一直保持着同步,也就是始终会有稳定的和频激光输出.因此,本系统也可以为其他实验提供一稳定的短波长飞秒激光源.

5. 结 论

我们利用电子 PLL 实现了飞秒激光器与皮秒激光器的主动同步.在输出激光脉冲的时间抖动低于 1 ps 的基础上,进行了两束脉冲激光的和频,得到了 5.5 nm 的宽带蓝光飞秒激光.本工作进一步证明了用两个或者多个独立的宽带激光器通过和频方式产生短波长超短脉冲激光的可行性.

- [1] Cerullo G, De Silvestri S 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 1
 [2] Cheville R A, Reiten M T, Halas N J 1992 *Opt. Lett.* **17** 1343
 [3] Wei Z Y, Kobayashi Y, Zhang Z G et al 2001 *Opt. Lett.* **26** 1806
 [4] Wei Z, Kobayashi Y, Torizuka K 2002 *Appl. Phys. B* **74** S171
 [5] Tian J R, Wei Z Y, Wang P et al 2005 *Opt. Lett.* **30** 2161

- [6] Wei Z, Kobayashi Y, Torizuka K 2002 *Opt. Lett.* **27** 2121
 [7] Shelton R K, Foreman S, Ma L S et al 2002 *Opt. Lett.* **27** 312
 [8] Tian J R, Wei Z Y, Wang P et al 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 129
 (in Chinese)[田金荣、魏志义、王 鹏等 2005 物理学报 **54** 129]

- [9] Ma L S , Shelton R K , Kapteyn H C *et al* 2001 *Phys. Rev. A* **64** 3004]
R021802
- [10] Wang P , Wang Z H , Wei Z Y *et al* 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3004
(in Chinese)[王 鹏、王兆华、魏志义等 2004 物理学报 **53**
- [11] Wang Z H , Wei Z Y , Teng H *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 362
(in Chinese)[王兆华、魏志义、滕 浩等 2003 物理学报 **52**

Active synchronization of two independent femtosecond and picosecond lasers and sum frequency generation of two laser pulses^{*}

Wang Peng Zhao Huan Wang Zhao-Hua Li De-Hua Wei Zhi-Yi[†]

(*Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*)

(Received 21 December 2005 ; revised manuscript received 21 April 2006)

Abstract

The scheme for synchronizing Ti :sapphire femtosecond laser and Nd :YVO₄ picosecond laser is described. Sub-ps jitter is obtained , based on which broad-band femtosecond blue-light laser of 460 nm is generated through mixing two laser pulses in the BBO crystal. The technique not only shows a general way of synchronizing lasers of completely different wavelength and pulse width , but also demonstrates a new scheme for generating ultra-short laser with new wavelength through nonlinear frequency mixing .

Keywords : active synchronization , ultra-short pulse , sum-frequency , difference-frequency

PACC : 4260 , 4265F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60225005 , 60490280 , 60321003).

[†] Corresponding author. E-mail : wzhy@aphy.iphy.ac.cn