

# 两台独立飞秒钛宝石振荡器的高精度 主动同步研究<sup>\*</sup>

赵 环 赵研英 田金荣 王 鹏 朱江峰 令维军 魏志义<sup>†</sup>

(中国科学院物理研究所 北京凝聚态物理国家实验室 北京 100080)

(2007 年 4 月 27 日收到 2007 年 5 月 24 日收到修改稿)

对两台独立钛宝石飞秒振荡器的高精度主动同步进行了研究. 实验中共采用三套锁相环对它们输出的激光脉冲进行了主动同步控制, 最终得到了时间抖动低于 30 fs 的同步精度; 由于通过计算机智能监控两台振荡器的相对腔长变动, 使得高精度同步维持的时间高达 40 min.

关键词: 飞秒激光, 主动同步, 锁相环, 时间抖动

PACC: 4260

## 1. 引 言

飞秒激光在物理、化学、生物、信息以及先进制造业等领域都具有重要的应用价值. 由于具有极短的时间特性, 它能够把物质内部原子、分子的瞬间行为“记录”下来, 所以它不仅是人们在“时间”范畴取得新发展、建立新理论的重要手段, 也是人们在“空间”范畴对物质开展原子、分子层次上精密、准确加工的重要工具. 但对于更广泛意义上的前沿应用研究来说, 单一飞秒激光的作用是很有局限性的. 比如一个典型的超快抽运探测实验<sup>[1]</sup>, 就需要两束同步的超短激光脉冲来完成, 其中一束(抽运光)用来抽运激发研究对象, 另一束(探测光)用来探测该研究对象被激发后所表现出的瞬间行为. 一般情况下, 对这两束同步飞秒激光脉冲所要求的特性是不同的, 但由于实际应用过程中可能不具备理想的同步飞秒激光源, 人们往往会采用将单束飞秒激光分成两束的替代方案, 其中一束作为抽运光, 另一束作为探测光. 尽管这样得到的两束激光脉冲是同步的, 功率可能也不一样, 但其中心波长、脉宽等关键参数却是相同的, 因此实验得到的物理现象反映的仅是物质的局部规律, 而不能揭示其全部本质规律, 因此可以看

出, 不同特性的同步飞秒激光是极具重要研究价值的. 目前, 同步飞秒激光已在很多方面广泛应用, 例如对分子、原子的相干控制<sup>[2]</sup>, 就需要两束或多束同步飞秒激光的共同作用; 在大气环境测量、光电对抗及激光制导等重要国防应用中所需的中红外、远红外乃至太赫兹波段的飞秒电磁辐射, 其中一个可行的方案就是采用两束波长不同的同步飞秒激光进行差频; 在量子密码通信中, 所需的纠缠光子对也可以由同步激光器产生获得; 将两束飞秒激光脉冲实现同步, 然后再对它们的相位进行锁定, 即可以实现激光的相干合成<sup>[3]</sup>. 由此可见, 同步飞秒激光具有极其广泛和重要的应用价值.

同步飞秒激光一般是由同步的飞秒振荡器产生并输出的, 振荡器的同步技术可分为被动同步<sup>[4]</sup>和主动同步<sup>[5]</sup>方式, 两者各有优缺点, 其中主动同步技术为本文的主要研究内容. 本文对两台独立钛宝石飞秒振荡器的高精度主动同步技术进行了研究, 首先采用 DBM(double-balanced mixer)鉴相的两套锁相环(phase locked loop, PLL)实现两台振荡器的同步锁定, 尔后将它们和频激光的光电信号反馈回进行主动同步控制的宽带 PLL, 从而极大的提高了两束飞秒脉冲激光之间的同步精度.

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60490280, 60225005, 60621063)和中国科学院知识创新工程重要方向项目资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: zywei@aphy.iphy.ac.cn

## 2. 采用 DBM 鉴相的两套 PLL 来实现两台振荡器的同步锁定

用于主动同步实验的飞秒激光器“TWIN I”和“TWIN II”均是由三棱镜对补偿腔内色散的钛宝石振荡器,其输出中心波长约为 800 nm,脉宽为 150 fs 左右,脉冲重复频率为 80 MHz. 两台振荡器内均装有压电致动器(PZT),它的一个端面与微调架连接,另一端面粘结振荡器的端镜,用以高精度锁定两台振荡器的腔长. 其中振荡器“TWIN I”内装载的是美国 Thorlabs 公司生产的型号为 AE0505D08 系列 PZT(这里简称 TL PZT),它的最大位移量约为  $6 \mu\text{m}$ (加载 100 V 电压时),响应频率大于 10 kHz;振荡器“TWIN II”内装载的是德国 PI 公司生产的 PL055.21 系列 PZT(简称 PI PZT),其最大位移量约为  $2 \mu\text{m}$ (加载 100 V 电压时),响应频率大于 100 kHz. 两个 PZT 分别属于两套不同的 PLL,受控于不同的驱动电压,在两台激光器的主动同步过程中分别起着不同的作用.

进行主动同步控制的 PLL 中的反馈误差信号一般是由鉴相器 DBM 产生的,这类 PLL 的基本原理<sup>[6]</sup>是将振荡器的脉冲重复频率信息(即腔长信息)由光电探测器接收并转化为相应的电脉冲信号后输入到 DBM 中去,由其产生的误差信号经滤波、积分和放大后再加载到 PZT 上去,从而锁定两台振荡器的腔长,以同步它们的激光脉冲输出. 输入 DBM 中进行鉴相的信号既可以是基本的脉冲重复频率信号,也可以是锁模脉冲序列的高次谐波频率信号,而且谐波信号的次数越高,输入到 DBM 中信号的幅度到相位的转化噪声越低,经 DBM 输出的误差信号对

两束激光脉冲的时间误差灵敏度也就越高,这样从理论上讲,两台振荡器实现同步锁定后,它们输出的激光脉冲的同步精度也就越高<sup>[7]</sup>. 图 1 是我们用于飞秒振荡器“TWIN I”和“TWIN II”主动同步的其中一个宽带 PLL 的原理图,其中 PIN 为高速光电探测器,它由美国 Thorlabs 公司生产,型号为 D400FC,上升沿为 100 ps,带宽为 1 GHz;BPF 为成都金天之公司生产的带通滤波器,中心频率为 800 MHz,带宽为 80 MHz;OPA 为美国 Mini-Circuits 公司生产的 DC-1 GHz 宽带放大器;LF 表示环路滤波器;OPA227 为高精度、低噪声运算放大器芯片;PA45 为高压、大电流功率运算放大器芯片. 可以看出,该 PLL 是提取了激光锁模脉冲序列的十次谐波频率信号(即 800 MHz 频率信号)经 DBM 进行了鉴频鉴相,由其输出的误差信号经处理后最终加载到了“TWIN II”中的 PI PZT 上,驱动其高速运行. 该 PLL 的环路增益带宽大于 20 kHz,PZT 的最大振动频率超过 50 kHz,因此属于快速 PLL,它的作用是以极快的响应和伺服速度来迅速补偿两台振荡器的腔长变动,以高精度同步它们的飞秒脉冲输出.

图 1 所示宽带 PLL 中的 PI PZT 虽响应速度快,但其最大位移量却不足  $0.7 \mu\text{m}$ (该环路中它被加载的最大电压约为 30 V),这个位移量在短期内(低于 1 s 时间量级)或许能够补偿两台振荡器的相对腔长变动,但是时间一长,由于外界环境变化、机械形变等因素造成的相对腔长变化量极有可能大于该 PZT 的最大位移量. 因此仅通过图 1 所示的宽带 PLL 我们只能在短时间内保证两台振荡器的稳定同步,欲达到长期稳定同步的目的,振荡器腔内还必须存在一个位移量更大的 PZT,它能够在更大的位移范围内来随时补偿两台振荡器的相对腔长变动. 图 2 是

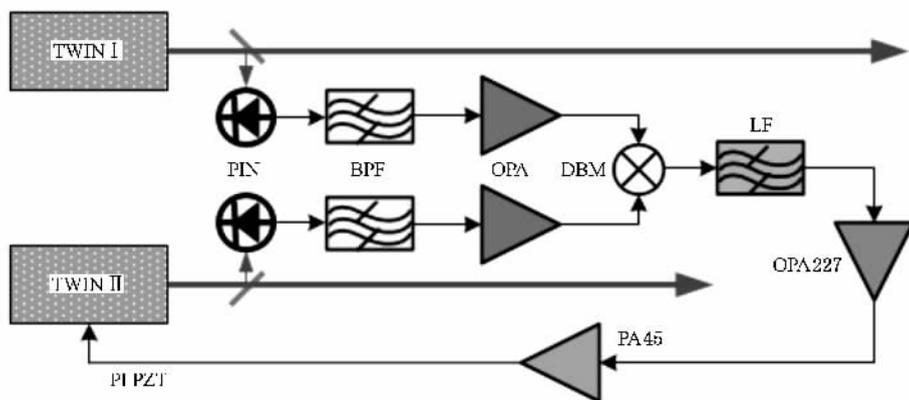


图 1 用于振荡器“TWIN I”和“TWIN II”主动同步的宽带 PLL 的原理图

我们用于主动同步的另一窄带 PLL 的原理图,它所驱动的是振荡器“TWIN I”中的 TL PZT,该 PZT 在环路中被驱动的最大位移量约为  $2 \mu\text{m}$ ,足可以在较长的时间范围内(一般大于  $10 \text{ min}$ )补偿两台振荡器的相对腔长变动.如图所示,该 PLL 的误差信号来自于图 1 所示的宽带 PLL 中环路滤波器的输出经 OPA227 放大后的信号(即输入到功率放大器 PA45 的信号),该信号首先与另一恒定电压信号在减法器(由运放芯片 AD711 构建而成)中相减( $U_{\text{out}} = U_{\text{in}} - U_{\text{dc}}$ ),差分信号再输入环路滤波器,它的输出信号经精密运算放大器 MAX400 放大后最终驱动 TL PZT 运行.其中环路滤波器的增益带宽为  $30 \text{ Hz}$  左右,严

格控制环路带宽和增益幅度,即可实现该 PLL 和宽带 PLL 的共同运行.但就该 PLL 本身而言,它运行的目的是使得  $U_{\text{out}}$  趋为零,也就是使得  $U_{\text{in}}$  维持在恒定电压值  $U_{\text{dc}}$  附近变动.实验中, $U_{\text{dc}}$  的设定值为  $7.5 \text{ V}$  左右,这样两套 PLL 都实现正常运行后,宽带 PLL 中的 PI PZT 就会维持在  $15 \text{ V}$  电压值(图 1 中的 PA45 具有两倍电压放大功能,此电压值为环路中 PI PZT 最大驱动电压的一半)附近振动,欲达到此功能,窄带 PLL 就必须驱动 TL PZT 动态的稳定两台振荡器的相对腔长,以保证它们之间的腔长之差被控制在 PI PZT 的最大位移范围之内,从而使得图 1 中的宽带 PLL 保持长期稳定运行.

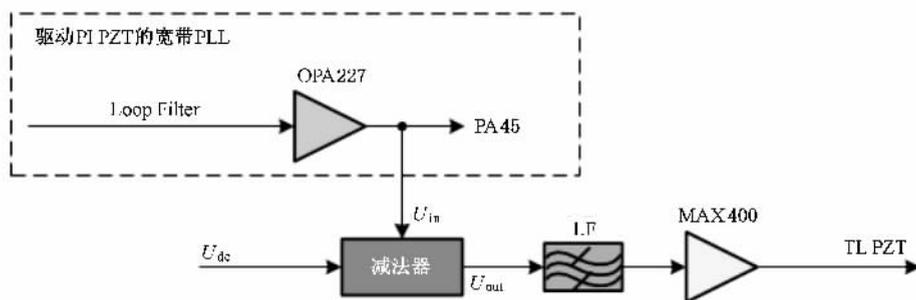


图 2 用于振荡器“TWIN I”和“TWIN II”主动同步的窄带 PLL 的原理图

图 1 和图 2 所示的两套 PLL 必须同时运行<sup>[8]</sup>,当它们都实现正常运转后,两台振荡器便实现了相对稳定的同步飞秒脉冲输出,但同步脉冲之间的时间抖动(timing jitter)约有几百飞秒,这相对于两束激光的脉宽来说显然是过大了,因此同步精度还有待进一步提高.

### 3. 利用和频光信号作反馈来提高两台振荡器的同步精度

上面两台振荡器的同步主要是利用图 1 中的宽带 PLL 实现的,其中两束激光脉冲的时间误差信息是由鉴相器 DBM 来间接获得的. DBM 的输入是电信号,它对输入信号的最小时间分辨也就在皮秒量级,这对于分辨飞秒脉冲的时间误差是不够的,因此我们不得不尽可能的提高进入 DBM 的激光锁模脉冲信号的谐波次数,以使得 DBM 对于激光脉冲具有更高的时间误差分辨率,这是提高同步精度的常用方法之一.另一方面,假如两台振荡器已经实现同步后(同步精度不一定很高),我们可以把它们输出的激光脉冲通过非线性晶体(如 BBO 或 LBO 晶体)进

行和频,将其输出的和频激光经一窄带光电探测器(带宽小于  $1 \text{ MHz}$ )接收并转化为电信号,这样该信号对于两束激光脉冲将会具有极高的时间误差分辨率(如果两束激光的脉冲宽度均为百飞秒左右量级,那么最小可分辨时间误差将能达到飞秒量级),若设法将该信号反馈回原先进行主动同步控制的 PLL,即可明显提高主动同步的精度<sup>[9]</sup>.

图 3 是我们利用和频光信号作反馈的窄带 PLL 原理图,如图所示,和频激光(SFG laser)先由光电探测器(这里使用的是 S5973,它的输出阻抗设置为  $1 \text{ M}\Omega$ )部分接收,输出的光电信号在减法器中与另一直流电压信号相减( $U_{\text{out}} = U_{\text{in}} - U_{\text{dc}}$ ),再经精密运放 AD711 放大(约放大 5 倍)后输入环路滤波器(LF),它输出的电压信号经过可调电位器分压后输入图 1 所示的宽带 PLL 中,该信号和 DBM 输出的误差信号一起进入其中的环路滤波器,由它最终产生 PI PZT 的控制信号.与图 2 中的 PLL 一样,图 3 中的电路也属于窄带 PLL(它的带宽小于  $100 \text{ Hz}$ ),图 1 中的宽带 PLL 可以看作是主环,而两个窄带 PLL 则可认为是它的附属从环,只不过这两个从环的作用不同.图 3 中的 PLL 主要是为了补偿宽带 PLL 中

DBM 所输出的激光脉冲时间误差信息的不足,它运行的结果是使得  $U_{out}$  趋为零,也就是使得和频激光的光电信号维持在预设的固定电压值  $U_{dc}$  (实验中它的取值一般设置在 20—100 mV 之间)附近.与图 1 和图 2 中的两套 PLL 不同的是,该 PLL 的输出并不是直接控制振荡器中的 PZT,而是输入到宽带 PLL 的环路滤波器中.该 PLL 与图 1 中的环路滤波器的连接方式如图 4 所示,从图中可以看出,该环路滤波器属于二阶有源滤波器,如果无需和频光信号作反馈,那么正常情况下,运放芯片 OPA227 的“+”输入端应该是接地的.不过如果在该端口加载一定量电压(电压值一般要小于 50 mV),那么当宽带 PLL 实现正常运转后,我们即可以利用输入此端口的电压信号来控制两束激光脉冲的相对延时,当电压值改变时,延时也会随之发生变化,两者之间的变化关系基本上是线性的.正是基于此原理,我们把和频光反馈 PLL 的输出信号加载在此端口上,该 PLL 通过调节端口处的电压来控制两束激光脉冲的相对延时,从而使得和频激光的强度维持在一个固定的强度值附近,这样也就间接提高了两束激光脉冲之间的同步精度.

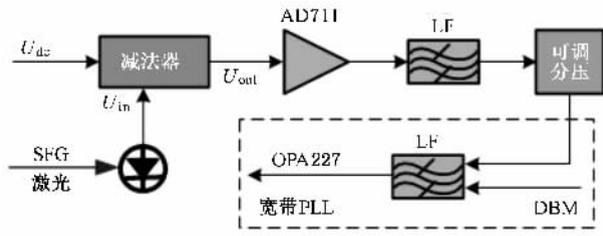


图 3 利用和频光信号作反馈的窄带 PLL 原理图

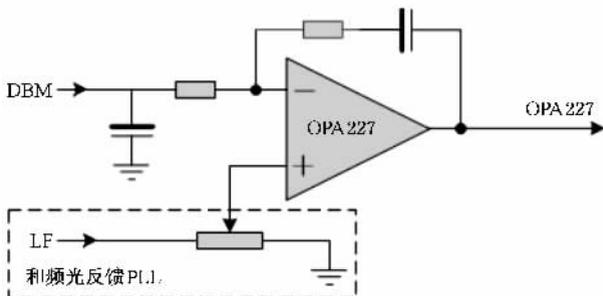


图 4 和频光信号作反馈的窄带 PLL 的输出在图 1 所示的宽带 PLL 的环路滤波器中的连接方式

当图 1、图 2 以及图 3 所示的三套 PLL 都实现正常运转后,两台振荡器的主动同步精度有了明显的提高,它们输出激光脉冲之间的时间抖动从几百飞秒降低到了几十飞秒,由此可见,利用和频光信号作

反馈对于提高主动同步精度是非常行之有效的.

用相关法对两束飞秒脉冲激光的同步精度进行了测量<sup>[10]</sup>,图 5 是其互相关强度曲线,其半高全宽为 215 fs;图 6 则是其互相关信号(即调节两束激光脉冲的延时,使其和频光的强度降低到最大值的一半时的强度信号)的时间稳定性曲线,监测时间为 10 s.利用图 5 和图 6 所提供的数据我们可计算得到两束激光脉冲的 RMS 时间抖动约为 30 fs.实验中用计算机实时监测着两台振荡器的相对腔长变动情况,并通过控制电动平移台的位移来自动补偿因外界环境因素所导致的较大的腔长变动,从而使得两台振荡器之间高精度同步维持的时间长达 40 min 以上,因此,这足以保证与同步飞秒激光相关的物理实验的顺利开展.

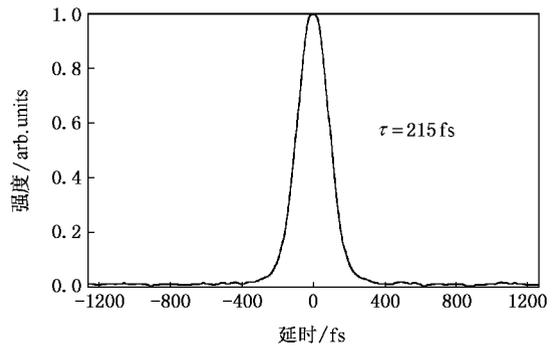


图 5 两束同步飞秒脉冲激光的互相关强度曲线

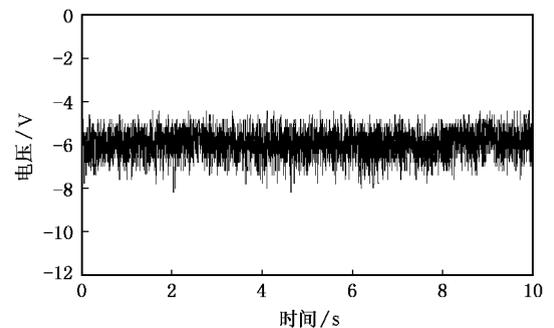


图 6 两束同步飞秒激光的互相关信号的时间稳定性曲线

### 4. 结 论

本文对两台独立的钛宝石飞秒振荡器的主动同步进行了深入的研究,实验中,我们共使用三套 PLL 对两台振荡器所输出的飞秒激光脉冲进行了主动同步控制:首先采用 DBM 鉴相的两套 PLL 对两台振荡器进行了初步同步控制,然后采用和频光反馈的

PLL 进一步提高了两者之间的同步精度,使得两束飞秒激光脉冲间的时间抖动由几百飞秒降至 30 fs 左右.实验中也利用计算机智能监测并控制两台振荡器之间的相对腔长变动,从而使得高精度同步维持的时间高达 40 min.因此,较高的同步精度以及较

长的同步维持时间,这些特点都为该同步飞秒脉冲激光的成功应用提供了有力的保障.

感谢中国科技大学的潘建伟教授、杨涛教授及鲁山博士对本工作给予的协助.

- [ 1 ] Yahng J S ,Ahn Y H ,Sohn J Y ,Kim D S 2001 *J. Opt. Soc. Am. B* **18** 714
- [ 2 ] Judson R S ,Rabitz H 1992 *Phys. Rev. Lett.* **68** 1500
- [ 3 ] Shelton R K ,Ma R S ,Kapteyn H C ,Murnane M M ,Hall J L ,Ye J 2001 *Science* **293** 1286
- [ 4 ] Tian J R ,Wei Z Y ,Wang P ,Han H N ,Zhang J ,Zhao L H ,Wang Z H ,Zhang J ,Yang T ,Pan J W 2005 *Opt. Lett.* **30** 2161
- [ 5 ] Wang P ,Zhao H ,Wang Z H ,Li D H ,Wei Z Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 4161 ( in Chinese ) [ 王 鹏、赵 环、王兆华、李德华、魏志义 2006 物理学报 **55** 4161 ]
- [ 6 ] Yasui T ,Minoshima K ,Matsumoto H 2001 *IEEE J. Quantum Electron.* **37** 12
- [ 7 ] Shelton R K ,Foreman S M ,Ma L S ,Hall J C ,Kapteyn H C ,Murnane M M ,Notcutt M ,Ye J 2002 *Opt. Lett.* **27** 312
- [ 8 ] Jones D J ,Potma E O ,Cheng J X ,Burfeindt B ,Pang Y ,Ye J ,Xie X S 2002 *Rev. Sci. Instrum.* **73** 2843
- [ 9 ] Ma L S ,Shelton R K ,Kapteyn H C ,Murnane M M ,Ye J 2001 *Phys. Rev. A* **64** 021802
- [ 10 ] Wei Z Y ,Kobayashi Y ,Zhang Z G ,Torizuka K 2001 *Opt. Lett.* **26** 1806

## Highly precise active-synchronization between two independent femtosecond Ti : sapphire oscillators \*

Zhao Huan Zhao Yan-Ying Tian Jin-Rong Wang Peng

Zhu Jiang-Feng Ling Wei-Jun Wei Zhi-Yi<sup>†</sup>

( Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics ,Institute of Physics ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing 100080 ,China )

( Received 27 April 2007 ; revised manuscript received 24 May 2007 )

### Abstract

We demonstrate the highly precise active-synchronization between two independent Ti : sapphire femtosecond oscillators. A combination of three phase locked loops , is used to control the synchronization between two laser pulses ,which gives a RMS timing jitter less than 30 fs. With the technique of cavity length monitoring and autocontrol by a computer ,this highly precise synchronization can be retained for more than 40 minutes.

**Keywords :** femtosecond laser , active synchronization , phase locked loop , timing jitter

**PACC :** 4260

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60490280 ,60225005 ,60621063 ) and the Chinese Academy of Sciences for Key Topics in Innovation Engineering.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail :zywei@aphy.iphy.ac.cn