

亚飞秒被动同步掺钛蓝宝石激光器^{*}

田金荣¹⁾ 魏志义^{1)2)†} 王 鹏¹⁾ 赵玲慧¹⁾ 王兆华¹⁾ 张 军¹⁾ 韩海年¹⁾ 张 杰¹⁾

¹⁾ (中国科学院物理研究所光物理重点实验室, 北京 100080)

²⁾ (中国科学院计量测试高技术联合实验室, 北京 100080)

(2004 年 4 月 7 日收到, 2004 年 5 月 19 日收到修改稿)

通过采用一种新的被动同步方案, 使两束独立掺钛蓝宝石激光通过互相位调制实现稳定同步. 同步维持时间超过 24h, 同步精度达到 0.78 fs.

关键词: 互相位调制, 被动同步

PACC: 4260B, 4260H

1. 引 言

以克尔透镜锁模(KLM)技术^[1]为基础的掺钛蓝宝石激光推动了飞秒脉冲在基础科学中的应用^[2], 成为研究超快现象的有力工具. 特别是在此基础上发展起来的双波长同步飞秒激光由于在抽运探测, 激光成像, 激光相干合成, 光频标, 相干控制, 量子通讯等方面的重要应用, 成为近来超快激光研究的一个新热点^[3-6]. 20 世纪 90 年代开始, 人们就采用被动同步技术相继获得双波长同步飞秒脉冲^[7-9]. 这类被动同步使同一谐振腔中的两束激光在增益晶体内耦合获得同步, 结构简单. 但是由于两束激光共享增益介质和振荡腔, 锁模及同步调节互相干扰, 反而使光学调节变得复杂. 同时增益共享导致的增益竞争效应不仅限制了能量的提高, 同时严重影响锁模及同步稳定, 其输出脉冲的波长不能独立调谐, 可调谐带宽比较窄. 这些缺陷使传统被动同步技术仅局限于实验室研究, 达不到实际应用中稳定可靠和高功率的要求.

2001 年提出的新被动同步方案实现了 Ti:sapphire 和 Cr:forsterite 的稳定同步输出^[10,11]. 本文在此方案基础上提出新的双波长同步飞秒激光设计. 根据设计建成一台双波长飞秒掺钛蓝宝石激光器, 其各项技术指标完全可以达到实用要求. 互相测量结果显示, 该系统同步精度达到 0.78 fs.

2. 被动同步的物理机理

传统的被动同步由于共享增益, 一般由速率方程理论^[12,13]进行模拟. 更多研究表明飞秒脉冲在非线性晶体内的互相位调制是导致其同步的主要原因. 文献^[14]从空间耦合角度研究了双波长飞秒激光的同步问题. 我们认为最基本的方法还是求解时域内的非线性 Schrödinger 方程^[15]. 飞秒脉冲在非线性晶体内的同步过程可以描述为: 首先, 两飞秒脉冲在非线性晶体内交叉(如图 1 所示), 形成交叠区, 交叠区内非线性折射率的变化对两束激光产生强互相位调制作用, 与光纤中同向或对向传输的超短脉冲相似^[16], 脉冲的上升沿和下降沿产生不对称的光谱展宽, 使其载波频率发生变化, 两脉冲的瞬时频率可唯象地表示为^[10]

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \omega_{01} - n_2(\omega_{01}, \omega_{01}) \frac{\partial I_1}{\partial t} \\ &\quad - n_2(\omega_{01}, \omega_{02}) \frac{\delta}{V_2} \frac{\partial I_2}{\partial t}, \\ \omega_2 &= \omega_{02} - n_2(\omega_{02}, \omega_{02}) \frac{\partial I_2}{\partial t} \\ &\quad - n_2(\omega_{02}, \omega_{01}) \frac{\delta}{V_1} \frac{\partial I_1}{\partial t},\end{aligned}\quad (1)$$

其中 $\omega_{01}, \omega_{02}, \omega_1, \omega_2$ 分别为某一时刻两脉冲作用前与作用后的载频, I_1, I_2 分别为两脉冲的光强. $n_2(\omega_{01}, \omega_{01})$ 和 $n_2(\omega_{02}, \omega_{02})$ 分别为两束激光单独

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60490280, 10227401)和国家重点基础研究发展规划(批准号: G1999075202)资助的课题.

[†] E-mail: wzhy@aphy.iphy.ac.cn; 电话: 82648115

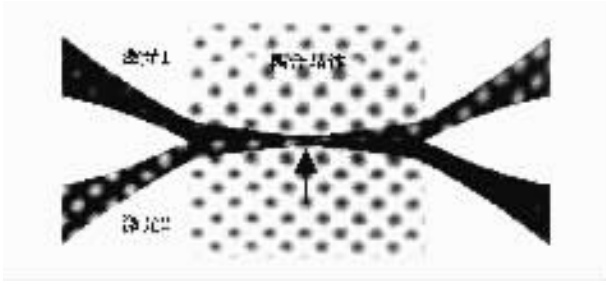


图 1 两束飞秒脉冲在耦合晶体内的交叠

存在时的自相位调制系数, $n_2(\omega_{01}, \omega_{02})$ 和 $n_2(\omega_{02}, \omega_{01})$ 为两束激光的互相位调制系数. δ 为两束激光的交叠体积, V_1, V_2 分别为两束激光的模式体积. 假定脉冲 1, 2 的往返时间分别为 T_1, T_2 , 方便起见, 我们设 $T_1 < T_2$. 脉冲 1 经过一次互相位调制作用后总频移为^[17]

$$\Delta\omega_1(\tau) = \frac{2\gamma P_2 L}{T_2} \cdot [e^{-\tau^2} - e^{-(\delta-\tau)^2}], \quad (2)$$

其中 P_2, T_2 为脉冲 2 的峰值功率和脉宽, L 为其相互作用长度, γ 是标志相互作用强弱的常数, 正比于其相互作用体积, τ 为作用开始时两脉冲峰值间的时间延迟, δ 为相互作用时间. 由(2)式可以看出, 脉冲 1 的载频出现红移. 红移导致其往返时间 T_1 发生变化

$$\begin{aligned} \Delta T_1 &= \text{GVD}_1 \cdot \Delta\omega_1 \\ &= \text{GVD}_1 \cdot \frac{2\gamma P_2 L}{T_2} \cdot [e^{-\tau^2} - e^{-(\delta-\tau)^2}], \end{aligned} \quad (3)$$

其中 GVD 为谐振腔 1 中净群速色散. 由(3)式可知, ΔT_1 的大小取决于两脉冲的峰值功率, 相互作用体积, 谐振腔的净色散. ΔT_1 的大小同时反映了互相位调制作用的强弱. 若 $\text{GVD} > 0, \Delta T_1$ 为负, 使 T_1 减小, 则使 T_1 更加背离 T_2 , 此时表现一种排斥机理, 不能形成稳定的同步. 反之若 $\text{GVD} < 0$, 则 ΔT_1 增大, T_1 增大, T_1 接近 T_2 , 多次作用后当两脉冲在时域上重合程度最大时, 其上升沿和下降沿经历相同的光谱展宽, 载波频率不再移动, 重复频率被锁定, 实现了“完全”同步. 但实际上环境微扰(空气流, 光学元件的伸缩变形, 光学系统的震动等)使振荡器腔长发生微小的改变, 导致 T_1 背离 T_2 , 同步状态被破坏. 此时互相位调制作用遵循上述耦合过程重新使 $T_1 \rightarrow T_2$, 这种破坏与重建的过程使 T_1, T_2 存在一定的偏离. 因此观察到的同步状态实际上是互相位调制作用与环境微扰竞争的结果, 是一种动态平衡状态.

3. 双波长同步激光器的设计与组建

图 2 显示我们设计并组建的的双波长同步飞秒激光器, 包括两个独立的 KLM 振荡器和一个耦合腔. 1, 3, 5, 7, 9, 11, 14, 16, 18, 19, 22, 23 组成振荡器 1, 其余组成振荡器 2, 使两振荡器实现独立锁模运转, 完全消除了增益竞争, 使其稳定性大为增强. 同时两束激光可独立调节, 其输出光谱互不影响. 为了实现两束激光的耦合, 在两振荡器的非色散臂引入耦合腔(19—22), 由四个曲率半径 $R = 100\text{mm}$ 的平凹全反镜组成, 用以对两束激光进行聚焦, 耦合介质(23)置于焦点, 可以增大两束激光的耦合强度. 增益介质选择了效率比较高的掺钛蓝宝石晶体(7, 8), 尺寸 $4\text{mm} \times 4\text{mm} \times 4\text{mm}$ 呈布儒斯特角放置, 水冷至 8°C . 由于掺钛蓝宝石非线性系数 n_2 比较大, 我们选择其为耦合介质. 两振荡器腔内色散由布儒斯特角切割的熔石英棱镜对(11—14)补偿, 根据锁模及同步参数计算的结果, 棱镜间距设为 80cm , 使腔内净色散为负值. 其中一个振荡器的输出镜(15 或 16)放置于一维精密平移台上, 用以精确调整腔长, 调节精度 $10\mu\text{m}$. 整个系统的设计尺寸 $80\text{cm} \times 40\text{cm}$. 两振荡器由两台输出波长 532nm , 最高输出功率 10W 的全固态激光器(Verdi-10, Coherent)分别抽运.

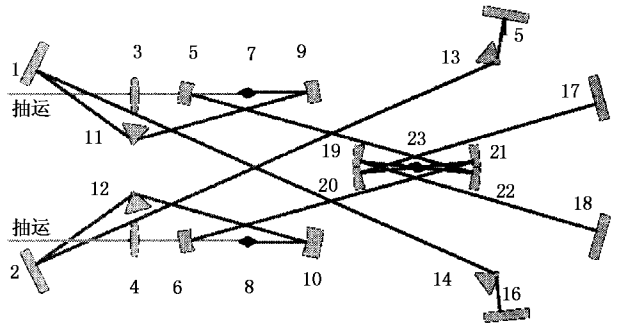


图 2 双波长飞秒同步激光器示意图(1, 2, 15, 16 为平面全反镜; 3, 4 为聚焦镜 5, 6, 9, 10, 19—22 为平凹全反镜, 11—14 为石英棱镜; 7, 8 为输出耦合(10% 或 20%) 7, 8, 23 为钛宝石晶体)

我们对激光器的性能进行了测试. 在 8.5W 抽运下, 振荡器稳定输出锁模功率为 1.4W , 效率约 15.5% . 能量稳定度在 $\pm 2\%$ 左右. 进一步提高抽运功率导致脉冲出现连续成分, 影响锁模稳定. 锁模可维持 24h 以上. 光谱仪观测的结果显示随棱镜的插入量变化输出脉冲的波长在 $730\text{—}850\text{nm}$ 可以独立调节, 光谱的半高宽为 $15\text{—}30\text{nm}$. 两激光器的光

谱可以独立调节,消除了传统被动同步光谱调节互相影响的情况. 这些参数使该激光器完全可以达到实用要求.

4. 同步的观察及影响同步的因素

4.1. 同步的观察

在 7W 抽运功率下,首先调节两路钛宝石激光锁模,锁模平均功率 820mW. 将两束锁模脉冲序列输入示波器进行监测,其中一束作为触发源. 在不同步的情况下,示波器显示作为触发源的一束脉冲序列稳定,另一束则迅速飘动,这说明两路激光的互相位调制作用还比较薄弱,不足以超过环境扰动的影响. 反复精确调节腔长相等,同时优化两路激光在耦合介质的耦合体积. 当互相位调制作用足以压倒环境微扰对腔长的影响时,两束激光实现同步,此时示波器显示两路稳定的锁模脉冲序列. 图 3 是我们利用 Tektronix TDS 5054 数字示波器采集到的同步图样,脉冲的重复频率约为 80MHz. 上下两路波形在图中的位置不同是由于输出脉冲到光电接收器的光程不同引起的.

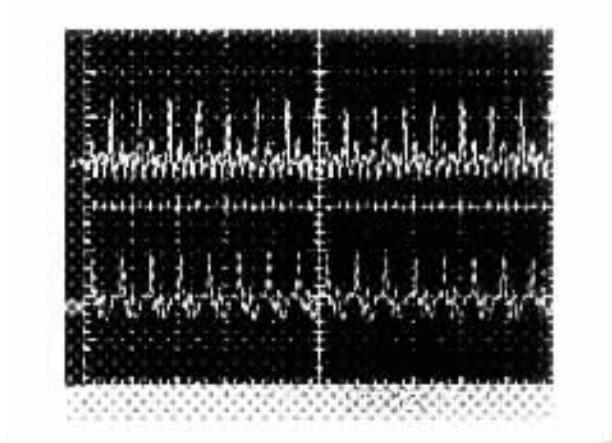


图 3 Tektronix TDS5054 数字示波器采集到的同步图样

4.2. 锁模功率和环境对同步稳定性的影响

我们首先测量了同步的稳定时间. 在输出 800mW 的情况下,同步稳定时间可持续 24h 以上. 调节两束激光的功率使其降至 300mW 时,同步可以维持的时间迅速缩短至几个小时左右,同时易受环境影响. 锁模功率降至 200mW 时已经不能启动同步. 这反映了互相位调制效应与环境微扰之间的竞争. 因为非线性折射率 $n_{NL} = n_2 I$, 其中 n_2 为非线性

系数 ($2.5 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$)^[18]. 当激光功率减小时, n_{NL} 减小,使两路激光的互相位调制效应变弱,从而使 ΔT_1 减小,当 ΔT_1 的变化与环境微扰对 ΔT_1 的影响接近时,同步很有可能被环境微扰破坏,此时的系统对于环境微扰敏感. 反之,若功率增大,互相位调制效应对 ΔT_1 的影响占主导地位,则系统对环境微扰不敏感,稳定性好. 观察结果同 (3) 式的描述是一致的.

4.3. 锁模脉冲的光谱和脉宽对同步的影响

我们采用 Ocean Optics pc1200 光纤光谱仪和强度自相关方法对同步后两束脉冲的光谱和脉宽进行了测量. 图 4 显示了在同步后测量到的光谱及其对应的脉宽. 两脉冲的中心波长分别位于 760nm 和 818nm,其光谱宽度分别为 23nm 和 28nm,脉宽为 45fs 和 37fs. 通过改变棱镜插入量调节激光的光谱和脉宽,都可以实现稳定的同步,光谱和脉宽的变化对同步并没有明显的影响.

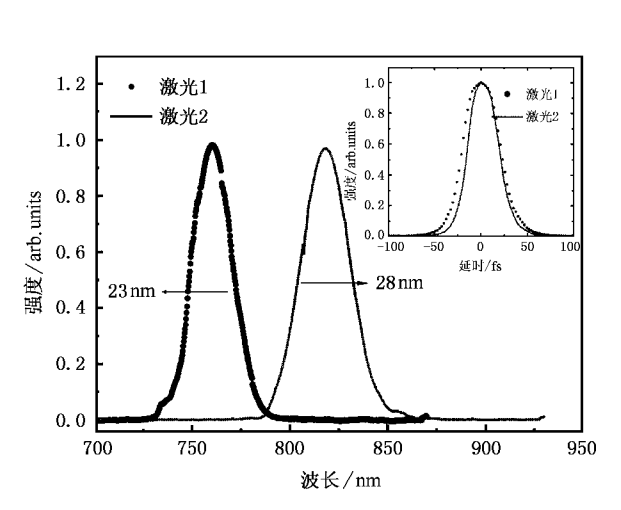


图 4 两束激光同步时的光谱及其强度自相关曲线

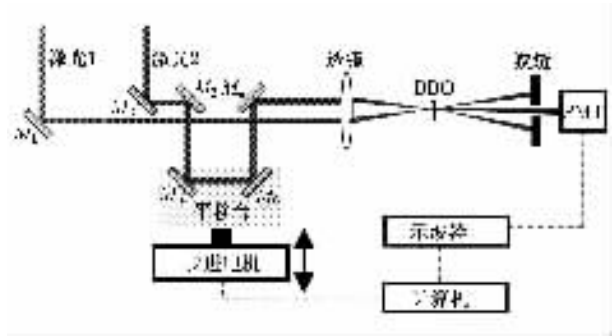


图 5 强度互相关测量装置 (M_1-M_6 为平面全反镜,透镜焦距 10cm)

5. 互相关测量结果与讨论

我们采用强度互相关测量技术对输出脉冲的同步精度进行了测量. 图 5 显示了互相关测量的光路. 平面反射镜 M_5, M_6 固定在平移台上, 平移台由计算机控制的步进电机控制, 用以精确调节两束激光的延时. 为了将两束激光产生的互相关信号 (SFG) 与单束激光产生的倍频信号 (SHG) 分开, 采用了狭缝将倍频信号与和频信号隔离. 使和频信号入射至光电倍增管, 光电倍增管的感生信号输入示波器进行处理.

我们将两束激光的输出能量稳定于 820mW, 对输出的同步脉冲序列进行强度互相关测量. 图 6 显示了测量到的一组互相关波形与能量抖动. 上曲线是两束激光脉冲的互相关曲线. 内嵌图是在 $2s$ 的

时间间隔内测量到的能量相对抖动, 显示这种能量抖动约在 2%, RMS 标准差为 0.00653. 内嵌图形是同时测量到的强度互相关曲线, 显示其半高宽约为 60fs. 通过计算可得对应的同步精度为 0.78fs, 是目前采用被动同步技术获得最高的同步精度. 测量中发现, 在不同条件下 (输出功率, 环境) 测量到的同步精度并不相同, 但均在 4fs 以下, 基于该激光器的实用性, 我们将该激光器的技术指标与国际上的商用产品进行了比较. 结果表明, 不仅其功率要高于一般的商用产品 ($\sim 500mW$), 而且其同步精度比目前国际上商用产品的同步精度^[19] (55—200fs) 高 1—2 个数量级. 另外, 本激光器的同步操作仅靠手调平移台即可完成 (平移台的精度 $10\mu m$), 据此可以推断该激光器有约 $10\mu m$ 的腔长失配容忍度, 比此前 $5\mu m$ 的结果大一倍, 比此前通过压电陶瓷实现同步的方法更加简单.

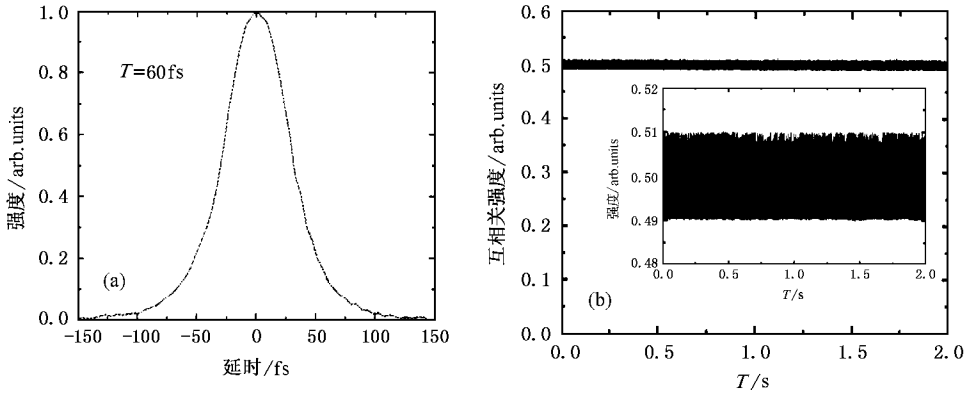


图 6 采用强度互相关方法测量到的互相关波形及能量相对抖动

6. 结 论

采用新的被动同步方案, 消除了传统被动同步技术输出功率低, 稳定性差的缺陷, 实现了双波长掺钛蓝宝石激光的大功率, 高精度稳定同步输出. 输出功率随抽运功率增加最大可达 1.4W, 波长在 730—850nm 范围内独立调节, 同步维持时间超过

24h. 同步精度达到 0.78fs, 是目前采用被动同步技术获得最高的同步精度. 该激光器也是目前国际上同步精度最高的实用同步飞秒激光器.

感谢中国科技大学杨涛教授, 潘建伟教授在测量方面给予的协助及中国科学院物理研究所聂玉昕研究员对本工作的支持.

[1] Brabec T, Spielmann C and Curley P F 1992 *Opt. Lett.* **17** 1292

[2] Bloembergen N 1999 *Rev. Mod. Phys.* **71** S283

[3] Shelton R K, Ma L S, Kapteyn H C, Mumane M M, Hall J L and Ye J 2001 *Science* **293** 1286

[4] Wei Z Y 1996 *Physics* **27** 61 (in Chinese) [魏志义 1996 物理 **27** 61]

[5] Xia J F, Wei Z Y and Zhang J 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 256 (in Chinese) [夏江帆、魏志义、张 杰 2000 物理学报 **49** 256]

[6] Yang H, Zhang T Q, Wang S F and Gong Q H 2000 *Acta Phys. Sin.* **49** 1292 (in Chinese) [杨 宏、张铁桥、王树峰、龚旗煌 2000 *物理学报* **49** 1292]

[7] de Barros M R X and Becker P C 1993 *Opt. Lett.* **18** 631

[8] Zhang Z and Yagi T 1993 *Opt. Lett.* **18** 2126

[9] Leitenstorfer A, Fürst C and Laubereau A 1995 *Opt. Lett.* **20** 916

[10] Wei Z Y, Kobayashi Y, Zhang Z G and Torizuka K 2001 *Opt. Lett.* **26** 1806

[11] Wei Z, Kaboyashi Y and Torizuka K 2002 *Appl. Phys. B* **74** [Suppl.] S171

[12] Henderson G A 1990 *J. Appl. Phys.* **68** 5451

[13] Song F, Yao J Q 2001 *Appl. Phys. B* **72** 605

[14] Wu S, Smith S L 1992 *Opt. Lett.* **17** 276

[15] Alfano R R, Baldeck P L and Ho P P 1989 *J. Opt. Soc. Am B* **6** 824

[16] Baldeck P L and Alfano R R 1988 *Appl. Phys. Lett.* **52** 1939

[17] Furst C, Leitenstorfer A and Laubereau A 1996 *IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics* **2** 473

[18] Backus S, Durfee C G III, Murnane M M and Kapteyn H C 1998 *Rev. Sci. Instru.* **69** 1207

[19] <http://www.splasers.com/> ; <http://www.coherent.com/>

Sub-femtosecond passive synchronization of Ti :sapphire lasers^{*}

Tian Jin-Rong¹⁾ Wei Zhi-Yi¹⁾²⁾ Wang-Peng¹⁾ Zhao Ling-Hui¹⁾ Wang Zhao-Hua¹⁾
Zhang Jun¹⁾ Han Hai-Nian¹⁾ Zhang Jie¹⁾

¹⁾ (Laboratory of Optical Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)
²⁾ (Joint Laboratory of Advanced Technology in Measurements, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)
(Received 7 April 2004 ; revised manuscript received 19 May 2004)

Abstract

Two independent femtosecond Ti :sapphire lasers are passively synchronized by an enhanced cross-phase-modulation technique. The synchronization operation is maintained over 24 h with a timing jitter of 0.78 fs.

Keywords : cross phase modulation, synchronization
PACC : 4260B, 4260H

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60490280, 10227401), and the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. G1999075202).