

## 超短及超强脉冲激光研究进展

魏志义,王兆华,韩海年,杜强,朱江峰,赵环,赵研英,张炜,周斌斌,钟欣,  
滕浩,李德华,聂玉昕,张杰

(中国科学院物理研究所 光物理重点实验室,北京 100080)

**摘要:**超短及超强脉冲激光是具有广泛应用的前沿技术,结合国际上有关该研究的最新进展,介绍了最近在周期量级脉冲激光的产生及包络相位测量、红外飞秒镁橄榄石激光研究、高精度飞秒激光同步、350 TW 啁啾脉冲放大激光、飞秒激光腔外压缩等方面取得的结果。

**关键词:**超短激光脉冲; 飞秒; 载波包络相位; 啁啾脉冲放大; 太瓦

**中图分类号:** O437.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2007)06-0773-05

## Progress on ultrashort and ultraintense laser pulse technology

WEI Zhi-yi, WANG Zhao-hua, HAN Hai-nian, DU Qiang, ZHU Jiang-feng, ZHAO Huan,  
ZHAO Yan-ying, ZHANG Wei, ZHOU Bin-bin, ZHONG Xin, TENG Hao, LI De-hua,  
NIE Yu-xin, ZHANG Jie

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

**Abstract:** The rapid development on ultrashort and ultraintense lasers technology triggered a lot of revolutionary progresses on the frontiers of basic science. Refer to the latest progress on this field in the world, our series relevant research works are reported, such as generation of few cycles laser pulse, measurement of carrier envelope phase(CEP), femtosecond Cr:forsterite laser, synchronized ultrashort pulse laser with low timing jitter, 350 TW laser facility with chirped pulse amplification (CPA) and 5.1 fs compressed laser pulse.

**Key words:** Ultrashort laser pulse; Femtosecond; CEP; CPA; Terawatt

## 0 引言

近 10 年来,超短脉冲激光技术的持续快速发展不仅深化着超快现象、THz 辐射等领域的研究,而且也促成了频标测量、飞秒激光精密微加工、飞秒纳米学、阿秒激光等前沿学科的出现和重大突破<sup>[1]</sup>。特别是通过啁啾脉冲放大(CPA)技术对飞秒激光脉冲的放大<sup>[2]</sup>,人们已能在一般规模的实验室里得到峰值功率数百太瓦(TW,  $10^{12}$  W)的超强激光及聚焦功率密度近  $10^{22}$  W/cm<sup>2</sup> 的极端光场,直接导致了高能量密度物理、粒子加速

物理、台面核物理等内容的创新进展。针对飞秒超强激光的重要应用,笔者以设计具有极短脉宽的飞秒掺钛蓝宝石激光振荡器为基础,先后建成峰值功率达 1.4 TW 的“极光 I”装置和 20 TW 的“极光 II”装置<sup>[3]</sup>,为超长等离子激光通道、超热电子特性等内容的研究提供了重要的实验平台。为了扩展飞秒激光的新应用,最近相继进行了亚 10 fs 激光脉冲产生、载波包络相位(CEP)控制、不同超短激光脉冲高精度同步、飞秒脉冲压缩、掺铬镁橄榄石激光(Cr:Mg<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>)飞秒激光、掺铬钇铝石榴石(Cr:YAG)飞秒激光、飞秒参量激光振

收稿日期:2007-05-10; 修订日期:2007-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60490280, 60308001, 60621063);中国科学院仪器研制和知识创新重点方向性项目资助课题(KJXC-SW-W14)

作者简介:魏志义(1963-),男,甘肃甘谷人,研究员,博士生导师,中国科学院物理研究所光物理重点实验室常务副主任,计量测试高技术联合实验室主任,主要从事超短超强激光脉冲的产生及应用等方面的研究。Email: zywei@aphy.iphy.ac.cn

荡器(OPO)、百大瓦激光、二极管激光直接泵浦的皮秒激光等内容,得到了光谱全宽近一个倍频程的周期量级脉宽,实现了基于自差频技术的单块光学频率梳,有效地扩展了飞秒激光波长的覆盖范围,建成了峰值功率大于 350 TW 的“极光 III”装置。

## 1 亚 10 fs 激光脉冲的产生

产生极短脉宽的激光振荡器需要有最佳的腔内色散、自相位调制等参数的平衡补偿机制,目前,激光振荡器常用的腔内色散补偿元件主要有棱镜对和啁啾反射镜,由于后者具有极宽的反射光谱带宽,已成为目前产生极短脉冲振荡器的首选方案。瑞士联邦技术大学、奥地利维也纳技术大学、德国马普量子光学研究所、麻省理工学院(MIT)的研究者都采用啁啾反射镜作为色散核心补偿元件,先后直接从振荡器得到了亚 10 fs 的激光脉冲,特别是 MIT 的科学家综合啁啾镜、棱镜及材料色散,产生了近 5 fs 的输出结果<sup>[4]</sup>。但由于复杂的色散补偿问题,这类激光振荡器的结构比较复杂,输出功率也只有 100~200 mW。笔者采用商用啁啾镜构成的四镜腔振荡器,通过计算并合理选择钛宝石晶体的厚度,产生了输出脉宽仅 7 fs、重复频率 160 MHz、平均功率 340 mW 的激光脉冲,与上述的同类工作相比,用相对简单的结构,得到了重复频率及输出功率均提高了的输出脉冲<sup>[5]</sup>。图 1 为测得的典型干涉自相关曲线。最近进一步采用 5 镜腔结构的振荡器后,测得脉冲宽度不到 6 fs。

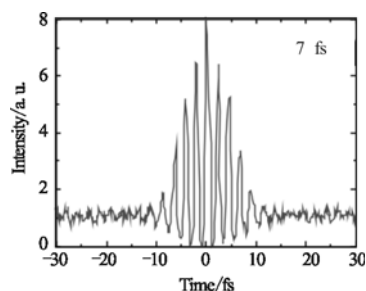


图 1 振荡器直接输出脉冲的干涉自相关曲线

Fig.1 Autocorrelation trace of the laser pulse from oscillator

对于中心波长在 800 nm 附近的这种极短激光,其脉冲结构不到 3 个光学振荡周期,因此,载波与振荡包络之间的相位 CEP 就成了一个重要的问题。德国和美国的科学家率先利用所谓的自参考技术,通过光子晶体光纤(PCF)对激光光谱的倍频程展宽,成功实现了 CEP 的高精度锁定<sup>[6]</sup>,不仅促进了飞秒激光的

重大进展,而且也革命性地实现了微波原子频标与光学频标的直接连接。目前,该发明作为最早概念的光梳,已广泛应用于光学频率等精密测量研究中,笔者也利用自建的飞秒钛宝石激光器,建成了重复频率 90 MHz 的光梳。但是,这种光梳在输出功率及稳定性方面受限于 PCF。2004 年 T.Fuji 等通过飞秒激光本身光谱的自差频,提出了单块结构的光梳概念<sup>[7]</sup>,该光梳无需 PCF,不仅具有紧凑的结构,而且避免了 PCF 影响功率及稳定性的问题。目前,德国已用这种技术实现了 75 MHz 重复频率飞秒激光的 CEP 锁定。

笔者以自建的高重复频率 7 fs 激光振荡器为对象,采用 MgO:PPLN 晶体作为差频(DFG)元件,测得了如图 2 所示的信噪比大于 30 dB 的 CEP 频率信号,通

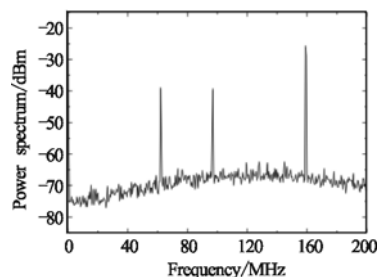


图 2 差频测得的 CEP 频率

Fig.2 Offset frequency measured with DFG technique

过锁定该信号及 160 MHz 的重复频率到铯原子钟,实现了新的单块光梳<sup>[8]</sup>,由于重复频率高于国际同类工作的结果,由此作为光梳,实用性更佳。

## 2 飞秒镁橄榄石激光产生

除钛宝石激光外,镁橄榄石激光是现有激光材料中另一种可产生飞秒脉冲的相对理想的增益介质。由于该介质在 1  $\mu\text{m}$  波段具有较好的吸收特性,由此可采用 Nd:YAG 激光直接泵浦,得到波长 1.2~1.4  $\mu\text{m}$ 、包括通讯波长在内的飞秒激光脉冲。目前,国际上有多组研究实现了 1.064  $\mu\text{m}$  激光泵浦的该飞秒激光运转,最短脉宽达 14 fs。采用更短波长的 Yb:YAG 激光作泵浦,首次在国内实现了啁啾反射镜色散补偿的镁橄榄石激光运转,在 5 W 的吸收功率下,得到了平均输出功率 120 mW、典型脉宽 29 fs 的稳定结果<sup>[9]</sup>,图 3 为锁模输出光谱曲线及脉宽干涉自相关曲线。此外,进一步采用 1 030 nm 波长的激光泵浦 Cr:YAG 晶体,得到了中心波长约 1.4  $\mu\text{m}$ 、典型脉冲 70 fs 的结果。使所得到的飞秒激光波段基本覆盖了 600~1 500 nm 的带宽范围。

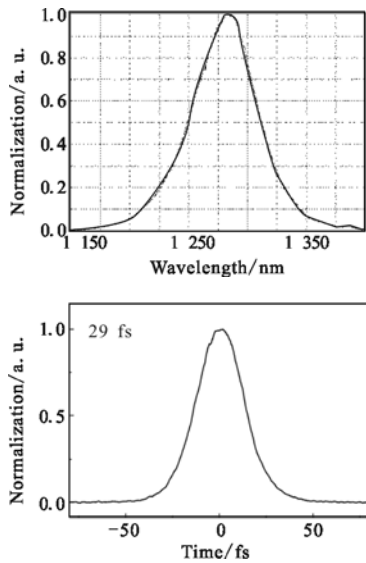


图 3 锁模输出光谱曲线及脉宽干涉自相关曲线  
Fig.3 Spectrum and interferometric autocorrelation trace of modelocking laser pulse

### 3 超短激光脉冲的高精度同步

在大量应用研究中,如泵浦探测、光束并束、相干合成、差频和频产生等,往往需要两个或多个超短激光脉冲的精密同步。激光同步有主动和被动两种,主动同步采用电子反馈系统对激光腔长的控制而实现重复频率的一致,被动同步则采用互相位调制实现,通常被动同步激光具有更高的同步精度,而主动同步具有更广泛的适用性。笔者已实现了飞秒钛宝石与钛宝石激光之间<sup>[10]</sup>、钛宝石激光与镁橄榄石激光之间的高精度同步<sup>[11]</sup>,最近又采用光梳研究中的锁相环技术,稳定实现了飞秒钛宝石激光与皮秒钷酸钷激光之间的同步,在此基础上进一步和频两激光,得到了中心波长 460 nm 的超短激光脉冲<sup>[12]</sup>,图 4 为理论模拟与实验测量得到

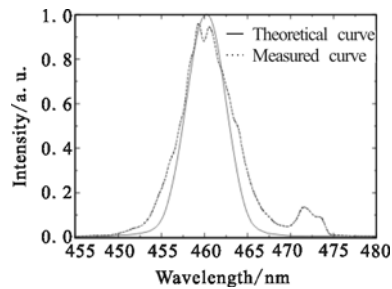


图 4 同步激光的和频光谱图

Fig.4 Spectral intensity curves of sum frequency laser

测量得到的和频光谱曲线,可以看出,两者具有很好的 consistency,带宽约 5.5 nm,在理论上支持 40 fs 的激光脉宽。这一工作不仅演示了同步不同脉宽、不同波长超短脉冲激光的一般方法,而且也提供了一种通过和频及差频技术产生新波长超短激光脉冲的全新技术。

### 4 350 TW 飞秒超强激光装置

通常从振荡器直接输出的飞秒激光单脉冲能量仅为毫焦量级,1985 年 CPA 技术的提出,为放大飞秒激光提供了一种革命性的新思路,从此人们所能得到的激光峰值功率得到了快速发展,美、英、日等多个国家的实验室通过采用该技术的钕玻璃激光装置,先后实现了峰值功率大于 1 PW 的结果,成为激光技术成就的重要标志。另一方面,由于钛宝石激光具有极短的激光脉宽和高的重复频率,采用 CPA 技术可以在普通大学的实验室里实现桌面尺寸的高重复频率超强激光系统。笔者曾先后建成重复频率 10 Hz、峰值功率 1.4 及 20 TW 的超强激光装置,随着应用研究工作的不断深入和国际上飞秒超强激光的快速进展,近年又开展了百太瓦激光装置的研究,并于 2006 年得到了大于 350 TW 的结果<sup>[13]</sup>。

图 5 为该装置的总体光路图,种子光源是已成型

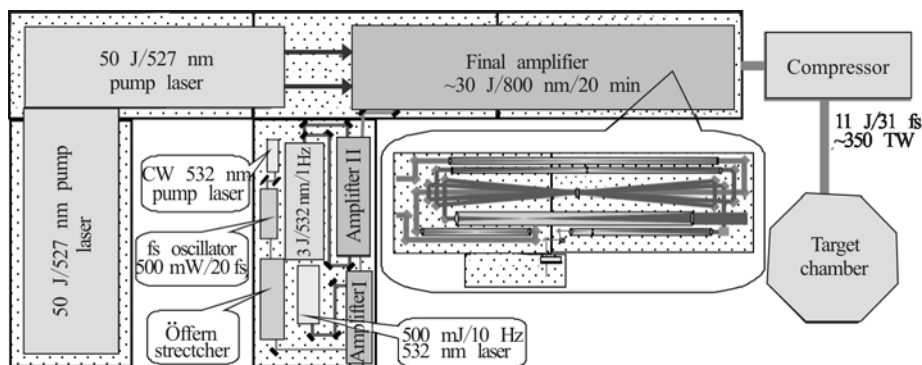


图 5 CPA 放大 350 TW 超强激光总体光路图

Fig.5 Schematic layout of 350 TW CPA laser system

化的飞秒钛宝石振荡器,其输出的 20 fs 激光脉冲经双通的 Öffern 展宽后,脉冲达近 600 ps 的宽度。为了克服放大中的增益窄化效应,采用了商用的声光调制器(Dazzler)以整形激光光谱,随后采用电子学控制的分频同步系统,注入到再生放大器进行放大。采用能量约 30 mJ 的纳秒 532 nm 激光作泵浦,得到了大于 2 mJ 的单脉冲放大结果。第二级放大采用的是多通放大方式,泵浦源为重复频率 1 Hz、单脉冲能量 2.6 J 的倍频 Nd:YAG 激光,再生放大后的脉冲经进一步分频、同步、滤波及光束扩展后,注入第二级多通放大中再放大,通过细化延时、优化激光通量并精调各光束的重合后,得到了大于 700 mJ 的输出。在最后一级的放大中,泵浦光是两路输出的 100 J 倍频钕玻璃激光,增益介质是尺寸  $\phi 85 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 、通过特殊切割形状抑制寄生振荡的大口径钛宝石激光晶体,将第二级放大后的激光通过滤波及像传递扩束到约 60 mm 的直径后,经多通放大后得到了 21 J 的能量。最后光束扩束到  $\phi 120 \text{ mm}$  并传递到真空压缩室进行脉冲压缩,压缩后典型的单脉冲能量为 10.9 J,平均脉宽 31 fs,对应着大于 350 TW 的峰值功率。

百太瓦量级的超强激光大于相对论光强的聚焦功率强度,因此,可以开展粒子加速、质子产生等极短非线性效应、高能量密度物理等前沿研究工作,是国际上竞相研究的热点内容之一。国际上第一台大于 100 TW 的超强激光是日本原子能研究院于 1999 年建造的,并于 2003 年进一步升级到 850 TW<sup>[14]</sup>。我国上海光机所、中物院激光聚变中心于 2004 年相继建成 120 TW 和 286 TW 的超强激光,并针对 PW 激光装置开展了许多工作,这些前沿激光技术研究,极大地提高了我国在超强激光领域的国际影响。

## 5 飞秒放大激光的脉冲压缩及相位控制

为了得到最短脉宽的激光脉冲,更为有效的方法是腔外压缩技术,这通常需要先要将脉冲光谱展宽,然后通过色散补偿,就能产生远小于原脉冲的宽度,针对驱动阿秒激光脉冲的要求,将从重复频率 1 kHz 的 CPA 激光输出的单脉冲能量 0.8 mJ、脉宽 25 fs 的放大激光注入空心波导光纤中,通过充入氩气并控制气压,得到了覆盖约 500~1 000 nm 的超连续光谱。采用不同啁啾镜的组合对展宽后的激光进行优化色散补偿,得到了脉宽仅 5.1 fs、单脉冲能量约 0.4 mJ 的周期量级脉冲<sup>[15]</sup>。图 6 为典型的干涉自相关曲线,图 7 为对应的光谱曲线。

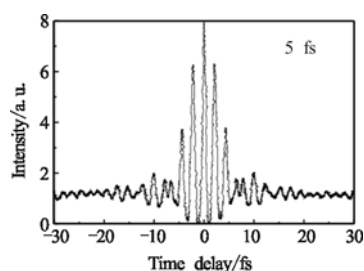


图 6 压缩激光脉冲的干涉自相关曲线

Fig.6 Autocorrelation trace of compressed laser

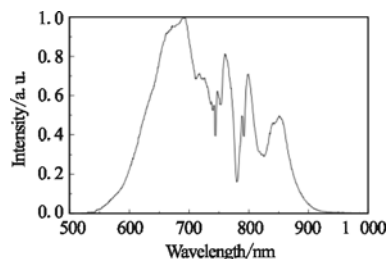


图 7 压缩激光脉冲对应的光谱曲线

Fig.7 Spectrum of the compressed pulse

为了进一步实现该激光的 CEP 锁定,搭建了基于光谱干涉的测量系统,并用自编的计算机程序和结合振荡器 CEP 控制的电子锁相环,实现了对该 5 fs 亚毫焦激光脉冲的 CEP 锁定。这为阿秒激光的产生提供了便利的实验平台。

## 6 结论

针对超短脉冲激光的前沿应用,开展了周期量级脉冲产生、CEP 控制、同步、放大、压缩等内容的研究,直接从振荡器输出了小于 6 fs 的脉冲,在实现差频 CEP 控制的基础上建成了先进的单块光梳,利用 1 030 nm 激光泵浦的镁橄榄石及 Cr:YAG 飞秒激光,得到了脉冲 29 fs 的 1 280 nm 及 70 fs 的 1 450 nm 红外激光。实现了不同超短脉冲激光的主动同步,并提出了和频产生飞秒激光的新方案,成功研制了 350 TW 的超强激光装置,压缩放大激光得到了单脉冲能量 0.4 mJ 的 CEP 锁定的 5.1 fs 激光脉冲。

**致谢:**感谢田金荣、令维军、王鹏、张军、贾玉磊等所做的工作,感谢张首刚、赵卫、钱列加等教授和镭宝光电的张放、孙晓洁的有益讨论和支持。

## 参考文献:

- [1] HENTSCHEL M, KIENBERGER R, SPIELMANN C H, et al. Attosecond metrology[J]. *Nature*, 2001, **414**: 509-513.
- [2] STRICKLAND D, MOUROU G. Compression of amplified chirped optical pulses[J]. *Optics Communication*, 1985, **56**(3):

- 219–221.
- [3] WANG Z H, JIN Z, WEI Z Y, et al. Wave-front correction of high-intensity fs laser beams by using closed-loop adaptive optics system[J]. *Science In China G*, 2005, **48**(1):122–128.
- [4] MORGNER U, ELL R, METZLER G, et al. Nonlinear optics with phase-controlled pulses in the sub-two-cycle regime [J]. *Physical Review Letters*, 2001, **86**(24):5462–5465.
- [5] ZHAO Yan-ying, WANG Peng, ZHANG Wei, et al. Generation of 7 fs laser pulse directly from a compact Ti:sapphire laser with chirped mirrors [J]. *Science in China Series G*, 2007, **50**(3):261–266.
- [6] JONES D J, DIDDAMS S A, RANKA J K, et al. Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis[J]. *Science*, 2000, **288**:635–639.
- [7] FUJI T, RAUSCHENBERGER J, APOLONSKI A, et al. Monolithic carrier-envelope phase-stabilization scheme [J]. *Optics Letter*, 2005, **30**(3):332–334.
- [8] ZHAO Y Y, ZHANG W, HAN H N, et al. Carrier-envelope phase measurement and control of sub-10 fs laser pulse at high repetition rate with difference frequency technique [C]// *CLEO2007*, CThX2, 2007.
- [9] ZHOU B B, WANG P, WEI Z Y, et al. Self-starting mode-locked Cr:forsterite laser pumped by 1 030 nm Yb:YAG Laser [C]// *SPIE, The 27th international conference on high speed photography and photonics*, 2007, **6279**:67793W.
- [10] TIAN J R, WEI Z Y, WANG P, et al. Independently tunable 1.3 W femtosecond Ti:sapphire lasers passively synchronized with attosecond timing jitter and ultrahigh robustness [J]. *Optics Letters*, 2005, **30**(16):2161–2163.
- [11] WEI Z Y, KOBAYASHI Y, ZHANG Z G, et al. Generation of two-color femtosecond pulses by self-synchronizing Ti:sapphire and Cr:forsterite lasers [J]. *Optics Letter*, 2001, **26**(22):1806–1808.
- [12] ZHAO H, WANG P, WEI Z Y, et al. **Generation of 460 nm femtosecond laser pulse by sum frequency synchronized femtosecond Ti:sapphire laser and picosecond Nd:YVO<sub>4</sub> laser** [M]. New York:Springer-Verlag Inc, 2006.
- [13] WANG Z H, WEI Z Y, ZHANG J, et al. A 355 TW femtosecond Ti:sapphire laser facility with three stage amplifiers [C]// *CLEO 2007*, JWC2, 2007.
- [14] AOYAMA M, YAMAKAWA K, AKAHANE Y, et al. 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser [J]. *Optics Letter*, 2003, **28**(17):1594–1596.
- [15] ZHU J F, WANG P, WEI Z Y, et al. Compression and carrier-envelope phase control of 5fs laser pulse for driving attosecond pulse [C]// *The 27th international conference on high speed photography and photonics, 8. Femto-Attosecond Source of Photoelectrons*, 2006.
- [16] JIA Y L, WEI Z Y, ZHENG J A, et al. Diode pumped self-starting Nd:YVO<sub>4</sub> laser with semiconductor saturable absorber output coupler [J]. *Chinese Physics Letter*, 2004, **21**(11):2209–2211.

## 2007 年光电探测与制导技术发展与应用研讨会成功召开

2007 年光电探测与制导技术的发展与应用研讨会于 2007 年 10 月 19 日~24 日在湖南省长沙市召开。本次会议由 中国宇航学会光电技术专业委员会主办, 中国航天科工集团第三研究院第八三五八研究所和国防科技大学精确制导自动目标识别国防科技重点实验室承办, 由中国航天科工集团二院二部、中国航天科工集团三院三部、哈尔滨工业大学航天学院、中国空空导弹研究院、中国航空工业第一集团洛阳电光设备研究所、华中科技大学图像识别与人工智能研究所和武汉高德红外技术有限公司共同协办。中国航天科工集团二院黄培康院士担任大会主席, 清华大学金国藩院士、北京理工大学周立伟院士担任大会共主席。会期 3 天, 与会代表 260 名, 分别来自国内航天、航空、中科院、电子、兵器等系统的 30 余家科研院所, 以及清华大学、北京大学、浙江大学、上海交通大学、哈尔滨工业大学、华中科技大学、国防科技大学等 30 余所高校。

开幕式由 8358 所所长张锋主持, 周立伟院士致大会开幕词, 最后由国防科技大学科研部王新立副部长讲话。黄培康院士和金国藩院士分别作了大会特约报告。本次大会采用大会报告和专业组报告相结合的方式, 24 名专家和学者作了专题报告。大会共收到会议稿件 176 篇, 其中特约报告 29 篇。经过编委审稿, 《红外与激光工程》正刊录用 13 篇, 增刊录用 152 篇。

在会议组织单位的精心策划以及全体专家、代表们的全力配合下, 会议取得了圆满成功。代表们对此次会议以及学会未来发展提出了中肯的意见和建议。

中国宇航学会光电技术专业委员会  
2007 年 10 月