

# 基于钛宝石的超快超强激光新进展

张宝辉<sup>1,2</sup> 徐 军<sup>2</sup> 杨秋红<sup>1</sup> 王静雅<sup>2</sup> 唐慧丽<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 上海大学电子信息材料系, 上海 200072; <sup>2</sup> 中国科学院上海硅酸盐研究所, 上海 201800)

**摘要** 作为三大基础激光晶体之一, 钛宝石晶体使激光的发展步入到超快、超强的新时代。结合近年来国内外以钛宝石为基础的超快超强激光领域的新进展作一概述。简要介绍了超快超强激光的应用领域。

**关键词** 激光器; 钛宝石; 激光晶体; 超快激光; 超强激光

**中图分类号** TN248 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.040003

## New Progress of Ultrafast and Ultraintense Lasers Based on Ti:Sapphire

Zhang Baohui<sup>1,2</sup> Xu Jun<sup>2</sup> Yang QiuHong<sup>1</sup> Wang Jingya<sup>2</sup> Tang Huili<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Electronic Information Materials, Shanghai University, Shanghai 200072, China)  
(<sup>2</sup> Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Titanium-doped sapphire, as one of the three basic laser crystals, has prompted the laser development into a new era of ultrafast and ultraintense lasers. We review the most recent progress of the ultrafast ultraintense lasers based on Ti:sapphire. The application areas of ultrafast ultraintense lasers are introduced briefly.

**Key words** lasers; Ti:sapphire; laser crystal; ultrafast laser; ultraintense laser

**OCIS codes** 140.3590; 160.3380; 320.7090

## 1 引言

1960年,第一台激光器诞生,为人类带来了一束神奇的光。如今,激光已大范围地应用于科技、医疗和能源等领域,广泛地改变了人类产业与战略的面貌。激光晶体是重要的激光材料,对于激光技术的发展起到了至关重要的作用<sup>[1]</sup>。作为三大基础激光晶体之一的钛宝石(化学式 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)晶体使激光的发展步入到超快、超强的新时代。由于钛宝石具有的宽带可调谐特性(最宽 660~1200 nm)、受激发射截面大、吸收带宽、适合多种抽运源抽运和物化性能优良等诸多优点,成为最重要的超强超短脉冲激光振荡源<sup>[2]</sup>。目前,国内外不少研究机构都能够在实验的基础上借助啁啾脉冲放大(CPA)技术并结合宽带激光材料(如钛宝石)来获得亚拍瓦甚至拍瓦级的超短(10~30 fs)脉冲激光。本文结合近年来国内外在以钛宝石为基础的超快、超强激光领域的新进展作一概述。

## 2 超快强激光的发展

锁模技术是获得短脉冲激光的重要手段。第一代的锁模激光器主要是基于红宝石、钕玻璃或 Nd:YAG 等增益介质<sup>[3]</sup>,此类激光器可产生小于 100 ps 的脉冲激光。1974年,Shank 等<sup>[4]</sup>用染料激光器产生了亚皮秒(0.5~1.0 ps)脉冲,但由于染料激光器本身所具有的稳定性的缺点,到 20 世纪 80 年代后期,新的固体激光材料开始成为研究热点。固体激光器相对于染料激光所具有的高稳定性、更宽的荧光谱线等优点,有利

**收稿日期**: 2012-12-05; **收到修改稿日期**: 2013-01-10; **网络出版日期**: 2013-03-11

**作者简介**: 张宝辉(1988—),男,硕士研究生,主要从事钛宝石激光晶体的生长、缺陷和激光性能等方面的研究。

E-mail: zbh-cn@foxmail.com

**导师简介**: 徐 军(1965—),男,博士,研究员,主要从事激光与光学晶体、晶体生长及装备技术等方面的研究。

E-mail: xujun@mail.shnc.ac.cn

于产生超短脉冲和宽的调谐性能。1986年, Moulton<sup>[5]</sup>研究了可在室温下工作的钛宝石激光器, 由于其具有的宽增益带宽性质保证了飞秒激光脉冲的实现。对于超快染料激光, 能够保证短脉冲 27 fs、平均功率约 10 mW, 但是对于平均功率约 100 mW 的 5~6 fs 超短脉冲则需依赖钛宝石激光器<sup>[6]</sup>。

同时期, CPA 技术的出现<sup>[7]</sup>使激光光强提高到  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>, 为产生超强、超短脉冲开辟了新的途径。CPA 技术的原理是: 由振荡器输出的短脉冲, 先展宽至皮秒甚至亚纳秒量级, 然后进行放大, 获得足够的能量增益, 再经压缩器获得与展宽前脉宽相近的飞秒脉冲。这样, 既可以保证飞秒脉冲放大有很高的通量以实现高的抽取效率, 又避免了因高强度而产生的光学损伤及非线性效应。图 1 为 CPA 飞秒脉冲放大系统示意图<sup>[8]</sup>。

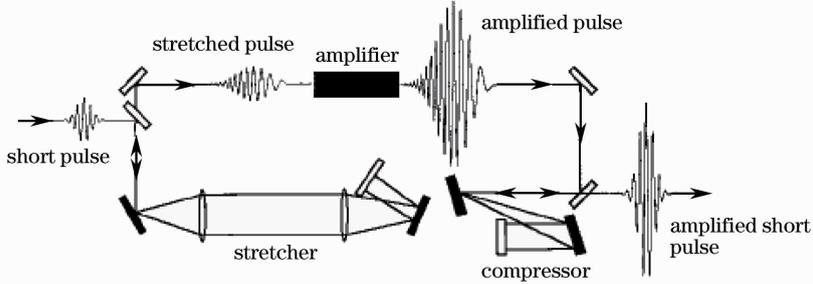


图 1 CPA 放大技术原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an amplifier system based on chirped-pulse amplification

1991年, Spence 等<sup>[9]</sup>采用克尔透镜锁模(KLM)技术, 以钛宝石晶体为激光增益介质研制成功了 60 fs 脉冲激光器。由于钛宝石较宽的增益带宽特性, 保证了从克尔透镜锁模振荡器获得飞秒量级的脉冲激光。特别是钛宝石的高饱和度能量密度( $0.9 \text{ J/cm}^2$ )、高的热导率(300 K 时  $46 \text{ W/mK}$ )和高损伤阈值特征, 适合产生高功率的激光脉冲<sup>[6]</sup>。最近几年, 采用多级 CPA 技术与宽带固体激光材料(钛宝石)结合, 获得的最大脉冲峰值功率可达到拍瓦量级<sup>[10-12]</sup>。

目前, 钛宝石已成为无可替代的超快激光材料, 而且只有钛宝石克尔透镜锁模激光器可获得小于 6 fs 的超短脉冲宽度。从染料激光器到克尔透镜锁模激光器, 钛宝石是运转变得简单和获得较稳定的激光器的首选材料<sup>[13]</sup>。

### 3 国内外超强、超短激光的新进展

对于超高强度的脉冲激光有越来越多的研究和应用需求, 例如基于激光的粒子加速、超快高能电子和离子的产生等。其中某些应用如激光尾场加速需要在拍瓦水平, 因此各国的研究者都在致力于发展超强、超短脉冲激光。近年来, 基于钛宝石的超快、超强激光的发展状况如图 2 所示。

#### 3.1 国外动向

自 20 世纪 90 年代中期以来, 将 CPA 技术和钛宝石增益介质相结合, 使超强飞秒激光系统产生的脉冲

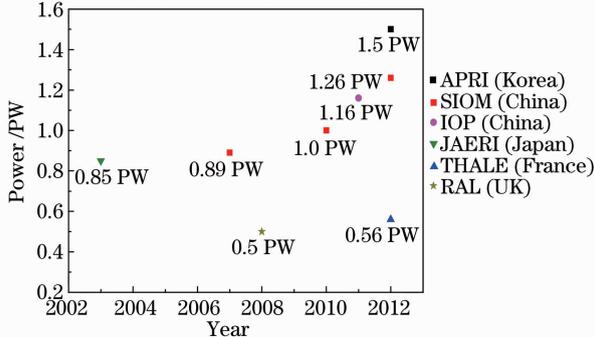


图 2 基于钛宝石的拍瓦激光的发展状况

Fig. 2 Recent development of petawatt laser system based on Ti:sapphire

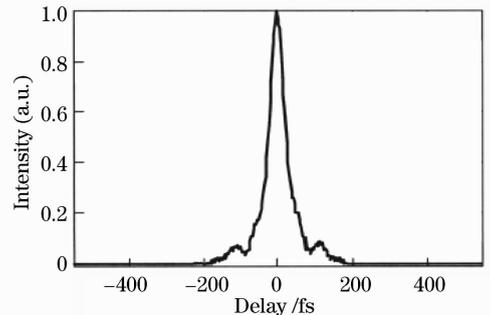


图 3 压缩脉冲的自相关曲线

Fig. 3 Autocorrelation trace of the compressed pulse

峰值功率已经发展至百太瓦的水平<sup>[14]</sup>。

2003年,日本原子能研究所(JAERI)的 Aoyama 等<sup>[15]</sup>以 CPA 技术为基础,在四级钛宝石放大器链上产生峰值功率 0.85 PW,脉冲持续时间 33 fs 的激光脉冲。其所测得压缩脉宽的自相关曲线如图 3 所示,脉冲宽度(半峰全宽 FWHM)为 32.9 fs,压缩器的传输率为 75%,压缩后输出脉冲能量为 28.4 J,其激光脉冲的峰值功率为 0.85 PW。

另外,2008年 Yanovsky 等<sup>[16]</sup>的报道也是达到了亚拍瓦级(约 300 TW),表明了同时期的较高水平。

到 2010年,韩国先进光子学研究所(APRI)的 Sung 等<sup>[11]</sup>,利用基于钛宝石的 CPA 激光系统获得了 1.0 PW,30 fs 的激光脉冲。2012年,该小组采用四光栅结构压缩器将放大后的激光脉冲压缩至 30 fs,从 0.1 Hz 的 CPA 钛宝石激光系统中得到了高对比度、1.5 PW 的激光脉冲<sup>[17]</sup>。同年,法国 Lureau 等<sup>[18]</sup>报道了 1.3 PW,亚 30 fs 的激光。

最新的报道指出欧洲的 Extreme Light Infrastructure (ELI)计划中用到的 APOLLON-10 PW 钛宝石激光系统正在设计和发展中<sup>[19~21]</sup>,未来将被用于其阿秒物理、二次源代和激光驱动核物理等科学研究领域。

### 3.2 国内进展

国内在该领域的研究主要集中在中国科学院上海光学精密机械研究所(简称上海光机所)强场激光实验室、中国科学院物理研究所、中国科学院西安光学精密机械研究所和天津大学等单位。

2007年,上海光机所的 Liang 等<sup>[22]</sup>在大口径钛宝石上电镀掺杂了吸收体的折射率匹配液,来抑制横向的寄生振荡,利用声光可编程色散滤波器(AOPDF)来抑制压缩脉冲前后的旁瓣。从而获得了 800 nm 的激光输出,其峰值功率为 0.89 PW,脉冲宽度 29.0 fs。激光系统设计如图 4 所示,包括 10 fs 自锁模钛宝石振荡器、AOPDF、采用 1200 g/mm 光栅的脉冲展宽器、再生放大器、三级多通道放大器以及采用为 1480 g/mm 的四光栅结构的压缩器。

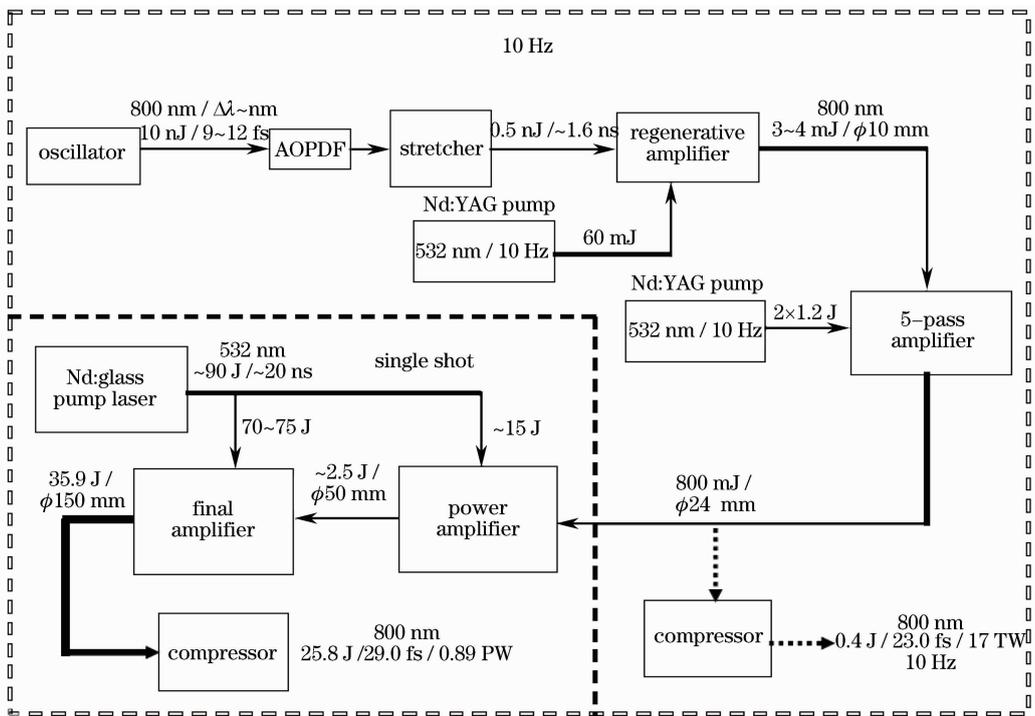


图 4 上海光机所 0.89 PW,29.0 fs 钛宝石 CPA 激光系统设计

Fig. 4 Schematic layout of the 0.89 PW,29.0 fs Ti:sapphire CPA laser system in SIOM

2010年,该研究小组通过增加大口径钛宝石放大器中的抽运及信号光束尺寸,优化整个激光系统,脉冲压缩之前的激光输出能量提高至 42.6 J,相应的激光峰值功率超过了 1 PW<sup>[23]</sup>。激光输出能量在 40 J 处所测得的不稳定度小于  $\pm 5\%$ 。其单次输出光束轮廓如图 5 所示,是典型的准平顶。

2011年,中国科学院物理研究所的 Wang 等<sup>[24]</sup>以双啁啾脉冲放大和飞秒非共线光学参量放大器的组合

方案为基础,通过提高末级放大器的增益效率和抽运能量,获得了高对比度、能量高达 32.3 J 的飞秒激光脉冲。测量显示其主激光脉冲的对比度约  $10^{10}$ ,压缩脉冲的持续时间是 27.9 fs,对应的峰值功率 1.16 PW。

2012 年,上海光机所的 Leng 等<sup>[25]</sup>获得了峰值功率 1.26 PW 的超强激光,其时间对比度提高至  $10^{11}$  左右。

另外,上海光机所的 Cao 等<sup>[26]</sup>正计划利用掺钛金绿宝石(Ti:chrysoberyl)和钛宝石混合放大链设计 10 PW 级的激光系统。

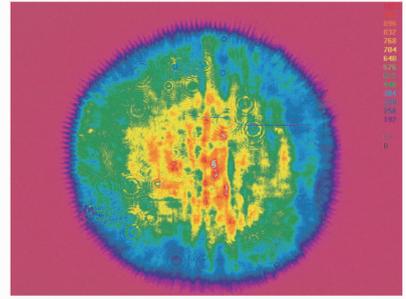


图5 单次输出光束轮廓

Fig. 5 Beam profile of a single output of the final amplifier

## 4 应用

超强激光的应用可概括为两个方面:1) 利用超短脉冲来观测材料中的超快反应过程;2) 利用超强度脉冲形成高能量密度的集中。借此,可以观察到原子、分子、离子和固体物理学的高度非线性过程,并进入前所未有的物质状态。

### 4.1 强场物理实验

飞秒激光产生的激光强度可达到  $10^{20}$  W/cm<sup>2</sup>,如此高的场强足以在几十到几百飞秒时间里将原子的几乎所有电子剥离,并将剥离的电子加速到相对论速度。在这样的极端条件下,会呈现一系列全新的物理效应。例如:激光脉冲的相对论自聚焦效应、自由电子非线性光学效应等。

### 4.2 其他应用

时间分辨光谱学:超短激光的脉冲宽度小于光穿过原子的时间,适合于在原子水平上来捕捉物理、化学和生物等超快过程的闪频照片<sup>[3]</sup>。发展超强飞秒激光致 X 射线源,可以帮助我们更好地了解材料的结构<sup>[27]</sup>。

超高强度激光可用来加速电子和质子至接近光速。这意味着可以创造出桌面离子加速器以使离子具有动能,与目前的最大的粒子加速器相匹敌,而尺寸、造价只有目前的一小部分<sup>[28]</sup>。

激光超微细加工方面,利用超短激光可实现多种材料的超微加工以及雕刻等工艺。并且,在量子水平上的操控可能产生新的材料和物质状态<sup>[29]</sup>。

## 5 结束语

现如今,激光的发展正在向着超快、超强和小型化的方向发展,国内一些研究人员在这一领域已取得了一定的成果,但相对于科技应用的巨大需求来讲,这个新的科研领域还存在着很大的发展空间,需要更多的探索与创新。

## 参 考 文 献

- Xu Jun. Recent developments and research frontier of laser crystals[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(9): 17~24
- 徐 军. 激光晶体材料的发展和思考[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(9): 17~24
- Xu Jun, Su Liangbi, Xu Xiaodong *et al.*. Recent development and research frontier of laser crystals[J]. *J. Inorganic Materials*, 2006, **21**(5): 1025~1030
- 徐 军, 苏良碧, 徐晓东 等. 激光晶体的现状及发展趋势[J]. 无机材料学报, 2006, **21**(5): 1025~1030
- Herman A. Haus. Mode-locking of lasers[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2000, **6**(6): 1173~1185
- C. V. Shank, E. P. Ippen. Subpicosecond kilowatt pulses from a mode-locked CW dye laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1974, **24**(8): 373~375
- P. Moulton. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[J]. *Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(1): 125~133
- Koichi Yamakawa, Christopher P. J. Barty. Ultrafast, ultrahigh-peak, and high-average power Ti:sapphire laser system and its applications[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2000, **6**(4): 658~675
- P. Maine, D. Sreickland, P. Bado *et al.*. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1988, **24**(2): 398~403
- Sterling Backus, Charles G. Durfee, Margaret M. Murnane *et al.*. High power ultrafast lasers[J]. *Rev. Sci. Instrum.*,

- 1988, **69**(3): 1207~1223
- 9 D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1): 42~44
- 10 Michael D. Perry, Gerard Mourou. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers[J]. *Science*, 1994, **264**(5161): 917~924
- 11 Jae Hee Sung, Seong Ku Lee, Tae Jun Yu *et al.*. 0.1 Hz 1.0 PW Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(18): 3021~3023
- 12 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3): 160~162
- 13 U. Keller. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. *Nature*, 2003, **424**(6950): 831~838
- 14 K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka *et al.*. 100-TW sub-20 fs Ti:sapphire laser system operating at a 10 Hz repetition rate[J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(18): 1468~1470
- 15 M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane *et al.*. 0.85 PW, 33 fs Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17): 1594~1596
- 16 V. Yanovsky, V. Chvykov, G. Kalinchenko *et al.*. Ultra-high intensity-300-TW laser at 0.1 Hz repetition rate[J]. *Opt. Express*, 2008, **16**(3): 2109~2114
- 17 Tae Jun Yu, Seong Ku Lee, Jae Hee Sung *et al.*. Generation of high-contrast, 30 fs, 1.5 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti:sapphire laser[J]. *Opt. Express*, 2012, **20**(10): 10807~10815
- 18 F. Lureau, O. Chalus, C. Radier *et al.*. 1 Hz peta watt class laser for laser driven wakefield acceleration[C]. High Intensity Lasers and High Field Phenomena, 2012. HT5C.6
- 19 Do-Kyeong Ko. Generations and applications of extreme light[C]. 17th Opto-Electronics and Communications Conference, 2012. 570~571
- 20 J. Lee, Tae Moon Jeong. Development and applications of 0.1-Hz, 1.1-PW Ti:sapphire Laser[C]. IEEE Photonics Conference, 2011. 632~633
- 21 F. Giamb Bruno, C. Radier, G. Rey *et al.*. Design of a 10 pw (150 J/15 fs) peak power laser system with Ti:sapphire medium through spectral control[J]. *Appl. Opt.*, 2011, **50**(17): 2617~2621
- 22 Liang Xiaoyan, Leng Yuxin, Wang Cheng *et al.*. Parasitic lasing suppression in high gain femtosecond petawatt Ti:sapphire amplifier[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(23): 15335~15341
- 23 Xiaoming Lu, Xiaoyan Liang, Yuxin Leng *et al.*. Improvement of the large aperture Ti:sapphire amplifiers in the petawatt femtosecond laser system at SIOM[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(10): 1008~1009
- 24 Wang Zhaohua, Liu Cheng, Shen Zhongwei *et al.*. High-contrast 1.16 PW Ti:sapphire laser system combined with a doubled chirped-pulse amplification scheme and a femtosecond optical-parametric amplifier[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(16): 3194~3196
- 25 Leng Yuxin, Liang Xiaoyan, Liu Jiansheng *et al.*. Progress on the Development and Application of Femtosecond Petawatt Ti:Sapphire Laser Facility at SIOM[R]. Huangshan, 2012
- 26 Cao Huabao, Lu Xingqiang, Fan Dianyuan. Conceptual design of a 10 PW class laser with a hybrid amplification chain[J]. *Appl. Opt.*, 2012, **51**(12): 2150~2154
- 27 Zhu Wei, Ye Yan, Zhu Pengfei *et al.*. Backlight imaging by X-ray irradiation from high-intensity femtosecond-laser driven gas target[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, **24**(11): 2651~2654  
朱巍, 叶雁, 朱鹏飞等. 超强飞秒激光驱动气体靶致 X 光源的背光成像[J]. *强激光与粒子束*, 2012, **24**(11): 2651~2654
- 28 Thomas M. Baer, Nicholas P. Bigelow. 2020 visions: lasers[J]. *Nature*, 2010, **463**(7277): 32
- 29 P. Bucksbaum, T. Ditmire, L. Dimauro *et al.*. The Science and Application of Ultrafast: Opportunities in Science and Technology Using the Brightest Light Known to Man[R]. Washington DC 2002