

## 基于啁啾放大的飞秒太瓦量级 $Ti:Al_2O_3$ 激光器新进展\*

曹东茂<sup>a</sup> 任兆玉<sup>a,b</sup> 杨志勇<sup>a</sup> 侯 洵<sup>a,c</sup>

(<sup>a</sup>西北大学光子与光子技术研究所,光电子技术省级重点开放实验室,西安,710069)

(<sup>b</sup>西北工业大学应用物理系,西安,710072)

(<sup>c</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所瞬态光学技术国家重点实验室,西安,710068)

摘要:综述了基于啁啾放大技术的飞秒太瓦量级  $Ti:Al_2O_3$  激光器的发展概况及最新进展,在详细分析了其应用前景的基础上,进一步指出了这一技术领域未来的发展趋势。

关键词:啁啾放大技术 飞秒 太瓦量级  $Ti:Al_2O_3$  激光器

## The new advance of fs ,TW level $Ti:Al_2O_3$ laser based upon CPA techniques

Cao Dongmao<sup>a</sup>, Ren Zhaoyu<sup>a,b</sup>, Yang Zhiyong<sup>a</sup>, Hou Xu<sup>a,c</sup>

(<sup>a</sup> Institute of Photonics & Photon-Technology and Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, North-West University, Xi'an, 710069)

(<sup>b</sup> Applied Physics Department, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072)

(<sup>c</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics and State key laboratory of Transient Optical Technology, The Chinese Academy of Science, Xi'an, 710068)

**Abstract:**  $Ti:Al_2O_3$  crystal are used as the gain medium and amplification medium to configure the high performance lasers with extra-short pulses of femto-second level, high power output of 100 TW grade and wide tuning range. This paper summarized the new progress of  $Ti:Al_2O_3$  lasers based on CPA technique systematically, described the developing process of  $Ti:Al_2O_3$  lasers and the new important advance. The  $Ti:Al_2O_3$  laser can be used as the extra-short laser pulse source to generate the extra-short X ray or other applications.

**Key words:** CPA techniques femtosecond TW level  $Ti:Al_2O_3$  laser

## 引 言

自1982年掺钛蓝宝石晶体问世以来<sup>[1]</sup>,用其作为增益介质和放大介质的激光器获得了飞速发展。迄今为止,用掺钛蓝宝石激光系统所产生的最短超短光脉冲,其脉宽已几乎接近理论极限 $3fs$ <sup>[2]</sup>,而峰值功率可高达 $100TW$ <sup>[3]</sup>,特别是运用钛宝石和高储能大孔径介质,如Nd:glass相结合,可达到拍瓦<sup>[4]</sup>以至更高的峰值输出。该激光系统的突出特点是脉冲宽度窄(飞秒量级),输出功率高(太瓦量级),波长调谐范围宽(可从近红外到可见光调谐),尤为重要是,采用倍频技术,可使其调谐范围从近红外扩展到紫外以至真空紫外<sup>[5]</sup>。正由于这种大功率超短脉冲在科学研究的许多领域有着巨大的应用前景,所以,世界各国都投入了大量人力财

力进行这一领域的研究,我国也不例外。

啁啾放大技术是产生大能量超短脉冲的重要手段。最初是由 Strikland D 和 Mourou G 为了避免光放大器受到光脉冲强度的限制,将 Brokner E 进行雷达信号放大的理论首次用于光学领域<sup>[6]</sup>。1990年,Squier J 等将其第一次应用于全钛宝石激光器<sup>[7]</sup>,并获得了较高峰值功率的超短脉冲。此后,基于啁啾放大技术原理的各式各样限制的放大装置相继产生,其性能也不断得到完善。运用啁啾放大技术实现大功率、超短脉冲钛宝石激光系统运转,是目前激光研究领域较为热点的研究课题之一。特别是在短短几年内,有关这一领域的研究工作已取得了令人瞩目的进展。我们将系统综述该领域的发展概况和最新进展,并在详细分析其应用前景的基础上进一步指出这一领域的发展趋势。

## 1 发展概况及最新进展

### 1.1 啁啾放大技术

啁啾放大技术是先用正色散使大能量超短光脉冲啁啾,即将脉冲在时域展宽(展宽比一般为 $10^3 \sim 10^5$ ),使其峰值功率下降到对系统元件的损坏阈值以下,从而避免强光对系统元件的损伤,避免增益介质的增益饱和以及非线性效应<sup>[8]</sup>;同时也可由增益介质更有效的提取能量,接着用负啁啾将脉冲压缩,从而获得高功率的超短光脉冲输出。啁啾放大的原理简图可用图1表示。其通常由4部分组成<sup>[9]</sup>(1)超短光脉冲振荡器(2)脉冲展宽器(3)脉冲放大器(4)脉冲压缩器。其中,展宽器通常由光栅和一个成像光学元件,如凸透镜、球面镜或抛物镜构成<sup>[10]</sup>。由于透镜球差、色差以及色散的存在,将导致展宽器和压缩器之间色散的不匹配,对有限直径的光束,将导致空间波动的光谱和波动的时域展宽<sup>[11]</sup>。为此,应尽量减少折射光学元件的使用<sup>[12]</sup>。

由于钛宝石具有较大的增益带宽、高的饱和能量以及损坏阈值,因而也可用于啁啾放大中的大功率放大器。与之相应的放大结构通常采用再生和多通放大

结构。所谓再生放大就是从锁模光脉冲序列中选出一个种子脉冲,注入再生放大器的谐振腔,在达到饱和之前来回振荡,在适当时间用调制元件取出的方法。该方法的突出优点是高效能取出。多通放大则是让光脉冲在几何上按一定光路多次通过增益介质(一般为 $8 \sim 10$ 次),从而使增益介质粒子反转数得以充分利用的方式。其突出优点是波长调谐容易,可高反差单脉冲工作。传统的放大结构通常采用再生放大与多通放大相结合的方式,但由于种子脉冲在注入再生放大腔后,需多次通过普克尔盒及偏振镜,为了避免宽频带超短脉冲的积累高阶色散效应,必须严格调整偏振器的消光比<sup>[13]</sup>,因此,限制了小于 $30 \sim 50\text{fs}$ 超短光脉冲的放大及输出光脉冲的大范围调谐<sup>[14]</sup>。而多通放大器在保持了再生放大器的高效、紧凑的一些优点的同时,避开了再生放大器的这一限制<sup>[13]</sup>。所以,当前在获得极高峰值功率超短光脉冲时,通常采用多级多通放大器相串联的结构型式。啁啾放大的压缩器是与展宽器具有相反色散的一条延迟线构成,通常为—对平行光栅。

### 1.2 近期发展的基本概况

自1982年掺钛蓝宝石晶体问世以来,用其作为增益介质的激光系统,输出激光脉宽不断缩短,从皮秒到亚皮秒,到1991年已达到飞秒量级。同时,伴随着啁啾放大技术的应用,脉冲

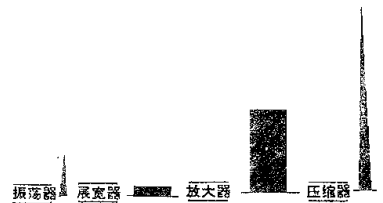


图1 超短光脉冲展宽-放大-压缩原理示意图

的峰值功率也迅速提高。到目前为止,已达到了百太瓦水平。但就重复率而言,只有 1~50Hz 较低重复率范围的钛宝石激光器发展较快。其中又以 10Hz 的发展最为突出,而较高重复率的高峰值功率钛宝石激光器的开发与研制相对较少,其根本原因是缺乏合适的泵浦源。

自 1991 年出现自锁模钛宝石超短脉冲激光器以来,重复频率从几赫到几千赫的飞秒、太瓦级钛宝石激光器已相继研制出来。其中重复频率在 1~50Hz,较有特色的有:1991 年加利福尼亚大学的 Sullivan A 等采用四阶 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 放大器,获得了 3TW,95fs 的高峰值输出<sup>[15]</sup>;1994 年,斯坦福大学的 Barty C P J 等首次通过控制飞秒尺度上的相位和振幅畸变,在重复频率为 10Hz 时,首次获得了低于 50fs 的 4TW,30fs 高峰值功率超短脉冲<sup>[16]</sup>。同年,华盛顿州立大学的 Zhou J P 等只采用多通放大器,在重复频率为 10Hz 时,获得了相对以前在获得 30~40fs 太瓦级超短脉冲时,采用再生放大器而导致脉冲和光谱畸变的最短 26fs,2TW 输出<sup>[17]</sup>。1995 年,加利福尼亚的 Sullivan A 等又用倍频的 Nd:glass 激光,泵浦钛宝石放大器,获得了 120fs,9.8TW 的高峰值功率输出<sup>[10]</sup>。同年,加利福尼亚大学圣地亚哥分校的 Barty C P J 等采用再生脉冲整形和高阶色散相位补偿,在 50Hz 获得了 18fs,4.4TW 的最短飞秒太瓦级脉冲<sup>[18]</sup>。1996 年,法国的 Chambaret J P 等在尽量减小相位畸变而不是补偿高阶色散条件下,采用展宽比为 10<sup>4</sup> 的无相差展宽和压缩系统,在重复频率为 10Hz 时,获得了 35fs,25TW 的当时最高峰值功率,聚焦强度达到 5 × 10<sup>19</sup> W/cm<sup>2</sup><sup>[19]</sup>。1997 年,日本原子能研究所高等光子研究中心的 Yamakawa K 和加利福尼亚大学的 Barty C P J 等合作,用固体标准具控制增益窄化效应和增益饱和,同时补偿多层电介质镜的三阶色散,采用两阶 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 放大器,在 10Hz 产生了 16fs,10TW 的最短脉宽和极高峰值输出,并获得了在所有钛宝石啁啾放大系统中超过理论值 90% 的最大放大器效率<sup>[20]</sup>。次年, Yamakawa K 等又用三阶 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 放大器,在重复频率为 10Hz 时,获得了 19fs,100TW 的最高峰值功率,并使最终放大器效率达到了理论量子极限<sup>[3]</sup>。至此,在基于啁啾放大技术的较低重复频率、高峰值功率超短脉冲钛宝石激光器的研制中处于领先地位。重复频率大于 50Hz 的高峰值功率超短脉冲钛宝石激光器的发展相对较少,主要集中在 1kHz。其中比较典型的有:1995 年华盛顿州立大学的 Backus S 等在尽量减少像散和介质色散条件下,采用三镜多通环形放大结构,在 1kHz 获得了 21fs,0.05TW 的较高峰值输出<sup>[21]</sup>;1996 年纽约的 Fu Q 和 Gayen S K 用再生放大和多通放大相结合在 1kHz 获得了 94fs,脉冲能量 75mJ 的输出。当重复频率在 250Hz 到 3kHz 调谐时,在 250Hz 和 500Hz 的脉冲能量大于 75mJ<sup>[22]</sup>。1997 年,奥地利的 Sartania S 和匈牙利的 Ferencz K 合作,采用无光栅展宽、空心光纤和啁啾镜技术,获得了 5fs,0.1TW 的衍射极限光束<sup>[23]</sup>。同年,密歇根州大学的 Backus S 等采用瞬态频控光闸获得了 20fs,0.2TW 的输出<sup>[24]</sup>。1998 年,东京大学的 Nabekawa Y 等通过在再生放大器谐振腔中插入棱镜补偿色散,在 1kHz 获得了 21fs,0.66TW<sup>[25]</sup> 的最高峰值输出,代表了在较高重复频率范围产生高峰值功率超短激光脉冲的新水平。

另外,值得一提的是,在用钛宝石和高效储能大孔径介质(如:钕玻璃)相结合的混合系统中,可获得 400fs 左右的大功率,高能量光脉冲<sup>[3]</sup>。如 1993 年,法国的 Rouger C 用 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nd:glass 混合系统产生了 440fs,50TW 的较高峰值输出<sup>[26]</sup>,1996 年,美国加利福尼亚的 Stuart B C 等采用优化的 Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nd:glass 混合系统,获得了 395fs,125TW 的近衍射极限光束<sup>[27]</sup>。而在这些不断完善的大功率混合系统中,要算美国的 LLNL Nova 系统领先一步了,它可产生 430fs,1.3PW 的极高峰值功率,强度达到 10<sup>21</sup> W/cm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>。这是原先科学家们所不敢想象的。

这一研究成果将给传统的建立在微扰论基础之上的物理学大厦带来巨大的冲击,从而为各领域科学工作者带来罕见的机遇。

## 2 发展趋势及应用前景

目前,关于钛宝石激光器的一般性能研究已较为成熟,并且作为新一代的超短激光脉冲光源,也已得到了广泛的应用。笔者认为,今后的研究目标将主要集中在极短脉冲和更大输出功率系统的开发研制方面。在脉宽方面,利用钛宝石飞秒激光系统目前已达到了 $4.6\text{fs}$ (接近理论极限 $3\text{fs}$ )的水平<sup>[2]</sup>,再利用钛宝石的宽频带增益进行更短脉冲的产生,已几乎没有更大的潜力。而利用钛宝石激光器较高的峰值功率聚焦后在物质中产生的非线性效应<sup>[28]</sup>,进行新波长范围、更短脉宽脉冲的产生,应该是获得极短脉冲的一条有效途径。比如,当固体表面聚焦光强大于 $1.38 \times 10^{10}\text{W}$ ( $1.38 \times 10^{18}\text{Wcm}^{-2}\mu\text{m}^2$ 相对论光强)时,已观察到固体高达75次的高次谐波,其在X射线波段的输出功率高达 $2.4 \times 10^7\text{W}$ <sup>[29]</sup>,而且具有极好的相干性。若将其相位锁定,便有可能实现 $\text{as}$ 激光器的运转。在这样短的脉冲下,较高的峰值功率显得更加容易获得,因为只需很少的能量,系统的峰值功率就可很高<sup>[30]</sup>。这样,在对泵浦源要求不高的情况下,系统的重复频率也可做得很高。

另外,在大脉冲能量、高峰值功率超短脉冲钛宝石激光器的研制方面,应该采用钛宝石和高饱和通量、较长上能级寿命的介质如 $\text{Nd}:\text{glass}$ 相结合的混合系统。其波长仍然保持全钛宝石激光器可调谐的特点<sup>[27]</sup>。同时,为了对几十焦以至几千焦的飞秒脉冲进行压缩和聚焦,必须进行新的光栅材料的研制,如近来发展的高损坏阈值 $\text{ZnS}$ 电介质衍射光栅<sup>[4]</sup>。脉宽的缩短、峰值功率的提高、重复频率的增大,最根本的障碍是缺乏在蓝绿光谱范围合适的大能量泵浦激光源<sup>[30,44]</sup>。为此,应发展和采用比钛宝石更优良的介质,发展更加优良的激光器,同时,应寻求新的具有较高质量的泵浦源。

由于钛宝石激光器具有调谐范围宽,调谐容易,能够产生超短光脉冲,输出功率高,性能稳定,结构紧凑等优点,已在许多领域获得了广泛的应用,诸如:高次谐波的产生,高密度等离子体的研究<sup>[31]</sup>,短波长激光器的研制<sup>[29]</sup>,超快软、硬X射线的产生<sup>[32]</sup>,多光子电离,超快光谱<sup>[25]</sup>,振动弛豫,质子、电子转移,超快化学反应动力学<sup>[5]</sup>。其中比较引入瞩目的应用有,利用高峰值功率超短脉冲激光极高的电场强度,进行电子的加速,已有将电子加速到 $100\text{MeV}$ 的报道。这极可能引起加速器物理的一场革命<sup>[33,34]</sup>;用超强超短激光脉冲与固体靶相互作用,可产生能量大于 $100\text{keV}$ 的高能超短脉冲X射线。这种高能X射线脉冲短,穿透能力极强,功率远大于同波段的同步辐射源<sup>[29]</sup>;利用超短光脉冲,在等离子体上打洞的过程已被证实,从而为快速点火惯性约束核聚变提供了可能<sup>[35]</sup>;在气体高次谐波产生实验中,已观察到Ar气的第81次最高级谐波辐射(相应波长 $9.69\text{nm}$ ),不可分辨谐波辐射不低于91次,Ne气的第107次最高次谐波辐射(相应波长 $7.33\text{nm}$ ),不可分辨谐波辐射不低于131次(相应波长短于 $5.99\text{nm}$ )<sup>[36]</sup>。最重要的是,已获得了He气300次以上的高次谐波辐射,相应波长短于 $3\text{nm}$ <sup>[37]</sup>。这一波长已进入了“水窗”波段<sup>[38]</sup>。从而为在“水窗”进行细胞活组织无损高对比度探测提供了可能。这将为最终解开生命之谜提供理想的工具,从而有可能对生命科学和其它相关学科的发展带来革命性的变革。

## 3 结 论

自1991年世界上第一台自锁模掺钛蓝宝石激光器研制成功以来,在短短的几年时间里,

脉宽由最初的皮秒发展到亚皮秒甚至于几个飞秒,峰值功率由瓦提高到太瓦以至拍瓦,输出脉宽和峰值功率都取得了较大的发展。当前进一步的研究工作将是产生太瓦到拍瓦以至拍瓦以上的峰值输出,同时使其脉宽再进一步缩短,以图突破阿秒量级。相信不久的将来,新一代的阿秒量级大功率激光器必将问世。

## 参 考 文 献

- 1 Moulton P F. Solid State Research Report. DIIC AD-A1 23405/4(1982.3). M I T Lincoln Lab Lexington, 1982 :12 ~ 15
- 2 Lerner E J. L F World, 1998, 34(12):77 ~ 84
- 3 Yamakawa K. Opt Lett, 1998, 23(18):1468 ~ 1470
- 4 孟绍贤. 物理学进展, 1998, 18(4):333 ~ 357
- 5 王菊霞, 杨志勇, 苗润才. 光子学报, 1997, 26(8):752 ~ 756
- 6 Strickland D, Mourou G. Opt Commun, 1985, 56(3):219 ~ 222
- 7 Squier J, Salin F, Mourou G. Opt Lett, 1991, 16(5):324 ~ 326
- 8 侯 洵, 阮双琛, 杨建军 *et al.* 光子学报, 1997, 26(3):193 ~ 195
- 9 Yamakawa K, Chiu P H, Magana A *et al.* IEEE J Q E, 1994, 30(11):2698 ~ 2703
- 10 Sullivan A, Bonlie J, Price D F *et al.* Opt Lett, 1996, 21(8):603 ~ 605
- 11 Lemoff B E, Barty C P J. Opt Lett, 1993, 18(19):1651 ~ 1653
- 12 友 清. 激光与光电子学进展, 1995, 6:21 ~ 22
- 13 Lenzer M, Spielmann Ch. Opt Lett, 1995, 20(12):1397 ~ 1399
- 14 Blanc C L, Grillon G. Opt Lett, 1993, 18(2):140 ~ 142
- 15 Sullivan A, Hamster H. Opt Lett, 1991, 16(18):1406 ~ 1408
- 16 Barty C P J, Gordon III G L, Lemoff B E. Opt Lett, 1994, 19(18):1442 ~ 1444
- 17 Zhou J P, Huang Ch P, Murane M M *et al.* Opt Lett, 1995, 20(1):64 ~ 66
- 18 Barty C P J, Guo T, Blanc C L *et al.* Opt Lett, 1996, 21(9):668 ~ 670
- 19 Chambaret J P, Blanc C L, Curley P *et al.* Opt Lett, 1996, 21(23):1921 ~ 1923
- 20 Yamakawa K, Aoyama M, Barty C P J *et al.* Opt Lett, 1998, 23(7):525 ~ 527
- 21 Backus S, Peatross J, Huang Ch P *et al.* Opt Lett, 1995, 20(19):2000
- 22 Fu Q, Seier F, Gayen S K. Opt Lett, 1997, 22(10):712 ~ 714
- 23 Sartania S, Cheng Z, Lenzer M *et al.* Opt Lett, 1997, 22(20):1562 ~ 1564
- 24 Backus S, Durfee III C G, Mourou G *et al.* Opt Lett, 1997, 22(16):1256 ~ 1258
- 25 Nabekawa Y, Kuramoto Y, Togashi T *et al.* Opt Lett, 1998, 23(17):1384 ~ 1386
- 26 Rouger C, Mourou G, Migus A *et al.* Opt Lett, 1993, 18(23):214 ~ 216
- 27 Stuart B C, Perry M D, Miller J *et al.* Opt Lett, 1997, 22(4):242 ~ 244
- 28 友 清. 激光与光电子学进展, 1995, (7):6
- 29 张 杰. 物理原理技术应用, 1997, 26(11):643 ~ 649
- 30 Barty C P J. L F World, 1996, 93 ~ 106
- 31 Zhou J, Peatross J. Phys Rev Lett, 1996, 76:752
- 32 Gordon III G L, Yin G Y. Opt Lett, 1995, 20:1056 ~ 1058
- 33 Ting A. Phys Plasmas, 1997, 18(4):89
- 34 Gordon D. Phys Rev Lett, 1998, 80(10):2133 ~ 2136
- 35 Zepf M. Phys Plasmas, 1996, 3:3242
- 36 徐至展, 王迎松, 翟 侃 *et al.* 中国科学(A辑), 1999, 29(3):270 ~ 273
- 37 从 征. 激光与光电子学进展, 1999, (4):6 ~ 12
- 38 Chang Z H, Rudquist A, Wang H *et al.* Phys Rev Lett, 1997, 78(16):2967

作者简介:曹东茂,男,1975年3月出生。硕士。现从事超短激光脉冲放大研究。

收稿日期:1999-06-28 收到修改稿日期:1999-11-20