

文章编号:1002-2082(2000)02-0007-06

飞秒、太瓦级钛宝石激光系统^{*}

曹东茂¹, 任兆玉^{1,2}, 杨志勇¹, 侯洵^{1,2,3}

(1. 西北大学, 陕西 西安 710069; 2. 西北工业大学, 陕西 西安 710072;

3. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710068)

摘 要:本文综述基于啁啾放大技术的飞秒 TW 级钛宝石激光系统的发展概况及最新进展, 在详细分析其应用前景的基础上, 进一步指出了这一技术的发展趋势。

关键词:啁啾放大技术; 飞秒; TW 级; 钛宝石激光系统

中图分类号:TN 248.1

文献标识码:A

引言

自 1982 年掺钛蓝宝石晶体问世以来, 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产生的最短超短光脉冲脉宽已几乎接近理论极限 $3f_s$ ^[1]; 而峰值功率可高达 $100TW$ ^[2], 特别是运用钛宝石和高储能大孔径介质 (如钽玻璃) 相结合, 可达到拍瓦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 (f_s 量级), 输出功率高, 波长调谐范围宽 (可从红外到可见光调谐)。尤为重要的是采用倍频技术, 可使其调谐范围从近红外扩展到紫外以至真空紫外。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。

啁啾放大技术是产生大能量超短脉冲的重要手段。为了避免光放大器受到光脉冲强

度的限制, 最初是由 D. Strikland 和 G. Mourou 将 E. Brokner 进行雷达信号放大的理论首次用于光学领域。1990 年, Jeff Squier 等人将其第一次应用于全钛宝石激光器, 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。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。本文将系统地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

收稿日期:1999-08-20

基金项目:国家攀登计划“飞秒脉冲放大系统的研究”项目和陕西省自然科学基金资助课题

作者简介:曹东茂(1975-), 男(汉族), 西北大学研究生, 现在西北大学光子学与光子技术研究所从事超短激光脉冲放大技术研究。

中国知网 <https://www.cnki.net>

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; 同时也可由增益介质更有

效地提取能量, 用负啁啾将脉冲压缩, 从而获得高峰值功率的超短光脉冲输出。啁啾放大的原理简图如图 1 所示。它通常由 4 个部分组成: 1) 超短脉冲振荡器; 2) 脉冲展宽

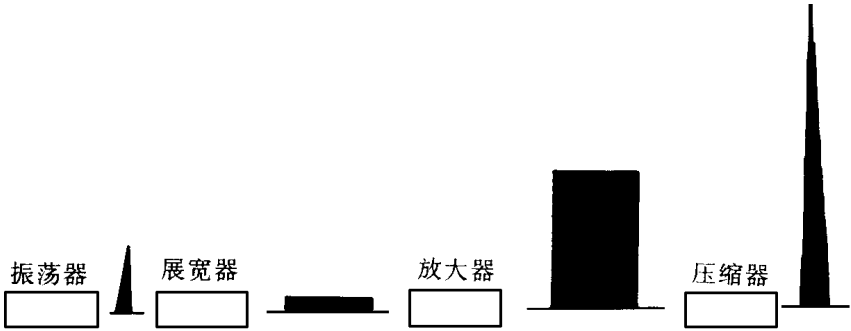


图 1 超短光脉冲展宽放大压缩原理示意图

器; 3) 脉冲放大器; 4) 脉冲压缩器。
目前利用“克尔透镜锁模+啁啾腔镜技术”的钛宝石飞秒激光器, 可产生小于 10fs 的激光脉冲, 为啁啾放大系统提供了极好的种子源。

啁啾放大技术的脉冲展宽器一般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^[3], 其原理如图 2 所示。入射的激光

首先被光栅衍射, 造成不同频率的色散, 光栅对的放置使得脉冲中的蓝光(高频成分)比红光(低频成分)的光程长, 结果其中的红光(低频成分)要先离开该系统, 这样初始脉冲就得到了展宽。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。为此, 在

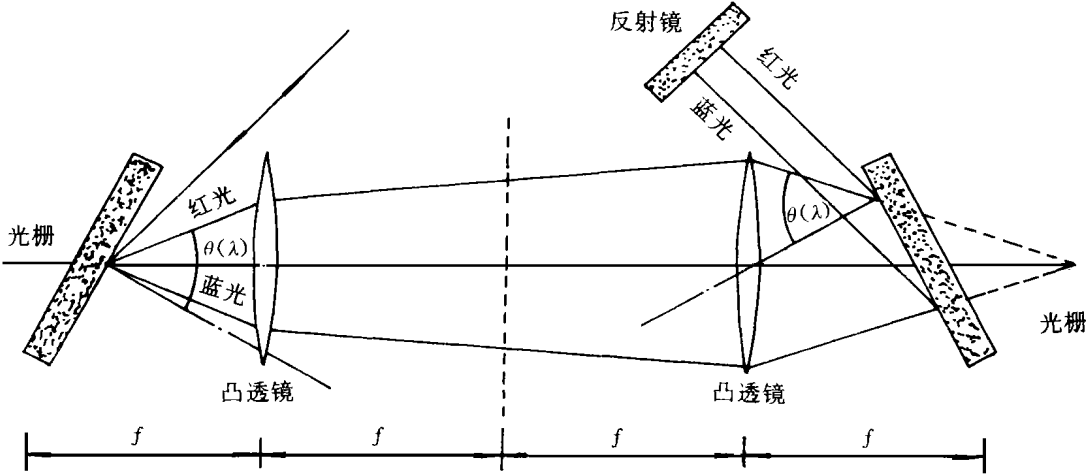


图 2 典型光栅展宽器的结构及原理

展宽器设计中应尽量少用折射光学元件。

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, 如图 3 所示。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 8-10 次), 从而使增益介质粒子反转数得以充分利用的方式, 如图 4 所示。其突出优点

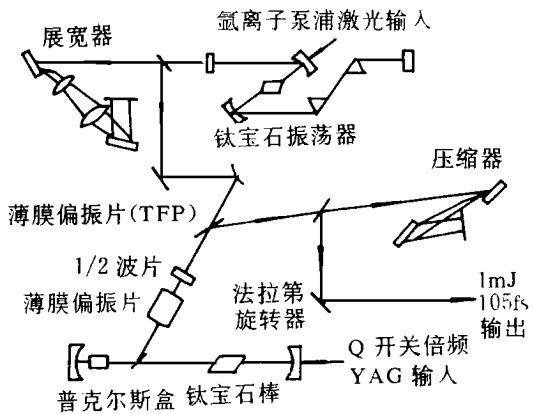


图 3 典型的再生放大结构及原理

是波长调谐容易, 可高反差单脉工作。由于再生放大的增益较高, 所以在传统的放大结构中, 通常用再生放大先将光脉冲预放大到毫焦量级, 再结合多通放大进行放大。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化, 因此限制了小于 30~50fs 超短光脉冲的放大及输出光脉冲的大范围调

谐。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。所以, 当前在获得极高峰值功率超短光脉冲时, 通常只采用多级多通放大器相串联的结构型式。

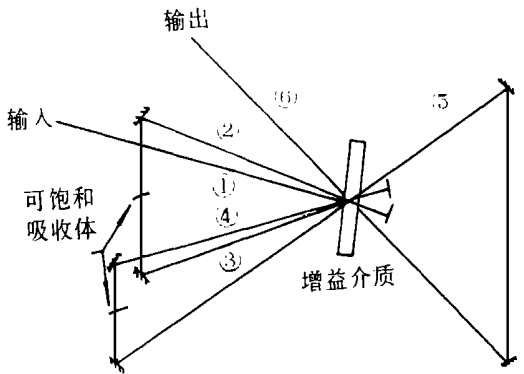


图 4 典型的多通放大结构及原理

啁啾展宽的光脉冲经过放大后需要被压缩恢复原来的形状, 因此通常采用光栅对结构, 其典型示意图如图 5 所示。原理上它可以完全补偿由于光栅展宽器对脉冲引进的时间展宽效应, 得到理想的压缩脉冲。实际上, 放大过程中其它光学元件也要引进一个附加的色散, 这主要通过调节压缩器中入射光线在光栅上的入射角度以及光栅对间距

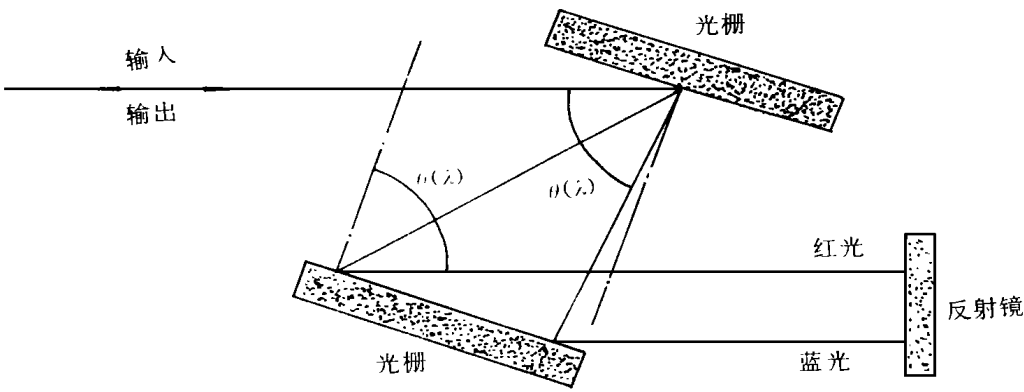


图 5 典型的光栅对压缩结构及原理

来得到补偿, 但一般很难彻底消除。

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, 其输出激光脉宽不断缩短, 从皮秒到亚皮秒, 到 1991 年已

达到 fs 量级。同时, 伴随着啁啾放大技术的应用, 脉冲的峰值功率也迅速提高目前已达到了 TW 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, 而对

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，重复率从几赫兹到几千赫兹的 fs、TW 级钛宝石激光器已相继研制出来。1991 年，加利福尼亚大学的 A·Sullivan 等人采用四阶 Ti: Al₂O₃ 放大器，获得了 3TW、95fs 的高峰值输出；1994 年，斯坦福大学的 C·P·J Barty 等人首次通过控制飞秒尺度上的相位和振幅畸变，在重复率为 10Hz 时，首次获得了低于 50fs 的 4TW、30fs 高峰值功率超短脉冲^[4]。同年，华盛顿州立大学的 Jianping Zhou 等人只采用多通放大器，在重复率为 10Hz 时，获得了相对以前在获得 30-40fs TW 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^[5]。1995 年，加利福尼亚的 A·Sullivan 等人又用倍频钕玻璃激光泵浦钛宝石放大器，获得了 120fs、9.8TW 的高峰值功率输出^[3]。同年，加利福尼亚大学圣地亚哥分校的 C·P·J·Barty 等人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 TW 级脉冲^[6]。1996 年，法国的 J·P·Chambaret 等人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 10⁴ 的无相差展宽和压缩系统，在重复率为 10Hz 时，获得了 35fs、25TW 的当时最高峰值功率，聚焦强度达到 $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ ^[7]。1997 年，日本原子能研究所高等光子研究中心的 K·Yamakawa 和加利福尼亚大学的 C·P·Barty 等人合作，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^[8]。次年 K·Yamakawa 等人又用三阶 Ti: Al₂O₃ 放大器，在重复率为 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^[2]。重复率大于 50Hz 的高峰值功率超短脉冲钛宝石激光器的发展

相对较慢，主要集中在 1kHz。其中比较典型的有：1995 年，华盛顿州立大学的 S·Backus 等人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 处获得了 21fs、0.05TW 的较高峰值输出；1996 年纽约的 Q·Fu 和 S·K·Gayen 用再生放大和多通放大相结合在 1kHz 处获得了 94fs、脉冲能量 75mJ 的输出；当重复率在 250Hz 到 3kHz 调谐时，在 250Hz 和 500Hz 的脉冲能量大于 75mJ。1997 年，奥地利的 S·Sartania 和匈牙利的 K·Ferencz 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^[9]。同年，密歇根州大学的 Sterling Backus 等人采用瞬态频控光闸获得了 20fs、0.2TW 的输出^[10]。1998 年，东京大学的 Y·Nabekawa 等人通过在再生放大器谐振腔中插入棱镜补偿色散，在 1kHz 获得 21fs、0.66TW^[11]的最高峰值输出，代表了在较高重复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。如 1993 年法国的 C·Rouger 用 Ti: Al₂O₃/Nd: glass 混合系统产生了 440fs、50TW 的较高峰值输出^[12]。1996 年，加利福尼亚的 B·C·Stuart 等人采用优化的 Ti: Al₂O₃/Nd: glass 混合系统，获得了 395fs、125TW 近衍射极限光束^[13]。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^{21} W/cm^2 ^[1]。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，作为新一代的超短激光脉冲光源，也已得到了广泛的应用。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接近理论极限 3fs 的水平,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进入波长范围。更短脉宽脉冲的产生,应该是获得极短脉冲的一条有效途经。比如,当固体表面聚焦光强大于 $1.38 \times 10^{10} \text{W}$ ($1.38 \times 10^{18} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{fs}^2$ 相对论光强)时,已观察到高达75次的高次谐波,其在X射线波段的输出功率高达 $2.4 \times 10^7 \text{W}^{[14]}$,而且具有极好的相干性。若将其相位锁定,但有可能实现as激光器的运转。在这样短脉冲下,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。这样在对泵浦源要求不高的情况下,系统的重复率也可做得很高。

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Nd: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。同时,为了对几十焦以至几千焦的fs脉冲进行压缩和聚焦,必然进行新的光栅材料的研制,如近来发展的高损坏阈值ZnS电介质衍射光栅。

脉宽的缩短、峰值功率的提高、重复率的增大,最根本的障碍是在蓝绿光谱范围缺乏合适的泵浦激光源。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,它已在许多领域获得了广泛的应用,如高次谐波的产生、高密度等离子体的研究、短波长激光器的研制、超快软、硬X射线的产生、多光子电离、超快光谱、振动弛豫、质子和电子转移、超快化

学反应动力学。其中比较引人注目的应用有:利用高峰值功率超短脉冲激光极高的电场强度进行电子加速,已有将电子加速到 100MeV 的报道,这极可能引起加速器物理的一场革命;用超强超短激光脉冲与固体靶相互作用,可产生能量大于 100keV 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^[14]。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。在气体高次谐波产生实验中,已观察到Ar气可分辨的第81次最高次谐波辐射(相应波长 9.69nm),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 7.33nm),不可分辨谐波辐射不低于131次(相应波长短于 5.99nm)。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 $3\text{nm}^{[15]}$ 。这一波长已进入了“水窗”波段,为在“水窗”进行细胞活组织无损高对比度检测提供了可能。这将为最终解开生命之迷提供理想的工具,从而有可能对生命科学和其他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。但是,人们仍在不懈地努力,力图使其性能最佳化和发挥出其特有的优势,国内外目前正在进行各种新型振荡器、放大器等激光器件的开发与研制等。当前进一步的研究工作将是产生TW到PW以至PW以上的峰值输出,同时使其脉宽再进一步缩短,以突破阿秒量级。这就需要人们进行理论上的探讨,同时进行实验手段的更新与改进,加紧更加优秀的新型非线性光学材料研制与开发工作的步伐,只有这样才有可能取得突破性的进展。特别是由于大功率激光脉冲在科

学技术的许多研究领域 (如激光武器、激光受控热核反应等) 都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重点攻关, 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] Eric J Lerner. Ultrafast lasers deliver powerful precise pulse [J]. Laser Focus World, 1998, 34 (12): 77-84.
- [2] K Yamakawa. 100-TW sub-20-fs Ti : sapphire laser system operating at a 10Hz repetition reate [J]. Opt Lett, 1998, 23 (18): 1468-1470.
- [3] A Sullivan, et al. 1. 1-J, 120fs laser system based on Nd : glass pvmpe Ti : sapphire [J], Opt Lett, 1996, 21 (8): 603-605.
- [4] C P J Barty, et al. Multiterawatt 30-fs Ti: sapphire laser system [J]. Opt Lett, 1994, 19 (18): 1442-1444.
- [5] Jianping Zhou, et al. Amplification of 26-fs 2TW pulses near the gain-narrowing limit in Ti : sapphire [J]. Opt Lett, 1995, 20 (1): 64-66.
- [6] C. P. J. Barty, et al. Generation of 18-fs, multiterawatt pulses by regenerative pulse shaping and chirped-pulse amplification [J]. 1996, 21 (9): 668-670.
- [7] J P Chambaret, et al. Generation of 25-TW, 32fs pulses at 10Hz [J]. Opt Lett, 1996, 21

(23): 1921-1923.

- [8] K Yamakawa, et al. Generation of 16-fs, 10-TW pulses at a 10Hz repetition rate with efficient Ti : sappire amplifiers [J]. Opt Lett, 1998, 23 (7): 525-527.
- [9] S Sartania, et al. Generation of 0. 1-TW 5-fs optical pulses at a 1kHz repetition rate [J]. Opt Lett, 1997, 22 (20): 1562-1564.
- [10] S Backus, et al. 0. 2-TW laser system at 1kHz [J]. Opt Lett, 1997, 22 (16): 1256-1258.
- [11] Y Nabekawa, et al. Generation of 0. 66-TW pulses at 1kHz by a Ti : sappire laser [J]. Opt Lett., 1998, 23 (17): 1384-1384.
- [12] C Rouger, et al. Generation of 50-TW femtosecond pulses in a Ti : sappire/Nd : glass chain [J]. Opt Lett, 1993, 18 (23): 214-216.
- [13] B C Stuart, et al. 125-TW Ti : sappire/Nd : glass laser system [J]. Opt Lett, 1997, 22 (4): 242-244.
- [14] C P J Barty. Ten-Femtosecond amplifier creates multiterawatt pulses [J]. Laser Focus World, 1996, 93-106.
- [15] 徐至展, 王迎松, 翟侃等. 45fs 钛宝石强激光场中 Ar 与 Ne 气的高次谐波辐射的实验研究 [J]. 中国科学, A 辑. 1999, 29 (3): 270-273.

FEMTOSECOND、TERAWATT LEVEL TI : SAPPIRE LASER SYSTEM

CAO Dong-mao¹, REN Zhao-yu^{1, 2}, YANG Zhi-yong¹, HOU Xun^{1, 2, 3}

(1. North West University, Xian 710069, China; 2. North West Polytechnic University, Xian 710072, China; 3. Xian Institute of Optics and Precision Macmics, the Academy of Scienoe of China, Xian 710068, China)

Abstract: The general developing condition and the new imporant advance of femtosecond pulse, TW level Ti : sapphire laser based upon CPA techniques is systematically summarized. On the basis of analysing its application in the future in detail, the developing trend and tendency of this field mentioned above in the future is pointed out.

Keywords: CPA technique; femtosecond; TW level; Ti : sappire laser system