

高功率钛宝石激光放大系统的研究进展

卢兴强 范滇元

(高功率激光物理国家实验室,中国科学院上海光机所,上海 201800)

提 要 总结了高功率钛宝石激光放大系统的研究成果及研究状况,并展望了今后的发展方向和发展趋势。

关键词 啁啾脉冲放大, 钛宝石激光放大器, 超强超短脉冲

1 引言

钛宝石(Ti:sapphire)晶体是P. F. Moulton在1982年发现的^[1],它具有增益谱线宽,受激发射截面大、激光损伤阈值高等优点,已成为产生超强超短脉冲输出的优质激光晶体之一。利用自锁模技术实现的钛宝石超短脉冲激光器,目前已获得脉宽5fs(1fs=10⁻¹⁵s)谱宽400nm左右的超短脉冲输出^[2-4],并基本上取代染料激光器在超短脉冲激光领域中的位置,成为最主要的超短脉冲激光振荡源。钛宝石激光振荡器虽然能够产生宽度在飞秒量级的脉冲,但其能量小,相应地峰值功率并不高,无法满足它在强场物理等研究领域中的应用。因此有必要开发大能量、高峰值功率的超强、超短脉冲技术,以便应用于激光烧蚀、等离子体物理和X射线产生等领域的研究^[5]。啁啾脉冲放大(CPA)是目前超短脉冲激光放大系统中广泛采用的技术,它是在1985年由D. Strickland首先提出的^[6]。基本原理是在放大前首先用展宽器把超短脉冲展宽到纳秒

(10⁻⁹)或亚纳秒量级,然后把展宽后的长脉冲进行放大,放大完成后再用压缩器把放大后的长脉冲压缩,就可获得大能量、高峰值功率的超强超短激光脉冲输出。CPA技术能有效克服脉冲自聚焦等非线性效应对脉冲放大的限制,可大大提高超短脉冲的放大质量和放大效率。把CPA技术和目前大尺寸、高质量的固体放大介质相结合,就能产生峰值功率达TW(10¹²W),甚至PW(10¹⁵W)量级的超强超短脉冲^[5]。钛宝石激光放大系统就在CPA技术提出后逐步得到重视和发展,目前它能输出的最高峰值功率达

200TW^[30],是一种在各研究领域中使用最普遍的超短脉冲激光放大系统。

2 钛宝石的放大特性

利用CPA技术对超短激光脉冲进行放大,一个基本要求是放大系统中使用的增益介质应具有足够宽的荧光谱,以减小增益变窄效应对放大脉冲频谱产生的畸变^[7]。目前适合于放大超短脉冲的增益介质主要有钛宝石(Ti:sapphire)、钕玻璃(Nd:glass)、Cr:LiSrAlF₆(或Cr:LiSAF)和Cr:forsterite等四种,它们的发射谱及其它激光特性分别

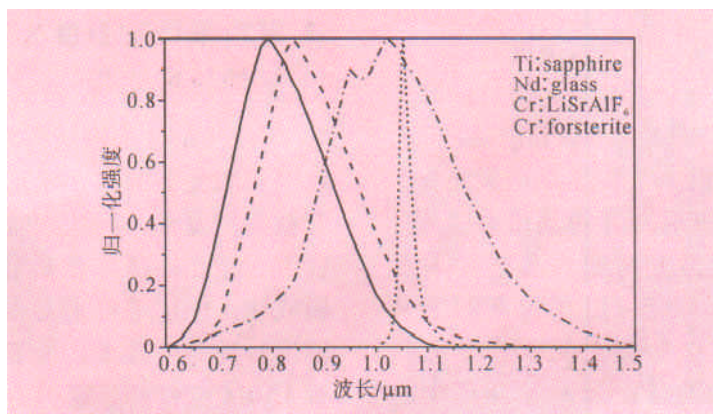


图1 不同放大介质的荧光发射谱示意图

收稿日期2002-05-15

作者简介:卢兴强(1973~),男,中国科学院上海光机所在读博士

表1 不同放大介质的部分激光特性

增益介质	抽运光波段 / μm	受激发射波长 / μm	发射截面 / $\times 10^{-19}\text{cm}^2$	荧光寿命 / μs	热导率 / $\text{W}/(\text{mK})$
Ti:sapphire	0.45~0.6	0.792	3.8	3.2	34
Nd:glass	0.425~0.434	1.053	0.4	300~500	1.1
Cr:LiSrAlF ₆	0.6~0.7	0.845	0.33	88	1.68
Cr:forsterite	0.88~1.1	1.2	2.5	3	8

如图1和表1所示^[8-11]:

这四种放大介质中,钕玻璃的频谱窄,受激发射截面小,能放大的脉冲最短为亚皮秒量级;但由于其上能级寿命长,容易获得体积大、光学均匀性好的材料,可以通过增加光束口径来获得高能量激光脉冲输出。因此,钕玻璃也是一种常用的CPA增益介质。高功率钕玻璃激光放大系统可应用于惯性约束聚变研究,早在1993年就实现了峰值功率55TW、脉宽440fs,能量24J的脉冲输出^[12],目前它已能获得峰值功率达拍瓦量级的放大脉冲输出^[13]。Cr:LiSrAlF₆的发射谱比钛宝石宽,能用来放大飞秒脉冲^[14-15]。但它的受激发射截面小,热导率低,放大系统在输出峰值功率较高时脉冲重频率小于1Hz,无法满足医学和生物等研究领域的需要,近年来文献对其报道已不多。Cr:forsterite基频光在1.13-1.367 μm 波段范围内可调谐,利用它不仅可向近红外波段拓宽钛宝石激光的调谐范围,而且对其基频光倍频后可以弥补钛宝石激光基频和倍频之间的波段空白。Cr:forsterite激光放大器在最近几年才得到研究^[16-17],它的受激发射截面和热导率都较高,系统可以在较高的重复率下工作;但它的吸收波段和发射波段有重合,脉冲放大时存在激发态吸收^[18],从而导致其放大效率较低。目前,峰

值功率达太瓦的Cr:forsterite激光放大系统还未见报道。

钛宝石晶体是一种最优秀的超短脉冲激光放大介质,它具有三个优点:一是激光荧光宽度足够宽,在理论上支持对飞秒量级的超短脉冲进行放大;二是受激发射截面大,激光损伤阈值较高,导热性能好,能在较小体积范围内对脉冲进行放大,并且脉冲输出重复率可以比较高;三是钛宝石在波长532nm附近具有大的吸收截面,能采用目前发展成熟的Nd:YAG或Nd:YVO₄倍频激光器进行抽运,从而有利于提高脉冲放大效率和降低放大系统的体积。钛宝石基于上述优点而成为CPA激光放大系统使用的主流放大介质,用它实现的超短脉冲激光放大系统结构紧凑、体积小、易商品化,受到了人们的广泛注意。

3 高功率钛宝石激光放大系统的研究成果

在CPA技术刚被提出来时,钛宝石激光器的自锁模现象还没有被人们发现,因此当时的脉冲钛宝石激光振荡源是采用主动锁模或注入锁定等技术实现的,其输出脉冲宽度较大,最窄脉宽只有150fs左右^[18]。这种激光振荡源的发展水平在CPA技术刚被提出时限制了钛宝石激光放大系统

的迅速发展。直到1990年,D. E. Spence等人发现了钛宝石激光器中的自锁模现象^[19],并率先把钛宝石激光振荡源的输出脉冲宽度降低到60fs后,钛宝石激光放大系统才进入迅速发展时期。利用体积小、结构紧凑、输出宽度在几飞秒或几十飞秒量级的自锁模钛宝石激光振荡源,结合大尺寸、高质量的固体增益介质,采用CPA技术就可以把超短脉冲的峰值功率再提高6~7个数量级,实现太瓦到拍瓦量级的超强超短脉冲输出。

目前研制成功的高功率钛宝石激光放大系统主要有两类:一类输出脉冲重复率在千赫量级,单脉冲能量一般在毫焦耳量级,主要用于探索、获取物质超快信息的研究;另一类脉冲重复率较低,一般在10Hz左右,但输出脉冲能量大、峰值功率高,可应用于强场物理等方面的研究。目前文献报道重复率为1kHz的钛宝石激光放大系统输出脉冲聚焦后的功率密度一般在 $10^{16}\sim 10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ 之间,最高峰值功率可达0.66TW^[20],重复率为10Hz的钛宝石激光放大系统的输出峰值功率最高已达100TW^[30],聚焦后功率密度高达 $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ 。尤其是美国里弗莫尔实验室研制的200TW钛宝石激光放大装置^[28],虽然其重

表2 钛宝石激光放大系统的研究成果

研制单位	放大脉冲输出指标	光束质量M ²	报道时间
日本东京大学	0.66TW/21fs/1kHz	1.5	1998
美国华盛顿州立大学	0.05TW/21fs/1kHz	1.8	1995
美国Quantronix公司	0.05TW/94fs/1kHz	1.3	1997
美国德拉瓦大学	0.09TW/64fs/1kHz	~1	2001
美国加利福尼亚大学	4.4TW/18fs/50Hz	~1	1996
美国华盛顿州立大学	2TW/26fs/10Hz	1-2	1995
美国斯坦福大学	4TW/30fs/10Hz	~1	1994
美国密西根大学	40TW/24fs/10Hz	1.2	1999
美国里弗莫尔实验室	200TW/75fs/1Hz	2.2	1999
日本东京大学	13TW/26fs/10Hz	1.4	1997
日本原子能所	100TW/19fs/10Hz	2-2.5	1998
法国 ENSTA	30TW/27fs/10Hz	~1	1997
上海光机所	15TW/35fs/10Hz	1.5	2001
北京物理所	1.4TW/25fs/10Hz	***	1999
天津大学	1.4TW/38fs/10Hz	***	2000

复频率较低(1Hz),但聚焦后的激光脉冲功率密度高达 $10^{21}W/cm^2$,是目前钛宝石激光装置获得的最好结果。表2给出了文献报道中的部分研究成果^[20-33]。

4 钛宝石激光放大系统的组成单元

钛宝石激光放大系统主要包括五个单元,分别为脉冲振荡源、抽运源、脉冲展宽器、脉冲放大器和脉冲压缩器。它们在实际放大系统中的排布如图2所示^[27]。

当系统工作时,由振荡源产生的超短脉冲,经展宽器展宽后,再进入放大器单元进行放大。放大器单元一般有多级放大器组成,脉冲依次进入各级放大器进行放大,完成后再由压缩器把其脉冲宽度压缩回初始宽度,从而获得所需的超强超短脉冲输出。上述五个组成单元中,脉冲

振荡源一般为可调谐钛宝石飞秒脉冲激光器,输出脉宽一般小于30fs;抽运源一般采用高功率调Q Nd:YAG(或Nd:YVO₄)二

倍频激光器,输出脉冲波长为532nm,宽度为几十纳秒;脉冲展宽器、脉冲放大器和脉冲压缩器是高功率激光放大系统中较为核心的部分,下面分别对其进行说明。

4.1 脉冲展宽器

脉冲展宽器把从激光振荡源输出的超短脉冲展宽成长啁啾脉冲,在工作时一般对注入脉冲产生正啁啾^[6]。在CPA技术刚被提出时,脉冲展宽器是由光纤构成的,这种展宽器不仅光耦合困难、激光损伤阈值低,而且在展宽中会对脉冲引入非线性啁啾,因此很难达到和压缩器相匹配的目的。钛宝石激光放大系统使用的脉冲展宽器一般由光栅组成,它是1987年由O. E. Martinez首次提出^[34],具体结构是在传统的双光栅压缩器中引入了一个1:1望远镜系统。使用光栅展宽器主要有两个优点:一是光栅色散能力强,可以把超短脉

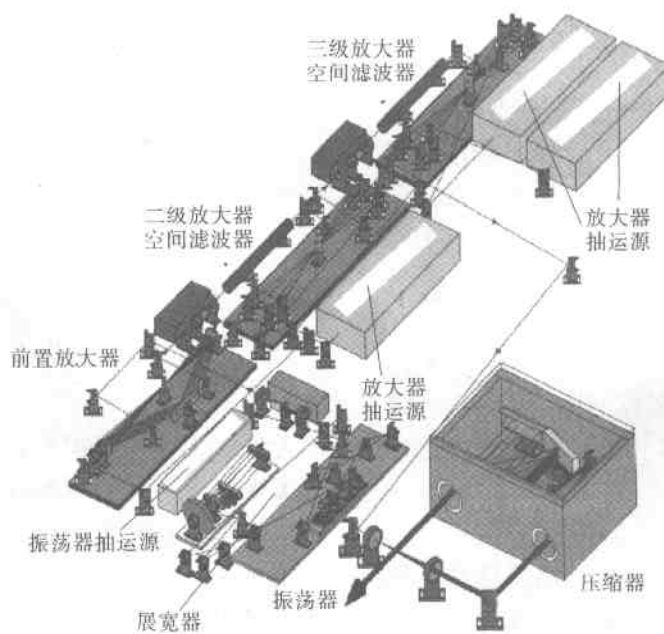


图2 高功率钛宝石激光放大系统装置图(美国密西根大学,占地6.5m²、输出40TW/24fs/10Hz)

冲展宽 10^4 倍以上;二是利用相同规格的光栅对做脉冲展宽器和压缩器在理论上完全匹配,压缩后的放大脉冲可以达到其在展宽前的脉冲宽度和脉冲信噪比^[35]。基于上述两个优点,光栅展宽器目前已成为激光放大系统中使用最广的脉冲展宽设备。

钛宝石激光放大系统使用的种子源脉冲宽度一般在几飞秒到几十飞秒,要求脉冲展宽器不能对注入脉冲引入色差,以避免放大后的脉冲无法压缩回其原来宽度,从而导致脉冲质量下降。为降低超短脉冲在展宽中被引入的色差,G. Cheriaux等人基于Öfner的发明专利^[36],在1996年提出一种无色差脉冲展宽器^[37],它是利用抛物柱面反射式Öfner望远镜结构代替O. E. Martinez在展宽器中使用的透射式1:1望远镜系统,由光栅、柱面凸反射镜、柱面凹反射镜和屋脊棱镜组成的(图3)。无色差脉冲展宽器不仅排除了其它展宽器所固有的色差,而且避免了脉冲在展宽中被引入的空间啁啾,目前广泛应用到钛宝石激光放大系统。国际上利用反射式Öfner望远镜结构设计的脉冲展宽器,获得最大展宽倍数的是日本原子能所,他们把10fs脉冲展宽17万倍后获得了1.7ns的脉冲输出^[30]。国内中科院物理所设计的无色差脉冲展宽器,可以把13fs的脉冲展宽到930ps,展宽倍数达到7万^[32]。

4.2 脉冲放大器

振荡源输出的超短脉冲能量一般在毫焦耳量级,要得到峰值功率达太瓦量级的超强脉冲一般需要对脉冲放大8~9个数量级,如此高的放大倍数用一块钛宝石晶

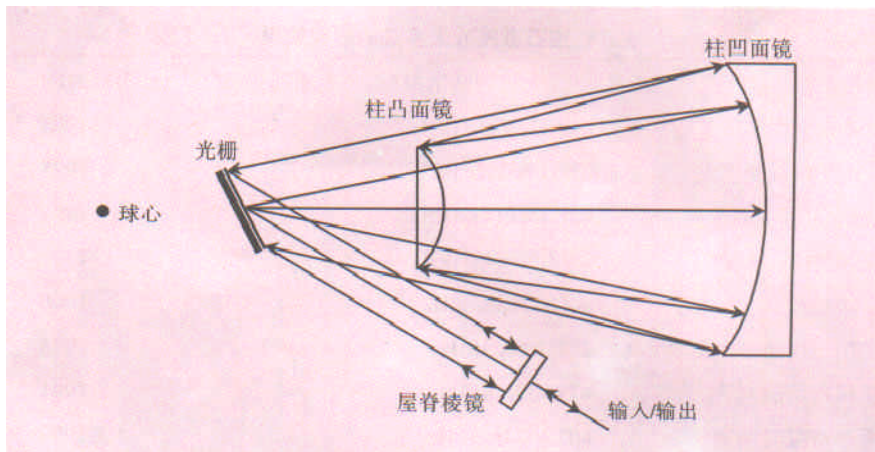


图3 Öfner望远镜型脉冲展宽器

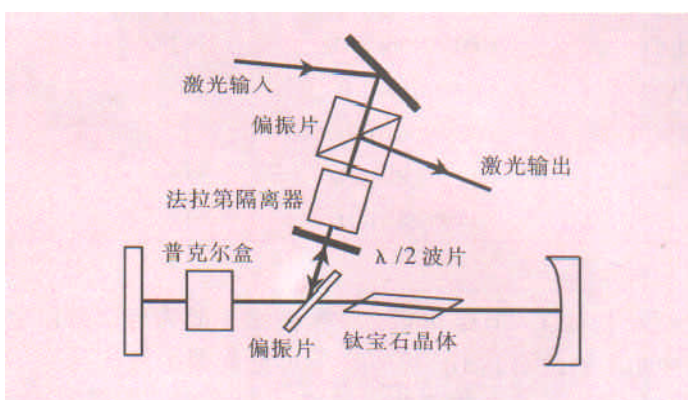


图4 再生放大器示意图

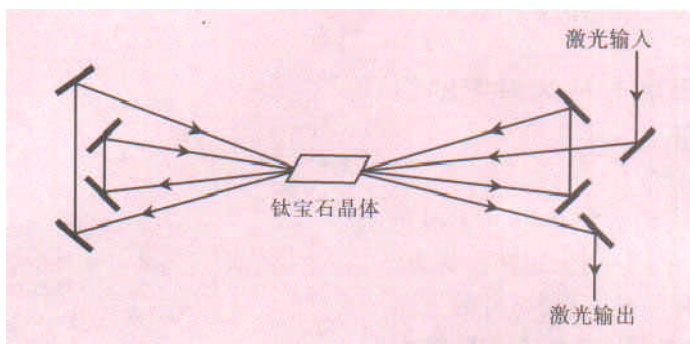


图5 多程放大器示意图(4程)

体无法实现,一般需要对脉冲进行多级放大,并要求脉冲能在同一块晶体中反复进行放大。基于上述考虑,脉冲放大器按工作方式可分为再生放大和多程放大两种。再生放大是把脉冲引入一个稳定的谐振腔进行放大,放大完成后用电光装置把脉冲引出来。

多程放大是利用反射镜把光束折叠,让折叠后的光束分别以不同角度通过同一块增益介质进行放大。它们的具体结构分别如图4和5所示。

再生放大脉冲可以在谐振腔中来回放大多次,每次的放大倍数较小,输出脉冲质量较

高；多程放大脉冲通过放大介质的次数较少（一般小于10次），因此每次的放大倍数较高。在这两种放大方式中，再生放大需要的光学元件多，对放大脉冲产生的高阶色散大，因此不适宜直接放大脉宽小于20~30fs的脉冲。多程放大对脉冲引入的高阶色散少，增益变窄轻，因此更适用于对超短脉冲进行放大。法国ENSTA采用三级多程放大实现30TW的钛宝石激光装置中^[31]，在注入脉冲宽度为30fs时，完成放大并压缩后的脉冲宽度仍能到30fs，是目前色散补偿最好的高功率激光系统，它验证了多程放大器在放大超短脉冲方面的优势。

目前很多钛宝石激光放大系统还是采用再生/多程放大器链实现的^[20, 22-24, 26, 28-30]。在放大系统中采用再生放大器可以对脉冲整形，从而消除增益变窄对脉冲产生的畸变，达到保持脉冲频谱宽度不变或有所增加的目的。再生放大器中的脉冲整形主要利用F-P标准具、色散棱镜和双折射滤光片来进行^[37]。文献^[30]获得的脉宽19fs，峰值功率达100TW的脉冲放大结果，就是在再生放大器中利用F-P标准具补偿掉增益变窄效应后得到的。多程放大的缺点之一是难于在脉冲放大过程中进行脉冲整形，不过文献^[32]在激光振荡源中采用特性化光谱设计技术，达到了补偿多程放大器中增益变窄效应的目的，从而为多程放大器的设计提供了另一种思路。

4.3 脉冲压缩器

超强超短脉冲激光放大系统对压缩器有两个要求：一是要

求压缩器能补偿展宽器、材料色散和压缩器本身对脉冲产生的高阶色散，以便获得更短的压缩脉冲；二是要求压缩器具有足够的损伤阈值和传输效率，以避免脉冲压缩过程中产生的超强超短脉冲对其本身产生破坏。目前，补偿高阶色散的方法主要有三种，它们是：在脉冲展宽和压缩之间应用不匹配光栅^[39]；在压缩器中使用变形镜^[40]和调整光束入射压缩器光栅的方向^[31]。提高压缩器激光损伤阈值和传输效率的方法有两种，即采用更高质量的衍射光栅和使用反射式光学元件设计压缩器。另外，为降低非线性效应对压缩脉冲的影响，以便得到更高质量的脉冲输出，脉冲压缩器在使用中一般要置于真空室中。

光栅压缩器是1969年由E. B. Treacy提出的^[41]，当时它由两块平行放置的光栅组成，脉冲从一端射入，经两块光栅先后衍射后由另一端射出。钛宝石激光放大

系统中使用的脉冲压缩器都是基于上述结构的，它一般由一块或两块大尺寸光栅组成，在压缩过程中脉冲在屋脊棱镜的作用下先后两次通过光栅，其结构分别如图6和图7所示。

美国密西根大学在其40TW钛宝石激光装置^[27]和美国里弗莫尔实验室^[28]在其200TW钛宝石激光装置中使用的脉冲压缩器，总体传输效率都达到了75%，是目前高功率钛宝石激光放大系统中使用的总体传输效率最高的脉冲压缩器。

5 发展展望

为满足强场物理等研究领域中的需求，钛宝石激光放大系统今后将向大能量、高峰值功率方向发展。钛宝石以其优秀的激光品质目前已具备产生峰值功率从EW（ 10^{18} W）到ZW（ 10^{21} W）量级、超强超短激光脉冲输出的条件^[42]。而获得高峰值功率放大脉

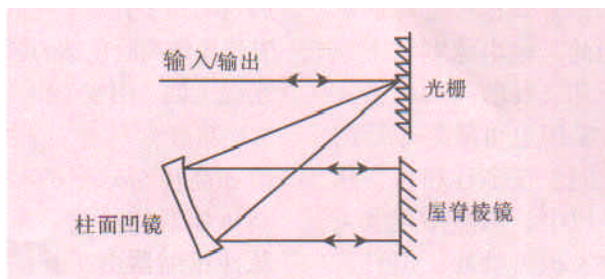


图6 单光栅压缩器

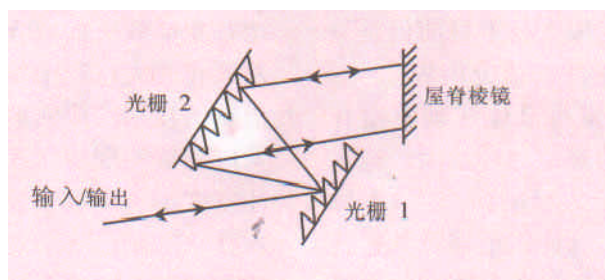


图7 双光栅压缩器

冲输出的一个有效途径是降低脉冲宽度,因此,输出脉宽在十几飞秒、甚至几飞秒的高功率钛宝石激光放大系统也可能是今后的一个研究方向。在多程和再生这两种放大手段中,虽然多程放大更适合于放大超短脉冲,但目前它仅实现了宽度在30fs左右的超短脉冲放大,宽度小于30fs的超短脉冲激光放大技术目前仍是一个很具挑战性的研究内容。

用钛宝石晶体实现宽度在10fs左右的超短脉冲放大,应进行下面几个方面的研究:1)脉冲展宽器、脉冲压缩器及其它各种光学元件应具备足够宽的通光范围,以避免放大脉冲频谱产生畸变;2)充分降低系统对放大

脉冲产生的高阶色散,或设计能补偿系统高阶色散的脉冲展宽/压缩系统(如采用变形镜压缩技术^[40]);3)发展大尺寸、高激光损伤阈值和高传输效率的衍射光栅,提高压缩器的传输效率,以便克服脉冲压缩器由于其损伤阈值低对研制高功率激光放大系统造成的技术瓶颈;4)研究能克服或补偿增益变窄效应的放大技术,或者发展在放大过程中均匀增加脉冲谱宽的技术,成熟的频谱增宽技术应能够实现使压缩后的输出脉冲宽度小于或等于放大系统的注入脉冲宽度。

6 结束语

高功率钛宝石激光放大系

统不仅结构紧凑、体积小(占地面积一般小于 10m^2),而且输出脉冲宽度小,峰值功率高、脉冲重复率高,能为强场物理等许多新型学科的研究提供所需的极端物理研究条件,因此。它是人们在激光烧蚀、X射线产生、团簇物理及高次谐波产生等研究领域认识探索和自然的必不可少的重要工具。可以预见:随着激光放大技术的发展,结构紧凑、体积小、峰值功率高且性能稳定的高功率钛宝石激光放大装置会日渐成熟,并不断应用于各种探索和认识世界的研究领域中,从而推动人类科学事业不断向前发展。

参考文献

- 1 P. F. Moulton. Spectroscopic and laser characteristics of $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$, *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985, **3**(1):125~132
- 2 D. H. Sutter, G. Steinmeyer, L. Gallmann *et al.*. Semiconductor saturable-absorber mirror-assisted Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser producing pulses in the two-cycle regime. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(9):631~633
- 3 U. Morgner, F. X. Kärtner, S. H. Cho *et al.*. Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(6):411~413
- 4 R. Ell, U. Morgner, F. X. Kärtner *et al.*, Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser, *Opt. Lett.*, 2001, **26**(6):373~375
- 5 M. D. Perry, G. Mourou. Terawatt to petawatt subpicosecond lasers, *Science*, 1994, **264**(3):917~924
- 6 D. Strickland, G. Mourou, Compression of amplified chirped optical pulses. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3):219~221
- 7 M. D. Perry, F. G. Patterson. Spectral shaping in chirped-pulse amplification, *Opt. Lett.*, 1990, **15**(7):381~383
- 8 干福熹. 玻璃的光学和光谱性质. 上海科学技术出版社, 1992年, 226~227
- 9 G. J. Linford, R. A. Saroyan, J. B. Trenholme *et al.*, Measurements and Modeling of gain coefficients for Neodymium laser glasses. *IEEE J. of Quantum Electron.*, 1979, **QE-15**(6):510~523
- 10 C. Spielmann, P. F. Curley, T. Brabec *et al.*, Ultrabroadband femtosecond lasers, *IEEE J. of Quantum Electron.*, 1994, **30**(4):1100~1114
- 11 N. V. Kuleshov, V. G. Shcherbitsky, V. P. Mikhailov *et al.*, Excited-state absorption and stimulated emission measurements in Cr^{3+} :forsterite. *J. Luminescence*, 1997, **75**(3):315~325
- 12 C. Rouyer, E. Mazzaud, I. Allais *et al.*, Generation of 50-TW femtosecond pulses in a Ti:sapphire/Nd:glass chain, *Opt. Lett.*, 1993, **18**(3):214~216
- 13 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*, Petawatt laser pulses. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3):160~162
- 14 T. Ditmire, M. D. Perry, Terawatt Cr:LiSrAlF_6 laser system. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(6):426~428
- 15 P. Beaud, M. Richardson, E. J. Miesak *et al.*, 8-TW 90fs Cr:LiSAF laser. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(18):1550~1552
- 16 V. Shcheslavskiy, F. Noack, V. Petrov *et al.*, Femtosecond regenerative amplification in Cr:forsterite , *Appl. Opt.*, 1999, **38**(15):3294~3297

- 17 J. M. Evans, V. Petricevic, R. R. Alfano. Kilohertz Cr:forsterite regenerative amplifier. *Opt. Lett.*, 1998, 1692, **23**(21): 1692~1694
- 18 S. G. Demos, V. Petricevic, R. R. Alfano. Up-converted luminescence and excited-state excitation spectroscopy of Cr⁴⁺ ions in forsterite. *Physical Review B*, **52**(3):1544~1548
- 19 D.E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbert. 60-fs pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser, *Opt. Lett.*, 1991, **16**(1):42~44
- 20 Y. Nabekawa, Y. Kuramoto, T. Togashi *et al.*. Generation of 0.66-TW pulses at 1kHz by a Ti:sapphire laser, *Opt. Lett.*, 1998, **23**(17):1384~1386
- 21 S. Backus, J. Peatross, C. P. Huang *et al.*. Ti:sapphire amplifier producing millijoule-level 21-fs pulses at 1kHz, *Opt. Lett.*, 1995, **20**(19):2000~2002
- 22 Q. Fu, F. Seier, S. K. Gayen *et al.*. High-average-power kilohertz-repetition-rate sub-100-fs Ti:sapphire amplifier system, *Opt. Lett.*, 1997, **22**(10):712~714
- 23 J. Z. H. Yang, B.C. Walker. 0.09-terawatt pulses with a 31% efficient, kilohertz-repetition-rate Ti:sapphire regenerative amplifier. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(7):453~455
- 24 C.P. J. Barty, T. Guo, C. L. Blanc *et al.*. Generation of 18-fs, multiterawatt pulses by regenerative pulse shaping and chirped-pulse amplification. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9):668~670
- 25 J. Zhou, C. Huang, M. M. Murnane *et al.*. Amplification of 26-fs, 2-TW pulses near the gain-narrowing limit in Ti:sapphire, *Opt. Lett.*, 1995, **20**(1):64~66
- 26 C. P. J. Barty, C. L. Gordon III, B. E. Lemoff, Multiterawatt 30-fs Ti:sapphire laser system. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(18): 1442~1444
- 27 H. Wang, S. Backus, Z. Chang *et al.*. Generation of 10-W average-power, 40-TW peak-power, 24-fs pulses from a Ti:sapphire amplifier system. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1999, **16**(10):1790~1794
- 28 F. Patterson, J. Bonlie, D. Price *et al.*. >10²¹W/cm² Laser based upon large aperture Ti:sapphire disk amplifier, *Conference on Lasers and Electro-optics, CLEO'99*, May 23-28, 1999, Baltimore, Maryland
- 29 J. Itatani, Y. Nabekawa, K. Kondo *et al.*. Generation of 13-TW, 26-fs pulses in a Ti:sapphire laser. *Opt. Commun.*, 1997, **134**(1):134~138
- 30 K. Yamakawa, M. Aoyama, S. Matsuoka *et al.*. 100-TW sub-20-fs Ti:sapphire laser system operating at a 10-Hz repetition rate. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(18):1468~1470
- 31 A. Antonetti, F. Blasco, J. P. Chambaret *et al.*. A laser system producing 5×10¹⁹/cm² at 10Hz, *Appl. Phys. B*, 1997, **65**(2): 197~204
- 32 魏志义, 张杰, 夏江帆等. 飞秒激光脉冲的高效率放大研究. *强激光与离子束*, 1999, 11(5):538~542
- 33 王清月, 张伟力, 王勇等. 飞秒激光啁啾脉冲放大过程中的放大自发辐射及其抑制. *中国科学A辑*, 2000, 30(5):456~462
- 34 O. E. Martinez. 3000 times grating compressor with positive group velocity dispersion: Application to fibre compensation in 1.3-1.6μm region. *IEEE J. of Quantum Electron.*, 1987, **QE-23**(1):59~64
- 35 M. Pessot, P. Maine, G. Mourou. 1000 times expansion/compression of pulses for chirped pulse amplification, *Opt. Commun.*, 1987, **62**(6):419~421
- 36 A. Öffner, U. S. Patent 3748015, 1971
- 37 G. Cheriaux, P. Rousseau, F. Salin *et al.*. Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(6):414~416
- 38 C. P. J. Barty, G. Korn, F. Raksi *et al.*. Regenerative pulse shaping and amplification of ultrabroadband optical pulses, *Opt. Lett.*, 1996, **21**(3):219~221
- 39 J. Squier, C.P. J. Barty, F. Salin *et al.*. Use of mismatched grating pairs in chirped-pulses amplification systems. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(9):1638~1641
- 40 E. Zeek, K. Maginnis, S. Backus *et al.*. Pulse compression by use of deformable mirrors. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(7):493~495
- 41 E. B. Treacy. Optical pulse compression with diffraction grating. *IEEE J. of Quantum. Electron.*, 1969, **QE-5**(9):454~458
- 42 T. Tajima, G. Mourou. Zettawatt-exawatt lasers and their applications in ultrastrong-field physics. *Physical Review Special Topics-Accelerators and Beams*, 2002, 5(3):031301-1~031301-9

Progress of high-power Ti:sapphire laser-amplifier system

LU Xingqiang FAN Dianyuan

(National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract The research results and status of high-power Ti:sapphire laser-amplifier systems are reviewed, and its development orientation and trend are prospected.

Key words chirped-pulse-amplification, Ti:sapphire laser amplifier, ultrahigh-intensity, ultrashort pulse

高能激光可在空间传输能量

得到美国航天总署先进技术部的支持,已认定空间太阳能的工作可以作为空间光基能量的基础,用太阳光作能源。使用高能激光器时,能量可以作为相干光通过自由空间传输。此计划的动机是:作为近地空间的能源,太阳光可以连续不断地提供几十亿太瓦的功率。另一动机为,它可以高空间精度和低功率损耗,将几十亿瓦功率传送到几千公里以外。

研究高能激光基本物理的最近工作发现,此种基础结构虽然现在昂贵得吓人,但在今后40年内则有付诸应用的可能^[1]。

将太阳能转换为相干光的问题与数据通讯的光转换相似。光子必须从天然光的量子态转换为光场量子态,近于可能最大的相干度。每个被转换光子的最低费用,以开关产生的热偿还,为 $kT \ln 2$, 此处 k 为玻尔兹曼常数, T 为开关温度。对于可获得的温度,其效率原则上可大于90%。与准单色光照明的光生伏打高效率(约65%)相结合,从太空向另一位置(例如地球)发送能量可实现约50%的效率。

需要新技术

主要的挑战为,集光结构需要千米级的面积,以获得吉瓦以上的功率水平。减少面积密度(每单位面积的质量)的设计得到重视,因为它可减少“送入轨道”的费用^[2]。在飞船中使用最小面积密度的Gossamer方针特别合乎要求,其预计的面积密度低达 $0.1 \sim 1.0 \text{ kg/m}^2$ 。

Gossamer激光设计使用12个谱带,所需的总系统面积约为 $20 L^2$, L 为锥形集光器的高度,单位为千米(图1)。其集光器壳很薄,可提供大的表面,而其面积密

度又最小。集光系统由多个转动反射镜列阵组成,排列成两个对称的锥形列阵。多个激光振荡器收集分布于细长激光结构(多色区)上主动反射镜传来的能量。所产生的相干光通过激光装置末端的输出耦合镜输出。

系统的经济生命力需要发展多种技术。其一为低损耗反射镜,其吸收率低于百万分之一,又可以使用几十年,承受的光强超过 1 kW/cm^2 。高级的计算机模拟,如用于这些大型太空结构光学系统的 ASAP 将颇有价值。另一需要为用于多个光谱带具有高透射/反

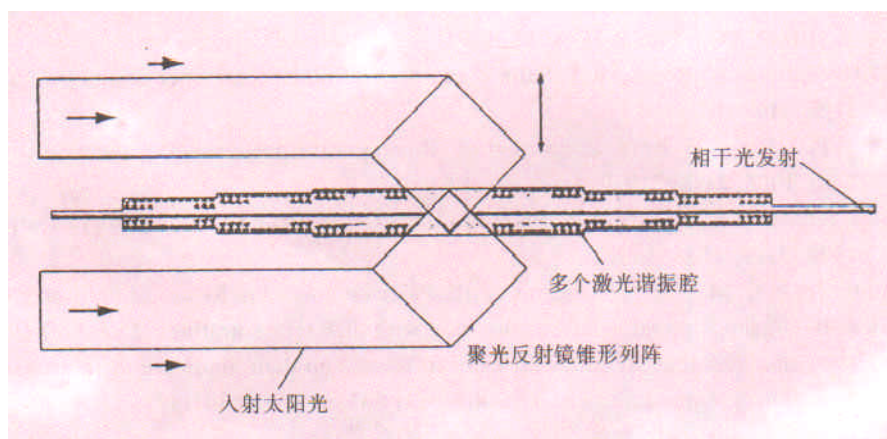


图1 Gossamer 激光器具有可调节反射镜列阵,可跟踪太阳,并将光谱分辨的阳光聚焦到薄盘放大器的分布列阵上。被放大激光束从薄盘放大器聚集功率