

文章编号: 0258-7025(2006)06-0721-09

超强固体激光及其在前沿学科中的应用(1)

彭翰生

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要 20 世纪 80 年代中期发展起来的啁啾脉冲放大(CPA)技术与先进的高功率激光技术及优良的激光增益介质相结合把激光峰值输出功率提高了几个数量级,出现了输出拍瓦级(10^{15} W)皮秒(10^{-12} s)和飞秒(10^{-15} s)脉冲的固体激光装置,聚焦峰值功率密度达到 $10^{20} \sim 10^{22}$ W/cm²。激光与物质相互作用的物理过程中,激光功率密度起主导作用,不同光强对应不同的物理学领域。如此高的激光功率密度能够在实验室中产生前所未有的极端物态条件,即超强电场、超强磁场和超高压强等,从而开创了崭新的强场物理领域,推动了相关学科的交叉融合,形成了多个前沿研究方向,如粒子加速、强辐射源、先进光源、阿秒物理、快点火聚变、超热物质、激光核物理、超快过程诊断、激光天体物理、非线性量子电动力学(QED)等,在材料科学、生命科学和医学等领域中也极具应用价值。

关键词 超强激光;啁啾脉冲放大;光参量啁啾脉冲放大;强场物理;前沿科学

中图分类号 TN 248 **文献标识码** A

Ultraintense Solid-State Lasers and Applications to the Frontiers of Sciences

PENG Han-sheng

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Peak output powers of solid-state laser facilities have tremendously increased by a few orders of magnitude since the middle of last eighties due to the combination of the technique of chirped pulse amplification (CPA), advanced high-power laser technologies and novel laser materials. Petawatt (PW) level laser facilities have been built for picosecond and femtosecond pulses with focused intensities of up to $10^{20} \sim 10^{22}$ W/cm². Laser intensities play dominant roles in understanding the physics of laser-plasma interactions and, therefore, different intensities open different physics areas to study. Such high laser intensities are able to produce extreme conditions: ultraintense electric and magnetic fields, and ultrahigh pressure, leading to the emerging of strong-field physics. A number of multidisciplinary frontiers have been explored, such as particle acceleration, intense radiation source, advanced light source, attosecond physics, fast ignition fusion, superhot matter, nuclear physics, ultrafast process diagnosing, laser astrophysics, nonlinear quantum electrodynamics (QED) and so on. Also, there exist invaluable potentials in material, biological and medical applications.

Key words ultraintense laser; chirped pulse amplification; optical parametric chirped pulse amplification; strong-field physics; frontier of science

1 引 言

自激光问世以来,提高可聚焦光强始终是激光技术发展所追求的目标之一。在过去数 10 年中,受激光聚变研究牵引,纳秒固体激光技术取得了举世瞩目的进展,国际上已经建成和正在建造多台大型激光装置,输出功率多在 $10^{12} \sim 10^{14}$ W 范围内,聚焦功率密度覆盖了 $10^{14} \sim 10^{16}$ W/cm²。20 世纪 80 年

代中期,啁啾脉冲放大技术(CPA)^[1]被成功地用来产生超短超强激光脉冲,开创了超强激光技术发展的新纪元。近年来,世界上诸多实验室纷纷建造这类激光装置。由于把激光脉冲宽度压缩到皮秒(10^{-12} s)和飞秒(10^{-15} s),较小的激光装置就能够输出数十至数百太瓦($1 \text{ TW} = 10^{12}$ W)甚至拍瓦级(10^{15} W)的激光脉冲,聚焦功率密度达到 $10^{18} \sim 10^{22}$ W/cm²。这样高的激光功率密度能够在实验室中

收稿日期:2006-01-05;收到修改稿日期:2006-03-05

作者简介:彭翰生(1937—),男,山东济南人,中国工程物理研究院研究员,主要从事高功率激光技术和等离子体物理研究。E-mail:penghsh@caep.ac.cn

产生前所未有的极端物态条件,为许多前沿科学研究提供了技术基础和工具,从而诞生了强场物理这一新的领域和许多交叉学科,成为国际学术界广泛关注和积极探索的热点。尽管这些研究尚处在起步阶段,人们已经可以看到其对相关学科研究的推动作用和影响力,以及潜在的应用价值。

本文将对超强固体激光技术的发展历史和现状进行评述,并对未来发展趋势进行讨论,对超强激光与相关领域交叉融合所形成的前沿学科和潜在的应用前景进行概括和展望。近年来,其他类型的超强激光如超强自由电子激光技术也取得了重大进展,限于篇幅,本文未予论述。

2 超强固体激光技术

超强固体激光技术在过去十多年内取得了跨越式的发展。这得益于 CPA 技术、先进激光增益介质和在激光聚变研究牵引下发展起来的高功率固体激

光技术的成功结合。

高功率输出一直是激光技术所追求的目标之一。早期提高输出功率主要靠缩短脉冲宽度,20 世纪 60 年代调 Q 技术和锁模技术的发展把激光脉冲宽度缩短到纳秒和皮秒,峰值功率提高了六个数量级,激光器光学介质中的功率密度达到 GW/cm^2 水平。在这样高的功率密度下,光学材料非线性效应引起自聚焦和成丝,造成材料破坏和降低光束质量。在其后长达十多年的时间内提高装置输出功率的技术手段没有重大突破,主要是靠增加通光口径。直到 20 世纪 80 年代中期,CPA 技术演示成功并被广泛采用。其核心思想是首先将小能量窄脉冲展宽成啁啾脉冲(可以展宽 4~5 个数量级),再进行放大,然后压缩回短脉冲^[2~6],如图 1 所示。这样,在长脉冲情况下放大,既可以有高的激光通量以获得高的能量抽取效率,又保持足够低的功率密度从而避免非线性效应,巧妙地把激光峰值功率提高了数个数量级。

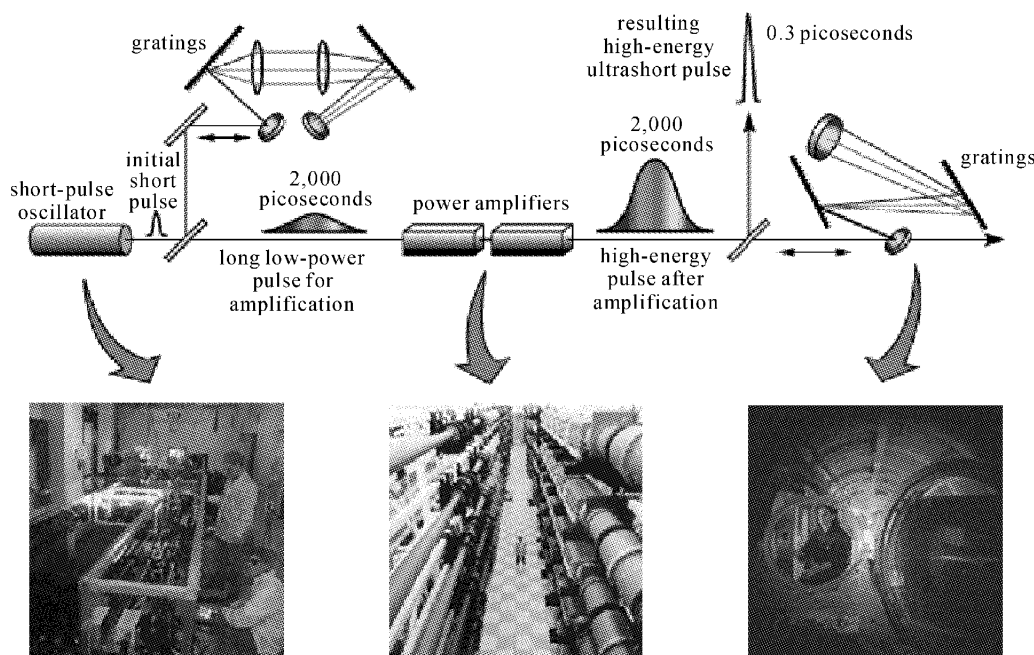


图 1 CPA 技术原理图和 LLNL 拍瓦激光装置^[2]

Fig. 1 Concept of CPA and the LLNL Petawatt laser^[2]

从技术特点和应用背景上看,超强激光技术发展形成了两个主要分支^[7]。以钕玻璃为功率放大介质的大能量型皮秒脉冲激光和以掺钛蓝宝石为功率放大介质的高功率型飞秒脉冲激光。前者主要针对聚变快点火研究需要,而后者则适于更快时间过程的强场物理和相关领域研究。光参量啁啾脉冲放大

(OPCPA)技术具有许多特点和优点,在本文所涉及的超强激光装置中已较多地用在预放级,用作功率放大级正处于发展阶段。

2.1 皮秒超强激光

高功率皮秒脉冲固体激光技术是 CPA 技术与用于惯性约束聚变(ICF)研究的高功率钕玻璃激光

装置相结合发展起来的。钕玻璃激光系统放大后的啁啾脉冲带宽一般不超过数纳米,可获得皮秒和亚皮秒压缩脉宽。已建拍瓦激光装置多是利用已退役的美国 Nova 和法国 Phebus 激光装置的主放大器系统建造的。现在,世界上从事激光聚变、重粒子束聚变和脉冲功率装置 Z 箍缩聚变研究的实验室无一例外地都在发展拍瓦皮秒激光技术,用于快点火研究或作等离子体背光照像源。

劳伦斯·利弗莫尔实验室(LLNL)是美国从事激光聚变研究和发展高功率固体激光技术的主要研究所,常常代表着该领域的主流方向。在 ICF 快点火研究的需求牵引下,1993 年就着手发展拍瓦激光技术,利用当时世界上最高功率的 10 束钕玻璃激光器 Nova 装置的一束作放大器,经过 4 年努力,于 1996 年 5 月实现拍瓦功率输出,取名 Petawatt^[2,6]。1997 年,末级口径增大到 58 cm,光栅口径增大到 94 cm,输出脉冲宽度 440 fs,脉冲能量 660 J,峰值功率 1.5 PW,靶面功率密度达到 6×10^{20} W/cm²。这是世界上第一台皮秒拍瓦激光装置。遗憾的是 1999 年 Nova 装置退役,大厅改做国家点火装置(NIF)的光学元件洁净装校用,Petawatt 激光装置也随之被拆除,失去了与 Nova 装置联合进行快点火原理性实验研究的历史机遇。94 cm 大口径全息光栅是 LLNL 自己研制的,世界上已建成的皮秒拍瓦激光装置所用的压缩光栅都出自 LLNL。

大阪大学激光工程所(ILE)是日本的激光聚变研究中心。1983 年他们建成了当时世界上最大的 12 束 Gekko-Ⅻ 激光装置,并取得有影响的物理研究成果。90 年代中期,正当美、法、中、英、俄几个国家忙于筹划建造新一代巨型激光装置时,他们把研究重点转向快点火。1998 年初步建成 PWM(Peta-Watt Module)^[8],输出能量 45 J,脉冲宽度 700 fs,峰值功率 60 TW,靶面聚焦功率密度 5×10^{19} W/cm²。2001 年为 Gekko-Ⅻ 装置建成第 13 束激光^[9],成功研制了 OPCPA 预放级,取代原来的再生放大器,既克服了增益窄化,脉冲缩短到 0.5 ps,输出功率达到 1 PW,同时也把输出脉冲信噪比提高到 10^8 。至此,ILE 成为世界上唯一同时建有高功率纳秒激光和皮秒激光的研究机构,具有了进行快点火原理性探索研究的起码条件。

ILE 利用 Gekko-Ⅻ 装置内爆压缩含氘聚乙烯靶丸,拍瓦亚皮秒脉冲加热预压缩的靶物质,中子产额比无加热脉冲时提高了 3 个量级,第一个用实验证明皮秒脉冲加热是有效的,成为当前快点火研究

的亮点^[10]。这一重大进展促使 ILE 科学家制订了一个大胆的发展规划,提出了分两步走的 FIREX (Fast Ignition Realization Experiment)^[11] 计划。第一步拟花 6 年建造 4 束激光装置,脉宽 10~20 ps,总能量 10 kJ,与原 Gekko-Ⅻ 激光装置配合,预期可以把预压缩靶燃料加热至 5~10 keV;第二步,再用 6 年,将内爆压缩激光和加热激光都升级至 50 kJ,争取实现点火和燃烧。FIREX 装置的主放大器系统也借鉴了 NIF 技术,是组合式多通放大构型,所面临的难点是 4 束的相干并束技术和光栅拼接技术。

英国卢瑟福实验室(RAL)的 Vulcan 装置是一台千焦耳级的钕玻璃激光器。1998 年,他们利用 Vulcan 一条束线作 CPA 激光的放大器,末级口径 15 cm,获得了 30 J,700 fs, 5×10^{19} W/cm² 的输出。后来,又利用 LLNL 提供的 Nova 装置退役的放大器和大光栅提高了装置的输出能力,也用 OPCPA 预放级取代原再生放大器,脉宽和信噪比都得到改善,2002 年实现了拍瓦输出,脉冲能量为 500 J,脉冲宽度为 0.5 ps^[12]。

美国罗彻斯特大学激光力能学实验室(LLE)于 1995 年建成 60 束 Omega 装置后一直专注于物理实验研究,这是当今世界上正在运行的最大固体激光装置。2003 年美国国会批准实施 Omega EP^[13] 计划,采用类似 NIF 的多通放大器技术增建 4 条 40 cm×40 cm 口径的束线,其中两条为超短脉冲激光束线,脉宽 1~100 ps,每束输出 2.6 kJ,功率 2~3 PW。满足如此大能量束线的压缩光栅尚不存在,所以 LLE 着手研究光栅拼接技术^[14],已演示了 2 块光栅的相干拼接,但是稳定性不易解决。建成后将与 Omega 装置耦合,进行等离子体背光照像和快点火研究,以及高能量密度物理实验。

法国的强激光应用实验室(LULI)利用一台末级口径 10.8 cm 的百焦耳钕玻璃激光器作放大器建成了输出功率 100 TW,脉冲宽度 300 fs 的激光器。目前正在利用里梅尔实验室退役的 Phebus 激光装置放大器建造拍瓦装置^[15],预期实现 500 J,0.5 ps 输出。由于没有足够大的光栅,LULI 正在采用 4 块 48 cm×33 cm 破坏阈值更高的介质膜光栅研制新构型脉冲压缩器。

德国重离子研究中心(GSI Darmstadt)正在实施 PHELIX (Petawatt High Energy Laser for Heavy Ion EXperiments)^[16] 计划,建造一台拍瓦皮秒脉冲激光装置,用作重粒子聚变等离子体诊断和

加热研究,主放大器系统也来自退役的 Nova 和 Phebus 装置。

美国圣地亚实验室 SNL 利用 Z-Pinch 进行 ICF 研究,90 年代末 LLNL 实验室把 Beamlet^[17] 激光装置送给 SNL,用作等离子体 X 光背光诊断光源。目前正在把它改建为拍瓦激光装置。

新一代巨型激光装置 NIF 和法国的兆焦耳激光器(Laser MegaJoule)LMJ 尚在建造中,原方案是按中心点火要求设计的,现在也都考虑兼顾快点火打靶方式。美国 LLNL 正在进行为 NIF 装置增配快点火皮秒脉冲激光束的概念设计和可行性研究^[18]。目前的要点是设计和已有布局及空间相容

的啁啾脉冲压缩系统和发展大口径介质膜(MLD)光栅制造技术。法国考虑为 LMJ 装置的原型 LIL (Line Integration Laser) 建造输出 1~10 ps, 1~3.5 kJ 的第 9 束^[19],在 LIL 完成后可以尽早进行背光照像和快点火实验研究。

我国皮秒超短脉冲激光技术研究起步较晚。上海高功率激光和物理联合实验室于 2003 年建成 20 TW 亚皮秒激光装置^[20,21],神光 II 激光装置新建了第 9 束,除作诊断光源外,也准备改建为皮秒拍瓦激光。此外,为建造更高功率超短脉冲激光装置,我国正在发展大口径介质膜光栅制造技术。

世界上主要的高功率皮秒激光装置列于表 1。

表 1 高功率皮秒固体激光装置

Table 1 High power picosecond solid-state laser facilities

Nationality	Lab	Setup	Energy /kJ	Pulsewidth /ps	Power /PW	Time
US	LLNL	Petewatt	0.66	0.44	1.5	1996~1999
US	LLE	Omega EP	2×2.6	1~100	2~3	Building
US	SNL	Z-Beamlet	0.5~3	0.5~5	1	Building
Japan	ILE	PWM	0.5	0.5	1	2001
Japan	ILE	FIREX	4×2.5	2~10	1~5	2007
UK	RAL	Vulcan PW	0.5	0.5	1	2002
France	LULI		0.5	0.5	1	Building
Germany	GSI	PHLIX	0.5	0.5	1	Building

2.2 飞秒超强激光

掺钛蓝宝石具有 230 nm 增益带宽,1 J/cm² 饱和通量和高的导热率,是非常理想的高功率重复率飞秒脉冲激光介质。数十太瓦以下的飞秒激光装置已经商品化,近百太瓦装置近来也有产品出售。由于飞秒激光装置相对规模较小、费用较低、强度更高、脉冲更短,在国际上许多中小实验室都建有数十太瓦的装置,用作发展前沿科学的得力工具,超高功率装置的研制和相关技术攻关则集中在一些国际知名的实验室和研究所。

Janus 装置是 LLNL 实验室于 1974 年建成的百焦耳级钕玻璃激光器。他们利用 Janus 输出的 130 J 绿光抽运 2 级钛宝石放大器,于 2000 年建成了 JanUSP (Janus-pumped ultrashort-pulse laser) 装置^[22]。输出功率达到 200 TW,脉冲宽度 75 fs,聚焦功率密度高达 2×10^{21} W/cm²。输出功率和聚焦功率密度都为当时世界之最。

日本原子能研究所(JAERI)首先建造了一台 10 Hz, 18.9 fs, 100 TW 激光器^[23],后来研制了一台 150 J 钕玻璃激光器抽运 $\phi 80$ 钛宝石放大级,2002 年

可以输出 550 TW (32.9 fs, 18.1 J)^[24],2003 年达到 850 TW^[25]。这台装置的标称功率是当今世界最高的飞秒装置,但由于技术和管理的多种原因,一直未能为物理实验提供正常运行。

法国 LOA 实验室专门从事飞秒激光技术发展和强场物理研究,2002 年建成 100 TW, 10 Hz 激光装置^[26],采用低温制冷放大器消除热效应对波面的影响和可编程谱色散滤波器(AOPDF)控制谱振幅和相位,获得了近衍射极限的光束质量和 25 fs 的脉冲宽度。

美国密歇根大学 CUOS 中心是超快光科学研究十分活跃的实验室,建有 27 fs, 45 TW Hercules 装置,利用变形镜和 $f/0.6$ 离轴抛物镜得到 7×10^{21} W/cm²^[27] 功率密度。

美国加州大学圣地亚哥分校在上世纪末建成了 20 fs, 60 TW, 10 Hz 激光装置^[28]。

韩国近年来十分重视飞秒激光技术发展,光州科学技术研究所(GIST)于 2005 年引进了法国 Thales 公司制造的 100 TW, 10 Hz 激光器 UQBF^[29]。

英国 RAL 实验室 2004 年启动了 Astra Gemini 项目^[30], 计划在 2007 年建成两束 0.5 PW 飞秒激光, 可以同步打靶。预期聚焦强度可达 10^{22} W/cm², 信噪比达到 10^{10} 。

此外, 许多实验室建有数十太瓦的飞秒激光装置, 广泛地应用于多个领域。如德国的 MBI 研究所、MPQ 研究所、Jena 大学、美国 Berkeley 实验室、韩国 KAERI 研究所、日本东京大学等。

我国飞秒激光技术发展在国际上占有重要地位。中国科学院物理所在过去几年内先后建成极光 I (1.4 TW/25 fs) 和极光 II (20 TW/30 fs), 目前正在建造极光 III (200 TW/40 fs), 在超短脉冲产生和两台激光装置精确同步研究方面都有创新成果^[31,32]。中国科学院上海光学精密机械研究所于 2003 年研制出当时国际上最大功率的 16.7 TW/120 fs OPCPA 激光器^[33,34], 又于 2004 年利用自己生产的大口径钛宝石晶体, 实现了 120 TW/36 fs 的激光脉冲输出^[35], 现在正在建造更高功率的飞秒激光装置。中国工程物理研究院于 2004 年初年建成了 26 fs, 300 TW 钛宝石激光装置

SILEX-I (Super Intense Laser for Experiments on Extremes)^[36~39], 装置总体性能和多项关键技术已处世界前列, 如利用 AOPDF 进行光谱和脉冲时间特性主动控制^[40,41]、超高斯整形和像传递空间质量控制等。一年多来经受物理实验连续打靶考验, 证明是当今世界上能够稳定运行的最高功率飞秒激光装置。SILEX-I 激光装置见图 2。国际上主要飞秒激光装置列于表 2。

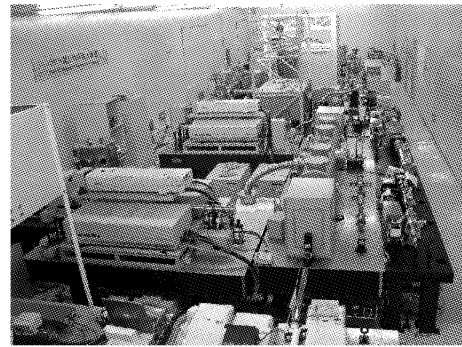


图 2 SILEX-I 钛宝石激光装置

Fig. 2 SILEX-I Ti:sapphire laser facilities

表 2 高功率飞秒固体激光装置

Table 2 High power femtosecond solid-state laser facilities

Nationality	Lab	Setup	Energy /J	Pulsewidth /fs	Power /TW	Time
US	LLNL	JanUSP	15	75~80	200	2000
US	LLNL	Falcon	4/0.5 Hz	30	100	2002
US	CUOS	Hercules	1.2	27	45	2003
US	UCSD		1.3/10 Hz	22~25	60	1999
Japan	JAERI	0.85 PW	18	32.9	850	2003
France	LOA		2.5/10 Hz	25	100	2002
China	CAEP	SILEX-I	9	26	300	2004
China	SIOM		4.3	36	120	2004
China	IOP	Jiguang-III		40	200	2006
Korea	GIST	UQBF	3.6/10 Hz	32	125	2005
Russia	IAP		9	45	200	2005
UK	RAL	Astra Gemini	2×15	30	2×500	2007

2.3 超强固体激光发展趋势

超强激光技术的发展开创了新的物理学研究领域, 促进了多个学科的交叉融合。随着应用研究的开拓和深入, 对激光装置的性能和参数不断有新的需求提出, 成为超强激光技术持续发展的动力。当前看来有以下几方面值得关注。

输出更高能量和功率的多束激光。现在已建皮秒激光束大都输出拍瓦脉冲 (0.5~1.0 kJ/0.5 ps), 前面提到的在建和计划建造的 40 cm×40 cm 口径

的光束也只能输出数千焦耳。激光输出能力受到光学元件破坏阈值或增益介质饱和通量的限制。快点火所要求的激光脉冲参数尽管一时还难以确定, 但大都认为不会少于数十千焦耳。大于 40 cm 的口径对于钕玻璃介质来说, 即使有好的包边技术, 也已受到放大自发辐射 (ASE) 的限制, 必须增加束数才能提高总输出能量。对于钛宝石飞秒激光, 单束所达到的聚焦强度难以超过 10^{23} W/cm², 而物理学研究希望有更高的功率密度出现, 以便探索未知的研究

领域。现在所用的钛宝石晶体直径已近 10 cm, 因为钛宝石小信号增益系数很高(多用在 0.5/cm 左右), 更大的尺寸时放大自发辐射将会耗尽上能级粒子数。这样, 也要走多束的道路。建造多束超强激光装置会遇到许多工程和技术问题, 如米级介质膜光栅制造, 啁啾脉冲压缩系统设计, 多束激光精确同步技术和相干叠加技术^[11]。美国 NIF 和法国 LMJ 巨型固体激光装置尚在建造之中, 已有人提出用其抽运甚多路钛宝石激光系统, 产生 $10^{18} \sim 10^{20}$ W 的飞秒激光脉冲, 聚焦功率可达 10^{28} W/cm²^[42]。当然, 这还只是概念上的想象, 讨论是否可行的问题还为时尚早。

宽光谱脉冲放大技术。保持啁啾脉冲在放大过程中的谱宽和控制高阶色散是获得窄脉冲和高信噪比的前提。数年前, 拍瓦装置钕玻璃系统增益窄化导致放大后的带宽为纳米左右, 压缩后的脉宽一般不小于 1 ps, 后来使用 OPCPA 预放级代替原再生系统, 所能达到的脉宽也仅为 0.5 ps 左右。同样, 钛宝石再生系统增益窄化也限制了输出脉冲宽度。为进一步缩短脉冲, 需要研究宽光谱啁啾脉冲的放大和传输技术。对光谱的振幅和相位进行主动控制可以有效地补偿增益窄化和消除高阶色散。AOPDF^[43,44] (Acousto-Optic Programmable Dispersive Filter) 是近年来法国 Fastlite 公司开发的光谱控制技术产品, 通过编程控制光谱振幅和相位, 既可克服增益窄化, 又可帮助达到傅里叶变换极限脉宽和实现脉冲任意整形。在中国工程物理研究院 SILEX-I 装置上引入 AOPDF 后, 脉冲宽度由原来 55 fs 缩短至 26 fs, 输出功率提高了一倍, 还消除了高阶色散, 使压缩后的主脉冲前后沿非常干净。控制光谱还有其他一些措施, 如美国 LLNL 的 JanUSP 和日本 JAERI 的 850-TW 装置上都是采用标准具来补偿增益窄化, 但是, 很难灵活优化补偿效果, 也无法矫正高阶色散。

高信噪比技术。在超强超短激光脉冲打固体靶的各种实验中, 预脉冲所产生的气化物质和预等离子体都会改变靶物质的状态, 从而影响作用过程甚至改变作用机制^[45]。在 $10^8 \sim 10^{11}$ W/cm² 时就会使靶物质气化或产生等离子体。当前使用的靶面激光强度多在 $10^{18} \sim 10^{20}$ W/cm², 将来还会更高, 信噪比成了制约许多实验的瓶颈。现实装置中, 由于放大自发辐射、开关消光比限制等因素, 脉冲对比度一般都在 $10^5 \sim 10^6$ 。因此发展相关技术, 将其进一步提高已受到格外的关注。已经研究的措施很多, 如等

离子体镜^[46~50]、二倍频^[51~56]、饱和吸收^[57]、双共焦多通放大^[58]、双 CPA^[59]、强度相关偏振旋转^[60] 和 OPCPA^[61,62] 等。选择适宜的技术用在大型激光装置上, 既提高信噪比又不影响其他性能, 还需更多研究与实践。目前看起来, OPCPA 技术用在前端是较好的方案, 美、日、英、法诸国拍瓦激光装置都已成功采用。

高光束质量。好的光束质量始终是强激光系统所追求的。但是, 不同应用背景所关注的空间频率有所区别。这不但需要精心的光路设计和严格的光学元件质量控制, 还需要采用主动控制手段。变形镜自适应光学系统是普遍采用的成熟技术。超短超强激光追求尽可能高的聚焦功率密度, 使用变形镜尤为必要。因为变形镜的主要功能是矫正低阶波面畸变, 可以有效地提高主焦斑的能量集中度^[26,27,63~65]。超短激光系统中, 需用离轴抛物镜聚焦。这种镜子一般难于达到理想抛光质量, 对于希望实现近衍射极限光束质量的系统中, 聚焦元件的波面控制和精确准直需认真研究。

多脉冲宽度和多波长激光。激光聚变和未来的许多强场物理和高能量密度物理研究需要实验装置具有同时输出几种不同宽度脉冲的能力。如快点火实验, 靶丸预压缩需要纳秒激光脉冲, 快点火则需要皮秒激光脉冲, 等离子体诊断有可能需要飞秒激光脉冲。纳米和皮秒激光主要是钕玻璃激光, 波长 1.053 μm , 而飞秒激光主要是钛宝石激光, 波长 0.8 μm 。当前有两种研究思路, 一是设法把不同脉冲宽度的激光同步起来, 二是设法用同一台振荡器产生出不同波长和脉冲宽度的激光束^[66]。这是一种较为前展的需求, 需要更多的创新研究才能找到满意的技术途径。

OPCPA 超强激光技术^[67~78]。OPCPA 是一种非线性过程, 与传统激光放大原理比较, 具有明显的特点, 如高增益、工作介质短、大带宽、高脉冲对比度、低热沉积等, 对于获得更短的脉冲宽度、更高的聚焦强度和更高的信噪比十分有利。在超强激光系统中, 已建和在建的钕玻璃拍瓦皮秒激光装置都在前端采用了两级或三级 OPCPA 放大取代再生放大级, 在钛宝石飞秒激光系统中用 OPCPA 做预放级也已成为趋势, 全部用 OPCPA 系统建造飞秒激光装置也日益受到青睐。如前面所述, 2003 年中国科学院上海光学精密机械研究所 OPCPA 激光装置实现了 16.7 TW 输出。2005 年俄罗斯应用物理所等五个研究机构建造了 200 TW/45 fs 的全 OPCPA 装

置^[79],是KD*P晶体三级放大系统,末级放大器晶体直径10 cm,厚8 cm。这是迄今最高功率的OPCPA放大器,而且还在研制数拍瓦甚至数十拍瓦飞秒激光装置。由于是三波过程,而且增益很高,如现在用于拍瓦前端的多级OPCPA总增益高达 $10^7 \sim 10^{10}$,信号脉冲和抽运脉冲需要精确同步,否则晃动将导致输出能量大幅度起伏。因此,该技术面临的主要挑战是提高稳定性和能量转换效率。俄罗斯200 TW激光同步性在50 ps内,效率达到25%,输出能量稳定性10%。Omega EP激光装置前端三级OPCPA放大系统采用精确时空控制技术,同步到15 ps,获得34%的效率和1%的能量稳定性^[80]。OPCPA放大过程中,抽运光脉冲的质量,包括时间、空间、光谱都会影响信号光的特性,如果有新的光谱成分产生,将会导致压缩脉冲出现高阶旁瓣,影响脉冲信噪比。因此对于OPCPA的抽运源系统的性能要严格控制,这是需要着力研究的技术。

进一步提高超强激光输出功率,对于钽玻璃皮秒脉冲激光,微米口径介质膜光栅制造或多光栅相干拼接,以及光栅破坏阈值等是当前主要瓶颈;对于钛宝石飞秒激光,晶体直径大于10 cm后,横向放大自发辐射会大量消耗上能级粒子束,因此上面两种激光输出功率很难有量级提升。而采用OPCPA技术和大口径KDP晶体,有望建造出数十拍瓦的飞秒激光装置,把可聚焦激光强度提升到 $10^{23} \sim 10^{25} \text{ W/cm}^2$ 。

(本文第二部分请见下期)

参 考 文 献

- 1 D. Strickland, G. Mourou. Compression of amplified chirped optical pulses [J]. *Opt. Commun.*, 1985, **56**(3):219~221
- 2 M. D. Perry. Crossing the petawatt threshold [J]. *Sci. & Technol. Rev.*, 1996, (Dec.):4~11
- 3 S. Backus, C. G. Durfee III, M. M. Murnane *et al.*. High power ultrafast lasers [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **69**(3):1207~1223
- 4 P. Maine, D. Strickland, P. Bado *et al.*. Generation of ultrahigh peak power pulses by chirped pulse amplification [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1988, **24**(2):398~403
- 5 G. A. Mourou, C. P. J. Barty, M. D. Perry. Ultrahigh-intensity lasers; Physics of the extreme on a tabletop [J]. *Phys. Today*, 1998, **22**(1):22~28
- 6 M. D. Perry, D. Pennington, B. C. Stuart *et al.*. Petawatt laser pulses [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(3):161~162
- 7 Peng Hansheng. High-power ultrashort-pulse lasers and amazing phenomena of physics [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(4):386~391
彭翰生. 高功率超短脉冲激光与新奇物理现象[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(4):386~391
- 8 Y. Kitagawa, R. Kodama, H. Yoshida. GEKKO XII petawatt module (PWM) project [R]. ILE Osaka Univ. Ann. Progr. Rep., 1998. 17
- 9 Y. Kitagawa, H. Fujita, R. Kodama. Prepulse-free petawatt laser for fast ignitor [R]. ILE Osaka Univ. Ann. Progr. Rep., 2002. 12~21
- 10 P. A. Norreys, S. Sakabe, K. A. Tanaka *et al.*. Fast heating scalable to fast fusion ignition [J]. *Nature*, 2002, **418**:933
- 11 M. Miyanaka, H. Azechi, K. A. Tanaka *et al.*. FIREX petawatt laser development for fast ignition research at ILE, Osaka [C]. IFSA2003, Monterey Sept. 7~12, 2003. 507~511
- 12 C. N. Danson, P. A. Brummitt, R. J. Clarke *et al.*. Vulcan petawatt- an ultra-high-intensity interaction facility [J]. *Nucl. Fusion*, 2004, **44**:s239~s249
- 13 W. Seka, J. M. Sours. OMEGA EP Project [R]. Progr. Rep., Lab. for Laser Energetics, 2003. Feb.
- 14 T. J. Kessler, J. Bunkenburg, H. Huang *et al.*. The coherent addition of gratings for pulse compression in high-energy laser systems [C]. IFSA2003, Monterey Sept. 7~12, 2003. 621~625
- 15 C. Le Blanc, C. Felix, J. C. Lagron *et al.*. The petawatt laser glass chain at LULI: from the diode-pumped front end to the new generation of compact compressors [C]. IFSA2003, Monterey Sept. 7~12, 2003. 608~611
- 16 P. Neumayer, R. Bock, S. Borneis *et al.*. Status of PHELIX laser first experiments [C]. XXVIII I ECLIM, Rome, Sept. 6~10, 2004. 1~5
- 17 G. R. Bennett, O. L. Landen, R. F. Adams *et al.*. X-ray imaging techniques on Z using the Z-Beamlet laser [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(1):657~662
- 18 C. P. J. Barty, M. Key, J. Britten *et al.*. Technical challenges and motivations for high energy petawatt lasers on NIF [C]. IFSA2003, Monterey Sept. 7~12, 2003. 612~615
- 19 N. Blanchot, E. Bignon, H. Hulin *et al.*. Technical issues in the multi-petawatt laser facility project on Line Integration Laser (LIL) [C]. IFSA2003, Monterey Sept. 7~12, 2003. 642~645
- 20 Xie Xinglong, Zhu Jiangqiang, Liu Fengqiao *et al.*. 20 TW sub-picosecond laser system (SPS) applied for the neutron experiment [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(10):865~872
谢兴龙,朱健强,刘凤翘等. 20 TW亚皮秒激光系统(SPS)与中子产生实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(10):865~872
- 21 X. L. Xie, F. Q. Liu, J. X. Yang *et al.*. Dual sub-picosecond and sub-nanosecond laser system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(11):658~660
- 22 J. D. Bonlie, F. Patterson, D. Price *et al.*. Production of $>10^{21} \text{ W/cm}^2$ from a large-aperture Ti:sapphire laser system [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **70**(Suppl.):155~160
- 23 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
- 24 K. Yamakawa, M. Aoyama, Y. Akahane *et al.*. Generation of a 0.55-PW, 33-fs laser pulse from a Ti:sapphire laser system [J]. *Laser Letter*, 2002, **30**(12):747~748
- 25 M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane *et al.*. 0.85-PW, 33-fs Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(17):1594~1596
- 26 M. Pittman, S. Ferre, J. P. Rousseau *et al.*. Design and characterization of a near-diffraction-limited femtosecond 100-TW 10-Hz high-intensity laser system [J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **74**(6):529~535
- 27 S. W. Bahk, P. Rousseau, T. A. Planchon *et al.*. Characterization of focal field formed by a large numerical aperture paraboloidal mirror and generation of ultra-high intensity (10^{22} W/cm^2) [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**(7):823~832
- 28 B. C. Walker, C. Toth, D. N. Fittinghoff *et al.*. A 50-EW Ti

- : sapphire laser system for studying relativistic light-matter interactions [J]. *Opt. Express*, 1999, **5**(10):196~202
- 29 I. W. Choi, T. J. Yu, J. H. Sung *et al.*. APRI ultrashort high-intensity laser system and application experiments [C]. The 13th Intern. Symp. on Laser Spectroscopy, 2005 (to be published)
- 30 J. L. Collier. The Astra GEMINI project-an overview [R]. CLF Ann. Rep. 2004/2005. 210
- 31 Z. Y. Wei, Y. Kobayashi, Z. G. Zhang *et al.*. Generation of two-color femtosecond pulses by self-synchronizing Ti:sapphire and Cr:forsterite lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(22):1806~1808
- 32 J. R. Yian, Z. Y. Wei, P. Wang *et al.*. Independently tunable 1.3 W femtosecond lasers passively synchronized with attosecond timing jitter and ultrahigh robustness [J]. *Opt. Express*, 2005, **30**(16):2161~2163
- 33 X. D. Yang, Z. Z. Xu, Y. X. Leng *et al.*. Multiterawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(13):1135~1137
- 34 Z. Z. Xu, X. D. Yang, Y. X. Leng *et al.*. High-power output from a compact OPCPA laser system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(1):24~27
- 35 Xu Jun, Si Jiliang, Li Hongjun *et al.*. 100 TW CPA fs laser output of Ti:sapphire crystal in SIOM [J]. *J. Synthetic Crystal*, 2004, **33**(5):875~876
徐 军, 司继良, 李红军 等. 大尺寸钛宝石晶体 CPA 超短超强激光输出突破 100 太瓦 [J]. *人工晶体学报*, 2004, **33**(5):875~876
- 36 H. S. Peng, X. J. Huang, Q. H. Zhu *et al.*. 286-TW Ti:sapphire laser at CAEP [C]. *SPIE*, 2004, **5627**:1~5
- 37 H. S. Peng, W. Y. Zhang, X. M. Zhang *et al.*. Progress in ICF programs at CAEP [J]. *Laser and Particle Beams*, 2005, **23**:205~209
- 38 Huang Xiaojun, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng *et al.*. Ultrashort ultra-intense Ti:sapphire laser facility with peak power of hundred-terawatt-level [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(11):1685~1688
黄小军, 彭翰生, 魏晓峰 等. 100 TW 级超短超强钛宝石激光装置 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(11):1685~1688
- 39 H. S. Peng, X. J. Huang, Q. H. Zhu *et al.*. SILEX-I: 300-TW Ti:sapphire laser [J]. *Laser Physics*, 2006, **16**(2):244~247
- 40 Liu Lanqin, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng *et al.*. Compensation of gain narrowing by using AOPDF in high-power ultrashort pulse laser systems [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(6):2764~2768
刘兰琴, 彭翰生, 魏晓峰 等. 高功率超短脉冲激光系统中用 AOPDF 实现增益窄化补偿的实验研究 [J]. *物理学报*, 2005, **54**(6):2764~2768
- 41 Liu Lanqin, Peng Hansheng, Wei Xiaofeng *et al.*. Spectral gain narrowing compensation modulation function in high-power ultrashort-pulse laser system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(6):856~860
刘兰琴, 彭翰生, 魏晓峰 等. 高功率超短脉冲激光系统中增益窄化补偿的调制函数 [J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(6):856~860
- 42 T. Tajima, G. Mourou. Zettawatt-exawatt lasers and their applications in ultrastrong-field physics [J]. *Phys. Rev., ST-accelerators and Beams*, 2002, **5**(031301):031301-1~031301-9
- 43 P. Tournois. Acausto-optic programmable dispersive filter for adaptive compensation of group delay time dispersion in laser systems [J]. *Opt. Comm.*, 1997, **140**:245~249
- 44 F. Verluise, V. Laude, J. P. Huignard *et al.*. Arbitrary dispersion control of ultrashort optical pulses with acoustic waves [J]. *Opt. Soc. Am. B*, 2002, **17**(1):138~145
- 45 K. B. Wharton, C. D. Boley, A. M. Komashko *et al.*. Effects of nonionizing prepulses in high-intensity laser-solid interactions [J]. *Phys. Rev. E*, 2001, **64**:025401-1~025401-4
- 46 H. C. Kapteyn, M. M. Murnane, A. Szoke *et al.*. Prepulse energy suppression for high-energy ultrashort pulses using self-induced plasma shuttering [J]. *Opt. Lett.*, 1991, **16**(7):490~492
- 47 P. Monot, G. Doumy, S. Doboş *et al.*. High-order harmonic generation by nonlinear reflection of an intense high-contrast laser pulse on a plasma [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(8):893~895
- 48 C. Ziener, P. S. Foster, E. J. Divall *et al.*. Specular reflectivity of plasma mirrors as a function of intensity, pulse duration and angle of incidence [J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, **93**(1):768~770
- 49 B. Dromey, S. Kar, M. Zepf *et al.*. High contrast for TW-PW lasers-plasma mirrors operated in the near field [R]. CLF Ann. Rep., 2002/2003. 76~77
- 50 D. M. Gold. Direct measurement of prepulse suppression by use of a plasma shutter [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(23):2006~2008
- 51 D. F. Price, R. M. More, R. S. Walling *et al.*. Absorption of ultrashort laser pulses by solid targets heated rapidly to temperatures 1~1000 eV [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **75**(2):252~255
- 52 Z. Jiang, J. C. Kieffer, J. P. Matte *et al.*. X-ray spectroscopy of hot solid density plasmas produced by subpicosecond high contrast laser pulses at 10^{18} ~ 10^{19} W/cm² [J]. *Phys. Plasmas*, 1995, **2**(5):1702~1711
- 53 M. Hacker, R. Netz, M. Roth *et al.*. Frequency doubling of phase-modulated, ultrashort laser pulses [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **73**(3):273~277
- 54 I. A. Begishev, M. Kalashnikov, V. Karpov *et al.*. Limitation of second-harmonic generation of femtosecond Ti:sapphire laser pulses [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2004, **21**(2):318~322
- 55 T. Harimoto, Y. Takeuchi, M. Fujita. Spectral properties of second-harmonic generation at 800 nm in a BiB₃O₆ crystal [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(5):811~816
- 56 H. Y. Zhu, T. Wang, W. G. Zheng *et al.*. Effective second harmonic generation of femtosecond laser at 1 μ m [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(10):2150~2155
- 57 K. H. Hong, B. Hou, J. A. Nees *et al.*. Generation and measurement of $>10^8$ intensity contrast ratio in a relativistic kHz chirped-pulse amplified laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **81**(4):447~457
- 58 J. Wojtkiewicz, C. G. Durfee. High-energy, high-contrast, double-confocal multipass amplifier [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(7):1383~1388
- 59 M. P. Kalashnikov, E. Risse, H. Schonagel *et al.*. Characterization of a nonlinear filter for the front-end of a high contrast double-CPA Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(21):5088~5097
- 60 D. Homoelle, A. L. Gaeta, V. Yanovsky *et al.*. Pulse contrast enhancement of high-energy pulses by use of a gas-filled hollow waveguide [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(18):1646~1648
- 61 H. Yashida, E. Ishii, R. Kodama *et al.*. High-power and high-contrast optical parametric chirped pulse amplification in BBO crystal [R]. ILE Osaka Univ. Ann. Progr. Rep., 2002. 185~186
- 62 I. Jovanovic, B. Wattellier, C. P. J. Barty. Parametric technique for extreme-contrast, high-energy petawatt pulses [C]. IFSA2003, Monterey Sept. 7~12, 2003. 646~649
- 63 F. Druon, G. Cheriaux, J. Faure *et al.*. Wave-front correction of femtosecond terawatt lasers by deformable mirrors [J]. *Opt.*

- Express*, 1998, **23**(13):1043~1045
- 64 H. Baumhacker, G. Pretzler, K. J. Witte *et al.*. Correction of strong phase and amplitude modulations by two deformable mirrors in a multistaged Ti:sapphire laser [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(17):1570~1572
- 65 Y. Akahane, J. L. Ma, Y. Fukuda *et al.*. Characterization of wave-front corrected 100 TW, 10 Hz laser pulses with peak intensities greater than 10^{20} W/cm² [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, **77**(2):023102-1~023102-7
- 66 X. M. Zhang, D. Y. Fan, X. M. Zeng *et al.*. Acquiring 1053 nm femtosecond laser emission by optical parametric amplification based on supercontinuum white-light injection [J]. *Opt. Express*, 2006, **31**(6):646~648
- 67 A. Dubietis, G. Jonusauskas, A. Piskarskas. Powerful femtosecond pulse generation by chirped and stretched pulse parametric amplification in BBO crystal [J]. *Opt. Commun.*, 1992, **88**(4-6):437~440
- 68 I. N. Ross, P. Matousek, M. Towrie *et al.*. The prospects for ultrashort pulse duration ultrahigh intensity using optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **144**(1-3):125~133
- 69 J. Wang, M. H. Dunn, C. F. Rae. Polychromatic optical parametric generation by simultaneous phase matching over a large spectral bandwidth [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(11):763~765
- 70 P. Matousek, B. Rus, I. N. Ross. Design of multi-petawatt optical parametric chirped pulse amplifier for the iodine laser ASTERIX IV [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2000, **36**(2):158~163
- 71 J. L. Collier, C. Hernandez-Gomez, I. N. Ross *et al.*. Evaluation of an ultrabroadband high-gain amplification technique for chirped pulse amplification facilities [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(36):7486~7493
- 72 I. N. Ross, J. L. Collier, P. Matousek *et al.*. Generation of terawatt pulses by use of optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(15):2422~2427
- 73 I. N. Ross, P. Matousek, G. H. C. New *et al.*. Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2002, **19**(12):2945~2956
- 74 X. D. Hang, Z. Z. Xu, Y. X. Leng. Multiterawatt laser system based on optical parametric chirped pulse amplification [J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(13):1135~1137
- 75 J. C. Collier, I. N. Ross, L. Cardoso *et al.*. Progress towards petawatt level OPCPA [C]. IFSA2003, Monterey Sept. 7~12, 2003. 603~607
- 76 V. Bagnoud, I. A. Begishev, M. J. Guardalben *et al.*. Optical parametric chirped -pulse amplifier as the front end for the Omega EP laser chain [C]. IFSA2003, Monterey Sept. 7~12, 2003. 670~673
- 77 B. Schmidt, P. S. Banks, D. Du. S. P. Jensen *et al.*. The design and performance of OPCPA based terawatt and petawatt lasers [C]. IFSA2003, Monterey Sept. 7~12, 2003. 674~676
- 78 I. Jovanovic, B. J. Comaskey, C. A. Ebberts *et al.*. Optical parametric chirped -pulse amplifier as an alternative to Ti:sapphire regenerative amplifiers [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(15):2923~2929
- 79 V. Bagnoud, I. A. Begishev, M. J. Guardalben *et al.*. 5 Hz, >250 mJ optical parametric chirped -pulse amplifier at 1.053 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(14):1843~1845
- 80 V. V. Lozhkarev, G. I. Freidman, V. N. Ginzburg *et al.*. 200 TW 45 fs laser based on optical chirped pulse amplification [J]. *Opt. Express*, 2005, **14**(1):446~454