

啁啾脉冲放大技术 ——从超快激光技术到超强物理世界*

2018-12-05收到

† email: zywei@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20181202

魏志义^{1,2,†} 王兆华¹ 滕浩¹ 韩海年¹ 常国庆¹

(1 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(2 中国科学院大学 北京 100049)

Chirped pulse amplification——from ultrafast laser technology to ultraintense physics

WEI Zhi-Yi^{1,2,†} WANG Zhao-Hua¹ TENG Hao¹ HAN Hai-Nian¹

CHANG Guo-Qing¹

(1 Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(2 University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

摘要 2018年的诺贝尔奖揭晓,3位科学家因在光学技术领域作出的开创性发明而获得物理学奖。其中 Arthur Ashkin 教授因为发明光镊技术(Optical Tweezer)分享了一半的奖金; Gérard Mourou 教授和 Donna Strickland 副教授因共同发明啁啾脉冲放大技术(Chirped Pulse Amplification, CPA)分享了另一半奖金。作为突破高强度激光发展瓶颈的重大技术创新,CPA 技术自发明以来一直是激光物理研究、特别是超快激光研究的核心技术。文章将主要简述该技术发明的相关背景、原理、结构及所导致的激光进展和开拓的超强物理应用。

关键词 飞秒,啁啾脉冲放大,超快激光,超强激光,诺贝尔物理学奖

Abstract The Nobel Prize in 2018 was announced that three scientists won the physics prize for their pioneering inventions in the field of laser technology. Among them, Professor Arthur Ashkin shared half of the prize for the invention of optical tweezers; Professor Gérard Mourou and Associate Professor Donna Strickland shared the other half for the co-invention of Chirped Pulse Amplification (CPA). As a major technological innovation to break through the bottleneck of high-intensity laser development, CPA technology since its invention has become the core technology for laser physics research, especially for ultra-fast laser research. In this article, we review the background, principle, configuration of CPA technology and applications.

Keywords femtosecond, Chirped Pulse Amplification(CPA), ultrafast laser, ultraintense laser, Nobel Prize in Physics

1 引言

自从 Theodore Maiman 1960 年研制成功世界上第一台激光器以来,激光技术不仅得到了快速

发展,而且在农业、工业、医疗、科研、国防等领域不断开拓出重大应用,并成就了多项诺贝尔奖的工作。自 1964 年汤斯、巴索夫、普罗霍罗夫因微波激射器及激光的基础研究工作而获得诺贝

* 国家科技重点专项(批准号:2018YFB1107200)、国家自然科学基金(批准号:11434016)资助项目

尔奖以来，先后有激光光谱学、飞秒化学反应动力学、光纤通信、引力波测量等14项与激光相关的工作获得诺贝尔奖。2018年的诺贝尔物理学奖授予光镊及啁啾脉冲放大(Chirped Pulse Amplification, CPA)两项与激光密切相关的技术发明，既在很多人的预料之外，也在物理学界普遍认可的情理之中，可以说是实至名归。

我们先简单了解一下什么是光镊技术。早在1619年，德国数学家和天文学家开普勒在观察彗星中认为，当光照射在物体上时，会对物体产生一个压力，据此提出了辐射压力(Radiation Pressure)的概念。1871年，电磁波的奠基人之一麦克斯韦在理论上预言了辐射压力现象。但辐射压力非常微弱，假设将平均功率5 mW的激光垂直入射到镜子表面并被全部反射，那么镜面所感受到的压力只有 33×10^{-12} N。1970年前后，在贝尔实验室工作的美国物理学家Arthur Ashkin发现，物体的不同部位在聚焦的连续激光焦点附近能感受到来自不同方向上的光线，这些光线在物体表面既有反射又有折射，反射和折射改变光的动量，因此对物体产生作用力^[1]。如果物体小到只有纳米到微米量级，其将被聚焦光束限制在焦点附近合力为零的平衡位置。通过移动激光光束的焦点位置，被“抓住”的微小物体也会随之被移动，宛如镊子一样“夹”起了微观粒子(原子、分子等)和微小物体(细胞、病毒等)。Arthur Ashkin不仅进一步预测这种“光镊”技术还可用于囚禁原子和分子，而且与他当时的博士后朱棣文一起，实现了介电小球的囚禁。后者很快将光镊技术用于激光冷却和原子捕获，开创了超冷原子这一学科，并因此荣获1997年诺贝尔物理学奖。如今光镊技术的应用已远超出物理领域，尤其是在生命科学领域具有不可替代的应用，可以用来操作DNA、生物大分子或者细胞等，为精确研究微观生命现象开启了一扇大门。中国科学技术大学郭光灿院士于1989年率先在我国开展了光镊技术的研究，目前有多所大学和科研院所也在从事着与该技术相关的工作。

与光镊所提供的微弱作用力相反，激光发明

之后一个重要的发展内容是如何得到高强度的激光。20世纪80年代初，一部《珊瑚岛上的死光》的国产电影，启蒙了许多国人对激光的认识与好奇，不久美国总统里根抛出的“星球大战计划”(也称Strategic Defense Initiative，即“战略防御计划”)，使人们更加认识到高强度激光在维护国家安全中的潜力。实际上激光发明后不久，国际上就开展了高强度激光研究的竞争，如美国休斯实验室、埃弗雷特实验室、空中激光实验室等研究机构相继建造了大功率的气体动力激光装置，至70年代报道的平均功率达40万瓦。中国科学院上海光学精密机械研究所邓锡铭、中国科学院物理研究所陈春先等人从60年代初也开始了大能量钕玻璃及红宝石激光的研究，分别得到峰值功率100兆瓦^[2]及最高能量1千焦耳的输出^[3]。1964年，著名物理学家王淦昌独立提出了将高能激光用于核聚变的倡议，通过激光取代原子弹引发氢弹过程，可望成为人造小太阳提供洁净能源。尽管此后大能量的激光研究成为多个大国的战略研究计划，但要得到超高强度的激光，还需要高的峰值功率及极短的脉冲宽度。

利用锁模技术产生具有皮秒(ps, 10^{-12} s)及飞秒(fs, 10^{-15} s)脉宽的超短脉冲激光，是激光问世之后另一个倍受人们重视的研究内容。这类脉冲激光不仅可以用来研究观察分子、原子等微观世界粒子的超快动力学行为，揭示掩盖在瞬态过程中的科学现象与规律，而且比纳秒乃至微秒等长脉冲激光具有高数个量级的峰值功率。因此进一步放大超短脉冲激光，是产生高峰值功率激光的当然选择。但随着激光峰值功率的提高，人们面临的一个重要问题是激光在达到放大饱和前，就由于强度依赖的克尔效应导致的自聚焦及元件损伤，正是由于该原因，激光强度的进一步发展遭遇巨大瓶颈。直到1985年，当时在美国罗切斯特大学工作的Gérard Mourou教授和他的博士生Donna Strickland巧妙地提出了啁啾脉冲放大的概念^[4]，从而有效解决了这一矛盾，引发了激光峰值功率的飞跃。图1是CPA基本结构示意图^[5]，由展宽器(Stretcher)、放大器(Amplifier)及压缩机

(Compressor)组成。限于笔者的专业方向，本文将主要介绍这一发明的背景、原理结构及所带来的技术进展与行业应用。

2 CPA技术的发明背景

20世纪60至70年代，超短脉冲激光研究的主流内容是如何产生更短的脉宽。1981年，随着碰撞脉冲锁模(Colliding Pulse Mode-locking, CPM)技术的发明，美国贝尔实验室的R. L. Fork等人利用染料激光器直接产生了90 fs的脉冲^[6]，标志着超短脉冲激光研究进入了飞秒时代，也称之为超快时代。图2为CPM染料激光的典型光路图，泵浦光P通常采用氩离子激光，其提供的488 nm及515 nm的蓝绿激光经平面镜M0及凹面镜CM2聚焦到染料增益介质G(通常为若丹明6G)中，以激发粒子反转提供激光振荡，并通过由CM1、输出镜OC、平面镜M1、M2及另一对共焦凹面镜CM4与CM3组成的环形腔实现激光运行。可饱和吸收体A置于凹面镜CM3与CM4的焦点上，其与增益介质G的距离为总腔长的四分之一，这样环形腔中以顺逆时针方向传输的两个脉冲经历同样的增益后，正好在可饱和吸收染料A中碰撞，从而产生极短的脉冲。但这种锁模染料激光不仅稳定性不高，输出的平均功率也非常低。为了进行飞秒激光放大以提高平均功率，当时所能采用的技术就是行波放大。图3所示为典型的放大光路图^[7]，由调Q倍频Nd:YAG激光提供的532 nm泵浦光分三级依次泵浦输入的飞秒激光脉冲，每级之间采用可饱和吸收体隔离，经过三级放大后，采用一对光栅补偿放大介质中产生的色散，最后得到脉宽70 fs、峰值功率达1 GW、对应单脉冲能量放大到微焦耳量级的光学脉冲。这一时期，无论是采用有机染料还是准分子作增益介质的放大器，由于较低的饱和通量，所能输出的激光能量限制在10 mJ以下。

考虑用于能量放大的激光增益介质，其能产生的激光饱和通量由下式决定：

$$J_{\text{sat}} = \frac{h\nu}{\sigma_g}$$

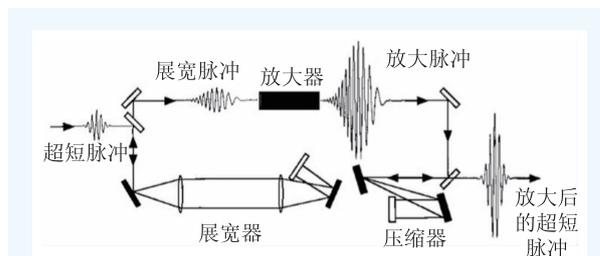


图1 CPA的结构示意图^[5]

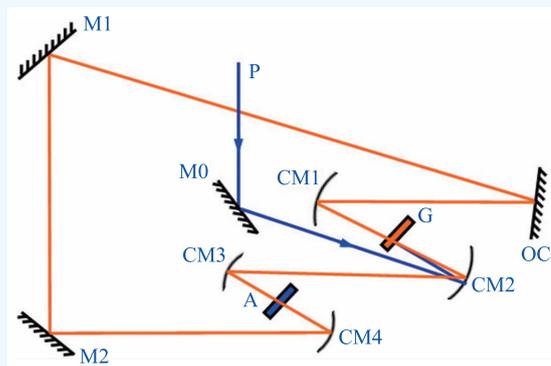


图2 CPM染料激光器结构

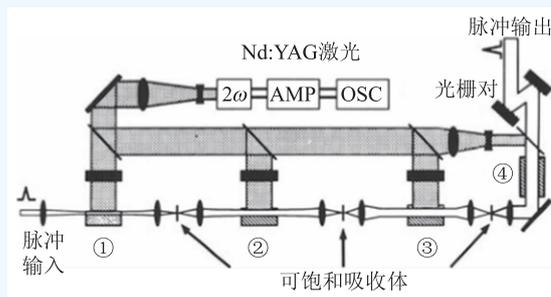


图3 飞秒激光行波放大结构^[7]

其中 ν 为跃迁频率， σ_g 为增益受激发射截面， h 为普朗克常数。对于染料及气体增益介质，典型的饱和通量仅1—2 mJ/cm²，假设要放大得到5 mJ能量的超短脉冲激光，就需要大于2 cm的直径。而对于钕玻璃及随后发明的掺钛蓝宝石、掺铬镁橄榄石、Cr:LiSAF等固体激光增益介质而言，由于上能级寿命长、增益光谱宽、饱和通量及损坏阈值高并适合倍频Nd:YAG激光泵浦等一系列优点，在激光能量放大方面展现出巨大的优势。如1986年报道发明的掺钛蓝宝石晶体，其高达0.9 J/cm²的饱和通量、8—10 J/cm²的破坏阈值及 2.7×10^{-19} cm²的增益受激发射截面 σ_g ，使其成为非常理想的激光放大介质，即使仅1 cm²的增益区域，也能够提取出大

于1 J的放大激光能量。因此采用固体作为放大增益介质，便成为提高激光强度的发展方向，此外该晶体上能级寿命长达3.2 μs ，室温下的热导率高达46 W/mK，覆盖660—1100 nm的宽带增益，使其也成为取代液体染料产生极短飞秒脉冲的主要选择。

尽管固体增益介质为人们产生并放大激光提供了理想的选择，但如前节所述，由于固体激光介质的自聚焦效应及导致的元件损伤问题，以及液体及气体激光介质较低的饱和通量问题，致使激光自发明以来，强度提高的发展非常缓慢。图4给出了自1980年以来的激光强度进展，可以看出至1986年前后，人们所能得到的激光峰值功率还不到 10^{10} W，强度也不到 10^{16} W/cm 2 。

3 CPA技术的原理结构

1986年前后，超快激光发展历史上迎来了具有辉煌意义的岁月。不仅R. L. Fork等人通过腔外压缩技术将CPM输出的飞秒脉冲激光推进到了6 fs的最短脉冲世界纪录并保持到1996年^[9, 10]，而且F. Moulton报道了迄今仍是飞秒激光产生及放大性能最优良的掺钛蓝宝石晶体^[11]，特别是G. Mourou及D. Strickland借鉴雷达中的微波放大技术，首次实验演示了激光啁啾脉冲的放大与压缩^[4]，揭开了超快激光向超强激光飞跃的序幕。图5为他们当时的实验光路，对比图1所示的结构示意图，其具体的工作原理是：首先由商用的连续波锁模Nd:YAG激光器产生150 ps的种子脉冲，利用长度为1.4 km的单模非保偏光纤作为展宽器。由于单模光纤引入的正色散及自相位调制，种子脉冲经展宽器后展宽为300 ps的啁啾脉冲，从而峰值功率被大大降低，这样进一步注入到硅酸盐钕玻璃激光再生放大器(Regenerative Amplifier)后，激光脉冲能够安全地多次往返放大到饱和能量，避免了自聚焦效应并进而打坏元件的问题。最后将从再生放大腔倒空输出的能量饱和放大的啁啾脉冲入射到一组平行光栅对组成的压缩器后，通过光栅对的负色散补偿抵消展宽器附加的正色散，得到单脉冲能量1 mJ、脉宽2 ps、中心波长1.062 μm 的激光脉冲。

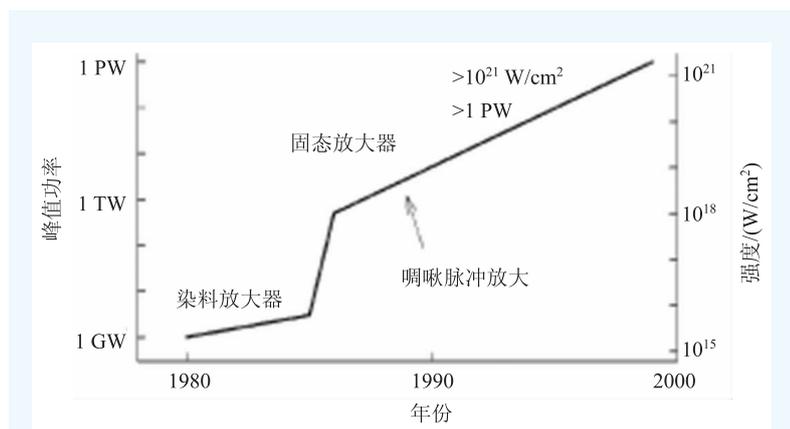


图4 激光强度的演化历程^[8]

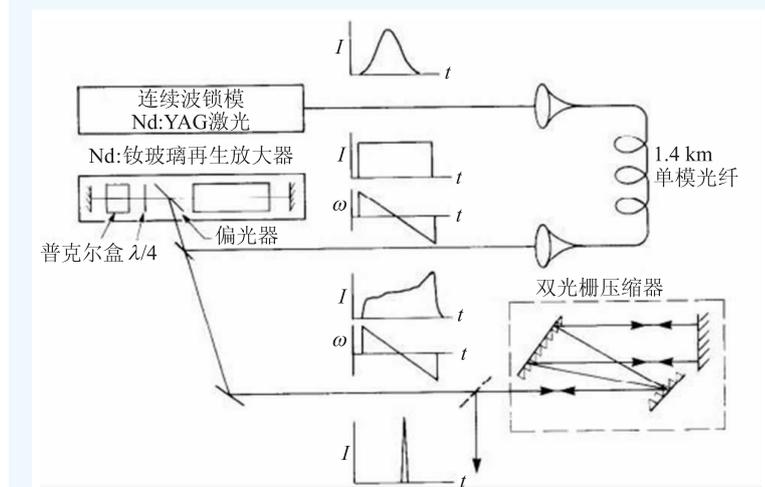


图5 首次CPA技术的实验光路图

上述实验中一个关键的技术是“啁啾”脉冲。由于种子激光脉冲的频谱包含有不同的频率分量，因此在单模光纤这种具有正色散的介质中，频率低的部分比频率高的部分传播快，这样光脉冲在时间上被逐渐拉宽，如同被扫频了一样，形成脉冲前沿频率低、后沿频率高的现象，宛如鸟儿发

出的不同声音，这样的脉冲我们称之为正啁啾脉冲。相反前沿频率高、后沿频率低的脉冲，则称之为负啁啾脉冲。CPA技术的核心其实就是先将无啁啾的种子脉冲转换为脉宽展宽了的啁啾脉冲，从而能够实现超快激光的安全放大。

虽然CPA的发明为超快超强激光的发展提供了创新的概念和方案，但许多方面还很不完善；受单元技术的限制，也没有得到其他研究组的及时跟进。大规模的研究是在1991年英国圣安德鲁斯大学W. Sibbet教授的研究组发现钛宝石激光的自锁模之后开始的^[12]。图7为该激光的光路图，通过对其锁模机制的深入研究，人们普遍认为是克尔透镜效应的作用，因此也称之为克尔透镜锁模(Kerr-Lens Mode Locking, KLM)。相比此前广受关注的CPM染料激光器，其不仅输出功率提高了数十甚至百倍，而且结构大为简单，稳定性也大为提高，从而很快成为CPA技术的标配种子光源。下面我们分单元技术进一步介绍CPA的结构与发展。

3.1 种子脉冲光源——锁模激光振荡器

优良种子脉冲是获得高质量放大的关键。1990年以前，CPA的种子激光多是主动锁模Nd:YAG激光或同步泵浦锁模染料激光，然而这两类激光对环境扰动极其敏感，因此稳定性差。此外Nd:YAG激光的典型脉宽约在10—100 ps量级，如在G. Mourou等人CPA的首次实验中，所用的正是脉宽长达150 ps的这类锁模激光器。这样长的脉宽不仅不能有效体现CPA的意义，而且也限制着放大后所能得到的压缩脉宽及峰值功率。随着KLM钛宝石激光的发现，其优良的稳定性和极短的脉宽等特性使其成为CPA技术的理想种子光源。目前有多个课题组通过该激光色散精确补偿的研究，能够直接产生亚10 fs乃至5 fs的脉冲，用其作为种子脉冲，更是CPA技术的高端选项。

3.2 展宽器

早期展宽器主要采用单模光纤展宽种子脉

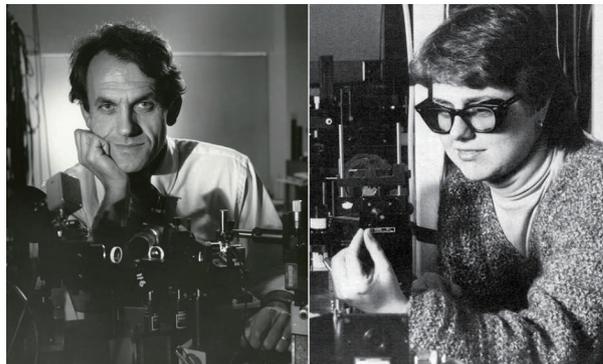


图6 20世纪80年代的G. Mourou和D. Strickland

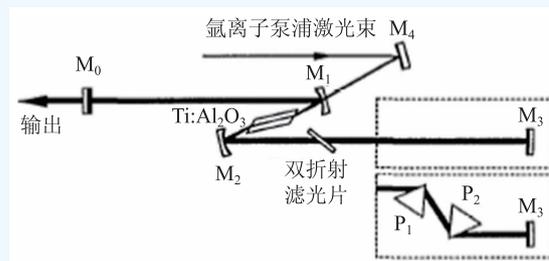


图7 自锁模飞秒钛宝石激光振荡器光路图^[12]

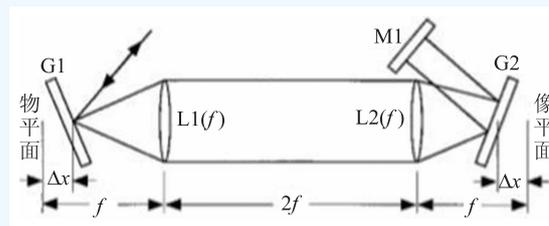


图8 Martinez展宽器的典型结构

冲，但这种展宽技术不仅需要长度达公里量级的光纤，而且损耗大、展宽量低、色散不能调节。如图5所示的CPA实验，使用1.4 km长的光纤，脉宽也仅被展宽了2倍，因此提高强度的效果并不显著。1987年，时在美国访问研究的阿根廷学者E. Martinez提出了采用透镜成像光栅对的结构，不仅极大地提高了脉冲的展宽比，而且色散可调。图8为这种展宽器的典型结构，其由一对共焦的透镜L1、L2及反平行放置在距透镜焦点 Δx 处的全息光栅G1、G2组成。G1通过透镜组成像后，等价于与G2成平行放置的光栅压缩器，但色散相反，因此能够完好地补偿放大脉冲的啁啾。为了也能够消除该结构中透镜带来的材料色散，后来人们又进一步发展了采用Öffner望远镜结构的光栅展宽器，从而使得压缩后的放大脉冲

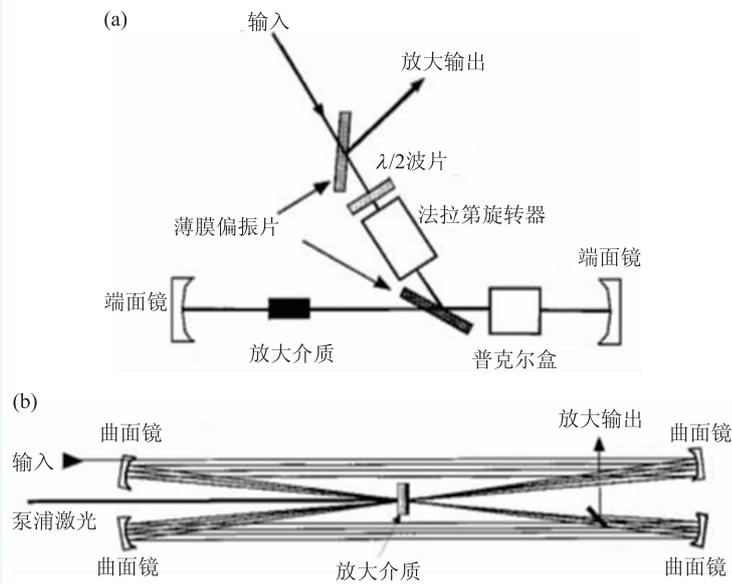


图9 (a)再生放大及(b)多通放大的典型结构

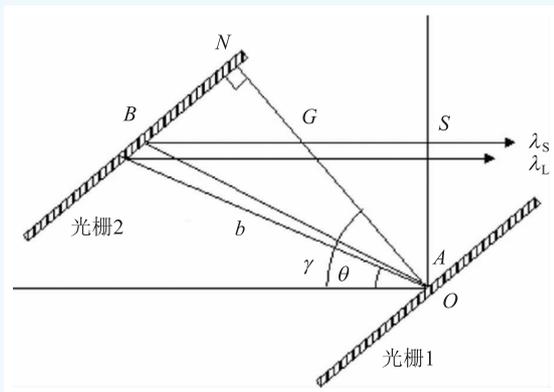


图10 采用Treacy结构的光栅对压缩器

突破到了短于50 fs的压缩能力。

3.3 放大器

放大器是实现能量放大、获得超强激光的核心单元。同样在钛宝石、Cr: LiSAF等具有宽带高饱和通量的固体增益介质之前，放大介质基本是染料、钕玻璃、Nd: YAG等低通量或窄带宽的介质。目前啁啾脉冲放大使用的增益介质主要集中在钛宝石及钕玻璃两种材料上，主要技术有再生放大及多通放大两种方案。图9(a)为典型的再生放大结构，具有调节方便、增益高、光束质量好的特点。但缺点是对比度低、材料色散大、增益

窄化效应严重。而多通放大正好相反，图9(b)为典型的多通放大结构，通过两组共焦的凹面反射镜，每程放大中光束都聚焦重合在放大介质中，经8到10程的放大，可得到大于 10^6 的增益。实际中不论是再生放大还是多通放大，放大后的能量通常都在mJ量级，该放大也叫“增益放大”。为了进一步提高啁啾脉冲激光的能量，还需要再进行二级或三级甚至多级放大，与增益放大不同，后级的放大只能用多通放大，通常也叫“能量放大”。

3.4 压缩器

为了将能量放大到目标的啁啾脉冲压缩回与种子脉冲相同的脉宽，需要采用与展宽器色散量相当、符号相反的负色散系统。一个被广泛使用的结构是早在1969年由E. B. Treacy提出的光栅对结构，如图10所示。通过E. B. Treacy给出的光栅对色散方程，可以准确地得出该压缩器的色散，从而完全补偿放大脉冲的啁啾。目前借助该压缩器，经CPA放大的脉冲已被压缩到小于20 fs。随着放大能量的不断提高，所用全息光栅的制造技术在过去的十多年也得到了突飞猛进的发展，最大尺寸突破了1 m。此外也推动了啁啾镜、透射光栅等元器件的发展，被越来越广泛地用于压缩器中。

4 基于CPA技术的典型飞秒超强激光装置

从上节的介绍可以看出，超快超强激光的发展，不仅得益于CPA技术的创新概念，而且也与振荡器、展宽器、放大器、压缩器及材料器件的发展和突破密切相关。正是在与这些单元技术共同发展的基础上，CPA激光的输出能量从最初的1 mJ提高到今天大于1 kJ的能力，峰值功率也从

刚开始不到 1 GW 的水平发展到 10 PW(拍瓦, 10^{15} 瓦)的量级。目前国际上不仅每个国家级的激光实验室都开展有基于 CPA 技术的飞秒超强激光研究,而且几乎所有的大学里都有用于开展应用研究的飞秒 CPA 激光装置。C. P. J. Barty 教授 2012 年统计了全世界峰值功率大于 100 TW 的基于 CPA 技术的激光装置^[13]。这里我们简述几项具有突破性的典型工作。

4.1 美国密歇根大学 HERCULES 装置

1988 年, G. Mourou 离开罗切斯特大学到密歇根大学,组建了超快光科学中心并担任主任。一段时间里,该中心吸引了日后活跃在世界各地的超快科学顶级学者,并研制了命名为 HERCULES(大力士)的钛宝石 CPA 装置。图 11 为该装置的整体示意图,计划中的放大方案由一级再生放大及三级多通放大组成。通过结合交叉偏振波技术及变形镜波前校正技术,于 2008 年得到了重复频率 0.1 Hz, 峰值功率 300 TW(太瓦, 10^{12} 瓦)、聚焦功率密度为 10^{22} W/cm² 的超强激光^[14]。特别是其聚焦功率密度,连续多年保持了激光强度的世界纪录。

4.2 法国 LASERIX 装置

法国是 G. Mourou 的出生地,也是强激光研究的大国。已有及在建的基于 CPA 技术的拍瓦激光有 LULI 激光装置、ILE APOLLON 超强激光装

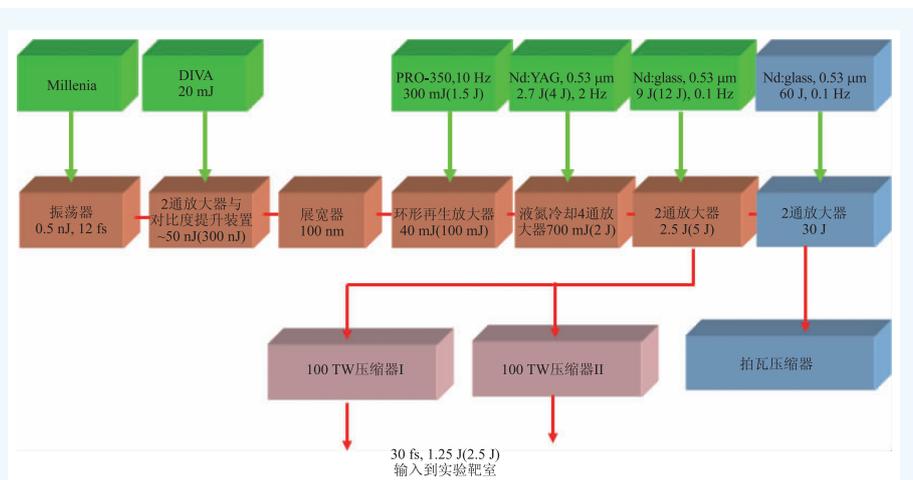


图 11 HERCULES 激光装置示意图

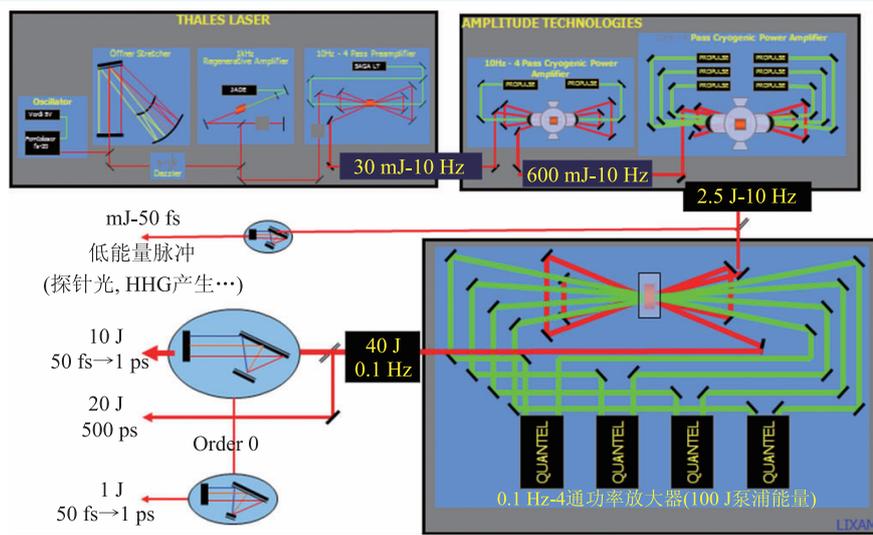


图 12 LASERIX 激光装置示意图

置及 LMJ 激光装置等。早在十多年前,法国巴黎第十一大学(Paris-Sud 11 University)就开展了命名为 LASERIX 的飞秒激光放大装置研究,其前级系统由钛宝石振荡器、Öffner 展宽器、1 kHz 再生放大器、4 通放大器组成。图 12 为结构示意图,通过从不同的放大阶段输出并压缩脉冲,可以得到单脉冲能量从 30 mJ 到 20 J、脉宽从 50 fs 到 1 ps 的结果。可以根据不同实验所需,灵活提供不同的脉冲能量和重复频率^[15]。

4.3 韩国 UQBF 装置

韩国是国际上投入超快超强激光最多资源的

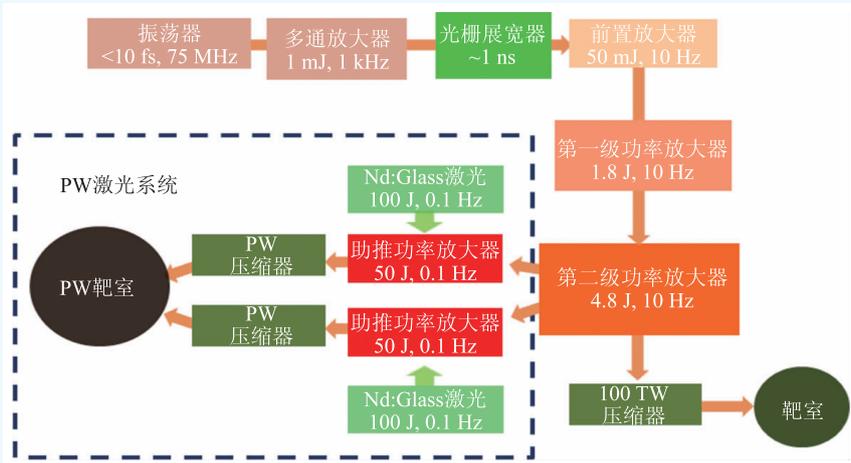


图13 UQBF激光装置示意图

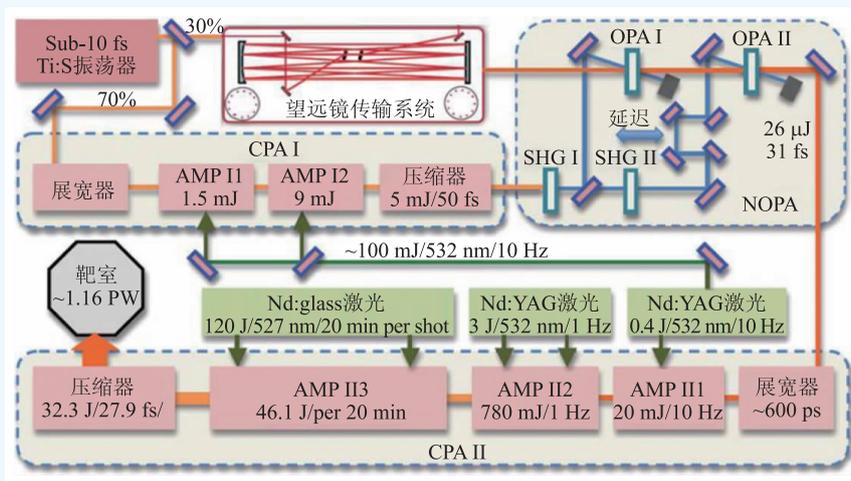


图14 “极光III”飞秒钛宝石放大装置示意图

国家之一，作为城市名片，在光州成立了专门的研究机构，研制建造致力于重复频率多PW输出的UQBF(Ultrashort Quantum Beam Facility)激光装置。图13为该装置基本的光路示意图，由共享一套商用亚10 fs钛宝石振荡器、Offner展宽器、一级预放大器、两级多通放大器的两路高能放大系统组成。在从第二级功率放大器得到4.8 J单脉冲能量的基础上，进一步分两路独立放大，助推放大后再进入两套真空压缩室压缩脉宽，最后得到两路精确同步、相对延时可调的飞秒PW激光脉冲，共同作用于靶室开展应用研究^[16]。最近该装置在0.1 Hz的重复频率下，报道了4.2 PW的输出，是目前重复频率运行的国际最高结果。

4.4 中国科学院物理研究所“极光”装置

1997年，针对当时CPA已引领的超快激光研究热点及在强场物理、超快现象等领域的重要应用，魏志义在张杰教授的建议和邀请下，到物理所共同开展CPA装置的研制。通过采用自己研制的飞秒钛宝石激光振荡器作为种子光源、自变焦的多通放大作为增益放大器，两年后获得了峰值功率1.4 TW的飞秒脉冲输出，并命名为“极光”装置。此后在基金委、科技部、中科院及863等项目的进一步支持下，通过不断学习消化国内外同行学者日益进展的研究结果，研究发展更高峰值功率的技术与装置，提出了飞秒参量放大(OPA)与双啁啾脉冲放大(DCPA)组合的“极光III”放大方案，图14为该方案的示意图。在解决放大脉冲

对比度、能量放大效率等问题的基础上，2011年输出了峰值功率1.16 PW的飞秒超强脉冲，成为当时基于钛宝石激光放大系统的世界纪录^[17]。

5 未来发展展望

CPA虽然创造了激光乃至光学研究的许多重大突破，推动了诸如近视眼外科手术、微纳尺度的材料精密加工、激光尾场粒子加速、激光聚变等涉及民生健康、社会经济、科学前沿等应用行业的创新与发展，但其发展的脚步从未放慢过。目前国际上基于CPA技术的最高峰值功率是中国科学院上海光机所于2017年报道的10 PW结

果。实际上早在十多年之前，欧盟在 G. Mourou 等人的推动下，就论证立项了 200 PW 的 ELI(Extreme Light Infrastructure)激光装置，以获取从未有过的峰值功率，并在匈牙利、捷克、罗马尼亚三个国家布局建造面向阿秒动力学、激光粒子加速、光核作用研究的三个峰值功率 10 PW 量级的子系统装置。此后俄罗斯科学院应用物理研究所也启动了 200 PW 的研究计划。这样高峰值功率的激光聚焦后，将能产生高达 10^{24} — 10^{25} W/cm² 的光场强度，创造“超相对论”范畴的研究领域，并使科学家们能在新的平台上，开辟核物理学、天体物理学、广义相对论、非线性 QED 和宇宙学等超强物理研究。

我国 20 世纪 80 年代初紧跟超快技术的国际前沿，在飞秒激光的产生方面取得过国际先进的结果。经过多年来持续不懈的努力并解决一个又一个的难题，在基于飞秒脉冲的超强激光发展中，终于有了国际领先的突破。不久前，上海光机所进一步立项了结合自由电子激光的 100 PW 项目，中国科学院物理研究所也在怀柔启动了包括超快装置的综合极端条件设施(图 16)。未来随着国内外这些装置的建设完成，科学家将有可能开展更为广泛的多行业应用研究及更为极端的前沿科学研究。正如 G. Mourou 教授 10 月 11 日在诺贝尔奖宣布后来北京的首场学术报告中所展望的：在这个领域，最精彩的尚未到来。

参考文献

- [1] Ashkin A. Phys. Rev. Lett., 1970, 24: 156
- [2] 王淦昌. 人造小太阳——受控惯性约束聚变. 北京:清华大学出版社, 2000 年 12 月出版. ISBN: 9787302041986
- [3] 中国科学院物理研究所志, 第 28 页, 中国大百科全书出版社, 2015 年 4 月第一版. ISBN 978-7-5000-9541-5
- [4] Strickland D, Mourou G. Opt. Commun., 1985, 56: 219
- [5] Backus S, Durfee C G, Murnane M M *et al.* Rev. of Sci. Instru.,



图 15 2011 年 G. Mourou 到中国科学院物理研究所参观“极光 III”装置



图 16 怀柔综合极端条件设施建筑效果图

1998, 69: 1207

- [6] Fork R L, Greene B I, Shank C V. Appl. Phys. Lett., 1981, 38: 671
- [7] Fork R L, Shank C V, Yen R T. Appl. Phys. Lett., 1982, 41: 223
- [8] Thomas B, Krausz F. Rev. of Mod. Phys., 2000, 72(2): 545
- [9] Fork R L, Brito Cruz C H, Becker P C *et al.* Opt. Lett., 1987, 12: 483
- [10] Baltuška A, Wei Z, Pshenichnikov M S *et al.* Opt. Lett., 1997, 22: 102
- [11] Moulton P F. J. Opt. Soc. Am. B, 1986, 3: 125
- [12] Spence D E, Kean P N, Sibbett W. Opt. Lett., 1991, 16: 42
- [13] Barty C P J. <https://www.icuil.org/>
- [14] Yanovsky V *et al.* Opt. Express, 2008, 16: 2109
- [15] Ros D *et al.* Springer Proceedings in Physics, 2007, 115: 191
- [16] Sung J H *et al.* Opt. Lett., 2010, 35: 18
- [17] Wang Z H, Liu C, Shen Z W *et al.* Opt. Lett., 2011, 36: 3194