



超短激光

脉冲产生与放大

Generation and Amplification
of Ultra-Short Laser Pulse

■ 令维军 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

超短激光脉冲产生与放大

令维军 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要从实验和理论两个方面研究了超短脉冲的产生和放大。全书共分为6章,内容包括:超短脉冲产生和放大的发展历史及研究现状;超短飞秒脉冲的产生技术和理论;皮秒脉冲的产生和放大技术及理论;啁啾脉冲放大的理论和实验研究;宽带飞秒脉冲非线性频率变换技术及理论和台面掺钛蓝宝石激光放大系统的设计。全书总结了最近几年该领域最新的实验研究成果,提供了大量的资料、图表和数据。

本书可供高等学校激光及相关专业的师生以及从事超快激光技术的科研人员和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

超短激光脉冲产生与放大/令维军著. —北京:国防工业出版社, 2013. 3

ISBN 978-7-118-08681-2

I. ①超... II. ①令... III. ①超短光脉冲—产生②超短光脉冲—放大技术 IV. ①TN781

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 047332 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 7 字数 154 千字

2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777
发行传真: (010)88540755

发行邮购: (010)88540776
发行业务: (010)88540717

前 言

1991 年 Sibbett 等人发明了第一台自锁模飞秒掺钛蓝宝石激光器以及啁啾脉冲放大技术的问世,真是意义上开创了超短超强脉冲的新时代。借助锁模技术,特别是克尔透镜自锁模技术(Kerr-lens-Mode-Locked, KLM)使激光的输出脉冲宽度接近了光学周期;借助超短啁啾脉冲放大技术(Chirped Pulse Amplification, CPA),使激光的峰值功率达到太瓦(10^{12} W)甚至是拍瓦(10^{15} W)量级,聚焦后的功率密度达到 10^{22} W/cm²,这种高强度的聚焦光场与物质相互作用后,可以产生高温、高压、高强场、高密度等极端物理条件,为研究光与物质作用提供有力的手段。目前已广泛应用于强场物理、激光通信、医学和军事等重要应用领域。超短脉冲的产生和放大技术及理论成了近几年全固态激光技术研究的热点内容之一。

本书总结了近几年超短脉冲产生和放大以及非线性频率变换技术的最新成就,提供了大量的资料、图表及数据;既有系统的理论分析、数据计算结果,又有具体激光器的设计参数及实验结果。全书分为 6 章,具体内容如下:

第 1 章主要从超短脉冲产生和超短脉冲啁啾放大两个方面概述了其发展历史及最新研究成果。介绍了啁啾脉冲放大的单元技术以及放大过程中考虑的问题。

第 2 章主要论述了超短脉冲产生的理论和相关技术。首先从理论上分析了克尔锁模的物理机理,分析掺钛蓝宝石激光器谐振腔的设计以及色散的优化。重点研究了几类典型的飞秒激光器的设计及实验。这些激光器包括:高重复频率飞秒激光器,低重复频率飞秒激光器,低阈值飞秒激光器以及近红外波段的飞秒激光器,基本涵盖了近几年飞秒激光器设计的最新研究成果。

第 3 章主要论述了皮秒激光脉冲的产生、放大及非线性频率变换。首先介绍了近几年被动锁模的原理及最新技术;接下来实验上系统研究了皮秒掺钛蓝宝石激光脉冲的产生放大以及非线性倍频和参量的过程;最后实验上研究了主动锁模 Nd:YAG 皮秒脉冲的产生以及皮秒 Nd:YAG 脉冲再生放大技术。

第 4 章概述了啁啾脉冲放大的理论和实验研究成果。首先理论上模拟了多通放大的过程和结果,设计了一个八通预放大器;根据 ASE 产生的特点,我们分别在空间上、时间上和光谱上对 ASE 的抑制进行了研究;最后按照理论模拟设计了一个五通主放大器,获得了 38% 最高转换效率。

第 5 章研究了宽带飞秒脉冲非线性频率变换。主要包括两部分:宽带飞秒脉冲倍频理论和实验,近红外宽带飞秒脉冲产生和参量放大。重点研究了基于参量放大和差频技术的载波包络相位稳定的近红外脉冲的产生,最后实验上研究了近红外脉冲的放大。

第 6 章主要介绍了台面掺钛蓝宝石激光放大系统的设计。其中包括飞秒振荡器、展

宽器、千赫兹再生放大器、主放大器及压缩器的设计。由于放大过程光束质量的控制十分重要,最后研究了几种光束质量控制的技术。

全书在完成过程中得到了老师和同行的无私帮助。我的导师魏志义研究员在百忙之中审阅了全书,给出很多宝贵中肯的意见和建议。在实验数据收集过程中,也得到许多老师和师弟师妹的鼎力帮助。韩国浦项工大 Kim Don Eon 教授为参量放大实验提供了优良的实验条件,中科院西安光机所王屹山研究员为飞秒激光紫外倍频提供了实验条件和有益的指导。在第2章飞秒脉冲产生的理论和实验2.4、2.5和2.7节中,引用了我的师妹赵研英、张青和师弟周斌斌的实验结果。所有这些实验结果的获得,和他们的指导与帮助是分不开的,在此我表示诚挚的感谢!

由于出书时间比较仓促,加上本人学术水平有限,书中不足之处在所难免,希望读者予以谅解,也欢迎读者不吝赐教,提出宝贵的意见,作者将不胜感激!

2013.01.18 于韩国浦项工大

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 超短脉冲激光研究的发展	3
1.3 太瓦级放大系统概述	4
1.4 台式啁啾脉冲放大系统的基本结构	9
1.5 百太瓦级脉冲放大过程中要考虑的问题	11
参考文献	14
第 2 章 飞秒激光脉冲产生的理论与实验	18
2.1 克尔效应及克尔透镜锁模机理	18
2.2 KLM 掺钛蓝宝石激光器谐振腔设计	20
2.3 谐振腔色散优化及计算	24
2.4 低重复频率飞秒掺钛蓝宝石激光器	27
2.5 高重复率飞秒掺钛蓝宝石激光器	31
2.6 低阈值飞秒掺钛蓝宝石激光器	33
2.7 近红外超短脉冲激光器研究进展	41
参考文献	46
第 3 章 皮秒激光脉冲产生、放大及频率变换	50
3.1 被动锁模原理与技术	50
3.2 自启动皮秒掺钛蓝宝石激光实验研究	54
3.3 皮秒掺钛蓝宝石激光脉冲放大的实验研究	56
3.4 皮秒掺钛蓝宝石激光脉冲倍频及参量放大实验研究	58
3.5 高功率全固态 Nd:YAG 主动声光锁模激光器	59
3.6 全固态 Nd:YAG 皮秒激光脉冲的再生放大研究	63
参考文献	66
第 4 章 啁啾脉冲放大的理论和实验研究	68
4.1 啁啾脉冲放大的理论	68
4.2 多通脉冲预放大实验研究及 ASE 消除	71
4.3 双向泵浦的高效率多通主放大器	77
参考文献	78
第 5 章 宽带飞秒脉冲非线性频率变换	79
5.1 高功率飞秒脉冲激光倍频理论	79

5.2	高功率飞秒脉冲激光倍频实验研究	82
5.3	近红外波段载波包络相位稳定的飞秒激光脉冲产生和放大	87
5.4	基于 OPA 技术近红外波段飞秒激光脉冲放大	92
	参考文献	93
第 6 章	20TW 掺钛蓝宝石激光放大系统的设计研究	96
6.1	前言	96
6.2	整体放大系统光路介绍	96
6.3	单元系统概述	97
6.4	光束质量的控制	101
	参考文献	103

第1章 绪 论

1.1 引 言

激光是20世纪最伟大的发明之一。自从1958年肖洛(A. Schawlow)和汤斯(C. Townes)首次发表描述光频下产生激光作用条件的论文^[1]以及1960年梅曼(T. Maiman)利用红宝石晶体第一次实现激光输出^[2]以来,激光科学和激光技术的发展真可谓一日千里。目前,激光技术的研究成果已被广泛地应用于科学研究、工农业生产、信息、通信、国防、医疗卫生、娱乐文化产业和环境保护等领域的多个方面,并随着激光技术的不断发展形成了许多新的学科,开辟了许多新的研究领域。这些重大变革主要表现在:借助非线性频率变换技术,使激光输出的波长几乎覆盖了从紫外到远红外的所有波段;借助锁模技术,特别是克尔透镜自锁模技术(Kerr - Len - Mode - locked, KLM)^[3],使激光的输出脉冲宽度达到飞秒量级(10^{-15} s),并接近光学周期^[4-6];借助啁啾脉冲放大技术(Chirped Pulse Amplification, CPA)^[7-8],使激光的峰值功率达到太瓦(10^{12} W)^[9-12]甚至是拍瓦(10^{15} W)量级^[13],聚焦后的功率密度达到 10^{22} W/cm²^[9],这种高强度的聚焦光场与物质相互作用后,可以产生高温、高压、高强场、高密度等极端物理条件,为研究光与物质作用提供有力手段。

纵观激光50年来的发展历史,主要有以下几个里程碑式的技术使得激光飞速发展。1961年提出了调Q技术(Q - Switching)^[14],随后几乎每年激光器的输出功率约增加一个数量级,20世纪60年代末—70年代初又提出了锁模技术(Mode - locking)^[15],开始了超短脉冲时代,这期间经过了20多年的发展,先后经历了主动锁模(APM)^[16]、被动锁模^[17]、碰撞锁模(CPM)^[18]等,采用这些锁模技术可以将激光脉冲由调Q技术产生的纳秒(10^{-9} s)量级缩短到亚皮秒(10^{-12} s)量级。到20世纪80年代中期,由于晶体介质的非线性效应导致的自锁模(Self - mode locking)技术^[19]和啁啾脉冲放大技术^[7-8],使激光的发展真正步入超短超强脉冲时代,采用这种技术后,输出的激光脉宽可以短到飞秒(10^{-15} s)量级,脉冲功率可达太瓦(10^{12} W)、拍瓦(10^{15} W)量级^[20],体现了高峰值功率和低平均功率的完美结合,并且所占台面只有一般实验室的大小。这种台面的超短超强激光装置,使世界上一般实验室在真正意义上拥有研究激光与物质相互作用的条件。正是由于这种激光系统的这些优点,开创了强场物理和超快现象研究的新天地^[21]。从采用调Q技术、锁模技术以至发展到现在的啁啾脉冲放大技术,单脉冲激光功率增加了6个量级,G. Mourou将不同年代采用的技术与所能输出的激光功率总结如图1.1所示。

直接对激光器输出的飞秒脉冲进行放大是无法得到太瓦级峰值功率的,这是因为当脉冲放大到一定的程度,就会出现以下一些问题:一是增益饱和使激光脉冲从放大介质中

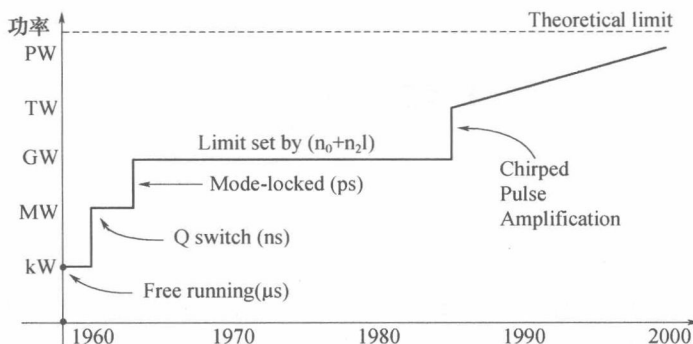


图 1.1 激光峰值功率随时间的变化

抽取能量的效率降低;二是放大过程中导致的过高的脉冲峰值功率会产生各种非线性效应,使得激光脉冲的光束质量、能量提取效率等下降;三是过高的峰值功率会对放大介质、光学元件等的镀膜造成伤害。所以,目前太瓦级的飞秒激光放大系统都采用啁啾脉冲放大技术。啁啾脉冲放大技术最早来源于啁啾雷达技术^[7],1985年,D. Strickland 和 G. Mourou 首次将这种啁啾脉冲放大技术用于激光脉冲放大中^[22],解决了放大高峰值功率激光脉冲的技术瓶颈。其基本原理就是:将一个振荡器输出的飞秒量级的脉冲,经过一个展宽器后展宽到 200ps 以上甚至到纳秒量级,进入一级和多级能量放大到几百毫焦甚至是几十焦耳量级,最后通过一个与展宽器色散相反的压缩器将能量放大后的脉冲压缩到初始脉冲宽度,便会获得一个峰值功率高达太瓦甚至是拍瓦量级的脉冲。这就是 CPA 放大的基本原理,图 1.2 对这个过程进行了形象的说明。虽然 CPA 技术是 1985 年发明的,但直到 1991 年 Sibbet 等的自锁模 Ti: Sapphire 振荡器研制成功后才比较广泛地用于掺钛蓝宝石晶体(800nm)、Nd:Glass(1060 nm)、Cr:LiSAF(850nm)^[23]、镁橄榄石等。目前,在实验室和商品化 CPA 激光系统中用得最广泛的还是掺钛蓝宝石晶体,主要是因为它有以下优点:增益带宽很宽,可以达到 700nm ~ 1100nm;有较高的导热性能和好的力学性能;该晶体的饱和能流较高,接近 $1\text{J}/\text{cm}^2$,可以保证激光脉冲获得较高的放大能量。正是超短飞秒脉冲的出现和 CPA 技术的完美结合,才使脉冲放大不断地向更高的峰值功率和更高的功率密度方向发展。

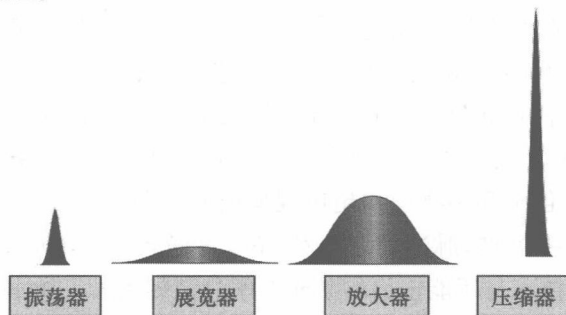


图 1.2 啁啾脉冲放大原理

1.2 超短脉冲激光研究的发展

超短脉冲激光器作为 CPA 系统的前级,对脉冲放大有重大的影响,它的光谱分布、脉冲宽度、信噪比以及脉冲的稳定性等直接影响最后的放大效果。例如,特性化后的光谱可以有效地抑制增益窄化效应^[24],窄的脉冲宽度在同样的情况下更易将脉冲展得更宽,经过压缩以后可获得更高的峰值功率。同样,脉冲稳定也是一个非常重要的方面,种子光能量轻微的扰动会导致放大后的脉冲能量极度不稳定。所以,放大系统首先要求振荡器能够输出优质的种子脉冲。

首次用于啁啾脉冲放大系统的振荡器是采用锁模的 Nd:YAG 激光作为振荡器^[25],但是由于受带宽的限制,脉冲宽度只能做到 100ps,所以放大后的峰值功率也是 GW 量级,真正意义的高峰值功率 TW 量级的放大脉冲实现,归功于 20 世纪 90 年代飞秒自锁模激光器的出现。飞秒激光于 1980 年问世^[26],随后主要是以染料为激光介质,以碰撞锁模为机制,得到较短的激光脉冲^[27]。到 20 世纪 80 年代后期,随着晶体生长技术的日趋成熟,出现了一批性能优秀的固体激光介质和非线性晶体,固体激光器才成为飞秒激光器的主要发展方向。特别是 20 世纪 90 年代后期到 21 世纪初期,飞秒固体激光器已经成为飞秒激光器的主流。这些飞秒激光介质主要是 Ti:Sapphire、Cr:LiSFA、Yb:YAG、Nd:glass、Yb:KGW、Yb:GdCOB、Yb:KYW、Cr:Forsterite、Cr:YAG 等,这些晶体均有很宽的荧光谱宽。但最优秀的飞秒介质还要算 Ti:Sapphire 晶体,不仅是因为它有很宽的荧光谱(660nm ~ 1100nm)、良好的光学均匀性和导热性、硬度大、损伤阈值高等优良的性能,而且目前已经商品化的倍频 Nd:YAG 激光器的输出波段为 532 nm,正好在其吸收峰附近,这种激光器如 Spectra Physics Inc. 公司生产的 Millennia、Coherence Inc. 公司生产的 Verdi 等,其功率稳定度小于 1%,输出为 TE00 模,光束质量好,很适合作为飞秒钛宝石激光器的泵浦源。可以说,1991 年 D. E. Spence 等利用氩离子激光器作为泵浦源,用 F14 的棱镜补偿腔内色散,首次研制成功一台以掺钛蓝宝石为激光介质的飞秒自锁模激光器,获得了 60 fs 的激光脉冲,标志着固体飞秒激光器进入一个新的时代。这种锁模机理解释为克尔效应和光阑作用的结果,定义为克尔透镜锁模(KLM)。此后,钛宝石飞秒 KLM 激光器的输出脉冲宽度便不断变窄。1993 年初,华盛顿州立大学的 M. T. Asaki 等^[28]为减少 3 阶色散,采用高掺杂浓度的短钛宝石晶体,并改用石英棱镜对其进行色散补偿,获得了 10.9 fs 的激光脉冲。1994 年, J. P. Zhou 等^[29]采用 2mm 长的钛宝石晶体和双石英棱镜对获得了 8.5fs 光脉冲。1995 年, A. Stingl 等^[30]利用啁啾介质反射镜,无需其他色散补偿元件获得了 8fs 的激光脉冲。1996 年, Lin Xu 等^[31]采用环形腔结构,同时利用啁啾镜补偿色散,获得了 7.5fs 的锁模脉冲。1997 年, I. D. Jung 等^[32]同时使用啁啾镜和棱镜对进行色散补偿,得到了 6.5fs 的锁模脉冲。1999 年, H. A. Haus 等利用低色散棱镜对和一对啁啾镜,直接从钛宝石激光器中输出小于两个光学周期的飞秒脉冲,输出脉冲缩短到 5fs,对应的带宽大于 350 nm,是当时激光振荡器直接输出的最短的飞秒脉冲^[33]。2001 年, R. Ell 和 F. X. Kartner 等采用双啁啾镜补偿技术^[34],结合腔内增强自相位调制作用,获得了光谱范围覆盖了 600nm ~ 1200nm 的倍频程掺钛蓝宝石激光振荡器,输出脉冲宽度为 5fs^[35]。这是迄今为止,人们从掺钛蓝宝石振荡器中直接获得的光谱宽度最宽、脉冲宽度最窄的脉冲激

光。图 1.3 说明脉冲宽度随年代变化的情况。

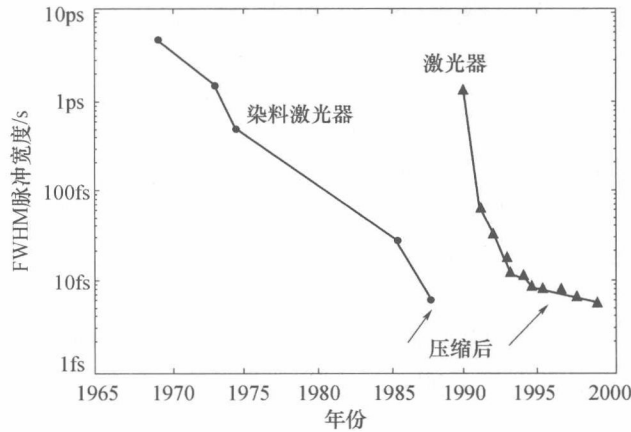


图 1.3 脉冲宽度随年代变化发展(实线表示从振荡器直接输出的脉冲宽度;虚线表示腔外压缩后得到的脉冲宽度)

1.3 太瓦级放大系统概述

自激光发明以来,追求超短脉冲和高峰值功率一直是激光发展的主流方向和热点内容。高峰值功率、高强度的聚焦脉冲的出现,主要归功于 CPA 技术和宽带高增益介质的出现。在 CPA 技术出现以前,由于受到非线性效应和激光元件损伤阈值的限制,脉冲峰值功率一直停留在 GW(10^9 W)量级,对应的聚焦功率密度也很低。直到 1985 年以后,将 CPA 技术用于激光脉冲放大中,加上晶体生长技术的日趋完善,出现了许多性能优秀的宽带高增益放大介质,使脉冲的峰值功率迅速提高,达到太瓦(10^{12} W)量级,甚至是拍瓦(10^{15} W)量级。与此相对应,激光脉冲的聚焦功率密度也迅速提高,目前的记录达到 10^{22} W/cm² 量级以上^[9],推动物理学研究进入了非线性相对论光学范围。图 1.4 说明了激光聚焦强度随年代的变化以及对应的物理状态。

在利用 CPA 技术进行脉冲放大的过程中,宽带高增益的放大介质保证了高峰值功率的获得。宽带保证了放大脉冲压缩的极限,高增益保证了高效率的放大。目前,用于放大的介质主要有掺 Nd³⁺ 和 Ti³⁺ 两大类。掺 Nd³⁺ 类中用于放大最普遍的是 Nd:Glass,图 1.4 列出了各类玻璃放大介质的物理和光学特性。从图中可以看出,Nd:Glass 类放大介质有 300μs 以上的荧光寿命,同时它的饱和能流高达 4.8J/cm² ~ 7.4J/cm²,很适合高能量放大的需要。不过它的增益谱宽比较窄,在 20nm 左右,不适合短脉冲(小于 100fs)放大,同时它的导热性也较差,热导率一般小于 1.5。掺 Ti³⁺ 类放大介质最常用的就是 Ti:Sapphire 晶体,相对于其他放大介质,它最大的优点就是有很宽的增益谱宽(180nm),加上高损伤阈值(5J/cm²)和优良的导热性能(热导率高达 34,比玻璃类放大介质约高 30 倍),可以作为放大超短脉冲的理想介质。但它的荧光寿命比较短(2.3μs),饱和能流也相对比较小(~1J/cm²),所以它不适合高能量放大,但由于它可以支持很短(小于 20fs)的脉冲放大,所以仍然可以得到高峰值功率的放大脉冲(表 1.1、表 1.2)。目前,采用 Ti:Sapphire 的台

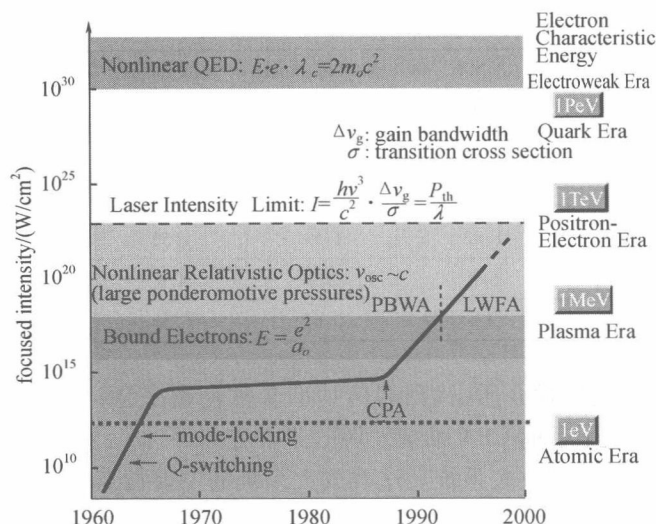


图 1.4 激光聚焦强度随年代变化及对应的物理状态

面放大系统已产生高达 850TW 的放大脉冲,与占面庞大的 Nd:Glass 放大系统获得的峰值功率相当。Ti:Sapphire 放大系统的另一个显著的优点就是它的占面仅需要一般实验室的台面大小,如物理所研制的输出峰值功率为 1.4TW 的极光 I 号系统占面仅 3m²。所以,Ti:Sapphire 放大系统也称为台式 CPA 系统。它使世界上一般实验室研究强光于物质相互作用成为可能。

表 1.1 玻璃类放大介质物理和光学特性

玻璃类型	Q246(S)	Q88(P)	LHG5(P)	LHG8(P)	LG670(S)	LG760(P)
发射峰(nm)	1062	1054	1054	1054	1061	1054
增益带宽(nm)	27.7	21.9	18.6	20.1	27.8	19.5
$\sigma_e(10^{-20}\text{cm}^2)$	2.9	4	4.1	4.2	2.7	4.3
荧光寿命(μs)	340	330	290	315	330	330
饱和能流(J/cm^2)	6.9	5	4.8	4.95	7.4	4.65
折射率	1.568	1.545	1.539	1.528	1.561	1.503
非线性折射率($10^{16}\text{cm}^2/\text{W}$)	3.7	3.0	3.5	3.1	3.8	2.9
导热系数($\text{w}/\text{m}\cdot\text{k}$)	1.3	0.84	1.19	0.58	1.35	0.67

注:S指S偏振,P指P偏振

表 1.2 各种放大介质物理和光学特性列表

材料	Nd:YAG	Nd:Phosphate	Nd:Silicate	Nd:YLF	Ti:Sa
掺杂离子	Nd^{3+}	Nd^{3+}	Nd^{3+}	Nd^{3+}	Ti^{3+}
发射峰(nm)	1064	1052.5	1060	1053/1047	800
$\sigma_e(10^{-20}\text{cm}^2)$	65	4.2	2.9	12	30
增益带宽(nm)	0.45	17.5	25.5	0.7	180

(续)

材料	Nd:YAG	Nd:Phosphate	Nd:Silicate	Nd:YLF	Ti:Sa
荧光寿命(μs)	230	340	300	480	3.2
饱和能流(J/cm^2)	0.3	4.5	6.4	1.6/1.1	0.85
吸收峰(nm)	590,750,800	Same	Same	Same	500
折射率	1.82	1.51	1.56	1.45	1.54
非线性折射率($10^{16}\text{cm}^2/\text{W}$)	6.2	2.9	4.3	1.68	3.2
热导率($\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$)	13	0.67	1.35	6	34

以下将按照所用的增益介质,输出峰值功率和重复频率,将 CPA 放大系统分成 3 大类,这 3 类也分别代表了目前 CPA 系统发展的 3 个方向。

第一类:高能量长脉冲放大系统。这类放大系统的主要特点是:主要放大介质一般为 Nd:Glass,重复频率低(小于 1Hz),放大脉冲能量高,脉冲宽度比较宽(大于 100 fs)。这类放大系统的优点是放大介质体积可以做得很大,加上能级驰豫时间比较长(大于 300 μs),并在 800 nm 处有很强的吸收,因此很适合半导体激光器直接泵浦。但导热性能差、重复频率低是这种装置的主要缺点,有的系统要 1h 甚至数小时才能输出一个脉冲,所以平均功率一般不高。1991 年, G. Mourou 等利用 Nd:Glass 作为放大介质,实现了 20 TW 的脉冲输出。其脉冲宽度为 1.2ps,单脉冲能量为 24J。同年, K. Yamakawa 和 C. P. J. Party 等将峰值功率提高到 30 TW^[36], 1995 年, N. Blanchot 利用 Nd:Glass 作放大介质,得到 300fs、近 100 TW 放大脉冲^[37]。1997 年, B. C. Stuart 等进一步将脉冲功率提高,得到 395 fs、51J、125TW 的高峰值功率脉冲输出^[38]。1999 年,美国 Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) 国家实验室利用 Ti:Sapphire、Nd:Glass 激光系统产生了大于 1500TW (1.5PW) 高峰值功率的激光脉冲,聚焦后的功率密度达到 $7 \times 10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ 以上,是到目前为止人们所获得的最高峰值功率的激光脉冲。图 1.5 说明了高能长脉冲放大系统的发展。

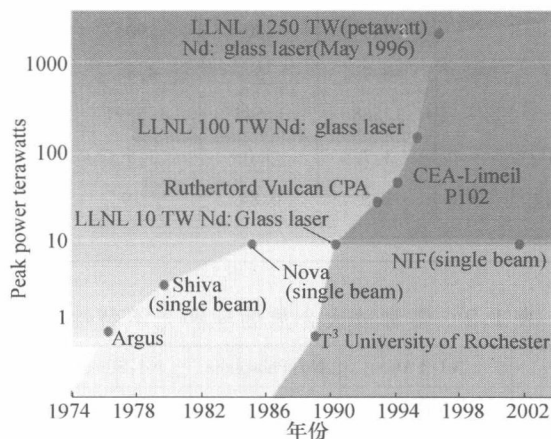


图 1.5 高能长脉冲激光放大系统随年代的发展

第二类:超短脉冲高峰值功率放大系统。这类激光放大系统的特点是:重复频率一般是几十赫兹以下,目前以 10Hz 最为典型。脉冲能量一般在几个焦耳量级,所用的放大介质基本上都是掺钛蓝宝石晶体(Ti:Sapphire),对应的放大脉冲宽度一般小于 100fs,目前以小于 30fs 的脉冲宽度较为常见。这类激光器可以获得 100TW 以上的峰值功率,同时由于光束质量优于 Nd:Glass 获得的放大光束质量,因而也容易获得极高的功率密度,目前已经达 10^{22} W/cm^2 ,高于从 Nd:Glass 输出高能量脉冲的聚焦功率密度。其成本相对低,应用广泛,发展最活跃,是目前 CPA 放大系统发展的主流方向。

可以说,自从 1990 年 Sibbet 等研制成功 KLM 的振荡器以后,CPA 技术才得到真正的应用。1991 年,A. Sullivan 等利用 Ti:Sapphire 晶体作为放大介质,通过 4 级放大得到了能量为 0.45J、脉冲宽度为 95 fs 的放大脉冲^[39]。1993 年,P. Beaud 等用 4 级放大的 CPA 获得了 8TW、90fs 的放大脉冲,但重复频率为 1Hz^[40]。1994 年,C. P. J. Party 等首次将放大后的脉冲宽度缩短到 30fs,1996 年,他们进一步改进系统,将放大脉冲宽度缩短到 18fs,峰值功率为 4.4TW,重复频率为 50Hz,其种子脉冲宽约 100nm,展宽倍数超过 10^5 ^[24]。同年,C. P. Chambaret 等只用 3 级放大,产生了 25TW、35fs、10Hz 的放大脉冲,聚焦后功率密度达到 $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ ^[41]。1997 年,日本 J. Itatani 等做出了 13TW、26fs、340mJ、10Hz 的激光脉冲^[42]。同年,法国 A. Antonetti 等实现了 0.8J、30fs 的激光脉冲,其峰值功率达到 30TW,重复频率为 10Hz,聚焦功率密度达到 $5 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$,平均功率为 9W^[43]。1998 年,日本 K. Yamakawa 等将输出脉冲宽度进一步缩短到 16fs,并且展宽器将振荡器输出的 10fs 脉冲展宽了 100000 倍以上,得到 10 TW 的放大脉冲^[44],同年,他们将系统改造升级,输出放大脉冲的宽度为 19fs,压缩后的脉冲能量为 1.9J,峰值功率首次达到了 100TW,聚焦后的功率密度可达 $3 \times 10^{20} \text{ W/cm}^2$,其聚焦功率密度已经与 LLNL 的 1.5PW 放大系统相当,同时,展宽器将 10fs 的种子脉冲展宽了 170000 倍,代表了目前放大系统的最高展宽水平^[12]。2002 年,法国 M. Pittman 等利用声光程控色散过滤器(AOPDF)对放大脉冲的光谱和相位进行人为设置,得到小于 25fs 的放大脉冲,同时,将主放大级晶体采用液氮冷却到 -153°C ,得到比较好的光束质量,最后聚焦强度大于 10^{20} W/cm^2 ,输出的脉冲峰值功率为 100TW^[45]。2003 年,日本 M. Aoyama 和 K. Yamakawa 等在原来 100TW 的基础上再加了一个主放大级,采用大口径($\phi 88\text{mm}$)的 Ti:Sapphire 晶体,用 70J 的能量泵浦,转换效率高达 50%以上,最后得到 850TW 的高峰值功率,预计聚焦后的激光脉冲强度为 $3 \times 10^{21} \text{ W/cm}^2$ ^[9],这是到目前为止这类激光器所达到的最高峰值功率和强度。

在国内,中国科学院上海光机所、中国科学院物理所和中国工程物理研究院也相继开展了 TW 量级台式 CPA 的研究工作,并取得了举世瞩目的成绩。1999 年,中国科学院物理所研制成功极光 I 号放大系统,通过光谱的特性化设计及种子脉冲的有效展宽等技术,仅用 290mJ 的能量就获得了 1.4TW 的放大脉冲^[46]。随后,在激光 I 号的基础上又开发了第二代 CPA 放大系统——极光 II 号装置,使脉冲的输出功率达到 20TW。近几年在极光 II 的基础上,研制成功了输出功率接近 1PW 的极光 III 装置。2004 年,中国工程物理研究院在引进了 3TW 装置的基础上,通过与物理所等单位合作建成了逾 200TW 输出能力的 SILEX 装置。

第三类:高重复频率放大系统。这类放大系统的显著特点是重复频率在 1 kHz 以上,由于重复频率高,这种放大系统输出的脉冲峰值功率相对较低,很难达到太瓦量级,但平

均功率较高。这类放大系统的增益介质也主要是掺钛蓝宝石,近年来也出现了 Nd 类高重复频率的 $1\mu\text{m}$ 波长的放大系统。1993 年, G. . Mourou 等通过 CPA 放大系统,得到了 160fs、230J、重复频率为 10kHz 的放大脉冲,对应的平均功率为 $2\text{W}^{[47]}$ 。同年, G. V. Rudd 等得到了压缩后 0.35mJ、55fs、1kHz 的放大脉冲,对应的平均功率为 $0.35\text{W}^{[48]}$ 。1994 年, K. Wynne 等利用 18fs 的种子脉冲,得到 30fs、15 μJ 的放大脉冲,其重复频率是 5kHz,平均功率为 $75\text{mW}^{[49]}$ 。1995 年, M. Lenzner 等获得了 18fs、100 μJ 、1kHz 的脉冲输出^[50]。同年, S. Backus 等将放大脉冲的能量提高到 1mJ 量级,重复频率为 1kHz,对应的平均功率达到 $1\text{W}^{[51]}$ 。在随后的两年内,他们将放大脉冲的能量提高到 4mJ,对应的平均输出功率为 4W,同时脉冲峰值功率达到了 $0.2\text{TW}^{[52]}$ 。1997 年, F. Krausz 等将放大以后得到的 20fs、1.5mJ、1kHz 的放大脉冲进一步压缩,利用空心光纤及啁啾镜得到了 5fs、0.5mJ 的压缩脉冲,峰值功率高达 0.1TW ,而平均功率也仅 0.5W,另外该系统结构紧凑,占面仅 $2.5\text{m}^2^{[53]}$ 。1998 年, Y. Nabekawa 等在 1 kHz 重复频率下,得到 21fs、14mJ 的放大脉冲,将脉冲输出的峰值功率提高到 0.66TW ,平均功率达到 $14\text{W}^{[54]}$ 。

总之,自 CPA 技术问世 10 几年以来,由于受到物理实验的牵引,已经得到长足的发展,并在世界上许多实验室实现,现在将世界各个实验室 CAP 系统通过列表加以比较,图 1.3 就是世界上各实验室 CPA 的简单情况。

表 1.3 世界上各实验室 CPA 情况

放大类型	脉宽	输出能量	重复频率	研究小组
再生 (1 stage)	60fs	50mJ	1kHz	Chicago, USA
再生 + 多通	18fs	79.2mJ (4.4TW)	50Hz	California, USA
再生 + 多通	26fs	60mJ	10Hz	Washington, USA
多通 (3 stages)	24fs	1J	10Hz	Michigan, USA
多通 (4 stages)	95fs	0.45J	10Hz	California, USA
多通 (3 stages)	33fs	0.8J	10Hz	Limeil, France
再生 + 多通 (3 stages)	20fs	50TW	10Hz	San Diego, USA
再生 + 多通 (3 stages)	45fs	75mJ	10Hz	Michigan, USA
再生 + 多通 (3 stages)	20fs	2J	10Hz	JAERI, Japan
再生 + 多通	30fs	125mJ	10Hz	Stanford Uni.
多通 (3 stages)	72fs	800mJ	10Hz	Astra Rutherford, England
多通 (2 stages)	700fs	22J	1 hour	Vulcan Ruthford, England
再生	10fs	5mJ	10Hz	Uni. California
再生 + 多通	440fs	1.5PW (660J)	1 hour	LLNL, USA
多通 (2 stages)	16fs	160mJ	10Hz	JAERI, Japan
多通 (3 stages)	32fs	25TW (0.8J)	10Hz	France
多通 (3 stages)	24fs	40TW	10Hz	Uni. Michigan
再生 + 多通	395fs	51J (125TW)		LLNL, USA
再生 + 多通	440fs	24J (50TW)		Limeil France
再生 + 多通 (2 stages)	26fs	340mJ (13TW)	10Hz	Uni. Tokyo, Japan

(续)

放大类型	脉宽	输出能量	重复频率	研究小组
KrF + Ti:s(再生 + 多通)	300fs	7W	1kHz	Uni. Tokyo, Japan
再生 + 多通	130fs	1J	10Hz	Maxplanc, German
再生 + 多通(2stage)	30fs	300mJ	10Hz	Taiwan, China
再生 + 多通	20	20 mJ	1kHz	France
再生 + 多通	75fs	15J	10Hz	JanUSP - LLNL, USA
多通(2 stages)	25fs	36mJ	10Hz	IOP, China
再生 + 多通	33fs	644mJ	10Hz	IOP, China
再生 + 多通	29.8fs	8.58J(286TW)	10Hz	CAEP, China
再生 + 多通	45fs	450mJ	10Hz	SIOM. China
再生 + 多通	30fs	3J(100TW)	10Hz	MBI Germany
多通(3stages)	25fs	2.5J(100TW)	10Hz	Cedex France
再生 + 多通(4stages)	33fs	28.4J(0.85PW)	10Hz	JAERI, Japan

1.4 台式啁啾脉冲放大系统的基本结构

台式 CPA 系统由于系统台面小,成本相对较低,能够满足一般实验室研究强光与物质相互作用的需要,因而它是目前 CPA 系统发展的主流。对于一个典型的 CPA 系统,其通常由 4 部分组成,即飞秒振荡器、脉冲展宽器、能量放大器及脉冲压缩器。

飞秒激光振荡器的作用是提供放大的种子脉冲,CPA 系统对飞秒振荡器有严格的要求,即高稳定、可整形的光谱和窄脉冲宽度的种子脉冲对保证整个系统的稳定运行和最后脉冲的压缩具有重要的作用。只有采用稳定性好的 KLM 掺钛蓝宝石激光器作为种子源,啁啾脉冲放大技术才能可靠地工作。目前,100TW 的放大系统一般采用脉宽很窄的种子脉冲,日本原子能研究院 0.85PW 和 100TW 系统均采用 10fs 的种子脉冲,法国 Cedex 也采用脉冲宽度仅为 15fs 的脉冲作为种子源,但是脉冲越短,放大过程中其高阶色散也越难以补偿,所以 CPA 系统的种子脉冲宽度多为 20fs ~ 30fs,这个范围的脉冲宽度比较容易获得,同时,振荡器稳定性相对也好,输出功率较高。设计 20TW 系统采用的 25fs 的种子源,其振荡器泵浦源为 7W 的 532nm 激光器,腔型为折叠的 X 型腔,采用空间像散补偿技术,输出的脉冲具有较好的光束质量和高稳定性,功率可达 1W。由于 KLM 振荡器稳定性容易受到外界的干扰,启动也必须耍外力的扰动,针对这种缺陷,U. Keller 等将 SESAM 用于启动和维持锁模,这种振荡器对保证整个系统稳定运行有一定的重要意义。为此设计了一台低阈值振荡器,输出脉冲宽度为 17fs,采用 2W 的泵浦功率,可输出 200mW 的稳定锁模脉冲,可作为 CPA 系统理想的种子光源^[55]。

振荡器输出的锁模脉冲,首先要经过脉冲展宽器,将飞秒脉冲展宽到几百皮秒甚至是纳秒量级。展宽器最常用的结构是反射式望远镜结构,包括 Martinez 结构和 Öffener 结构^[56,57],由于 Öffener 结构不存在像差,因而目前主要用该结构展宽器对脉冲进行展宽。在 100TW 以上的系统中,要求脉冲展得足够宽,这样才会有较小的非线性效应,同时在高

能量下也不易损伤晶体,所以展宽器要求能够提供尽可能大的展宽倍数。法国 Cedex 的 100TW 系统将 15fs 的种子脉冲展宽到 400ps,日本原子能研究院将 10fs 的种子光展宽到 1.7ns,对应 170000 倍展宽倍数,代表了目前最高的展宽比。设计 20TW 系统也将 25fs 的种子脉冲展宽到 300ps,对应的展宽倍数是 12000。

脉冲经过展宽后,就进入能量放大阶段,这一阶段从放大次序和放大增益程度可分为预放大和主放大。预放大一般是将纳焦量级的展宽脉冲放大到毫焦量级^[58~64],主要利用小信号增益的指数增长特性,对应的增益可达 $10^6 \sim 10^7$,通常按工作方式分为再生预放大和多通预放大,再生预放大本身是一个谐振腔,输出光束质量和能量不受种子光的影响,但增益窄化严重,B 积分大,适合于较长的脉冲放大(大于 30fs)。而多通预放大输出模式和放大能量受种子光的影响大,但单程增益高,增益窄化相对小。另外,目前还有一种很有潜力的预放大方案——光学参量啁啾脉冲放大(OPCPA)。OPCPA 是目前国际上提出发展超短超强激光科学技术的全新概念,是 CPA 技术与 OPA 技术的结合。其过程为:首先将飞秒超短脉冲展宽成纳秒级的啁啾脉冲作为信号脉冲,再以纳秒级的强激光脉冲作为泵浦脉冲,利用 LBO 或 BBO、KDP 等非线性晶体作为光学参量放大晶体进行 OPA 放大,最后通过压缩得到高的峰值功率。由于它具有极高的增益,所以 OPA 可以作为预放大级的前级。OPCPA 有许多诱人的优点:保持了参量光优良的光束质量,极高的增益可使种子光仅经过 2 次~3 次晶体就可以获得毫焦量级的放大能量,使整个系统 B 积分很小,同时它是一个非线性过程,放大不受介质增益带宽的限制,可以支持很宽的光谱,理论上信噪比可以达到 10^9 ,比 CPA 系统要高出 2 个数量级。但目前还存在一些技术和工程上的问题,如在近红外带宽受到种子光波长的限制、放大要求很高的同步精度、稳定性受同步精度和种子光及泵浦光的影响等。不过,这些将随着工程技术的进步会得到很好的解决,成为未来预放大采用的主要方案。这里将 3 种预放大方案进行比较,如表 1.4 所列。

经预放大后,毫焦量级的脉冲还要经过主放大作进一步放大,将单脉冲能量放大到几百毫焦到几十焦耳,其结构主要采用多通预放大,一般经过 1 级~2 级能量主放大就可以获得所需要的能量。虽然主放大增益小,但能量放大很可观,必须考虑热透镜效应及非线性效应等的影响。本书介绍的 20TW 系统直接采用了一级六通主放大就获得了约 1J 的放大输出能量,对应的能量转换效率为 38%。

表 1.4 3 种预放大方案比较

放大器类型	OPCPA	再生预放大器	多通预放大器
提取效率	5%~30%	20%~30%	10%~20%
支持谱宽	不受增益带宽影响,很宽	有较强的增益窄化,谱宽窄	保持种子脉冲谱宽
光束质量	好	好,与种子无关	取决于种子
稳定性	主要取决于同步	好	取决于种子
ASE 影响	很弱	较大	较弱
信噪比	很大	较差	取决于种子
B 积分影响	很小	较大	较小