



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

新型全固态超短脉冲激光
振荡器及放大器研究

作者姓名: 刘家兴

指导教师: 魏志义 研究员

中国科学院物理研究所

学位类别: 理学博士

学科专业: 光 学

研究所: 中国科学院物理研究所

2016 年 5 月

Novel All Solid-State Ultra-Short
Laser Oscillators and Amplifiers

By

Jiaxing Liu

A Dissertation Submitted to
The University of Chinese Academy of Sciences
In partial fulfillment of the requirement
For the degree of
Doctor of Science

Institute of Physics

Chinese Academy of Sciences

May, 2016

摘 要

高功率超短脉冲激光器已经广泛应用于工业加工、科学研究、军事国防、生物医学等领域。全固态超短脉冲激光融合了全固态激光以及超短脉冲激光技术的综合特性,具有结构紧凑、高稳定性、高峰值功率、低成本等优点,开展全固态超短脉冲激光的研究在学术和应用上都具有非常重要的价值。本论文着重开展了新型钕离子掺杂增益介质的激光特性、超短脉冲激光放大研究、全固态皮秒激光应用等研究以及高功率全固态皮秒激光设备的研制,取得的创新性成果主要有:

1、实现了 Nd:LGS、Nd:CLB、Nd:CGB、Nd:SYB、Nd,Y:CaF₂ 等掺钕无序晶体的激光振荡以及连续可调谐运转,均首次获得了光谱宽度超过 40 nm 的调谐激光输出。特别是基于激光二极管泵浦的 Nd:LGS 激光器,获得了从 1045.2 nm 到 1105.3 nm 宽达 60.1 nm 的连续调谐激光输出,并在中心波长 1066 nm 处首次获得了连续锁模,脉冲宽度为 381 fs。相关研究结果发表在 **Opt. Express** 22 (22) 26933-26938 (2014) 杂志上。

2、在全固态 Nd:LGS 超短脉冲锁模激光器中首次发现了 Nd:LGS 晶体的自倍频特性,并且在实验上成功实现了基于 Nd:LGS 晶体的皮秒、飞秒自倍频绿光激光运转。相关研究结果发表于 **Chin. Phys. Lett.** 32 (1) 014206 (2015) 杂志上,并申请了国家发明专利一项。

3、在科技部重大仪器研制项目的支持下,采用基于 Nd 掺杂的 YVO₄ 和 YAG 晶体的组合式皮秒激光放大系统,获得了重复频率为 1 kHz、单脉冲能量为 64.8 mJ、中心波长在 1064.4 nm、光束质量因子 M^2 平方小于 2 的高能量皮秒脉冲激光输出;以及重复频率为 100 kHz、平均功率为 37.5 W、对应的单脉冲能量为 375 μ J、光束质量因子 M^2 小于 2 的高重复频率皮秒放大激光。在此实验基础上,调研和设计了重复频率可达 500 kHz 的全固态飞秒放大器方案。相关研究结果已发表在 **Appl. Sci.** 5 1590-1602 (2015) 杂志上。

4、采用平均功率大于 4 W 的皮秒绿光激光泵浦钛宝石晶体,成功获得了脉冲宽度为 46 fs 的同步泵浦锁模激光输出;采用高重复频率的皮秒激光作为加工与打标系统的光源,合作进行了人类牙齿切片、白宝石、石英片、高分子材料以及碳纤维等材料的激光加工实验;开展了高能量的皮秒放大激光泵浦太赫兹

(THz) 产生的实验研究, 初步获得了重复频率为 1 kHz、脉冲宽度为数十皮秒的高功率皮秒 THz 辐射。

5、成功设计和研制了高能量全固态皮秒激光放大器实验样机以及模块化的皮秒振荡器、再生放大器、功率放大器等全固态皮秒激光设备, 其中设备已经运行于上海同步辐射源、中国计量科学院等合作单位。

关键词: 全固态超短脉冲激光, 掺铈无序晶体, 再生放大, 功率放大, 同步泵浦锁模

Abstract

High power ultra-short lasers have been widely used in industrial processing, scientific researches, military, medical and other fields. Combining the merits of diode pump sources and ultra-short lasers, all solid-state lasers possess advantages of compactness, high stability, high peak power and low cost. Thus, the study on all solid-state ultra-short lasers is very important and valuable in academic and applications. This paper reports our study on laser characteristics of new type Nd doped laser gain media, ultra-short laser amplifiers, applications of all solid-state picosecond lasers and development of picosecond laser instruments. The main innovative results are summarized as follows:

1、Continuous wave and tunable continuous wave laser were firstly realized in Nd:LGS, Nd:CLB, Nd:CGB, Nd:SYB and Nd,Y:CaF₂ disordered crystals. The tuning ranges were over 40 nm in all used crystals. Based on a diode pumped Nd:LGS laser, a tuning range of 60.1 nm from 1045.2 nm to 1105.3 nm was achieved. Further in mode-locked operation, femtosecond pulses with pulse duration of 381 fs were obtained for the first time. Relevant results have been published in **Opt. Express** 22 (22) 26933-26938 (2014) .

2、Self-frequency doubling property was firstly found in Nd:LGS crystal. Diode-pumped self-frequency doubling picosecond and femtosecond Nd:LGS lasers were demonstrated successfully in experiment. Relevant results have been published in **Chin. Phys. Lett.** 32 (1) 014206 (2015) and a national invention patent have been applied.

3、Supported by the National Major Equipment Development Project of the Ministry of Science and Technology of China, with diode-pumped solid-state hybrid amplifiers based on Nd doped YVO₄ and YAG crystals, an output energy of 64.8 mJ centered at 1064.4 nm at a repetition rate of 1 kHz high energy picosecond laser was

achieved with M^2 less than 2. An average power of 37.5 W at a repetition rate of 100 kHz high power picosecond laser was obtained, corresponding to pulse energy of 375 μ J. An all solid-state femtosecond amplifier with high repetition rate ($\sim$ 500 kHz) was studied and designed based on the experience on picosecond amplifications. Relevant results have been published in **Appl. Sci.** 5 1590-1602 (2015) .

4、A synchronously pumped mode locked Ti:sapphire laser by a picosecond green laser of 4 W average power was demonstrated and femtosecond pulse with pulse duration of 46 fs was obtained. With a high repetition rate picosecond laser marking system, laser processing experiments on tooth, sapphire, quartz, polymer material and carbon fiber were carried out cooperating with other groups. An investigation on THz wave generation pumped by a picosecond laser was made and high power THz radiation with pulse duration of tens of picoseconds at a repetition rate of 1 kHz was obtained.

5、A high energy all solid-state picosecond laser amplifier prototype and a series of picosecond laser instruments, such as picosecond oscillators, regenerative amplifiers and power amplifiers, were designed and developed successfully. Some of the instruments are running in Shanghai Synchrotron Radiation Facility and National Institute of Metrology for experiments.

KEY WORDS: all solid-state ultra-short lasers, Nd-doped disordered crystals, regenerative amplification, power amplification, synchronously pumped mode locking

目 录

摘 要	i
Abstract.....	iii
目 录	v
第一章 绪论.....	1
1.1 全固态超快激光技术的发展简介	1
1.1.1 全固态激光技术的发展与特点.....	1
1.1.2 全固态超快激光技术的发展与应用.....	2
1.2 基于钕离子掺杂晶体激光器的研究进展	4
1.2.1 钕离子掺杂激光增益介质研究进展.....	5
1.2.2 钕离子掺杂无序晶体激光研究进展.....	6
1.2.3 掺钕硅酸镱晶体激光特性研究进展.....	8
1.3 全固态超快激光放大器研究进展	9
1.4 全固态皮秒激光产业发展概况	13
1.5 本论文的研究内容和意义	16
第二章 二极管泵浦掺钕无序晶体激光器.....	19
2.1 激光腔内损耗与阈值理论分析	19
2.2 钕离子掺杂无序晶体的连续激光及调谐激光运转	21
2.3 Nd:LGS 锁模飞秒激光运转	27
2.3.1 掺钕硅酸镱晶体的光谱特性.....	27
2.3.2 SESAM 锁模原理.....	28
2.3.3 激光二极管泵浦的全固态 Nd:LGS 飞秒锁模激光器.....	30
2.4 基于 Nd:LGS 晶体的全固态超短脉冲自倍频激光器.....	35
2.5 本章小结与展望	40
第三章 高功率超短脉冲激光放大系统实验研究.....	43
3.1 引言	43
3.2 1kHz、60mJ 皮秒激光系统.....	43

3.2.1 皮秒振荡器的设计与搭建.....	44
3.2.2 激光二极管端面泵浦的皮秒再生放大器.....	49
3.2.3 组合式的全固态皮秒功率放大器.....	56
3.2.4 倍频器.....	60
3.3 100kHz、40W 皮秒激光系统	62
3.4 大于 100kHz 飞秒激光系统的调研与设计	66
3.5 本章小结与展望,.....	69
第四章 全固态皮秒激光器应用研究.....	71
4.1 皮秒激光同步泵浦钛宝石锁模激光器实验研究	71
4.2 皮秒激光加工实验研究	77
4.2.1 人类牙齿切片的表面加工.....	78
4.2.2 其他材料激光加工.....	80
4.3 皮秒激光 THz 产生实验研究	81
4.4 本章总结与展望	85
第五章 全固态皮秒激光设备化研究.....	87
5.1 全固态皮秒激光设备化研究的意义	87
5.2 全固态皮秒激光放大器实验样机搭建	88
5.3 全固态皮秒激光器模块化设计与设备研制	90
5.3.1 皮秒振荡器.....	90
5.3.2 皮秒再生放大器.....	96
5.3.3 皮秒多级单通放大器.....	99
5.3.4 用于同步泵浦钛宝石飞秒激光器的高功率皮秒激光.....	101
5.4 本章总结与展望	104
第六章 总结与展望.....	105
参考文献	109
个人简历及发表文章目录	119
致谢	123
学位论文原创性声明和使用授权说明	125

第一章 绪论

视觉是人类直观认识世界的手段，视觉的产生来源于光。从取火、照明的需求到对五彩缤纷的自然现象的好奇，人类对光的探索与研究从未停下脚步。激光是光的一种特殊存在形式，它具有高亮度、高能量、高相干性以及高方向性等特点，广泛应用于工业制造、信息传输、医疗诊断、科学研究等各个领域。激光技术的理论基础最早可追溯到 1917 年 A. Einstein 所发表的一篇文章中，他在文中用量子的理论描述了辐射，阐述了受激辐射的现象^[1]。此后的几十年中，不断有科学家对光的受激吸收与辐射进行研究并日趋成熟，为激光器的研制打下了理论基础^[2-4]。随后在 1958 年，谐振腔的概念首次由美国贝尔实验室的 C. Townes 和 A. Schawlow 提出^[5]。于是在 1960 年，年轻的科学家 T. Maiman 在前人的肩膀上利用红宝石成功产生了世界上第一束激光^[6]。从此经过半个世纪的发展，激光以其独特的魅力与力量影响并推动着世界的进步。

1.1 全固态超快激光技术的发展简介

1.1.1 全固态激光技术的发展与特点

从激光器类型上分类，激光诞生至今已经发展了气体、液体、固体、光纤、半导体以及自由电子激光器等各式各样的激光器。其中，固体激光器特别是激光二极管泵浦的全固态（DPSS）激光器，融合了半导体激光泵浦技术与固体激光技术，在激光技术的发展历史中具有里程碑式的意义。起初固体激光器采用的都是基于惰性气体的闪光灯泵浦源，这类泵浦源的辐射光谱很宽，覆盖范围从紫外波段一直到红外波段，这就导致了泵浦的能量往往比较分散。而固体激光器所用的增益介质的吸收光谱通常比较窄，只有小部分的泵浦能量能够被吸收利用，其他大多都转化为热量而浪费掉了，其中紫外波段的辐射还有可能在增益介质中产生色心等现象而致其被破坏^[7]。这类闪光灯泵浦的固体激光器具有转换效率低、光束质量差等缺点。1962 年，GaAs 半导体激光二极管（LD）的问世给固体激光器带来了春天^[8]，科学家们意识到如果能找到与 LD 辐射波长相匹配的激光增益介质，就能够实现高效率的半导体激光二极管泵浦的固体激光器（DPL）。LD

问世一年后, R. Newman 第一次实现了这种全新的泵浦方式, 并将其称为全固态激光器。他选择了 Nd:GaWO₄ 晶体作为增益介质, 通过温度控制将 GaAs 激光二极管的波长范围调谐到 880 nm 附近, 成功实现了 1064 nm 的激光输出^[9]。随后利用这种 LD 泵浦的全固态激光技术, 研究者在多种固体增益介质中分别实现了激光输出^[10-14]。其中不乏我国科学工作者的贡献, 1985 年周炳坤等就利用波长为 809 nm 的激光二极管作为泵浦源, 泵浦 Nd:YAG 晶体棒实现了频率稳定的激光输出。全固态激光器的发展初期比较缓慢, 主要局限于 LD 的技术水平低下, 所制备的 LD 质量并不高, 输出功率也比较低, 同时往往需要在低温下工作。直到二十世纪八十年代后, LD 迎来了迅猛的发展, 这主要得益于量子阱 (QW) 和应变量子阱 (SLQW) 等结构的提出以及半导体制备工艺水平的提高和成熟。技术的发展都是相辅相承的, LD 的发展促使全固态激光器得到了突破式的进展, 输出功率由毫瓦级上升到瓦级, 甚至千瓦^[15-17], 光光转化效率最高可达近 30%^[18, 19], 各种新型的激光增益介质如雨后春笋般迅速崭露头角^[20-27], 展现了极大的活力。随后的时间里, 全固态激光器以其高转换效率、结构紧凑、可靠性高、波长范围广等优点得到了广泛的关注和研究, 并成为了激光技术的一个重要分支, 在众多领域中得到了应用和发展。

1.1.2 全固态超快激光技术的发展与应用

为了将激光的能量集中起来, 满足更多的应用需求, 科学家们一直在追求更强、更快的激光输出, 超短脉冲激光技术就是获得该类激光的手段, 超短脉冲激光一般指的是脉冲宽度在 ps 量级 (10^{-12} s) 以内的脉冲激光。世界上第一台激光器是可以运转在脉冲状态的, 但脉冲持续时间为 ms 量级。1961 年提出的调 Q 技术以及继而出现的腔倒空技术, 使输出激光的脉冲宽度压缩为 ns 量级。要想将脉冲宽度进一步压缩, 得到超短脉冲激光, 就离不开锁模技术。激光在谐振腔内振荡过程中存在各个不同的模式, 将各个模式之间的相位锁定起来的技术就称之为锁模技术, 锁模后的激光器能够输出超短脉冲激光。最早的锁模激光器出现在 1964 年, Hargrove 等人在 He-Ne 激光器的谐振腔中插入一个声光调制器对激光进行调制, 首次实现了锁模, 并获得了 10^{-10} s 量级的激光输出^[28]。实验中的锁模原理是利用主动调制的元件实现激光腔内模式锁定的, 被称为主动锁模。区别

于主动锁模的另一种常见锁模技术是被动锁模，它的原理是通过在腔内插入可饱和吸收体，利用其非线性来实现模式之间的锁定，可以获得更短的激光脉冲。1966年，D. Maria 等在 Nd:glass 激光器中首次实现了被动锁模激光输出^[29]。

锁模技术最先在染料激光器中大放异彩，从二十世纪七十年代中叶开始，科学家们首先在染料激光器研究中，实现了连续锁模的皮秒激光输出^[30]，继而采用碰撞锁模方式得到了百飞秒激光输出^[31]，到了 1987 年结合光纤展宽压缩技术获得了最短为 6 fs 的脉冲激光输出^[32]。但是由于染料激光器自身稳定性差、具有毒性、难以维护等缺点最终也没有得到广泛应用。二十世纪八九十年代，随着克尔透镜锁模和半导体可饱和吸收镜（SESAM）锁模技术的出现，以及激光晶体生长技术的日趋成熟，固体超快激光器取得了突飞猛进的发展。

1991 年，Spence 等首次在钛宝石激光器中获得了 60 fs 的克尔透镜锁模脉冲激光输出^[33]，克尔透镜锁模的机理源于介质的克尔效应，由于激光增益介质的克尔效应使激光在谐振腔内产生自聚焦，其中高功率密度的脉冲中间部分比低功率密度的边缘部分聚焦成的光斑半径更小，通过腔内光阑的作用，脉冲在腔内振荡过程中不断被窄化，最终获得超短脉冲的激光脉冲，由于克尔透镜锁模不需要插入任何可饱和吸收体，依靠克尔介质便可实现锁模，因此也叫做自锁模。自锁模技术的出现，使得超短脉冲激光进入了亚十飞秒的量级，再结合腔外压缩技术，最短可以得到几个飞秒的脉冲激光输出^[32]。然而，克尔透镜锁模技术对于调节的要求是非常高的，它要求谐振腔的状态处于稳区的边缘。同时克尔透镜锁模的启动需要一定外界的扰动，使得其对环境的要求也非常高。

SESAM 锁模技术主要应用于全固态超短脉冲激光器，1992 年由 U. Keller 等首次引入，他们利用 SESAM 在 Nd:YLF 晶体中实现稳定的连续锁模，获得了 3.7 ps 的脉冲激光输出^[34]。紧接着在 1993 年，他们再次采用 SESAM 锁模的方式在 Nd:glass 上实现了脉冲宽度为 130 fs 的激光输出^[35]。在早期对 SESAM 锁模固体激光器的研究中，科学家们发现激光器在调试以及工作过程中很容易出现自调 Q 的锁模状态，使 SESAM 在固体激光锁模应用研究中受到了很大阻力。该问题在 1999 年由 C. Honninger 等进行了系统的理论分析和实验验证^[36]，只要在设计激光器参数过程中合理考虑 SESAM 的宏观参量（饱和通量、调制深度、非饱和损耗等），就可以很好地抑制自调 Q 的产生，获得连续锁模状态。该研究激发了

SESAM 锁模应用的活力, 使其在短短十几年间取得了让人瞩目的成果。在短脉冲方面, 6.5 fs 的 SESAM 自启动锁模钛宝石激光器^[37]和 43 fs 的 SESAM 锁模 Yb:CALYO 激光器^[38]已经被报道; 在高功率方面, 薄片结构的 SESAM 锁模 Yb:Lu₂O₃ 激光器获得了功率高达 141 W、脉冲宽度 738 fs 的激光输出^[24]; 在高重复频率方面, Nd:YVO₄ 锁模激光器实现了 160 GHz 激光输出^[39]。SESAM 已经成为了一种主流的锁模元件, 以其灵活的参数设计广泛应用于超快激光的研究中。二十一世纪以来, 随着纳米技术的蓬勃发展, 单壁碳纳米管 (SWNT) 以及石墨烯 (Graphene) 也相继被发现具有类似 SESAM 的可饱和吸收特性, 并且应用于产生超快激光脉冲。2004 年, S.Y.Set 等首次在 Er 光纤激光器中采用 SWNT 作为锁模元件, 实现了 318 fs 的脉冲激光输出^[40]。SWNT 作为锁模元件具有灵活多变、超短的恢复时间、损伤阈值高等优点, 应用潜力很大。2009 年, Zhang 等首次在 Er 光纤激光器中利用石墨烯进行锁模, 成功获得了 694 fs 的激光输出^[41]。近年来, SWNT、石墨烯和拓扑绝缘体等特殊结构材料作为锁模元件的研究已经成为科学家们关注的热点之一。

除了克尔透镜和 SESAM 锁模两种基本的锁模方式外, 同步泵浦锁模也是一种实现超短脉冲激光的途径, 通常被应用于钛宝石激光器的锁模。同步泵浦锁模是指采取一台锁模激光器去泵浦另一台激光器, 通过调制腔内增益的方式实现连续锁模, 采用该锁模方式可以进一步压缩脉冲的宽度, 同时可以获得可调谐的超短脉冲激光。它要求两个激光器要严格同步, 也就是谐振腔的长度要相互匹配(相等或者具有整数倍关系)。早在 1991 年, C. Spielmann 等采用一台锁模的 Nd:YLF 激光器泵浦钛宝石晶体, 首次实现了同步泵浦锁模, 获得了可调谐的 70 fs 脉冲激光输出^[42]。2005 年, R. Ell 等采用同步泵浦的锁模技术, 在钛宝石激光器中实现了少周期的激光输出, 脉冲宽度为 6 fs^[43]。

1.2 基于钕离子掺杂晶体激光器的研究进展

实现激光运转的三要素为激光增益介质、谐振腔以及泵浦源, 其中激光增益介质为激光器的“心脏”, 它的性质直接影响到激光器的输出特性和工作状态。激光出现以来, 对于增益介质的探索与研究一直是科研工作者的重要课题之一。合适的荧光谱线与宽度、对泵浦光强的吸收能力和高的量子效率是激光增益介质

的基本特征。固体激光增益介质通常由掺杂基质和掺杂离子组成, 掺杂基质决定了激光增益介质的物理特性, 掺杂离子决定了其激光发射波长、泵浦光吸收能力等激光特性。掺杂基质和掺杂离子的相互组合给人们带来了性质各异、多姿多彩的激光增益介质, 实现了各种类型的激光输出。而作为超短脉冲激光的增益介质, 除了基本的特性外, 足够宽的光谱带宽尤为重要。常见的用以实现超短脉冲激光运转的增益介质有掺钛蓝宝石 (Ti:Sapphire), 镱离子 (Yb^{3+}) 掺杂的各类晶体 (如 Yb:YAG、Yb:YGG、Yb:YCOB、Yb:CALGO、Yb:KGW 等), 钕离子 (Nd^{3+}) 掺杂的各类晶体 (如 Nd:YAG、Nd:YVO₄、Nd:YLF、Nd:glass、Nd:CaF₂ 等), 铬离子 (Cr^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cr^{4+}) 掺杂和铥离子 (Tm^{2+}) 掺杂的各类晶体 (如 Cr^{4+} :YAG、 Cr^{2+} :ZnSe、Tm:KLuW 等), 激光波长涵盖了从可见光到中红外的范围^[23, 44-46]。

1.2.1 钕离子掺杂激光增益介质研究进展

Nd^{3+} 掺杂的激光晶体最早被用作激光增益介质, 发展至今仍然扮演者重要的角色。这类晶体的吸收波长在 0.8 μm 附近, 且很适合以 LD 作为泵浦, 以其受激辐射截面和长的上能级粒子寿命被广泛应用于各类激光系统中。如图 1.1(a) 所示为 Nd^{3+} 掺杂激光晶体的能级图, 受激辐射跃迁通常发生在 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ 、 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ 中, 对应的辐射波长分别为 1.3 μm 、1.0 μm 和 0.9 μm 附近。其中 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{11/2}$ 的跃迁为四能级系统, ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{13/2}$ 和 ${}^4\text{F}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{9/2}$ 的跃迁为准三能级系统。对于 Yb^{3+} 掺杂的激光晶体 (能级图如图 1.1 (b) 所示), 受激辐射跃迁只能发生 ${}^2\text{F}_{5/2} \rightarrow {}^2\text{F}_{7/2}$ 的准三能级系统中, 对应辐射波长为 1.0 μm 附近。相比较而言, Nd^{3+} 掺杂的激光晶体虽然荧光谱线较窄, 但是当激光运转于 1.0 μm 波长附近时为四能级系统, 不存在重吸收的困扰, 目前已经在高功率超快激光器中得到了重要应用。其中 Nd^{3+} 掺杂的玻璃材料已经成为了飞秒激光系统和啁啾脉冲放大器的最常用材料之一^[47-49]; Nd^{3+} 掺杂的 YVO₄ 和 YAG 也已经是各类皮秒激光振荡器和放大器的最为成熟的激光增益介质^[50, 51]。而运转与准三能级的 0.9 μm 和 1.3 μm 波长附近的激光具有特殊的应用需求, 运转于 1.3 μm 的激光^[52]在光通讯和生物医学领域具有重要应用, 0.9 μm 激光^[53]波长正好覆盖了水蒸气的吸收峰, 可应用在大气探测中。同时, 上述三个波段的激光倍频后正好为红、绿、蓝三色光, 在激光显示、激光全息成像等领域具有很大的应用前景。

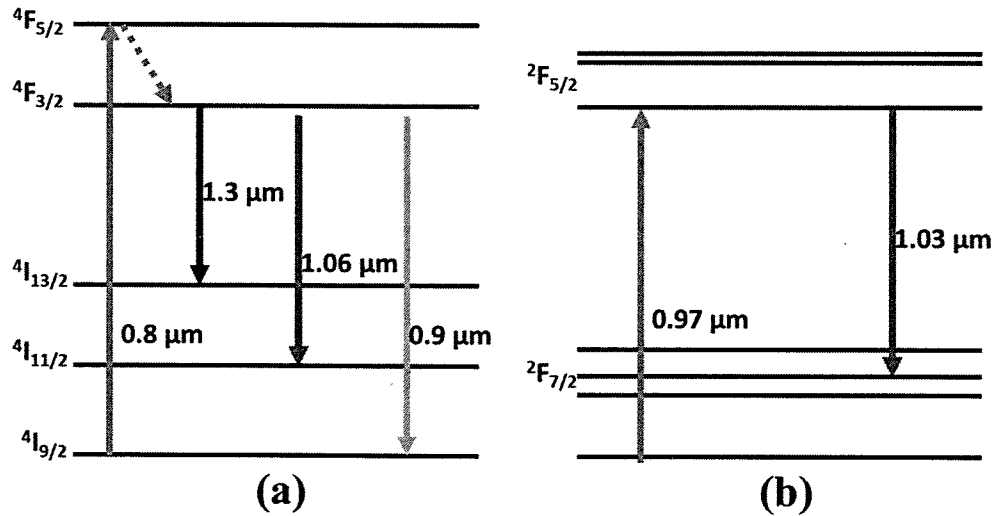


图 1.1 (a) Nd 离子掺杂晶体能级图和 (b) Yb 离子掺杂晶体能级图

1.2.2 钕离子掺杂无序晶体激光研究进展

钕离子掺杂的激光介质中，钕玻璃的激光特性较为优秀，各类钕离子掺杂的玻璃在 $1.0 \mu\text{m}$ 附近的荧光谱线线宽都很宽，可以支持较短脉冲的激光运转。在实验上钕玻璃可实现从 $1.0532 \mu\text{m}$ 到 $1.0893 \mu\text{m}$ 宽达 36.1 nm 的连续调谐激光输出^[54, 55]。早在 1993 年在 SESAM 锁模技术出现不久，U. Keller 等就在 Nd:glass 上实现了 130 fs 的超短脉冲激光输出^[36]。到目前为止，科学家们也不断在各类钕离子掺杂的不同玻璃材料中获得了数十飞秒的激光运转^[56-59]。由于钕玻璃制备技术的成熟，往往可以得到很大的尺寸，因此钕玻璃已经被广泛应用在激光放大系统中并且具备其独有的优势，特别是在 PW 量级的超强超快激光系统中作为高功率泵浦激光器的增益介质，发挥着其他材料难以替代的作用。然而钕玻璃有着自身明显的缺陷，通常热导率都比较低（ 1 W/m/K 附近），这就意味着钕玻璃很难承受高平均功率的泵浦激光，在高重复频率的放大系统中显得无能为力^[60]。

除了钕玻璃外，一般钕离子掺杂的晶体荧光谱线宽都很窄，制约着它们在飞秒激光器中的应用。科学家们一直都没有放弃寻找新的激光增益介质，近些年来，一类无序结构的晶体引起了人们的注意。

从引起无序结构的部分来看，无序晶体一般可分为两种类型：掺杂基质无序的晶体和离子共掺无序的晶体。掺杂基质无序是指基质中某些位置的离子分布具有随机性，导致在该位置有一定概率占据不同种类离子，造成了晶体的无序性。

这类晶体如 $\text{NaNdP}_4\text{O}_{12}$ (NNP)、 Nd:CaYAlO_4 (CYA)、 $\text{Nd:KY}_3\text{F}_{10}$ (KYF)、 $\text{Nd:Ca}_3(\text{GaNb})_{2-x}\text{Ga}_3\text{O}_{12}$ (CNGG)等。离子共掺无序指的是由于两种不同离子共同掺杂在基质中，它们在晶体中某些位置具有一定概率分布而引起的无序性。这类晶体如 Nd,Y:CaF_2 、 Nd,Y:SrF_2 、 Nd,Gd:CaF_2 等。

得益于晶体的无序结构，不同的离子在对不同频率的光发生吸收或者辐射，导致谱线出现非均匀加宽，钕离子掺杂无序晶体的吸收谱线和荧光谱线都得到了明显的加宽，可以支持飞秒激光的运转。此外，钕离子掺杂无序晶体的热导率要优于钕玻璃，使得它们在高功率飞秒激光器以及飞秒激光放大器中也具备应用潜力。但是由于无序晶体的制备工艺更为复杂，以致于制备高质量晶体的难度很大，目前关于无序晶体在飞秒激光器中的报道并不多。2009 年，谢国强等首次在无序晶体 Nd:CLNGG 中获得了 900 fs、1061 nm、486 mW 的激光输出^[61]；接着他们在 Nd:CLNGG-CNGG 混合无序晶体中再次获得了 534 fs、1064 nm、60 mW 的激光输出^[62]；2014 年，基于 Nd,Y:CaF_2 和 Nd,Y:SrF_2 分别实现了 103 fs 和 332 fs 的激光运转^[63, 64]。如表 1.1 所示为近年来基于 Nd^{3+} 掺杂无序晶体的飞秒激光运转相关报道^[61-67]。

表 1.1 基于 Nd^{3+} 掺杂无序晶体的飞秒激光运转结果

晶体种类	泵浦源	激光波长	脉宽	输出功率
Nd:CLNGG	Laser Diode	1061 nm	900 fs	486 mW
Nd:CLNGG-CNGG	Laser Diode	1061.5 nm	534 fs	60 mW
Nd:SLG	Ti:sapphire laser	1061 nm	378 fs	33 mW
Nd:BLG	Ti:sapphire laser	1076 nm	290 fs	30 mW
Nd,Y:CaF_2	Laser Diode	1064 nm	103 fs	89 mW
Nd,Y:SrF_2	Ti:sapphire laser	1057 nm	332 fs	395 mW
Nd:SYSO	Laser Diode	1075.5 nm 1076.8 nm 1078.2 nm	646 fs (best)	620 mW (tri-wavelength)

1.2.3 掺钕硅酸镓镧晶体激光特性研究进展

本论文所重点研究的无序晶体为钕离子掺杂的硅酸镓镧，晶体基质硅酸镓镧 (LGS, $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$) 是一种多功能材料。LGS 的晶格常数为 $a=8.162 \text{ \AA}$, $c=5.087 \text{ \AA}$, 属于三方晶系，晶体结构图如图 1.2 所示^[68, 69]。

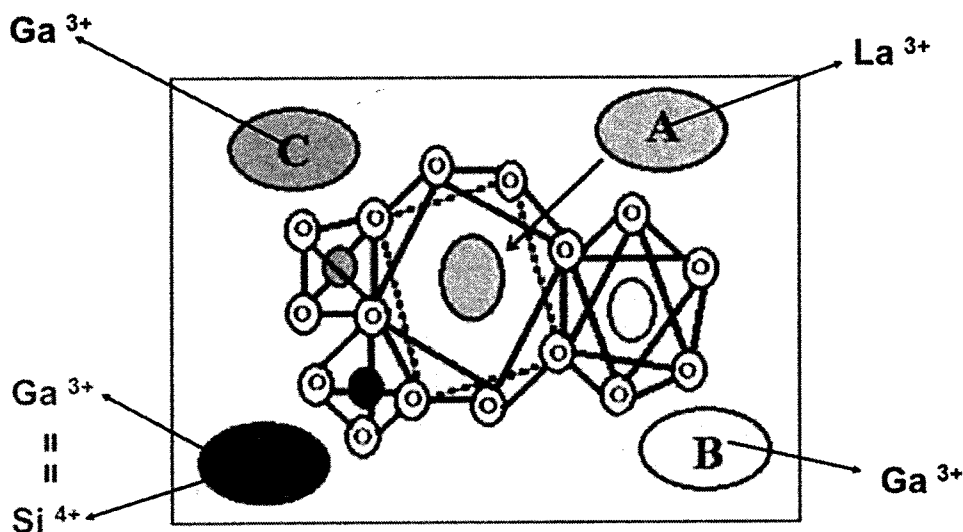


图 1.2 硅酸镓镧 (LGS) 晶体结构示意图

其中 A、B、C 三个晶格位置分别被 La^{3+} 、 Ga^{3+} 和 Ga^{3+} 所固定占据，D 晶格位置则等同概率地可被 Ga^{3+} 和 Si^{4+} 占据，从而造成了 LGS 晶体的无序性。作为一种多功能材料，LGS 晶体目前已经被发现具有压电^[70]、电光^[71]以及电介质^[72]等特性，并且广泛被用作压电晶体、电光 Q 开关、表面波元件等。掺杂稀土元素后，LGS 也是一种优良的激光增益介质，如表 1.2 所示为 Nd:LGS 晶体的特性。1983 年，A. A. Kaminskii 等首次利用 Nd^{3+} 掺杂的 LGS 实现了激光运转^[72]。1994 年，H. J. Eichler 等首次实现了 Nd:LGS 锁模激光运转，获得了 5.6 ps 的超短脉冲激光输出^[73]。随着半导体激光器的日益成熟，对 Nd:LGS 激光性能的研究越来越多。在四能级系统激光运转中，基于 Nd:LGS 的连续与调 Q 激光运转相继被报道，波长为 $1 \mu\text{m}$ 附近^[74, 75]；在准三能级系统激光运转中，904 nm 波长附近的连续可调谐激光及其腔内倍频蓝光激光也已经成功实现^[53, 76]。

表 1.2 Nd:LGS 晶体的特性

	Nd:LGS
晶体结构	三方晶系
折射率	$n=1.96$ (@1064 nm)
激光波长	1066 nm
受激发射截面	$3.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$
发射线宽	10.2 nm (@1064 nm)
自发荧光辐射寿命	90 μs
泵浦波长	809 nm
吸收线宽	5.0 nm (@809 nm)
莫氏硬度	5.5
热导率 (@300 K)	a: 1.4 W/m/K c: 1.7 W/m/K
密度	5.754 g/cm^3
熔点	1470 $^{\circ}\text{C}$

作为一种无序结构的晶体，其所引起的非均匀加宽使得晶体的荧光线宽在 1064 nm 附近宽达 10.2 nm，这意味着具备足够的能力支持飞秒激光的运转。此外，Nd:LGS 的热导率约为 1.7 W/m/K，优于目前常用的钕玻璃材料，是实现全固态飞秒激光运转的一种优良晶体。

1.3 全固态超快激光放大器研究进展

受限于晶体材料的损伤阈值以及泵浦激光的输出功率等因素，直接从振荡器中输出的激光的能量是有限的，一般是单脉冲能量在 nJ 量级^[77]。然而对于一些特殊的应用，如高能物理研究、自由电子激光器、惯性约束聚变等先进研究领域，高峰值功率的超短脉冲激光发挥着非常重要的作用。能量更高、更快的激光脉冲也是人们一直以来所追求的目标，因此超短脉冲激光放大技术尤为重要。要将超短脉冲激光进行放大，最容易想到的就是让激光脉冲再一次经过激光增益介质进行能量的提升，这种方式对于皮秒量级的脉冲激光具有一定的作用，其放大效果取决于激光在增益介质中的功率密度、激光增益介质的种类、泵浦激光的耦合方式等因素，而且往往不够理想。对于脉冲宽度更短的飞秒激光，由于其脉冲持续时间非常短，很容易因为峰值功率密度 (GW/cm^2) 过高而造成破坏，同时介质在高峰值密度下的非线性效应很强，导致难以对飞秒激光进行直接放大。

1985 年, D. Strickland 和 G. Mourou 等首次提出了一种新的放大概念: 啁啾脉冲放大 (CPA) [78]。CPA 原理如图 1.3 所示, 直接从飞秒振荡器输出的激光脉冲首先经过色散元件 (如光栅对、啁啾镜等), 使其光谱成分中的不同频率部分在时间上引入延时而造成脉冲宽度展宽, 这种方式与生物界中的鸟叫声的频率分布很相似, 科学家们形象地称之为“啁啾”; 脉冲宽度更宽的啁啾脉冲峰值功率很低, 注入放大器中进行放大的过程中就很巧妙地避免了元件破坏的问题, 同时还能够有效提取能量; 放大后的啁啾脉冲再经过与展宽过程相反的色散元件进行压缩, 得到比放大前高几个数量级的飞秒激光脉冲。CPA 技术的成功应用, 解决了长期困扰人们的超短脉冲激光放大问题, 推动了高峰值功率超短脉冲激光的快速发展。超短脉冲激光的峰值功率最高已经突破了 PW 量级, 正在向 EW 量级继续推进 [79, 80]。峰值功率密度高达 10^{22} W/cm^2 量级, 在强场物理、极端条件的实验中得到了广泛应用 [81]。

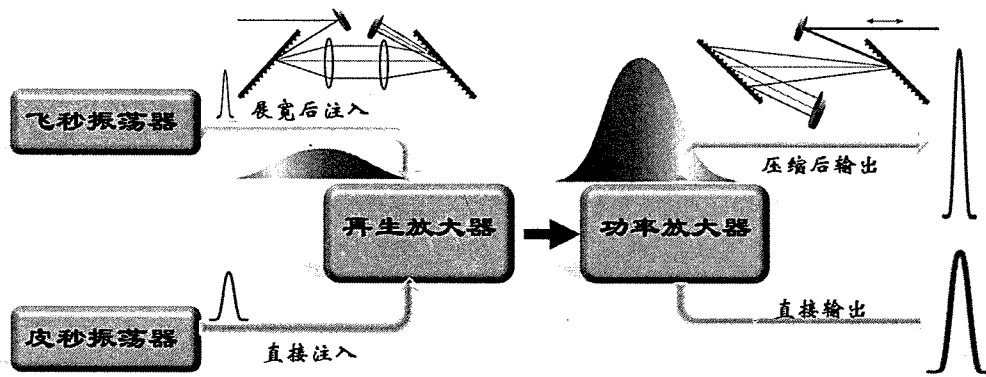


图 1.3 飞秒激光放大技术与皮秒激光放大技术方案图

对于皮秒量级的激光脉冲, 则可以直接注入放大器进行放大, 如图 1.3 所示。放大器中所采取的方式, 最常见的是再生放大技术和多通放大技术。再生放大是一种驻波放大技术, 结构如图 1.4 所示 [82], 它将种子光注入一个激光振荡腔中形成振荡而进行放大。该技术的优点是稳定性高、光束质量好、对种子光要求低、放大效率高等, 缺点是引入色散量大和放大光对比度低等。再生放大技术通常被用作预放大, 从振荡器出来的 nJ 量级激光脉冲经过再生放大后可以被放大到 mJ 量级, 放大增益高达 10^6 - 10^7 。

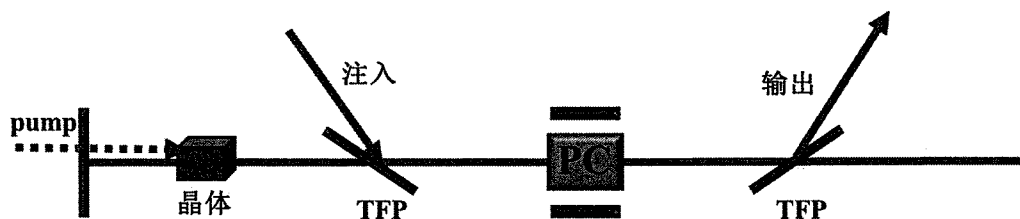


图 1.4 再生放大器结构示意图

多通放大是一种行波放大技术，结构如图 1.5 所示^[83]，它通常用于再生放大后的主放大级以及高重频脉冲激光的放大。这种放大方式通过晶体的次数有限，因此放大效率低于再生放大技术，而且对种子光的光束质量要求较高，放大后光束质量也会出现劣化。优点是引入的材料色散较小，有利于放大脉冲的压缩。

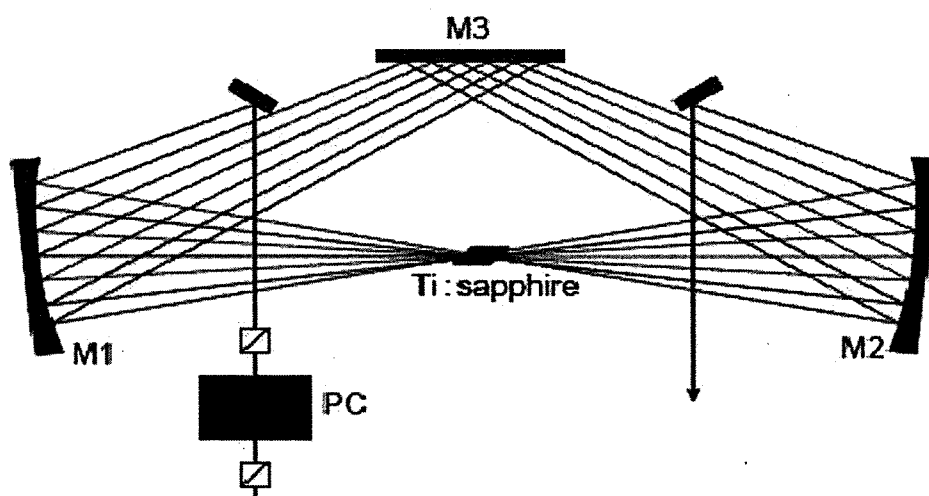


图 1.5 多通放大器结构示意图

半导体激光器泵浦的全固态激光技术与放大技术相结合造就了各种各样的全固态超短脉冲激光放大系统，这类放大器具有结构紧凑、成本低、性价比高的优点，受到了广泛的关注和研究。

全固态皮秒激光在科学研究、工业加工、医疗器械、国防军工等领域应用广泛，近年来特别在材料加工领域更是发展迅猛，相对于传统的加工方式具有得天独厚的优势^[84-87]。采用块状晶体作为增益介质（如 Nd:YAG、Nd:YVO₄ 等），2009 年 H. Daniel 等获得了单脉冲能量高达 1.5 J、脉冲宽度 110 ps、重复频率为 10 Hz 的皮秒放大激光^[88]；2015 年 B. Nathan 等实现了平均功率 145 W、脉冲宽度 200 ps、重复频率为 3 kHz 的放大结果^[89]。采用薄片晶体技术，平均功率高达 1.3 kW、

脉冲宽度约为 8 ps、重复频率为 300 kHz 的超高功率皮秒激光已经实现运转^[90]；近期在欧洲正在建立的 ELI 系统中，已经实现了具有高光束质量和高单脉冲能量（110 mJ）的皮秒泵浦激光源^[91, 92]。采用基于 Yb:YAG 的板条放大技术，M. Schulz 等在 2011 年获得了平均功率为 250 W、重复频率为 12.5 kHz 的皮秒放大激光输出^[93]。本论文采用再生放大以及行波放大技术，深入对全固态皮秒激光放大系统进行了研究。

全固态飞秒放大器结合了全固态激光技术与 CPA 技术，是一种新型的全固态超短脉冲激光系统，被认为是超精密加工与器件制备、激光医疗、科学研究等领域的下一代优秀光源，是目前全固态放大领域的研究热点之一。在精密加工领域，高重复频率的飞秒激光脉冲很容易在材料中引起双光子聚合效应^[94]，从而能够在很高的精度下制备具有微纳结构的器件，如图 1.6 所示为利用全固态飞秒激光进行的微纳器件制备^[95]。

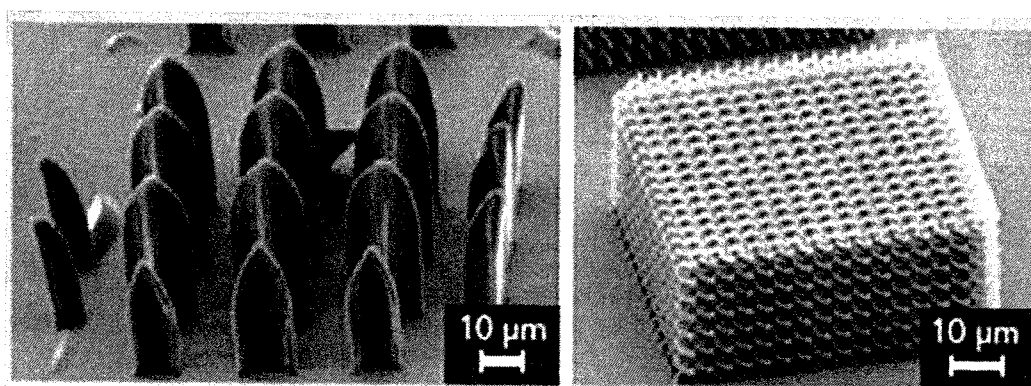


图 1.6 飞秒激光双光子聚合制备微纳结构

在科学研究领域，近年来科学家们已经在实验上得到了脉冲宽度为阿秒量级的激光脉冲，但是苦于目前所用的驱动光源所限，阿秒激光产生效率较低。单脉冲能量为百微焦耳的高重复频率的全固态飞秒激光被认为是下一代高重复频率阿秒激光系统的理想驱动光源，得到了各方的重视。在高单脉冲能量方面，2008 年 Siebold 等采用 Yb:CaF₂ 晶体作为增益介质，基于现有的太瓦系统获得了 197 mJ、1 Hz、192 fs 的太瓦激光输出^[96]；2014 年 Alexander Kessler 等采用 LD 泵浦方式，在 Yb:CaF₂ 晶体上实现了能量高达 16.6 J 的放大激光输出。在高重复频率方面，近年来研究的人越来越多。2013 年，G. H. Kim 等采用双晶体 Yb:KGW 再生放大器结构和 CPA 放大技术，实现了 21 W、小于 300 fs、200 kHz 的放大激光输

出^[97]；同年 E. Caracciolo 等基于 Yb:CALGO 晶体的再生放大器获得了 28 W、217 fs、500 kHz 的飞秒激光脉冲^[98]。在商用激光器方面，立陶宛 Light Conversion 和美国的光谱物理公司也相继推出了全固态飞秒激光器产品，在市场上受到了热烈的欢迎^[99, 100]。相比于国外在全固态飞秒激光器方面的研究，国内无论从研究上还是产品研发上都还处于起步和技术攻关阶段，目前还没有此类产品。

1.4 全固态皮秒激光产业发展概况

过去的 2015 年是联合国颁布的“国际光年”，围绕激光器的全球性活动为激光器在各行各业的发展提供了巨大动力，可以说，激光器已经进入了我们的日常生活中并且逐步成熟。2014 年全球激光器销售额增长 6%，总额已经达到 92.03 亿美元^[101]。其中全固态超短脉冲激光器作为一股新兴的力量，已经逐步扩大市场份额，在科研、工业、医疗、军事等应用上发挥重要作用。特别是全固态皮秒激光器，相比于飞秒激光器，无需进行展宽与压缩即可进行放大，从而在稳定性、小型化、成本控制上更容易进行产业化和满足各类的应用需求。

目前全固态皮秒激光器的应用优势最大的领域在工业加工上。传统的连续与纳秒激光器与材料的相互作用过程中，由于作用时间较长，所产生的热量让材料从液态开始到气态蒸发，使得加工的精度较低；而对于超短脉冲的激光，与材料相互作用后使其从固体直接到气体转化，极大地提高了加工精度。如图 1.7 为长脉冲激光与超短脉冲激光与物质相互作用的机制^[102]。

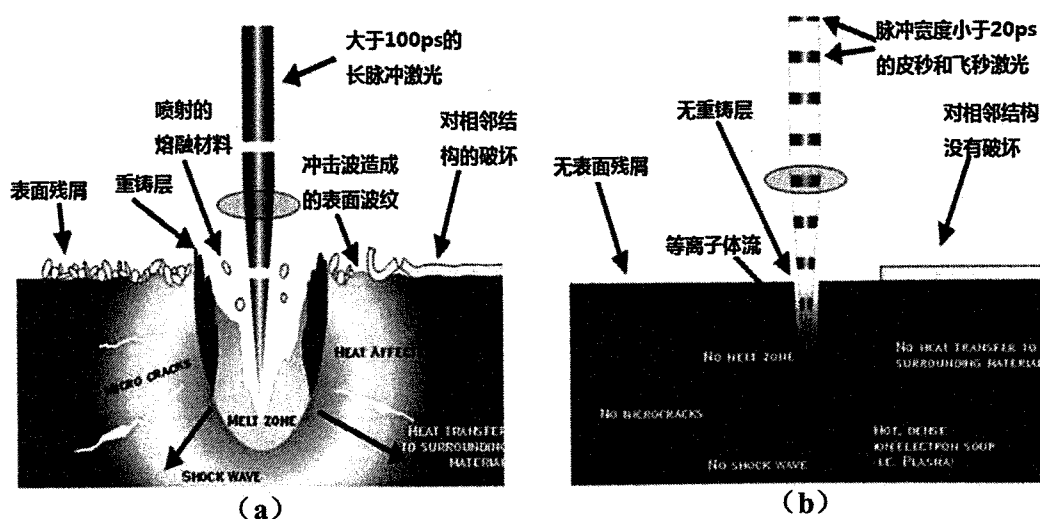


图 1.7 长脉冲激光 (a) 与超短脉冲激光 (b) 与物质相互作用机制

在长脉冲激光（纳秒激光）与物质的相互作用过程中，起主要贡献的为热作用，这种加工方式难以避免地在相互作用区内产生重铸、碎屑以及冲击波等破坏，如图 1.7 (a) 所示^[103, 104]，导致工件边缘以及整体质量不高。对于超短脉冲激光，能量在超短时间尺度内作用于相应区域，很好的避免了长脉冲加工的弊端，是一种“冷加工”方式，如图 1.7 (b) 所示^[102]，加工质量和精密度都非常高。用于加工的超短脉冲激光的单脉冲能量通常要求在几百微焦耳以上，这就意味着需要进行激光放大。相比于飞秒激光器，全固态皮秒激光器除了成本低、结构紧凑、维护方便等优点外，加工效率更快，因此在激光加工领域更受欢迎。

全固态皮秒激光器在加工领域的兴起迅速在各种材料的精密加工中得到了验证与初步使用。如图 1.8 (a) - (d) 为皮秒激光应用于太阳能电池加工、生物支架切割、激光刻蚀刻槽、硅片划线等案例^[105-107]。大功率的全固态皮秒激光系统在科研领域中的应用则显得更为成熟，特别是作为光参量振荡与放大器的泵浦激光在国内外先进的激光装置中起到关键作用。这类皮秒激光器通常要求很高的单脉冲能量（mJ-J 量级），重复频率在 kHz 以内、脉冲宽度在几个皮秒到十几个皮秒之间，对激光器的参数要求较高。如图 1.9 为近年来 F. Krausz 等提出的第三代飞秒激光技术的光路图^[108]，计划主要用作阿秒激光产生的驱动光源。其中皮秒激光器作为三级 OPA 的泵浦激光，其稳定性与输出参数直接影响着整个系统的运行，起到至关重要的作用。该方案的成功研制与广泛应用，必定会促进皮秒激光器走向一个新的台阶。

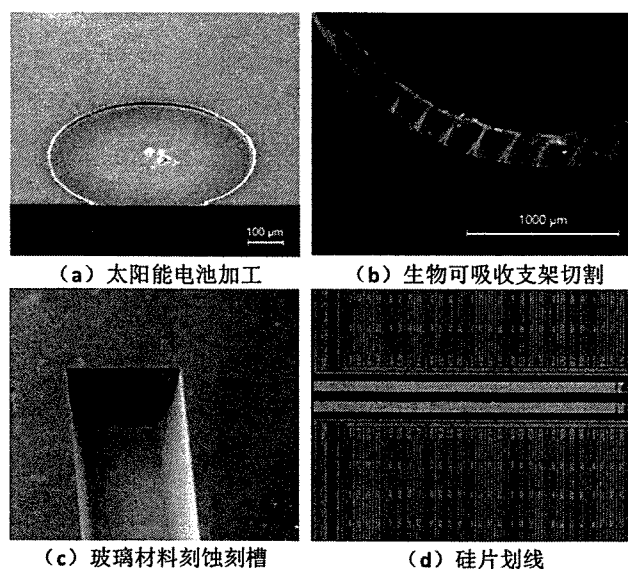
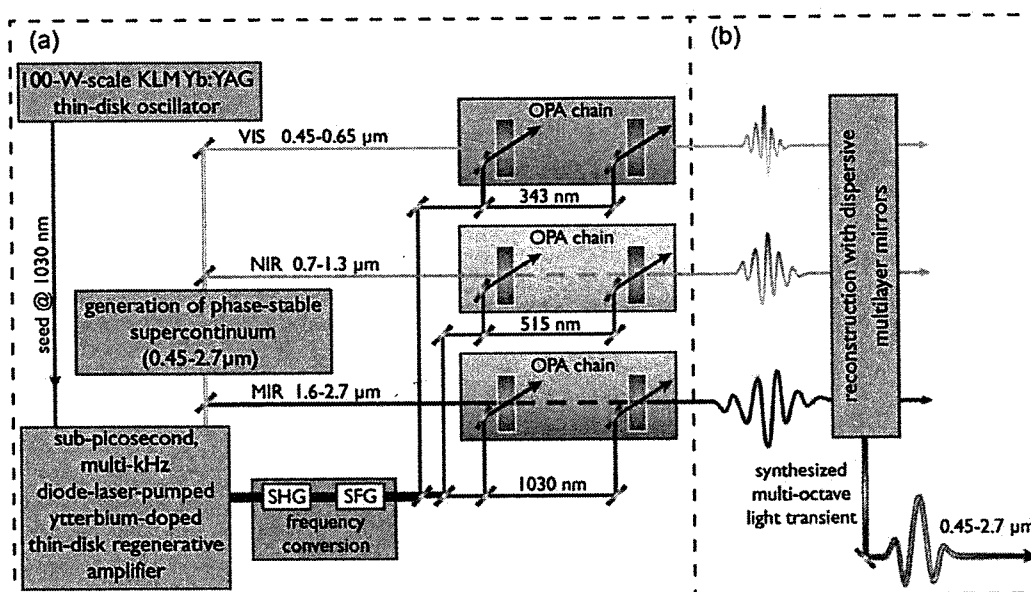


图 1.8 皮秒激光加工案例^[105-107]

图 1.9 第三代飞秒激光系统^[108]

目前皮秒激光产品主要可划分为以下三大类：

第一类，皮秒激光振荡器及功率放大器。该类激光器重复频率在 MHz 量级，平均功率为 W 级，对应的单脉冲能量为 nJ 量级。主要应用于生物医学成像、激光泵浦、激光探测、激光划线等领域，其系统简单、稳定性最高、免于维护，是产量和需求最大的皮秒激光产品。

第二类，高重复频率高平均功率皮秒激光器。该类激光器重复频率在 100 kHz 以上，平均功率在数十 W 到上百 W，对应的单脉冲能量大于 100 μJ。主要应用于各类工业加工、激光成像、激光显示等，是超快激光在工业领域最广泛的激光产品，其往往与激光打标机、加工机床、计算机控制系统、监测系统等集成于一体，应用面广、产值高。

第三类，高单脉冲能量皮秒激光器。这类激光器重复频率通常在 1 kHz 以内，输出激光脉冲能量在 mJ 量级以上。目前主要应用在科学研究领域，作为激光泵浦、强场物理以及高功率 THz 产生等研究的优秀光源。由于应用特殊、参数要求高和成本高等特点，这类激光器需求量不大，主要集中在国内外超快激光相关研究的实验室中。

各类全固态皮秒激光器的技术研发和产品研制一直是国内外激光公司的重点发展方向，目前市场上主要的产品大多来源于国际上几家大型激光公司。如美国 PHOTONICS 公司的 RG30 系列、德国 ALPHALASINC 公司的 Picopower 系

列、奥地利 HighQ LASER(已被 Newport 公司收购)的 picoREGEN 系列、立陶宛 EKSPLA 公司的 PL2210 系列、德国 TRUMPE 公司的 TruMicro 系列等,在市场上占据着主要的份额。这几年来,国内几家激光公司也逐步重视皮秒激光产品的研发,相继推出了各类皮秒激光产品,如国科激光、盐城物科光电、大恒光电、华日激光等。相信在众多领域应用需求的影响与推动下,更多种类、更高参数和更高质量的皮秒激光器必将陆续出现在人们面前,发挥着更大的作用。

1.5 本论文的研究内容和意义

高功率短脉冲的激光器已经广泛应用于工业加工、科学研究、军事国防、生物医学等领域,开展超短脉冲激光的研究在学术和应用上都很重要的价值。本论文着重进行新型钕离子掺杂激光增益介质激光特性、超短脉冲激光放大器研究、全固态皮秒激光应用研究以及小型化、高稳定性的皮秒放大激光设备的研制。主要结构和内容如下:

第一章介绍了全固态超快激光技术的发展历程、基于钕离子掺杂激光增益介质激光器的研究进展、全固态超快激光放大器的研究进展以及全固态皮秒激光产业的发展概况,同时给出了本论文的研究意义和主要内容。

第二章对几种新型的钕离子掺杂的无序晶体的激光特性进行了研究,从实验上实现了其连续激光运转,以及在 $1.0\ \mu\text{m}$ 波长附近进行了激光调谐并获得了较宽的调谐范围。在激光调谐实验研究基础上,选择综合性能较好的 Nd:LGS 晶体开展了激光锁模研究,在中心波长 $1.06\ \mu\text{m}$ 处获得了飞秒脉冲激光输出。同时,对 Nd:LGS 的自倍频特性进行实验研究,并分别首次实现了皮秒和飞秒自倍频绿光激光运转。

第三章详细介绍了高脉冲能量与高平均功率的全固态皮秒激光放大器的设计和研制,以及高重复频率的全固态飞秒激光放大器的方案设计和实验研究。分别实现了中心波长为 $1064\ \text{nm}$ 、单脉冲能量为 $64.8\ \text{mJ}$ 、重复频率为 $1\ \text{kHz}$ 、光束质量因子小于 2 的高能量皮秒放大激光输出和中心波长为 $1064\ \text{nm}$ 、平均功率为 $37.5\ \text{W}$ 、重复频率为 $100\ \text{kHz}$ 、光束质量因子小于 2 的高重复频率皮秒放大激光输出。以及在实验上获得了高重复频率的全固态飞秒激光放大器的初步结果。

第四章介绍了基于所研制的全固态超快激光器进行的一系列应用性研究。其中包括高功率皮秒绿光激光同步泵浦钛宝石锁模激光器的实验研究,并合作进行的皮秒激光加工和皮秒激光驱动的高功率 THz 产生的实验研究。

第五章进行了皮秒放大激光的可靠性及设备化研究。对全固态皮秒激光放大系统及相关设备进行模块化与小型化的改造,着重对光路系统、冷却系统以及电路控制系统等进行了一系列工程化设计,成功研制了小型化皮秒种子源、一体化皮秒再生放大器、皮秒功率放大器以及高功率皮秒绿光激光器等产品化的激光设备。

第六章为对本论文的总结与进一步研究工作的展望。

第二章 二极管泵浦掺钕无序晶体激光器

从荧光发射谱上看, 钕离子掺杂晶体在中心波长 $1.06\ \mu\text{m}$ 处峰值最大, 激光运转效率最高。该波长所对应的为四能级系统的跃迁, 不存在重吸收问题, 且发射截面很大, 所以钕离子掺杂晶体激光阈值往往也较低。钕离子掺杂无序晶体由于其光谱的非均匀加宽, 具备实现飞秒激光运转的巨大潜力, 本章重点开展了钕离子掺杂无序晶体激光特性研究, 其中包括其连续激光、调谐激光以及锁模激光运转等。首先利用波长在 $700\ \text{nm}$ - $900\ \text{nm}$ 间可调谐的激光泵浦源, 针对 Nd:LGS、Nd:CLB、Nd:CGB、Nd:SLB、Nd:SYB、Nd,Y:CaF₂ 等无序晶体, 进行了连续以及可调谐激光特性研究; 进而选择性能较好的 Nd:LGS 晶体, 在 $808\ \text{nm}$ 二极管激光器泵浦下, 采用 SESAM 被动锁模的方式, 研究了其锁模激光运转的特性, 首次实现了二极管泵浦的 Nd:LGS 飞秒激光输出。

2.1 激光腔内损耗与阈值理论分析

从速率方程出发可以对激光在腔内振荡过程中的腔内损耗和阈值进行分析^[109, 110]。假设在晶体内部的激光模式为 ω_0 , 泵浦光模式为 ω_p , 晶体长度为 L , 如图 2.1 所示。以 Nd³⁺ 掺杂的晶体为例, 其能级图如图 2.2 所示。

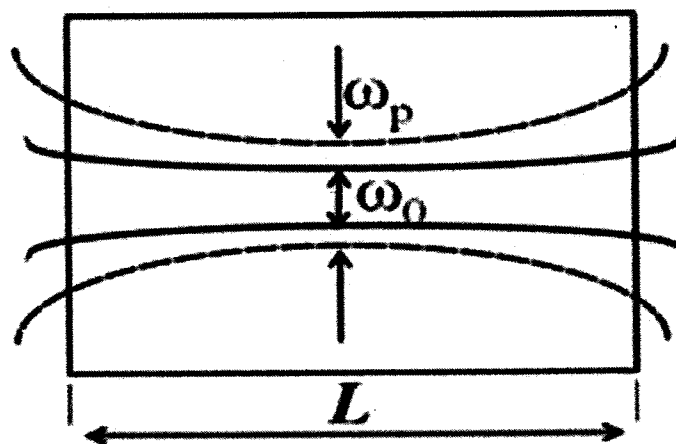
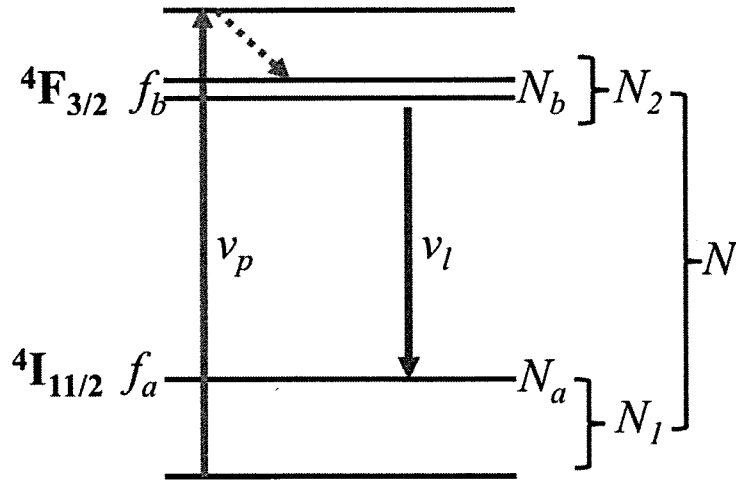


图 2.1 晶体内部激光和泵浦光模式图


 图 2.2 Nd³⁺掺杂晶体能级和布居图

总粒子布居数为 N , 在热平衡的时候, 假设 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{F}_{3/2}$ 能级的粒子布居数为 N_1^0 和 N_2^0 ($N_1^0 \gg N_2^0$, 总粒子数 $N = N_1^0 + N_2^0 \approx N_1^0$); 在激光运转的时候, 假设 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 和 ${}^4\text{F}_{3/2}$ 能级的粒子布居数为 N_1 和 N_2 ($N_1 \gg N_2$, $N = N_1 + N_2 \approx N_1$)。因此激光上能级以及下能级粒子数分别表示为 $N_b = N_2 \times f_b$, $N_a = N_1 \times f_a$, 其中 f_a 和 f_b 是激光上下能级分别占 ${}^4\text{F}_{3/2}$ 和 ${}^4\text{I}_{11/2}$ 能级的粒子数布居比例。根据速率方程的方法, 激光起振的阈值条件可由下面公式表达^[109]:

$$P_{th}^{ab} = \frac{\pi h \nu_p}{2(f_a + f_b) \eta_p \tau} (\omega_0^2 + \omega_p^2) \left(\frac{\delta}{2\sigma} + N_a^0 L \right) \quad (2.1)$$

$$P_{th} = P_{th}^{ab} / [1 - \exp(-\alpha L)] \quad (2.2)$$

上式中 ν_p 为泵浦光频率, η_p 为泵浦效率, τ 为激光上能级粒子寿命, σ 为受激辐射截面, δ 为谐振腔内总损耗。其中 P_{th}^{ab} 指所吸收的泵浦光功率, P_{th} 指入射泵浦光的功率。由(2.1)式我们可以得到, 下能级粒子数布居 f_a 的存在使得激光开始振荡的阈值提高。假设激光模式和泵浦光模式的比例因子 $(\omega_0 / \omega_p)^2$ 为整数, 可以得到腔内损耗的表达式为:

$$\delta_{total} = \left[\delta - \frac{\Delta N^0 L \sigma I_{sat}}{I} \ln \left(1 + \frac{2I}{I_{sat}} \right) \right] \quad (2.3)$$

$$\text{若假定} \quad \delta_s = -\frac{\Delta N^0 L \sigma I_{sat}}{I} \ln \left(1 + \frac{2I}{I_{sat}} \right) \quad (2.4)$$

$$\text{就有} \quad \delta_{total} = \delta + \delta_s$$

其中 $\Delta N = N_b - N_a$ 为粒子数反转, ΔN^0 指在热平衡条件下的粒子数反转。从 (2.4) 式我们就能够得出, 对于 Nd^{3+} 掺杂的晶体, 激光运转在四能级系统中, $\Delta N^0 = 0$, 因此不存在由于重吸收而造成的损耗, 其激光振荡的阈值往往比较低。

2.2 钕离子掺杂无序晶体的连续激光及调谐激光运转

本节对几种钕离子掺杂的无序晶体激光特性进行了研究, 分别开展了连续激光运转与光谱调谐实验。所进行实验的无序晶体包括由合作单位山东大学晶体材料研究所生长的 $\text{Nd}:\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ ($\text{Nd}:\text{LGS}$)、 $\text{Nd}:\text{Ca}_3\text{La}_2(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Nd}:\text{CLB}$)、 $\text{Nd}:\text{Ca}_3\text{Gd}_2(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Nd}:\text{CGB}$)、 $\text{Nd}:\text{Sr}_3\text{Y}_2(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Nd}:\text{SYB}$) 和上海硅酸盐研究所生长的 $\text{Nd}:\text{Y}:\text{CaF}_2$ 等。实验中除了 $\text{Nd}:\text{LGS}$ 晶体为 z 向切割外, 其他晶体的切割方向都为 a 向切割, 晶体横截面积为 $3 \times 3 \text{ mm}^2$, 长度分别为 8 mm 长 $\text{Nd}:\text{LGS}$ 、8 mm 长 $\text{Nd}:\text{CLB}$ 、4 mm 长 $\text{Nd}:\text{CGB}$ 、4 mm 长 $\text{Nd}:\text{SYB}$ 以及 8 mm 长 $\text{Nd}:\text{Y}:\text{CaF}_2$ 。

由于其无序结构, 引起了晶体荧光发射谱的非均匀加宽, 实验中所用晶体的荧光发射谱如图 2.3 和图 2.4 所示^[111]。

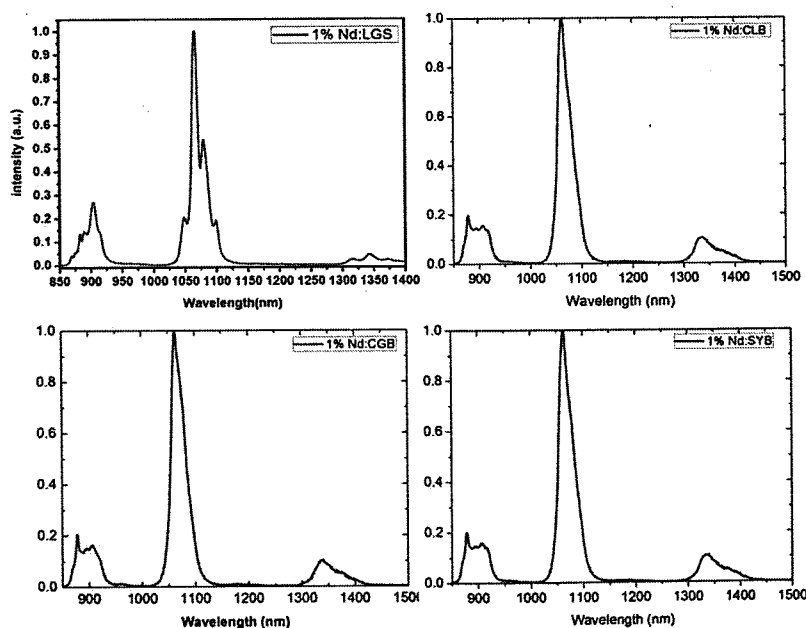
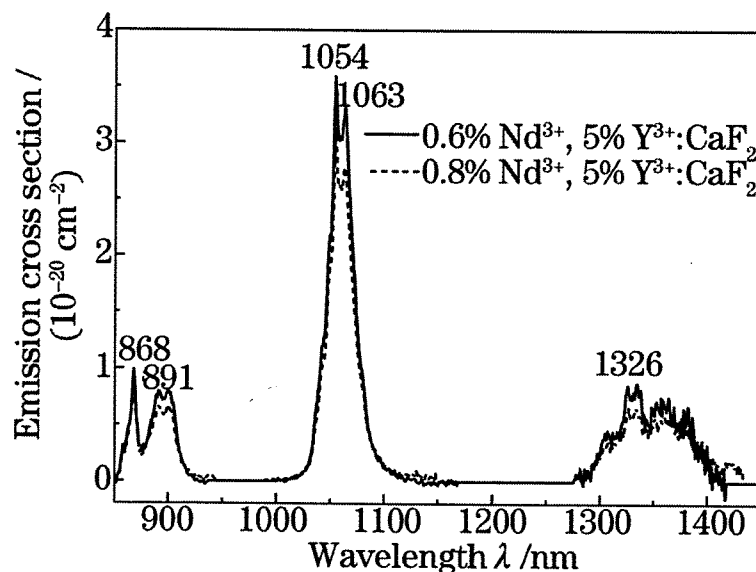


图 2.3 $\text{Nd}:\text{LGS}$ 、 $\text{Nd}:\text{CGB}$ 、 $\text{Nd}:\text{CLB}$ 、 $\text{Nd}:\text{SYB}$ 荧光发射谱


 图 2.4 Nd,Y:CaF₂ 荧光发射谱^[11]

从以上荧光光谱图可以看到,各类晶体荧光发射峰最强都位于 1.06 μm 附近,光谱都比较宽,半高宽接近 30 nm。次强峰在 0.9 μm 以及 1.3 μm 附近,而且光谱宽度相比于最强峰值处甚至更宽。荧光光谱的结果意味着这一系列晶体都具备实现飞秒激光运转的潜力,接着我们在实验上对各类晶体的激光特性进行研究与分析。

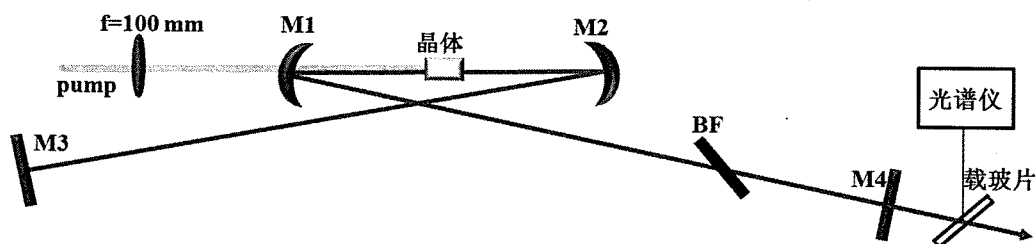


图 2.5 不同晶体连续激光与调谐激光运转实验装置图

实验装置如图 2.5 所示,腔型为一个典型的 X 型腔,其中 M1 和 M2 为一对曲率 $R1=100\text{ mm}$ 的凹面双色镜,镜片对着腔内的一面镀有对 1020 nm-1100 nm 波长范围内的高反膜(反射率 $R>99.9\%$)和波长为 800 nm 附近的增透膜($R<0.2\%$),另一面镀有对 800 nm 附近泵浦激光的增透膜($R<0.2\%$)。两臂端镜分别为一片镀有对腔内激光(1020 nm-1100 nm)高反膜的平面高反镜 M3,以及一片输出镜 M4(输出耦合率 $T=0.8\%$ 或者 2.5%)。当进行激光调谐实验,在装有输出镜的一臂以布儒斯特角插入一片双折射滤光片 BF,通过旋转滤波片来改变晶轴与光轴的角度实现波长调谐。晶体固定在一个由紫铜制成的热沉上,

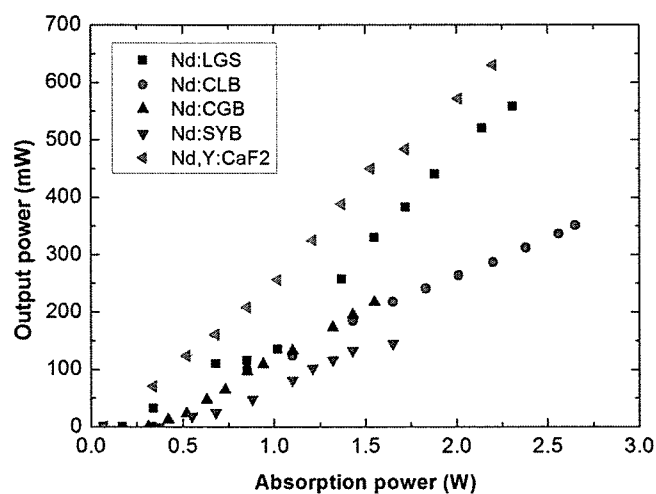
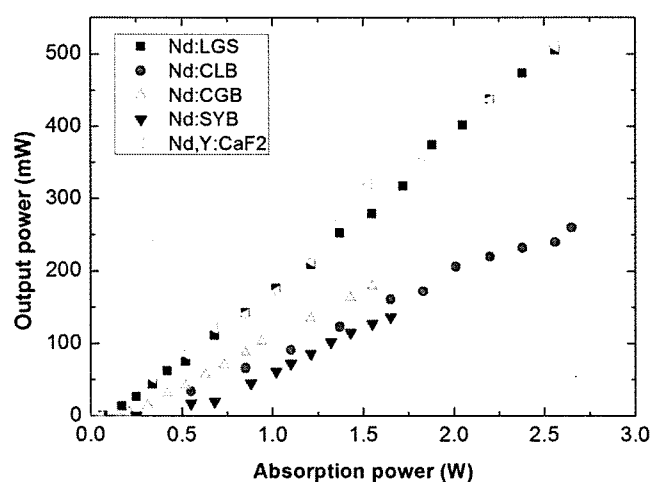
热沉通过水冷恒温为 12 °C。为了使晶体侧面与紫铜更好地接触，晶体用铝箔包裹，通光两个端面镀有对泵浦光（800 nm 附近）与激光（1020 nm-1100 nm）的增透膜。为了针对不同激光晶体，在实验中可进行泵浦光波长的调节，所用的泵浦源为一个自行搭建的波长可调谐的钛宝石连续激光器，其输出功率最大为 3 W，波长调谐范围为 700 nm-900 nm。泵浦激光通过一个焦距 $f=100$ mm 的平凸透镜聚焦到位于两片凹面双色镜中心的晶体上。在输出镜右侧激光输出一端放置一片载玻片，以分出一束功率很小的激光进行光谱测量，测量仪器为一台商用的光谱分析仪（AQ6315A, Ando Inc.），实验中所设置的分辨率为 0.02 nm。

在不插入双折射滤光片的情况下，首先探究不同无序晶体在连续激光运转下的特性。在保持相同泵浦功率下，根据不同晶体的吸收情况调谐泵浦激光波长，测得各个晶体的最佳吸收率以及所对应的泵浦光波长如表格 2.1 所示。其中 Nd:CGB 和 Nd:SYB 晶体由于长度较短，吸收率相比于其他几种晶体要低得多，也同样影响了后续连续激光运转下的输出功率。

表 2.1 不同晶体的最佳吸收率与对应的泵浦光波长

晶体种类	晶体长度 (mm)	掺杂浓度 (%)	泵浦光波长 (nm)	晶体吸收率 (%)
Nd:LGS	8	1.0	809.0	85.4
Nd:CLB	8	1.0	807.3	91.5
Nd:CGB	4	1.0	807.2	52.2
Nd:SYB	4	1.0	806.0	55.0
Nd,Y:CaF ₂	8	1.0	796.8	85.1

接下来的实验中，根据所用晶体的种类，调节泵浦光的波长让晶体对泵浦激光吸收率达到最佳，优化两个端镜的角度使得输出激光的功率最高。分别在输出耦合率 $T=2.5\%$ 与 $T=0.8\%$ 情况下测量不同晶体的连续激光输出功率曲线，为了尽可能排除由于晶体长度较短，吸收率较低而引起的差异，更为客观反映晶体的激光特性，图 2.6 和图 2.7 所示的功率曲线中，纵坐标为输出激光功率，横坐标为晶体所吸收的泵浦光功率。


 图 2.6 输出耦合率 $T=2.5\%$ 下不同晶体连续激光输出功率曲线

 图 2.7 输出耦合率 $T=0.8\%$ 下不同晶体连续激光输出功率曲线

当采用输出耦合率为 2.5% 的输出镜时, 在其他条件不变的情况下, 由于输出镜透射率的较大, 因此输出激光的功率相对较大。在所进行实验的五种晶体中, Nd:LGS 和 Nd,Y:CaF₂ 两种晶体连续激光运转时输出功率最大, 对应的光光效率分别为 26.0% 和 30.4% ; 其他晶体转换效率从大到小分别是 Nd:CGB、Nd:CLB 和 Nd:SYB。

当输出耦合率为 0.8% 时, 在同样的泵浦光功率下, 由于腔内功率密度较强, 因此腔内激光起振的泵浦光阈值相对较低。其中 Nd:LGS 和 Nd,Y:CaF₂ 两种晶体对应的泵浦光阈值最低, 分别为 67 mW 和 54 mW ; 其余 Nd:CGB、Nd:CLB、

Nd:SYB 晶体对应的阈值分别为 150 mW、210 mW、250 mW。

综合上述连续激光运转的实验结果, 五种掺钕无序晶体的激光阈值都比较低, 其中 Nd:LGS 和 Nd,Y:CaF₂ 两种晶体的综合特性最好, 激光起振的阈值最低以及激光运转时转换效率最高。

为了得到相对较宽的激光调谐宽度, 我们采用了输出耦合率为 0.8 % 的输出镜, 增加腔内振荡激光的功率密度, 以便尽可能大范围地调谐激光的波长。在保持连续激光运转的情况下, 在装有输出镜的一臂插入一片以布儒斯特角放置的双折射滤光片, 插入后仔细微调插入角度使得插入损耗最小, 这时输出激光的功率最大。实验中通过逐渐旋转双折射滤光片与光轴的角度, 利用光谱仪连续调谐输出激光的波长, 分辨率设置为 0.02 nm, 并且记录下该波长所对应的输出功率, 最终得到不同晶体的激光调谐曲线如图 2.8-2.12 所示。

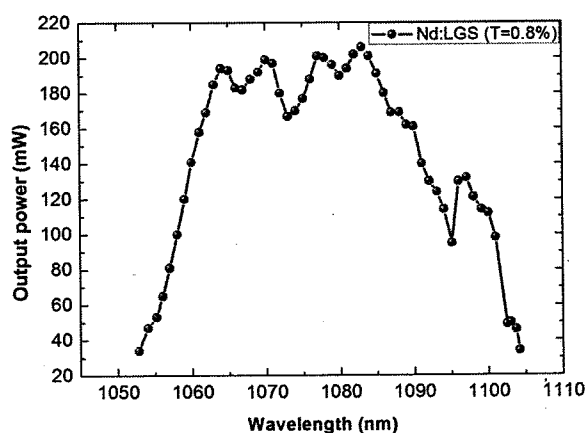


图 2.8 输出耦合率 $T=0.8\%$ 下 Nd:LGS 晶体激光连续调谐曲线

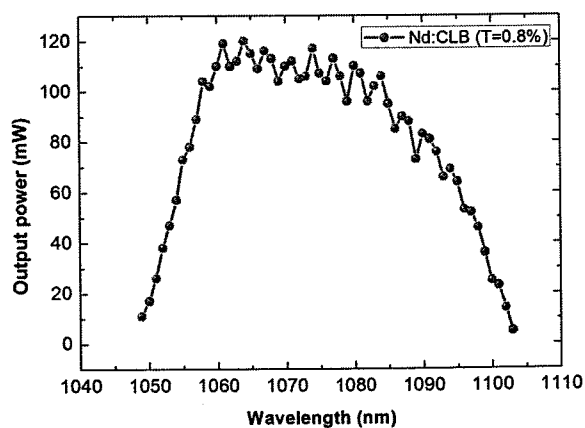


图 2.9 输出耦合率 $T=0.8\%$ 下 Nd:CLB 晶体激光连续调谐曲线

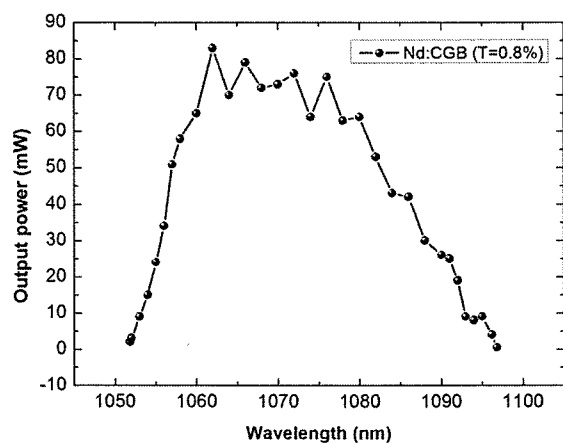


图 2.10 输出耦合率 $T=0.8\%$ 下 Nd:CGB 晶体激光连续调谐曲线

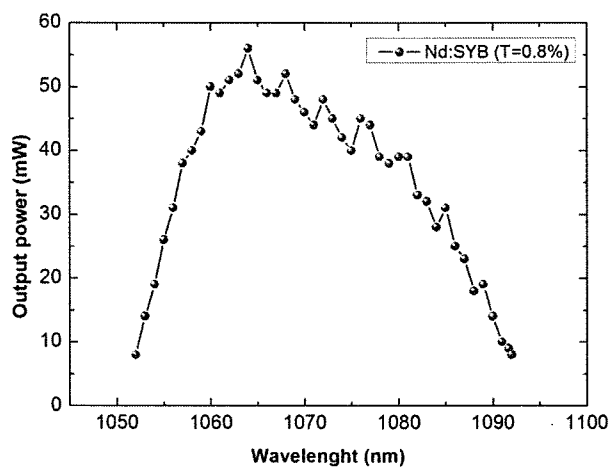


图 2.11 输出耦合率 $T=0.8\%$ 下 Nd:SYB 晶体激光连续调谐曲线

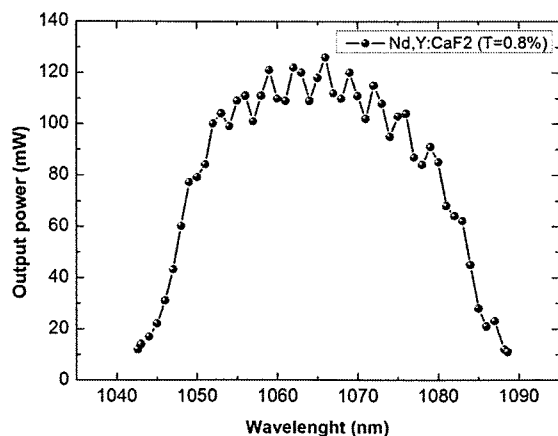


图 2.12 输出耦合率 $T=0.8\%$ 下 Nd,Y:CaF₂ 晶体激光连续调谐曲线

从上述激光连续调谐曲线可知, 实验中所有无序晶体都首次实现了光谱宽度超过 40 nm 的调谐宽度, 优于目前文献所报道的掺钕激光晶体的相关结果。其中 Nd:CLB 和 Nd:LGS 两类晶体调谐宽度最宽, 分别获得了 51.4 nm (1052.8 nm-1104.17 nm) 和 54.1 nm (1048.87 nm-1103 nm) 的结果; Nd:CGB、Nd:SYB 以及 Nd,Y:CaF₂ 晶体调谐宽度依次分别为 45 nm、40 nm 以及 46 nm。

2.3 Nd:LGS 锁模飞秒激光运转

从几种钕离子掺杂无序晶体的调谐激光特性分析结果, 结合连续激光运转效率以及调谐范围的实验结果, 选择了综合性能较好的 Nd:LGS 晶体进行了锁模激光特性研究, 采用 SESAM 锁模技术与腔内色散补偿控制, 首次获得了飞秒激光输出。

2.3.1 掺钕硅酸镓钬晶体的光谱特性

硅酸镓钬晶体 (LGS) 是一种具有无序结构的多功能晶体^[70-72], 掺杂稀土元素离子 Nd³⁺后, Nd:LGS 成为了一种性能优良的激光增益介质^[74, 75, 112]。首先, 由于其无序结构所引起的非均匀加宽使得晶体的吸收谱和发射谱发生了明显的增宽。图 2.13 为采用分光光谱仪所测得的 1 %掺杂浓度 z 向切割的 Nd:LGS 晶体的荧光发射谱与吸收谱。其中心波长位于 809 nm 附近的宽度较宽的吸收峰非常适合于激光二极管泵浦, 受激辐射带宽 (FWHM) 在 1.0 μm 附近大于 30 nm, 其中中心波长在 1066 nm 处宽达 10 nm 以上, 已经足以支持飞秒脉冲激光的运转。此外, Nd:LGS 的热导率约为 1.7 W/m/K, 优于目前在飞秒激光器常用的钕玻璃材料^[113]。综合以上性能, Nd:LGS 是一种实现全固态飞秒激光运转的优良晶体。

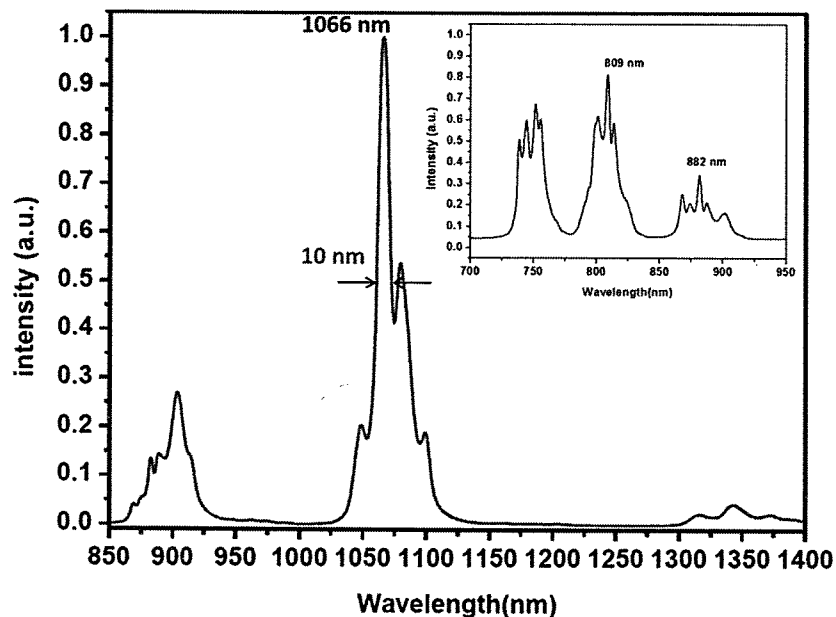


图 2.13 1%掺杂浓度, z 向切割的 Nd:LGS 晶体荧光发射谱与吸收谱

在此前的实验研究中,我们采用一台连续钛宝石激光器作为泵浦源,已经在该晶体上初步实现了飞秒激光运转^[14]。但是,钛宝石激光器成本高、结构复杂、难以维护,不适合于小型化、低成本飞秒激光器的研发,而激光二极管泵浦的全固态飞秒激光器以其结构紧凑、成本低廉、稳定性好等优点更受研究者与社会的欢迎,因此激光二极管泵浦的 Nd:LGS 飞秒锁模激光研究具有重要的价值与实际应用意义。

2.3.2 SESAM 锁模原理

SESAM 是半导体可饱和吸收镜的简称,饱和通量 $F_{\text{sat},A}$, 调制深度 ΔR , 非饱和损耗 ΔR_{ns} 以及恢复时间 τ_A 是其主要的参数。在工作的时候, SESAM 对激光脉冲的反射率会随着脉冲激光通量的逐渐升高而趋向饱和,饱和指的是对激光不再存在吸收作用,因而完全反射。其中调制深度 ΔR 就是指饱和时的反射率与低通量入射时的反射率的差值。在实际情况中,由于缺陷和杂质的吸收、散射以及基底材料反射率有限等因素, SESAM 达到饱和状态时是难以完全反射的,这部分的损耗就是非饱和损耗 ΔR_{ns} 。饱和通量 $F_{\text{sat},A}$ 定义为: $F_{\text{sat},A} = h\nu / \sigma_A$, 其中 $h\nu$ 是指入射的光子能量, σ_A 是指在 SESAM 内载流子的吸收截面。当激光脉冲离开后, SESAM 将从饱和状态逐渐恢复为平衡状态,这个恢复过程分为两个阶段,

第一个阶段发生在 60 fs-300 fs 内，期间价带和导带各自发生内部的热平衡，使饱和部分恢复；第二个阶段发生在接下来的数 ps 到数 ns 之间，期间载流子再复合回到价带，使得饱和逐渐完全恢复，这个阶段所经历的时间就是恢复时间 τ_A 。这两个饱和恢复过程在 SESAM 锁模中各自发挥着不同的作用。第一个阶段协助形成超短脉冲，维持锁模状态；第二个阶段启动锁模。

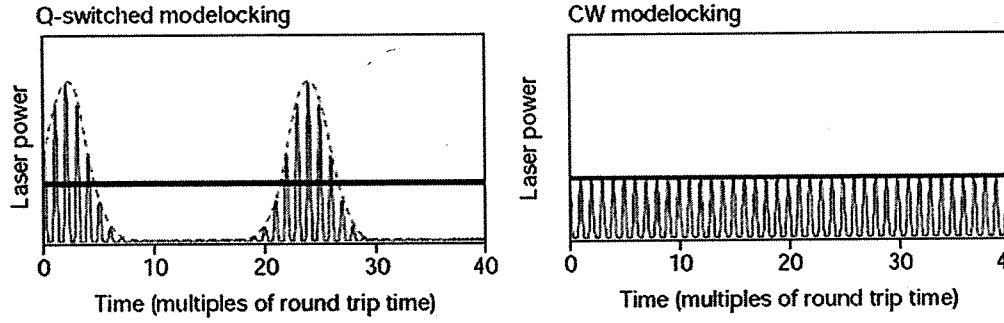


图 2.14 调 Q 锁模（左图）和连续锁模（右图）状态运转图

基于 SESAM 进行被动锁模的激光器中，通常会存在两种状态：调 Q 锁模和连续锁模，如图 2.14 所示^[115]。其中稳定的连续锁模状态是我们所想要的，调 Q 锁模是要避免的。在 SESAM 被应用与固体激光器锁模初期，调 Q 锁模的存在给实验和应用造成了很大阻碍，科学家们也逐步深入开展了对这两种状态出现的理论研究^[116, 117]。

1999 年，C. Honninger 等进行了系统的理论分析，经过公示推导更为简洁明了地得到了连续锁模的条件^[37]：

$$E_p^2 > E_{sat,L} \cdot E_{sat,A} \cdot \Delta R \quad (2.5)$$

$$E_{sat,L} \cdot g \cdot K^2 \cdot E_p^3 + E_p^2 > E_{sat,L} \cdot E_{sat,A} \cdot \Delta R \quad (2.6)$$

其中(2.5)式对连续锁模的皮秒脉冲有效，而对于孤子锁模激光，锁模条件演化成了(2.6)式。其中 E_p 指腔内激光脉冲的能量； $E_{sat,L}$ 指激光增益介质的饱和能量，由饱和通量 $F_{sat,L}$ 和有效模面积 $A_{eff,L}$ 决定 ($E_{sat,L} = F_{sat,L} \cdot A_{eff,L}$)； $E_{sat,A}$ 指 SESAM 的饱和能量，由在 SESAM 的饱和通量 $F_{sat,A}$ 和有效模面积 $A_{eff,A}$ 决定 ($E_{sat,A} = F_{sat,A} \cdot A_{eff,A}$)。饱和通量 $F_{sat,L}$ 和有效模面积 $A_{eff,L}$ 可由激光光子能量 $h\nu$ 、

受激辐射截面 σ_L 和激光束腰半径 ω_L 所决定 ($F_{sat,L} = h\nu / m\sigma_L$, $A_{eff,L} = \pi\omega_L^2$)。 g 为激光在腔内的增益; $K = df / dE_p$, 其中 f 为激光脉冲和增益带宽的比值。

从上式我们可以得到, 要想实现连续锁模以及抑制调 Q 锁模, 在激光器设计以及 SESAM 的选择上可以采取以下一系列措施:

- (1) 提高腔内激光的单脉冲能量。可通过提高泵浦激光的功率, 采用输出耦合率更小的输出镜以及提高腔长等方式实现。
- (2) 减小腔内激光在 SESAM 和激光增益介质上的束腰半径, 使得激光的能量在 SESAM 和激光增益介质中更容易达到饱和。
- (3) 选择饱和能量更低以及调制深度更小的 SESAM。

2.3.3 激光二极管泵浦的全固态 Nd:LGS 飞秒锁模激光器

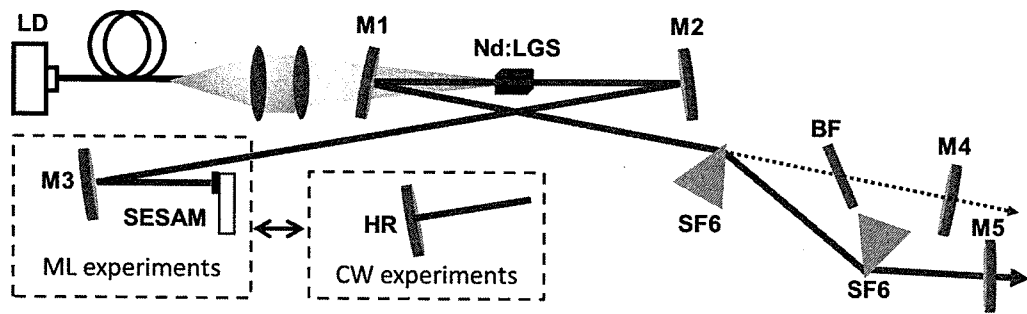


图 2.15 全固态 Nd:LGS 连续与锁模激光实验装置图

图 2.15 为实验中所设计与采用的装置图, 为了系统研究 Nd:LGS 晶体在激光二极管泵浦下的特性, 我们首先进行了连续可调谐的激光实验。实验中所用的激光增益介质为一块 $3 \times 3 \times 8 \text{ mm}^3$ 、Z 向切割、钕离子掺杂浓度为 1% 的 Nd:LGS 晶体, 晶体通光两端镀有对 808 nm 和 $1 \mu\text{m}$ 附近增透膜 ($R < 0.2\%$)。为了得到较好的冷却效果, 晶体的侧面用铝箔包裹并固定与紫铜热沉上, 通过水冷将温度控制在 12°C 。泵浦源采用的是由德国 LIMO 公司生产光纤耦合输出的激光二极管, 耦合光纤的芯径为 $100 \mu\text{m}$, 泵浦激光中心波长为 808 nm, 通过一个 1:1 的成像系统聚焦到晶体上。实验中所采用的谐振腔为 X 型腔, M1 和 M2 是一对曲率半径为 75 mm 的平凹双色镜, 镜片对着腔内的一面镀有对波长在 $1 \mu\text{m}$ 附近的高反膜 (反射率 $R > 99.9\%$) 和波长在 808 nm 附近的增透膜 ($R < 0.2\%$), 对着腔外的一面镀有对 808 nm 附近泵浦激光的增透膜 ($R < 0.2\%$)。谐振腔的两个端

镜分别为一片镀有对腔内激光（波长在 $1\ \mu\text{m}$ 附近）高反膜的平面高反镜 HR，以及一片输出耦合率为 0.8 % 或者 2.5 % 的输出镜 M4。通过调节激光腔镜的姿态优化激光输出功率，在泵浦功率为 5.8 W 情况下，当使用 0.8 % 的输出镜时最大输出功率为 726 mW；当使用 2.5 % 的输出镜时最大输出功率为 953 mW，输出功率曲线如图 2.16 (a) 所示。激光起振时泵浦光的阈值较低，分别为 71 mW 和 161 mW。接着我们在装有输出镜的一臂插入一片双折射滤光片对激光波长进行调谐，为了使得插入损耗最小，双折射滤光片的插入角度为布儒斯特角，通过旋转其与光轴的角度进行波长调谐，输出镜选用的输出耦合率为 0.8 %。最终我们获得了波长从 1045.2 nm 到 1105.3 nm 连续调谐范围宽达 60.1 nm 的结果，如图 2.16 (b) 所示。这是目前掺钕激光晶体所得到的最宽的调谐范围，使得 Nd:LGS 成为实现飞秒激光运转的优良晶体。

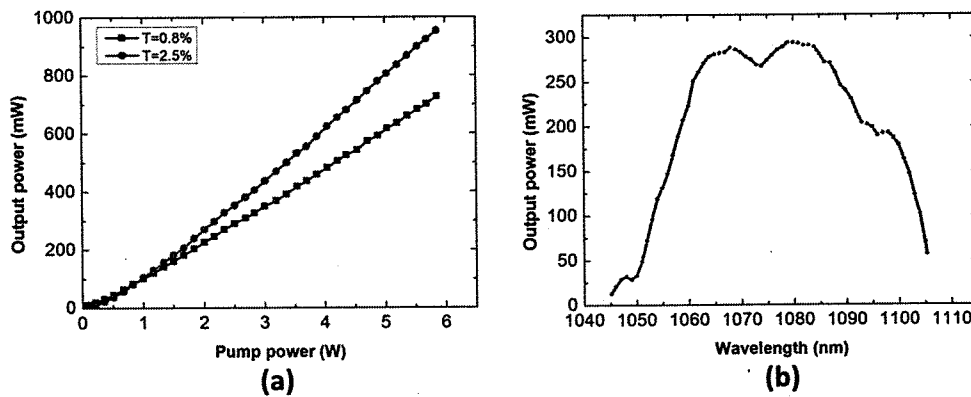


图 2.16 (a) 不同输出耦合率下 Nd:LGS 连续激光输出功率曲线；(b) 在输出耦合率为 0.8 % 下连续激光波长调谐曲线

为了实现飞秒锁模激光运转，我们将腔内一端的平面高反镜 HR 更换为一片曲率半径为 100 mm 的平凹反射镜 M3 和一片半导体饱和吸收镜 (SESAM)。该 SESAM 由德国的 BATOP 公司生产，它工作在中心波长 $1.06\ \mu\text{m}$ 处的调制深度为 0.4 %、饱和通量为 $90\ \mu\text{J}/\text{cm}^2$ 、恢复时间为 500 fs。腔内激光在 SESAM 上的光斑直径约为 $70\ \mu\text{m}$ ，保证高的激光功率密度以启动锁模。在腔内色散管理方面，我们插入了一对 SF6 棱镜对来引入负色散，通过预先估算腔内总的正色散量，棱镜对摆放的间距为 31.5 cm。所采用的输出镜 M5 的输出耦合率为 0.8 %，谐振腔总的长度为 1.12 m，对应的重复频率为 134 MHz。

通过优化腔内镜片以及色散补偿量,在泵浦功率为 5.9 W 下我们获得了锁模激光运转。但是,我们观察到锁模脉冲序列并不够稳定,分析原因后判断是由于双波长以及高阶横模的振荡所引起的。如图 2.17 (a) 的连续激光运转光谱可知,中心波长在 1063 nm 和 1066 nm 的激光很容易同时实现振荡。当激光运转于锁模状态时,从图 2.17 (b) 可以明显看到,除了处于锁模状态的中心波长在 1066 nm 的激光模式外,中心波长在 1063 nm 处的激光模式也同时实现了振荡输出,对锁模序列的稳定性和光谱质量造成了很大的影响。为了解决这个问题,我们在两个棱镜对之间插入了一个可以调节宽度的狭缝,通过调节狭缝的位置和宽度,改变腔内各个激光模式的损耗,成功抑制了 1063 nm 处激光模式的振荡,明显的提高了激光锁模的稳定性和光谱的质量,如图 2.17 (c) 所示,实现了稳定的锁模以及在中心波长 1066 nm 处光滑的锁模光谱输出。然而狭缝的插入也带来了高的腔内损耗,使得输出功率从 120 mW 降低为 75 mW。综合输出功率、锁模稳定以及光谱质量等方面考虑,我们认为该措施是有效且具有价值的。图 2.18 为从示波器上观测到的锁模脉冲序列,以及锁模激光运转时的输出功率曲线。当泵浦光功率逐渐增加到 4.54 W 时,稳定的连续锁模可以实现自启动。当泵浦功率为 5.9 W 时,锁模激光输出功率最大为 75 mW。

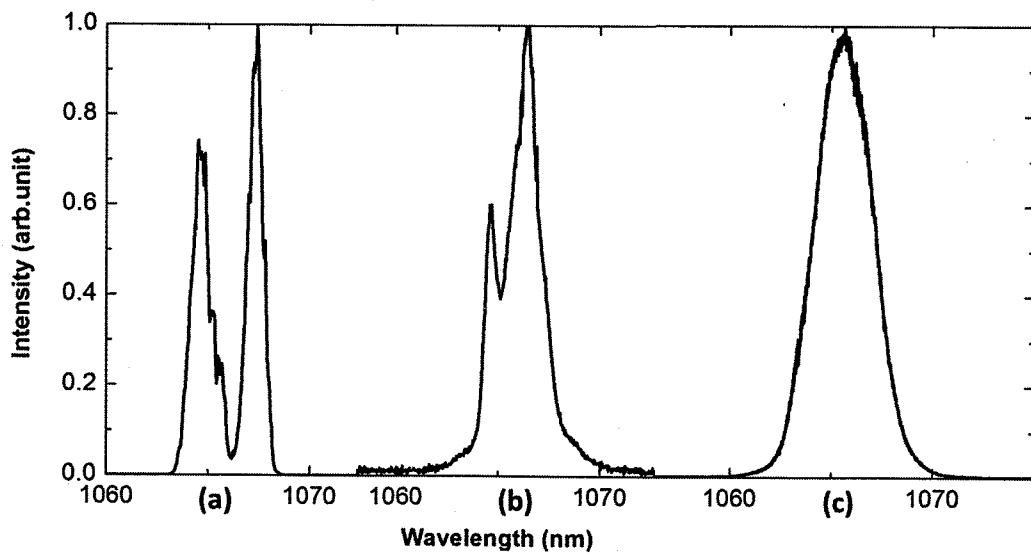


图 2.17 连续激光和锁模激光的光谱图。(a) 连续激光光谱图; (b) 不插入狭缝下锁模激光光谱图; (c) 插入狭缝优化后锁模激光光谱图

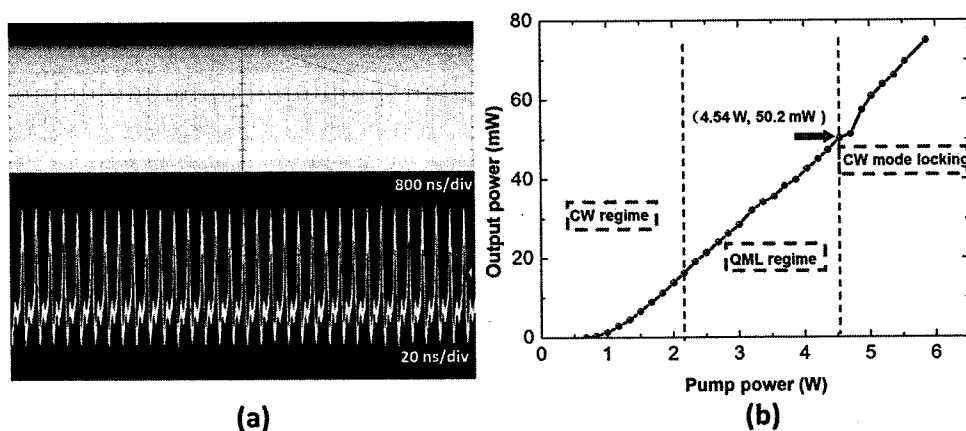


图 2.18 (a) 示波器上观测的连续锁模脉冲序列；(b) 在输出耦合率为 0.8 % 下的锁模激光输出功率曲线

如图 2.19 所示为我们采用一台商用的强度自相关仪 (Femtochrome, FR-103MN) 所测得的锁模脉冲的强度自相关曲线, 测量结果显示自相关曲线半高宽度为 587 fs。如果采用常用的双曲正割曲线拟合, 激光脉冲宽度为 381 fs。图 2.19 插图所示为采用一台光谱分析仪 (AQ6315A, Ando Inc.) 测得的锁模激光光谱图, 其中光谱中心波长为 1066 nm, 半高宽度为 3.28 nm。由光谱宽度以及脉冲宽度可计算出时间带宽积为 0.33, 与双曲正割曲线的傅里叶转换极限理论值 0.315 非常接近, 这反映出我们腔内色散的控制较为合理。

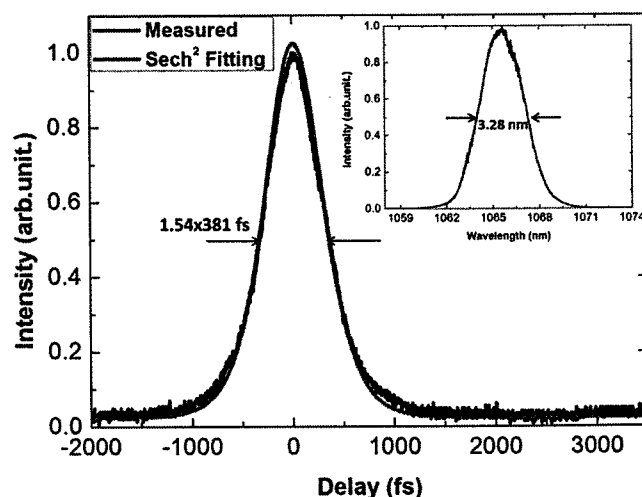


图 2.19 锁模激光脉冲的强度自相关曲线测量结果与双曲正割拟合结果；插图：中心波长为 1066 nm、光谱半高宽为 3.28 nm 的锁模激光脉冲光谱测量结果

为了进一步反映锁模激光的稳定性与重复频率，我们采用了一台频谱分析仪（Agilent E4407B）对锁模脉冲的频谱进行测量。如图 2.20 所示结果，当扫描的分辨率设置为 1 kHz 时，频谱曲线的最高峰值出现在 134.4 MHz 处，且信噪比在 60 dB 以上；当扫描的分辨率设置为 100 kHz、扫描范围为 0-1 GHz 时，频谱曲线显示为一系列稳定的梳齿，反映了锁模激光处于一个较高的稳定性。一旦泵浦激光关闭后重新启动，随着泵浦功率的逐渐增加锁模会自启动以及保持稳定运行。

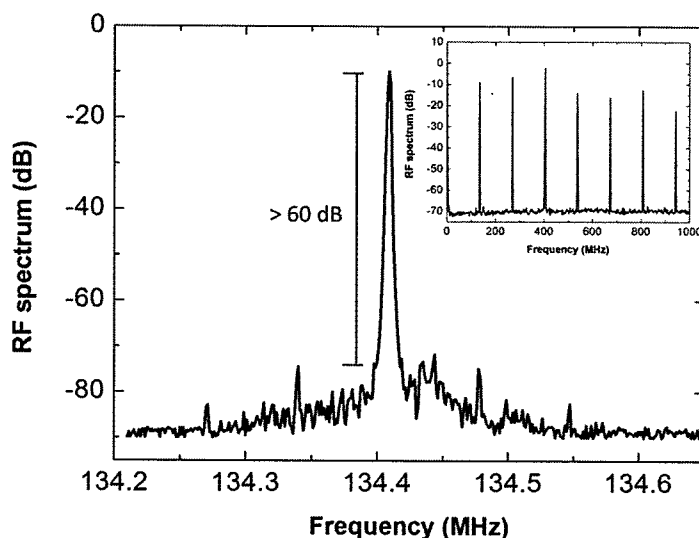


图 2.20 在扫描分辨率为 1 kHz 时所测得的锁模脉冲频谱图；插图：在扫描分辨率为 100 kHz、扫描范围为 1 GHz 时所测得的锁模脉冲频谱图

我们采用激光二极管作为泵浦源，从实验上证明了 Nd:LGS 无序晶体较宽的激光发射谱以及首次实现了全固态的 Nd:LGS 飞秒激光运转。在连续激光运转的研究中，得到了从 1045.2 nm 到 1105.3 nm 宽达 60.1 nm 的连续调谐激光输出；在锁模激光运转的研究中，我们采用插入狭缝的方法调节腔内各个激光模式的损耗，成功抑制了中心波长在 1063 nm 的模式以及高阶横模的振荡，在中心波长 1066 nm 处获得了稳定以及自启动的连续锁模激光运转。测量结果显示激光脉冲宽度为 381 fs，输出功率为 75 mW，该参数的激光输出很适合作为全固态飞秒放大器的种子激光。结合全固态激光器紧凑、低成本的特点，Nd:LGS 无序晶体在小型化超快激光器的研制上具有很大的潜力和价值。

此外，从 Nd:LGS 晶体荧光发射谱线中我们可以发现，其在 1.06 μm 和 1.08 μm 处都具有较宽的光谱宽度。实验中我们实现了波长在 1066 nm 附近的飞秒激

光运转, 如果采取适当的技术措施, 波长在 $1.08\ \mu\text{m}$ 附近相信也完全可以实现飞秒激光的输出, 同时还能实现超短脉冲双波长的锁模激光运转, 这些类型的超快激光有其特殊的应用价值和需求, 如氦的吸收峰正好为 $1.08\ \mu\text{m}$ 附近^[118, 119]、双波长输出激光可作为相干太赫兹辐射产生的驱动源^[120, 121]等。

2.4 基于 Nd:LGS 晶体的全固态超短脉冲自倍频激光器

硅酸镱镧晶体 (LGS) 是一种性能优良的多功能材料, 在作为激光增益介质基质之前就已经被应用于众多领域^[70-72]。LGS 晶体同时具备压电特性、电光特性以及电介质特性, 多年来一直为科学家们广泛研究, 继续发掘着新的特性与应用价值。本小节中, 我们采用激光二极管泵浦的方式以及 SESAM 被动锁模技术, 在 Nd:LGS 超短脉冲激光器中首次发现了其自倍频的特性, 并且成功实现了皮秒、飞秒自倍频绿光激光的运转, 为多功能材料 LGS 赋予了一个新的、具有重要应用价值的亮点。结合全固态激光的优点以及自倍频的特性, Nd:LGS 晶体有望在紧凑、稳定及低成本的超短脉冲绿光激光光源的研制中发挥重要作用。

1983 年, Kaminskii 等首次将 Nd 掺杂的 LGS 晶体用作激光增益介质, 同时研究了其光学特性^[68]。他们在实验上测量了 Nd:LGS 晶体的折射率以及非线性特性, 结果显示 Nd:LGS 晶体在波长为 $1.06\ \mu\text{m}$ 和 $1.37\ \mu\text{m}$ 激光运转中不可能被用作相位匹配的二次谐波产生, 因为其双折射率系数并不满足相位匹配的条件。到目前为止关于 Nd:LGS 在连续激光以及调 Q 激光运转的文献报道中, 并没有观察到二次谐波产生的现象^[78, 79]。然而, 这并非意味着 Nd:LGS 晶体不可能产生二次谐波。在对类似非线性材料进行参数测量的时候, 常用的一种方法为 Maker-Fringe 技术, 采用该技术进行测量的过程中, 往往会伴随着二次谐波的产生, 这种所谓“非相位匹配”的二次谐波产生究其原因主要是由于基频光高的功率密度以及所用材料良好的非线性特性所引起的。从目前对于 Nd:LGS 的研究中, 该晶体已经被证明是一种优良的非线性晶体^[71]。我们有理由相信, 在超短脉冲激光运转时 Nd:LGS 晶体很有可能实现二次谐波的产生。

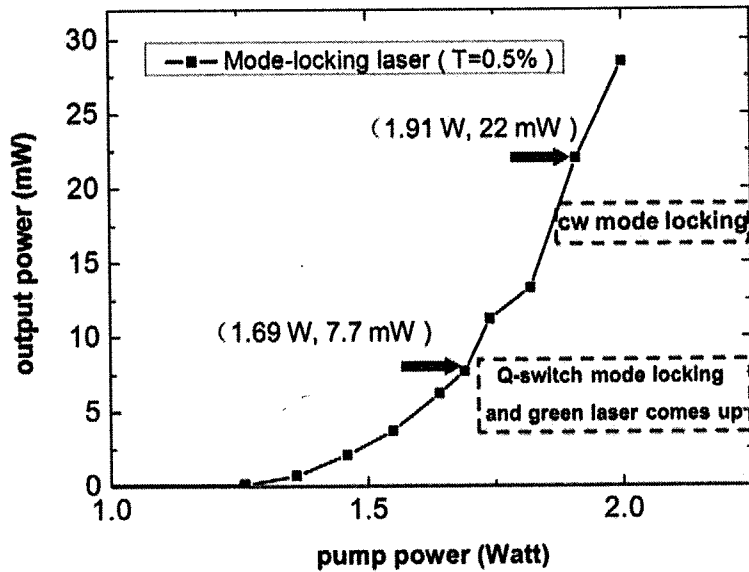


图 2.22 在输出耦合率为 0.5 % 时锁模基频激光输出功率曲线

通过优化谐振腔的参数与端镜，使其工作在最佳状态，得到了如图 2.22 所示的锁模激光输出功率曲线（基频光）。当泵浦光增加到阈值功率 1.26 W 时，激光开始振荡，但是由于功率较低，还未达到启动 SESAM 锁模的功率密度，因此这时候输出激光为连续激光；继续增加泵浦光的功率，当泵浦功率为 1.69 W 时，激光突然转变为调 Q 锁模的状态，基频光输出功率为 7.7 mW。由于腔内激光从连续状态变为脉冲状态，导致激光在晶体中的能量密度有了量级上的提高，从输出端我们观测到了 532 nm 绿光的产生；进一步继续提高泵浦光功率密度，所得到的自倍频 532 nm 绿光的功率也随之增加，当泵浦光功率为 1.91 W 时，连续锁模状态很容易实现自启动，锁模激光中心波长为 1063 nm；最终在最大泵浦功率 2 W 情况下，连续锁模的基频激光与自倍频激光的输出功率分别为 28.5 mW 和 40 μ W。从上述自倍频激光的出现与变化我们可以明显发现，它的产生和输出功率与基频激光的脉冲能量密度有着密切的依赖关系。

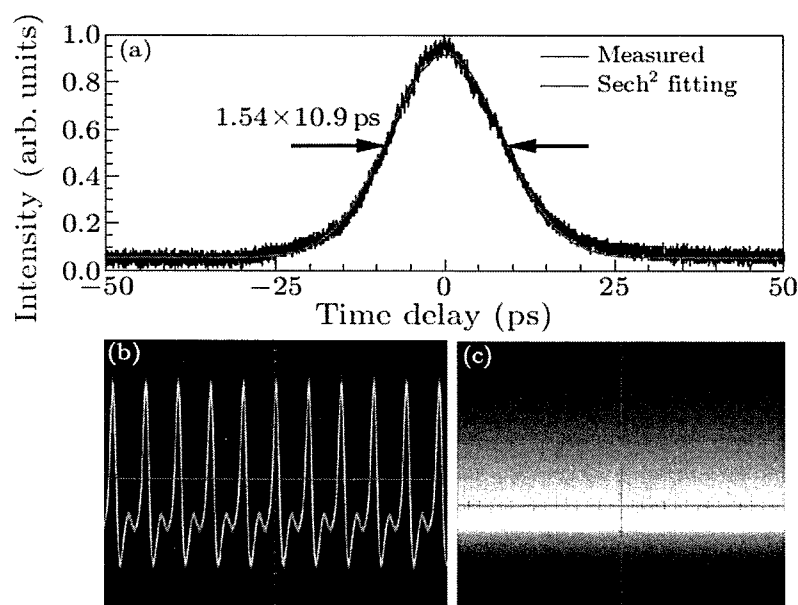


图 2.23 (a) 基频激光强度自相关曲线及其双曲正割拟合; (b) 10 ns 扫描尺度下激光脉冲锁模序列; (c) 10 μs 扫描尺度下激光脉冲锁模序列

受限于自倍频绿光激光输出的功率较低, 我们难以直接测量其脉冲宽度, 实验中对基频激光的脉冲宽度进行了测量。如图 2.23 (a) 所示为所测得的基频激光的强度自相关及其拟合曲线, 测量仪器为一台商用的强度自相关仪, 在双曲正割曲线拟合下, 输出基频激光的脉冲宽度为 10.9 ps。图 2.23 (b) 和 (c) 分别为在示波器上 10 ns 和 10 μs 尺度下观测到的脉冲锁模序列, 从中可得锁模稳定性较好。

实验中采用一台频谱分析仪分别对基频激光和自倍频激光的频率谱线进行了测量, 结果如图 2.24 所示, 两者在频谱上严格对应, 同时保持着高的稳定性和信噪比, 对应的重复频率为 173.7 MHz。如图 2.25 为所测得的基频激光和自倍频激光的锁模光谱图, 其中基频激光中心波长为 1063 nm, 光谱半高宽为 3.2 nm; 自倍频激光中心波长为 532 nm, 光谱半高宽约为 1 nm, 其光谱的窄化主要是在自倍频产生过程中非线性相互作用所造成的结果。

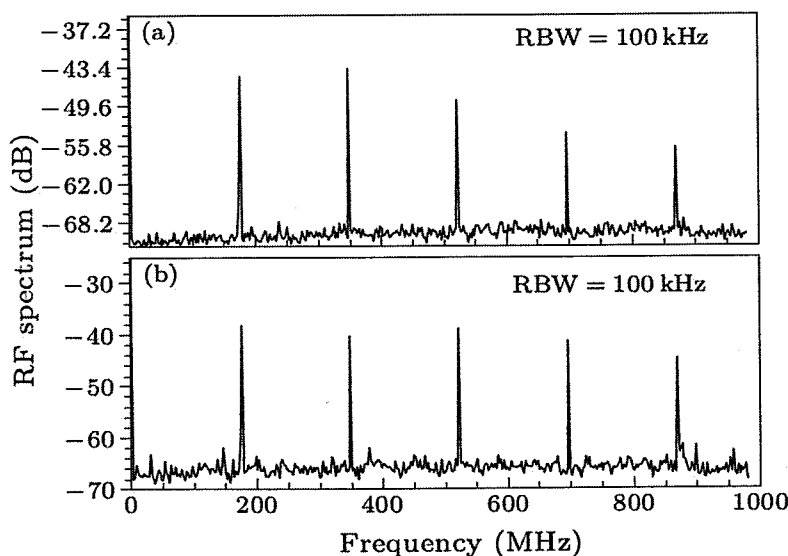


图 2.24 扫描范围为 (0-1) GHz, 扫描精度 RBW 为 100 kHz 下锁模激光频谱图。

(a) 基频激光频谱图; (b) 自倍频激光频谱图

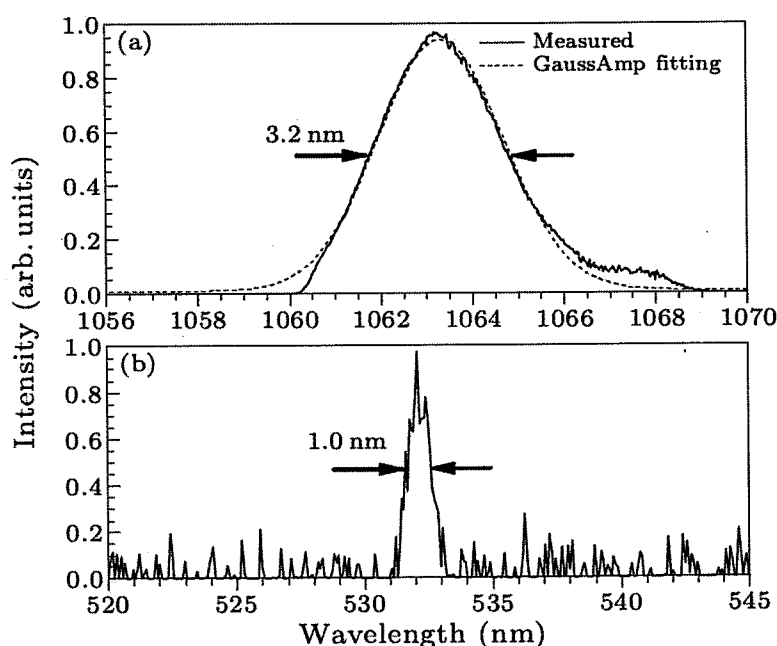


图 2.25 (a) 基频激光锁模光谱图; (b) 自倍频激光锁模光谱图

为了进一步探究自倍频激光在 Nd:LGS 晶体中的产生机理, 我们首先对激光晶体的摆放角度在 $\pm 1^\circ$ 的范围内进行了连续调节, 自倍频的绿光总是维持且没有明显变化, 这就排除了一般情况下角度匹配的情况。此外, 我们更换了更高功率的泵浦源, 让激光运转于飞秒锁模的状态 (如 2.3 节所介绍), 同样观察到了

更为明显的自倍频绿光产生，其所测量的自倍频激光光谱如图 2.26 所示，最大输出功率接近 1 mW。

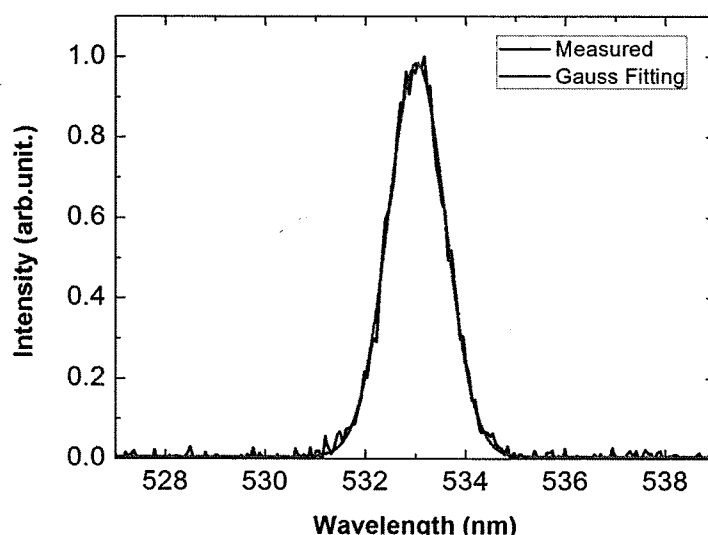


图 2.26 Nd:LGS 飞秒锁模激光运转下自倍频激光光谱图

根据以上实验结果以及非相位匹配二次谐波产生的特点^[122-127]，我们初步认为这就是 Nd:LGS 晶体中二次谐波产生的原因。当激光运转于连续和调 Q 状态时，由于腔内能量密度低且 Nd:LGS 并不满足角度匹配的基本条件，因此并没有二次谐波的产生；而当激光运转于锁模状态时，这时腔内振荡激光为超短脉冲激光，导致在晶体上的激光能量密度有了量级上的提升，再加上 Nd:LGS 晶体良好的非线性特点，因此产生了非相位匹配的自倍频激光；随着脉冲宽度从皮秒量级压缩到飞秒量级，自倍频激光的强度也随之增大。然而，更加让我们感兴趣的是，晶体中强的能量密度并非唯一条件，从目前许多关于超短脉冲激光的报道中也并没有看到自倍频的产生，对于 Nd:LGS 晶体，在锁模激光运转时却产生了很明显的二次谐波，这与晶体本身的特性是有着紧密关系的，其背后的理论解释以及详细的产生机理有待更进一步的研究与探讨，同时如何将 Nd:LGS 晶体的自倍频特性充分应用更是具有实际意义与价值。

2.5 本章小结与展望

本章开展了掺钕无序晶体的激光特性、全固态掺钕无序晶体超短脉冲激光器以及 Nd:LGS 无序晶体自倍频特性的实验研究。相关研究结果已分别发表在 **Opt.**

Express 22 (22) 26933-26938 (2014), **Chin. Phys. Lett.** 32 (1) 014206 (2015) 杂志上。

首先研究了一系列掺钕无序晶体的连续激光以及调谐激光的性质, 实验中分别研究了 Nd:LGS、Nd:CLB、Nd:CGB、Nd:SYB、Nd,Y:CaF₂ 等无序晶体的连续激光输出特性, 以及在上述所有无序晶体中都首次实现了光谱宽度超过 40 nm 的调谐宽度, 优于目前文献所报道的掺钕激光晶体的相关结果。其中 Nd:CLB 和 Nd:LGS 两类晶体调谐宽度最宽, 分别获得了 51.4 nm 和 54.1 nm 的结果; Nd:CGB、Nd:SYB 以及 Nd,Y:CaF₂ 晶体调谐宽度依次分别为 45 nm、40 nm 以及 46 nm。

接着从中选择了综合性能较好的 Nd:LGS 晶体, 进行了激光二极管泵浦的飞秒锁模激光实验研究, 获得了从 1045.2 nm 到 1105.3 nm 宽达 60.1 nm 的连续调谐激光输出以及在中心波长 1066 nm 处获得了稳定以及自启动的连续锁模激光运转, 激光脉冲宽度为 381 fs, 输出功率为 75 mW。

最后在全固态 Nd:LGS 超短脉冲锁模激光器中首次发现了 Nd:LGS 晶体自倍频的特性, 并且成功实现了皮秒、飞秒自倍频绿光激光的运转。同时对此在实验上进行了产生机理的探究和讨论。

第三章 高功率超短脉冲激光放大系统实验研究

3.1 引言

超短脉冲激光的蓬勃发展给科研、工业加工以及医疗等各个领域带来了巨大的活力,满足了更多新的应用与研究方向。融合了全固态激光器结构紧凑、成本低、稳定性高等优点和超短脉冲激光高峰值功率、短脉冲等特点的全固态超短脉冲激光器的发展,越来越受到广泛的关注和研究。

重复频率在几个 kHz 以内的皮秒激光器兼顾了高峰值功率和高平均功率,是光参量啁啾放大器(OPCPA)、光参量振荡器(OPO)、光参量产生(OPG)以及紫外光产生的优良驱动光源^[115, 128-130];重复频率大于 100 kHz 的皮秒激光器在工业加工领域则更受欢迎,因为它们具有高的加工效率和高的平均功率;全固态飞秒激光器特别是具有高重复频率的飞秒激光,作为高效率参量放大器以及下一代阿秒脉冲产生的优良泵浦源,在科研领域备受关注。在微纳加工领域,脉冲宽度为 200 fs 附近、脉冲能量在数百微焦耳的飞秒激光通过在材料中产生的多光子聚合效应,可用于制备精度非常高的微纳结构器件。高功率的全固态超短脉冲以其特有的魅力和应用需求,已经引起了国内外长期的关注和研究。

基于高功率超短脉冲激光器的应用和发展前景,国家提供了大力的支持,在科技部重大仪器研制专项子课题全固态超短脉冲激光泵浦源开发研究的支持下,我们开展了高功率超短脉冲激光放大系统的实验研究,成功研制了高能量的皮秒激光放大器和高重复频率的皮秒激光放大器,同时在此基础上对高重复频率高功率的飞秒激光放大器进行方案调研与设计,开展了初步的实验研究。本章将对各部分内容进行详细介绍。

3.2 1kHz、60mJ 皮秒激光系统

本节开展了基于 Nd 掺杂的激光增益介质的高能量皮秒激光放大系统的研究,采用连续、准连续以及侧面泵浦的半导体激光器作为泵浦源,在重复频率 1 kHz 条件下获得了单脉冲能量为 64.8 mJ、中心波长在 1064.4 nm、光束质量因子 M^2

小于 2 的皮秒脉冲激光输出,通过二倍频后在中心波长 532 nm 处可得到近 30 mJ 的绿光激光。

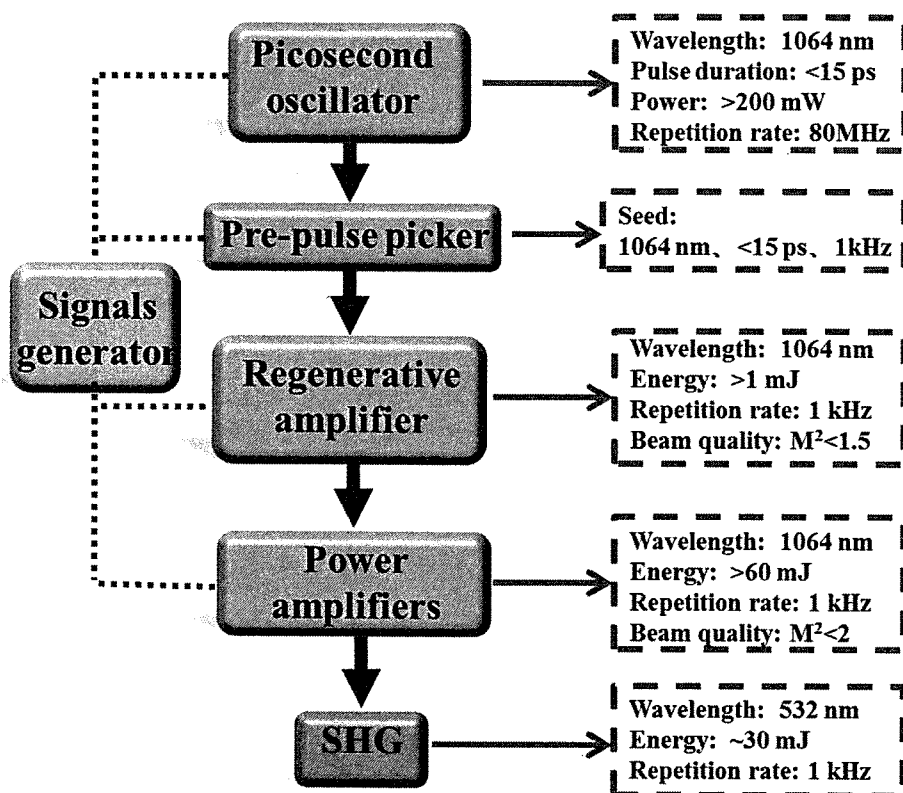


图 3.1 高能皮秒激光放大系统方案图

如图 3.1 为所设计的高能皮秒激光放大系统方案图, 整个系统主要包括一个皮秒振荡器、一个皮秒再生放大器、由四级单程放大器与一级侧面泵浦主放大组成的皮秒功率放大器、一个倍频器和一个控制各级放大器时间同步的信号发生器。以下将对各个组成部分的设计与搭建进行详细介绍。

3.2.1 皮秒振荡器的设计与搭建

掺钕的激光增益介质具有较大的荧光发射截面和较长上能级粒子寿命, 而且在波长为 1.0 μm 的跃迁附近属于四能级系统, 没有重吸收影响, 可以保证晶体对泵浦光足够的吸收, 是实现高效激光振荡器和放大器的优良晶体。特别是在皮秒激光器应用中, Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 两种晶体是目前最为成熟和常用的激光增益介质, 如表 3.1 所示这两种晶体在 Nd 离子掺杂浓度为 1 at% 时与激光相关的主要性能比较^[103, 131-133]。

表 3.1 Nd:YVO₄ 和 Nd:YAG 晶体 (1 at%) 主要性能比较

	Nd:YVO ₄	Nd:YAG
晶体结构	四方晶系	立方晶系
折射率 (@1064 nm)	$n_o=1.96$ $n_e=2.17$	1.82
激光波长	1064.3 nm	1064.1 nm
受激发射截面	$15.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$	$2.8 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$
发射线宽	~0.8 nm	~0.6 nm
自发荧光辐射寿命	90 μs	230 μs
泵浦波长	808.5 nm	807.5 nm
吸收线宽	2.5 nm	1.0 nm
偏振特性	线偏振	无偏振
热导率 (@300 K)	// C: 5.23 W/m/K ⊥ C: 5.10 W/m/K	14 W/m/K
热膨胀系数	$\alpha_a: 4.43 \times 10^{-6}/\text{K}$ $\alpha_c: 11.37 \times 10^{-6}/\text{K}$	$7.8 \times 10^{-6}/\text{K}$
熔点	2105 °C	1970 °C

Nd:YVO₄ 晶体在激光性能上具有很明显的优点：它的受激辐射截面很大，在 1064 nm 附近是 Nd:YAG 晶体的 5 倍以上，激光增益很高；它的吸收谱宽度较宽，在 808.5 nm 处为 2.5 nm，更适合采用激光二极管来泵浦；Nd:YVO₄ 晶体是偏振晶体，在激光吸收和辐射上都具有偏振性，可以避免热退偏效应的同时更适合用作放大器的种子；它激光辐射线宽较 Nd:YAG 宽，支持更短脉冲激光运转。然而相比于 Nd:YAG，Nd:YVO₄ 晶体很明显的缺陷在于热性能不够好，它的热导率较小同时热膨胀系数较大，需要控制在合适的泵浦功率下工作。

本研究中皮秒振荡器的主要作用是为后续的放大器提供种子光，并不需要高功率的输出，对稳定性、激光效率和偏振性更为注重。因此综合两种晶体的性能，我们选择了效率更高以及偏振性能好的 Nd:YVO₄ 作为激光增益介质。在对振荡器的方案设计和器件选择上，主要从稳定性与紧凑性的角度进行考虑，设计了一款低功率 LD 泵浦的高效 Nd:YVO₄ 皮秒振荡器，具有以下特点：

- 1、选择尽可能低功率的 LD 作为泵浦源，最大限度减少晶体中多余热量的产生，使得晶体在自然冷却条件下即可正常工作，降低对散热的依赖以提高稳定性，同时降低成本；
- 2、在保证足够瑞利长度的条件下采用紧聚焦的方式，提高谐振腔内激光功率密

- 度，从而提高 SESAM 锁模稳定性，同时整体缩小体积；
- 3、采用对称共焦式腔型结构设计，保证较大的稳区以及高的光束质量；
 - 4、根据对脉冲宽度的需求，选择性采用 GTI 镜的补偿腔内色散形式，使得输出激光脉冲宽度具有一定灵活性。

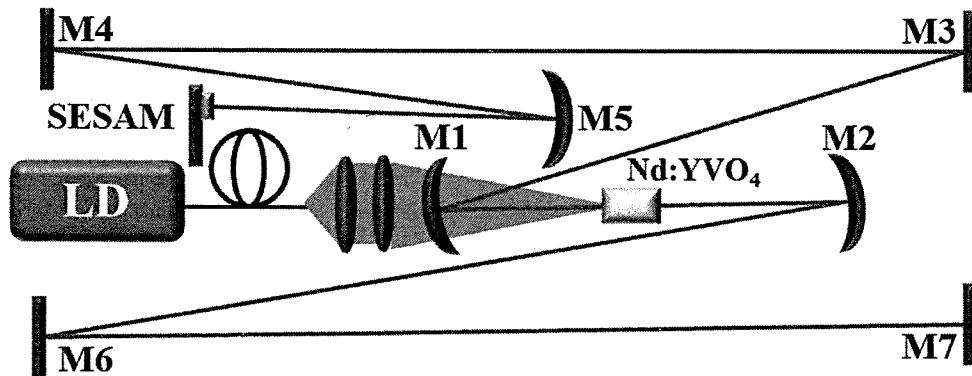


图 3.2 高效率 Nd:YVO₄ 皮秒振荡器光路图

皮秒振荡器的光路设计如图 3.2 所示。激光增益介是一块 Nd:YVO₄ 晶体，掺杂浓度为 0.5 at%、尺寸为 3x3x5 mm³、沿 a 向切割，晶体透光两端镀有对 808 nm 和 1 μm 附近的增透膜 (R<0.2%)。晶体的侧面用铝箔包裹并固定与紫铜热沉上，晶体在工作过程中无需通水冷，采用自然散热。为了提高谐振腔内激光功率密度，泵浦源采用的是北京凯普琳公司 (BWT) 生产的平均功率 2 W 的光纤耦合输出激光二极管，耦合光纤的芯径为 50 μm，泵浦激光中心波长为 808 nm，通过一个 1:1 的成像系统聚焦到晶体上，泵浦光在晶体中的光斑直径约为 50 μm。实验中采用对称共焦式的谐振腔结构，M1 和 M2 是一对曲率半径为 75 mm 的平凹双色镜，镜片对着腔内的一面镀有对波长在 1 μm 附近的高反膜 (反射率 R>99.9 %) 和波长在 808 nm 附近的增透膜 (R<0.2 %)，对着腔外的一面镀有对 808 nm 附近泵浦激光的增透膜 (R<0.2 %)。谐振腔的其中一臂以锁模元件 SESAM 为端镜，该 SESAM 由德国 Batop 公司生产，在中心波长 1064 nm 处的调制深度为 1 %、饱和通量为 90 μJ/cm²、恢复时间为 10 ps。为了启动被动锁模，我们采用了一片曲率半径为 200 mm 的平凹反射镜 M5 将腔内激光聚焦到 SESAM 上，以提高 SESAM 表面的激光功率密度。谐振腔的另一臂以一片平面输出镜 M7 为端镜，输出镜的耦合率为 10 %。谐振腔总的长度所对应的重复频率约为 80 MHz。为了满足对不同需求对脉冲宽度的要求，两片平面高反镜 M3 和

M4 可根据需要更换为两片平面 GTI 镜(每一片引入的群速度色散约为 -1000 fs^2)，M6 为一片平面高反镜。

根据 ABCD 矩阵理论，采用商用的软件对谐振腔的腔内激光模式分布和稳定性参数进行了模拟分析，评估腔型设计的结果。如图 3.3 为谐振腔内激光模式的分布图，其中激光束腰最小的位置为激光晶体和 SESAM 处，分别为 $60 \mu\text{m}$ 和 $137 \mu\text{m}$ 。激光晶体处 $50 \mu\text{m}$ 的束腰直径与泵浦光在晶体中的光斑直径相当，保证了高的转换效率和光束质量；SESAM 处 $137 \mu\text{m}$ 的束腰直径保证了足够的激光通量以启动被动锁模。根据高斯光束在谐振腔内传输的理论，其稳定性条件需要同时满足 $-2 < A+D < 2$ 以及 $0 < G_1 \cdot G_2 < 1$ 。如图 3.4 为计算机模拟所设计腔型的结果图，从中可知 $A+D=1.1$ ， $G_1 \cdot G_2=0.8$ ，处于谐振腔的稳区，表示腔内激光能够稳定振荡。

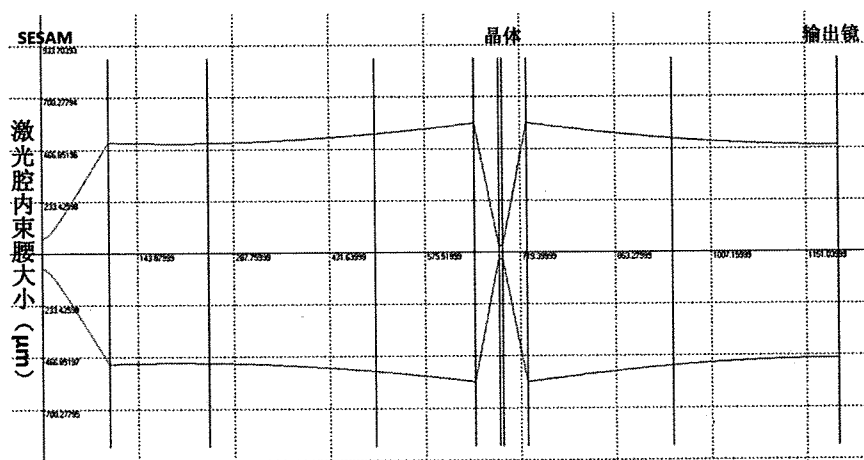


图 3.3 谐振腔的腔内激光模式分布图

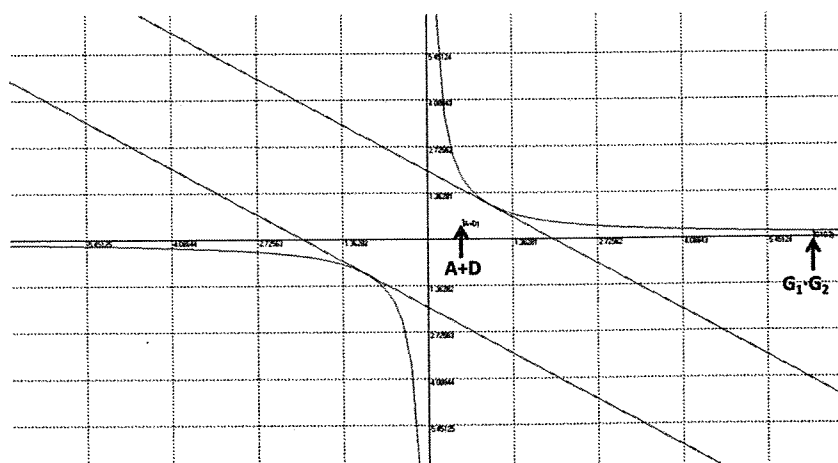


图 3.4 谐振腔的稳定性参数 $A+D$ 和 $G_1 \cdot G_2$ 模拟图

仔细优化腔内镜片的角度和摆放距离，获得了稳定的被动锁模激光输出，从示波

器上采集的锁模序列如图 3.5 (a) 所示。在平均功率为 2 W 的泵浦光下，最大锁模激光输出功率约为 400 mW，激光重复频率为 80 MHz。我们采用相干公司的激光功率计测试了激光器长时间运行的功率稳定性，如图 3.5 (b) 所示，衡量输出功率的不稳定度 rms 小于 0.7 %。

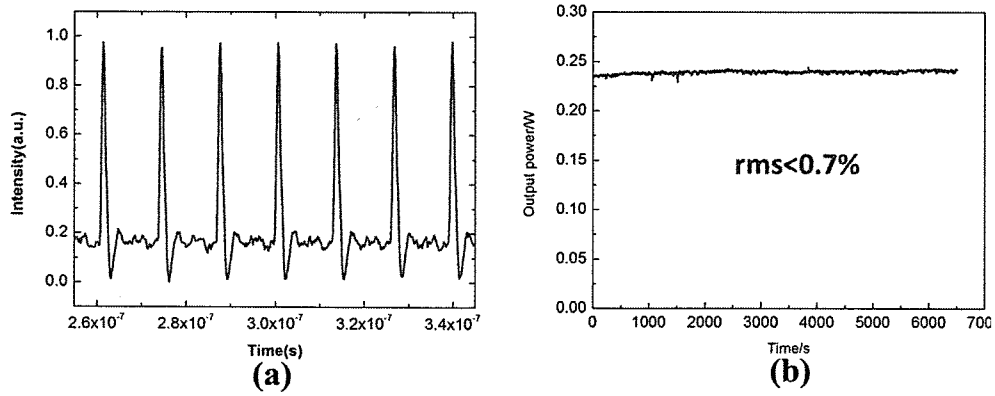


图 3.5 (a) 皮秒锁模激光脉冲序列图；(b) 皮秒激光输出功率稳定性曲线

通过 M3 和 M4 两片镜片对谐振腔内的色散量进行补偿调节，分别获得了脉冲宽度为 10 ps 和 15 ps 的激光输出。其中当两片镜片都为 GTI 镜片时，谐振腔内一共引入了约 -2000 fs^2 群速度色散，输出激光的脉冲宽度测量结果为 10 ps；当两片镜片都为普通平面高反镜时，谐振腔内不引入负色散，输出激光的脉冲宽度测量结果为 15 ps。我们采用一台商用的强度自相关仪 (Femtochrome, FR-103MN) 和光纤光谱测量仪 (AQ6315A, Ando Inc.) 分别测量了输出激光的强度自相关曲线和锁模光谱图如图 3.6 所示，输出激光的中心波长为 1064.4 nm，对强度自相关曲线进行双曲正割拟合后得到脉冲宽度分别为 10 ps 和 15 ps。

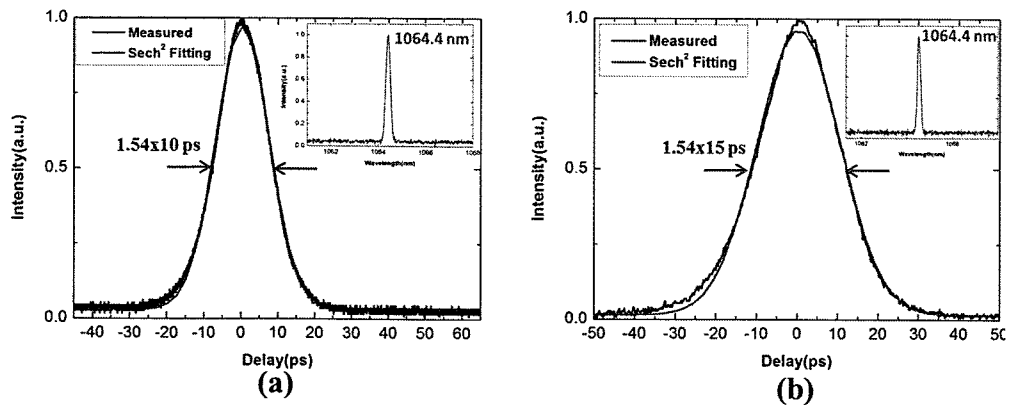


图 3.6 输出激光的强度自相关曲线和锁模光谱图：(a) 10 ps；(b) 15 ps

考虑到作为种子激光注入放大器后腔内功率密度较高, 选择了脉冲宽度为 15 ps 的激光作为后续放大的种子, 在达到系统最后输出激光的目标参数同时尽可能保证元器件的稳定性。上述所介绍的紧凑, 稳定、高质量的皮秒振荡器为再生放大器提供了性能优秀的种子激光, 为整个系统的稳定工作奠定了基础。

3.2.2 激光二极管端面泵浦的皮秒再生放大器

(1) 再生放大技术原理

再生放大技术是一种常见的驻波放大技术, 它结合了调 Q 技术和种子光注入导出技术, 将种子光注入一个激光振荡腔中形成振荡而进行放大, 而且在放大过程中通过调 Q 技术实现了脉冲的选单, 可以将 MHz 的注入种子光重复频率降低为数百 kHz 以内。再生放大技术具有稳定性高、光束质量好、对种子光要求低、放大效率高等特点, 可以将从振荡器出来的 nJ 量级激光脉冲经过再生放大后可以被放大到 mJ 量级, 放大增益高达 10^6 - 10^7 。

(2) 激光增益介质的增益饱和

但是再生放大器不可能无限制地将种子光进行放大, 它的放大能力和所用的激光增益介质以及谐振腔的参数相关。1980 年, W.H.Lowdermilk 等对此进行了研究, 计算了谐振腔的能量密度相关公式^[134, 135]。其计算过程中主要利用三个最主要的特征参数来表征激光增益介质的性质: 小信号增益系数 $G_0 = \exp(g_0 l)$ 、饱和能量密度 I_s 以及增益恢复系数 p 。对于放大器的性能, 其放大能力主要取决于被放大的脉冲相邻两次经过激光增益介质的时间间隔 (T_c) 以及激光增益介质下能级的恢复时间 (τ_R)。如果在放大过程中增益介质处于完全的恢复状态, 那么有 $\tau_R \ll T_c$, 增益恢复系数 p 的值为 0.5; 如果还并没有达到增益恢复, 也就是 $T_c \ll \tau_R$, 那么 p 值取 1。假设 T 为谐振腔的单程透过率, δ 为单程损耗, 它们满足 $T = \exp(-\delta)$ 的关系式。设注入的激光脉冲的能量密度为 I_{in} , 输出激光脉冲的能量密度为 I_{out} ; 由于在再生放大过程中, 激光脉冲在放大到最大的能量密度时通过调 Q 元件被导出, 因此可以认为输出激光脉冲的能量密度与腔内振荡的激光脉冲的峰值能量密度相同。在激光增益介质、输入和输出激光脉冲在模式匹配以及空间上完全重合情况下, 可以得到以下表示腔内激光在放大过程中的能量密度和增益的表达式:

$$I_{k+1} = TI_s \ln \left\{ Gk \left[\exp \left(\frac{I_k}{I_s} \right) - 1 \right] + 1 \right\} \quad (3.1)$$

$$g_{k+1} = g_k - (p/I_s)[(I_{k+1}/T) - I_k] \quad (3.2)$$

从以上两个表达式可以看到,随着脉冲通过激光增益介质的次数增加,能量密度越来越大,但是激光增益介质的单程增益却不断降低。在通过次数达到一定后,增益和损耗相等,这个时候认为介质达到了增益饱和,饱和的能量密度为:

$$I_{out} = (I_s/p) \ln \left[TG_0 \left(\frac{1-T}{T(G_0-1)} \right)^{1-T} \right] + I_{in} \quad (3.3)$$

一般情况下,所注入的种子激光能量密度很小,因此经过再生放大后输出的能量密度主要由再生放大腔的性质所决定。进一步的计算可以得到,激光增益介质的增益越高,被放大激光脉冲要想达到增益饱和就需要更多次数地通过激光增益介质,因此最终输出的饱和能量密度也就越高。

(3) 基于电光晶体的脉冲选单技术

再生放大器中实现脉冲选单和腔倒空的关键器件为电光 Q 开关,也就是普克尔盒。普克尔盒是基于电光晶体的普克尔 (Pockels) 效应制成的,普克尔效应是一种线性的电光效应,指电光介质在外电场的作用下快轴和慢轴两个方向具有不同的折射率,从而具有的双折射特性,在晶体快慢轴两个方向引入相位差,其原理如图 3.7 所示。

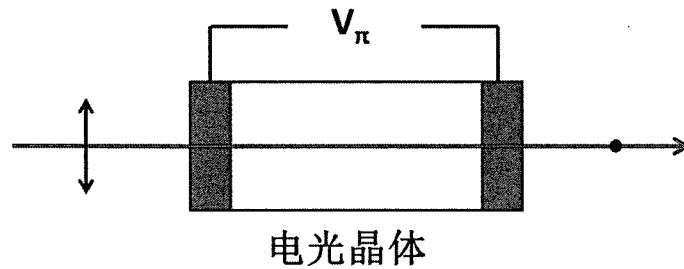


图 3.7 普克尔效应原理示意图

当在电光晶体两端加上半波电压 V_π 时, V_π 可由下式表示^[136]:

$$V_\pi = \frac{\pi c}{\omega n_0^3 \gamma} = \frac{\lambda}{2n_0^3 \gamma} \quad (3.4)$$

其中 n_0 为晶体折射率, γ 为电光系数。这时晶体相当于一个半波片,具有线偏振的光通过该晶体后偏振状态将会旋转 90° 。同理,当电光晶体两端加上电压为 V 时,这时晶体所引入的相位差 Γ 为^[137]:

$$\Gamma = \pi \frac{V}{V_{\pi}} \quad (3.5)$$

作为良好的电光晶体，对其材料的性能的评价有以下几点^[138]：

- (1) 材料的电光系数要求大，这就意味着其半波电压较低；
- (2) 对入射光的波长透明范围广；
- (3) 光学损伤阈值高；
- (4) 晶体生长的光学均一性好，尺寸大；
- (5) 稳定的物理、化学性质等。

常用的作为普克尔盒电光晶体的材料有磷酸二氘钾（DKDP）、铌酸锂（LiNbO₃）、磷酸钛氧钾（KTP）、偏硼酸钡（BBO）和磷酸钛氧铷（RTP）等几种，它们的作为电光晶体的性质对比如表 3.2 所示^[139-142]。

表 3.2 作为电光开关的不同材料的性质对比

	DKDP	LiNbO ₃	KTP	BBO	RTP
透光范围	200-2150 nm	350-5500 nm	350-4500 nm	189-3500 nm	350-5100 nm
电光系数	γ_{63} =26.4 pm/V	γ_{22} =3.4 pm/V	γ_{23} =15.7 pm/V; γ_{33} =36.3 pm/V	γ_{22} =2.7 pm/V	γ_{23} =17.5 pm/V; γ_{33} =40.5 pm/V
损伤阈值	>500 MW/cm ²	~100 MW/cm ²	>600 MW/cm ²	>1 GW/cm ²	>600 MW/cm ²
半波电压 (1064 nm)	3-5 kV	1.9 kV @2 μ m (5x5 mm ²)	1.8 kV (4x4 mm ²)	7 kV (3x3 mm ²)	1.6 kV (4x4 mm ²)
是否潮解	是	否	否	轻微	否
均匀性	优秀	一般	良好	优秀	良好
晶体缺点	易潮解	损伤阈值低	存在自然双折射；电阻率大	半波电压高	存在自然双折射

其中 DKDP 能够生长为很大的尺寸, 电光系数大, 半波电压较低, 在许多激光系统中广泛应用。但是缺点是晶体容易潮解, 使用时对环境要求高; BBO 损伤阈值最高, 光学均匀性和稳定都比较好, 在高功率高重复频率的激光系统中使用最多。但是缺点是晶体半波电压很高; KTP 和 RTP 两种材料的性质很相似, 半波电压较低, 也不会潮解, 但是都存在自然双折射, 因此作为电光开关是通常要设法补偿。其中 KTP 的电阻率很大, 晶体在高压下很容易发黑, 大大阻碍了它的应用; LiNbO_3 晶体虽然电光性质较好, 但是其致命的缺点是损伤阈值太低, 很难在激光腔内使用。综合上述各种材料的性质, 目前在激光放大系统中, DKDP 在低重复频率的再生放大器中使用较多, 而 BBO 由于其高的损伤阈值和好的高频稳定性, 在高重复频率的再生放大器中较为常用。

除了电光晶体外, 高压电源是普克尔盒的另一个关键技术。由于加在电光晶体两端的电压往往都在数千伏, 而且需要长时间工作, 对高压电源的稳定性提出了很高的要求。电光晶体在工作时的重复频率取决于高压电源的频率, 在维持数千伏的高压下, 重复频率越高, 技术的难度越大。在很长一段时间里, 普克尔盒的工作频率都是在 100 kHz 以内。近几年, 高压电源技术取得了很大的进展, 目前国内外较为稳定的高频高压电源的最高重复频率可在 500 kHz 以内, 电压峰值约为 3.6 kV。随着人们对高重复频率激光器日益强烈的需求, 双晶体结构的普克尔盒以及串联高压电源技术的应用, 使得激光再生放大器的重复频率已经突破了 500 kHz 的限制, 最高可达 1 MHz^[98, 143]。

(4) 皮秒再生放大器的设计与搭建

从皮秒振荡器输出的种子光注入到一级由激光二极管泵浦的 Nd:YVO_4 再生放大器中进行放大, 获得单脉冲能量为 mJ 量级, 重复频率为 1 kHz 的皮秒放大激光。再生放大器光路设计如图 3.8 所示。

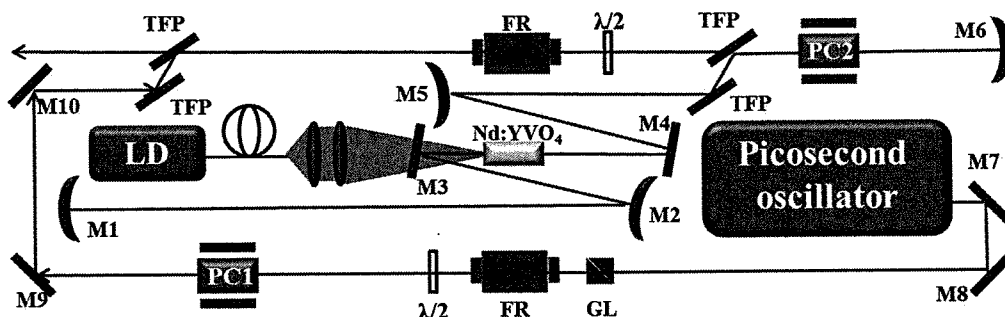


图 3.8 高能量全固态皮秒再生放大器光路图。图中 M1, M6: 曲率半径 900 mm 的平凹腔镜; M2, M5: 曲率半径为-1000 mm 的平凸腔镜; M3, M4: 平面双色镜; M7-M10: 平面高反镜; PC: 普克尔盒; TFP: 薄膜偏振片; FR: 法拉第旋光器; GL: 格兰棱镜。

在激光增益介质的选择上，我们采用了增益更高且具有偏振性的 Nd:YVO₄ 晶体，使得再生放大腔保持高的增益，以获得更高的放大效果。为了克服晶体在热传导方面的不足以及在高的泵浦功率下的散热问题，从元件的选择和方案的设计上采取了有效地措施：首先，尽可能利用掺钕晶体四能级系统的优势，采用掺杂浓度低和长度较长的晶体，保证对泵浦光高吸收率的同时将晶体中所产生的热量在纵向分散开。实验中 Nd:YVO₄ 晶体掺杂浓度为 0.3 at%，尺寸为 4x4x10 mm³，a 向切割，所测得的晶体对泵浦激光的吸收率在 85 % 以上。进一步提高散热能力，晶体侧面用铝箔包裹并固定与紫铜热沉上，紫铜中通有温度为 14 °C 的冷水以保持恒温。晶体两个通光面镀有对 808 nm 和 1 μm 波长附近的增透膜 ($R < 0.2\%$)。此外，泵浦光选用由德国 DILAS 公司生产的光纤耦合的准连续激光二极管，光纤芯径为 400 μm，中心波长为 808 nm，工作重复频率为 1 kHz，脉冲宽度为 120 μs。相比于连续输出的泵浦源，准连续的泵浦激光通过外部触发信号控制其输出频率与激光重复频率一致，在晶体中所产生的多余热量大大减少。泵浦激光通过一个成像比率为 2 的耦合系统聚焦打在晶体中，以保证足够的泵浦功率密度。最后，在腔型上我们设计了一个具有热透镜补偿能力的谐振腔，如图 3.7 所示，晶体两边采用了一对曲率为 -1000 mm 的平凸反射镜，以补偿激光晶体在高泵浦能量下所产生的热致透镜效应；腔的两个端镜为一对曲率为 900 mm 的平凹反射镜，以形成稳定的谐振特性。借助商用的腔型设计软件分别模拟了该腔型在考虑晶体热透镜效应（等效热透镜焦距 $f=1000$ mm）下的腔内激光模式分布图以及稳定性

参数模拟图如图 3.9 和 3.10 所示。从中可看到热透镜效应的存在下谐振腔依然维持在一个稳定运行的状态下，其稳定性参数 $A+D=-1.6$ ， $G_1 \cdot G_2=0.1$ ，处于谐振腔的稳区，表示腔内激光能够稳定振荡。同时，晶体中和普克尔盒所在位置的激光束腰直径约为 1.2 mm 和 1.8 mm，保证了在较高的腔内能量密度下这两个关键元件不被损坏，提高了稳定性。

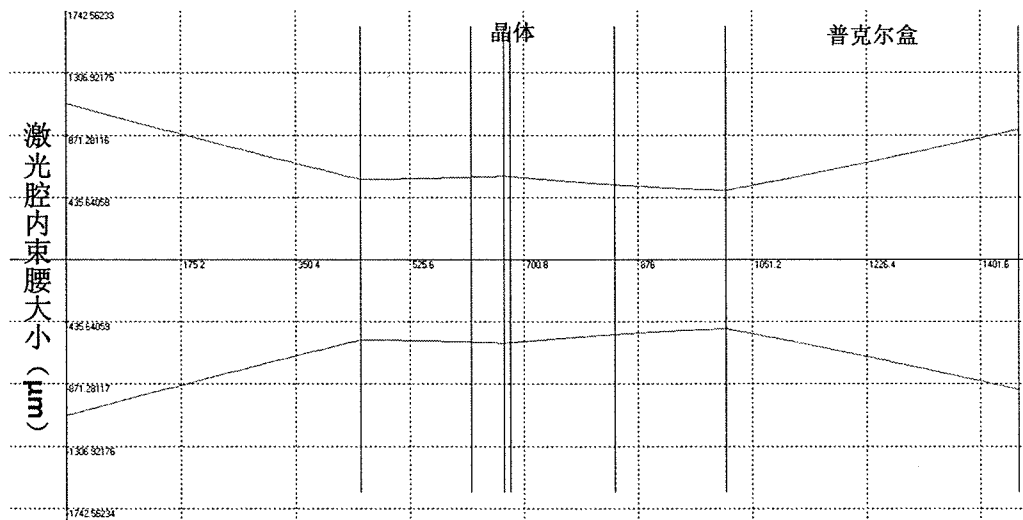


图 3.9 在考虑晶体热透镜焦距 1000 mm 下再生放大腔内激光模式分布图

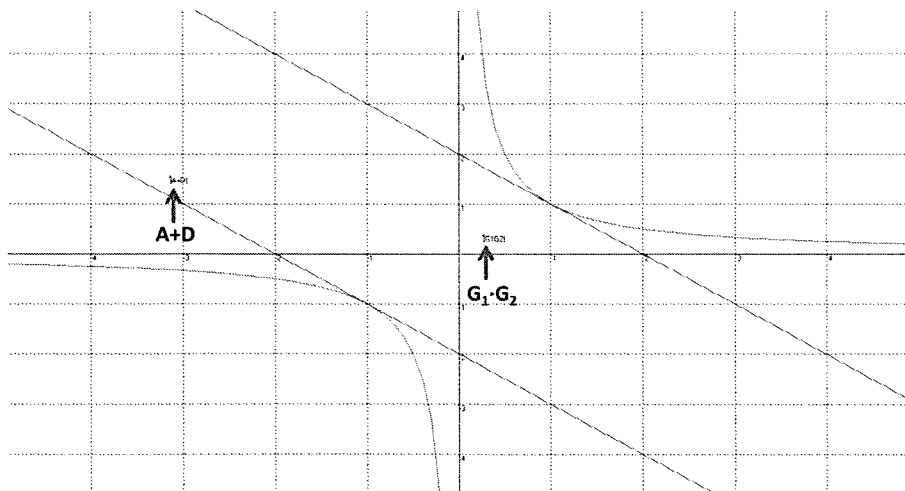


图 3.10 谐振腔的稳定性参数 $A+D$ 和 $G_1 \cdot G_2$ 模拟图

由于脉冲宽度为 15 ps 的种子激光已经足够保证在放大过程中腔内峰值功率在元器件的破坏阈值以下，因此并不需要进行脉冲展宽和压缩，大大降低了放大的成本。为了减小种子光的背景噪声，提高放大激光的对比度，我们在种子激光注入前进行了脉冲预选单，将从振荡器输出的 80 MHz 种子光的重复频率降低为

与放大激光相同的 1 kHz，然后在注入再生放大器中进行放大。普克尔盒晶体选择了在同等电压下口径更大的 DKDP，在波长 1064 nm 处的四分之一波电压为 3.2 kV，损伤阈值大于 1 GW/cm^2 。

整个再生放大器的工作过程为：从振荡器输出的种子激光重复频率为 80 MHz，偏振状态为 P 偏振。正向通过一个格兰棱镜、法拉第旋光器和二分之一波片组成的隔离器后，进行了 90° 偏振旋转，变为 S 偏振光。接着通过一个普克尔盒进行了脉冲预选单，重复频率变为 1 kHz，偏振状态为 S 偏振。然后种子光再分别通过一个法拉第旋光器和二分之一波片，偏振状态再次旋转 90° 变为 P 偏振光，经过薄膜偏振片投射后注入再生放大腔中。再生放大腔中的普克尔盒静态被调节为四分之一波片状态，当普克尔盒不加高压时，再生腔内 S 偏振的种子光两次经过处于四分之一波片状态的普克尔盒后变为 P 偏振而透过薄膜偏振片直接导出，不能形成振荡；当普克尔盒施加四份之一波电压时，加上静态时的四份之一波状态，整个普克尔盒相当于一个二分之一波片，此时种子光可以在再生腔内被捕获而形成振荡，多次经过晶体后被逐步放大。当达到增益饱和后，通过信号发生器控制普克尔盒上电压的持续时间，这时腔内放大激光两次通过静态普克尔盒后透过薄膜偏振片而被导出。

我们从示波器上观察在再生腔中放大激光的建立过程如图 3.11 所示。图中红色脉冲序列信号为种子激光在腔内逐步放大的过程，黑色的方波信号为施加在普克尔盒上的高压信号，从图中计算可得种子光注入到饱和的建立时间约为 86.6 ns，再生腔内激光往返一次所需时间为 9.3 ns，可知种子光要达到增益饱和需要在腔内约 9 个往返，通过晶体约 18 次。能量在 nJ 量级的种子光经过再生放大后，在 8 mJ 的端面泵浦能量下获得了单脉冲能量为 1.5 mJ、重复频率为 1 kHz、中心波长为 1064.4 nm 的皮秒激光。这种激光二极管端面泵浦的再生放大器可以保证放大激光高的光束质量，我们采用一款商用的 M^2 因子测试仪（M2-200S-FW, Ophir-Spiricon Inc.）对放大激光的光束质量进行测量，测量结果如图 3.12 所示，结果显示光束质量因子 M^2 小于 1.15，再生放大器输出的激光保持了很高的光束质量。

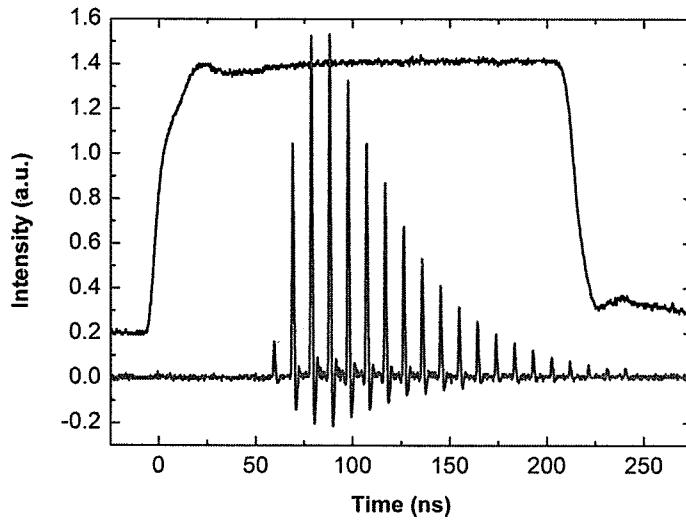


图 3.11 再生腔内放大激光建立过程

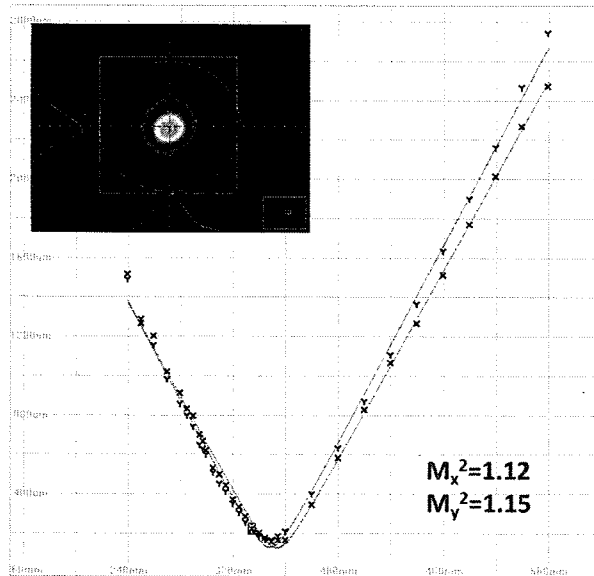


图 3.12 再生放大器输出激光光束质量测量结果

3.2.3 组合式的全固态皮秒功率放大器

从再生放大器输出的 1.5 mJ 皮秒激光需要继续进行功率放大以获得更高的能量。在此前的文献报道中，采用多级的侧面泵浦放大技术，可以获得单脉冲能量高达 80 mJ 的皮秒激光脉冲，但是侧面泵浦的不均匀性使得放大激光的光束质量下降很严重，最终输出的激光 M^2 在 4 以上，难以满足作为高质量驱动光源的要求。为了兼顾放大能量和高的光束质量，我们采用了组合式的功率放大模式，

整个功率放大器由四级端面泵浦单程放大器和一级侧面泵浦功率放大器组成，将总体超高泵浦能量的压力分配到各级放大器中，每一级承受在损伤阈值以内的高能量泵浦以及保证高的放大效率。而激光二极管端面泵浦的方式有效地保持了注入激光的光束质量，最后的侧面泵浦放大器将激光能量放大到了一个较高的水平。该皮秒功率放大器光路图如图 3.13 所示。

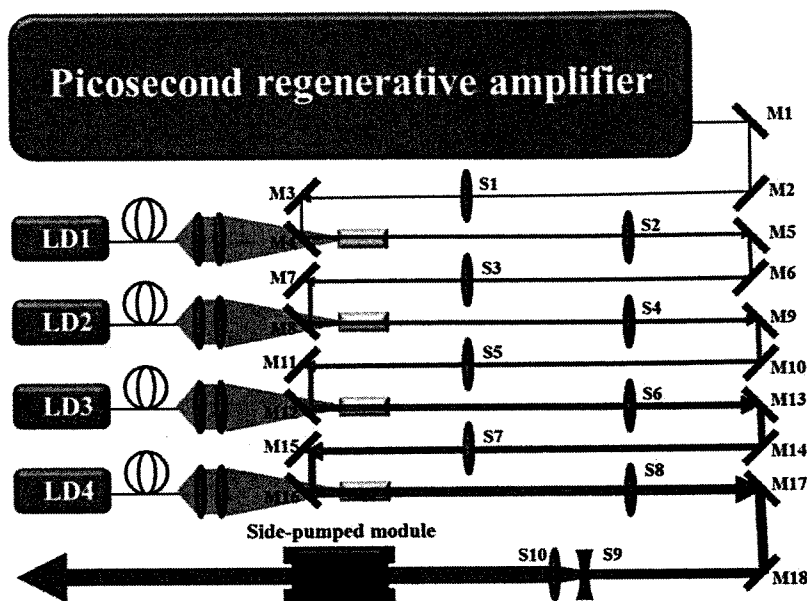


图 3.13 组合式的全固态皮秒功率放大器光路图

在端面放大阶段，我们依然选择了增益较高且具有偏振性的 Nd:YVO₄ 晶体作为放大介质，通过优化晶体参数和控制每一级泵浦激光的强度，保证晶体始终工作在损伤阈值以内同时保持高的放大效率。各级 Nd:YVO₄ 晶体掺杂浓度为 0.3 at%，尺寸为 4x4x10 mm³，a 向切割，晶体侧面用铝箔包裹并固定与紫铜热沉上，紫铜中通有温度为 14℃ 的冷水以保持恒温。晶体两个通光面镀有对 808 nm 和 1 μm 波长附近的增透膜（R<0.2%）。泵浦源（LD1-LD4）是 DILAS 公司生产的光纤耦合的准连续激光二极管，光纤芯径为 800 μm，中心波长为 808 nm，工作重复频率为 1 kHz，脉冲宽度为 120 μs，通过信号发生器提供的外触发信号控制各级单程放大器和再生放大器泵浦激光的时间延时而保持时刻同步。泵浦激光由成像比率为 2 的耦合系统聚焦在晶体中，以保证足够的泵浦功率密度。为了使放大激光和泵浦光模式匹配和保证一定的泵浦光萃取效率，实验中采用透镜组合 S1-S8 对晶体前的激光进行聚焦和对晶体后的激光进行准直。在四级单程功率放大器总共约 125 mJ 的能量泵浦下，从再生放大器输出的 1.5 mJ 皮秒激光被放大

为大于 34 mJ 的皮秒激光，相应的光光转换效率为 26 %。图 3.14 为所测得的各级单程功率放大器的输出激光功率曲线以及对应的激光光斑测试图。

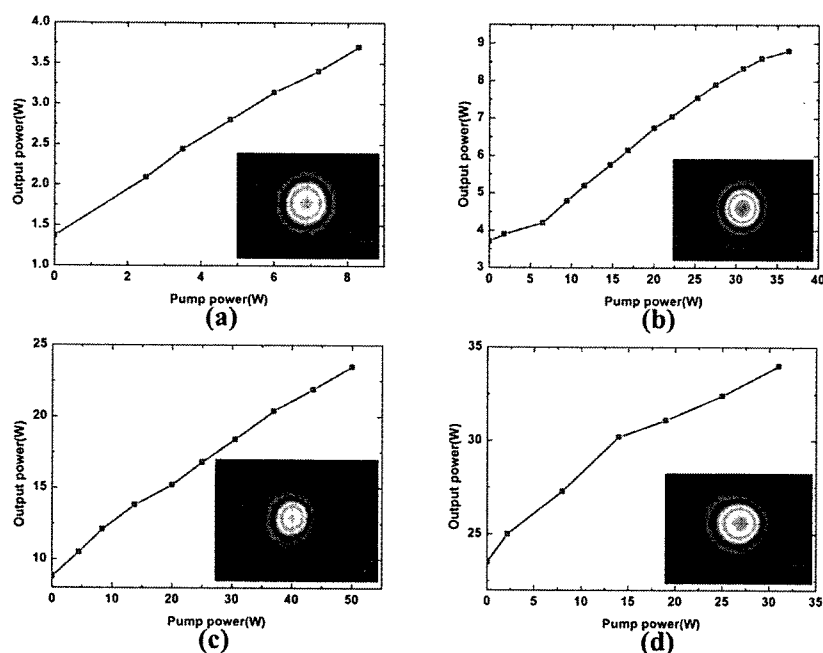


图 3.14 各级单程功率放大器的输出激光功率曲线及激光光斑测试图。(a) 第一级；
(b) 第二级；(c) 第三级；(d) 第四级

在最后一级侧面泵浦放大阶段，由于泵浦激光为连续光，泵浦功率可高达上千瓦，对晶体的热效应要求很高。所用的泵浦源为基于 Nd:YAG 晶体的半导体侧面泵浦模块，如图 3.15 所示。该泵浦模块放大介质为直径 8 mm、长度 185 mm 的棒状 Nd:YAG 晶体，采取激光二极管侧面连续泵浦方式，最大可以提供平均功率为 1000 W 的泵浦光，中心波长为 808 nm。激光晶体和二极管通过 14 °C 的水冷进行恒温冷却。在实验中，从端面泵浦放大阶段输出的 34 mJ 皮秒激光在高达 750 W 的泵浦功率下，最后被放大为单脉冲能量 64.8 mJ、重复频率在 1 kHz、中心波长 1064.4 nm 的皮秒激光。图 3.16 为所测得的侧面泵浦功率放大器的输出激光功率曲线以及最终放大激光的光束质量测试结果，光束质量因子 M^2 小于 2。

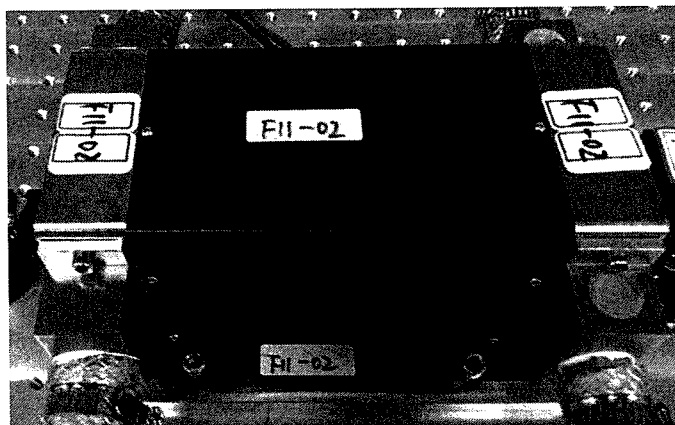


图 3.15 基于棒状 Nd:YAG 晶体的半导体侧面泵浦模块

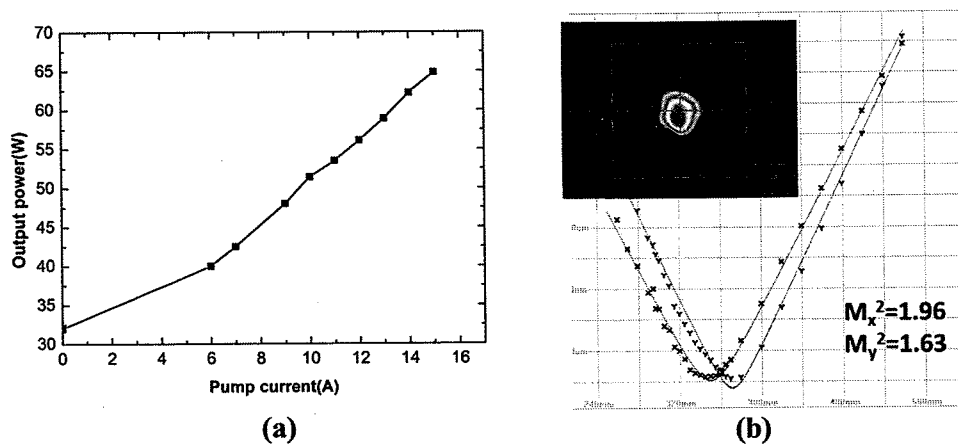


图 3.16 侧面泵浦功率放大器的输出激光功率曲线及光束质量测试结果

我们采用基于 Nd 掺杂的激光增益介质，设计与搭建了高单脉冲能量全固态皮秒激光放大器，由一个皮秒振荡器、一级皮秒再生放大器和一个组合式的全固态皮秒功率放大器组成。采用连续、准连续以及侧面泵浦的半导体激光器作为泵浦源，在重复频率为 1kHz 下最终获得了单脉冲能量为 64.8 mJ、中心波长在 1064.4 nm、光束质量因子 M 平方小于 2 的皮秒脉冲激光输出，图 3.17 为该系统的整体实物图。

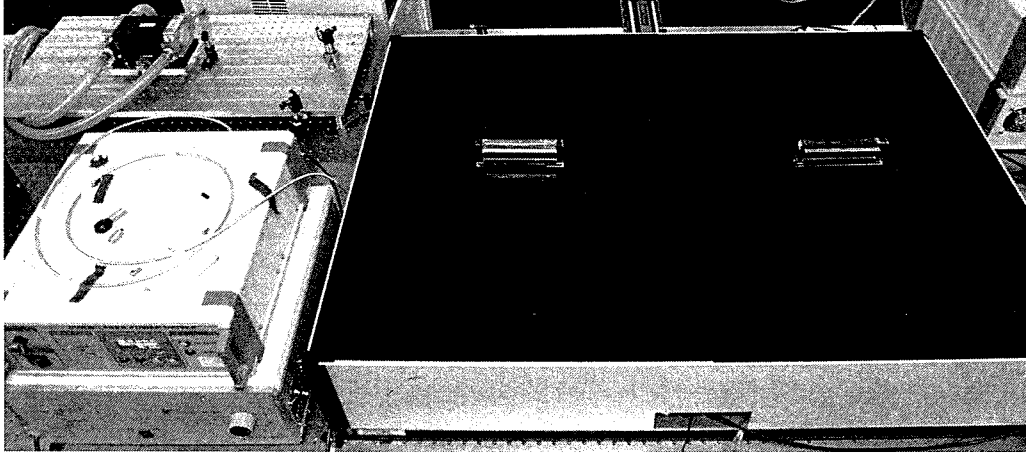


图 3.17 高单脉冲能量的全固态皮秒激光放大器实物图：右边为端面泵浦放大部分，
左上为侧面泵浦放大部分

3.2.4 倍频器

激光器输出的激光在对面不同应用领域时，对激光波长有着一定的要求，通常需要利用非线性材料进行波长的变换。差频与和频是最常见的非线性频率变换效应，它们都是基于非线性三波混频相互作用的二次谐波效应。在非线性材料中同时入射两个不同频率的光时，由于光电场的作用会在非线性材料内产生极化，其中包括非线性的极化强度 P_{NL} ：

$$P_{NL} = P^{(2)} + P^{(3)} + P^{(r)} + \dots \quad (3.6)$$

式中 $P^{(r)}(t)$ 表示不同阶次的非线性极化强度，假设 E 为介质中的光电场，那么第 r 阶的非线性极化强度可以表示为：

$$P^{(r)}(t) = \sum_{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_r} \epsilon_0 \chi^{(r)}(\omega_{\alpha_1}, \omega_{\alpha_2}, \dots, \omega_{\alpha_r}) E(\omega_{\alpha_1}) E(\omega_{\alpha_2}) \dots E(\omega_{\alpha_r}) e^{-i \sum_{m=1}^r \omega_{\alpha_m} t} \quad (3.7)$$

在三波混频效应中，入射到非线性材料中的为两束光，那么我们主要研究第二阶的非线性极化强度，其表达式为：

$$P^{(2)}(t) = \epsilon_0 \sum_{m,n} \chi^{(2)}(\omega_m, \omega_n) E(\omega_m) E(\omega_n) e^{-i \omega t} \quad (3.8)$$

将上式进行多项式展开后我们取其和频项，到由入射电场 E_1 和 E_2 在非线性材料中相互作用时，所得第三个电场 E_3 的波矢和频率应该满足以下关系式

$$\omega_3 = \omega_1 + \omega_2 \quad (3.9)$$

$$k_3 = k_1 + k_2 \quad (3.10)$$

这就是二次谐波效应需要满足的条件，称为相位匹配条件。二倍频时和频效应的特殊情况，指的是两个入射电场相同时的情况。在二倍频过程中，实现以上相位匹配条件的方法一般有两种：角度相位匹配和温度相位匹配。其中角度相位匹配是利用晶体的双折射效应实现的，温度相位匹配是利用晶体折射率随温度变化而实现的。其中对于角度相位匹配，按照入射光的偏振状态的不同，又可以分为两类不同的相位匹配方式：当入射的光都是偏振状态一致的线偏振时，产生的倍频光为另一种不同的偏振状态，为 I 类相位匹配（如 $o+o \rightarrow e$ ）；当入射光选为两种不同的偏振状态时，所产生的倍频光为其中一种偏振状态，为 II 类相位匹配（如 $o+e \rightarrow o$ ）。

我们通常用三束光的三波耦合方程组来描述晶体中的倍频过程，如下面的式子：

$$\begin{cases} \frac{dE(\omega_1, z)}{dz} = \frac{i\omega_1^2}{k_1 c^2} \chi_{eff}^{(2)} E(\omega_3, z) E^*(\omega_2, z) e^{-i\Delta k z} \\ \frac{dE(\omega_2, z)}{dz} = \frac{i\omega_2^2}{k_2 c^2} \chi_{eff}^{(2)} E(\omega_3, z) E^*(\omega_1, z) e^{-i\Delta k z} \\ \frac{dE(\omega_3, z)}{dz} = \frac{i\omega_3^2}{k_3 c^2} \chi_{eff}^{(2)} E(\omega_1, z) E^*(\omega_2, z) e^{-i\Delta k z} \end{cases} \quad (3.11)$$

其中 $\Delta k = k_1 + k_2 - k_3$ 表示相位失配量。由上面的式子进行演化，可以得到二次谐波产生的转化效率表达式：

$$\eta = \frac{8\pi^2 l^2 d_{eff}^2}{c\epsilon_0 n_1^2 n_2 \lambda_1^2} \frac{P_1}{\pi \omega_{10}^2} \frac{\sin^2(\Delta k l / 2)}{(\Delta k l / 2)^2} \quad (3.13)$$

上述表达式中 $\frac{d_{eff}^2}{n_1^2 n_2}$ 是与所用非线性材料相关的项， $\frac{P_1}{\pi \omega_{10}^2}$ 是指基频激光的功率密度， $\frac{\sin^2(\Delta k l / 2)}{(\Delta k l / 2)^2}$ 为相位匹配因子，取决于相位失配量 Δk 和所用晶体的长度 l 。从表达式中分析可以知道，想要获得高的倍频效率，就需要选用非线性性质好的材料、提高入射基频激光的功率密度以及保证尽可能好的相位匹配。

目前常见的用于 $1 \mu m$ 附近波长的倍频材料有 KTP（磷酸氧钛钾）、KDP（磷酸二氢钾）、BBO（偏硼酸钡）和 LBO（三硼酸锂）。在用于基频光 1064 nm 倍频为 532 nm 激光产生中，KTP 和 BBO 的有效非线性系数较大，但是 KTP 的损伤阈值比较低，BBO 的走离效应很严重，难以采用较长的晶体来保证倍频效应。所以在我们实验中，考虑到脉冲能量较大，功率密度和能量密度都比较高，选用了综合两者优点的 LBO 晶体，它的损伤阈值很高，在 10 GW/cm^2 以上（能量破坏密度 24.6 J/cm^2 ）。虽然有效非线性系数不够大，但是其走离效应很低，

特别是可以采用温度匹配的方式，大大增加了所用晶体的长度，保证了较好的倍频效率。

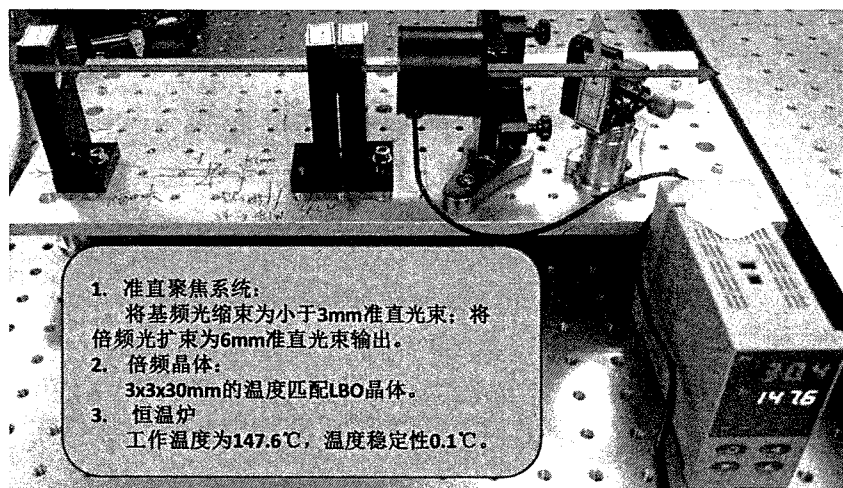


图 3.18 高能量皮秒激光倍频器实物图

实验中我们采用一块由福晶科技有限公司生长的 $3 \times 3 \times 30 \text{ mm}^3$ 的 LBO 晶体作为倍频材料，晶体两面镀有对基频激光 1064 nm 和倍频激光 532 nm 附近的增透膜。相位匹配方式为温度匹配，入射角为正入射，工作温度在 $147 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近。如图 3.18 所示，倍频晶体置于一个电路控制的恒温炉中(温度稳定性为 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$)，使工作温度稳定在最合适的区间。从全固态皮秒放大器中输出的大于 60 mJ 的 1064 nm 基频光首先经过一个由透镜组组成的缩束准直系统将光束直径缩小为 3 mm 以下的平行光，其能量密度计算后在 LBO 晶体的损伤阈值以内。通过优化晶体的入射角度、入射激光的偏振状态以及恒温炉的工作温度，最终在 147.6°C 下得到了转换效率约 45% 的倍频效率，输出的倍频绿光能量为 26.5 mJ ，重复频率为 1 kHz ，脉冲宽度估算后小于 20 ps 。

3.3 100kHz、40W 皮秒激光系统

高单脉冲能量的皮秒激光由于其高的峰值功率密度和能量密度，在科研和军工领域具有重要的应用。在工业应用领域，通常材料的加工对激光器能量的要求在 $100 \text{ }\mu\text{J}$ 以上就已经足够了，过高的脉冲能量（如 mJ 量级）很有可能会造成某些材料的整体破裂；此外，重复频率在 1 kHz 以内的脉冲激光加工效率太慢，不满足工业应用的需求。因此，重复频率在 100 kHz 以上、脉冲能量在百 μJ 量级

的皮秒激光器更受工业应用的青睐。我们在高能量全固态皮秒激光器研究的基础上，通过关键部件与结构设计的调整，获得了工作在 100 kHz、输出功率在 37.5 W、对应单脉冲能量为 375 μJ 的皮秒激光输出，本节将进行介绍。

与工作的 1 kHz 重复频率的皮秒激光放大器相比，高重复频率的皮秒激光放大器具有以下不同点：

- 1、再生放大腔内脉冲能量更低，腔内元件不容易损坏；
- 2、局限于目前准连续激光二极管技术，需采用连续的激光二极管作为泵浦源，激光增益介质处产生的热量更多；
- 3、工作于高重复频率的普克尔盒通光孔径较小（3 mm），对再生腔的设计提出了新的要求；
- 4、由于采用连续激光泵浦，再生放大器中光光转化效率更低。

针对以上特点与要求，我们着重对皮秒再生放大器部分的进行了重新设计和搭建。高重复频率的再生放大腔中晶体处和普克尔盒处的束腰更小，以提高转换效率、降低热量的产生和保证小孔径的普克尔盒正常工作（为了避免衍射效应，激光束腰应比实际通光孔径的一半要小）。同时，新设计的再生腔型对晶体所产生的热致透镜具有更大的容忍度，热补偿能力更强。如图 3.19 所示为所设计的 100 kHz 皮秒再生放大器。

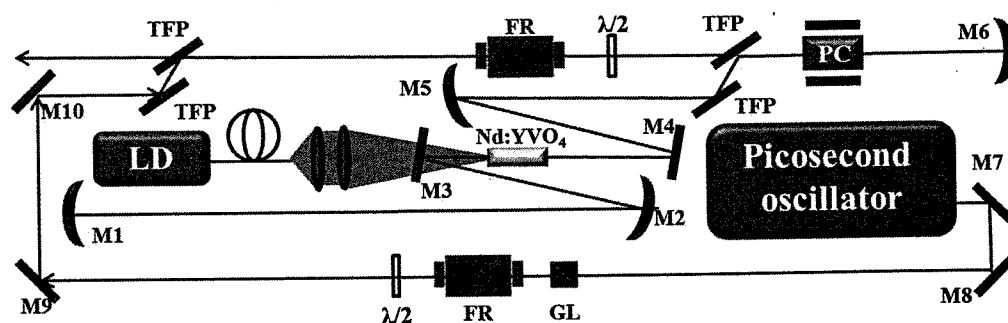


图 3.19 工作在 100 kHz 重复频率下的皮秒再生放大器光路图。图中 M1, M6: 曲率半径 900 mm 的平凹腔镜；M2, M5: 曲率半径为 600 mm 的平凹腔镜；M3, M4: 平面双色镜；M7-M10: 平面高反镜；PC: 普克尔盒；TFP: 薄膜偏振片；

FR: 法拉第旋光器；GL: 格兰棱镜。

与此前的腔型设计主要不同点体现在晶体两端的腔镜，我们通过腔型设计软件进行了模拟计算，如图 3.20 为在不同热透镜下腔内激光模式的分布图。表

3.3 为不同热透镜下腔内相关参数的变化。从中可的在晶体热透镜焦距从 250 mm 到无穷的范围，再生腔都保持一个稳定振荡的状态。在热透镜效应最严重的情况下，晶体上激光束腰为 470 μm ，普克尔盒所在区域的激光束腰在 1.06 mm 以内。腔型的设计计算机模拟结果达到了我们的预期目的。

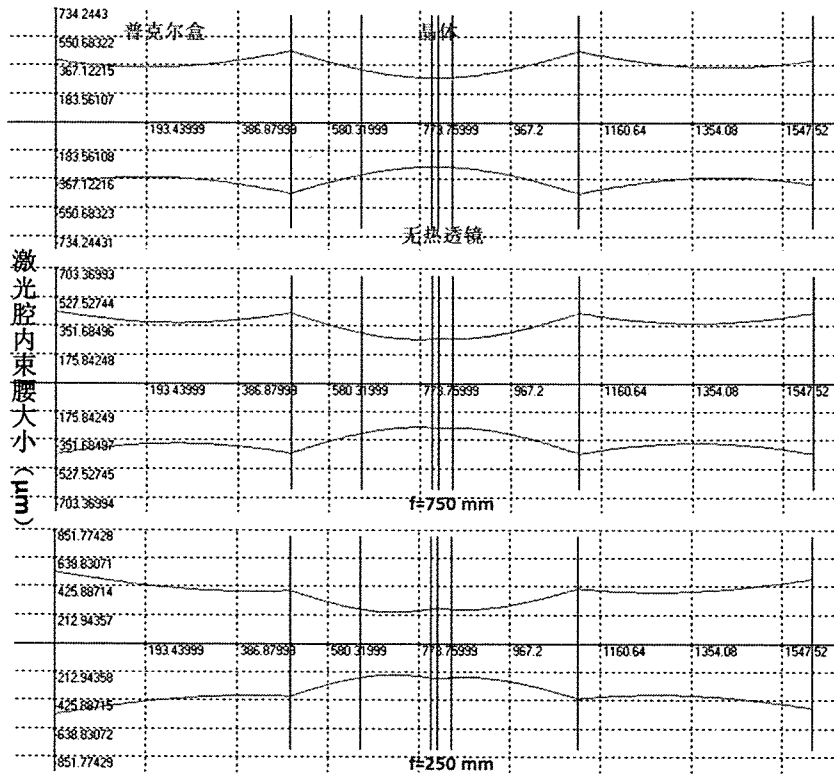


图 3.20 晶体不同热透镜焦距下再生放大腔内激光模式分布图

表 3.3 不同热透镜焦距下再生腔参数对比

热透镜焦距 (mm)	无	1000	750	500	250
晶体处束腰 (μm)	574	550	542	526	470
普克尔盒处 束腰 (μm)	708~ 801	736~ 860	742~ 880	756~ 918	780~ 1064
A+D	-0.82	-1.22	-1.33	-1.54	-1.93
$G_1 \cdot G_2$	0.30	0.20	0.17	0.12	0.02

实验中所用的增益介质是一块掺杂浓度为 0.3 at%，尺寸为 3x3x10 mm³，a 向切割的 Nd:YVO₄ 晶体，晶体侧面用铟箔包裹并固定与紫铜热沉上，紫铜中通有温度为 14 $^{\circ}\text{C}$ 的冷水以保持恒温。晶体两个通光面镀有对 808 nm 和 1 μm 波长

附近的增透膜 ($R < 0.2\%$)。泵浦源是由西安炬光公司生产的光纤耦合的连续激光二极管, 光纤芯径为 $200\ \mu\text{m}$, 中心波长为 $808\ \text{nm}$, 最大输出功率为 $30\ \text{W}$ 。泵浦激光通过一个成像比率为 2 的耦合系统聚焦在晶体中。普克尔盒晶体为 BBO, 通光孔径 $3\ \text{mm}$, 工作最高重复频率为 $100\ \text{kHz}$, 四份之一波电压为 $3.6\ \text{kV}$ 。最终在 $15.5\ \text{W}$ 的泵浦功率下, 获得了平均功率为 $2.6\ \text{W}$ 、重复频率为 $100\ \text{kHz}$ 、中心波长为 $1064.4\ \text{nm}$ 的皮秒激光。如图 3.21 为我们所测得的放大激光的光束质量因子, 结果显示光束质量因子 M^2 小于 1.2, 再生放大器输出的激光同样保持了很高的光束质量。

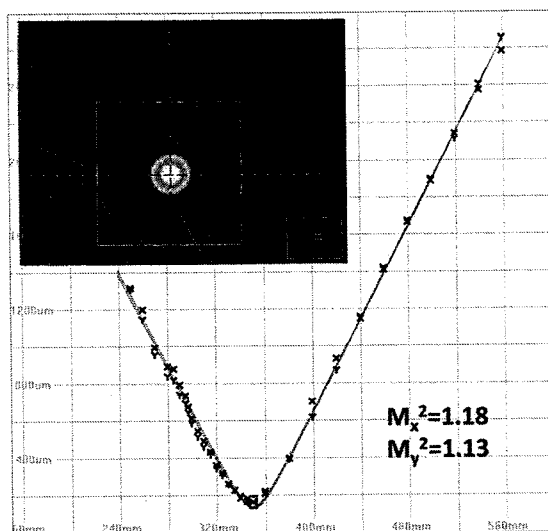


图 3.21 100 kHz 皮秒再生放大器输出激光光束质量测试结果

我们同样采用与图 3.13 类似的组合式的功率放大模式, $100\ \text{kHz}$ 的功率放大器由三级端面泵浦单程放大器和一级侧面泵浦功率放大器组成。端面泵浦部分的泵浦激光为西安炬光公司生产的光纤耦合的连续激光二极管, 光纤芯径为 $400\ \mu\text{m}$, 中心波长为 $808\ \text{nm}$, 最大输出功率为 $30\ \text{W}$ 。放大介质为掺杂浓度为 $0.3\ \text{at}\%$, 尺寸为 $3 \times 3 \times 10\ \text{mm}^3$, a 向切割的 Nd:YVO_4 晶体, 通过 14°C 水冷以分散去累积的热量。在总共 $88.5\ \text{W}$ 的泵浦功率下, 获得了平均功率 $21\ \text{W}$ 的皮秒放大激光, 对应的脉冲能量和转换效率分比为 $210\ \mu\text{J}$ 和 20.8% 。在侧面泵浦放大部分, 同样采用了上小节所描述的半导体侧面泵浦模块, 在侧面泵浦 $900\ \text{W}$ 的功率下, 最终获得了平均功率高达 $37.5\ \text{W}$ 的 $100\ \text{kHz}$ 重复频率的皮秒放大激光, 对应的单脉冲能量为 $375\ \mu\text{J}$ 。我们最后对整个系统输出的激光光束质量进行了测量, 如图 3.22 所示为侧面泵浦阶段输出激光功率曲线和光束质量测试结果, 光束质量因子

M^2 保持在 2 以内。这种具有高重复频率、高平均功率和高光束质量的皮秒放大激光同时具备高效率和高能量的特点,在材料加工的应用中能够发挥非常重要的作用。

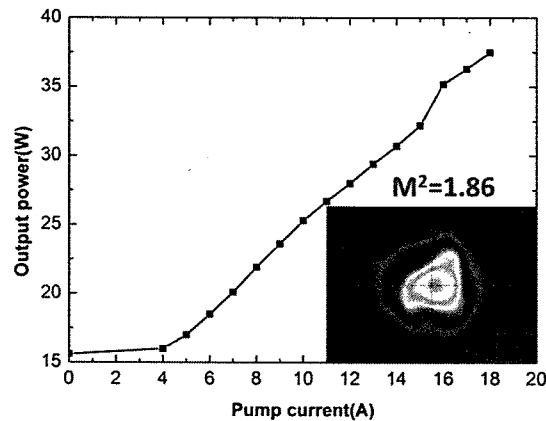


图 3.22 侧面泵浦功率放大阶段输出激光功率曲线和光束质量测试结果

3.4 大于 100kHz 飞秒激光系统的调研与设计

在全固态皮秒再生放大器的基础上,结合啁啾脉冲放大(CPA)技术,可以发展为飞秒量级的激光放大器。特别具有高重复频率(>100 kHz)和短脉冲宽度(<200 fs)的飞秒放大激光,是目前全固态放大领域的研究热点之一,在超精密加工领域和科学研究领域具有十分重要的应用需求。我们在成功实现了高能量和高重复频率的全固态皮秒放大器的基础上,对高重复频率的全固态飞秒放大器进行系统的调研和方案设计,开展了相关的研究工作。

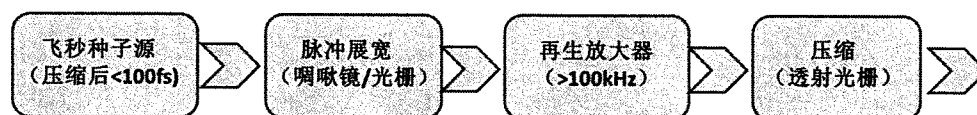


图 3.23 高重复频率全固态飞秒激光放大器系统方案图

如图 3.23 是我们所设计的高重复频率全固态飞秒激光放大器的系统方案图,放大器的种子光来源于具有宽光谱的飞秒激光振荡器,该振荡器中心波长在 $1\mu\text{m}$ 附近,输出激光光谱半高宽在 10 nm 以上,压缩后可以支持小于 100 fs 的激光输出;飞秒振荡器输出的种子激光首先经过一个由啁啾镜组或者光栅对组成的脉冲展宽器,展宽后激光脉冲宽度为数十皮秒,平均功率在 100 mW 以上,同时

保持较宽的光谱带宽；然后将皮秒量级的种子激光注入到一个高重复频率的再生放大器中进行放大，放大后的激光经过一级隔离器后进行脉冲压缩，最终输出脉冲宽度小于 200 fs、平均功率大于 5 W、重复频率大于 100 kHz 的飞秒放大激光。

其中与皮秒再生放大器相比较，最为关键的元器件在于激光增益介质和高重复频率普克尔盒的选择。对于具备超短脉冲宽度的飞秒放大器中的激光增益介质，除了要求具有良好的热效应和高的增益外，介质的荧光发射谱带宽尤为重要。此外，考虑到再生放大过程中的增益窄化效应，想要获得脉冲宽度小于 200 fs 的激光输出，那么种子光可以支持的脉冲宽度至少要在 100 fs 以下。目前在皮秒激光器中常用的掺钕激光晶体中荧光发射谱都很窄，难以支持飞秒脉冲激光运转。掺镱的激光晶体是较为合适的选择，从近年来各类研究的报道中可发现，其中 Yb:KGW/KYW、Yb:CaGdAlO₄(CALGO)/CaYAlO₄ 和 Yb:CaF₂ 三个系列的晶体性质比较突出，表 3.4 统计了其中在飞秒振荡器方面已经报道的较好结果^[23, 38, 144-148]。从中我们可以看到，在自锁模方式下，这三类晶体都可以实现脉冲宽度小于 100 fs，重复频率在数十 MHz 的飞秒振荡激光。

表 3.4 Yb 掺杂 KGW、CaGdAlO₄/CaYAlO₄ 和 CaF₂ 在飞秒振荡器中的部分结果

晶体种类	锁模方式	中心波长 (nm)	脉冲宽度 (fs)	输出功率 (mW)	重复频率 (MHz)
Yb:KGW	SES AM	1026	162	8800	62
Yb:KGW	Kerr-lens	1032	67	3000	77
Yb:CaYAlO ₄	SES AM	1065	43	20	67
Yb:CALGO	SES AM	1050	47	38	109
Yb:CALGO	SES AM	1050	94	12500	80
Yb:CALGO	Kerr-lens	1063/ 1045	32/40	90/ 1080	96
Yb:CaF ₂	Kerr-lens	1049	68	2300	73

考虑到在高重复频率的再生放大级中的应用, Yb:CaF₂ 晶体的热效应并不够出色, 虽然它能够实现非常高的单脉冲能量放大激光, 2008 年 Siebold 等采用该晶体作为增益介质获得了 197 mJ、1 Hz、192 fs 的太瓦激光输出^[96]; 2014 年 Alexander Kessler 等采用 LD 泵浦方式, 在 Yb:CaF₂ 晶体上实现了能量高达 16.6 J 的放大激光输出。但是高重复频率的放大器往往是采用连续激光进行泵浦, CaF₂ 晶体的热膨胀系数很大, 在热积累下很容易发生断裂。Yb:KGW 和 Yb:CALGO 则在高重复频率放大器中应用较多, 近年来也出现了不少相关的报道。2013 年, G. H. Kim 等采用双晶体 Yb:KGW 再生放大器结构和 CPA 放大技术, 实现了 21 W、小于 300 fs、200 kHz 的放大激光输出^[97]; E. Caracciolo 等基于 Yb:CALGO 晶体的再生放大器获得了 28 W、217 fs、500 kHz 的飞秒激光脉冲^[98]。同时, 在热效应上 Yb:CALGO 晶体似乎更有优势, 它本身所具有的负透镜的特性, 正好可以弥补在热积累下的热透镜, 支持更高功率的泵浦^[149]。再生放大器中另一个关键的部件为普克尔盒, 目前市面上常用的单块晶体的普克尔盒正常工作的重复频率为 100 kHz 以内, 随着技术的进步, 新型的基于双晶体的普克尔盒能够支持更高的重复频率, 一般情况下最大可以到 500 kHz, 可以满足我们方案的需求。基于上述的相关调研和我们在全固态皮秒放大器的工作基础, 设计了如图 3.24 所示的高重复频率全固态飞秒放大器装置图。

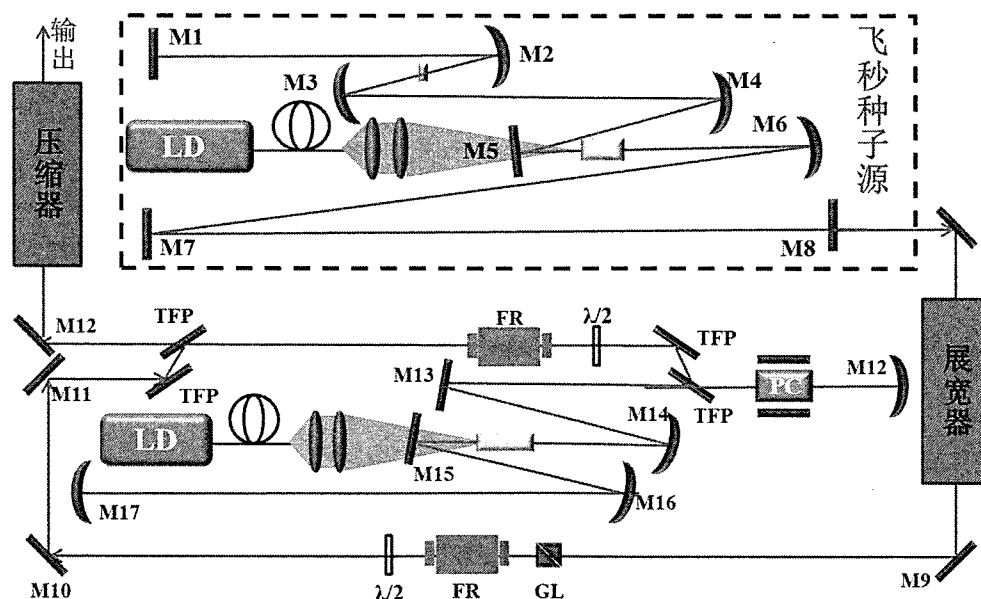


图 3.24 高重复频率全固态飞秒放大器装置图

整个系统由飞秒种子源、展宽器、再生放大器和压缩器四个部分组成。飞秒种子源基于 Yb:CALGO 晶体，采用自锁模方式，目标参数为平均功率大于 300 mW，脉冲宽度小于 100 fs，重复频率为 80 MHz；种子光经过展宽器后展宽为 50~100 ps 的宽光谱带宽的激光，然后注入到再生放大器中；再生放大其中激光增益介质为 Yb:CALGO 晶体，普克尔盒选择双晶体 BBO 普克尔盒，通光孔径为 3.5 mm，四份之一波电压小于 2.5 kV。腔型的设计上参考 100 kHz 皮秒放大器的搭建经验，保证在晶体和普克尔盒处合适的激光束腰，利用商用的腔型设计软件模拟所设计再生腔内激光模式分布图（热透镜焦距取 250 mm）如图 3.25 所示，在晶体处激光束腰约为 264 μm ，在普克尔盒处激光束腰为 980 μm ，小于通光孔径的一般，大小较为合适。从再生放大器中输出的放大激光目标参数为平均功率大于 8W，光谱宽度约为 10 nm 以上，重复频率为 100~500 kHz。最后放大激光通过一个由投射光栅组成的脉冲压缩器获得飞秒量级的放大激光，压缩后目标参数为平均功率大于 5 W，脉冲宽度小于 200 fs，重复频率为 100~500 kHz。

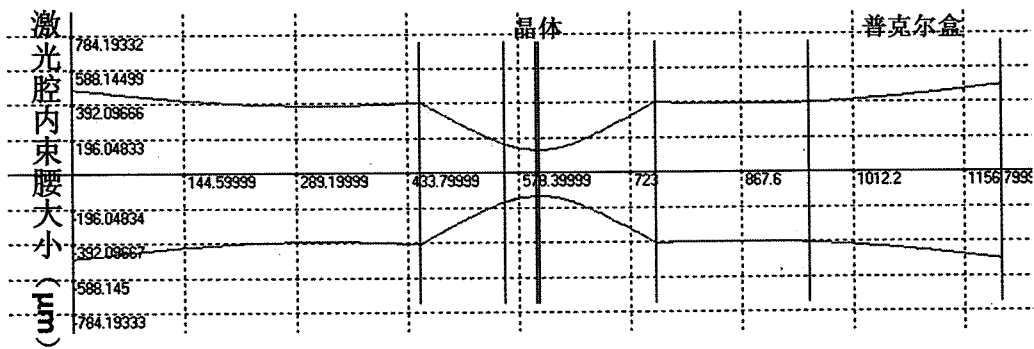


图 3.25 在热透镜焦距为 250 mm 下再生腔内激光模式分布图

3.5 本章小结与展望

本章开展了高能量全固态皮秒激光放大器、高重复频率全固态皮秒激光放大器以及高重复频率全固态飞秒激光放大器的相关研究。相关研究结果已发表在 Appl. Sci. 5 1590-1602 (2015) 杂志上。

基于 Nd 掺杂的激光增益介质 YVO₄ 和 YAG，以及连续、准连续以及侧面泵浦的半导体激光泵浦技术，设计了一个组合式的皮秒激光放大系统。在重复频率为 1 kHz 下，获得了单脉冲能量为 64.8 mJ、中心波长在 1064.4 nm、光束质量

因子 M^2 小于 2 的皮秒脉冲激光输出, 通过二倍频后在中心波长 532 nm 处可得到近 30 mJ 的绿光激光。在重复频率为 100 kHz 下, 最终获得了平均功率高达 37.5 W 的重复频率的皮秒放大激光, 对应的单脉冲能量为 375 μ J, 光束质量因子 M^2 保持在 2 以内。

在皮秒放大器的研究基础上, 结合具有宽光谱特性的 Yb 掺杂的激光增益介质和双晶体普克尔盒技术, 通过系统调研和技术分析设计了高重复频率全固态飞秒放大器的方案, 目标参数为平均功率大于 5 W, 脉冲宽度小于 200 fs, 重复频率为 100 kHz~500 kHz, 中心波长在 1 μ m 附近。

第四章 全固态皮秒激光器应用研究

全固态的皮秒激光器融合了全固态激光以及皮秒激光技术的特性,具有结构简单、稳定性高、成本低等优点,相比于其他类型的激光器更受欢迎,应用范围更为广阔。通过非线性效应倍频后的高功率皮秒绿光激光是科学研究中非常优良的泵浦激光;高重复频率的皮秒激光是工业微加工中的佼佼者,在材料切割、穿孔、表面处理等方面应用广泛;高能量的皮秒激光在超远距离激光测距、非线性过程泵浦等也有着很好的应用。本章我们将介绍基于所开发和研制的全固态皮秒激光系统,进行的一系列应用性研究,其中主要包括皮秒激光同步泵浦钛宝石锁模激光器研究、皮秒激光材料加工研究、皮秒激光泵浦的 THz 产生实验研究等。

4.1 皮秒激光同步泵浦钛宝石锁模激光器实验研究

同步泵浦锁模是一种实现超短脉冲激光的途径,该技术通常被应用于钛宝石激光器的锁模,在其他类型的激光器中比较少见。同步泵浦的锁模方式是指采取一台锁模激光器去泵浦另一台激光器,通过调制腔内增益的方式实现连续锁模,从而进一步压缩脉冲的宽度,获得脉冲宽度更短且可调谐的超短脉冲激光。要实现稳定的同步泵浦锁模,要求两个激光器要严格同步,也就是谐振腔的长度要相互匹配,这样对泵浦激光的腔长和稳定性提出了一定的要求。同步泵浦的钛宝石锁模激光器实际上是同步泵浦启动的克尔透镜锁模过程,被泵浦的钛宝石激光器首先要通过调节优化使其工作在克尔透镜锁模的区域,再通过同步泵浦技术启动克尔透镜锁模,以获得超短脉冲的飞秒激光输出,同时实现自启动的锁模,综合了同步泵浦锁模以及克尔透镜锁模两者的优势。本小节将详细介绍利用所研发的皮秒绿光激光作为泵浦源,同步泵浦钛宝石实现自启动的数十飞秒脉冲激光输出,在实验研究和超快激光设备化推进中具有十分重要的意义和价值。

基于掺钛蓝宝石的飞秒激光器一直以来都是超短脉冲激光最为重要的激光器之一,特别是脉冲宽度在几个飞秒到数十个飞秒的激光器中,几乎是唯一可选的激光光源。然而钛宝石激光器最大的不足之处在于高昂的成本以及稳定性,其中高的成本主要源于钛宝石晶体自身价格较高以及钛宝石激光器的泵浦源,通常用来泵浦钛宝石晶体的光源为高功率的连续绿光固体激光器,目前使用较多的基本都是国外公司较为成熟的产品,价格较高;稳定性的不足主要源于克尔透镜锁

模的方式，该锁模方式需要通过外界的扰动来启动锁模，在工作过程中如果再次受到扰动很容易使得锁模被打断。近年来我们研究组在钛宝石激光器设备化上进行了大量研究，引入电路检测以及自动锁模控制等技术后，稳定性已经得到了很大的提高。针对这两个主要的不足之处，我们开展了皮秒绿光激光同步泵浦钛宝石激光器的研究，采用皮秒激光同步泵浦锁模的方式，相比目前通用的钛宝石激光器有如下优点：

- 1、短脉冲激光泵浦下，钛宝石晶体中所产生的热量较少，能量的利用效率高；
- 2、同步泵浦的锁模方式使得可以实现自启动锁模，通过腔长锁定技术可以将精度控制在合理的范围，提高了锁模的稳定性；
- 3、通过辅助式的克尔透镜锁模，控制腔内色散补偿量后可以得到光谱宽度较宽的超短脉冲激光输出；
- 4、泵浦激光为皮秒绿光激光，有望打破了国外泵浦源的使用限制，推进了飞秒钛宝石激光器的国产化进程以及成本控制。

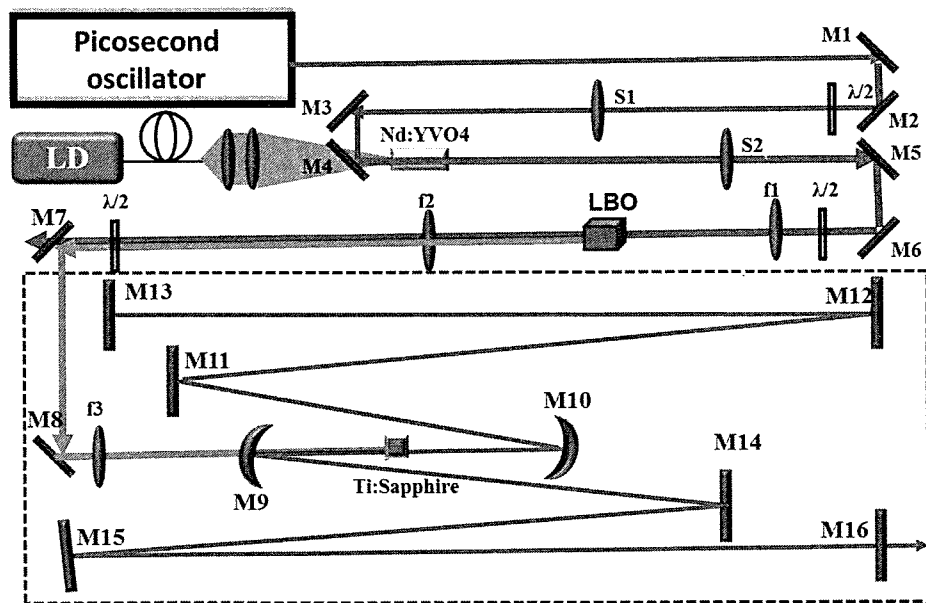


图 4.1 皮秒激光同步泵浦钛宝石激光器光路设计图

如图 4.1 为所设计的皮秒绿光激光同步泵浦钛宝石激光器的光路图，整个实验系统可以划分为四个部分：皮秒振荡器、功率放大器、倍频器以及钛宝石激光器。皮秒振荡器输出的激光平均功率为 1.8 W、脉冲宽度为 7 ps、中心波长为 1064 nm、重复频率为 68 MHz，通过两片平面高反镜 M1、M2 导入到功率放大器中。在功率放大器部分，被放大激光首先由一片对 1064 nm 波长作用的二分之一波片

对其偏振状态进行优化,接着透过一片焦距为 100 mm 的平凸透镜将激光聚焦在晶体中,实验中可以通过调节平凸透镜沿着激光传输方向的位置微调晶体中的激光束腰,保证高的放大效率同时避免晶体功率破坏。功率放大器中的激光增益介质选择在 1064 nm 波长附近效率更高、且具有偏振特性的 Nd:YVO₄ 晶体,掺杂浓度为 0.3 at%, a 向切割,尺寸为 3x3x10 mm³。晶体两端面镀有 1064 nm 附近波长激光以及 808 nm 波长泵浦光的增透膜,被铝箔包裹后置于紫铜热沉中通过冷却水进行散热,温度控制在 12 °C。泵浦激光为西安炬光科技有限公司生产的光纤耦合激光二极管,波长为 808 nm、耦合光纤芯径为 200 μm、最大输出连续光功率为 30 W,从光纤中输出的泵浦激光通过一个成像比例为 2 的耦合系统聚焦在激光晶体中。放大后的激光再通过一片焦距为 200 mm 的平凸透镜进行准直,然后在注入到倍频部分。如图 4.2 为功率放大器中放大激光的功率曲线,从皮秒振荡器中输出的 1.8 W 平均功率激光经过一级单程功率放大器后,最后在 27 W 泵浦激光功率下,得到了 10.2 W 的基频放大激光输出,重复频率为 68 MHz,中心波长为 1064 nm。

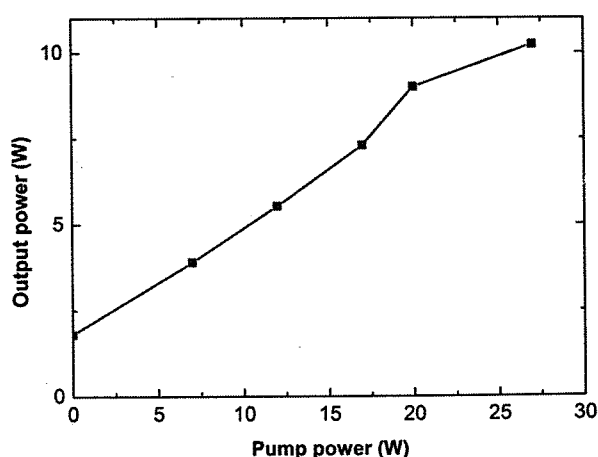


图 4.2 皮秒功率放大器输出功率曲线

倍频部分所用的非线性晶体为一块一类匹配的尺寸为 4x4x10 mm³ 的 LBO 晶体,工作温度为常温,入射角度为正入射。基频激光首先通过一片二分之一波片进行偏振状态优化,进而再由一片焦距为 200 mm 的平凸透镜聚焦到倍频晶体中,以保证较好的倍频效率,倍频后再通过一片同样参数的平凸透镜进行准直。在 10 W 基频激光功率下,优化倍频晶体角度以及基频光偏振状态后得到最大输

出倍频激光功率为 4.2 W、波长为 532 nm、重复频率为 68 MHz。为了切合钛宝石晶体偏振吸收的特性，准直后的倍频绿光激光透过一片对 532 nm 波长激光起作用的二分之一波片对其偏振状态进行调节，最后通过一片对基频激光高透而倍频激光高反的双色平面镜 M7 和一片对倍频激光高反的平面反射镜 M8 导入到钛宝石激光器中。

钛宝石激光器的设计基于我们研究组研制的成熟产品结构^[150]，配合泵浦激光的重复频率进行了腔长调整。其中钛宝石晶体的长度为 4 mm，初步估算激光通过一次所引入的群速度色散量为 220 fs^2 - 240 fs^2 ；腔内 M9 和 M10 为一对带啁啾的凹面腔镜，对着腔内晶体一面镀有以 800 nm 为中心的宽带反射膜以及 532 nm 波长附近的增透膜，另一面镀有对 532 nm 波长附近的增透膜，曲率半径为 100 mm；M11 和 M12、M14 和 M15 为两对平面啁啾镜，镀有以 800 nm 为中心的宽带反射膜；M13 为一片不带啁啾的平面高反镜，放置于一个平移台中以便调节腔长；M16 为输出镜，输出耦合率为 10 %。腔内激光在谐振腔内走一次由镜片所引入的啁啾量总共为 -240 fs^2 ，与晶体所引入的正色散量相当，以得到较短脉冲输出。皮秒 532 nm 泵浦激光通过一片焦距为 100 mm 的平凸透镜聚焦在钛宝石晶体中，匹配晶体中的激光束腰。钛宝石晶体以布儒斯特角放置，最大限度降低插入损耗。

皮秒激光同步泵浦钛宝石激光器的调节过程为：第一步为克尔透镜锁模区域的调节，通过优化调节腔内各个元器件的位置和角度，使得钛宝石激光器处于克尔透镜锁模区域，且输出功率最优；第二步为同步泵浦锁模，在皮秒绿光激光泵浦下，调节端镜 M13 的位置，使得钛宝石激光器腔长与皮秒泵浦激光腔长严格一致，当两者达到同步时，可以得到稳定的同步泵浦锁模信号；第三步为引入腔长锁定电路，将皮秒泵浦激光器中的振荡器和钛宝石激光器两者的腔长进行锁定，以保证同步锁模的稳定性和自反馈调节。如图 4.3 和 4.4 分别为腔长不完全同步以及完全同步下所得到的锁模脉冲序列图，其中蓝色序列为钛宝石激光器输出的锁模序列，黄色序列为皮秒泵浦激光锁模序列。从图中可以看到，当腔长完全匹配时，从钛宝石激光器中输出稳定、干净、重复频率同样为 68 MHz 的锁模脉冲序列。当泵浦激光功率为 4 W 时，得到锁模激光功率最大为 420 mW。

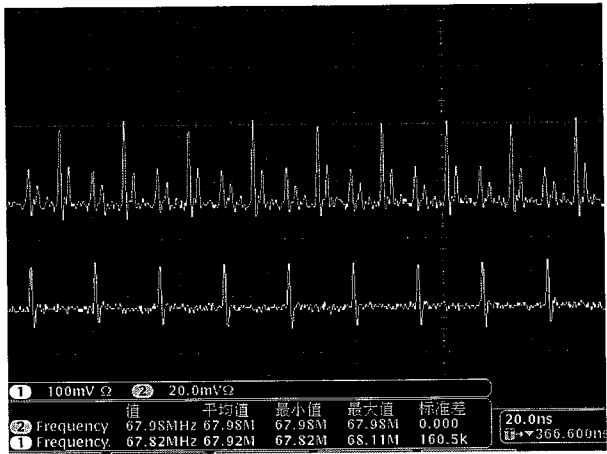


图 4.3 腔长不完全同步下的钛宝石激光器与皮秒泵浦激光器锁模序列图：上面为钛宝石激光器输出脉冲序列；下面为皮秒激光器输出脉冲序列



图 4.4 腔长完全同步下的钛宝石激光器与皮秒泵浦激光器锁模序列图：上面为钛宝石激光器输出脉冲序列；下面为皮秒激光器输出脉冲序列

在稳定同步锁模激光运转下，我们对输出的锁模激光光谱和脉冲宽度进行了测量。如图 4.5 为同步泵浦锁模激光光谱图，激光中心波长位于 786 nm，光谱半高全宽为 28 nm。图 4.6 为所测得的强度自相关曲线，在双曲正割曲线拟合下，测得的锁模激光的脉冲宽度为 46 fs。我们在实验中通过设计和搭建高功率的皮秒绿光激光，以此作为泵浦源成功实现了同步泵浦锁模的钛宝石激光器，得到了自启动的、稳定性高的数十飞秒的锁模脉冲激光输出，为国产化的飞秒激光器提供了实验基础，实验中系统运转实物图如图 4.7 所示。

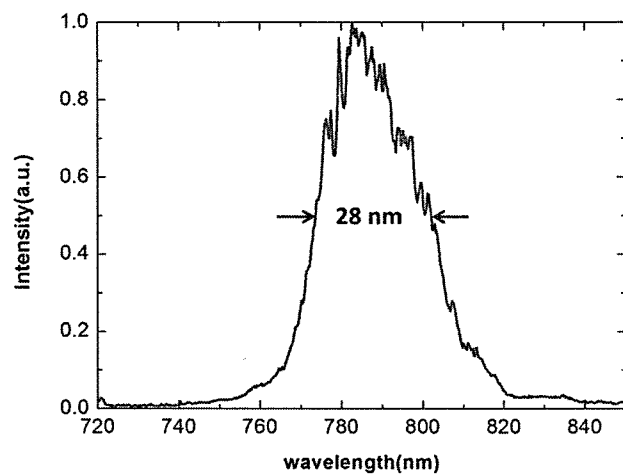


图 4.5 同步泵浦锁模激光光谱图

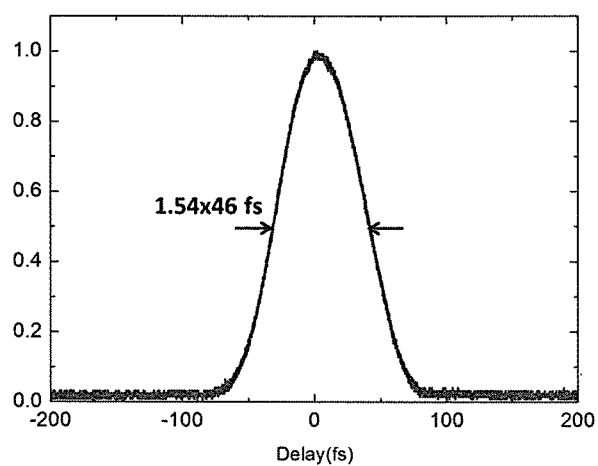


图 4.6 同步泵浦锁模激光强度自相关曲线

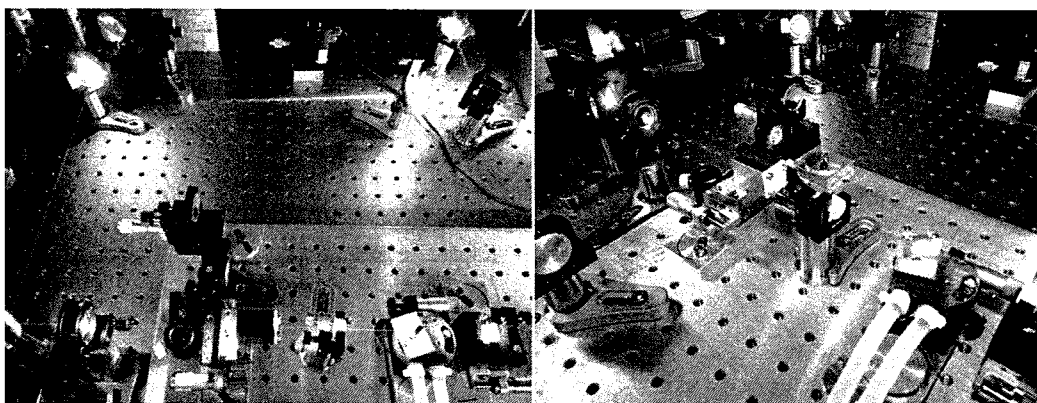


图 4.7 同步泵浦钛宝石激光器实物图

4.2 皮秒激光加工实验研究

材料加工的应用是全固态皮秒激光优势最大的领域,超短脉冲激光与物质相互作用的时候,能量集中在超短时间尺度内,很好的避免了长脉冲加工的弊端,是一种“冷加工”方式,加工出来的样品质量和精密度都非常高。而相比于飞秒激光器,全固态皮秒激光器成本更低、结构更紧凑、维护更为方便,特别是高重复频率的皮秒激光,其加工效率更快,非常适合于材料加工领域的应用。我们在实验上研制了一套重复频率为 100 kHz,平均功率可达近 40 W 的皮秒激光系统,基于该高重复频率的全固态皮秒激光器开展了一系列材料加工的实验探索,本小节将进行介绍。

要想将皮秒激光器用于材料的加工和打标,激光器本身为核心的部件,但是还需要与控制激光路径和加工参数的打标机进行整合。我们与大恒激光有限公司进行合作,在 100 kHz 皮秒激光系统的基础上,通过对光路进行初步的扩束与准直,连接由大恒激光公司生产的激光打标机以及控制器,形成了一个皮秒激光加工与打标平台,如图 4.8 所示。

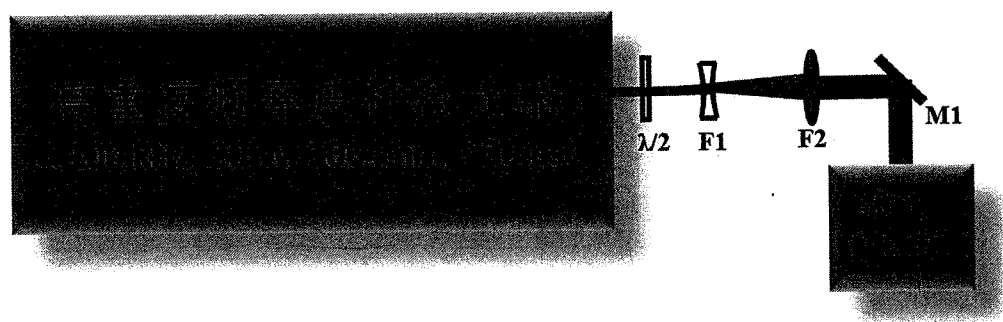


图 4.8 高重复频率皮秒激光加工与打标系统

整个系统由三部分组成:高重复频率皮秒激光器,光路整形部分,激光打标机及其控制器。由高重复频率皮秒激光器输出的激光重复频率为 100 kHz、最大输出平均功率设定为 20 W、对应脉冲能量为 200 μ J、中心波长为 1064 nm、脉冲宽度约为 20 ps。光斑直径约为 4 mm 的输出激光首先透过一片二分之一波片来优化与调节偏振状态。然后通过由 F1 和 F2 组成的扩束准直系统将光斑直径扩束为 8 mm,其中 F1 为焦距-200 mm 的平凹透镜, F2 为焦距 400 mm 的平凸透镜,两者共同组成了扩束比为 2 的光束变换系统。扩束后的激光再通过一片平面高反镜 M1 注入到激光打标机中,该激光打标机由两片垂直放置的方形振镜、

以及一个非球面聚焦镜组成，如图 4.9 所示。通过控制器的电脑程序控制振镜组振动频率和方向，以达到控制激光路径的效果，激光经过非球面透镜聚焦于载物台中对材料进行加工和打标。基于该系统我们进行了相关材料加工探究实验。

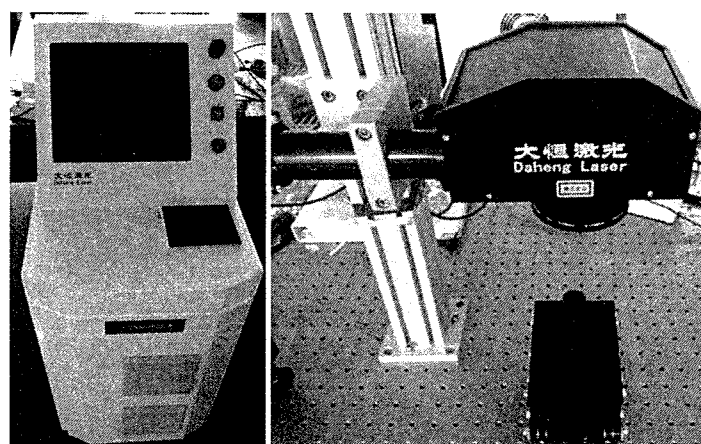


图 4.9 激光打标机及其控制器

4.2.1 人类牙齿切片的表面加工

牙齿是人类身体中最坚硬的部分，而牙齿中最坚硬的部分就是表面的釉质层——牙釉质。日常生活中牙科的疾病是最为常见的疾病之一，牙齿虽然很硬，但是也会造成破坏或者生长畸形。最普遍的处理方式就是将已经病变的牙齿拔除然后重新种植或者填补，牙科治疗中面临着大量的牙齿需要处理。近年来，随着激光加工的日益发展，特别是超短脉冲激光的发展，其优良的特性可以成为牙科治疗中的有力工具。基于所搭建的皮秒加工系统，我们和北京大学口腔医院合作进行了人类牙齿切片的表面加工，将皮秒激光应用于对牙釉质的加工处理，取得了较为不错的加工效果。

实验中所用的样品为已经预先处理的人类牙齿切片，切片厚度为 2 mm。我们将激光参数和加工参数作如下设计：

- 1、激光单脉冲能量：5 mJ、7.5 mJ、10 mJ 三挡能量，对应能量密度分别为 4 J/cm^2 、 6 J/cm^2 、 8 J/cm^2
- 2、激光实际聚焦光斑半高宽直径约为 $40 \mu\text{m}$ ，如图 4.10 所示
- 3、加工线距： $50 \mu\text{m}$
- 4、加工速度：4000 mm/s

通过改变不同的参数组合，在切片上采用皮秒激光进行划线，探究牙齿切片的表面加工效果。根据以往的材料显示牙齿牙釉质层的加工阈值为 J/cm^2 量级，实验中在最低能量 5 mJ 情况下，对应能量密度为 $4 J/cm^2$ ，可以得到较为明显的加工效果。我们在面积约为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的牙齿切片上进行组合划线，加工速度设置为 4000 mm/s ，划线的距离为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 。如图 4.11 所示为牙齿切片加工后在高倍率电镜下的形貌图，从中可看到在牙齿表面每隔 $50\text{ }\mu\text{m}$ 距离形成了深度约为 $60\text{ }\mu\text{m}$ 的凹槽，在我们所设计的激光参数和加工参数下，可以较好地对比牙齿最为坚硬的牙釉质层成功进行加工，为皮秒激光在牙科应用中提供了实验基础。结合实际应用，采用皮秒激光加工的方式，我们可以根据不同个体的需求，设定不同的激光参数和加工参数，对牙齿中的某个部分进行加工处理与去除，以满足具体应用的需求。

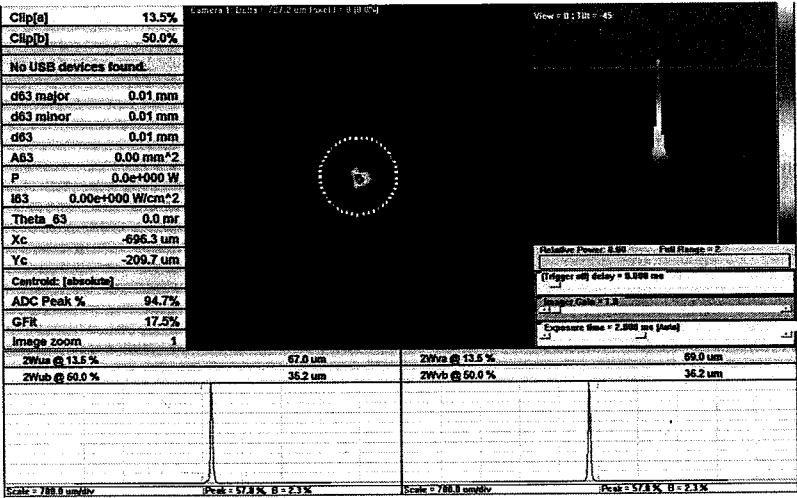


图 4.10 CCD 相机拍摄的激光焦点处光斑图

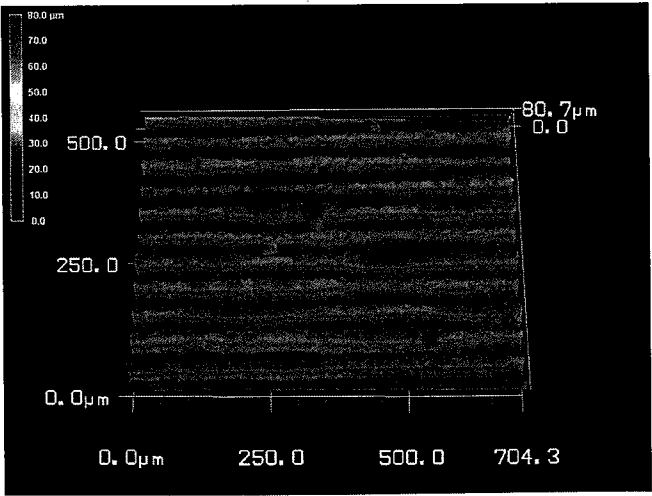


图 4.11 人类牙齿切片表面处理效果图

4.2.2 其他材料激光加工

除了人类牙齿切片表面加工外，我们还进行了包括白宝石、石英片、高分子聚合物材料、碳纤维等材料加工的实验探究。在实验探究过程中我们发现，皮秒激光的加工方式虽然为“冷加工”，但是如果加工重复时间过长，也就是加工次数过多，也会在材料中产生热量积累而造成毛糙。此外，对于不同的材料特别是脆性较高的材料，过高的脉冲能量也很容易造成样品的破裂，因此通过实验探究找出合适的组合参数对材料的加工非常重要。

我们初步的实验结果显示，加工次数较少、脉冲能量相对较高的一次成型情况下，样品加工后边缘的效果最佳。如图 4.12 为我们采用两种不同加工参数对白宝石片切割后边缘的效果图，其中上图为激光脉冲能量设置较低、加工次数比较多、每次加工速度较快；下图为激光脉冲能量设置较高的一次成型、走线速度较慢。从中可以明显看到，多次加工达到切割目的情况下样品的边缘较差，形成了小范围碎裂的痕迹和毛糙，从而造成边缘的不平整；一次成型的情况下样品的边缘较为干净，没有明显的碎裂痕迹和毛糙，切割效果较好。

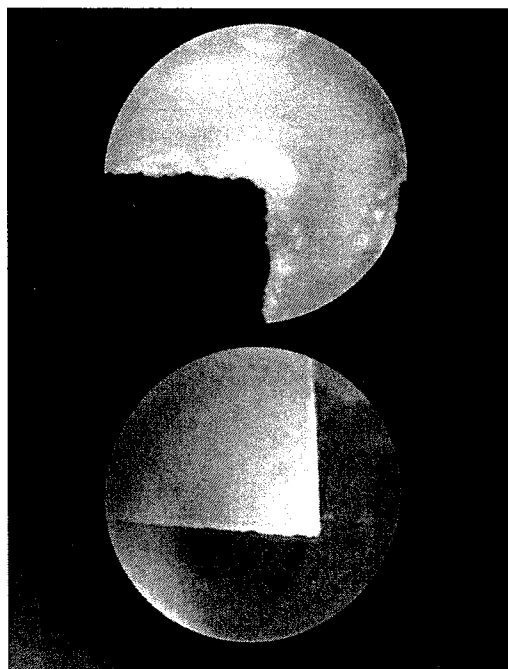


图 4.12 不同加工参数下的白宝石样品切割边缘效果图

基于这种加工参数选择的原则，我们进行了多种材料的激光加工实验探索，如图 4.13 为白宝石条形切割、高分子聚合物切割、石英片切割以及碳纤维材料表面划线等加工效果图。

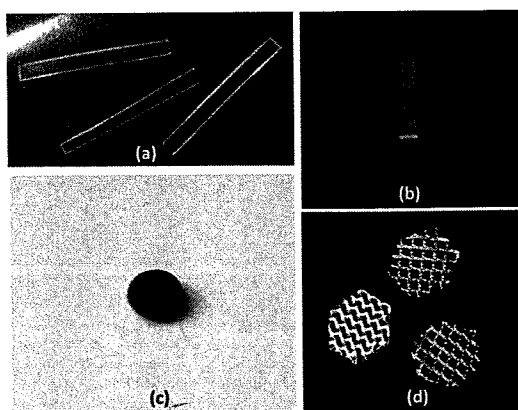


图 4.13 不同材料皮秒激光加工效果图：（a）白宝石；（b）石英玻璃；（c）碳纤维材料；（d）高分子聚合物

4.3 皮秒激光 THz 产生实验研究

太赫兹（THz）辐射是指频率在 0.1THz 到 10THz 范围内的电磁波，对应波长为 30 μm 到 3000 μm 范围内的辐射，在光谱带中位于远红外与微波之间，如图 4.14 所示^[151]。由于长期以来人们对 THz 波段的认识非常有限，因此这一个光谱范围被称为“THz gap”。近年来，世界各国给予了 THz 研究高度的重视，THz 的研究已经成为了国际上最为重要的研究之一。THz 辐射又被称为“生命光线”，它普遍存在于一切生命体中和物质中。同时，由于其波段处于红外和微波之间，它兼有这两者的性质，特别是具有与微波相似的高穿透性。THz 辐射以其独特的性质在材料科学、生物医学、光谱与成像、天体物理等领域具有广泛的应用价值。其中与我们生活中最贴近的就是应用于安检中，THz 辐射通常能量很小而且穿透性很高，不会对物质产生破坏作用，相比于 X 射线更有优势，非常适合应用于安检中，如图 4.15 为采用 THz 成像技术对工具箱进行的成像图。

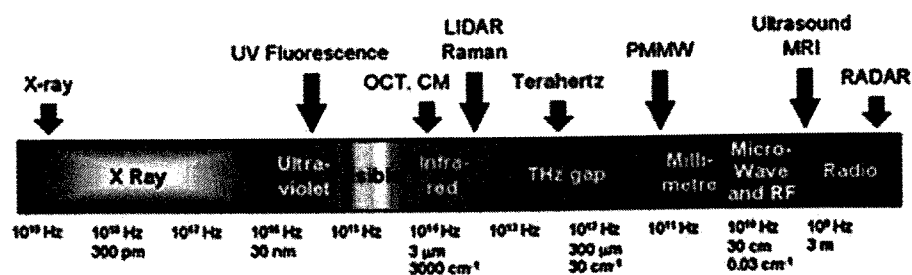


图 4.14 THz 辐射在光谱带中所处的位置^[151]

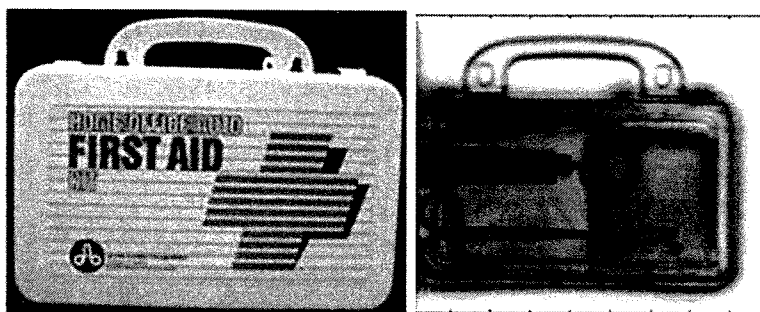


图 4.15 THz 成像技术应用案例

目前 THz 产生的方法主要有电子学和光子学的方法，电子学方法包括自由电子与半导体的共振产生以及加速电子产生法等；光子学的方法包括与超短激光脉冲相关的 THz 辐射的光整流、光电导和非线性光学差频方法等。其中加速电子产生法得到的 THz 辐射的能量最高，但是该方法所需的能量源巨大，一般仅限于实验室中使用，而且所得到的 THz 辐射重复频率一般都很低，为 Hz 量级。光整流、光电导等方法所需器件简单，利于小型化，但是所产生的 THz 辐射功率往往很小，效率也很低，难以满足更多的应用领域。以超短脉冲激光为基础的非线性光学差频方法介于两者之间，综合了小型化和高功率的优点，是一种极具潜力的 THz 产生方法。其中皮秒量级的 THz 辐射具有较高的时间分辨率，结合其较高的重复频率，可以得到平均功率更高的 THz 辐射，能够满足更多的应用需求。我们采用自行研制的高能量皮秒激光放大系统为驱动光源，与天津大学太赫兹实验组合作开展了高功率皮秒 THz 产生的实验研究，并成功获得了脉冲宽度为数十皮秒量级、重复频率为 1 kHz、平均功率较高的 THz 辐射，实验中取得了较好的结果，相关实验结果与数据目前还与合作单位进行处理中。本小节仅主要从光路设计与光源参数上进行介绍，以及简要展示其中的部分实验结果。

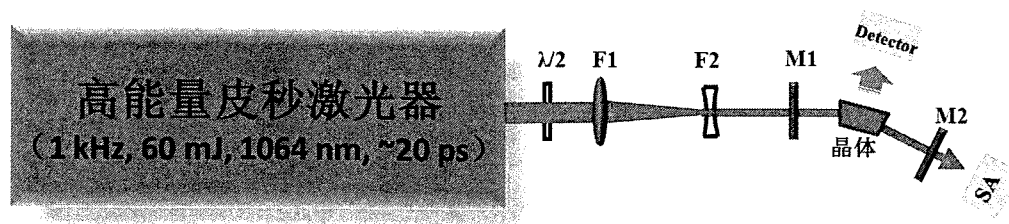


图 4.16 皮秒激光泵浦 THz 产生实验光路图。其中 Detector 为热电探测器；SA 为光谱分析仪

如图 4.16 为实验中基于高能量皮秒激光放大器所搭建的 THz 产生系统光路设计图, 整个系统可以分为四个部分: 高能量皮秒激光光源、光束缩束准直部分、非线性差频 THz 产生部分以及测量部分。其中高能量皮秒激光光源重复频率为 1 kHz、中心波长为 1064 nm、最大输出单脉冲能量可达 60 mJ (实验中使用最大能量约为 20 mJ)。从皮秒激光放大器中输出的皮秒脉冲首先透过一片二分之一波片对其偏振状态进行优化, 然后通过由一片焦距为 300 mm 的平凸透镜和一片焦距为 -100 mm 的平凹透镜组成的缩束准直系统, 将输出激光进行缩束准直, 以提高非线性部分的转换效率。为了初步验证非线性的效率, 我们在注入非线性部分前预先插入一块二倍频用的 LBO 晶体, 通过倍频效率来初步评估基频激光的非线性效应强度, 优化调节基频激光参数使其保持较好的倍频效率。最后将缩束准直后的放大激光注入非线性部分, 该部分由两片对 1064 nm 泵浦光高透, 对 1070 nm 附近信号光高反的腔镜 M1 和 M2 以及一块非线性晶体组成。在 M2 后采用一台商用的光谱测量仪对泵浦光和信号光光谱进行测量, 以推算 THz 产生的波长; 在垂直于晶体反射点处采用一台商用的热电测量仪对 THz 的功率进行测量。

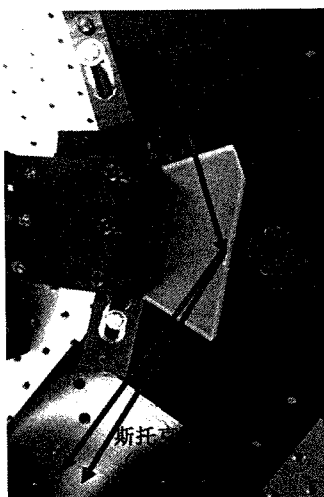


图 4.17 皮秒激光泵浦 THz 产生实验中非线性晶体实物图

实验中所用的非线性晶体如图 4.17 所示, 为一块尺寸较大的 MgO 掺杂的铌酸锂 (LN) 晶体, 该晶体沿着相位匹配角以及太赫兹辐射敏感区切割。波长为 1064 nm 的泵浦激光垂直于晶体的前表面入射, 经过晶体侧面的反射点全反射而透过晶体的后表面垂直出射。泵浦光在非线性晶体中由于较强的峰值功率而引起的拉曼效应, 首先产生波长为 1070 nm 附近的斯托克斯光作为信号光, 所产生的

信号光与泵浦光具有一个很小的角度，同时在腔内振荡增强。在这过程中，1064 nm 波长附近的泵浦光和 1070 nm 附近的信号光在全反射点处进行差频，从而产生 THz 辐射，垂直于全反射面输出。实验中所产生的 THz 辐射脉冲宽度与泵浦光相当，为数十皮秒，重复频率同样为 1 kHz，我们通过热电测试仪收集 THz 辐射进而对其强度进行测量，同时在示波器上测得其脉冲序列如图 4.18 所示，从示波器中可以得到 THz 辐射的重复频率以及强度信息：重复频率为 1 kHz，波形序列的幅值高达 6 V 以上（此时泵浦激光能量约为 20 mJ），相比于此前实验中所产生的 THz 辐射要强得多，平均功率有望突破 mW 量级。目前相关数据转换还在处理当中。

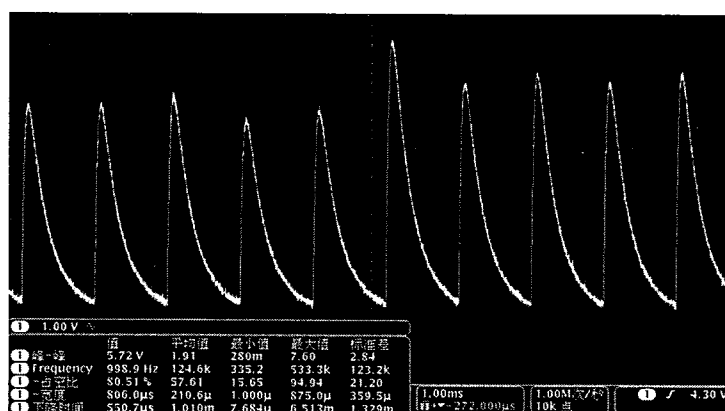


图 4.18 热电探测器检测到的 THz 辐射序列图

为了实现 THz 辐射波长的调谐，我们通过改变泵浦光相对于非线性晶体的入射角度来实现，通过匹配角的改变引起所产生的斯托克斯光波长的移动，进而调谐 THz 辐射的频率。由于目前测量仪器中未能直接对 THz 波长进行测量，我们根据泵浦光和斯托克斯光的波长，如图 4.19 所示，间接推算 THz 辐射的频率。

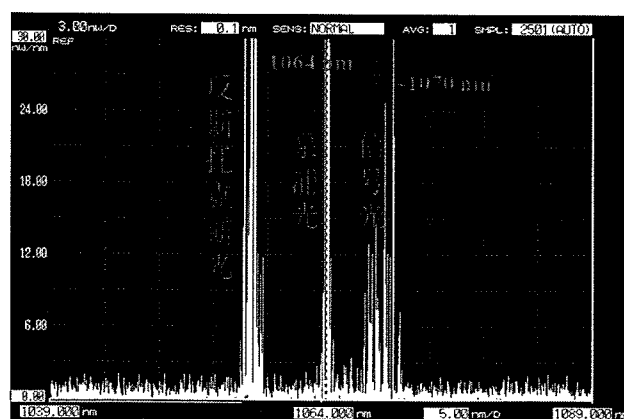


图 4.19 泵浦光与信号光（斯托克斯光）波长测试结果图

4.4 本章总结与展望

本章开展了全固态皮秒激光相关的应用研究。采用高功率的皮秒绿光激光作为泵浦源同步泵浦钛宝石激光器，成功获得自启动且稳定的锁模脉冲激光，脉冲宽度为 46 fs，为国产化的飞秒激光设备提供了实验基础；基于高重复频率的皮秒激光放大器，与激光打标机进行连接，建立了皮秒激光加工与打标系统，与外单位合作进行了人类牙齿切片、白宝石、石英片、高分子材料以及碳纤维材料等激光加工实验探究，得到了不错的效果；利用高能量的皮秒激光放大器作为驱动光源，泵浦非线性晶体进行差频 THz 产生的实验研究，初步获得了重复频率为 1 kHz、脉冲宽度为数十皮秒、平均功率有望突破 mW 量级的皮秒 THz 辐射，目前相关实验数据还在处理与分析中。本章所介绍工作相关的文章和专利正在撰写中。

第五章 全固态皮秒激光设备化研究

5.1 全固态皮秒激光设备化研究的意义

自从第一台激光器被成功研制以来,激光就被广泛应用于各个领域,对社会和科技的发展起到非常重要的推动作用。多年来,随着激光技术的日趋成熟和发展,越来越多的新的应用被发掘,激光已经“无处不在”。在科学研究领域,各类激光作为一种驱动源发挥着重大作用;在工业加工领域,激光作为一把锋利的工具革新了一代又一代技术;在生物和医疗领域,激光眼科手术、激光微创手术、激光医疗器件制造等,给人类健康带来了福音;还有军事、国防、天文等领域,都可以看到激光的“身影”。超短脉冲激光的发展和出现,将激光技术推向了一个新的高度。超短脉冲激光以其高峰值功率、超短脉冲宽度的特点,可以在传统激光无法触及的领域大展拳脚,在已经得到应用的领域可以做得更好更优秀。近几年来,超短脉冲激光器是全球激光产业中的一颗新星,每年的发展速度独占鳌头,一直为人们所青睐。全固态皮秒激光系统具有结构紧凑、成本低、稳定性好等特点,已经在许多领域得到了应用。例如高单脉冲能量的皮秒激光是科学研究中 OPCAP、OPA、OPG 等过程的泵浦源,同时也是自由电子激光器和天文望远镜中的优良光源;高重复频率的皮秒激光在工业加工领域广泛应用,占据着很大的市场份额。

各类全固态皮秒激光器的技术研发和产品研制一直是国内外激光公司的重点发展方向,目前市场上大多数的全固态皮秒激光产品主要来源于如美国 PHOTONICS 公司、德国 ALPHALASINC 公司、奥地利 HighQ LASER(已被 Newport 公司收购)、立陶宛 EKSPLA 公司、德国 TRUMPE 公司等几家国际公司,占据着市场主要的份额。国内很早就开展了全固态皮秒激光的研究,科研单位如中科院理化所、中科院物理所、光电技术研究院等,注重产品研制的公司如国科激光、盐城物科光电、大恒光电、华日激光等,也逐步推出了自主研发的相关产品。本人所在的研究组一直以来就致力于全固态皮秒激光的研究,特别是近年来在国家重大科学仪器设备开发专项的大力支持下,在我们已经积累的研究基础上成功研制了多种皮秒激光器,并且与相关合作单位开展了多种应用研究,如皮秒激光太赫兹产生、皮秒激光同步泵浦钛宝石激光器、皮秒激光微加工、皮秒激光

成像等前沿应用。旨在研制性能优良的国产化的全固态皮秒激光设备，为我国激光仪器设备的发展贡献力量。为了达到该目标，激光器的稳定性、可靠性与操作性等特别重要，这就需要激光器设备化的相关研究，是激光器产品研制的关键一环。本章将具体介绍我们在全固态皮秒激光设备化研究的工作，包括皮秒激光放大系统实验样机的设计与搭建、激光器模块化设计与相关设备研制等。

5.2 全固态皮秒激光放大器实验样机搭建

第三章中我们详细介绍了在实验上分别成功获得的高能量和高重复频率全固态皮秒放大激光，以重复频率为 1 kHz 的激光放大系统为例，其技术路线为：首先搭建一套基于 Nd:YVO₄ 晶体的皮秒振荡器作为种子源；从振荡器输出的 80 MHz、能量在 nJ 量级的种子光先经过一个由普克尔盒、隔离器、薄膜偏振片组成的脉冲预选单系统，得到重复频率为 1 kHz、能量同样为 nJ 量级的皮秒种子光；然后将预选单后的皮秒种子光注入一个基于 Nd:YVO₄ 晶体的再生放大器中，放大后得到能量为 1.5 mJ、重复频率为 1 kHz 的皮秒预放大激光；预放大的皮秒激光进而再经过一个端面泵浦的多级单程功率放大器，将激光能量放大为 34 mJ 以上；最后再经过一级侧面泵浦放大将能量进一步提升为 60 mJ 以上，经过倍频后得到近 30 mJ 的 532 nm 皮秒绿光输出。对该系统，我们进行了工程化的设计和改造：

- 1、将端面泵浦部分通过重新设计，安装在一个 1.2 m 长 0.8 m 宽的独立光学平板上，其中包括皮秒振荡器、脉冲预选单、皮秒再生放大器和皮秒多级单程功率放大器四个部分，光路设计如图 5.1 所示。

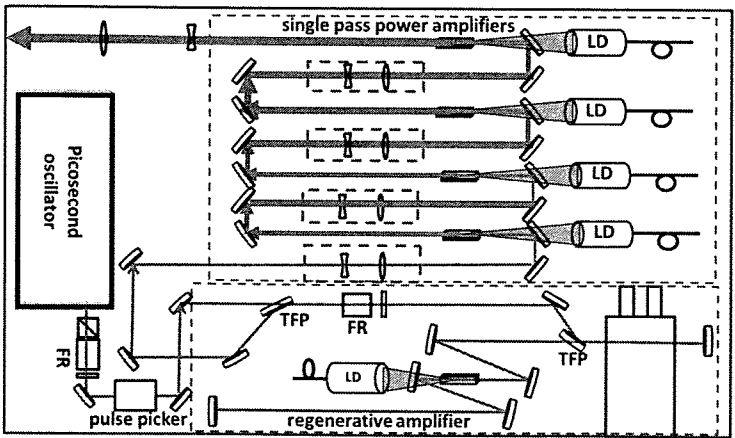


图 5.1 工程化的皮秒激光放大器光路设计图

- 2、将系统中泵浦激光以及普克尔盒等相关仪器的电源统计设计为规格一致的外壳，置于一个外置的机箱中；机箱半部分放置泵浦激光、普克尔盒、同步延时器等电源，下半部分放置水冷设备水箱和控制器，统一控制和检测激光放大系统的工作状态。
- 3、将光路系统中的泵浦端光纤尾纤、制冷用水管以及电路线等分别通过一条波纹管连接到放置电源和水冷的机箱中。

整个系统的工程机械设计图如图 5.2 所示，实际安装后实物图如图 5.3 和 5.4 所示，从该系统中输出重复频率为 1 kHz、单脉冲能量近 40 mJ、波长为 1064 nm 的皮秒放大激光。根据用户以及实际应用需求，可将从该端面泵浦系统中输出的激光注入侧面泵浦放大部分，进一步得到更高能量的激光脉冲。

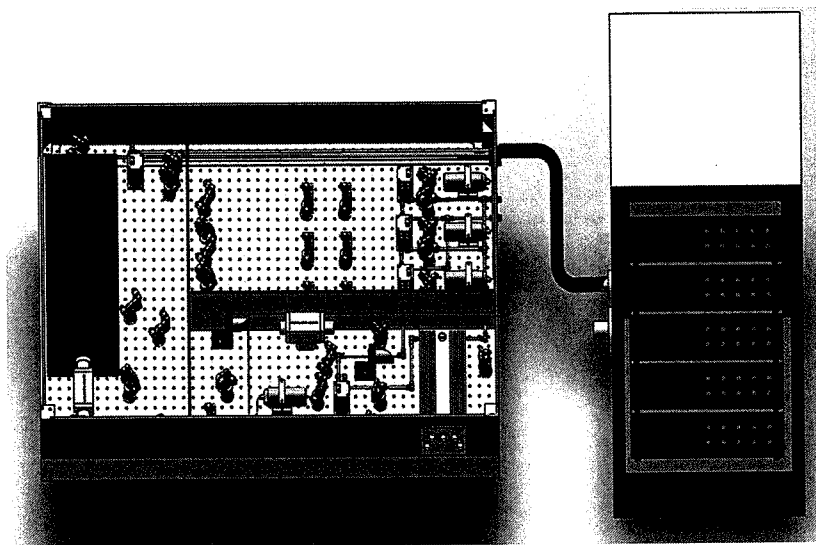


图 5.2 工程化的皮秒激光放大器及其控制系统机械设计图

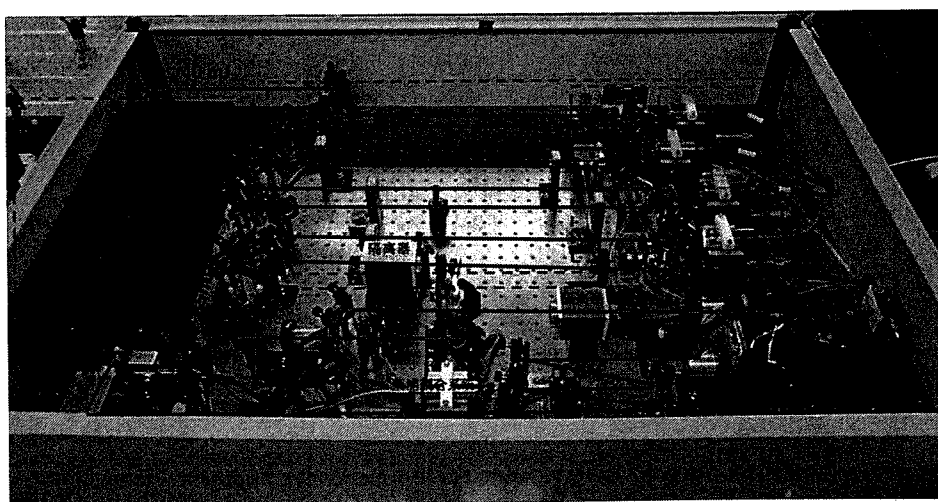


图 5.3 工程化改造的端面泵浦皮秒激光放大器内部实物图

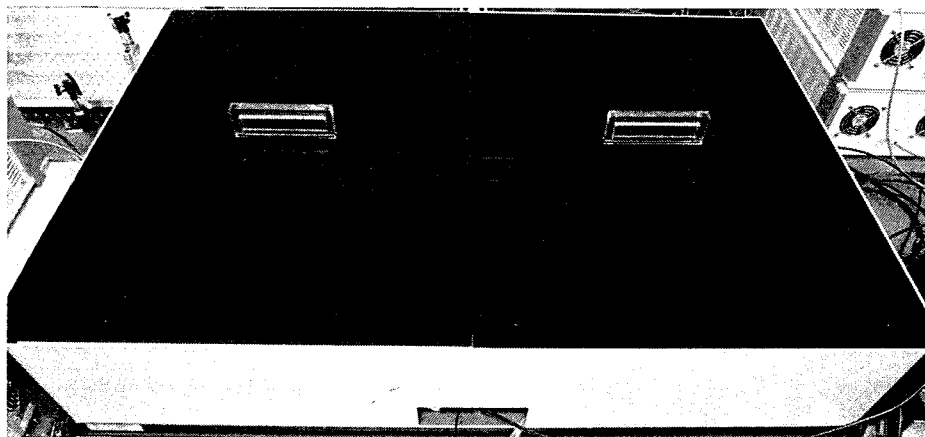


图 5.4 工程化改造的端面泵浦皮秒激光放大器外部实物图

5.3 全固态皮秒激光器模块化设计与设备研制

为了进一步提高激光器的产品化程度以及稳定性,同时丰富产品参数的多样性和灵活性,我们对皮秒放大系统中的各个单元分别进行了模块化设计与相关设备研制,其中所研制的典型产品包括:皮秒振荡器种子源,中小功率皮秒绿光激光器,皮秒再生放大器,皮秒功率放大器以及高功率皮秒绿光激光器等激光设备。在这些模块化的激光设备基础上,根据不同应用的需求选择不同的模块进行有效组合,提供参数灵活多样的全固态皮秒激光产品。本节将分别对各个典型的模块化皮秒激光设备进行介绍。

5.3.1 皮秒振荡器

针对不同的具体用途,我们设计了两种不同参数和规格的全固态皮秒振荡器设备。除了光路设计上更为紧凑外,主要在机械设计与电路辅助系统上进行设备化改造。在机械设计上:

- 1、激光器内部元件采用不可调节固定件和可调节镜架相结合的方式,尽量减少光路中可调节的部分,最大程度上减少由于调节部件的微小变形而引起的不稳定性;
- 2、对于设备外壳,采取瘦长型的结构设计、降低激光距离底板的高度以及元件的设置更加紧凑以减小体积,降低由于光路空间的漂移或者空气的膨胀等因素所引起的影响;
- 3、外壳、底板所用材料采用热处理后金属,避免由于温度的变化所带来的形变。

在电路辅助系统上,主要考虑用户的可操作性以及简便性,一方面在激光器内部安装实时监测激光锁模序列的信号采集器,用户可以通过外部接线随时监测激光器的工作状态;另一方面将激光器中所有电源设备及其控制器集成在电源机箱和显示面板中,简化用户的操作,向一键式开关的目标推进。以下将具体介绍我们所研制的两款典型的皮秒振荡器设备。

第一款是低功率的小型化全固态皮秒振荡器,该设备主要面向如实验室内探测、放大器种子源、便携式超快光源等低功率的应用。其优点是体积小、成本低、稳定性高以及便于携带,所设计的产品输出参数如下

- 1、重复频率: 80~150 MHz
- 2、脉冲宽度: 10 ps
- 3、平均功率: >300 mW
- 4、中心波长: 1064 nm

根据目标参数,我们所设计的小型化全固态皮秒振荡器光路图和实物图如图 5.5 所示,光路设计中相关元件参数在本论文第三章中已经进行了详细阐述。该设备具有无额外冷却设备、启动简易、随时监测等特点。得益于激光参数的优化设计,晶体中所产生的热量较少,在常温下自然冷却即可稳定工作,省去了额外冷却设备的成本以及由于温度变化而引起的抖动;用户启动与关闭激光器时,只需要开关电源以及控制出光按钮等简单操作就可以随时启用与关闭设备,无需进行提前预热等;激光器的工作状态可以通过其信号输出端口从示波器上直接进行检测。如图 5.6 为该类型设备的外形图,整体尺寸为 300 mm(长)x130 mm(宽)x90 mm(高),便于随时进行携带和移动。

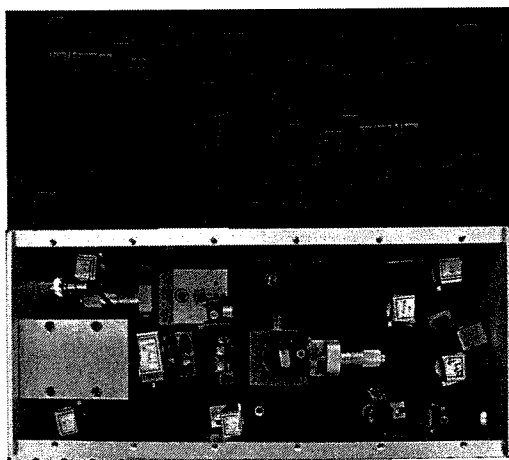


图 5.5 小型化全固态皮秒振荡器光路图和实物图

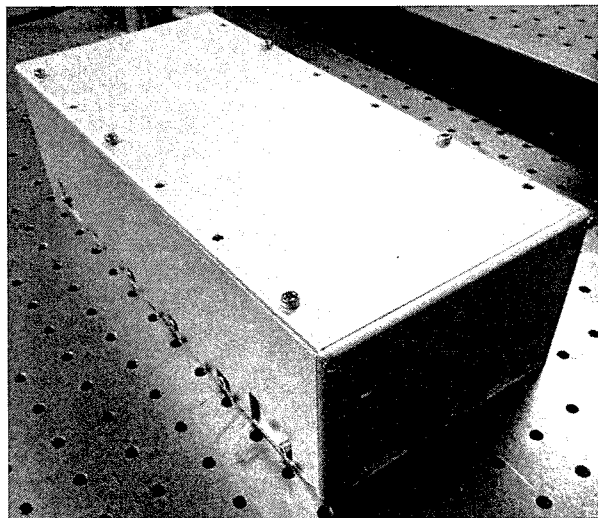


图 5.6 小型化全固态皮秒振荡器外形图

该激光器激光增益介质采用 Nd:YVO₄ 晶体，谐振腔的总长度为 1.89 m，对应的重复频率为 80 MHz，具体腔长可以根据需求进行调节，重复频率调节范围为 80 MHz 到 150 MHz。我们对激光器输出参数进行了测量，其输出功率最大为 420 mW，中心波长为 1064 nm。其输出激光脉冲序列和强度自相关曲线如图 5.7 所示，对所测得的强度自相关曲线进行双曲正割曲线拟合后，得到脉冲宽度约为 10 ps。我们将该低功率的皮秒振荡器作为皮秒放大激光的种子源，相比与此前的种子激光体积更小、操作更为简便以及稳定性更高，为皮秒激光放大设备的研制奠定了基础。

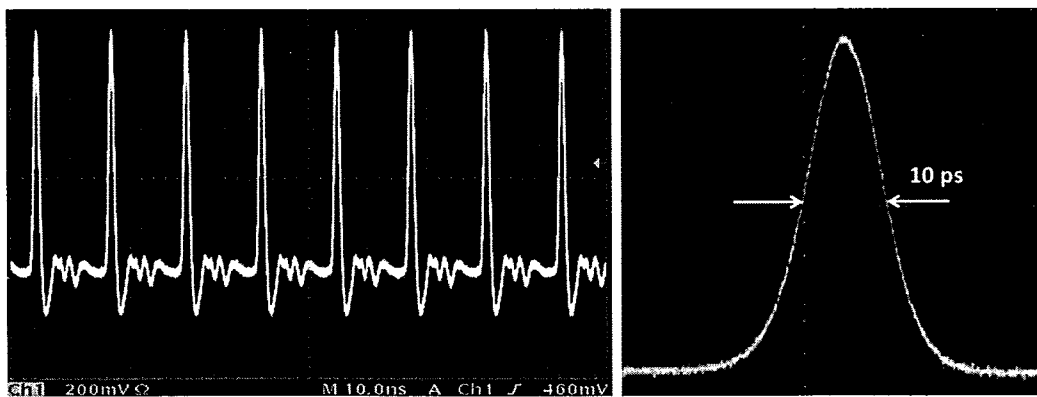


图 5.7 小型化全固态皮秒振荡器输出激光脉冲序列和强度自相关曲线

第二款典型的设备为高效率的全固态皮秒绿光激光器，该设备主要面向激光测距与测量、皮秒激光成像等中低功率的绿光激光应用领域。其优点是结构紧凑、效率高、参数灵活等，对于这类激光设备我们根据中国计量科学院声学研究所科

研团队的需求进行了研发,成功研制了一款中低功率的高效全固态皮秒绿光激光器设备,其光路设计图如图 5.8 所示。

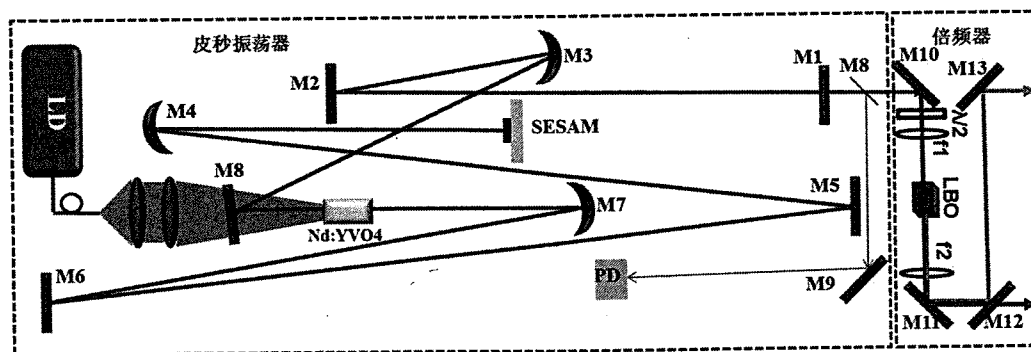


图 5.8 高效率的全固态皮秒绿光激光器光路设计图

系统主要由两个部分组成：皮秒激光振荡器和倍频器。皮秒激光振荡器部分与此前所介绍的振荡器光路类似，所用的泵浦源为激光二极管，激光增益介质同样为 Nd:YVO₄ 晶体，掺杂浓度为 0.5 at%、尺寸为 3x3x5 mm³、沿 a 向切割，晶体通光两端镀有对 808 nm 和 1 μm 附近的增透膜（R<0.2%）。晶体的侧面用铝箔包裹并固定于紫铜热沉上，在高功率泵浦下通过冷却水进行散热。为了提高转换效率，系统中晶体两侧的激光腔镜 M7 和 M3 为平凹高反镜，镀有对波长在 1 μm 附近的高反膜（反射率 R>99.9 %）。通过腔型设计软件进行模拟后得出腔内激光在晶体中的束腰约为 110 μm，瑞利长度约为 30 mm。光纤耦合的泵浦激光芯径为 200 μm，通过一个成像比例为 1 的耦合系统聚焦在晶体中，晶体中泵浦激光的束腰约为 200 μm，比激光在晶体中的束腰稍大，以保证较好的模式匹配。晶体中较大的激光束腰与较长的瑞利长度，有利于提高光光转换效率和降低谐振腔内激光对晶体位置的敏感度，以提高稳定性。锁模方式采用基于 SESAM 的被动锁模，SESAM 作为谐振腔中的一个端镜，激光器中所用的 SESAM 由德国 Batop 公司生产。采用了一片平凹反射镜 M4 将腔内激光聚焦到 SESAM 上，以达到启动锁模所需的功率密度，同时保证其在较高的腔内功率下不至于超过阈值而被损坏。输出镜的耦合率为 10 %，谐振腔总的长度约为 1.89 m，所对应的重复频率约为 80 MHz。M8 为一片平面双色镜，其对着晶体一面镀有对腔内振荡激光的高反膜以及对泵浦激光的高透膜，另一面镀有对泵浦激光的增透膜。为了补偿腔内正色散，M5 和 M6 为两片平面 GTI 镜（每一片引入的群速度色散约为 -1000 fs²）。M2 为一片平面高反镜，镀有对腔内激光高反膜。在 8 W 的 808 nm 激光泵浦下，

所得到的稳定锁模的激光输出平均功率为 1.5 W，如图 5.9 为所测得的锁模激光脉冲的强度自相关曲线和从示波器上所监测到的锁模序列，从中可知锁模激光脉冲的重复频率为 79.4 MHz，脉冲宽度约为 10 ps。

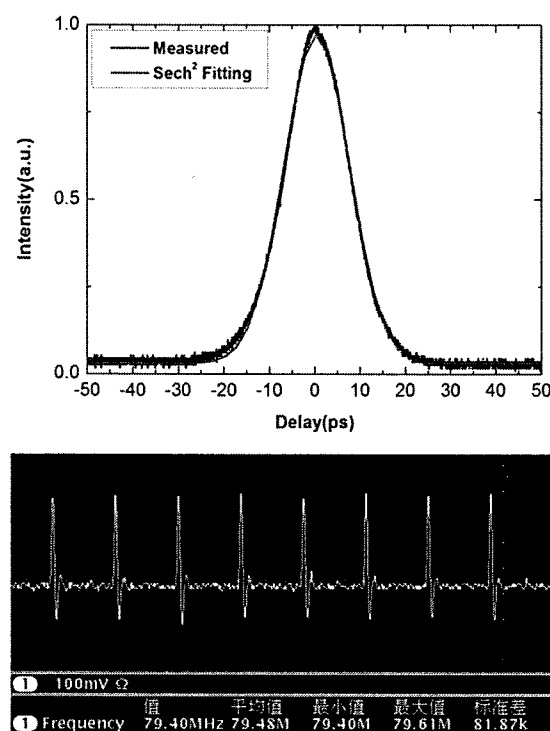


图 5.9 锁模激光脉冲强度自相关曲线和锁模序列

从输出耦合镜输出的中心波长为 1064 nm 的皮秒激光首先通过一片反射率很低的玻璃片 M8，所反射的微弱激光由平面高反镜 M9 反射打在一个光电探头上，以实时监测锁模激光工作状态。透过玻璃片的基频光注入到倍频器中进行频率变换，倍频器中所用的非线性晶体为一块一类匹配的尺寸为 $4 \times 4 \times 10 \text{ mm}^3$ 的 LBO 晶体，工作温度为常温，入射角度为正入射。为了得到较高的二倍频转换效率，基频激光通过一片平凸透镜聚焦到倍频晶体中，倍频后再通过一片同样参数的平凸透镜进行准直。在倍频晶体前插入一片二分之一波片对基频激光的偏振状态进行优化，同时也可以通过偏振状态的改变灵活调节倍频绿光的功率。倍频器中其他镜片参数为：M10 为对基频激光高反的平面反射镜；M11 为对基频激光和倍频激光高反的平面反射镜；M12 为对倍频激光高反而对基频激光高透的平面分光反射镜；M13 为对倍频激光高反的平面反射镜。最终通过 M13 镜片的反射在输出端输出波长为 532 nm 的皮秒绿光激光，其光谱测量结果如图 5.10 所

示, 最大的输出功率在 500 mW 以上, 用户可根据自身应用需求选择性地输出倍频后剩余的基频激光。如图 5.11 为该全固态皮秒绿光激光器的实物图, 目前已经在中国计量科学院运行, 用于对声学波的测量研究。

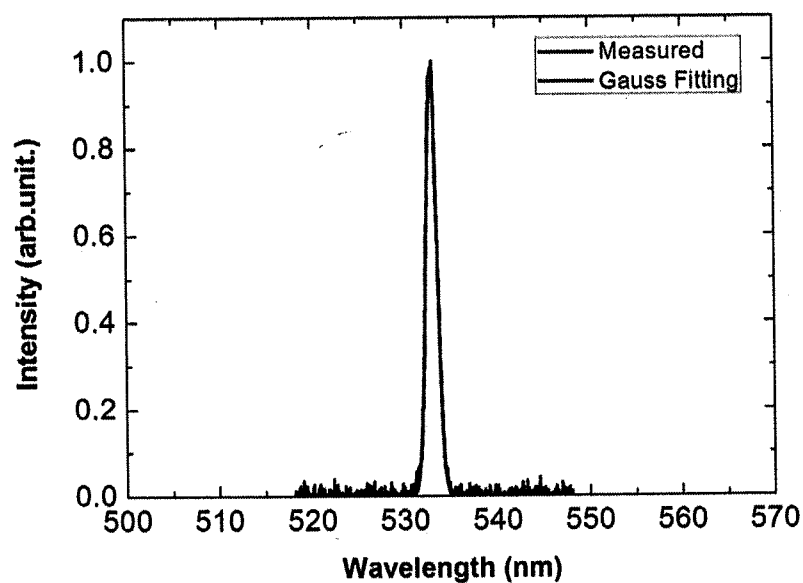


图 5.10 最终输出的皮秒绿光光谱图

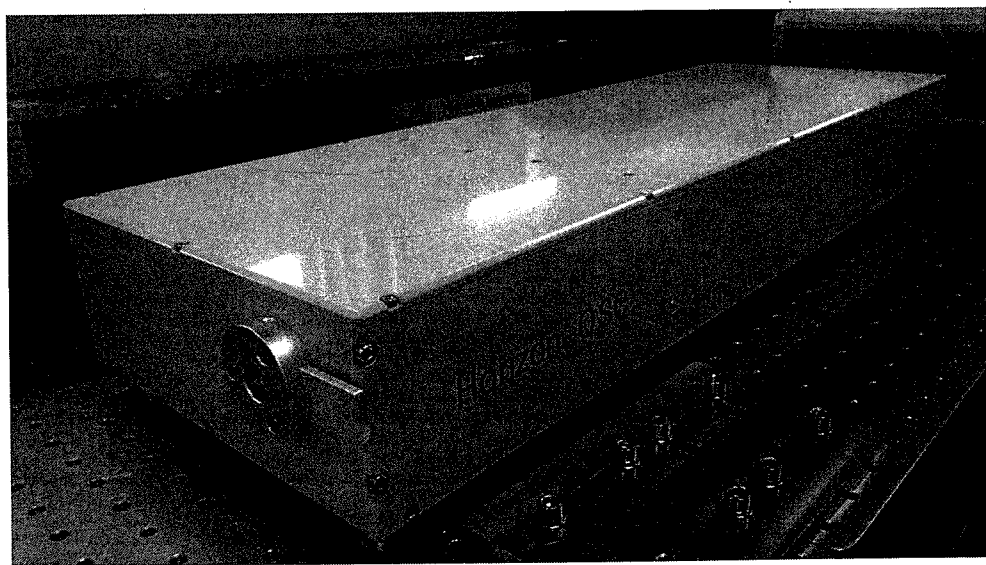


图 5.11 全固态皮秒绿光激光器 (Horizon-OSC) 实物图

5.3.2 皮秒再生放大器

再生放大器是全固态皮秒放大系统中较为核心的部分，其输出参数与稳定性对整个系统的性能起到很重要的影响，我们结合上节所介绍的小型化皮秒种子源以及其中关键部件的成功改造，设计与研制了一个一体化的皮秒再生放大器，与此前搭建的再生放大部分相比，体积更小、稳定性更高、成本更为低廉。

一体化皮秒再生放大器中最为关键的部件为普克尔盒，此前在实验上搭建的再生放大器中最为常用的是 FastPulse 公司生产的整机式的普克尔盒，如图 5.12 所示。该普克尔盒将电光晶体和高压电源整合到一个密封的外壳中，将两者间的高压接线置于机壳中，具有调节方便、安全性高等优点。但是缺点是体积太大，不利于再生放大器的设备化设计与研制，同时该普克尔盒价格较高，更多的是用于实验室中的光路系统。在激光器模块化设计中，我们首要是解决普克尔盒的选择问题，通过实验中多次的尝试和测试，我们成功在再生放大器中使用了国产化的普克尔盒，如图 5.13 和 5.14 所示，该普克尔盒的电光晶体、高压模块以及电源控制系统分别从不同公司进行采购，实现了普克尔盒的国产化。得益于普克尔盒各个部件的灵活性，我们根据一体化再生放大器的设计需求将体积较小的电光晶体放置于光路中，高压电源采用悬挂式设计安装于光路外的侧壁中，电源控制器与系统的其他控制设备整合在一起，较好的克服了普克尔盒体积庞大的缺点，同时很大程度地降低了成本。

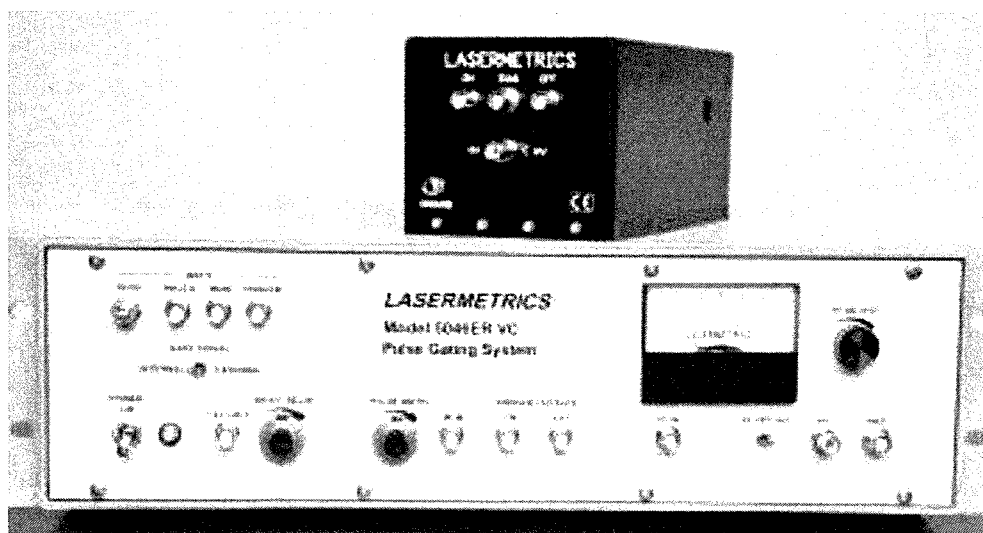


图 5.12 FastPulse 公司商用普克尔盒产品

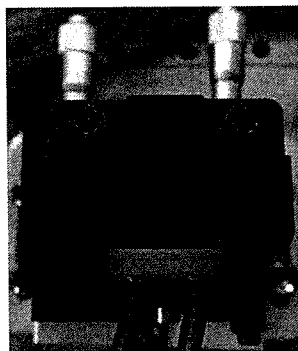


图 5.13 国产化普克尔盒电光晶体及其调整架

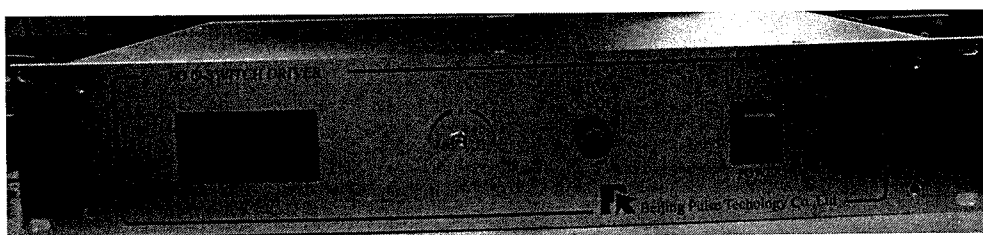


图 5.14 国产化普克尔盒高压电源控制器

一体化再生放大器设计中的另一个主要的亮点为整合了脉冲预选单系统和种子激光注入系统。如第三章中我们所介绍的皮秒再生放大器，一般脉冲预选单系统由一个普克尔盒和响应的偏振器件组成，种子激光注入系统通常由法拉第旋光器、偏振器件以及二分之一波片组成。两者从本质上都是通过改变注入激光的偏振状态来实现选单和注入，如果合理设计与控制普克尔盒的高压时间，就能够在一个系统中同时实现上述两个功能。如图 5.15 为我们所设计的 1 kHz 高能量一体化再生放大器装置图，重复频率为 80 MHz、偏振状态为 p 偏振的皮秒种子激光首先经过两片平行放置的薄膜偏振片反射经过第一个普克尔盒（PC1），普克尔盒加上一个重复频率为 1 kHz 的二分之一波高压，调节高压持续时间与延时使得在该时间内只有一个激光脉冲，该脉冲经过 PC1 后偏振状态旋转 90° 成为 S 偏振，透过偏振片注入到再生放大腔内，这时注入激光的重复频率变为 1 kHz。其他在高压范围外的种子激光经过 PC1 后不改变偏振状态而从薄膜偏振片反射出去，同时实现了脉冲预选单和种子光注入的两种功能。种子光注入再生放大器后进行放大，通过薄膜偏振片投射出的放大激光的偏振状态为 p 偏振，调节 PC1 的高压信号的延时使得此时 PC1 处于零电压的状态，p 偏振的放大激光偏振状态不发生改变，经过从 PC1 后从薄膜偏振片投射而导出。

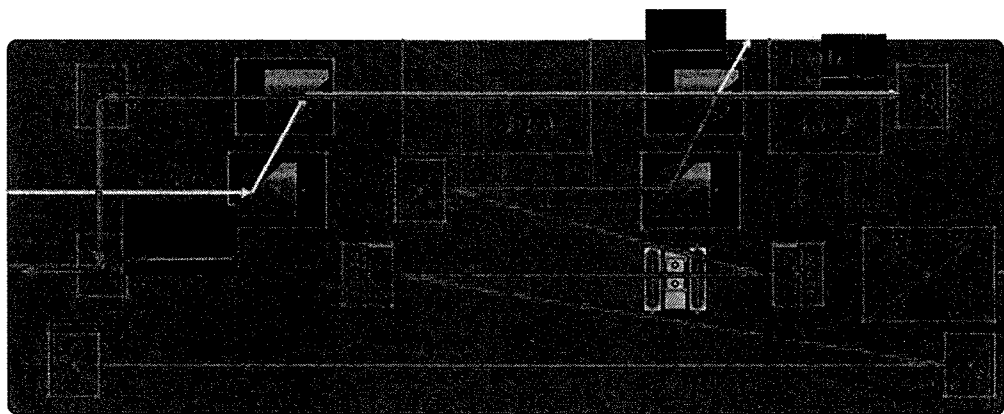


图 5.15 1 kHz 高能量一体化再生放大器装置图

我们对高能量一体化再生放大器的输出参数进行了测量，如第三章 3.2.2 小节所介绍结果，在此就不再重复。如 5.16 为加入小型化皮秒振荡器后所设计的模块化皮秒再生放大器产品的机械设计图和效果图，尺寸为 590 mm（长）x480 mm（宽）x120 mm（高），相比初步的实验样机体积大为缩小，而且国产化普克尔盒的使用很大程度上降低了成本。

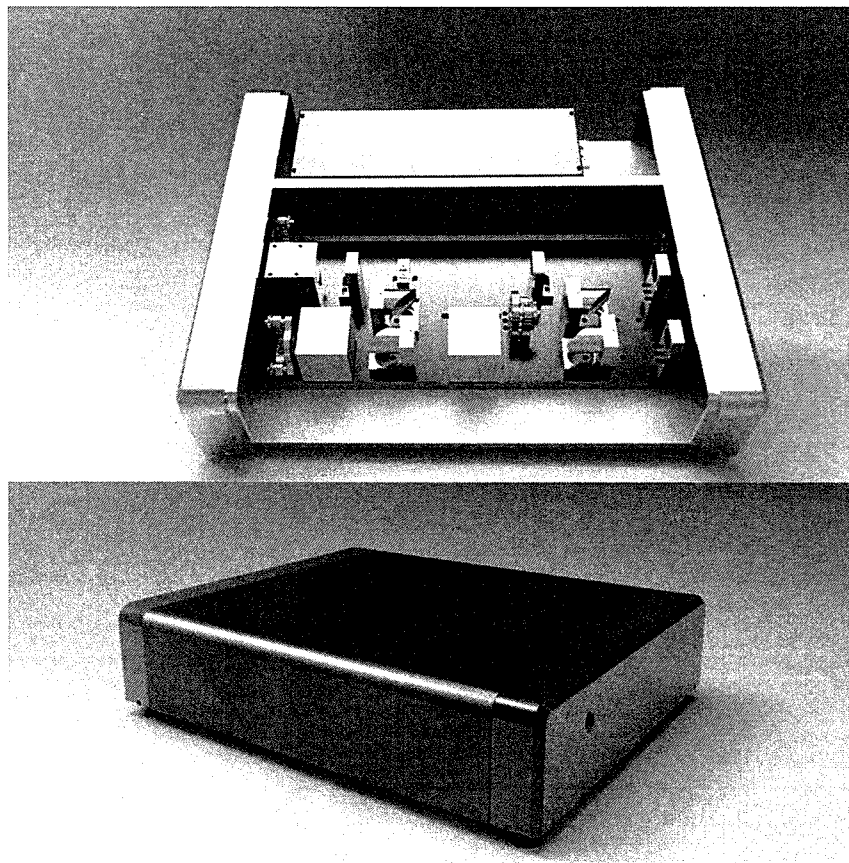


图 5.16 模块化皮秒再生放大器机械设计图和效果图

5.3.3 皮秒多级单通放大器

皮秒多级单通放大器是一款直接的功率放大器,如第三章所介绍,采用激光二极管端面泵浦的方式,由多级单程放大器组成,用于再生预放大后的功率放大。我们将该部分单独进行了设计改造,研制了一款模块化的皮秒多级单通放大器,根据用户的具体应用需求进行选择安装,提高产品的多样性和灵活性。

我们应上海应用物理研究所的具体需求和委托,设计和研制了一款皮秒两级单通功率放大器,将从再生放大器输出的皮秒预放大激光成功进行功率放大,超过了预期的目标参数,已经运行于用户单位,为上海同步辐射光源的相关实验提供激光光源支持。所设计的皮秒两级单通功率放大器的目标参数为:

- 1、前级激光参数: 10 Hz、1047 nm、1.3 mJ、7 ps
- 2、放大后参数需求: 10 Hz、1047 nm、>5 mJ、7 ps

针对以上目标需求,我们设计了一款激光二极管端面泵浦的两级单程放大器,其光路如图 5.17 所示,第一级为预放大,第二级为主放大。在激光增益介质的选择上,我们选择了与需求参数相匹配的 Nd:YLF 晶体,其吸收曲线在波长 792 nm 和 805 nm 处具有最强峰,荧光谱线在 1047 nm 和 1053 nm 附近都有较强的峰,其中最强峰在 1047 nm 处,当晶体为 a 向切割时,最强的振荡波长在 1047 nm 处,与我们目标参数较为切合。此外,Nd:YLF 晶体的吸收系数虽然仅为 Nd:YVO₄ 的三分之一,但是上能级粒子寿命较长,很适合用于激光放大^[152-154]。泵浦源的中心波长为 805 nm 的激光二极管,相比 792 nm 附近的激光二极管更为成熟、成本更低。最终泵浦激光选择光纤耦合的半导体激光器,泵浦激光耦合光纤的芯径为 400 μm ,工作频率为 10 Hz,两级泵浦激光在占空比为 10 %~20 %下一共可以提供的泵浦能量为 30 mJ~45 mJ。泵浦激光通过一个成像倍率为 2 的耦合系统聚焦在晶体中,晶体中泵浦光的束腰约为 800 μm 。从前级放大器注入的 10 Hz、1047 nm、1.3 mJ 的皮秒激光首先经过一个二分之一波片优化激光的偏振状态,以匹配晶体的偏振吸收特性。然后通过一个平凸透镜 S1 聚焦在第一级激光晶体中,保证合适的功率密度以提高放大效率。第一级放大激光接着再通过一个平凸透镜 S2 进行准直后再注入第二级放大,放大过程与第一级一样。放大器中 M2、M6 为平面双色镜,对着晶体一面镀有对放大激光高反膜以及泵浦激光高透膜,另一面镀有泵浦激光高透膜;其他镜片皆为对放大激光高反的平面镜。

在泵浦激光电源以及同步延时控制系统方面，我们设计了一个一体化的控制器，将光路外的控制部分安装在机箱中，通过面板按钮对激光放大器进行开关控制。在冷却方面，由于放大器工作的重复频率较低，晶体中所产生的热量很少，几乎可以忽略其影响，因此光路系统中并没有设置额外冷却。如图 5.18 为最终所研制的皮秒两级单程功率放大器产品实物图，由光路与控制器两部分组成。

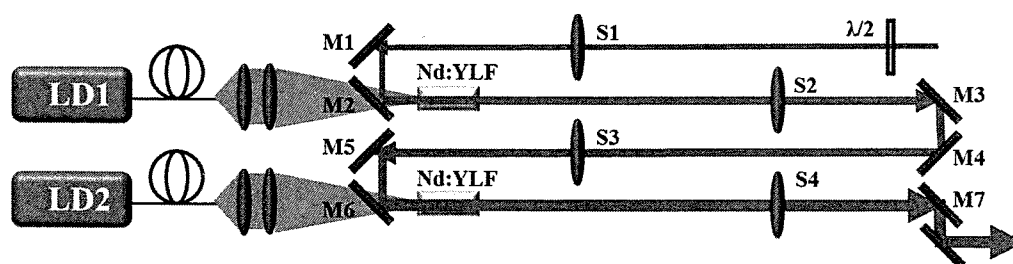


图 5.17 激光二极管端面泵浦的皮秒两级单程放大器光路图

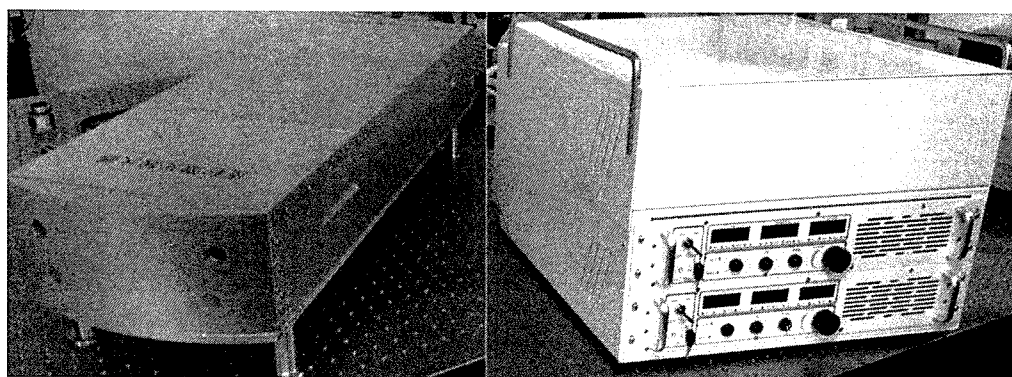


图 5.18 激光二极管端面泵浦的皮秒两级单程放大器实物图：左边为光路部分，右边为控制器部分

在两级总共约 40 mJ 泵浦能量下，放大后最大输出能量为 12 mJ，对应的光光转换效率约为 27 %，远超了客户要求的输出指标。结合应用需求的功率以及激光放大系统的安全性，我们降低了泵浦激光能量，将最终的输出能量定为约 9 mJ、重复频率为 10 Hz、中心波长为 1047 nm、脉冲宽度为 7 ps。如图 5.19 和 5.20 分别为放大器在用户现场运行时输出的能量随着两级泵浦电流的变化曲线以及实物图，用于激光四倍频前对基频激光的能量放大。

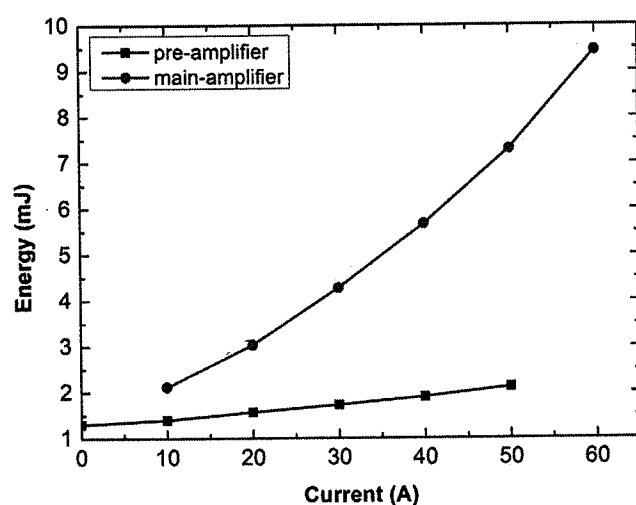


图 5.19 在用户现场运行时输出的能量随泵浦电流变化曲线

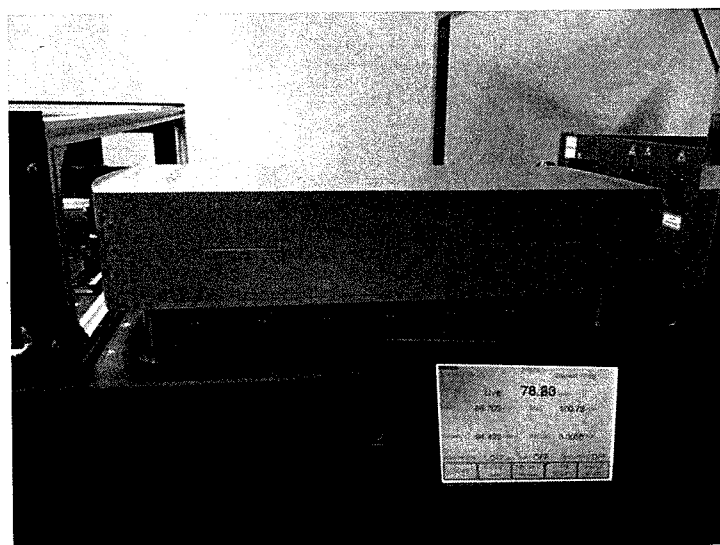


图 5.20 皮秒功率放大器现场运行图

5.3.4 用于同步泵浦钛宝石飞秒激光器的高功率皮秒激光

上一章中我们介绍了高功率皮秒绿光激光同步泵浦钛宝石飞秒激光器, 为了满足该系统的泵浦光需求以及高功率皮秒绿光激光的其他应用, 我们综合高功率皮秒振荡器、皮秒功率放大器以及倍频器等技术与设计, 研制了一套高功率皮秒绿光激光器产品。作为一款可以满足高功率泵浦需求的激光设备, 我们设计了如下目标参数:

- 1、重复频率：80 MHz
- 2、中心波长：532 nm（可选择同时输出 1064 nm 基频激光）
- 3、输出功率：>5 W@532 nm
- 4、脉冲宽度：10 ps/15 ps

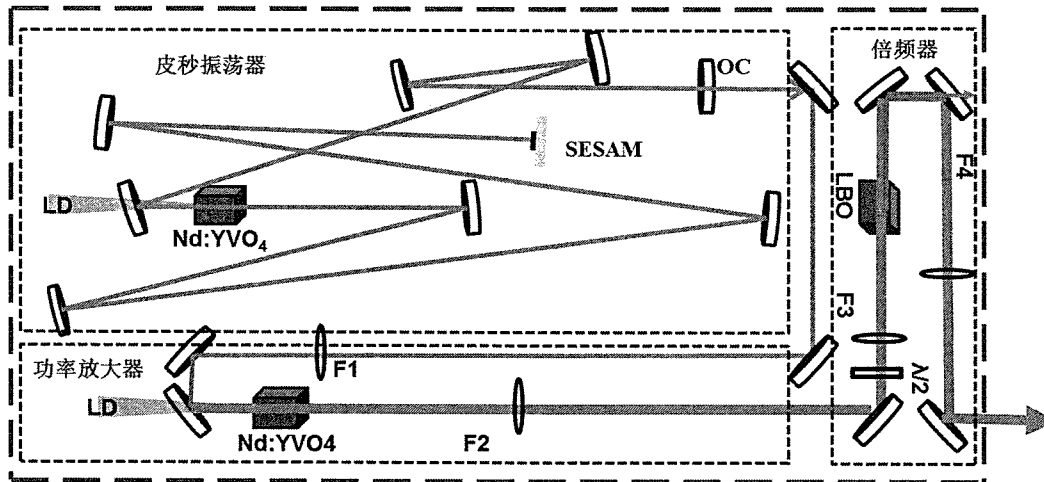


图 5.21 高功率皮秒绿光激光器光路设计图

如图 5.21 为该高功率全固态皮秒绿光激光器的光路设计图，整个系统由皮秒振荡器、功率放大器以及倍频器三部分组成。皮秒振荡器为 5.3.1 节所介绍的高效率皮秒振荡器，泵浦源为一个光纤耦合输出的激光二极管，最大输出连续泵浦光功率为 15 W，光纤芯径为 200 μm ，波长为 808 nm，通过一个成像比例为 1 的耦合系统聚焦在激光增益介质 Nd:YVO₄ 晶体中，锁模方式同样为 SESAM 被动锁模。皮秒振荡器最大输出锁模激光功率大于 2 W，通过一片 10 %耦合率的输出镜输出，中心波长为 1064 nm，重复频率约为 80 MHz。从振荡器输出的基频激光然后注入一个全固态功率放大器中，由于基频激光的重复频率较高，在直接放大过程中效率也相对较高，根据我们的目标参数选择了一级单程放大。泵浦激光最大输出功率为 30 W，通过一个成像比例为 2 的耦合系统聚焦在激光晶体中，放大级晶体为一块 Nd:YVO₄ 晶体。为了提高能量萃取效率，被放大激光首先通过一个平凸透镜聚焦到晶体中，放大后激光再通过一个平凸透镜扩束和准直后最后注入到倍频器中。经过功率放大器后，基频激光的平均功率被进一步放大到 12 W 以上，重复频率维持不变为 80 MHz。倍频器结构如 5.3.1 节介绍，其中晶体同样为一块一类匹配的 LBO 晶体，由于基频激光功率较强，因此倍频激光

中的激光束腰不适宜太小，我们选择了一块平凸透镜进行聚焦以及准直，最终倍频后皮秒绿光激光平均功率大于 5 W，波长为 532 nm，重复频率为 80 MHz，达到了我们所设计的目标。

在冷却系统设计上，我们采用了串联式的冷却方式。两个泵浦用的激光二极管和激光晶体分别置于紫铜热沉上，共用一台水冷设备通冷却水进行散热，温度控制在 18 ℃。热沉部分全部置于机壳内部，水冷管道和电源接线隔离后通过机壳与外部电源控制器连接，接口可即插即用。一方面避免了耦合光纤暴露在外容易折损，另一方面提高了安全性和搬运的灵活性。电源控制系统与水冷设备内部隔离分层后集成在统一设计的控制器中，通过面板控制激光工作状态。如图 5.22 和 5.23 分别为高功率皮秒绿光激光器内部机械设计图和实物效果图。

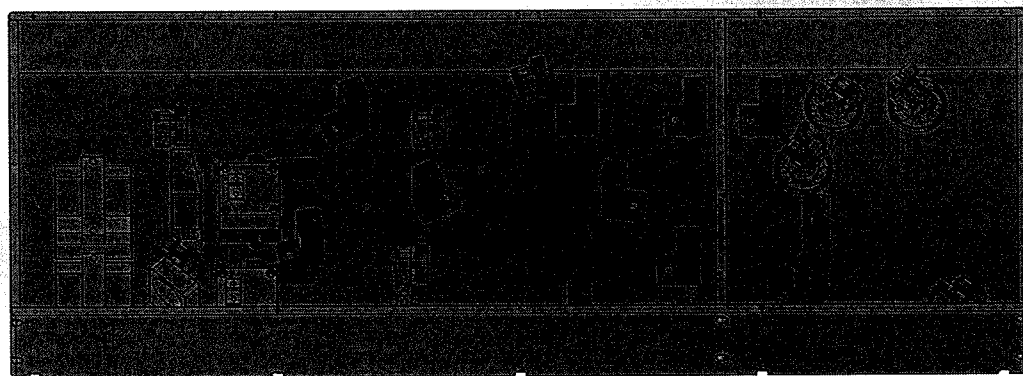


图 5.22 高功率皮秒绿光激光器内部机械设计图

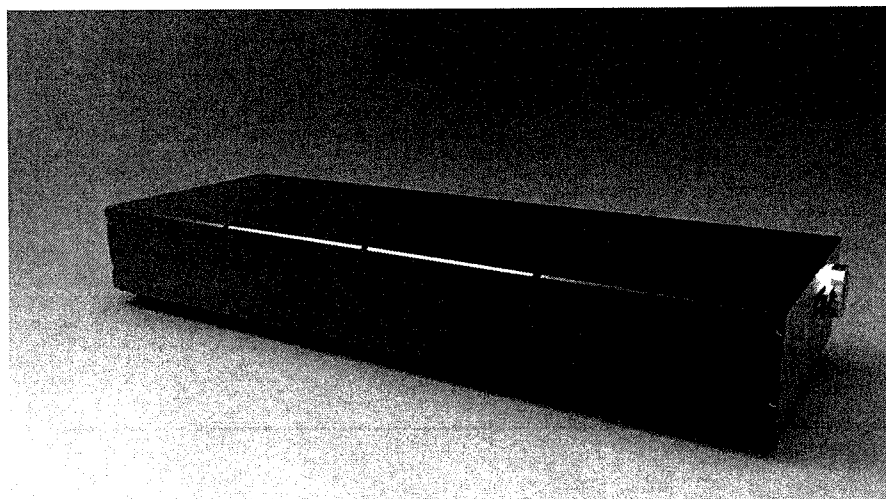


图 5.23 高功率皮秒绿光激光器实物效果图

5.4 本章总结与展望

本章开展了全固态皮秒激光器设备化的研究,成功设计和研制了高能量全固态皮秒激光放大器实验样机以及模块化的皮秒振荡器、再生放大器、功率放大器等相关激光设备,各类激光器已经运行于上海同步辐射源、中国计量科学院等单位,进行相关的应用研究。

第六章 总结与展望

新型全固态超短脉冲激光振荡器及其放大器的研究是激光领域内具有创新性和发展前景的重要课题之一。本论文围绕该方向为主题,进行了一系列实验研究工作。主要包括激光二极管泵浦的新型钕离子掺杂无序晶体激光器研究、全固态高功率超短脉冲激光放大器的研究、全固态皮秒激光器相关应用研究以及全固态皮秒激光可靠性和设备化研究等。本论文的工作开始于 2012 年 7 月,至 2016 年 5 月结束,现对论文中所开展的主要工作进行总结。同时由于时间有限,工作当中仍存在不足以及还有许多可进一步发展和挖掘的地方。本论文的主要研究内容和创新性总结如下方面:

1、开展了钕离子掺杂无序晶体的激光特性、超短脉冲激光运转以及自倍频特性等实验研究。实验中分别研究了 Nd:LGS、Nd:CLB、Nd:CGB、Nd:SYB、Nd,Y:CaF₂ 等无序晶体的连续激光输出以及调谐特性,都首次实现了光谱超过 40 nm 的调谐宽度。其中 Nd:CLB 和 Nd:LGS 两类晶体分别获得了 51.4 nm 和 54.1 nm 的最宽调谐结果。

2、基于综合性能较好的 Nd:LGS 晶体,进行了激光二极管泵浦的飞秒锁模激光实验研究,获得了从 1045.2 nm 到 1105.3 nm 宽达 60.1 nm 的连续调谐激光输出以及脉冲宽度为 381 fs 的锁模激光输出,输出功率为 75 mW。同时在 Nd:LGS 超短脉冲锁模激光器中首次发现了 Nd:LGS 晶体自倍频的特性,并且成功实现了皮秒、飞秒自倍频绿光激光的运转。相关研究结果已分别发表在 *Opt. Express* 22 (22) 26933-26938 (2014), *Chin. Phys. Lett.* 32 (1) 014206 (2015) 杂志上。并申请了国家发明专利《掺钕硅酸镓镧自倍频超短脉冲激光器》(CN201310603654.9)。

3、开展了高能量全固态皮秒激光放大器、高重复频率全固态皮秒激光放大器以及高重复频率全固态飞秒激光放大器的相关研究。基于 Nd 掺杂的 YVO₄ 和 YAG 两种晶体,以及采用连续、准连续以及侧面泵浦的半导体激光泵浦技术,设计了一个组合式的皮秒激光放大系统。在重复频率为 1 kHz 下,获得了单脉冲能量为 64.8 mJ、中心波长在 1064.4 nm、光束质量因子 M 平方小于 2 的皮秒脉冲激光输出,通过二倍频后在中心波长 532 nm 处可得到近 30 mJ 的绿光激光。在重复频率为 100 kHz 下,最终获得了平均功率高达 37.5 W 的重复频率的皮秒

放大激光,对应的单脉冲能量为 375 μJ ,光束质量因子 M^2 保持在 2 以内。此外,在上述研究基础上,结合 Yb 掺杂的激光晶体和双晶体普克尔盒技术,系统调研和设计了一个高重复频率的全固态飞秒放大器方案。相关研究结果已发表在 *Appl. Sci.* 5 1590-1602 (2015) 杂志上。

4、开展了全固态皮秒激光相关的一系列应用研究。采用高功率的皮秒绿光激光作为泵浦源同步泵浦钛宝石激光器,成功获得自启动且稳定的锁模脉冲激光,脉冲宽度为 46 fs,为国产化的飞秒激光设备提供了实验基础;基于高重复频率的皮秒激光放大器,建立了皮秒激光加工与打标系统,与外单位合作进行了人类牙齿切片、白宝石、石英片、高分子材料以及碳纤维材料等激光加工实验探究;以高能量的皮秒激光放大器作为驱动光源,合作进行了差频 THz 产生的实验研究,初步获得了重复频率为 1 kHz、脉冲宽度为数十皮秒、平均功率有望突破 mW 量级的皮秒 THz 辐射,目前该应用实验数据还在处理与分析中。

5、开展了全固态皮秒激光器设备化的研究,成功设计和研制了高能量全固态皮秒激光放大器实验样机以及模块化的皮秒振荡器、再生放大器、功率放大器等相关激光设备,各类激光器已经运行于上海同步辐射源、中国计量科学院等单位,进行相关的应用研究。为超短脉冲激光器的应用研究提供稳定且有效的光源和工具。

由于时间有限,本论文所开展的工作当中仍存在不足,以及还有许多可进一步发展和挖掘的地方,主要有以下方面:

1、Nd:LGS 晶体作为一种性能较好、功能较多的优良晶体,同时也具有较好的非线性,采用克尔透镜的锁模方式,可以获得脉冲宽度更短、输出功率更高的飞秒激光输出。对于其自倍频特性,需要从理论和实验上更深入地分析产生机理。

2、皮秒放大器中对晶体的冷却需要采取更为有效的方法,以更好散去晶体中积累的热量,提高泵浦光功率和放大效率。组合式的放大器中最后一级的侧面泵浦放大器可考虑替换为多级的端面泵浦,以进一步提高放大激光的光束质量。基于双晶体的普克尔盒技术可以有效地将皮秒放大器的重复频率提高到 500 kHz,同时提高放大激光的平均功率,满足更多的应用需求。根据所设计的方案在实验

上实现高重复频率的全固态飞秒激光放大器，再结合功率放大技术，得到高功率的飞秒激光输出。

3、在同步泵浦钛宝石激光器中进行精度更高的色散控制，如插入棱镜对或者尖劈对腔内色散进行微调，优化腔内色散量可以获得更宽的锁模光谱以及脉冲宽度更短的飞秒激光输出。进一步从泵浦激光器到锁模激光器，设计和搭建一体化的同步泵浦钛宝石飞秒激光器设备，完善电路锁定控制系统，得到稳定性更高的同步泵浦飞秒激光器设备。

4、在全固态皮秒激光器设备化研究中，继续研制更多模块化的激光产品，如侧面泵浦放大模块以及倍频器模块等，将各部分已经独立稳定运行的模块化产品有机整合与集成为大型激光系统，满足要求更高的应用领域。同时进一步提升对激光系统中机械部分和电路部分的设计水平，以推进各类激光系统向体积更小、稳定性更高、自动化程度更高、成本更低的目标发展。

参考文献

- [1] A. Einstein, Quantum theory of radiation, *PHYSIKALISCHE ZEITSCHRIFT*, **18** (1917) 121-128.
- [2] W.E.L. Jr., M. Skinner, The Fine Structure of Singly Ionized Helium, *Physical Review Superseded in Part by Phys.rev.a Phys.rev.b Solid State Phys.rev.c & Phys.rev.d*, **78** (1950) 539-550.
- [3] R.C. Tolman, Duration of Molecules in Upper Quantum States, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **23** (1924) 85-87.
- [4] V.A. Fabrikant, The excitation of atoms in a gas discharge, *Dokl. Akad.*, (1939).
- [5] A.L. Schawlow, C.H. Townes, Infrared and Optical Masers, *Physical Review*, **112** (1958) 1940-1949.
- [6] T.H. Maiman, 5-Stimulated Optical Radiation in Ruby *, *Essentials of Lasers*, **187** (1960) 493-494.
- [7] 王庆, 新型全固态激光器及皮秒激光放大的实验研究, *中国科学院大学博士学位论文*, (2013).
- [8] R.N. Hall, G.E. Fenner, J.D. Kingsley, T.J. Soltys, R.O. Carlson, Coherent Light Emission From GaAs Junctions, *Physical Review Letters*, **9** (1962) 366-368.
- [9] R. Newman, Excitation of the Nd³⁺ Fluorescence in CaWO₄ by Recombination Radiation in GaAs, *Journal of Applied Physics*, **34** (1963) 437-437.
- [10] R.J. Keyes, T.M. Quist, INJECTION LUMINESCENT PUMPING OF CaF₂:U³⁺ WITH GaAs DIODE LASERS, *Applied Physics Letters*, **4** (1964) 50-52.
- [11] M. Ross, YAG laser operation by semiconductor laser pumping, *Proceedings of the IEEE*, **56** (1968) 196-197.
- [12] H.P. Weber, T.C. Damen, H.G. Danielmeyer, B.C. Tofield, Nd - ultraphosphate laser, *Applied Physics Letters*, **22** (1973) 534-536.
- [13] J. Stone, ., C.A. Burrus, Neodymium-Doped Fiber Lasers: Room Temperature cw Operation with an Injection Laser Pump, *Applied Optics*, **13** (1974) 1256-1258.
- [14] K. Kubodera, ., K. Otsuka, . Efficient LiNdP(4)O(12) lasers pumped with a laser diode, *Applied Optics*, **18** (1979) 3882-3883.
- [15] M.D. Rotter, C.B. Dane, S. Fochs, K. Lafortune, R. Merrill, B. Yamamoto, Solid-state heat-capacity lasers: Good candidates for the marketplace, *About Us*, (2004).
- [16] P.F. Moulton, The changing technology of solid state lasers, in: *Lasers and Electro-Optics*, 2004.
- [17] T. Kozeki, M. Sakashita, T. Miura, S. Wada, Development of cw-diode pumped amplifier for over 1-kW-average-power solid, in: *Lasers and Electro-Optics*, 2005. (CLEO). Conference on, 2005, pp. 162-164 Vol. 161.
- [18] U.J. Greiner, H.H. Klingenberg, D.R. Walker, C.J. Flood, H.M.V. Driel, Diode-pumped Nd:YAG laser using reflective pump optics, *Applied Physics B Photophysics Laser Chemistry*, **58** (1994) 393-395.

- [19] D. Golla, ., S. Knoke, ., W. Sch?Ne, ., G. Ernst, ., M. Bode, ., A. Tünnermann, ., H. Welling, . 300-W cw diode-laser side-pumped Nd:YAG rod laser, *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1148-1150.
- [20] J.A. Au, D. Kopf, F. Moriergenoud, M. Moser, U. Keller, 60-fs pulses from a diode-pumped Nd:glass laser, *Opt. Lett.*, **22** (1997) 307-309.
- [21] G.P. Malcolm, P.F. Curley, A.I. Ferguson, Additive-pulse mode locking of a diode-pumped Nd:YLF laser, *Opt. Lett.*, **15** (1990) 1303-1305.
- [22] U. Griebner, A. Yoshida, Diode-Pumped Mode-Locked Yb³⁺:YCa₄O(BO₃)₃ Laser Generating 35 fs Pulses, *Advanced Solid*, (2011).
- [23] Y. Zaouter, ., J. Didierjean, ., F. Balembois, ., G. Leclin, Lucas, F. Druon, ., P. Georges, ., J. Petit, ., P. Goldner, ., B. Viana, . 47-fs diode-pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ laser, *Opt. Lett.*, **31** (2006) 119-121.
- [24] C.R.E. Baer, K.N. Christian, S. Clara Jody, H. Oliver Hubert, G. Matthias, P. Rigo, P. Klaus, S. Thomas, H. Günter, K. Ursula, Femtosecond thin-disk laser with 141 W of average power, *Opt. Lett.*, **35** (2010) 2302-2304.
- [25] S. Andreas, R. Simon, S. Günter, Y. Jong Hyuk, C. Won Bae, L. Soonil, R. Fabian, M.C. Pujol, M. Xavier, A. Magdalena, Passive mode locking of Yb:KLuW using a single-walled carbon nanotube saturable absorber, *Opt. Lett.*, **33** (2008) 729-731.
- [26] W.B. Cho, A. Schmidt, J.H. Yim, Y.C. Sun, S. Lee, F. Rotermund, U. Griebner, G. Steinmeyer, V. Petrov, X. Mateos, Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 μ m using a carbon nanotube saturable absorber, *Opt. Express*, **17** (2009) 11007-11012.
- [27] D.J. Ripin, C. Chudoba, ., J.T. Gopinath, J.G. Fujimoto, E.P. Ippen, U. Morgner, ., F.X. K?Rtner, V. Scheuer, ., G. Angelow, ., T. Tschudi, . Generation of 20-fs pulses by a prismless Cr(4+):YAG laser, *Opt. Lett.*, **27** (2002) 61-63.
- [28] L.E. Hargrove, R.L. Fork, M.A. Pollack, Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation. Appl Phys Lett, *Applied Physics Letters*, **5** (1964) 4-5.
- [29] A.J. Demaria, D.A. Stetser, H. Heynau, SELF MODE - LOCKING OF LASERS WITH SATURABLE ABSORBERS, *Applied Physics Letters*, **8** (1966) 174-176.
- [30] E. Ippen, C. Shank, Subpicosecond kilowatt pulses from a mode - locked cw dye laser, *Applied Physics Letters*, **24** (1974) 373-375.
- [31] R.L. Fork, B.I. Greene, C.V. Shank, Generation of Optical Pulses Shorter Than 0.1 Psec by Colliding Pulse Mode-Locking, *Applied Physics Letters*, **38** (1981) 671-672.
- [32] R.L. Fork, C.H. Cruz, P.C. Becker, C.V. Shank, Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compensation, *Opt. Lett.*, **12** (1987) 483-485.
- [33] D.E. Spence, P.N. Kean, W. Sibbett, . 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser, *Opt. Lett.*, **16** (1991) 42-44.
- [34] U. Keller, T.H. Chiu, Resonant passive mode-locked Nd:YLF laser, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **28** (1992) 1710-1721.

- [35] U. Keller, ., T.H. Chiu, J.F. Ferguson, Self-starting femtosecond mode-locked Nd:glass laser that uses intracavity saturable absorbers, *Opt. Lett.*, **18** (1993) 1077-1079.
- [36] C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, U. Keller, Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking, *Journal of the Optical Society of America B*, **16** (1999) 46-53.
- [37] I.D. Jung, F.X. Kärtner, N. Matuschek, ., D.H. Sutter, F. Morier-Genoud, ., G. Zhang, ., U. Keller, ., V. Scheuer, ., M. Tilsch, ., T. Tschudi, . Self-starting 6.5-fs pulses from a Ti:sapphire laser, *Opt. Lett.*, **22** (1997) 1009-1011.
- [38] P. Federico, S.D.D.D. Cafiso, K. Matthias, G. Annalisa, K. Florian, V. Stefano, T. Mauro, A.D.A. Juerg, A. Antonio, Sub-50-fs widely tunable Yb:CaYAlO(4) laser pumped by 400-mW single-mode fiber-coupled laser diode, *Opt. Express*, **23** (2015) 9790-9795.
- [39] L. Krainer, R. Paschotta, S. Lecomte, M. Moser, K.J. Weingarten, U. Keller, Compact Nd:YVO₄ lasers with pulse repetition rates up to 160 GHz, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **38** (2002) 1331 - 1338.
- [40] S.Y. Set, H. Yaguchi, Y. Tanaka, M. Jablonski, Ultrafast fiber pulsed lasers incorporating carbon nanotubes, *IEEE J.sel.top.quantum Electron*, **10** (2004) 137-146.
- [41] H. Zhang, Q. Bao, D. Tang, L. Zhao, K. Loh, Large energy soliton erbium-doped fiber laser with a graphene-polymer composite mode locker, *Applied Physics Letters*, **95** (2009) 141103 - 141103-141103.
- [42] C. Spielmann, ., F. Krausz, ., T. Brabec, ., E. Wintner, ., A.J. Schmidt, Femtosecond pulse generation from a synchronously pumped Ti:sapphire laser, *Opt. Lett.*, **16** (1991) 1180-1182.
- [43] R. Ell, G. Angelow, W. Seitz, M.J. Lederer, H. Heinz, D. Kopf, J.R. Birge, F.X. Kärtner, Quasisynchronous Pumping of Mode-locked Few-cycle Titanium Sapphire Lasers, *Springer*, **13** (2005) 9292-9298.
- [44] R. Ell, ., U. Morgner, ., F.X. Kärtner, J.G. Fujimoto, E.P. Ippen, V. Scheuer, ., G. Angelow, ., T. Tschudi, ., M.J. Lederer, A. Boiko, . Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser, *Opt. Lett.*, **26** (2001) 373-375.
- [45] C. C, F. J G, I. E P, H. H A, M. U, K.r. F X, S. V, A. G, T. T, All-solid-state Cr:forsterite laser generating 14-fs pulses at 1.3 μm , *Digital Video & Hdtv*, **26** (2001) 281-300.
- [46] C. M Natali, C. Huseyin, K. Adnan, S. Alphan, Kerr-lens mode-locked femtosecond Cr(2+):ZnSe laser at 2420 nm, *Opt. Lett.*, **34** (2009) 3056-3058.
- [47] E.W. Gaul, M. Mikael, B. Joel, J. Axel, R. Martin, H. Doug, B. Ted, E. Ramiro, D. Skylar, H. Watson, Demonstration of a 1.1 petawatt laser based on a hybrid optical parametric chirped pulse amplification/mixed Nd:glass amplifier, *Applied Optics*, **49** (2010) 1676-1681.
- [48] S. Jae Hee, L. Seong Ku, Y. Tae Jun, J. Tae Moon, L. Jongmin, 0.1 Hz 1.0 PW Ti:sapphire laser, *Opt. Lett.*, **35** (2010) 3021-3023.
- [49] W. Zhaohua, L. Cheng, S. Zhongwei, Z. Qing, T. Hao, W. Zhiyi, High-contrast 1.16 PW Ti:sapphire laser system combined with a doubled chirped-pulse

- amplification scheme and a femtosecond optical-parametric amplifier, *Opt. Lett.*, **36** (2011) 3194-3196.
- [50] D.C. Brown, J.M. Singley, K. Katie, G. James, V. Victoria, High sustained average power cw and ultrafast Yb:YAG near-diffraction-limited cryogenic solid-state laser, *Opt. Express*, **18** (2010) 24770-24792.
- [51] N. Daniel W E, W. Stefan, M. Jonas, A. Robert K, E. Kjeld S E, High-energy, high-repetition-rate picosecond pulses from a quasi-CW diode-pumped Nd:YAG system, *Opt. Lett.*, **38** (2013) 3021-3023.
- [52] Y. Wang, W. Li, L. Pan, J. Yu, R. Zhang, Optimizing mode-to-pump ratio in end-pumped Nd:GdVO₄ laser at 1342 nm considering the energy-transfer-upconversion, *Laser Physics*, **22** (2012) 1655-1658.
- [53] W. Qing, W. Zhiyi, Z. Yongdong, Z. Zhiguo, Y. Haohai, Z. Huaijin, W. Jiyang, G. Mingwei, G. Chunqing, W. Zhenlin, Tunable continuous-wave laser at quasi-three-level with a disordered Nd:LGS crystal, *Opt. Lett.*, **36** (2011) 1770-1772.
- [54] L.A. Lompre, G. Mainfray, J. Thebault, Tunable - wavelength mode - locked Nd - glass laser with instant recording of temporal and spectral parameters, *Journal of Applied Physics*, **48** (1977) 1570-1575.
- [55] D.J. Booth, T. Kobayashi, H. Inaba, A widely-tunable narrow-linewidth Nd-glass laser, *Optical & Quantum Electronics*, **11** (1979) 370-372.
- [56] S. Han, W. Lu, B.Y. Sheh, L. Yan, M. Wraback, H. Shen, J. Pamulapati, P.G. Newman, Generation of sub-40 fs pulses from a mode-locked dual-gain-media Nd:glass laser, *Applied Physics B*, **74** (2002) s177-s179.
- [57] A. Antonio, G. Alessandro, P. Federico, R. Giancarlo, 80-fs Nd:silicate glass laser pumped by a single-mode 200-mW diode, *Opt. Express*, **18** (2010) 10098-10103.
- [58] W. Lu, L. Yan, C.R. Menyuk, Kerr-lens mode-locking of Nd:glass laser, *Optics Communications*, **200** (2001) 159-163.
- [59] X. Ribeyre, ., L. Videau, ., A. Migus, ., R. Mercier, ., M. Mullot, . Nd:glass diode-pumped regenerative amplifier, multimillijoule short-pulse chirped-pulse-amplifier laser, *Opt. Lett.*, **28** (2003) 1374-1376.
- [60] W.F. Krupke, M.D. Shinn, J.E. Marion, Spectroscopic, optical, and thermomechanical properties of neodymium- and chromium-doped gadolinium scandium gallium garnet, *Journal of the Optical Society of America B*, **3** (1986) 102-114.
- [61] G.Q. Xie, D.Y. Tang, W.D. Tan, H. Luo, ., H.J. Zhang, H.H. Yu, J.Y. Wang, Subpicosecond pulse generation from a Nd:CLNGG disordered crystal laser, *Opt. Lett.*, **34** (2009) 103-105.
- [62] G.Q. Xie, L.J. Qian, P. Yuan, D.Y. Tang, W.D. Tan, H.H. Yu, H.J. Zhang, J.Y. Wang, Generation of 534 fs pulses from a passively mode-locked Nd:CLNGG-CNGG disordered crystal hybrid laser, *Laser Physics Letters*, **7** (2010) 483-486.
- [63] Z.P. Qin, G.Q. Xie, J. Ma, ., W.Y. Ge, P. Yuan, ., L.J. Qian, L.B. Su, D.P. Jiang, F.K. Ma, Q. Zhang, . Generation of 103 fs mode-locked pulses by a gain linewidth-variable Nd,Y:CaF₂ disordered crystal, *Opt. Lett.*, **39** (2014) 1737-1739.

- [64] L. Wei, H. Han, W. Tian, J. Liu, Z. Wang, Z. Zhu, Y. Jia, L. Su, J. Xu, Z. Wei, Efficient femtosecond mode-locked Nd:Y:SrF₂ laser, *Applied Physics Express*, **7** (2014) 5880-5885.
- [65] A. Agnesi, F. Pirzio, L. Tartara, E. Ugolotti, H. Zhang, J. Wang, H. Yu, V. Petrov, 378 fs pulse generation with Nd³⁺:SrLaGa₃O₇ (Nd:SLG) disordered crystal, *Laser Physics Letters*, **10** (2013) 315-324.
- [66] A. Agnesi, F. Pirzio, L. Tartara, E. Ugolotti, H. Zhang, J. Wang, H. Yu, V. Petrov, Tunable femtosecond laser based on the Nd³⁺:BaLaGa₃O₇ disordered crystal, *Laser Physics Letters*, **11** (2014) 035802.
- [67] J. Hou, L.H. Zheng, J.L. He, J. Xu, B.T. Zhang, Z.W. Wang, F. Lou, R.H. Wang, X.M. Liu, A tri-wavelength synchronous mode-locked Nd:SYSO laser with a semiconductor saturable absorber mirror, *Laser Physics Letters*, **11** (2014) 035803.
- [68] A.A. Kaminskii, B.V. Mill, G.G. Khodzhabyan, A.F. Konstantinova, A.I. Okorochkov, I.M. Silvestrova, Investigation of trigonal (La_{1-x}Nd_x)₃Ga₅SiO₁₄ crystals. I. Growth and optical Properties, *Physica Status Solidi*, **80** (1983) 387-398.
- [69] 范泽, 掺钕硅酸镓镧(Nd:LGS)晶体生长及其性质研究, in, 山东大学, 2010.
- [70] J. Bohm, R.B. Heimann, M. Hengst, R. Roewer, J. Schindler, Czochralski growth and characterization of piezoelectric single crystals with langasite structure: La Ga SiO (LGS), La Ga Nb O (LGN), and La Ga Ta O (LGT) . Part I, *Journal of Crystal Growth*, **204** (1999) 128-136.
- [71] H. Kong, J. Wang, H. Zhang, Y. Xin, S. Zhang, Y. Liu, X. Cheng, G. Lei, X. Hu, M. Jiang, Growth, properties and application as an electrooptic Q-switch of langasite crystal, *Journal of Crystal Growth*, **254** (2003) 360-367.
- [72] V. Giordano, Y. Kersale, J.J. Boy, Dielectric properties of La₃Ga₅SiO₁₄ at microwave frequencies between 10 and 400 K, *Applied Physics Letters*, **78** (2001) 2545-2547.
- [73] H.J. Eichler, D. Ashkenasi, H. Jian, A.A. Kaminskii, Acentric disordered Nd³⁺:La₃Ga₅SiO₁₄ crystal. A broadband luminescence material with high thermal conductivity to generate picosecond laser pulses, *Physica Status Solidi*, **146** (1994) 833-841.
- [74] X.H. Fu, Y. Che, Y.L. Li, Diode-pumped Nd:LGS intracavity-doubled green laser at 532 nm, *Laser Physics*, **21** (2011) 995-997.
- [75] Y. Yonggui, W. Jiyang, Z. Huaijin, W. Zhengping, Y. Haohai, J. Minhua, Continuous wave and Q-switched laser output of laser-diode-end-pumped disordered Nd:LGS laser, *Opt. Lett.*, **34** (2009) 467-469.
- [76] D.W. Feng, Y. Feng, G.W. Zhang, Diode-pumped Nd:LGS/LBO laser at 452 nm, *Laser Physics*, **22** (2012) 885-887.
- [77] 张青, 赵研英, 魏志义, MW 级峰值功率掺钛蓝宝石激光振荡器, *物理学报*, **59** (2010) 3244-3248.
- [78] D. Strickland, G. Mourou, Compression of amplified chirped optical pulses, *Optics Communications*, **55** (1985) 219-221.
- [79] T.J. Yu, S.K. Lee, J.H. Sung, J.W. Yoon, T.M. Jeong, J. Lee, Generation of high-contrast, 30 fs, 15 PW laser pulses from chirped-pulse amplification Ti:sapphire laser, *Opt. Express*, **20** (2012) 10807-10815.

- [80] C. Yuxi, L. Xiaoyan, Y. Lianghong, X. Yi, X. Lu, M. Lin, L. Xiaoming, L. Yanqi, L. Yuxin, L. Ruxin, High-contrast 2.0 Petawatt Ti:sapphire laser system, *Opt. Express*, **21** (2013) 29231-29239.
- [81] S.W. Bahk, P. Rousseau, ., T.A. Planchon, V. Chvykov, ., G. Kalintchenko, ., A. Maksimchuk, ., G.A. Mourou, V. Yanovsky, . Generation and characterization of the highest laser intensities (10(22) W/cm²), *Opt. Lett.*, **29** (2004) 2837-2839.
- [82] J.V. Rudd, G. Korn, ., S. Kane, ., J. Squier, ., G.A. Mourou, P. Bado, . Chirped-pulse amplification of 55-fs pulses at a 1-kHz repetition rate in a Ti:Al₂O₃ regenerative amplifier, *Opt. Lett.*, **18** (1993) 2044-2046.
- [83] J. Zhou, ., C.P. Huang, C. Shi, ., M.M. Murnane, H.C. Kapteyn, Generation of 21-fs millijoule-energy pulses by use of Ti:sapphire, *Opt. Lett.*, **19** (1994) 126-126.
- [84] B.C. Stuart, M.D. Feit, A.M. Rubenchik, B.W. Shore, M.D. Perry, Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses, *Physical Review Letters*, **74:12** (1995) 2248-2251.
- [85] M.D. Feit, A.M. Rubenchik, Laser-induced damage in dielectrics with nanosecond to subpicosecond pulses II: theory, in: *Laser-Induced Damage in Optical Materials: 1994, 1995*, pp. 469-478.
- [86] A.A. Oraevsky, L.B.D. Silva, M.D. Feit, A.M. Rubenchik, Plasma-mediated ablation of biological tissues with ultrashort laser pulses, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, **2391** (1995) 423-432.
- [87] B.C. Stuart, M.D. Perry, R.D. Boyd, J.A. Britten, B.W. Shore, M.D. Feit, A.M. Rubenchik, Development of high damage threshold optics for petawatt-class short-pulse lasers, *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, **2377** (1995) 247-259.
- [88] H. Daniel, V. Laszlo, T. Raphael, T. Franz, S. Karl, P. Vladimir, K. Ferenc, Generation of sub-three-cycle, 16 TW light pulses by using noncollinear optical parametric chirped-pulse amplification, *Opt. Lett.*, **34** (2009) 2459-2461.
- [89] N. Bodnar, B. Webb, M.C.L. Shah, M. Richardson, 145 W, 3 kHz picosecond amplifier for OPCPA pumping, in: *Lasers and Electro-Optics*, 2015.
- [90] J.P. Negel, A. Voss, M.A. Ahmed, D. Bauer, 1.3 kW average output power Yb:YAG thin-disk multipass amplifier for multi-mJ picosecond laser pulses, in: *Lasers and Electro-Optics*, 2014, pp. 1-2.
- [91] J. Novak, P. Bakule, J.T. Green, Z. Hubka, 100 mJ thin disk regenerative amplifier at 1 kHz as a pump for picosecond OPCPA, in: *Lasers and Electro-Optics*, 2015.
- [92] O. Yoshihiro, N. Keisuke, M. Momoko, T. Masaaki, Y. Fumiko, K. Nanase, M. Michiaki, S. Akira, Yb:YAG thin-disk chirped pulse amplification laser system for intense terahertz pulse generation, *Placenta*, **23** (2015) 15057-15064.
- [93] M. Schulz, ., R. Riedel, ., A. Willner, ., T. Mans, ., C. Schnitzler, ., P. Russbuedt, ., J. Dolkemeyer, ., E. Seise, ., T. Gottschall, ., S. H?drich, . Yb:YAG Innoslab amplifier: efficient high repetition rate subpicosecond pumping system for optical parametric chirped pulse amplification, *Opt. Lett.*, **36** (2011) 2456-2458.
- [94] 陈子坚, 飞秒双光子聚合的微纳加工机理研究, in: 南开大学, 2011.
- [95] 大规模生产新方式: 纳米级别激光加工, *OFweek 激光网*, (2015).

- [96] S. Mathias, H. Marco, B. Ragnar, P. Sebastian, K. Sandro, W. Christoph, K. Ferenc, K. Stefan, U. Reinhard, J. Axel, Terawatt diode-pumped Yb:CaF₂ laser, *Opt. Lett.*, **33** (2008) 2770-2772.
- [97] G.H. Kim, J. Yang, S.A. Chizhov, E.G. Sall, A.V. Kulik, V.E. Yashin, U. Kang, A high brightness Q-switched oscillator and regenerative amplifier based on a dual-crystal Yb:KGW laser, *Laser Physics Letters*, **10** (2013) 3901-3901.
- [98] E. Caracciolo, ., M. Kemnitzer, ., A. Guandalini, ., F. Pirzio, ., J. Au, Aus Der, A. Agnesi, . 28-W, 217?fs solid-state Yb:CaIGdO₄ regenerative amplifiers, *Opt. Lett.*, **38** (2013) 4131-4133.
- [99] <http://www.lightcon.com/>.
- [100] <http://www.spectra-physics.cn/>.
- [101] 2014 年全球激光产业回顾及 2015 年市场展望, *LASER FOCUS WORLD*, (2015).
- [102] Clark-MXR, <http://www.cmxr.com/Education/ShortSamples.html>.
- [103] W. Koechner, Solid-State Laser Engineering, 世界图书出版公司, 2005.
- [104] E.S. Bliss, Opto-electronics [M], *1st Springer*, (1971).
- [105] Coherent, <http://www.coherent.com/>.
- [106] Lumera, <http://www.lumera-laser.com/>.
- [107] Fiannium, <http://www.fianium.com/>.
- [108] H. Fattahi, Third-generation femtosecond technology, *Optica*, **1** (2014) 45-63.
- [109] T.Y. Fan, R.L. Byer, Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd: YAG laser, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **23** (1987) 605-612.
- [110] W.P. Risk, Modeling of longitudinally pumped solid-state lasers exhibiting reabsorption losses, *Journal of the Optical Society of America B*, **5** (1988) 1412-1423.
- [111] L.B. Su, Q.G. Wang, H.J. Li, G. Brasse, P. Camy, J.L. Doualan, A. Braud, R. Moncorgé, Y.Y. Zhan, L.H. Zheng, Spectroscopic properties and CW laser operation of Nd, Y-codoped CaF₂ single crystals, *Laser Physics Letters*, **10** (2013) 390-392.
- [112] Y. Ren, V.D.A. Jr, F. Chen, H. Zhang, Channel waveguide lasers in Nd:LGS crystals, *Opt. Express*, **21** (2013) 6503-6508.
- [113] 祁海峰, 硅酸镓钪晶体光电性能及应用研究, in, 山东大学, 2005.
- [114] Q. Wang, Z. Wei, J. Liu, Z. Wang, Mode-locked Nd:LGS laser with femtosecond pulse duration, in: *Lasers and Electro-Optics Pacific Rim*, 2013, pp. 1-2.
- [115] K. Ursula, Recent developments in compact ultrafast lasers, *Nature*, **424** (2003) 831-838.
- [116] H. Haus, Parameter ranges for CW passive mode locking, *IEEE Journal of Quantum Electronics*, **12** (1976) 169-176.
- [117] F.X. Kaertner, L.R. Brovelli, D. Kopf, M. Kamp, I.G. Calasso, U. Keller, Control of solid state laser dynamics by semiconductor devices, *Optical Engineering*, **34** (1995) 2024-2036.
- [118] R.E. Slocum, L.D. Schearer, P. Tin, R. Marquedant, Nd:LNA laser optical pumping of 4He: Application to space magnetometers, *Journal of Applied Physics*, **64** (1988) 6615-6617.

- [119] H.R. Verdun, L.M. Thomas, Nd:CaYAlO₄—a new crystal for solid - state lasers emitting at 1.08 μm , *Applied Physics Letters*, **56** (1990) 608-610.
- [120] C. Zhenhua, T. Dingyuan, D.T. Wei, Z. Jian, X. Changwen, L. Dewei, X. Xiaodong, L. Dongzhen, X. Jun, Z. Xingyu, Dual-wavelength passively mode-locked Nd:LuYSiO₅ laser with SESAM, *Opt. Express*, **19** (2011) 3984-3989.
- [121] M. Katsuhiko, M. Hiroaki, F. Masazumi, H. Hideki, I. Hiromasa, Widely tunable terahertz-wave generation using an N-benzyl-2-methyl-4-nitroaniline crystal, *Opt. Lett.*, **33** (2008) 252-254.
- [122] P.D. Maker, R.W. Terhune, M. Nisenoff, C.M. Savage, Effects of Dispersion and Focusing on the Production of Optical Harmonics, *Physical Review Letters*, **8** (1962) 21-22.
- [123] S.X. Dou, M.H. Jiang, Z.S. Shao, X.T. Tao, Maker Fringes In Biaxial Crystals And The Nonlinear Optical Coefficients Of Thiosemicarbazide Cadmium Chloride Monohydrate, *Applied Physics Letters*, **54** (1989) 1101 - 1103.
- [124] R. Komatsu, T. Sugawara, S. Uda, Nonlinear Optical Properties of Langasite Crystal, *Japanese Journal of Applied Physics.pt Regular Papers & Short Notes*, **36** (1997) 6159-6161.
- [125] B. Boulanger, J.P. Feve, G. Marnier, C. Bonnin, Absolute measurement of quadratic nonlinearities from phase-matched second-harmonic generation in a single KTP crystal cut as a sphere, *Journal of the Optical Society of America B*, **14** (1997) 1380-1386.
- [126] 阎江, 李浩文, 杨学林, 谢绳武, 孙真荣, 晶体球中非相位匹配二次谐波产生测量铌酸锂非线性系数, *激光杂志*, **21** (2000) 14-16.
- [127] 阎江, 杨学林, 李浩文, 谢绳武, 丁良恩, 晶体球中非相位匹配二次谐波产生及最佳聚焦条件, *光学学报*, **20** (2000) 1596-1601.
- [128] J. Kleinbauer, R. Knappe, R. Wallenstein, A powerful diode-pumped laser source for micro-machining with ps pulses in the infrared, the visible and the ultraviolet, *Applied Physics B*, **80** (2005) 315-320.
- [129] K. Florian, K.K. Chen, A. Shaif-Ul, C.B.E. Gawith, J.I. Mackenzie, D.C. Hanna, D.J. Richardson, D.P. Shepherd, High-power, variable repetition rate, picosecond optical parametric oscillator pumped by an amplified gain-switched diode, *Opt. Express*, **18** (2010) 7602-7610.
- [130] B.A. Reagan, C. Bamgarten, K. Wernsing, H. Bravo, 1 Joule, 100 Hz repetition rate, picosecond CPA laser for driving high average power soft x-ray lasers, in: *Lasers and Electro-Optics*, 2014, pp. 1-2.
- [131] W.F. Krupke, Ytterbium solid-state lasers. The first decade, *Selected Topics in Quantum Electronics IEEE Journal of*, **6** (2000) 1287 - 1296.
- [132] A. Ikesue, L.A. Yan, T. Taira, T. Kamimura, K. Yoshida, G.L. Messing, Progress in ceramic lasers, *Annual Review of Materials Research*, **17** (2006) 397-429.
- [133] <http://www.jiepu.com/>.
- [134] J.E. Murray, W.H. Lowdermilk, ND : YAG regenerative amplifier, *Journal of Applied Physics*, **51** (1980) 3548-3556.
- [135] W.H. Lowdermilk, J.E. Murray, The multipass amplifier: Theory and numerical analysis, *Journal of Applied Physics*, **51** (1980) 2436-2444.

- [136] 俞宽新, 激光原理与激光技术, 北京工业大学出版社, 2008.
- [137] 石顺祥, 光电子技术及其应用, 电子科技大学出版社, 2000.
- [138] 张克从, 非线性光学晶体材料科学, 科学出版社, 1996.
- [139] 张宁宁, 电光 Q 开关的晶体材料研究及器件设计, in, 中国科学院研究生院, 2012.
- [140] J.C. Dainty, Electro-optic and Photorefractive Materials, *Journal of Modern Optics*, **35** (1988) 1280-1280(1281).
- [141] 肖定全, 晶体物理学, 四川大学, 1989.
- [142] C. Belouet, Growth and characterization of single crystals of KDP family, *Progress in Crystal Growth & Characterization*, **3** (1980) 121-156.
- [143] www.eksmaoptics.com.
- [144] P. Sévillano, ., P. Georges, ., F. Druon, ., D. Descamps, ., E. Cormier, . 32-fs Kerr-lens mode-locked Yb:CaGdAlO₄ oscillator optically pumped by a bright fiber laser, *Opt. Lett.*, **39** (2014) 6001-6004.
- [145] V.E. Kisel, A.S. Rudenkov, A.A. Pavlyuk, A. Kovalyov, V. Preobrazhenskii, M. Putyato, N. Rubtsova, B. Semyagin, N.V. Kuleshov, High power efficient SESAM-mode-locked Yb:KGW bulk laser, in: *Advanced Solid State Lasers*, 2015.
- [146] G. Machinet, ., P. Sevillano, ., F. Guichard, ., R. Dubrasquet, ., P. Camy, ., D. J-L, R. Moncorgé, ., P. Georges, ., F. Druon, ., D. Descamps, . High-brightness fiber laser-pumped 68??fs-2.3??W Kerr-lens mode-locked Yb:CaF₂ oscillator, *Opt. Lett.*, **38** (2013) 4008-4010.
- [147] Z. Haitao, M. Arkady, Powerful 67 fs Kerr-lens mode-locked prismless Yb:KGW oscillator, *Opt. Express*, **21** (2013) 31846-31851.
- [148] A. Greborio, Sub-100 fs pulses with 12.5-W from Yb:CALGO based oscillators, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, **8235** (2012) 282-282.
- [149] P. Loiko, F. Druon, P. Georges, B. Viana, K. Yumashev, Thermo-optic characterization of Yb:CaGdAlO₄ laser crystal, *Optical Materials Express*, **4** (2014) 2241-2249.
- [150] 沈忠伟, 超短超强激光对比度提升技术及工程可靠性研究, *中国科学院大学博士学位论文*, (2014).
- [151] <http://terahertz.tju.edu.cn/>.
- [152] 潘淑娣, Nd:YLF 晶体特性及全固态激光器研究, in, 山东师范大学, 2007.
- [153] 孙岩, 高重频全固态 Nd:YLF 激光器研究, in, 清华大学, 2010.
- [154] H. Wei, S. Zhang, S.Z. Xu, Z. Ma, L. Shen, W. Zeng, S. Chen, Diode-pumped Nd:YLF regenerative amplifier, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, **4914** (2002) 294-298.

个人简历及发表文章目录

基本情况

刘家兴，男，中共党员，广东省阳江人，1988 年 3 月出生，已婚，中国科学院物理研究所在读博士研究生。

教育状况

2011.09 - 2016.07 中国科学院物理研究所 攻读理学博士学位

2007.09 - 2011.07 中山大学 获得理学学士学位

科研及项目经历

参与科技部重大仪器研制专项子课题“全固态超短脉冲激光泵浦源开发研究-全固态超短脉冲放大”的研究工作

参与 XX 专项课题“高能量皮秒 1053nm 激光相位锁定及多光束相干合成的研究”的工作

参与技术开发项目“两级单程放大器及皮秒放大器同步组件”的研发

获奖情况

研究生期间：

2015 年获中国科学院物理研究所所长奖学金优秀奖

2014 年获中国科学院物理研究所所长奖学金表彰奖

本科期间：

2011 年获中山大学一等奖学金

2010 年获中国宋庆龄基金会宝马奖学金

2009 年获国家励志奖学金

2009 年获中山大学理工学院珠海校区第九届学生会“优秀部长”称号

社会活动与兼职

2012.09-2016.05 担任物理研究所光物理 07 组工会小组长

2011.09-2012.07 担任中国科学院物理所 303 班班长

发表文章目录

- [1] **Jiaying Liu**, Zhaohua Wang, Kunna He, Long Wei, Zhiguo Zhang, Zhiyi Wei, Haohai Yu, Huaijin Zhang, Jiyang Wang. “Passively mode-locked femtosecond laser with an Nd-doped $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ disordered crystal”, Optics Express 22(22) 26933-26938 (2014).
- [2] **Jiaying Liu**, Zhaohua Wang, Wenlong Tian, Qing Wang, Zhiguo Zhang, Zhiyi Wei, Haohai Yu, Huaijin Zhang, Jiyang Wang. “Observation of self-frequency doubling in diode-pumped mode-locked Nd-doped $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ laser”, Chinese Physics Letters 32(1) 014206 (2015).
- [3] **Jiaying Liu**, Wei Wang, Zhaohua Wang, Zhiguo Lv, Zhiyuan Zhang, Zhiyi Wei. “Diode-pumped high energy and high average power all-solid-state picosecond amplifier systems”, Applied Sciences 5 1590-1602 (2015).
- [4] Long Wei, Hainian Han, Wenlong Tian, **Jiaying Liu**, Zhaohua Wang, Zheng Zhu, Yulei Jia, Liangbi Su, Jun Xu, Zhiyi Wei. “Efficient femtosecond mode-locked Nd:Y:SrF₂ laser”, Applied Physics Express 7(9) 092704 (2014).
- [5] Wenlong Tian, Zhaohua Wang, **Jiaying Liu**, Jiangfeng Zhu, Lihe Zheng, Xiaodong Xu, Jun Xu, Zhiyi Wei. “Dissipative soliton and synchronously dual-wavelength mode-locking Yb:YSO lasers”, Optics Express 23(7) 8731-8739 (2015).
- [6] Kunna He, **Jiaying Liu**, Long Wei, Xiaodong Xu, Zhaohua Wang, Wenlong Tian, Zhiguo Zhang, Jun Xu, Juqing Di, Changtai Xia, Zhiyi Wei. “Diode-pumped passively mode-locked 1079 nm Nd:CaGdAlO₄ laser”, Chinese Physics Letters 33(1) 014203 (2016).

发明专利

- [7] 魏志义, **刘家兴**, 王兆华, 王庆, 张治国。《掺钕硅酸镓镧自倍频超短脉冲激光器》(北京, CN201310603654.9)
- [8] 魏志义, 魏龙, 韩海年, 王兆华, 田文龙, **刘家兴**。《飞秒锁模激光器及 Nd:Y:SrF₂材料在激光器中的应用》(北京, CN201410251367.0)
- [9] 魏志义, 田文龙, 王兆华, 魏龙, 彭英楠, 朱政, **刘家兴**。《克尔透镜自

锁模Yb:LSO激光器》（北京，CN201410240600.5）

参加会议情况

- [10] **Jiaying Liu**, Zhaohua Wang, Dehua Li, Zhiyi Wei. “40 mJ all-solid-stated picosecond laser amplifier”, UFO 2015 poster: UFO0161.
- [11] **Jiaying Liu**, Zhaohua Wang, Long Wei et al. “Diode-pumped tunable continuous wave and femtosecond laser operation with Nd:LGS disordered crystal”, Advanced Solid State Lasers (ASSL) 2014 paper: AM5A.28
- [12] **Jiaying Liu**, Zhaohua Wang, Qing Wang et al. “30 mJ all-solid-stated picosecond laser amplifier”, The 1st International Symposium on High Power Laser Science and Engineering(HPLSE)2014 paper: P-13.
- [13] Qing Wang, Zhiyi Wei, **Jiaying Liu**, Zhaohua Wang, Zhiguo Zhang, Huaijin Zhang, Jiyang Wang. “Mode-locked Nd:LGS laser with femtosecond pulse duration”, Conference on Lasers and Electro-Optics/Pacific Rim (CLEOPR) 2013 paper: ThA3-7
- [14] Wei, Long; Tian, Wenlong; **Liu, Jiaying**; Zhu, Zheng; Han, Hainian; Wei, Zhiyi; Su, Liangbi; Xu, Jun. “Mode-locked Nd³⁺:Y³⁺:SrF₂ laser with 181 fs pulse duration”, Science and Innovations (CLEO_SI) 2014 paper: SM4F.4
- [15] Wei, Long; Han, Hainian; Tian, Wenlong; **Liu, Jiaying**; Wang, Zhaohua; Wei, Zhiyi; SU, Liangbi; Xu, Jun. “SESAM mode-locked chirp-pulsed oscillator with Nd,Y:SrF₂ as gain medium”, Advanced Solid State Lasers (ASSL) 2014 paper: AM5A.

致谢

时光匆匆，如今我已即将完成毕业论文，犹记得五年前的那个早上，我第一次踏足京城，来到早已向往的中国科学院，那种紧张和激动的心情如今仍然记忆犹新。在研究生院历经了一年的课程学习后，我正式进入了物理所，加入了L07组的大家庭中，一个在我人生中最重要集体之一。

回顾过去五年的光阴，充满着挑战、艰苦和快乐。我在这里收获了友情、爱情和亲情，得到了受益一生的思维方式和技能。我要将内心最大的感激献给我的导师魏志义研究员。魏老师以其深厚的学术造诣和敏锐的研究触觉为我指明了方向，教会了我如何成为一名合格的科研工作者，带领我走进了超短脉冲激光的研究领域；魏老师辛勤甚至于忘我的工作，为我创造和提供了一个国际先进的科研条件，激励着我不断向前。在工作之余，魏老师时刻关心着我们的生活，得知我们有困难时总会及时伸出援手，帮助我们度过难关。每每想起魏老师所给予的理解和支持，我的内心充满了感激。此时此刻，我想对您说：魏老师，谢谢您！

感谢王兆华副研究员，能够成为您的学生是一种幸运。王老师与我亦师亦友，五年来相处的时光弥足珍贵。在工作上，王老师循循善诱，引导着我学会如何发现问题和解决问题；在实验室一起奋战的日子里，教会了我许多宝贵的经验和技能，让我逐步成长。王老师注重对我思维的培养，每次讨论中总能准确的指出问题的关键，让我学会如何更有效地抓住重点。在生活中，王老师喜欢和我们一起分享快乐，善于为我们排解压力，就像是我的“老大哥”一样，让我感到安心。

感谢张治国研究员，张老师七十多岁的高龄依然坚持战斗在科学前沿，让我深表佩服和感动。张老师在工作和生活中给予了我极大的关爱和帮助，他高尚的人格魅力和严谨的科研态度时刻感染着我。生活中的张老师是一个慈祥和蔼的长辈，每次的交谈中无时不为我着想，给予我宝贵的建议，向我传授着珍贵的人生经验。

感谢组里的滕浩副研究员、贺新奎副研究员、韩海年副研究员、李德华高级工程师、赵昆副研究员和方少波副研究员，在实验方案的讨论与期刊论文的修改中给予的帮助。

感谢王庆博士第一次带领我进入实验室，毫无保留地传授我实验经验和技能，耐心地帮助我适应和开展实验研究，以及在工作和生活中给予的关心和帮助。感谢沈忠伟博士、范海涛博士在产业化工作中给予的指导和帮助；还有与我亲密合作的陈超，感谢你在机械设计和电路设计上无私的付出和帮助，我永远也忘不了一起讨论和不断修改激光器设计方案的日子。感谢在一层实验室一起奋战的田文龙、吕志国、何鹏、秦爽、何会军、杨帅帅、张宁华、孟祥昊、张志远、程梦尧，和你们在一起无论实验多么艰苦都不会感到孤独和无助。

感谢舍友兼同窗于子蛟和钟诗阳，谢谢你们从研一到现在一直以来的陪伴和帮助，还有在平常工作和生活中给予的支持。感谢刘文军老师和何坤娜老师长期以来的帮助。感谢张龙博士、吕志国在光纤激光器方面的指导和帮助。感谢张金伟博士、彭英楠在薄片激光器方面的讨论和指导。感谢叶蓬博士、詹敏杰博士、汪礼锋博士、侯磊博士、王睿博士等师兄们耐心的教导和帮助。感谢吕亮师兄、刘阳阳、王立娜、朱政、林清峰、魏龙、卜祥宝、谢阳、黄沛、黄杭东、范振凯、高子叶、庞利辉、孙芯彤、江昱佼、张子越、梁玥瑛、胡呈峰、蒋建旺、杨佩龙、张强、王敏佳等，很荣幸在读博期间与你们一起工作，谢谢你们给予的支持和帮助。

特别感谢我的妻子李颖雯，九年的相识、六年的相知、两年的异地以及三年的相守，是你让我懂得了什么是爱情和责任。感谢你的牺牲和陪伴，毕业后前来北京与我共同奋斗，三年来一起经历了幸运和不幸、快乐和痛苦。多少个失落和艰苦的日子你和我一起走过，多少个幸福和快乐的瞬间你和我一起拥有，感谢你一直以来的理解和支持，鼓励着我不断前行，为了共同的目标一起努力。感谢你，我的挚爱！感谢我的岳父岳母，将女儿托付于我，并对待我如同亲生儿子，谢谢你们。

最后，我要感谢我的父母和姐姐，你们无微不至的照顾让我长大成人，你们淳淳的教诲让我懂事明理，感谢你们二十多年来无私的奉献。在外求学十二载，我无法陪伴在你们身边以尽孝道，感谢你们的理解和支持，没有你们就没有今天的我。感谢你们，我的至亲。

刘家兴

2016年5月

学位论文原创性声明和使用授权说明

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。本论文所参考的其他个人或集体已经发表或撰写的成果、数据和观点等，均已在文中明确注明出处。除此之外，尽我所知，本论文不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文研究成果做出贡献的个人和集体，本人已在文中作了明确的说明并表示谢意。

本人愿意承担由此声明而产生的一切法律责任。

学位论文作者签名：刘家兴 日期：2016年4月28日

关于学位论文使用授权的声明

本人声明：本人在毕业后发表、使用与本论文直接相关的学术论文或成果时，本人的第一署名单位仍然为中国科学院物理研究所（以下简称为物理所）；本人同意物理所保留并向国家有关部门或机构提交本学位论文的纸质版和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权物理所将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并可以采用复印、缩印或其它手段保存和汇编本学位论文。

学位论文作者签名：刘家兴 日期：2016年4月28日

导师签名： 日期：2016年4月28日