分类号	O437.4	密级
UDC	535	编号

中国科学院研究生院 博士学位论文

高功率高光束质量全固态皮秒激光器

及中红外全固态激光器研究

张小富

指导教师		许祖彦 研究	充员	
	中	国科学院理化技术	研究所	
申请学位级别	博士	_学科专业名称 _	光学	
论文提交日期	2009.4	论文答辩日期	2009.5	
培养单位	中国科学院物理研究所			
学位授予单位	中国科学院研究生院			

答辩委员会主席

摘要

半导体泵浦高功率全固态皮秒激光器在国防、先进制造和科学前沿等领域有 着极为广泛的应用前景。本文针对研制高功率高光束质量皮秒激光器的难点,通 过理论分析,深入研究了高平均功率、高光束质量全固态皮秒激光产生的若干关 键技术,包括低量子亏损泵浦技术、热管理技术、半导体可饱和吸收镜锁模技术、 高光束质量控制技术等,取得了创新性成果。

- 低量子亏损泵浦技术研究。针对半导体泵浦全固态激光器热效应产生的原因 与掺钕晶体能级图结构,分析了低量子亏损泵浦的可能性和优势,在此基础 上进行了 Nd: YAG 激光晶体 885 nm 低量子亏损泵浦研究,获得了 65.5 %光 光效率,斜效率达到 81.9 %;首次利用 885 nm 半导体激光器泵浦 Nd: YAG 激光陶瓷,取得了 58.9 %的光光效率,并申请相关国防专利一项;利用 888 nm 半导体激光器泵浦 Nd: YVO4 激光晶体,获得了 74.14 %的光光效率,斜效率 79 %;首次利用 888 nm 半导体激光器泵浦 Nd: GdVO4 激光晶体,获得了 67 % 的光光效率,斜效率为 69 %,并撰写发明专利一项。结果证明,低量子亏损 泵浦可以提高有效光光转换效率,同时降低全固态激光器的热管理难度。
- 2. Nd: GdVO₄侧面泵浦技术研究。根据 Nd: GdVO₄侧面泵浦要求,设计研制了 Nd: GdVO₄侧泵激光头,首次利用温度调节 Nd: GdVO₄ 晶体增益分布,并与 相同参数的 Nd: YAG 侧泵激光头进行了激光输出对比,在连续激光输出和调 Q 输出方面光光效率均比 Nd: YAG 高 18%。
- 3. 高功率高光束质量皮秒激光器研究。在低量子亏损泵浦技术的基础上,利用 885 nm LD 泵浦 Nd:YAG 激光晶体,突破了低量子亏损泵浦热管理和 SESAM 锁模参数优化等关键技术,获得了平均功率 17 W,光束质量 M²=1.1, 重复频率 80 MHz,脉冲宽度 35 ps 的被动锁模 1064 nm 激光器。
- 4. 大功率皮秒激光放大理论与实验研究。将 Nd:YVO4 和 Nd:YAG 激光晶体联 合使用的多级放大方法,以利于获得大功率输出。在 MOPA 系统中,将输出 功率提高到了 92.7 W,重复频率 73 MHz,脉冲宽度 26.5 ps,提取效率为 6%。
- 5. 利用先进的的热管理技术,研制了大功率中红外全固态激光器研究。针对 Tm:YAG 产生大功率 2 μm 波长激光的难点,通过理论分析,研究了热管理

I

技术、高功率密度泵浦技术、调 Q 输出技术等关键技术,研制了 2 μm Tm: YAG 侧泵激光头,并完成了激光实验,获得了 XX W 平均功率输出,并通 过声光调制调 Q 输出达到 XX W。

关键词:低量子亏损泵浦、半导体泵浦全固态皮秒激光器、被动锁模、MOPA 放大、Tm: YAG 中红外激光器、热管理。

Abstract

Zhang Xiaofu (Optics)

Directed by Prof. Zuyan Xu (Academician of Chinese Academy of Engineering)

Diode pumped high power all-solid-state picoseconds lasers are widely used in the fields of military affairs, industrial processing and scientific research. Experimental researches on high-power and high-beam-quality diode pumped picoseconds all-solid-state lasers are the keystones of this thesis. The investigation involves many theoretical and experimental studies such as the reduced quantum defect of direct laser level pumping (DLLP) of Neodymium doped materials, accurate management of thermal lens, passively mode locked laser with Semiconductor Saturable Absorber Mirror (SESAM), and control of beam-quality. The main work is described as follows:

- 1. Investigation of the reduced quantum defect of DLLP of Neodymium doped materials. The reasons of thermal effects generated in Neodymium doped materials were analyzed. The possibility and advantage of the reduced quantum defect of DLLP and the energy level diagram of Neodymium doped materials are studied on respectively. Laser performance of Nd:YAG crystal pumped by 885 nm LD is experimentally researched and 65.5 % optical-optical efficiency is obtained corresponding to 81.9 % slop efficiency. The Nd:YAG ceramic laser pumped by 885 nm LD is presented for the first time with high optical-optical efficiency of 58.9 % and a military affairs patent is asked. The 888 nm reduced quantum defect of DLLP Nd: YVO₄ crystal is also experimental studied on and 74.14 % optical-optical efficiency is obtained with slope efficiency of 79 %. The 888 nm pumping Nd:GdVO₄ laser, with 67 % optical-optical efficiency, and a patent is prepared. The reduced quantum defect of DLLP is an efficient way for high optical-optical conversion efficiency generation and better thermal management.
- Researches of Nd: GdVO₄ rod side pumping technique. Based on the requirement of Nd: GdVO₄ rod side pumping, the Nd: GdVO₄ side pumping laser head are designed and assembled. The temperature changed for distribution of fluorescence in the Nd: GdVO₄

rod is presented firstly. The laser performance of Nd: $GdVO_4$ side pumping laser head and Nd: YAG side pumping laser head with the same parameter are compared with 18 % of optical-optical efficiency higher than that of Nd: YAG in cw and Q-switched output.

- 3. Theoretical and experimental researches of high power and high-beam-quality picoseconds laser. Based on the reduced quantum defect of DLLP discussed before, a diode pumped passively mode locked Nd:YAG laser with SESAM is obtained with average power 17 W, repetition rate 80 MHz and M²=1.1, pulse width 30 ps, after the problem of thermal lens measurement and the parameters of SESAM are solved.
- 4. Theoretical and experimental researches of high power picoseconds laser amplifier. We investigate the method using both Nd: YVO₄ and Nd: YAG in multi-stage amplifier system to achieve high power output. In the MOPA system, by using Nd:YVO₄ and Nd:YAG together, the output power is increased to 92.7 W with repetition rate 73 MHz, pulse width 26.5 ps. The efficiency of energy extraction is 6%.
- 5. The high power middle-infrared lasers are studied by using advanced thermal management technique. The difficulties of 2 micron laser generated by Tm: YAG are discussed and theoretically analysesed including thermal management technique, high power density pump, and Q-switched output. The 2 micron Tm: YAG rod side pump laser head are designed and the laser power of XX W cw and XX W Q-switched output are achieved in the experimental research.

Keywords: Direct Laser Level Pumping, Diode-pumped Solid-State Picoseconds Lasers, Passively Mode Lock, MOPA Amplification, Tm: YAG Middle-infrared Lasers, Thermal Management

目 录

摘	要I
Abs	tract ······III
第-	一章 绪 论
1.1	高功率全固态激光器的发展简介
1.2	全固态皮秒激光器技术的发展和应用
1.3	高功率中红外 DPL 研究进展
1.4	本文主要研究内容
参考	考文献
第二	二章 固体激光工作物质的低量子亏损泵浦特性研究
2.1	低量子亏损泵浦优点介绍
2.2	Nd:YAG 激光晶体及 Nd:YAG 激光陶瓷的低量子亏损泵浦研究30
	2.2.1 Nd:YAG 激光晶体特性及低量子亏损泵浦研究
	2.2.2 Nd:YAG 激光陶瓷特性及低量子亏损泵浦研究
2.3	Nd:YVO4的低量子亏损泵浦特性研究40
2.4	Nd:GdVO4的泵浦特性研究43
	2.4.1 Nd:GdVO4的端面低量子亏损泵浦研究43
	2.4.2 Nd: GdVO4 的侧面泵浦研究46
本章	章小结······50
参考	考文献
第三	三章 高功率高光束质量皮秒激光器研究
3.1	锁模基本原理介绍53
3.2	半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模设计
	3.2.1 半导体可饱和吸收镜介绍
	3.2.2 半导体可饱锁模运行方式
	3.2.3 半导体可饱和吸收镜锁模原理
	3.2.4 SESAM 设计标准60

3.2.5 SESAM 参数确定65
3.3 17 W 半导体可饱和吸收镜被动锁模 Nd: YAG 激光器
3.3.1 皮秒激光器激光晶体参数设计
3.3.2 热透镜效应研究
3.3.3 皮秒谐振腔设计
3.3.4 高功率高光束质量皮秒激光器实验研究
本章小结
参考文献
第四章 皮秒行波放大及其变频研究
4.1 皮秒激光行波放大研究
4.1.1 全固态高重频皮秒脉冲放大理论
4.1.2 43 W 全固态皮秒放大器研究 ······86
4.1.3 93 W 全固态皮秒放大器研究 ······91
4.2 全固态皮秒变频技术研究 ······94
本章小结······96
参考文献
第五章 大功率中红外激光器研究
5.1 Tm: YAG 激光晶体特性研究 ······99
5.2 大功率 Tm: YAG 侧泵激光头增益分布控制研究105
5.3 连续波 2 μm 激光器研究109
5.3.1 单激光头实验结果
5.3.2 双激光头串接实验结果
5.4 准连续波 2μm 激光器研究
本章小结
参考文献
第六章 全文总结
已发表和待发表文章
致 谢

第一章 绪 论

激光的发明是 20 世纪的一项划时代的成就,对人类文明产生了极其深远的 影响。在物理学方面,激光的产生促进了很多学科的产生和发展,例如非线性光 学的产生、光通信的产生和发展、自适应光学的发展、量子光学的产生和发展等, 迄今已有 6 个年度的诺贝尔物理学奖涉及激光的应用;在工业应用上,精密测距 是应用激光最广泛的方向之一,进入千家万户的电脑、DVD 等娱乐设施,几乎 都安装有激光器;在军事上,激光作为"死光"一直是各国军方作为下一代新式 武器的首要发展方向。在很多的领域,激光已经引起了和正在引起着革命性的变 革。

自 1960 年第一台红宝石激光器出现以后,激光器技术经过了气体激光器、 液体激光器、半导体激光器、全固态激光器(DPL)等不同类型。随着全固态激 光器的发展,激光器的工程化、稳定性、体积、寿命等得到大幅度的优化,随着 全固态激光器在不同领域应用的不断扩展,全固态激光技术已成为激光技术研究 的重大方向。作为全固态激光器的一个重要方向,近年来,大功率全固态皮秒激 光器由于其拥有非常短的脉冲宽度和很高的峰值功率,更是在科研、工业、军事 等很多领域展现了它优秀的特性。高功率、高可靠性的波长为 2 μm 的中红外激 光源在国防、材料加工、医疗和探测领域也具有广泛的应用价值。

1.1 高功率全固态激光器的发展简介

激光的产生是一个漫长的过程,其间经历了众多科学家在理论上艰难的探索。 1917 年,爱因斯坦第一次阐明:当辐射击中一个原子或分子时,怎么能够激发 出更多的辐射?其条件是前来的光子或者辐射的能量,同一个原子在从较高的能 量状态落到较低能量状态的一次跃迁中丧失的能量接近于相等。这样,爱因斯坦 就描述了把能量提供给触发作用的辐射的过程^[1]。1924 年,理查德·托尔曼在《物 理学评论》上仔细讨论了辐射的受激发射和吸收,并提出受激发射必定同原来的 激发辐射相干^[2]。1939 年,俄国学者 V.A. Fabrikant 在学位论文里面描述了在气 体中光辐射的吸收和发射,首次提出"负吸收"和放大效应^[3]。1950-1953 年, 兰姆等人发表了对氢原子精细结构研究的系列总结性文章,提出了"如果占据较 高能级的粒子数比占据较低能级的多,那么将会发生净的感应发射。"^[4,5,6,7,8,9,10]

1954 年,莫斯科列别捷夫研究所的普罗霍罗夫和巴索夫发表一篇文章,描述碱 金属卤化物分子组成的分子束流,再通过一个空腔时会形成一个微波振荡器。 1958 年,贝尔实验室的科学家 A.Schawlaw 和 C.Townes 首次描述了激光产生的 条件,提出了利用尺度远大于波长的开放式光谐振腔实现激光器的新思路^[11]。 这为激光器的出现奠定了基础。仅仅两年之后的 1960 年,T.Mainman 发明了世 界上第一台激光器^[12]。,普罗霍罗夫、巴索夫和 C.Townes 于 1964 年获得物理 学诺贝尔奖自此以后,激光技术迅速发展,不仅对传统科学和技术领域产生了巨 大的影响,还影响了很多新的领域的产生和发展。

传统的固体激光器采用闪光灯作为泵源,它所产生的宽带辐射与固态激光器 的增益介质狭窄的吸收带不适应,能量吸收少,只有 1%-3%左右的电光转换 效率和较大的热效应,转换效率低和光束质量差是这类泵浦源的固有缺点。半导 体激光器(LD)的出现改变了这种状况。半导体激光泵浦的固体激光器中的元 器件都是"固态"的,因此被称为全固态激光器(DPL)。DPL 是激光发展历程 上的巨大革新, 它继承了 LD 寿命长、效率高及固体激光器光束质量好的优点, 克服了传统灯泵浦的寿命短、效率低、体积大等缺点。LD 体积小、重量轻、直 接电流注入使其有很高的量子效率,可以通过调整组分和控制温度来获得与激光 增益介质相匹配的发射波长;但其光束质量较差,模式特性也不理想,难以适应 对光束质量要求较高的应用。固态激光器输出的光束质量高,模式特性良好。因 此用 LD 泵浦固态激光器,可以有效地选择泵浦波长,使之位于激光介质吸收 带内,大大提高了泵浦效率; LD 还可以用来泵浦含有不同激活粒子的固态增益 介质,丰富了激光光源谱线,拓宽了固态激光器的应用领域; LD 泵浦的固态激 光器输出能量、功率已经达到闪光灯泵浦的固态激光器的输出水平,而光束质量、 效率和稳定性则优于它。DPL 与灯泵浦固体激光器相比,体积减小约 10 倍,效 率和寿命均提高约10倍,可靠性则提高约100倍,且更高光束质量激光输出也 更易实现。LD 泵浦的掺钕激光器的电光转换效率超过 10%。由于这种激光器 同时有较高的光谱功率,因此在非线性晶体频率变换中有很好的应用,可以获得 红外光、可见光和紫外光等多种谱线的激光辐射。与传统的化学激光器相比, DPL 具有效率高(电光效率约为17%)、波长短、能流密度高、体积小而紧凑

(全固化)、寿命长(万小时)、易操作、运转灵便(连续波/长脉冲/短脉冲)、 无污染等优点。再加上 DPL 便于模块化和电激励,所以可以普遍其应用到工业 生产、国防建设、科学研究等众多领域,在未来 10~20 年将发展成为高技术产 业、国防建设重大的关键技术,并将极大带动相关产业的发展。

近些年来,高功率 DPL 技术得到了迅速的提高,在激光加工、国防、医疗 卫生、热核反应、卫星通信、材料加工、大气科学、跟踪侦察和信息处理等方面 得到了更加广泛的应用。对 DPL 的研究一直和 LD 的研究紧密相关, 早在 1953 年,科学家们提出为了克服传统灯泵固体激光器电光效率低,热效应严重等缺点, 可以用输出波长在 800-900 nm 之间的窄带 LD 为固体激光介质中的几种稀土离 子提供有效的泵浦^[13,14,15,16]。第一支 GaAs 半导体激光器于 1962 年问世,虽然 第一支 LD 早在 1962 年就诞生了,但是,由于半导体工艺的限制(LD 寿命短, 阈值高、效率低、常温下发射谱线不能与增益材料的吸收峰相对应,需要冷却到 极低的温度),实际可用的 DPL 并没有出现。1963 年就提出用 LD 的相干辐射 针对 Nd³⁺的吸收带泵浦来获得高效率、结构紧凑的全固态激光器,同年 R.Newman用GaAs二极管880 nm附近的辐射去泵浦Nd:GaWO4,得到了1064 nm 的荧光输出,他意识到 GaAs LD 发射的波长与钕离子的吸收带光谱重叠,可导 致高效率、结构紧凑的 DPL 出现^[17]。1964 年,美国 MIT 林肯实验室的 Keyes 和 Quist 成功地实现了这一想法,展示了一台 LD 泵浦的固态激光器^[18],这台以 GaAs 半导体激光器作为泵浦源的激光器,其增益介质为U³⁺:GaF₂,工作在2.613 μm, 整个装置放在液氮中冷却至4K, 如图 1-1 所示。



图 1-1 第一台 LD 泵浦固体激光器

1968 年,麦道公司的 Ross^[19]实现了第一台用 GaAs 半导体激光器(867 nm) 泵浦的 Nd: YAG 激光器,但所用的 LD 只有冷却到 170 K,才能实现发射波长 和 Nd: YAG 的吸收峰相匹配。由于 LD 对低温的要求以及发射功率太小,无法 实现 DPL 的高效工作, 延缓了 DPL 的早期发展。尽管由于当时 LD 研制水平很 低,输出功率小,光束发散角大,发射光谱宽,而且需要工作在低温条件,DPL 实验获得的激光效率也不高,但是 DPL 高转换效率等优点已经呈现,引起了各 国科研人员的极大研究兴趣。随着半导体技术的进步,上世纪 70 年代 LD 实现 了室温下连续工作。1971 年 Ostermayer^[20]报导了室温下用直线排列的 64 个 GaAsP 半导体激光器泵浦的Nd:YAG 激光器,实现了连续波1.4 mW 的1.06 µm 激光输出, 电功率 30 W, 泵浦光功率为 900 mW。1972 年 Danielmeyer 等采用 LD 泵浦 Nd: YAG 首次实现了能够在室温条件下运转的 DPL。但是,科学家们 对 DPL 的研究工作主要集中在寻找适合 LD 泵浦的固体激光材料和基本的理论 研究上,例如:研制掺杂浓度可高于 Nd:YAG 而又没有激光上能级寿命淬灭的 NdP₅O₁₄(NPP)和 LiNdP₄O₁₂(LNP)等新型固体激光材料^[21, 22],因为这些新 的激光材料可以在较小的体积内吸收更多的泵浦光能量,以期望获得较高的激光 转换效率和功率输出; 1972 年, N.P. Barnes 发表侧面泵浦 DPL 激光阈值和斜效 率的近似方程方面的研究^[23]; 1974 年, G.I. Farmer 和 Y.C. Kiang 报道了采用速 率方程和矩阵光学对 LD 泵浦的固体激光器开展了更深入的理论研究工作^[24]。此 外在 70 年代研究者们也开始探索 LD 泵浦耦合技术方面的相关研究。例如: 1974 年, J.Stone 和 C.A.Burrus 采用波导结构, 首次实现了 LD 泵浦光纤激光器^[25]; 1973 年 L.J.Rosenkrantz 等研究者则首先研究了 LD 端面泵浦 DPL^[26, 27, 28, 29]。 在 70 年代, DPL 技术在很长一段时间内都没有大的突破, 当时的 LD 的缺点是: 输出功率低、转换效率低光束质量差、单色性差、波长单调且难以工作在室温条 件下。几十毫瓦的输出功率以及一百多开尔文的苛刻低温严重阻碍 DPL 的发展。 一直到 80 年代中期,这种状况都没有什么大的改观,除了低功率 LD 直接应用 于通讯、信息存储与处理等方面, DPL 基本上没有得到应用和发展。

20世纪80年代以来,高效、高功率的LD在光学记录等领域的应用前景, 冲破了固态激光器发展的瓶颈,固态激光器的发展活跃起来^[30,31]。进入80年代

后期,随着半导体物理新研究成果的应用,LD的生产采用了量子阱(QW)和应变量子阱(SL-QW)等新结构;同时,分子束外延(MBE)和金属有机物化学气相沉积 (MOCVD)等晶体生长新工艺的出现也极大的促进了LD的发展,新的外延生长工艺能够精确控制生长,可以生长出原子尺寸量级的超薄层。新结构的LD阈值明显降低,振荡效率提高了数倍,输出功率成倍增长,使用寿命大幅提高。自此,LD的发展进入加速期:1983年单个LD输出功率超过100 mW;1988年 单条 100 μm 条宽的LD 最大连续输出达 3.7 W;1989年,美国 SDL 公司在研制出1 cm的线性阵列在散热温度为23℃时,连续输出功率 76 W,电光转换效率 39%;在这一时期,LD 列阵(LDA)输出功率大于13 W;准连续峰功率大于150 W;LD 面阵输出功率密度大于3 kW/cm²;电光效率达 60%。在这一时期LD 的输出功率得到显著提高,器件的效率、寿命与可靠性也均得以大幅提高。

到了 90 年代,随着 LD 技术的迅速发展,DPL 取得较大的发展。1992 年的 CLEO 会议上,美国报导了 1 cm 阵列连续波功率 121 W 输出和 45%的效率; 同年,Kasinski 等人报道了 LD 列阵侧面泵浦的 Nd:YAG 激光器输出能量为 1J 的巨脉冲^[32]。1993 年美国的劳伦斯·利佛莫尔(LLNL)国家实验室利用阵列微 沟道强迫水冷法,获得了平均输出功率超过 1000 W 的 LD;准连续工作状态的 激光器,峰值功率为 50 W、120 W、1500 W 和 3 kW 的系列已商品化,60 W 集 成化带光纤耦合输出的 LD 和峰值功率 350 kW 的 LD 也已商品化;同年, Norman Hodgson 和 Shalei Dong 等人利用三块尺寸为 7 mm×26 mm×191 mm 的 Nd: YAG 板条组成的 MOPA 系统产生了 1460 W 的输出功率,光束质量因子在 x 方向和 y 方向上都小于 4 mm·mrad。

1994年,U.J. Greiner 等人用 6 个 10 W 的二极管激光器列阵侧面泵浦 Nd: YAG 棒,得到 14 W 多模激光输出,光光效率为 29%^[33]。1995年,侧面泵浦 Nd: YAG 板条,获得 40 W TEM₀₀激光输出,72 W 多模激光输出,斜效率分别 为 22%和 36%^[34]。同年,侧面泵浦 Nd:YAG 棒,获得 45 W TEM₀₀激光输出, 300 W 多模激光输出,光光效率为 28%^[35]。1996年,D.Golla 等人将二极管激光 器阵列光纤耦合输出后作为泵浦源,端面泵浦 Nd: YAG 棒,得到了 60 W TEM₀₀ 模基频输出,光光效率为 25%,最大输出 235 W ^[36]。1997年,日本 Mitsubishi

Electric 公司的研究人员采用侧面泵浦 Nd:YAG 棒结构,得到了 80 W TEM₀₀ 激 光输出,光光转换效率为 20.7%,电光效率为 8.06%^[37]。1999 年,该公司改进 了泵浦结构,得到了 208 W 的 TEM₀₀ 激光输出,光光转换效率为 18.9% ^[38]。同 年,Eric C.Honea 和 Raymond J.Beach 等人采用 LD 泵浦 Yb: YAG 获得了 1080 W 的连续激光输出,光光转换效率 27.5%,该激光器采用了双棒串接结构^[39]。2004 年,LLNL 国家实验室采用 LD 泵浦 Nd: GGG 晶体实现 30 KW (150 J / 200 Hz) 热容运转 DPL 激光输出,光光转换效率约 20%,并计划实现 100 KW 热容激光 输出^[40]。热稳态运转模式下,单台全固态激光器最大平均。输出功率为 12 KW^[41]。 2005 年,日本的 T.Kozeki 和 M.Sakashita 等人报道了一种高平均功率 DPL 的放 大系统。该系统采用连续 LD 泵浦,在波长为 1064 nm,重复频率为 10 KHz 的 情况下,输出功率为 1 kW^[42]。同年,Keisuke Furuta 等人又报道一种输出平均功 率可达 1 kW 的 MOPA 系统。该系统在调 Q 运转情况下产生的激光的峰值功率 达到 2.3 MW。重复频率为 6 kHz,光束质量 $M^2=9^{[43]}$ 。

进入 21 世纪以来,激光二极管列阵性能(功率、体积、效率、寿命等)持续不断的改进以及商业市场不断扩大,导致激光二极管列阵的价格也不断的下降,据 Scifres 报道^[44],每瓦半导体激光器的价格正以每年 60%的速度下降。这些预测均表明,高功率半导体激光器价格的下降将会显著拓展高功率(kW 级)DPL的应用市场,DPL的研究重点转向了实用化和商品化方向发展,高效率,高功率和高光束质量的 DPL成为国内外激光领域最重要的前沿课题之一。目前,DPL已广泛应用于工业生产、娱乐、军事、医疗和通讯等领域。百瓦级及百瓦级以下功率输出的 DPL 在美国、德国和日本等发达国家均已实现了产业化。千瓦级 DPL产品也已在德国夫郎和费研究所、Rofin-Sinar 以及 Trumpf等公司出售。目前可售 DPL的最高平均功率已达 8 kW^[45](可售光纤激光器最高已达 20 kW^[46])。以目前发展状况来看,美日等国在激光惯性约束核聚变相关计划支持下开展了大量的研究工作^[47,48,49,50,51,52,53],代表了当今国际最高水平。尽管我国 DPL 研究起步较晚,但发展很快,在中小功率水平器件上基本与国际发展水平相当^[54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64]。但在高功率/高能量器件研究方面较国际研究水平相对落后,这主要受限于我国高功率激光基础工业发展水平,但是由于高功率 DPL

的广泛应用前景且在某些重要领域具有战略性作用,国内高功率 DPL 的研究也 正在迎头赶上。目前,中国科学院物理研究所已于 2003 年实现连续波全固态激 光输出大于 500W^[65],2004 年采用传统方式运转,成功实现大于 1 kW 功率激光 输出^[66]。2005 年研究组将输出功率又提高到 1354 W,光光效率达 41.0 %,同年 采用热容方式运转,成功实现 2277 W 的功率,光光效率达 53.1 %^[67]。这是目前 文献报道的国内全固态激光输出最高结果,最令人激动的是关键器件实现了国产 化。随着我国综合国力的提高和基础工业水平的进步,相信我国的全固态激光技 术研究将逐步进入一个快速发展的阶段,并逐步赶上发达国家高功率 DPL 的研 究水平。另外还要注意到,DPL 与非线性光学变频技术相结合,将有可能实现 高功率(几十瓦~百瓦)、宽调谐(深紫外~中红外)、高效率的新型全固态相 干光源,其应用领域将无限宽广,具有强大的生命力。

纵观近十年 LD 的的发展,就是一个性能不断提高,成本不断下降的过程。 这些都表明了高功率的 LD 的不断进步,这种高功率 LD 成为 DPL 的强大基础, 使 DPL 的研究迈上新的台阶并不断取得新的成果和进步。

1.2 全固态皮秒激光器技术的发展和应用^[68,69,70]

皮秒激光器是输出脉冲宽度在皮秒至百皮秒量级(10⁻¹²~10⁻¹⁰s)的激光器, 一般情况下只能采用锁模的方式来获得。



图 1.2 主动锁模和被动锁模原理图

在第一台激光器出现后六年的时间里, De Maria 和他的同事们展示了第一 台被动锁模 Nd: glass 激光器^[71],锁模技术出现。锁模技术按照调制方式的不同, 一般可以分为主动锁模和被动锁模^[72]。图 1-2 给出了主动锁模和被动锁模的基本 原理图。

主动锁模是通过在激光腔内加入驱动频率恰好为纵模频率间隔的相位调制器(FM)或者调幅器(AM),使得激光器产生重复频率为*f=c/2L*的锁模脉冲序列,其中c为真空中的光速,L为光学腔长。一般使用的器件可以是声光调制器,或者电光调制器。这种锁模技术的优点是,由于采取主动强迫的方式,所获得的脉冲序列质量较高,较稳定;缺点是要保证腔长和调制频率的严格匹配往往要采用复杂的伺服系统。主动锁模可以根据调制器的类型不同分为调频锁模(FM mode lock)和调幅锁模(AM mode lock)。

被动锁模激光器是通过在激光腔内加入可随激光强度或者相位变化的非线 性元件,如可饱和吸收体等,使得脉冲在腔内运转时不断被相关的效应所压缩, 如可饱和吸收效应等,最终获得稳定的脉冲输出。被动锁模的器件可以是外加的 可饱和吸收体,如染料,半导体可饱和吸收镜等,也可以是激光晶体本身,例如 在锁模 Ti:sapphire 激光器中,激光晶体本身在 Kerr 效应中扮演了快速可饱和吸 收体的角色。被动锁模激光器根据其原理不同,有添加脉冲锁模(APM),克尔透 镜锁模 (KLM),可饱和吸收体锁模等。这种技术的优点是无需复杂的伺服设 备,而且获得的脉冲宽度比主动锁模窄的多(可达几个飞秒量级,主动锁模一般 在数十到数百皮秒),缺点是脉冲的稳定性不如主动锁模。但是这些缺点今年来 随着锁模技术的进一步发展已经有了很大的改善。本文我们所研究的正属于这个 范畴。

除了以上两种基本的锁模方式之外,还有同步泵浦锁模。同步泵浦锁模是采 用一台锁模激光器脉冲序列泵浦另一台激光器,通过调制腔内增益的方法获得锁 模脉冲。同步泵浦锁模的关键是被泵浦激光器的谐振腔长度与泵浦激光器的谐振 腔长度相等或是它的整数倍,泵浦脉冲序列周期等于光子在激光器内的循环周期 或整数倍。同步泵浦锁模的优点是可以进一步压缩激光脉冲宽度,获得比泵浦脉