

华夏英才基金学术文库

# 全固态激光及非线性光学 频率变换技术

All Solid State Laser and Nonlinear Optical  
Frequency Conversion Technology

姚建铨 徐德刚 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

随着大功率半导体激光二极管的发展,采用激光二极管泵浦的全固态激光器(DPL)已成为当前激光技术研发的热点之一。非线性光学频率变换技术(NOFc)也随着新型非线性光学晶体材料的出现和应用的需要,得到了快速发展。本书针对这两个领域的实验和研究展开详尽的介绍,全书共分为11章,内容包括:全固态激光器和非线性光学频率变换的发展历史及研究现状;最常用的DPL工作物质及若干典型的新型NOFC材料;DPL的泵浦方式、热效应及其补偿方法,主要运转方式,即连续及脉冲运转(包括锁模运转);谐振腔设计;激光二极管泵浦的光纤激光器及全固态可调谐激光器;非线性光学频率变换技术和采用周期极化晶体的准相位匹配技术等。

全书总结了当代全固态激光技术及非线性光学频率变换技术的最新成就,不仅涵盖了国际、国内最新成果的介绍,而且还提供了大量的资料、图表及数据;不仅包含系统的理论分析、数据计算结果,而且尤为侧重对实用器件的结构、参数设计及实验例证的介绍和归纳。

本书可供高等学校激光及相关专业师生以及从事激光技术的研究人员、工程技术人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

全固态激光及非线性光学频率变换技术=All Solid State Laser and Non-linear Optical Frequency Conversion Technology/姚建铨,徐德刚著.—北京:科学出版社,2007

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-017943-2

I.全… II.①姚…②徐… III.①固体激光器②非线性光学-频率变换器 IV.①TN248.1②TN74

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第100920号

责任编辑:张敏 / 责任校对:邹慧卿  
责任印制:刘士平 / 封面设计:陈敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年6月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年6月第一次印刷 印张:51

印数:1—2 500 字数:910 000

定价:120.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换(科印))

## 作者简介



### 姚建铨

教授，中国科学院院士，激光与光电子科学家

1939年1月出生于上海。1965年天津大学研究生毕业。现任天津大学精密仪器与光电子工程学院教授、博士生导师、学位委员会主任、名誉院长、激光与光电子研究所所长。1997年当选为中国科学院院士。

姚建铨1980~1982年在美国斯坦福大学及加州大学等地做访问学者。应邀在美国普林斯顿大学、宾夕法尼亚大学、南加州大学及英国、法国、德国、中国香港、中国台湾等地讲学及合作研究。多年从事激光与非线性光学频率变换技术的研究，在高功率倍频激光器、高功率固体激光器、可调谐激光器、非线性光学及激光应用技术等方面取得一系列重要研究成果，提出并发展了双轴晶体最佳相位匹配计算的理论与方法，被称为“姚技术”、“姚方法”。在国际上率先建立了双轴晶体最佳相位匹配计算一类高斯分布理论—准连续高功率倍频激光器—准连续激光调谐系统的技术体系。近十年来，在高功率全固态激光器和周期极化晶体—准相位匹配技术方面的研究达到国际先进水平。目前正开展太赫兹波的研究。

姚建铨院士曾获得国家发明二等奖、国家教委及天津科技进步二等奖（4次）、军队科技进步一等奖、中科院特等奖等。在国内外发表论文600余篇。已培养出13名博士后，47名博士生及55名硕士生。

姚建铨院士兼任中国光学学会理事，激光专业委员会副主任。哈尔滨工业大学“可调谐激光技术”国家重点实验室学术委员会副主任，天津大学—南开大学“光电信息技术科学”教育部重点实验室学术委员会主任，山东大学“晶体材料”国家重点实验室、北京交通大学“全光网络与现代通信网”教育部重点实验室学术委员会委员。任 *Chinese Optics Letters*、《光学学报》等编委。南京大学、中山大学、华中科技大学等兼职教授。天津市激光学会理事长。兼任全国政协委员、天津市政协副主席、天津市民进主委、民进中央常委、天津市科协副主席、天津市专家协会会长、天津市留学人员联谊会会长等。

姚建铨院士是“国家级有突出贡献中青年专家”、“全国高校先进科技工作者”、“全国优秀科技工作者”及“天津市特等劳模”，享受国务院特殊津贴。

## 徐德刚



1974 年出生，山东省胶南人。2005 年毕业于天津大学物理电子学专业，获工学博士学位，现为天津大学精密仪器与光电子工程学院教师。2006 年作为天津市优秀博士后，被公派到英国曼彻斯特大学光子科学研究所，进行学术访问和学习。已完成或目前正在承担的科研项目有 7 项，包括国家级 2 项，天津市科委 4 项。其中，在研项目有“光学 Cherenkov 效应研究”（天津市科委项目，项目负责人），“基于非线性光学差频技术产生 THz 辐射源的研究”（博士后科学基金项目，项目负责人），“全固态真彩色激光电视样机产业化研究”（天津市科委项目，项目负责人）；已完成项目有“高功率、高重复频率绿光光源的研究”（天津市科委项目，经费 150 万，第二完成人），“全固态激光彩色显示系统的关键技术研究”（天津市攻关计划，经费 250 万，第二完成人），“全固态激光大面积全色显示关键技术研究”（国家 863 计划，经费 150 万，第三完成人）。在 *Optics Express*、*Optics Communications*、*Chinese Physics Letters* 以及 *Chinese Optics Letters* 等重要刊物及国际会议上发表论文 20 多篇；获得实用新型专利 3 项。

## 序

激光与光电子技术是信息技术的支柱及核心技术之一，对现代科学技术的发展将产生巨大的推动作用。20世纪80年代以来，随着大功率半导体激光二极管的发展，采用激光二极管泵浦的全固态激光器（DPL）以其效率高、体积小、光束质量好等优点，在众多的激光技术中异军突起，成为当前激光技术研发的热点之一。伴随着新型非线性光学晶体材料的出现和应用的需要，非线性光学频率变换技术（NOFC）也得到了快速的发展，它极大地拓宽了激光的波长范围和应用领域。因此，全固态激光和非线性光学频率变换技术的研究不仅具有重要的学术意义，而且具有重要的应用价值。

天津大学姚建铨院士和他领导的研究集体长期致力于全固态激光和非线性光学频率变换技术领域的研究，在理论和实验上取得了许多有创造性的、高水平的重要成果。十年前出版的《非线性光学频率变换及激光调谐技术》（科学出版社）一书，是他们第一阶段研究成果的总结。我荣幸地曾为该书作过序。自20世纪90年代初，姚建铨院士又带领研究集体在全固态激光技术领域进行了艰苦而卓有成效的研究工作。事隔十年，他与他的学生徐德刚博士系统全面地总结了有关全固态激光器和非线性光学频率变换领域的理论和实验研究成果，写出了这本专著——《全固态激光及非线性光学频率变换技术》。该书总结了当代全固态激光技术及非线性光学频率变换技术的最新成就，是他们在这一领域的研究成果的总结和升华，是《非线性光学频率变换及激光调谐技术》一书的发展，也是我国在这一领域内自己撰写的、理论和实践并茂且特色鲜明的科技专著。

该书既有系统的理论分析和国内外的最新研究成果，又有实用器件的结构、参数设计及实验例证。全书内容包括：DPL工作物质及若干典型的新型NOFC材料、泵浦方式、热效应管理、谐振腔设计、DPL的主要运转方式、全固态光纤激光器、全固态可调谐激光器及非线性光学频率变换技术，特别是论述了周期极化晶体——准相位匹配技术。该书将DPL与NOFC有机地结合，是一本理论和实践结合、内容丰富、实用性很强的科技专著。相信该书的出版将会有力地促进我国激光技术的发展。



2007年1月20日于清华大学

# 前 言

自 1960 年世界上第一台激光器诞生以来, 各类激光器及激光技术发展极为迅速。激光技术在国民经济各个领域, 特别是科学研究及国防建设等领域得到了广泛的应用, 已经成为现代科学技术及社会发展的重要支柱之一。其中, 固体激光器的发展尤为突出, 它在材料加工、军事与医学等方面呈现出巨大的应用潜力; 但固体激光器具有的转换效率较低的固有不足, 大大限制了它的发展, 高功率激光器件更受其限制, 致使 20 世纪 70 年代以后固体激光器的发展日趋缓慢。

20 世纪 80 年代以来, 科学家们针对传统固体激光器的不足, 摒弃了闪光灯泵浦方式, 采用与固体激光介质的吸收峰相匹配的激光二极管泵浦方式, 使固体激光器的效率大大提高, 从而达到减少热效应, 改善光束质量及提高稳定性的目的, 同时, 这类激光器还具有体积小和重量轻的特点。这类激光器在学术上称“激光二极管泵浦的固体激光器”(laser diode pumped solid state laser, LDPSL 或 DPL), 亦称“全固态激光器”(all solid state laser)。全固态激光器的问世是激光技术领域的一场革命, 由于固体激光工作介质覆盖的波段广, 运转方式多样, 加之可配合各种非线性光学频率变换技术(NOFC), 因而 DPL 具有逐步取代气体、液体及传统固体激光器的可能性。同时, DPL 也进一步推动了激光应用技术的发展。

有关激光二极管泵浦的固体激光器的研究、开发及产业化, 已成为当今国际激光技术发展的热点之一, 每年有数千篇相关论文发表, 已成为众多国际、国内学术会议的中心议题之一。目前国外尚未有系统介绍 DPL 的书籍, 国内仅有重庆师范大学戴特力教授编著的《半导体二极管泵浦的固体激光器》(四川大学出版社, 1993, 23 万字)。该书内容全面, 提供了四百余篇参考文献。近十多年来, 国际上 DPL 技术又有了很大的发展, 器件及技术水平显著提高, 特别是大功率 DPL 的发展, 使激光应用技术进入了崭新的阶段。因此, 很有必要系统地总结有关激光二极管泵浦的固体激光器的理论、实验研究、设计方法及相应的技术, 以推动 DPL 激光技术的发展。

全书共分 11 章: 第 1 章概述 DPL 和 NOFC 的发展历史及研究现状; 第 2 章论述最常用的 DPL 工作物质及若干典型的新型 NOFC 材料; 由于 DPL 与常规

固体激光器的重要区别在于泵浦方式及热效应管理,第3和4章专门论述了DPL的泵浦方式、热效应及其补偿方法;谐振腔设计是提高DPL的输出及改善光束质量的关键,第5章就此做了专门论述;第6和7章分别论述了DPL的主要运转方式,即连续及脉冲运转(包括锁模运转);作为DPL的重要分支,激光二极管泵浦的光纤激光器及全固态可调谐激光器分别在第8和9章中进行论述;为扩展DPL的工作波段,除了采用可调谐技术外,十分重要而实用的是采用非线性光学频率变换技术,第10章是在《非线性光学频率变换及可调谐激光技术》(姚建铨.科学出版社,1995,60万字)一书的基础上发展而成的;采用周期极化晶体的准相位匹配技术是非线性光学频率变换技术的国际最新发展及成就,作为本书的特色之一,第11章对其做了深入论述。特别要指出的是,除了在第10和11章专门论述NOFC以外,其他章节也有关于DPL与NOFC相结合的内容及论述。本书含两个附录,附录I为我们研究所发表的有关DPL和NOFC论文的目录;附录II为有关非线性频率变换和谐振腔计算的Matlab源程序。

本书总结了当代全固态激光技术及非线性光学频率变换技术的最新成就,既介绍了国际、国内的最新成果,又提供了大量的资料、图表及数据;既有系统的理论分析、数据计算结果,又有实用器件的结构、参数设计及实验例证。书中900余个公式及700余幅图表将提供读者有关全固态激光及非线性光学频率变换技术的原理、理论及有关技术。本书中部分理论及相关技术对其他激光及相关领域也具有普遍的意义。本书有一定的理论体系,可供高等学校有关专业师生,从事激光技术的研究人员、工程技术人员参考。

本书是天津大学激光与光电子研究所多年来研究工作的总结,研究所全体成员二十多年来艰苦而卓有成效的工作奠定了本书的基础。本书很多内容取材于本人及本人的研究生的论文,周睿、张百钢、丁欣、张强、蔡志强及温午麒等曾为本书的初稿提供了资料,在此一并表示感谢。本书的完成要感谢重庆师范大学戴特力教授,他曾对本书提出了有益的建议;感谢德国柏林工业大学H. Weber教授,法国ENS(Cachan)的J. Zyss教授、Zondy教授,香港科技大学郭海成教授及台湾大学杨志忠教授对本书部分内容的有益建议。同时,感谢张玲博士为全书的文字进行的精心的校正。

本书的合著者徐德刚博士除撰著之外,还在图文修订方面做了大量的工作,师生通力合著,甚为愉快。

今年正值我国光学事业的奠基人、开拓者——王大珩院士的90寿辰。回忆

自己从事研究工作的经历，王先生坦荡而博大的胸怀、渊博而深邃的知识、孜孜不倦为科学而献身的精神，始终是激励我在激光领域拼搏的动力。长期以来，我受到王先生的鼓励和支持，从学术思想的启迪到研究领域的拓展等诸多方面，深深感受到先生的亲切教诲与关爱，使我终生难忘。作为晚辈，我谨以此书奉献给恩师。

2005年是天津大学建校110周年，也是苏州中学的百年校庆、千年府学纪念之年。在我国科学技术欣欣向荣的今天，我谨以本书，奉献给我国的激光界及哺育我成长的母校——无锡胶南中学（现为无锡堰桥中学）、苏州中学和天津大学，献给几十年如一日全心支持及帮助我的家人。

如果本书能对从事全固态激光及非线性光学频率变换技术的研究人员、科技人员和高等学校师生起到参考作用，对我国的激光及光电子技术有一定推动作用的话，我将十分欣慰。

姚建铨

2005年12月30日于天津大学

# 目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 全固态激光器及非线性光学频率变换技术发展的历史	3
1.1.1 萌芽期：20 世纪 60 年代	3
1.1.2 缓慢发展时期：20 世纪 70 年代	4
1.1.3 蓬勃发展时期：20 世纪 80 年代	6
1.1.4 飞速发展时期：20 世纪 90 年代至今	11
1.2 全固态激光器及频率变换技术的发展	26
1.2.1 高功率 DPL	26
1.2.2 应用于军事领域的 DPL	27
1.2.3 大功率三基色 DPL	27
1.2.4 紫外与深紫外波段的 DPL	28
1.2.5 可调谐全固态激光器	28
参考文献	29
第 2 章 全固态激光器的工作物质及非线性光学材料	48
2.1 全固态激光器的工作物质	48
2.1.1 掺钕钇铝石榴石 (Nd:YAG)	48
2.1.2 钕玻璃 (Nd:Glass)	54
2.1.3 掺钕钒酸钇 (Nd:YVO <sub>4</sub> )	58
2.1.4 掺钕氟化钇锂 (Nd:YLF)	62
2.1.5 掺钕铝酸钇 (Nd:YAP)	64
2.1.6 掺钕铝酸镁镧 (Nd:LMA)	68
2.1.7 掺钕钒酸钷 (Nd:GdVO <sub>4</sub> )	70
2.1.8 多晶 Nd:YAG 陶瓷	72
2.1.9 Er:YAG	77
2.1.10 铒玻璃	78
2.1.11 Tm, Ho:YVO <sub>4</sub>	79

2.1.12	Ho, Yb: YVO <sub>4</sub> .....	80
2.1.13	Yb: YAG .....	82
2.1.14	以过渡金属离子为激活离子的激光晶体 .....	89
2.2	非线性光学晶体材料 .....	89
2.2.1	磷酸氧钛钾 (KTiOPO <sub>4</sub> , KTP) 晶体 .....	90
2.2.2	偏硼酸钡 ( $\beta$ -BaB <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , BBO) 晶体 .....	99
2.2.3	三硼酸锂 (LiB <sub>3</sub> O <sub>5</sub> , LBO) 晶体 .....	105
2.2.4	硼酸铯锂 (CsLiB <sub>6</sub> O <sub>10</sub> , CLBO) 晶体 .....	112
2.2.5	三硼酸铋 (BiB <sub>3</sub> O <sub>3</sub> , BIBO) 晶体 .....	120
2.2.6	氟硼酸铍钾 (KBBF) 晶体 .....	123
	参考文献 .....	130
<b>第3章</b>	<b>全固态激光器的光泵浦系统</b> .....	<b>135</b>
3.1	激光二极管的基本原理及器件结构 .....	135
3.1.1	激光二极管基本原理 .....	136
3.1.2	典型激光二极管器件结构 .....	137
3.1.3	高功率激光二极管阵列 .....	141
3.2	端面泵浦耦合系统 .....	144
3.2.1	光学透镜耦合端面泵浦结构 .....	145
3.2.2	光纤耦合端面泵浦结构 .....	148
3.2.3	端面泵浦耦合计算和设计 .....	151
3.3	高功率激光二极管阵列泵浦耦合系统 .....	169
3.3.1	高功率激光二极管阵列泵浦耦合结构 .....	169
3.3.2	侧面泵浦耦合计算和设计 .....	174
	参考文献 .....	181
<b>第4章</b>	<b>全固态激光器的热效应</b> .....	<b>185</b>
4.1	侧面泵浦全固态激光器的热效应 .....	185
4.1.1	激光晶体中的温度分布及热效应 .....	186
4.1.2	Nd: YAG 棒的特性与温度的关系及其影响 .....	194
4.1.3	Nd: YAG 棒中的泵浦光分布及其影响 .....	197
4.1.4	热效应的消除及补偿 .....	201
4.1.5	Nd: YAG 热效应的测量及结果 .....	203
4.2	端面泵浦全固态激光器的热效应 .....	207
4.2.1	端面泵浦全固态激光器中的热效应 .....	207

4.2.2	热透镜效应的测量	225
4.2.3	热效应的缓解和补偿	228
4.3	高功率全固态激光器中非线性晶体的热效应	232
4.3.1	非线性晶体中的自热效应	232
4.3.2	KTP 倍频晶体中的温度分布	233
4.3.3	KTP 倍频晶体中的热效应对倍频转换的影响	236
4.3.4	高功率内腔倍频激光器	241
	参考文献	246
<b>第 5 章</b>	<b>全固态激光器的谐振腔技术</b>	<b>254</b>
5.1	谐振腔设计的基本原理	254
5.2	基模动态稳定腔技术	256
5.2.1	基模动态稳定腔的基本原理	256
5.2.2	基模动态稳定腔的失调灵敏度	262
5.2.3	基模动态稳定腔的设计准则	264
5.3	双棒串接腔和热致双折射补偿腔	268
5.3.1	双棒串接腔	268
5.3.2	热致应力双折射补偿技术	276
5.4	像散腔的计算和设计	280
5.4.1	像散的产生	280
5.4.2	像散补偿	281
5.4.3	稳区及腔内光束分布	284
5.5	其他典型谐振腔的设计举例	289
5.5.1	棒成像非稳腔和近共心非稳腔	289
5.5.2	主动振荡-功率放大 (MOPA) 系统及多程放大、相位共轭技术	291
5.6	类高斯分布理论	294
5.6.1	混合模的横向分布	295
5.6.2	混合模光束的特征	300
5.6.3	类高斯光束在均匀介质中的传播及变换	301
5.6.4	混合模系数 $M$ 的测量	302
	参考文献	305
<b>第 6 章</b>	<b>全固态连续激光器</b>	<b>308</b>
6.1	端面泵浦的 Nd:YAG 晶体准三能级系统连续运转特性分析	308
6.1.1	端面泵浦的 Nd:YAG 激光晶体准三能级系统模型	309

6.1.2	反转粒子数密度分布	314
6.1.3	归一化输出特性	319
6.2	端面泵浦全固态连续激光器	329
6.2.1	大功率连续运转 946nm Nd:YAG 激光器	329
6.2.2	大功率连续运转全固态蓝光激光器	341
6.2.3	大功率连续运转全固态 Nd:YVO <sub>4</sub> 1342/671nm 激光器	352
6.3	侧面泵浦高功率全固态连续激光器	362
6.3.1	基于 Nd:YAG 晶体的高功率全固态激光器	365
6.3.2	基于陶瓷 Nd:YAG 晶体的高功率全固态激光器	372
6.4	全固态多波长激光器	374
6.4.1	全固态激光器多波长同时振荡条件	374
6.4.2	全固态 Nd:YAG 多波长激光器	376
6.4.3	全固态 Nd:YVO <sub>4</sub> 多波长激光器	401
	参考文献	413
<b>第 7 章</b>	<b>全固态脉冲激光器</b>	<b>424</b>
7.1	内腔倍频调 Q 激光器理论分析	424
7.1.1	内腔倍频调 Q 激光器速率方程	424
7.1.2	速率方程的求解及结果分析	427
7.1.3	适合高功率激光器的声光 Q 开关	429
7.2	高功率全固态调 Q 内腔倍频绿光激光器	431
7.2.1	采用双端倍频输出方案	432
7.2.2	采用双调 Q 和强冷却倍频晶体方案	433
7.2.3	采用单调 Q 器件和热稳腔方案	436
7.2.4	采用 LBO 倍频晶体方案	438
7.2.5	采用高温 KTP 倍频晶体方案	440
7.3	高功率全固态准连续红光激光器	442
7.3.1	基于侧面泵浦直腔结构的全固态红光激光器	442
7.3.2	基于侧面泵浦折叠腔结构的全固态红光激光器	445
7.4	准连续运转掺钛蓝宝石激光器	447
7.4.1	准连续钛宝石激光器结构设计	447
7.4.2	实验结果分析	452
7.5	全固态锁模激光器	456
7.5.1	SESAM 被动锁模激光器的发展现状	457

7.5.2	激光谐振腔设计程序	463
7.5.3	SESAM 皮秒锁模激光器	471
	参考文献	485
<b>第 8 章</b>	<b>光纤激光器及放大器</b>	<b>491</b>
8.1	光纤激光器简介	491
8.1.1	光纤激光器	491
8.1.2	光纤激光器的主要特点	493
8.2	掺稀土光纤制作及光纤特性	495
8.2.1	掺稀土离子光纤的制作技术简介	495
8.2.2	光纤特性	499
8.3	光纤激光器的基本理论	506
8.3.1	光纤波导中的模式理论	506
8.3.2	光纤激光器输出特性理论	512
8.3.3	双包层光纤激光器的吸收特性	515
8.3.4	内包层形状对吸收效率的影响	518
8.3.5	光纤激光器的耦合技术	522
8.4	各种类型光纤激光器	528
8.4.1	连续运转光纤激光器	528
8.4.2	脉冲运转光纤激光器	534
8.5	光纤放大器	544
8.5.1	光纤放大器的分类	544
8.5.2	光纤放大器的研究进展和发展趋势	547
8.5.3	宽带光纤放大器	551
	参考文献	568
<b>第 9 章</b>	<b>全固态可调谐激光器</b>	<b>578</b>
9.1	可调谐激光晶体材料	578
9.1.1	过渡金属离子掺杂的激光材料	578
9.1.2	稀土离子掺杂的固体激光材料	587
9.1.3	掺钛蓝宝石晶体 ( $\text{Ti}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$ )	597
9.2	全固态可调谐激光器的波长调谐和线宽压窄技术	603
9.2.1	棱镜调谐与线宽压窄	603
9.2.2	光栅调谐与线宽压窄	608
9.2.3	双折射滤波器的调谐与线宽压窄	610

9.2.4	标准具调谐和线宽压窄 .....	620
9.2.5	种子注入技术 .....	623
9.3	宽带可调谐钛宝石激光器 .....	633
9.3.1	准连续运转掺钛蓝宝石激光器的时间特性 .....	633
9.3.2	输出脉冲宽度及延迟时间随各参数的变化关系 .....	636
9.3.3	准连续运转钛宝石激光器的输出功率 .....	641
	参考文献 .....	644
<b>第 10 章</b>	<b>非线性光学频率变换技术</b> .....	<b>652</b>
10.1	三波相互作用的耦合波方程 .....	652
10.1.1	三波相互作用的稳态耦合波方程 .....	652
10.1.2	三波相互作用的瞬态耦合波方程 .....	653
10.1.3	曼莱-罗威关系 .....	655
10.1.4	光倍频及光混频的稳态小信号解 .....	655
10.1.5	高斯光束倍频效率的计算 .....	657
10.1.6	高斯光束的内腔倍频 .....	658
10.2	非线性光学晶体性质及单轴晶体相位匹配技术与有效非线性系数的计算 .....	659
10.2.1	非线性光学晶体的性质 .....	659
10.2.2	单轴晶体的相位匹配及非线性系数的计算 .....	665
10.3	双轴晶体的相位匹配及非线性系数的计算 .....	674
10.3.1	双轴晶体的相位匹配的计算 .....	674
10.3.2	双轴晶体中三波相互作用的有效非线性系数 $d_{\text{eff}}$ 计算 .....	677
10.3.3	双轴晶体中温度对三波相互作用相位匹配及有效非线性系数的影响 .....	684
10.4	非线性光学晶体中三波相互作用允许参量的计算 .....	687
10.4.1	单轴晶体中三波相互作用的允许参量计算 .....	687
10.4.2	双轴晶体中三波相互作用的允许参量计算 .....	693
10.5	双轴晶体中光波走离角及其对三波相互作用的影响 .....	704
10.5.1	双轴晶体中光波的走离角计算 .....	704
10.5.2	双轴晶体中光波走离角对三波相互作用的影响 .....	706
	参考文献 .....	710
<b>第 11 章</b>	<b>全固态准相位匹配技术</b> .....	<b>712</b>
11.1	周期极化晶体 .....	712
11.1.1	几种获得周期极化晶体的方法 .....	713

11.1.2	周期极化晶体制作的发展过程 .....	714
11.1.3	几种极化晶体的比较 .....	715
11.1.4	国内外研究现状 .....	720
11.2	准相位匹配技术和光学参量振荡器的基本原理 .....	721
11.2.1	准相位匹配技术的基本原理 .....	721
11.2.2	准相位匹配技术的优点 .....	725
11.2.3	光学参量振荡器的基本原理 .....	726
11.3	周期极化铌酸锂晶体的光学参量振荡器理论 .....	732
11.3.1	准连续 OPO 角度调谐理论曲线计算 .....	732
11.3.2	准连续 OPO 其他调谐方式理论曲线计算 .....	736
11.4	温度调谐 PPLN 光学参量振荡器 .....	739
11.4.1	共焦腔结构 .....	741
11.4.2	平凹腔结构 .....	742
11.4.3	多种非线性效应 .....	746
11.5	角度调谐 PPLN 光学参量振荡器 .....	748
11.5.1	角度调谐 PPLN-OPO 泵浦源 .....	748
11.5.2	角度调谐 OPO 和 OPG .....	752
	参考文献 .....	759
附录 I	天津大学激光与光电子研究所发表的有关 DPL 及 NOFC 的论文 ..	765
附录 II	有关非线性频率变换和谐振腔计算的 Matlab 源程序 .....	784

# 第 1 章 概 述

1960 年,美国科学家梅曼用脉冲氙灯激励红宝石晶体,获得 694.3nm 的激光输出,从此诞生了世界上第一台固体激光器。自此以后,惰性气体灯成了各类固体激光器重要的泵浦源,它们具有输出功率高,光束质量好,固体介质寿命长且坚固等优点。但气体放电光源的电光转换效率不高(小于 15%);辐射光谱太宽(紫外至红外),固体激光介质的吸收谱带宽有限,因而激光效率较低(小于 5%);无用的紫外辐射使激光晶体寿命降低;多余的红外辐射加热激光晶体,致使激光束质量变差,并且为去除多余的热量还需要庞大的水冷系统。另外,气体放电光源寿命短、易碎、更难于模块化生产。这使得闪光灯泵浦的固体激光器诞生 40 年来,虽然应用领域已非常广泛,但仍处于多品种、高损耗、低效率状态。

半导体激光器采用电注入式 PN 结发射激光,谱宽很窄(纳米量级),波长可调,量子效率接近 1,其大功率器件的激光效率超过 50%,寿命长达万小时,且体积小,十分牢固。虽然半导体激光器的光束质量很差,发散角也很大(几十度),并且不对称,但是它的输出波长可以调整到激光晶体吸收带,因而效率极高,热效应也随之大大降低。从激光器诞生开始,科学家们就预言,输出光波长在 800~900nm 之间的窄带半导体光辐射二极管,能够为固体激光介质中的几种稀土离子提供有效的泵浦。在科研人员意识到以半导体激光器泵浦固体激光介质的潜在优势后,一代新型固体激光器——全固态激光器诞生了,这可以说是固体激光技术的一场革命。

全固态激光器(all solid state laser)是指用激光二极管(laser diode, LD)代替闪光灯泵浦固体激光增益介质的激光器,也称为激光二极管泵浦的固体激光器(laser diode pumped solid state laser, LDPSSL 或 DPL)。图 1.1 所示为典型

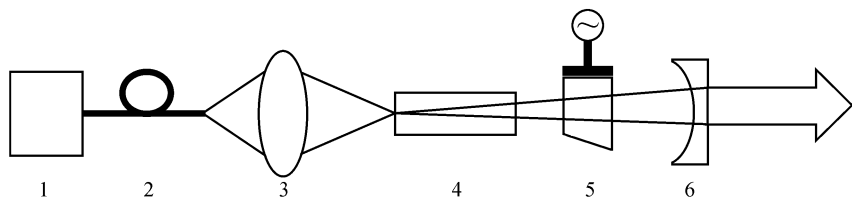


图 1.1 激光二极管泵浦的固体激光器装置图

1. 激光二极管; 2. 光纤; 3. 耦合透镜; 4. Nd:YAG; 5. 声光 Q 开关; 6. 输出镜

的激光二极管端面泵浦的固体激光器的装置图。它集两种激光器的优势于一体,具有转换效率高、器件结构紧凑、体积小、寿命长、可靠性高、结构牢固、光束质量好、输出能量大、峰值功率高、工作介质覆盖的波段广及运转方式多样等优点,与非线性光学频率变换技术相结合,可实现多种波长的运转,已成为新一代的优质相干光源,成为当前激光技术发展的主要方向,也进一步推动了众多激光应用技术的发展。

DPL 激光器在民用方面,如激光加工、激光通信及激光医疗等方面有极大的市场潜力;而在军事应用领域,采用 808nm 大功率半导体激光器作为泵浦源的小型化 Nd:YAG,已在激光测距、测速、激光制导、激光引爆及激光雷达等方面广泛应用。DPL 激光器与钕玻璃激光功率放大器结合,是实现激光受控核聚变的重要手段,在激光核引爆和核能的和平利用上都有重大的意义。在空间应用及天地平台间的空间光通信领域,半导体大功率激光器受到很大重视。美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室(LLNL)在“防御者”计划中研究的反导弹武器,采用 DPL 系统的功率为  $10^6$  W 激光器,能同时对付大量导弹目标,在 100~150km 处拦截助推阶段的 TBM,重量仅 1000kg,比化学激光武器体积小 1~2 个数量级。林肯实验室已研制了能精确跟踪火箭卫星的 DPL Nd:YAG 激光雷达。由此可见,激光武器不仅在战术上,而且在战略武器中也扮演着极为重要的角色。在各类精密制导武器中,使用于海湾战争中的基于 DPL 的光电子武器占 8%~10%,在“沙漠之狐”行动中已达 70%,而在科索沃战争中则上升到 90%。美国等军事大国已将大功率半导体激光器放在禁运之列。可见,在未来国家安全防务中,缺少这类光电子武器,后果不堪设想。

自 20 世纪 60 年代提出 DPL 以来,全世界范围内迅速掀起了研究热潮,经过 20 多年的发展,人们在 90 年代实现了中低功率 DPL 器件的实用化和产业化。许多传统激光器,如离子激光器、金属蒸气激光器、He-Ne 激光器、准分子激光器、染料激光器以及灯泵浦固体激光器等的大部分市场正在被 DPL 所取代。例如,采用大功率 LD 光纤模块泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体,使用 KTP 或 LBO 等非线性晶体倍频产生连续波绿光(532nm)激光器,输出功率 5~10W,与相同功率的氩离子激光器(488nm, 514nm)相比,耗电仅为其 1%,体积只有其 10%,寿命提高数倍,并且没有氩离子激光所必需的米级长度的石英玻璃气体放电管,激光输出的稳定性和信噪比亦明显提高。90 年代,DPL 的开发成了国际激光发展的主要方向,进展极快,年产值自 1996 年以来呈直线上升,1996~1997 年度增长 57% 以上(如图 1.2 所示)。由于很多支柱产业需求的带动,DPL 的发展正处在规模产业的前夜,呈现出前所未有的上升势头。据不完全统计,今后仅商用器件的生产就可达 2 亿美元/年(军用市场与商用市场大体相当),预计

2010 年以后将超过 20 亿美元/年。

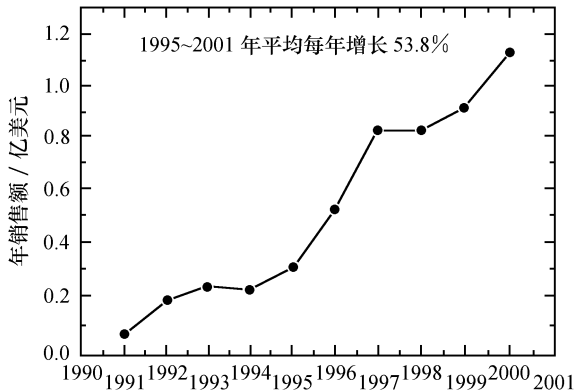


图 1.2 全固态激光器国际商用市场发展状况

在这一章中，我们主要是对全固态激光器及非线性光学频率变换技术的发展及在激光与光电子领域中的地位与作用进行全面的介绍，概述了它们的基本原理、特点及发展历史。

## 1.1 全固态激光器及非线性光学频率变换技术发展的历史

自从 1963 年 R. Newman 首次提出全固态激光器的概念以来<sup>[1]</sup>，经过四十多年的发展，全固态激光技术已经相当成熟。现在我们将这四十年分为四个阶段，并分别对全固态激光器在这四个阶段的发展状况进行综述。

### 1.1.1 萌芽期：20 世纪 60 年代

20 世纪 60 年代是全固态激光器的萌芽阶段，在此阶段，科学家们意识到了激光二极管泵浦代替闪光灯泵浦固体激光材料所能带来的优势。但是，由于半导体工艺的限制（激光二极管的寿命短、阈值高、效率低，需要在极低的温度下发射谱线才能与增益材料的吸收峰相对应），实际可用的全固态激光器并没有出现，对全固态激光器的相关报道也比较少。1962 年，研究人员<sup>[2~5]</sup>发现 GaAs PN 结可以产生受激发射，并对其激光辐射特性进行了研究。1963 年，R. Newman<sup>[1]</sup>用 GaAs 二极管 880nm 附近的辐射去泵浦 Nd : CaWO<sub>4</sub>，得到了 1.06 $\mu$ m 的荧光输出。1964 年，美国 MIT 林肯实验室的 Keyes 和 Quist<sup>[6]</sup>展示了世界上第一台激光二极管泵浦的固体激光器，这台 DPL 以 GaAs 二极管为泵浦源，工作物质为 CaF<sub>2</sub> : U<sup>3+</sup>，输出波长为 2.631 $\mu$ m。由于当时的 LD 必须要冷却才能够获得激光输出，因此整个装置在液氮中冷却至 4K（如图 1.3 所示）。Keyes 和 Quist 认

识到 LD 泵浦方式相对于闪光灯泵浦方式的优点, 指出, GaAs 激光二极管是  $\text{Nd}^{3+}$  激光器的理想泵浦源, 这种泵浦方式应该比闪光灯泵浦方式效率更高, 从而更易于减少增益介质中的热沉积和高能量激光器的热效应。Ochs 和 Pan-kove<sup>[7]</sup> 采用波长为 720nm 的发光二极管 (LED) 阵列泵浦  $\text{CaF}_2 : \text{Dy}^{2+}$ , 获得了波长为  $2.36\mu\text{m}$  的激光输出, 同时为了提高 LED 输出功率, 整个实验装置被冷却到 1.9K。经过这些早期的工作之后, 考虑到 Nd:YAG 具有极好的光谱特性, 科研人员的注意力开始向 Nd:YAG 转移。1968 年, 麦道宇航公司的 Ross<sup>[8]</sup> 在 170K 的低温环境中, 实现了世界上第一台用 GaAs 激光二极管 (867nm) 横向泵浦的 Nd:YAG 激光器, 并对 DPL 的优点作了客观的评述。

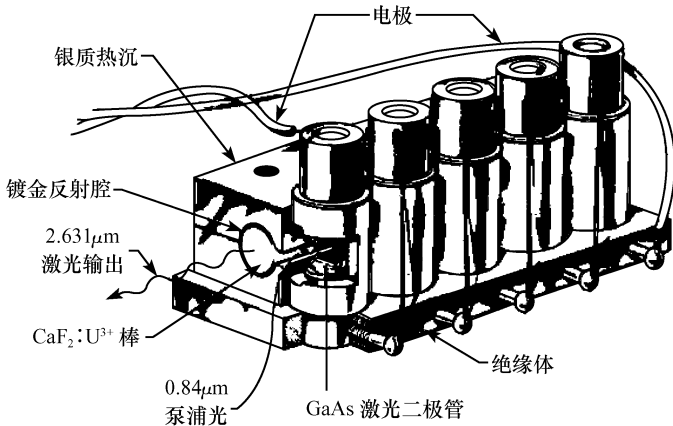


图 1.3 Keyes 的实验装置示意图

### 1.1.2 缓慢发展时期：20 世纪 70 年代

由于半导体生长工艺仍然没有突破, 激光二极管泵浦源的低功率和低转换效率阻碍了全固态激光器技术上的进步, 所以说, 20 世纪 70 年代是全固态激光器缓慢发展的阶段。当时, 大多数的试验还只是在低温或近室温下<sup>[9,10]</sup> 进行, 常温运转的试验装置刚开始出现。这一时期 DPL 的研究工作主要集中在 Nd:YAG 激光器的研发、探索新的增益材料以及波导激光器三方面。

1971 年, Ostermayer<sup>[11,12]</sup> 等人首次实现了能够在室温条件下连续运转的激光二极管泵浦 Nd:YAG 激光器, 全固态激光器的发展出现一缕曙光。端面泵浦 (又称纵向泵浦) 方式和侧面泵浦 (又称横向泵浦) 方式相继出现。1972 年, Barnes<sup>[13]</sup> 首次建立了 LED 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器模型, 并给出了阈值和斜效率的近似表达式。Conant 和 Reno<sup>[14]</sup> 采用 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 晶体, 获得

了 120mW 的激光输出, 斜效率为 6%。Jackson 和 Rice<sup>[15]</sup> 采用高重复频率短脉冲 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 得到准连续激光输出。Farmer 和 Kiang<sup>[16]</sup> 比较全面地研究了 LED 侧面泵浦的全固态激光器, 在泵浦光耦合、器件设计以及 GaAlAs 发光二极管的输出光谱等方面做了大量的工作, 并用速率方程理论分析了输出功率, 尤其是使用折射率匹配技术提高了泵浦光的耦合效率, 从而极大提高了全固态激光器的效率。这一时期, 苏联学者关于 LED 侧面泵浦的全固态激光器工作也取得了一定的进展<sup>[17~21]</sup>。

在最初的实验中, 由于全固态激光器运转工作点刚刚超过阈值, 所以输出功率都很低<sup>[17,18]</sup>, 后来, Zakgeim<sup>[19]</sup> 获得了 1W 的准连续输出, 这是当时采用 LED 侧面泵浦 Nd:YAG 所达到的最高水平。在 Bilak<sup>[20]</sup> 的实验中, LED 阵列被排列在 Nd:YAG 棒的四周, 能够输出 1.06 $\mu\text{m}$  或 1.32 $\mu\text{m}$  激光。由于当时 LD 的输出功率很低, 与侧面泵浦方式相比, 采用端面泵浦方式吸收长度大, 因而可以获得较高的斜效率。1973 年, Rosenkrantz<sup>[22]</sup> 首次公开了脉冲工作的 LD 端面泵浦实验, 并给出了阈值能量的近似表达式, 与实验结果大致相符。Draeger<sup>[23,24]</sup> 对低于室温的 LED 端面泵浦 Nd:YAG 激光器进行了试验, 获得了 CW 运转。Chesler 和 Singh<sup>[25]</sup> 建立了 LD 端面泵浦理论模型, 并在均匀分布假设下计算了阈值功率, 其结果与试验结果基本吻合。1976 年, Iwamoto<sup>[26,27]</sup> 利用 SLD (super luminescent diodes) 泵浦 Nd:YAG, 真正实现了能够在室温下连续运转的全固态激光器。随后, Ostermayer<sup>[28]</sup> 同样证明了利用单个 LED 端面泵浦 Nd:YAG 也可以实现室温下的连续运转。

提高激光介质的掺杂浓度可以在小的模体积内让增益介质吸收更多的泵浦光能量, 但是由于浓度猝灭效应的影响, Nd:YAG 的掺杂浓度被限制在 1.2at.% 以下, 为了探索新的适合 LD 泵浦的固体激光材料, 科研人员进行了大量的工作, 也取得了一定的进展。一些掺杂浓度高于 Nd:YAG 的固体激光材料涌现出来, 其中比较典型的是 NdP<sub>5</sub>O<sub>14</sub> (NPP) 和 LiNdP<sub>4</sub>O<sub>12</sub> (LNP)。另外, 一些适合 LD 泵浦的掺有其他激活离子的固体激光材料的试验也相继出现。Weber<sup>[29,30]</sup> 等人首先进行了脉冲染料激光器泵浦的 NPP 实验, 认识到 NPP 是一种有前途的适合 LED 泵浦的激光材料。随后, Chinn<sup>[31~33]</sup> 也做了大量的 LED 及 LD 泵浦 NPP 的相关工作, 并将光光转换效率提高到 7%。Saruwatari<sup>[34,35]</sup>、Budin<sup>[36,37]</sup> 等人在前面工作的基础上继续进行了 LED 及 LD 侧面泵浦 NPP 的工作。由于 NPP 的吸收峰与当时的 LD 发射波长相距甚远, 因此, 实验装置只能工作在低温下, 并且效率较低。Saruwatari<sup>[38,39]</sup> 在 -35℃ 环境中实现了 LED 泵浦 LNP 的激光器。1976 年, Saruwatari<sup>[40]</sup> 又利用高功率、高亮度 LD 实现了 LNP 激光器的室温运转。Kubodera 和 Otsuka<sup>[41]</sup> 采用 LD 泵浦 LNP, 分别获得了 2mW 的

1.05 $\mu\text{m}$  和 0.5mW 的 1.32 $\mu\text{m}$  的单横模、单纵模激光输出，并且能够工作于室温下。Zverev<sup>[42]</sup> 等人利用 LD 泵浦 LNP 获得了 0.6mW 的 1.047 $\mu\text{m}$  激光输出。Reinberg<sup>[43]</sup> 在 77K 的环境中，采用掺硅的 GaAs 二极管阵列侧面泵浦 Yb:YAG 激光器，获得了波长为 1.029 $\mu\text{m}$  的激光输出。Castleberry<sup>[44]</sup> 提出了一种室温运转的 LED 泵浦的 Tm, Ho:LiYbF<sub>4</sub> 激光器构想，Yb<sup>3+</sup> 离子吸收泵浦能量，再通过 Tm<sup>3+</sup> 离子传递给 Ho<sup>3+</sup> 离子，产生 2.07 $\mu\text{m}$  的激光辐射（如图 1.4 所示）。

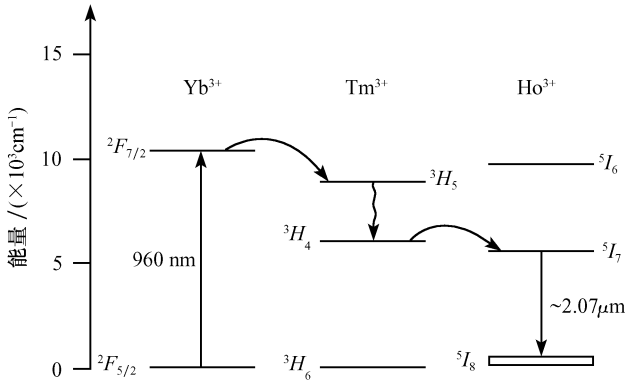


图 1.4 Tm, Ho:LiYbF<sub>4</sub> 能级结构示意图

全固态激光器的另一个发展方向——波导激光器以及光纤激光器，在这个时期也得到了一定的发展。1974 年，Bell 实验室的 Stone 和 Burrus<sup>[45]</sup> 首次公开了 LD 端面泵浦的掺铈硅光纤激光器，采用的光纤芯径为 35 $\mu\text{m}$ ，长度为 1cm，连续运转时的阈值小于 1mW。随后，他们又实现了 LED 泵浦 Nd:YAG 单晶光纤激光器<sup>[46~49]</sup>。LD 或 LED 横向泵浦的波导激光器及光纤激光器思想也在这一时期产生，文献 [50] 给出了一些设计准则，文献 [51]，[52] 提到了一些 LED 泵浦的波导激光器的相关实验。

在全固态激光器诞生的初期，由于输出功率太低，插入各种光学元件会引起极大的腔内损耗，因此，基于全固态激光器的非线性光学频率变换实验遇到了较大的困难<sup>[53,54]</sup>。随着半导体激光器输出功率的提高，基于全固态激光器的非线性光学频率变换成为可能。Kuratev<sup>[55]</sup> 就研制了一台 LED 泵浦内腔倍频 Nd:YAG 激光器，倍频晶体为 BaNaNb<sub>5</sub>O<sub>15</sub>。

这一时期，高峰值、调 Q 以及锁模全固态激光器也有一定的发展<sup>[56~58]</sup>，但总体水平较低，仍处于起步阶段。

### 1.1.3 蓬勃发展时期：20 世纪 80 年代

20 世纪 80 年代以来，半导体技术的突破性发展打破了全固态激光器发展的

停滞状态，使其进入了一个蓬勃发展的新时期。在这期间，半导体激光器吸收了半导体物理研究的新成果，采用了量子阱（QW）和应变量子阱（SLQW）等新结构，发展了晶体生长技术的新工艺，包括 MBE、MOVCD 及 CBE 等，新的外延生长工艺能够精确控制晶体生长，达到原子层厚度的精度，生长出优质量子阱及应变量子阱材料。激光二极管的阈值电流明显降低，转换效率也大幅度提高，输出功率成倍增加，使用寿命也显著增加。1983 年，单个激光二极管输出功率已超过 100mW；1988 年，单条  $100\mu\text{m}$  宽的激光二极管最大连续输出已达 3.7W；美国 SDL 在 1989 年研制的 1cm 线阵列最高连续输出功率可达 76W，转换效率达 39%。

全固态激光器以及基于全固态激光器的非线性光学频率变换的工作也随着激光二极管技术的发展迈上了一个新台阶，实验研究和理论模型分析都取得了突飞猛进的发展。1980 年，Allen<sup>[59]</sup>等人和 Smith<sup>[60]</sup>等人对 LD 线阵进行了改进，并进行了 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 实验，获得了最大 108mW 的  $1.06\mu\text{m}$  激光输出。1982 年，Kubodera 和 Noda<sup>[61]</sup>首次使用 GaAlAs 量子阱半导体激光器泵浦 LNP 晶体，得到了波长为  $1.3\mu\text{m}$ ，功率为 1.4mW 的单纵模激光输出，实验中使用了 7 个 LD，并利用光纤将泵浦光耦合进 LNP 晶体。1984 年，Telle<sup>[62]</sup>介绍了关于采用 NPP 晶体获得  $1.3\mu\text{m}$  附近可调谐激光输出的工作。1984 年，Laidig 等人采用分子外延技术（MBE）制作出应变量子阱（SLQW）半导体激光器，使得 LD 的输出功率和效率都得到极大的提高，这极大推动了全固态激光器在各个方面的发展速度。

全固态激光器的输出功率和效率不断提高，室温下的脉冲运转和连续运转方式都能够实现，不过输出功率（能量）还限制于几百毫瓦（毫焦）量级。1985 年，Zhou<sup>[63]</sup>等人公布了一个结构紧凑，不需要水冷的 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器，其腔镜直接镀在 YAG 棒的两端，获得了稳定度比闪光灯泵浦高一个数量级的激光输出（如图 1.5 所示）。Sipes<sup>[64]</sup>研制的 LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器的

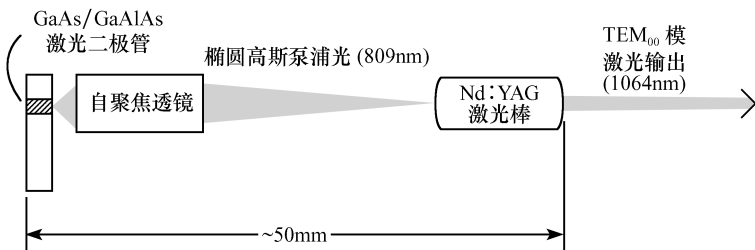


图 1.5 Zhou 的高稳定度 DPL 实验装置示意图

电光转换效率达到了 8%，表明高效率 DPL 在实验上已经成为可能。1987 年，Kane<sup>[65]</sup> 等人研制出一种 LD 阵列泵浦的 Nd:YAG 非平面环形光路整体腔激光器，获得了 25mW 的连续激光输出（如图 1.6 所示）。随后 Kane<sup>[66]</sup> 等人又以这个实验装置作为主振荡级进行了相干激光雷达实验。Begley 和 Krebs<sup>[67]</sup> 以 LD 线阵泵浦 Nd:YAG 获得了 TEM<sub>00</sub> 模 CW 激光输出，电光转换效率为 3%。Hanson<sup>[68]</sup> 用 LD 侧面泵浦 Nd:YAG，在长脉冲模式下得到了 21W 的 1.06 $\mu\text{m}$  峰值输出，通过在腔内插入 KTP 倍频晶体，获得了峰值功率 3W 的 532nm 绿光输出。Rice 和 Krebs<sup>[69]</sup> 利用 LD 泵浦板条 Nd:YAG 得到了 170mJ 的 1.06 $\mu\text{m}$  长脉冲输出，总的电光转换效率为 6%。Berger 和 Welch<sup>[70]</sup> 将 LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器的 1.064 $\mu\text{m}$  连续输出功率提高到 370mW，总的电光转换效率达到 9.1%。Katzman 分析了 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器在光通信领域的应用<sup>[71]</sup>，随后又成功地进行了以 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器作为放大级来放大 GaInAsP 半导体激光器的实验<sup>[72]</sup>。

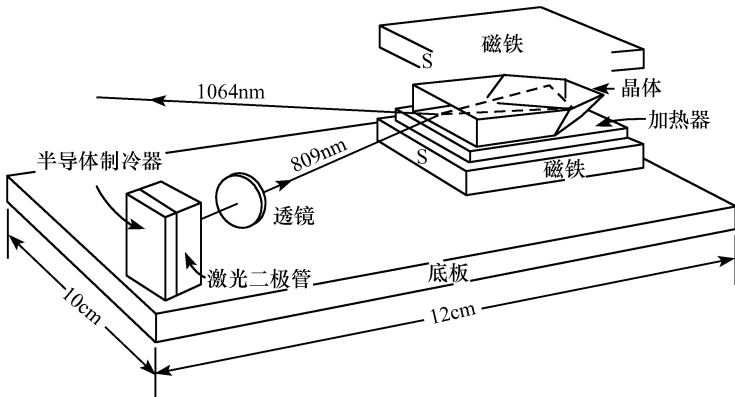


图 1.6 Kane 的非平面环形光路整体腔结构示意图

1988 年，Reed<sup>[73]</sup> 等人利用脉冲 LD 阵列泵浦 Nd:YAG 板条，实现了平均功率 585mW，峰值功率 70kW 的巨脉冲输出，电光转换效率为 4%。文献 [74]~[76] 介绍了采用 LD 泵浦 Nd:YAG，进行调 Q 产生巨脉冲的实验，得到了 10 $\mu\text{J}$  的脉冲激光输出。文献 [77] 采用同样的方法泵浦 Nd:YLF，其脉冲峰值功率提高了一倍，当采用 200mW 的 LD 阵列泵浦 Nd:YAG，经调 Q 后得到 1.2kW 的峰值功率，用同样的功率去泵浦 Nd:YLF，得到 2.48kW 的峰值功率，脉冲宽度小于 10ns。Basn 和 Byer<sup>[78]</sup> 用三镜折叠腔在单条 LD 泵浦 Nd:glass 实现了锁模运转。

全固态光纤激光器在这一时期的发展则比较缓慢。1985 年，Mears<sup>[79]</sup> 在 LD

泵浦的 Nd 掺杂 SiO<sub>2</sub> 单模光纤中, 实现了<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>11/2</sub> 激光跃迁。1986 年, Alcock<sup>[80]</sup> 和 Po<sup>[81]</sup> 先后在 Nd 掺杂的单模光纤中实现了<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> 和<sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>3/2</sub> 激光跃迁, 分别获得了 0.9μm 和 1.4μm 附近的激光输出。在 Digonnet<sup>[82]</sup> 的 LD 泵浦 Nd:YAG 单晶光纤实验中, 获得了 10% 的斜效率, 阈值为 4mW。1987 年, Millar<sup>[83]</sup> 实现了掺铒光纤激光器的低阈值运转, 输出波长为 1.6μm, 与之相对应的是 Er<sup>3+</sup> 的<sup>4</sup>I<sub>5/2</sub>—<sup>4</sup>I<sub>3/2</sub> 跃迁, 此波长十分接近光通信波段, 因此在光纤中的损耗最小。Reekie<sup>[84]</sup> 进行的 LD 泵浦单模掺铒光纤激光器实验获得了 130μW 的 1.6μm 激光输出。

此时, 科研人员认识到 DPL 在工业应用上具有广阔前景, 针对不同的用途, DPL 应该具有更多的激光发射波长和更多样的运转方式。例如, 高能量脉冲激光器需要使用上能级寿命长的激光介质以提高脉冲能量, 高功率连续激光器则要求吸收系数大且吸收带较宽, 以便充分利用泵浦光, 提高输出功率。很多新型激光介质以及原来没有采用 LD 泵浦方式的激光介质被应用到全固态激光器实验中。

1986 年, Fan<sup>[85]</sup> 等人进行了 Nd:YLF 代替 Nd:YAG 实验, 由于 Nd:YLF 的上能级寿命为 Nd:YAG 的 2 倍, 因而, 实验中的阈值功率降低到 1mW, 效率高达 38%, 并采用 MgO:LiNbO<sub>3</sub> 作为内腔倍频元件, 输出了 145μW 的绿光(如图 1.7 所示)。Kozlovsky<sup>[86]</sup> 用 Nd 玻璃做了相同的实验, 尽管由于非均匀加宽降低了受激发射截面, 但吸收带宽增加了, 在单条 LD 端面泵浦下仍然获得了高达 42% 的斜效率。20 世纪 80 年代出现的另一种新材料是 Nd:MgO:LiNbO<sub>3</sub><sup>[87]</sup>, 它集 Nd<sup>3+</sup> 离子的受激发射性质和受主材料的非线性光学性质于一身, 既可以做增益介质, 又可以做倍频材料, Fan 和 Cordova-Plaza 利用 Nd:MgO:LiNbO<sub>3</sub> 的这两个性质分别实现了自倍频激光器<sup>[88]</sup> 和主动调 Q 激光器<sup>[89]</sup>。Fields<sup>[90]</sup> 比较分析了 Nd:La<sub>2</sub>Be<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (BEL)、Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 三种激光晶体, 并用 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体获得了高达 12% 的电光转换效率。Hamel<sup>[91]</sup> 等人进行了 LD 泵浦 La<sub>x</sub>Nd<sub>1-x</sub>MgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> (LNA) 晶体实验, 由于晶体质量较差, 仅获得了 9% 的斜效率。

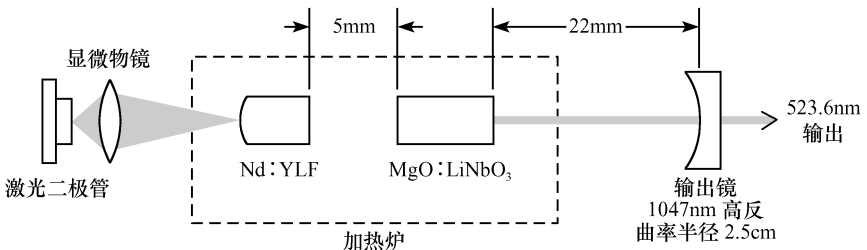


图 1.7 Fan 的 LD 泵浦 Nd:YLF 实验装置示意图

在探索新的全固态激光器波长方面,科研人员也取得了一定的进展。1986年,Allen<sup>[92]</sup>等人采用LD端面泵浦Ho:YAG,得到了波长为 $2\mu\text{m}$ 的激光输出,实验中Ho:YAG晶体掺入了 $\text{Er}^{3+}$ 和 $\text{Tm}^{3+}$ 离子进行敏化,并且工作在77K的低温下。随后,Hemmati<sup>[93]</sup>使用YLF晶体做了相同的实验。Fan<sup>[94,95]</sup>等人获得了掺 $\text{Tm}^{3+}$ 离子作为敏化剂的Ho:YAG的室温运转,测得LD泵浦阈值功率为4.4mW,斜效率为19%。随后,Kintz<sup>[96]</sup>等人使用100mW的LD阵列作为泵浦源,也进行了相同的实验,获得2mW的激光输出。1987年,Fan和Byer<sup>[97,98]</sup>在理论和实验上分别证明了室温下可以用LD泵浦Nd:YAG光纤,实现 $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 跃迁,获得946nm激光输出,其阈值小于10mW,斜效率为16%,并预言,当斜效率大于34%时,可以通过内腔倍频方式获得473nm的蓝光。Kintz<sup>[99]</sup>和Thomas<sup>[100]</sup>等人用LD泵浦Tm:YLF实现了 $\text{Tm}^{3+}$ 的 $^3F_4 \rightarrow ^3H_5$ 跃迁,得到了 $2.3\mu\text{m}$ 激光输出。随后,Kintz<sup>[101]</sup>等人又用LD泵浦Er:YLF,实现了 $\text{Er}^{3+}$ 的 $^4I_{11/2} \rightarrow ^4I_{13/2}$ 跃迁,得到了波长为 $2.8\mu\text{m}$ 的连续和脉冲激光输出,斜效率仅为0.7%,他们预言,在优化 $\text{Er}^{3+}$ 离子的掺杂浓度和采用single-stripe半导体激光器作为泵浦源后,斜效率可以提高一个数量级。

由于全固态激光器的输出功率仍然比较低,因此,基于全固态激光器的非线性光学频率变换工作仍然困难重重,但是已经可以产生非线性效应,并获得了毫瓦级的倍频光输出。1985年,Baer和Keirstead<sup>[102]</sup>研制成功LD泵浦内腔倍频全固态激光器,以KTP晶体作为非线性频率变换元件,获得了11mW的 $0.53\mu\text{m}$ 绿光输出。Kozlovsky<sup>[103]</sup>等人用掺氧化镁铌酸锂( $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$ )晶体实现了外腔谐振倍频,获得了2mW单纵模532nm绿光输出。Trutna<sup>[104]</sup>等人用外加磁场对Nd:YAG非平面环形几何实现了纵模调制,获得了 $1.319\mu\text{m}$ 和 $1.388\mu\text{m}$ 的单纵模输出。Risk<sup>[105]</sup>等人在室温运转946nm全固态Nd:YAG激光器的基础上,在腔内插入 $\text{LiIO}_3$ 作为倍频晶体,获得了473nm蓝光输出。随后,Risk<sup>[106]</sup>等人又利用内腔KTP,让 $1.06\mu\text{m}$ 的激光与泵浦光在其中混频,得到了蓝色的相干辐射。

在20世纪80年代,除了上述实验和理论模型的文章外,还有相当多的工作是评述性质的<sup>[107~110]</sup>,其中,文献[110]详细分析了DPL与闪光灯泵浦固体激光器、LD半导体激光器本身相比的不同之处,指出了DPL的优点和缺点,并建立了端面泵浦DPL的阈值以及阈值之上的运转特性的理论模型,同时还对DPL的波长选择进行了总结。

全固态激光器在这个阶段的发展过程中已经暴露出发射激光波长调谐比较困难和泵浦几何结构复杂这两个缺点。LD输出波长的温度调制直接影响了LD封装工艺和冷却方式,而泵浦几何结构的复杂性和多样性也使得大功率条件下的

DPL 设计变得更加困难。

#### 1.1.4 飞速发展时期：20 世纪 90 年代至今

进入 20 世纪 90 年代以后，高功率二极管激光器技术逐渐成熟，大功率的泵浦光源也已十分成熟，而且价格已经降到可以接受的水平上。外延 (epitaxial) 生长工艺已经可以将 LD 的发射波长从 630nm 扩展到  $1.1\mu\text{m}$ 。尤其是现在，高功率蓝光 LD 和白光 LD 技术已经成为业界关注的焦点，输出功率为 1.7W 的蓝光 LD 也已经出现<sup>[11]</sup>。目前 5~20W 连续波 LD 已生产出系列产品，1993 年就可以买到 30W 的阵列；1992 年的 CLEO 会议上，美国研究人员指出，可以实现 1cm 阵列连续波输出 121W 功率和 45% 的效率；在准连续状态工作的激光器中，峰值功率为 50W、120W、1500W 和 3kW 的系列已商品化。1992 年麦道公司为钕玻璃板条激光器制造了一个高功率泵浦源，阵列组件包含 6500 个激光条，输出峰值功率为 350kW。这为全固态激光器的发展奠定了强大而坚实的基础。

占世界激光器市场主导地位的是采用传统灯泵浦的固体激光器，几乎其所有的振荡方式使用激光二极管作为泵浦源都可以成功实现，从而，全固态激光器逐渐成为重要的发展方向。尤为引人注目的是高功率全固态激光器及其应用研究的新进展。具有“里程碑”意义的事件之一是美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 于 1992 年研制成功的千瓦级高功率二极管泵浦 Nd:YAG 激光器，其体积仅有葡萄柚般大小；另一件是 1994 年美国能源部宣布批准实施“国家点火设施”(national ignition facility, NIF) 计划，并在劳伦斯-利弗莫尔国家实验室建成的单束元装置 (beamlet) 上全面考核了 NIF 将使用的关键技术和元器件性能。据预测，如果大功率激光二极管价格下降 1~2 个数量级，全固态激光器将成为主流激光器，灯泵浦的固体激光器、染料激光器和气体激光器将逐渐被全固态激光器所取代。在高功率二极管激光器技术进步的基础上，全固态激光器及非线性光学频率变换技术进入了一个飞速发展的阶段，并且二者的联系也越来越紧密。全固态激光技术已经与非线性光学频率变换有机结合在一起，相互促进，一方面全固态激光器的输出功率不断地提高，使得基于全固态激光器的非线性光学频率变换得以实现，并且效率大大提高；另一方面，非线性光学频率变换技术极大拓展了全固态激光器的输出波长范围，尤其是频率可调谐激光技术 (光学参量振荡 (OPO, OPG)，钛宝石激光器) 等的出现，更使得全固态激光器的输出波长连续可调，大大拓展了其应用范围。

相比于 20 世纪 90 年代之前，全固态激光器及非线性光学频率变换技术的进展日新月异，发展的速度超乎科研人员的想像，每年发表的相关论文成倍增长，鉴于掌握的资料有限，在这里我们只对全固态激光器及非线性光学频率变换技术

在以下 3 个方面取得的进展进行简要的综述。

### 1. 小型化、商品化的中、小功率全固态激光器

中、小功率的全固态激光器大多采用端面泵浦方式，以获得较好的光束质量和较高的效率。1991 年，Kaneda<sup>[112]</sup> 采用 LD 端面泵浦 Nd:YAG，获得了 7.6W 的 TEM<sub>00</sub> 模 CW 激光输出。Tidwell<sup>[113~115]</sup> 等人发布了其高效率 LD 端面泵浦 Nd:YAG 激光器，TEM<sub>00</sub> 输出功率为 15W，效率为 60%，多模输出为 22.5W。随后，他们又将 TEM<sub>00</sub> 模输出功率提高至 60W<sup>[116]</sup>。Comaskey<sup>[117]</sup> 等人研制了平均功率为 70W 的全固态激光器。目前，国际上中、小功率的全固态激光器技术已经相当成熟，并达到了实用水平。美国 Amoco Laser、Spectra-Physics、Coherent 及 SDL 等公司在该领域异常活跃，近百家公司分别推出各种型号连续和脉冲小型 DPL 激光器。相比较而言，我国在商用中、小功率 DPL 方面的工作才刚刚起步，在国内激光市场上占据主导地位的激光打标机和激光加工机等还大多采用灯泵系统，仅有深圳大族和武汉楚天等公司在从事全固态激光打标机和加工机等研发工作。

### 2. 高功率全固态激光器

高（平均、峰值）功率全固态激光器及其应用是目前全固态激光器研究领域内最热门的课题，经过短短十几年的发展，其输出功率就从 20 世纪 80 年代末 90 年代初的几百毫瓦量级提高到现在的 10kW 量级，其应用范围也从工业加工拓展到激光武器及受控核聚变等方面。实现高功率全固态激光器的主要方案有以下几种：①多棒串接腔结构的 Nd:YAG（或 Yb:YAG）激光器；②Nd:YAG（或 Yb:YAG）板条、盘状激光器；③主动振荡-多程功率放大（MOPA）激光器；④高功率掺 Yb<sup>3+</sup> 双包层光纤激光器。下面我们对这几种高功率全固态激光器的发展历史分别进行简要的回顾。

#### 1) 多棒串接腔结构的 Nd:YAG（或 Yb:YAG）激光器

LD 侧面泵浦 Nd:YAG 棒是高功率全固态激光器最常用的结构，为了进一步提高输出功率，还可以将多个特性相同的泵浦组件在内腔或外腔串接起来，具有结构简单，造价低等优点，是目前获得最高输出功率的高功率激光系统，但是其热效应严重、光束质量较差。1995 年，Sakamoto<sup>[118]</sup> 等人指出，半导体泵浦方式可以解决高功率固体激光器面临的效率低、寿命短等问题。Golla<sup>[119,120]</sup> 等人采用圆柱透镜和光纤耦合的侧面泵浦高功率 DPL，输出功率超过 300W，光光转换效率分别为 20% 和 44%。Xu<sup>[121]</sup> 等人研制的高平均功率高效率全固态激光器，输出功率为 240W，光光转换效率达 33%。Kojima<sup>[122,123]</sup> 采用紧耦合漫反射腔

(close-coupled internal-diffusive exciting reflector, CIDER) 直接将 LD 泵浦光耦合到 Nd:YAG 晶体中, 获得了高达 50% 的光光转换效率。Konno<sup>[124]</sup> 等人采用 CIDER 技术获得了 80W 的 TEM<sub>00</sub> 模和 150W 的多模 1064nm 激光输出。1997 年, Chone<sup>[125]</sup> 等人研制的 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 连续激光器的输出功率达到 750W。

1998 年, LD 侧面泵浦的单 Nd:YAG 棒激光器输出功率已经可以突破 1kW, Brand<sup>[126]</sup> 等人采用长度为 18cm 的 Nd:YAG 棒, 设计出输出功率超过 1kW 的单棒侧面泵浦系统; Schmidt<sup>[127,128]</sup> 等人设计的 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器, 获得了 1.1kW 的输出功率, 光束参量积为 12mm×5mrad。在双棒串接腔中插入 90°偏振旋光片补偿热致双折射是获得高功率激光输出的最常用的方法, 且其光束质量相对较好, 关于这种方法的应用的例子也很多。Yasui<sup>[129]</sup> 等人采用双棒串接腔加入 90°旋光片, 获得了 500W 输出的高效率、高亮度激光输出。Fujikawa<sup>[130]</sup> 等人采用双凹镜直腔分别获得了电光转换效率为 11.6%,  $M^2$  (光束衍射倍率因子) 为 5.9 的 107W 激光输出和电光转换效率为 14.8%,  $M^2$  为 45 的 147W 激光输出。Hirano<sup>[131]</sup> 等人通过在谐振腔内插入两个凹透镜获得了高达 208W 的基模输出, 其  $M^2$  小于 1.2。美国的劳伦斯-利弗莫尔国家实验室的 Honea<sup>[132]</sup> 等人研制了 LD 泵浦的千瓦级输出 Yb:YAG 激光系统, 他们采用双 Yb:YAG 棒和 90°旋光片来补偿热致双折射, 在 3930W 泵浦时, 输出功率达 1080W, 光光转换效率达 27.5%, 电光转换效率达 12.3%, 光束质量很好, 1kW 输出时  $M^2$  为 10, 500W 输出时  $M^2$  为 2.2, 采用声光调 Q 时, 输出功率为 532W, 脉冲宽度为 70ns。Lee<sup>[133]</sup> 采用图解分析法对加入 90°旋光片的双棒串接腔进行了分析, 并采用两根 Nd:YAG 获得了 770W 的连续输出。1998 年, Brand<sup>[126]</sup> 研制的双棒串接腔全固态激光器的输出功率达到了 2kW。

近年来, 一些日本公司的多棒串接腔全固态激光器取得了很大的进展, 输出功率达到万瓦量级。1999 年, 日本东芝公司<sup>[134]</sup> 公布的 4 棒串接 DPL, 输出功率为 3.5kW, 电光转换效率为 19%。德国 Rofin-Sinar 公司<sup>[135]</sup> 的 8 棒串接 LD 泵浦 Nd:YAG 激光器样机的输出功率为 4.4kW, 每个长为 18cm 的 Nd:YAG 棒都可以单独输出 1kW 激光,  $M^2$  为 36。2001 年, Akiyama<sup>[136]</sup> 等人利用 3 个泵浦组件, 在没有采用其他热致双折射补偿措施的情况下, 获得了 5.4kW 的激光输出, 这是目前采用非光纤介质获得的最高输出功率。

## 2) Nd:YAG (或 Yb:YAG) 板条 (slab)、盘状 (disc) 激光器

LD 泵浦板条、盘状激光器是一种非常有前途的获取高功率、高光束质量激光输出的技术, 采用板条介质有效解决了高功率激光器面临的热效应问题, 提高了效率和稳定性, 缺点是板条、盘状激光介质的价格极其昂贵。1993 年, Co-

maskey<sup>[137]</sup>等人设计的采用折叠 zigzag 谐振腔的 LD 侧面泵浦 Nd:YAG 板条激光器, 输出功率达到了千瓦量级。1994 年, 日本 Fanuc 公司<sup>[138]</sup>的 LD 泵浦板条激光器系统的输出功率超过了 3kW。随后, 输出功率超过 300W 的工业用板条全固态激光器也出现了<sup>[139]</sup>。近年来, 科研人员又开始使用 LD 面阵来泵浦 Nd:YAG 板条, 同样获得了超过 1kW 的输出功率<sup>[140,141]</sup>。2000 年, Rutherford<sup>[142]</sup>的 LD 边缘泵浦技术有效简化了板条激光器的设计过程, 他预言采用此技术泵浦 Yb:YAG 板条将可能获得 100kW 的激光输出。随后, 他们采用此技术泵浦 Nd:YAG 和 Yb:YAG 板条<sup>[143]</sup>, 分别获得了 127W 和 46W 激光输出。2000 年在美国新墨西哥州 Albuquerque 举行的 Laser's 2000 国际会议上, 波音公司发布了其同轴泵浦及冷却的薄片结构高功率 Nd:YAG、Nd:GGG 及 Nd:glass 激光器, 均达到数千瓦的平均功率。德国柏林工业大学的基于光纤 SBS 效应的光学相位共轭镜技术的 500~700W 的全固态激光器, 输出光束接近 TEM<sub>00</sub>,  $M^2$  达到 1.4<sup>[144]</sup>。2001 年, Fujikawa<sup>[145]</sup>等人采用新的 LD 面阵侧面泵浦技术, 实现了 Nd:YAG 激光器的高效率运转, 输出功率为 320W, 总的电光转换效率为 28%。

与此同时, 盘状全固态激光器的发展也相当迅速, 但是输出功率仍然低于板条激光器。1999 年, 德国 Hass-Laser 公司<sup>[146]</sup>的盘状全固态激光器输出功率达到 350W, 但是光束质量较差 (如图 1.8 所示)。而后, 他们<sup>[147]</sup>又成功开发出输出功率超过 1000W 的由两个 Nd:YAG 圆盘串接的全固态激光器系统,  $M^2$  仅为 10。

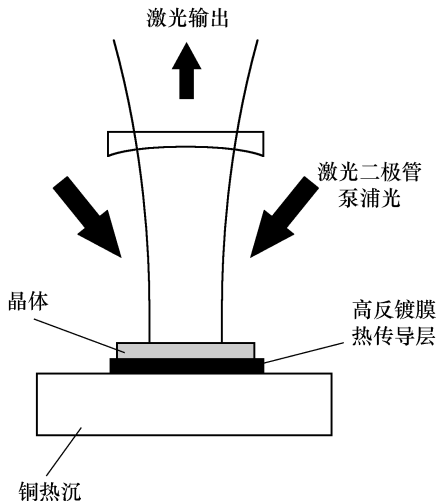


图 1.8 盘状 DPL 结构示意图

正是由于二极管泵浦板条激光器的出色表现使其备受军方的青睐,近年来,很多由军方支持的高功率、高光束质量全固态激光器计划采用的都是板条激光器。美国的 DAPKL 采用了 SBS 相位共轭器和 3 个 zigzag 板条获得了千瓦级的输出功率。法国的 LUCIA 计划同样采用了板条激光器,其目的是建成一个高平均功率 LD 泵浦 Yb:YAG 激光器系统(100J, 10Hz, 10ns),他们是将 LD 侧面泵浦的 Yb:YAG 板条构成的非稳凹凸腔激光器作为振荡级(如图 1.9 所示)。2004 年, LULI 实验室<sup>[148]</sup>还公布了 LUCIA 计划的最新进展。

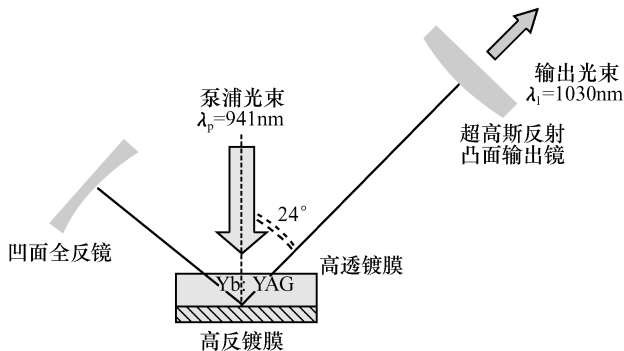


图 1.9 LUCIA 的振荡级示意图

### 3) 主动振荡-多程功率放大(MOPA)激光器

在目前获取高功率激光输出的众多方式中,主动振荡-多程功率放大(MOPA)系统,尤其是配合了 SBS 相位共轭技术的多程放大系统的光束质量是最好的(近基模),但其缺点是系统结构非常复杂。

早在 1963 年, Frantz 和 Nodvik<sup>[149]</sup>就首次建立了固体激光器的光脉冲放大理论。1980 年, Lowdermilk<sup>[150]</sup>等人又对固体激光器的多程放大理论进行了研究。1981 年, Simmons<sup>[151]</sup>等人模拟了光束在激光系统中的传输过程,用数值计算方法对光传输过程中衍射、自聚焦、增益饱和进行了模拟,同时还建立了系统中相关现象,如小尺度调制增长、空间滤波、成像、增益饱和以及光束自感应损耗的计算模型。理论和实验研究表明,光束在均匀泵浦、面冷却的板条介质内采用“之”字形光路行进,可以有效地减小热效应,获得高光束质量激光输出<sup>[152~154]</sup>。1989 年, Eggleston<sup>[154]</sup>等人又推导了“之”字形通光光路板条激光放大器的光脉冲放大表达式。

尽管多程 MOPA 放大理论已经成熟完善,但是由于半导体生长工艺不成熟,基于全固态激光器的多程 MOPA 放大系统发展很慢,直到最近其输出功率才实现了千瓦量级的突破。Hirano<sup>[155]</sup>用两根 Nd:YAG 棒和双程像传递光学系统的