

SOLID-STATE LASERS

固体激光器件

G U T I J I G U A N G Q I J I A N

吕百达 编著



北京邮电大学出版社
<http://www.buptpress.com>

版权免责声明

本文集内容均来源于网络, 版权归著作方所有。广州基座光学科技有限公司仅做搜集整理工作, 并供读者学习参考用途。在使用本文集内容时可能造成实际或预期的损失, 读者转载时破坏电子文档的完整性, 或以商业盈利目的复制和销售等行为, 本公司概不承担任何责任。若原文版权方有异议, 请联系我们删除。

吕百达 编著

固体激光器件

GUTI JIGUANG QIJIAN



A0959461

北京邮电大学出版社

· 北 京 ·

 Oeabt 基座光学
Optical Department and Basic Teaching

《基座光学专业文集--激光篇》

www.oeabt.com【版权属于著作方,如有侵权请联系kent@oeabt.com删除】

内 容 提 要

本书深入系统地阐述了固体激光器的基础知识和前沿进展。主要内容包括：固体激光器的工作机理和特性，常用和新型固体激光工作物质，固体激光器的光泵浦系统和光泵浦热效应，固体激光谐振腔，可调谐固体激光器，高功率固体激光器和二极管泵浦固体激光器。全书不仅是对作者本人在这一领域长期从事科研、教学经验和成果的系统总结，而且全面反映了国内外在这一领域中的最新研究成果和发展趋势。

本书可作为高等院校光学、光学工程、物理电子学等专业高年级本科生和研究生的教材，也可供在相应领域工作的科技人员作为参考书使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

固体激光器件/吕百达编著. —北京：北京邮电大学出版社，2002.1

ISBN 7-5635-0577-6

I. 激… II. 吕… III. 固体激光器件 IV. TN248.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 073255 号

书 名：固体激光器件

编 著：吕百达

责任编辑：郑 捷

出 版 者：北京邮电大学出版社（北京市海淀区西土城路 10 号）

邮 编：100876 电 话：62282185 62283578

网 址：<http://www.buptpress.com>

经 销：各地新华书店

印 刷：北京源海印刷厂

印 数：3 000 册

开 本：787 mm×1 092 mm 1/16 印张：15.75 字数：400 千字

版 次：2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月第 1 次印刷

书 号：ISBN 7-5635-0577-6/O·31

定 价：31.00 元

 Oeabt 基座光学
Optical Experiment and Basic Teaching

《基座光学专业文集--激光篇》

www.oeabt.com 【版权属于著作方, 如有侵权请联系 kent@oeabt.com 删除】

序

由美国休斯公司的 T.H.Maiman 博士于 1960 年 7 月研制成功的世界上第一台激光器是以红宝石为工作物质的固体激光器。此后，激光技术得到了飞速的发展，它对国民经济、国防建设、科学技术及日常生活产生了深远的影响。四十年来固体激光器在单元器件、关键技术和产品开发等方面发展迅速，在国民经济建设和国防军事上都获得了广泛应用。特别是近年来以二极管泵浦固体激光器的发展和应用为主要标志，固体激光显示出可持续发展的强劲势头。

作为全国高校光电子技术专业教学指导委员会的专家，我有机会审阅了吕百达教授编著的《固体激光器件》一书，并提出了建议。吕百达教授以其长期在科研和教学第一线的工作为基础，在本书中系统深入地阐述了固体激光器的基础知识和前沿进展。全书内容涵盖面广，物理概念清晰，理论与实验并重，组织材料由浅入深，易于阅读。其中，“固体激光器的光泵浦热效应”、“固体激光谐振腔”、“高功率固体激光器”和“二极管泵浦固体激光器”等章中都融入了吕百达教授在德国师从著名激光科学家 H.Weber 教授，从事固体激光器和光学谐振腔专题研究以及近年来参加国家高技术激光技术有关主题科研工作的丰硕研究成果，并反映了国内外在固体激光领域中的最新成果和发展趋势，由此形成了本书的主要特色。我认为，本书既是高校光学、光学工程、物理电子学及电子科学与技术等专业高年级本科生和研究生很好的教材，又是一本高水平的、对激光科技工作者有参考价值的学术著作，特此推荐出版。

中国科学院院士、天津大学教授

姚建铨

2001.3.19

前 言

众所周知，在各类激光器件中固体激光器是历史最久、发展最快和应用范围最广的激光器件之一。由斯普林格出版社（Springer-Verlag）出版的 W.Koechner 博士的名著——《固体激光工程》（Solid-State Laser Engineering）——自 1976 年第一版以来，至今已增修、再版五次（1976，1988，1992，1996，1999 年），充分反映了这一领域的迅速发展和知识的不断更新。

本书是以编著者自 20 世纪 80 年代初期以来在四川大学等校对光学、光电子技术专业高年级本科生和研究生讲授“激光器件与技术”和“固体激光工程”课程所用讲义为基础写成的。书中力求较为全面和系统地阐述固体激光器的基础知识和前沿进展，包括：固体激光器的机理和工作特性，常用和新型固体激光工作物质，固体激光器的光泵浦系统和光泵浦热效应，固体激光谐振腔，可调谐固体激光器，高功率固体激光器和二极管泵浦固体激光器。与“固体激光工程”相比较，本书有以下特点：（1）作为教材使用，从教学需要出发，注意了由浅入深组织材料，并考虑了我国高校相关专业课程设置的现状，写入了从“激光原理”到“固体激光器件”课程学习中需要补充的基础知识。这也是对编著者长期从事光学和激光专业课程教学经验的系统总结。（2）对 20 世纪 80 年代以来反映固体激光器主流发展方向的二极管泵浦固体激光器、高功率固体激光器和可调谐固体激光器的内容大为增加。（3）编著者本人在固体激光领域长期从事科研工作的成果和体会在全书每章中都有反映。其中，特别是第 4 章、第 5 章、第 7 章和第 8 章中反映了编著者在德国工作和 20 世纪 80 年代末期以来致力于国家高技术激光技术主题和惯性约束聚变主题一些专项科研工作的研究成果。

本书按电子工业部《1996~2000 年全国电子信息类专业教材编审出版规划》的大纲编写。天津大学姚建铨院士担任主审，并提出修改意见，谨此致谢。自 1980 年以来，本书编著者曾多次去德国工作，在从事固体激光器和光学谐振腔的专题研究中得到柏林技术大学光学研究所 H.Weber 教授和 H.J.Eichler 教授的大力支持和热情帮助。书中亦写入了这两位教授领导的研究组在固体激光领域所取得的具有代表性的研究成果。在编写过程中，还广为参考了这一领域的中外著作和论文。每章末列出了主要参考文献，供进一步学习参考之用。特

此，对 H.Weber 教授和 H.J.Eichler 教授以及这些文献的作者们（恕不在此一一列出）表示衷心的感谢！本书由江西师范大学基金资助出版。在出版过程中，得到江西师范大学邹道文教授、刘三秋教授和陶向阳教授的多方帮助，在此一并致谢！

受限于编著者的学识水平，书中谬误之处难免，恳请广大读者批评指正，不胜感谢！

吕百达

2001年3月于南昌

目 录

序	1
前言	1
绪论	1
参考文献	4
第一章 固体激光器的机理和工作特性	
§ 1.1 基本概念	5
§ 1.2 固体激光振荡器	14
§ 1.3 固体激光放大器	17
§ 1.4 固体激光器的光束质量	27
§ 1.5 固体激光器的效率	31
§ 1.6 固体激光器的工作特性	33
参考文献	37
第二章 固体激光工作物质	
§ 2.1 概述	38
§ 2.2 红宝石	40
§ 2.3 掺钕钇铝石榴石	43
§ 2.4 钕玻璃	47
§ 2.5 其它掺钕激光工作物质	50
§ 2.6 掺钪激光工作物质	54
§ 2.7 掺钆氟化镁和掺铬氟化锂铍铝	55
参考文献	58
第三章 固体激光器的光泵浦系统	
§ 3.1 惰性气体放电灯	59
§ 3.2 激光二极管	68
§ 3.3 聚光腔	77
§ 3.4 二极管激光泵浦耦合技术	84
参考文献	91

第四章 固体激光器的光泵浦热效应

§ 4.1 概述	92
§ 4.2 连续工作棒状固体激光器的热效应	93
§ 4.3 脉冲工作棒状固体激光器的热效应	99
§ 4.4 板条固体激光器的热效应	106
§ 4.5 补偿热效应的措施	108
参考文献	112

第五章 固体激光谐振腔

§ 5.1 热透镜腔和基模动态稳定腔	114
§ 5.2 多棒串接腔和热致应力双折射补偿技术	123
§ 5.3 像散补偿折叠腔	133
§ 5.4 负支实共焦非稳腔: 自滤波和自成像非稳腔	135
§ 5.5 各类棱镜腔	138
§ 5.6 共轴和离轴非稳腔	142
§ 5.7 非轴对称像散腔	145
§ 5.8 非均匀反射镜腔	153
§ 5.9 受激布里渊散射相位共轭腔	158
§ 5.10 可调望远镜和自适应镜动态稳定腔	164
参考文献	167

第六章 可调谐固体激光器

§ 6.1 掺钛蓝宝石激光器	171
§ 6.2 掺铬铝酸铍激光器	174
§ 6.3 色心激光器	176
参考文献	179

第七章 高功率固体激光器

§ 7.1 用于工业材料加工的高功率固体激光器	180
§ 7.2 惯性约束聚变高功率固体激光驱动器	192
§ 7.3 太瓦和拍瓦级超短脉冲高亮度源	199
参考文献	201

第八章 二极管泵浦固体激光器

§ 8.1 单频和可调谐二极管泵浦固体激光器	203
§ 8.2 二极管泵浦调 Q、倍频和锁模固体激光器	212
§ 8.3 中小功率二极管泵浦固体激光器	219
§ 8.4 高功率二极管泵浦固体激光器	225
§ 8.5 二极管泵浦固体激光器输出功率的定标	236
参考文献	241

绪 论

通常把以固体材料作为工作物质的激光器称为固体激光器。例如，红宝石激光器、掺钕离子 (Nd^{3+}) 的钇铝石榴石 (Nd:YAG) 激光器、掺钕离子 (Nd^{3+}) 的玻璃激光器和掺钛离子 (Ti^{3+}) 的蓝宝石 (简称钛宝石) 激光器等。作为 20 世纪重大科技成就之一的激光是以 1960 年世界上第一台红宝石激光器的发明为标志的。40 年来，固体激光器的发展大致经历了以下几个阶段：

1. 60 年代的迅速发展时期

红宝石 (1960 年)、钕玻璃 (1961 年) 和 Nd:YAG (1964 年) 激光器在这一时期相继研制成功。固体激光单元器件和振荡、放大、调 Q、锁模和选模等技术和应用都获得了迅速发展。

2. 70 年代的相对缓慢发展时期

70 年代，气体和染料等激光器发展迅速，相比之下，固体激光器的发展显得较为缓慢。但这一时期在新的固体激光材料开发、单元技术研究和应用开拓等方面，仍取得不少有意义的成果。

3. 80 年代的复苏时期

进入 80 年代以后，以高功率固体激光器、可调谐固体激光器和高效率固体激光器，特别是以二极管泵浦固体激光器的迅速发展为标志，固体激光器进入了被称为“复苏”的新的发展时期。

4. 90 年代的持续发展时期

在 90 年代，固体激光器保持了持续发展的势头，并不断开拓重要应用领域。其中，以高功率固体激光器和二极管泵浦固体激光器及其应用研究的新进展尤为引人注目。被称为具有“里程碑”意义的事件之一是美国劳伦兹—利弗莫尔国家实验室于 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。另一事件是 1994 年美国能源部宣布批准实施“国家点火设施” (National Ignition Facility, 简称为 NIF) 计划，并在劳伦兹—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。拟于 21 世纪初建成的 NIF 是一个集成多种当代先进固体激光技术的巨型高能量 (1.8 MJ)、高功率 (500 TW)、192 束的闪光灯泵浦钕玻璃固体激光装置，将用于核聚变，实现点火。

迄今，已实现激光振荡的固体激光工作物质有数百种之多，激光谱线数千条。固体激光器具有输出能量大、峰值功率高、器件结构紧凑、便于光纤耦合、比 CO_2 气体激光器波长

短、使用寿命长和单元技术成熟等优点。其主要缺点是常规惰性气体放电灯泵浦固体激光器效率低、热效应严重，限制了输出功率的进一步提高和光束质量的改善。

固体激光器在工业激光材料加工、激光医学、激光化学、科学研究与发展以及国防军事等方面获得广泛的应用。已用于激光打孔、焊接、切割、微调、划片、打标、热处理、手术刀、医学诊断、激光雷达、全息摄影、激光存储、激光测污和环境监控、遥感、水下探测、激光光谱分析、激光测距、目标指示、制导、致眩和惯性约束聚变（Inertial Confinement Fusion, 简称为 ICF）等，形成了相当广阔的世界固体激光市场。

在固体激光和相关领域未来的发展中若干值得重视的研究课题和发展方向有：

- 新的固体激光工作物质和非线性光学材料

材料是基础和先导。虽然 Nd:YAG、钕玻璃和钛宝石等激光工作物质的发明在固体激光器的发展中起了重要作用，但针对实际应用的新要求，不断探索和研制出新的高效率、高功率、可调谐激光工作物质，以及高效率、高质量的非线性光学材料仍是当务之急。例如，近年来研制成功的长寿命、高储能、大尺寸的掺镱氟磷酸铯（ $\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ）是用于高功率二极管泵浦较好的激光工作物质。

- 可调谐固体激光器

以掺铬铝酸铍（ $\text{Cr}^{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_3$ ）和钛宝石为代表的室温可调谐固体激光晶体的出现标志着固体激光器难于调频的概念已成为历史。而且，钛宝石激光器的可调谐范围宽达 500 nm, 其综合性能远比染料激光器为优。可调谐固体激光器在高分辨激光光谱学、激光化学、激光医学和军事方面有良好的应用前景。

- 工业应用的高功率固体激光器

在激光的民用市场中，工业材料加工占有重要地位。发展高功率、高光束质量的固体激光加工机，并进一步提高其性能价格比，以增强与 CO_2 激光加工机的竞争力，仍是固体激光科技人员面临的艰巨任务。

- ICF 固体激光驱动器

自 60 年代初期一些有远见卓识的科学家提出 ICF 的概念和用激光驱动实现 ICF 和惯性聚变能（Inertial Fusion Energy, 简称为 IFE）电厂的设想以来，钕玻璃固体激光驱动器技术已有了长足的进展。然而，实验室可控核聚变对驱动器提出了多种非常苛刻的要求。例如，极高的能量、功率指标，灵活的光束整形能力，多束激光的能量、功率平衡，极高的信噪比，光束匀滑化和靶面均匀辐照，以及精确的瞄准功能等等。对 IFE 电厂，还要求驱动器高效率、重复频率工作。随着研究工作向工程化的推进，人们认识到这远比最初设想的要困难得多，需要历经数代人持之以恒的艰苦奋斗，才有可能最终实现利用聚变能的长远目标。

- 二极管泵浦固体激光器

使用二极管泵浦可有效地克服常规固体激光器效率低、热效应严重的主要缺点，使得在一个结构紧凑、性能稳定的全固体化器件上同时实现高功率、高光束质量、高效率、高稳定性和长寿命工作成为可能，是固体激光器一个有生命力的发展方向，在工业材料加工、IFE 电厂驱动器、军事和其它方面都有广泛应用。在二极管泵浦固体激光中值得深入研究的课题包括：适于二极管泵浦的固体激光工作物质及其几何构型，泵浦和冷却方式，热效应和有效散热措施，高功率二极管阵列，新型光腔和放大系统等。

- 非线性光学效应

自 1961 年 Franken 将红宝石激光 (波长 6 943 Å) 通过石英晶体, 得到 3 471 Å 的倍频光以来, 采用非线性光学方法实现固体激光的频率变换, 利用非线性光学相位共轭效应补偿波前畸变, 以及光参量振荡和放大技术等一直是固体激光领域的热门研究课题。值得指出的是, 最近利用超短、超强固体激光与惰性气体介质的相互作用产生的高次谐波已成功地进入了“水窗”波段, 在活生物细胞和亚细胞结构的显微成像等方面有重要的科学研究价值和实际应用意义。

- 超短脉冲高亮度源和强场物理

近年来, 采用啁啾脉冲放大 (Chirped Pulse Amplification, 简称为 CPA) 和光参量啁啾脉冲放大 (Optical Parametric CPA, 简称为 OPCPA) 等技术, 在钛宝石和钕玻璃激光振荡—放大混合系统中已获得了超短 (脉宽为皮秒和飞秒量级)、超强 (功率为太瓦和拍瓦量级) 激光脉冲, 经光学系统聚焦后, 焦点上功率密度高达 $10^{18} \sim 10^{21} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$, 从而打开了一个崭新的学科领域——强场物理的大门。利用超短、超强激光, 可以在实验室中创造出超高功率密度、超强电场、超强磁场、超高密度辐射场、超高光压、超高电子加速度和超高温等极端物理条件, 开展相对论等离子体非线性光学、电子加速器、高次谐波产生、实验天体物理学、非线性量子电动力学以及 ICF 快点火等前沿科学的理论和实验研究工作。可以预期, 在强场物理某些研究中一旦取得重大突破, 将对未来科学技术的发展产生深远的影响。

历经 40 年的沧桑岁月, 固体激光已走出了一条可持续发展的道路。在前进道路上, 取得了若干具有里程碑意义的重要研究成果, 发展前景光明。面对新世纪的机遇和挑战, 固体激光科学家和工程师们任重而道远。

参考文献

1. Y.R.Shen, The Principles of Nonlinear Optics, New York, John Wiley & Sons, Inc., 1984.
2. H.Weber, Die Zukunft des Festkörperlasers, Wiss.Magazin, 1986, 9: 17.
3. 邓锡铭, 范滇元. 高功率激光与“神光”装置. 国外激光, 1991, 5: 7.
4. 吕百达. 面对 21 世纪机遇与挑战的高功率固体激光. 物理, 1996, 25 (8): 465.
5. C.P.J.Barty, T.Guo et al., Generation of 18-fs, multiterawatt pulses by regenerative pulse shaping and chirped-pulse amplification, Opt.Lett, 1996, 21 (9): 668.
6. M.D.Perry, D.Pennington et al., Petawatt laser pulses, Opt.Lett., 1999, 24 (3): 160.
7. H.J.Eichler, A.Haase, et al., Solid state lasers with phase conjugation approaching the kW-range, SPIE, 1998, 3264: 9.
8. 贺贤土. 超短脉冲超强激光与物质相互作用. 西安: 第五届全国激光科学技术青年学术交流会议特邀报告, 1999.
9. J.Zhang, Physics of the extreme on a tabletop, 西安: 第五届全国激光科学技术青年学术交流会议特邀报告, 1999.

文档篇幅过长，请跳转百度云盘下载：

链接：https://pan.baidu.com/s/11J_l2k-n4WRszPSeporAXQ

提取码：ikyc