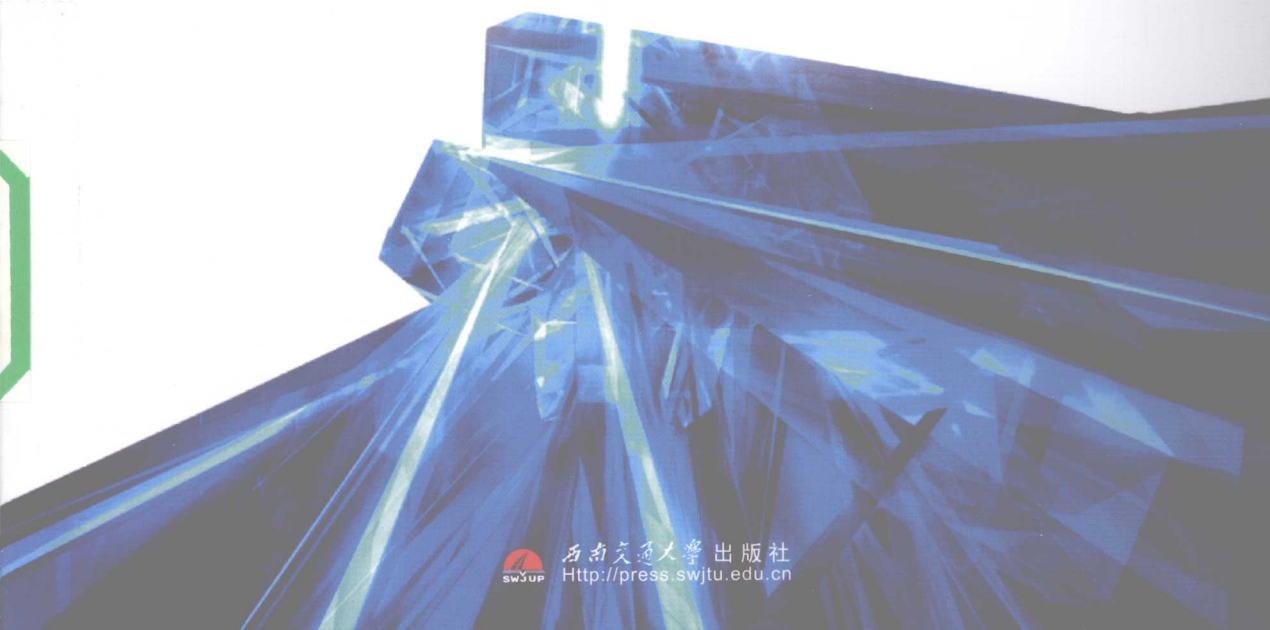


GUTAI YAG
JIGUANGQI JISHU

固态YAG

激光器技术

余先伦 廖京川 编著



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

固态YAG
激光器技术

固态YAG

激光器技术

张明华 王明华 编著



图例 (CIP) 目次

西南交通大学出版社, 2008.5
ISBN 978-7-294-0002-0

固态 YAG 激光器技术

余先伦 廖京川 编著

封面设计

封面设计

封面设计

封面设计

封面设计

封面设计

封面设计

封面设计

封面设计

封面设计

封面设计

封面设计

2008年7月第1次印刷

ISBN 978-7-294-0002-0

西南交通大学出版社

·成都·

地址: 成都二环路北三段101号
电话: 028-87600205

图书在版编目 (C I P) 数据

固态 YAG 激光器技术 / 余先伦, 廖京川编著. —成都:
西南交通大学出版社, 2008.7
ISBN 978-7-5643-0005-0

I. 固… II. ①余…②廖… III. 固体激光器—高等学校—
教学参考书 IV. TN248.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 113509 号

固态 YAG 激光器技术

余先伦 廖京川 编著

责任编辑	孟苏成
特邀编辑	李 鹏
封面设计	本格设计
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 87600533
邮 编	610031
网 址	http://press.swjtu.edu.cn
印 刷	四川锦祝印务有限公司
成品尺寸	170 mm×230 mm
印 张	14.625
字 数	269 千字
版 次	2008 年 7 月第 1 版
印 次	2008 年 7 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5643-0005-0
定 价	29.80 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

自 1960 年第一台固体激光器问世以来,固体激光器及其技术得到迅速普及和发展,其性能也显著提高,新型激光器件不断出现,从事和应用激光器件相关领域工作的专业人员不断增加,各种学科和技术领域纷纷应用激光并形成了一系列新的交叉学科和应用技术领域,包括信息光电子技术、激光医疗与光子生物学、激光加工、激光检测与计量、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快光子学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光分离同位素、激光可控核聚变和激光武器等。本书是在作者多年从事这方面研究和教学的基础上编著而成,希望能为电子信息工程、通信工程、应用物理学及现代教育技术学等相近专业的高年级本科生及相关专业老师提供参考。

本书的第一章对 YAG 固体激光器的发展和激光的主要物理概念作了简要的描述;第二章讨论了 YAG 激光器的基本理论;第三章重点阐述了典型固体激光器系统;第四章对 YAG 固体激光器的工作特性进行了分析;第五章和第六章对 YAG 激光器的锁模技术和调 Q 技术进行了讨论;第七章讨论 YAG 激光器的稳定性和可调谐技术;第八章主要分析 YAG 激光器的效率和噪声。

本书第一章、第三章、第五章、第七章、第八章由余先伦编写,第二章、第四章和第六章由廖京川编写,全书由余先伦统稿,由于编者水平的局限性,书中难免存在不少缺点和错误,敬请广大读者批评指正。

在这本书的编写和出版过程中,重庆三峡学院科技处王顺克教授给予了大量的支持与帮助,作者的学生唐开锋、罗志锋、石玉婷等绘制了部分图表并做了大量的文字录入工作,在此对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。

编 者

2007 年 10 月于重庆

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 激光技术的发展背景和前景	1
1.2 固体激光器的发展简史与前景	2
1.3 YAG 激光器的特点	3
1.4 Cr^{4+} : YAG 晶体在固体激光器的应用	7
第 2 章 固体激光器的基本理论	13
2.1 光波理论的基本概念	13
2.2 激光理论的基础	17
2.3 速率方程理论模型	22
2.4 半经典理论模型	26
2.5 全量子理论	32
第 3 章 典型 YAG 固体激光器系统	37
3.1 聚光腔	37
3.2 光学谐振参数的选择与设计	46
3.3 固体激光工作物质	56
3.4 固体激光器的泵浦源及冷却装置	69
3.5 典型固体激光器系统	74
3.6 其他固体激光器简介	81
第 4 章 典型固体 YAG 激光器的工作特性	87
4.1 概 述	87
4.2 YAG 激光器的理论模型	88
4.3 YAG 激光器的振荡阈值和吸收系数	90
4.4 YAG 晶体的增益与色散关系	96
第 5 章 YAG 固体激光器锁模技术与超短脉冲的测量	105
5.1 固体激光器锁模基本原理	105

5.2	固体激光器主动锁模和被动锁模技术	110
5.3	自锁模理论	118
5.4	超短脉冲测量技术	128
5.5	Cr^{4+} : YAG 激光器的锁模技术	145
第 6 章	YAG 固体激光器的调 Q 技术	158
6.1	概 述	158
6.2	调 Q 固体激光器的基本理论	161
6.3	固体激光器中电光调 Q 技术	167
6.4	固体激光器声光调 Q 技术	171
6.5	可饱和吸收调 Q 方法	176
第 7 章	YAG 激光器的稳定性和可调谐技术	183
7.1	频率的稳定性和复现性	183
7.2	固体激光器可调谐技术	189
7.3	YAG 激光器孤子脉冲的产生	194
第 8 章	固体激光器效率和噪声分析	202
8.1	概 述	202
8.2	固体激光器的本征效率分析	203
8.3	固体激光器的效率	210
8.4	固体激光器的噪声	212
参考文献		218

第1章 绪论

1.1 激光技术的发展背景和前景

激光科学技术以其强大的生命力谱写了一部典型的交叉学科的创造发明史，它的应用已经遍及科技、经济、军事和社会发展的许多领域。激光的理论基础可以追溯到 1917 年爱因斯坦 (Albert Einstein) 的受激发射和受激吸收的概念，随后的理论物理学家又证明，受激发射光子和激励光子具有相同的频率、方向、相位和偏振态。1954 年，美国的汤斯 (Charles H. Townes)、苏联的巴索夫 (Nikolai G. Basov) 和普洛霍洛夫 (Aleksander M. Prokhorov) 创造性地继承和发展了爱因斯坦的理论，提出了利用原子分子的受激辐射来放大电磁波的新概念，1958 年，汤斯 (Charles H. Townes) 和肖洛 (Arthur L. Schawlow) 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想，布隆伯根 (Nicolaas Bloembergen) 提出利用光泵浦三能级原子系统实现原子数反转分布的新构思，1960 年 7 月，梅曼 (Theodore H. Maiman) 演示了第一台红宝石固态激光器。从第一台激光器问世几十年以来，具有不同学科和技术背景的不同类型的激光器和激光控制技术相继问世，如半导体激光器、固体激光器、气体激光器、染料激光器、激光二极管泵浦全固化激光器、光纤放大器和激光器、光学参量振荡及放大器、自由电子激光器和 X 射线激光器等。与此同时，各学科和技术领域纷纷应用激光并形成了一系列新的交叉学科和应用技术领域，包括信息光电子技术、激光医疗与光子生物学、激光加工、激光检测与计量、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快光子学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光分离同位素、激光可控核聚变和激光武器等。

激光是 20 世纪的重大发明之一，它具有高亮度、良好的单色性、相干性和方向性，激光的应用已遍及工业、军事、通信和医学等诸多研究领域。为了能适应各方面的需要，许多旨在改善和提高激光性能的激光单元技术不断得到研究与发展，调 Q 技术和锁模技术能产生脉宽为飞秒或阿秒、峰值功率为 GW

和 TW 量级的巨脉冲, 为物理学、化学、生物学及光谱学等学科对微观世界和超快过程的研究提供了重要手段; 选模技术和稳频技术的发展能大大提高激光束的光束质量, 广泛用于精密干涉计量、全息照相、精细加工等方面。许多年来, 科学家们不断在研究和寻找各种提高激光器频率稳定性的, 具有实用价值的稳频技术, 其频率稳定性和复现性达到非常高的程度, 激光调制技术为光通信、光信息处理等应用提供极好的信息载波源, 极大地推动了光通信、实时光信息处理、光计算、光储存等应用技术的迅猛发展。

激光在科学发展与技术应用两方面都还存在巨大的挑战和创新的空间。在技术应用方面, 以半导体量子阱激光器和光纤器件为基础的信息光电子技术将继续成为未来信息技术的基础之一; 光子技术将和微电子技术、微机械技术交叉融合形成微光机电技术; 激光医疗与光子生物学在 21 世纪具有非常大的发展前景; 激光和光纤技术将有助于找到攻克心血管疾病和癌症等危害人类健康疾病的新方法; 激光光谱分析和激光雷达技术将对环境保护和污染检测提供有力的手段; 工业激光加工与计量将和工业机器人结合, 为未来的制造业提供先进、精密而灵巧的特殊加工与测量手段; 光纤传感技术和材料工程的交叉正在创造未来的灵巧结构材料。

1.2 固体激光器的发展简史与前景

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, 如红宝石激光器、Nd: YAG 激光器、掺钕离子的玻璃激光器、钛宝石激光器及 Cr^{4+} : YAG 激光器等。1960 年第一台红宝石激光器发明以来, 固体激光器的发展经历了以下几个阶段:

(1) 20 世纪 60 年代的迅速发展时期。1960 年的红宝石激光器、1961 年的钕玻璃激光器、1964 年的 Nd: YAG 激光器在这一时期相继研制成功, 固体激光器单元器件和振荡、放大、调 Q 、锁模及选模等技术和应用都获得了迅速发展。

(2) 20 世纪 70 年代的相对缓慢发展时期。在这个时期气体和染料等激光器发展非常迅速, 固体激光器的发展显得相对缓慢。

(3) 20 世纪 80 年代的复苏时期。进入 20 世纪 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。

(4) 20 世纪 90 年代之后的持续发展时期。20 世纪 90 年代以后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,其“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,之二是 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,并在劳伦兹-利弗莫尔国家实验室建成的单束元装置上全面考核了 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 CO₂ 气体激光器波长短、使用寿命长和单元技术成熟等优点。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、激光测温和环境监控、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 ICF)等诸多领域,形成了相当广阔的世界固体激光市场。

固体激光和相关领域未来的发展方向和研究课题有:

- (1) 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, Cr⁴⁺:YAG 晶体就是在 1988 年开始报道, 20 世纪 90 年代广泛开始应用的一种新型固体激光材料。
- (2) 可调谐固体激光器。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。
- (3) 工业应用的高功率固体激光器。
- (4) ICF 固体激光驱动器。
- (5) 二极管泵浦固体激光器。
- (6) 非线性光学效应。
- (7) 超短脉冲高亮度源和强场物理。

1.3 YAG 激光器的特点

YAG 激光器是以钇铝石榴石晶体为基质的一种激光器,钇铝石榴石的化学式是 Y₃Al₅O₁₅,简称 YAG,在 YAG 基质中掺入激活离子 Nd³⁺(约 1%)就成

为 Nd: YAG, 实际制备是将一定比例的 Al_2O_3 、 Y_2O_3 和 Nd_2O_3 在单晶炉中熔化结晶而成。Nd: YAG 属于立方晶系, 各向同性晶体, 由于 Nd: YAG 属四能级系统, 量子效率高, 受激辐射面积大, 它的阈值比红宝石和铝玻璃低得多。Nd: YAG 晶体具有优良的热学性能, 非常适合制成连续和重频器件, 它也是目前在室温下能够连续工作的唯一固体工作物质, 在中小功率脉冲器件中, 应用 Nd: YAG 的量远远超过其他工作物质。

YAG 激光器基本组成部分是激光工作物质、泵浦源和谐振腔, 但晶体中所掺杂的激活离子种类不同, 泵浦源和泵浦方式不同, 所采用的谐振腔的结构不同, 所采用的其他功能性结构器件不同, YAG 激光器又可分为多种, 如按输出波形可分为连续波 YAG 激光器、重频 YAG 激光器和脉冲 YAG 激光器; 按工作波长可分为 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ YAG 激光器、倍频 YAG 激光器、拉曼频移 YAG 激光器和可调谐 YAG 激光器等; 按掺杂不同可分为 Nd: YAG 激光器、掺 Ho、Tm、Er 等激光器; 以晶体的形状不同可分为棒形和板条形 YAG 激光器; 根据输出功率(能量)不同可分为高功率和中小型功率 YAG 激光器。形形色色的 YAG 激光器成为固体激光器中最重要的一个分支。

YAG 激光器从问世以来, 技术和工艺都发展得较成熟并得到广泛应用, 但随着激光相关技术的进步, YAG 激光器依然是目前固体激光器的一个研究热点。为了提高 YAG 激光器的效率、输出功率和光束质量, 扩展其频谱范围, 在激光材料、结构、泵浦源及泵浦方式等方面继续研究和改进, 主要解决的关键技术有:

(1) 寻求新的激光材料。如在 YAG 基质中掺杂 Ho、Tm、Er 等激活离子将 Nd: YAG 激光波长扩展至 $2\text{ }\mu\text{m}$ 左右, 使大气传输性能得到改善, 并提高激光对人眼的损伤阈值, 掺杂 Yb 激活离子可提高工作效率。

(2) 寻求新的激光器结构。如采用板条状晶体实现面泵浦和面散热, 可提高转换效率, 改善光束质量, 降低成本。

(3) 寻求新的泵浦源和泵浦方式。如采用二极管激光器取代灯泵浦是 YAG 激光器技术的一个重大突破, 使激光器性能得到显著改善。

1964 年, YAG 晶体首次制备成功, 经过几年的努力发展, 材料的光学和物理性能不断得到改善, 并能制备大尺寸的 YAG 晶体。1971 年可以拉制出直径为 40 mm 、长度为 200 mm 的 Nd: YAG 晶体, 为 YAG 激光器的研制提供了合适的优质晶体, 推动了 YAG 激光器的发展和应用, 如美国西尔凡尼亚公司推出的 YAG 激光精密跟踪雷达(PATS 系统)用于导弹测量靶场。20 世纪 70 年代掀起了研究和应用 YAG 激光器的热潮, 许多工业发达国家的研究机构都投入大量人力和财力, 研究的主要内容是提高 YAG 激光器的效率、功率和可

靠性, 解决工程化问题, 在激光测距、激光雷达、激光工业加工和激光医疗等领域出现了一些应用成果。20 世纪 80 年代 YAG 激光器的基本技术已比较成熟, 进入大发展时期, 成为各种激光发展和应用的主流。然而由于固体激光器在相干性、脉冲重频和输出功率等方面受到限制, 因而遇到 CO_2 激光器的挑战, 同时, 传统的圆棒形 YAG 激光器效率低 (3%), 热效应严重的固有缺点, 限制了其高功率输出和高重复频率, 光束质量也难以保证, 迫使人们寻求新的结构形式和泵浦方法, 板条形 YAG 激光器和二极管泵浦 YAG 激光器成为 YAG 激光器的重要发展方向。

新型面泵浦、面冷却板条状几何结构的 YAG 激光器概念于 1972 年首次由美国通用电气公司提出并获得专利, 但由于工艺技术上存在困难, 研究工作一直进展不大, 为此, 斯坦福大学对板条激光器技术进行了系统深入的理论和实验研究, 提出了千瓦级活动板条激光器的设计方案并进行了可靠性试验, 得到更好的光束质量和更高的平均输出功率, 引起世界各国的重视, 其后得到迅速发展。美国通用电气公司在 80 年代末已研制成功千瓦级的板条 YAG 激光器和 600 W 的材料加工样机。西欧尤里卡计划的固体激光规划中将板条 YAG 激光器作为 3 kW 高功率工业用固体激光器的选择方案。由于板条 YAG 激光器能获得高平均输出功率的同时保证了高光束质量, 因此, 美国、西欧和日本将研究的重点放在千瓦级板条激光器上, 这一研究工作在实用化方面的进展将在激光材料加工等方面增强固体激光器与 CO_2 激光器的竞争能力, 在军事上的应用前景也十分诱人。板条 YAG 激光器能否在一些主要应用领域取代传统的棒状 YAG 激光器, 取决于板条激光介质加工成本能否大幅度降低, 以及聚光腔结构的简化, 热效应的进一步克服和光腔的最佳化设计等一系列工程技术研究工作能否切实解决。

20 世纪 80 年代以来, 半导体二极管激光器 (LD) 技术和制造工艺逐步成熟, 为固体激光器提供了一种理想的泵浦源。与传统的泵浦灯相比, LD 具有输出功率高、寿命长的优点, 特别是它的输出与 YAG 激光介质的吸收带相一致, 因此使二极管泵浦的 YAG 激光器具有突出的优点:

- (1) 泵浦效率高, 可达 20% 左右 (灯浦泵效率只有百分之几)。
- (2) 随着效率的提高, 激光介质的热负荷下降, 因此大大改善光束质量。
- (3) 寿命长 (LD 的寿命达数万小时, 脉冲最高达 10^{11} 次), 可靠性高。
- (4) 体积小, 重量轻, 适于小型化应用。

其不足之处是结构复杂, 成本较高。尽管如此, 二极管激光器取代传统的泵浦灯已成为 YAG 激光器的一个重要发展方向。20 世纪 90 年代以来, 二极管泵浦的 YAG 激光器的研究工作取得重要进展, 先后解决了泵浦方式、泵浦光

耦合技术、固体激光介质的冷却和热效应补偿问题,使激光器的泵浦效率、输出功率和波束质量都达到新的水平。1996 年以前,国际上连续激光二极管的最高水平为 20 W,用泵浦 Q 开关 YAG 激光器,其最好输出水平为 10 kHz、15 kW。1998 年,德国用连续 LD 泵浦 Q 开关 YAG 激光器,得到 6.25 kHz、15 mJ、60 ns、250 kW 的输出,可作为军用探测装备的光源。随着 LD 输出功率的提高,高功率 LD 泵浦的 YAG 激光器的输出水平也不断提高。二极管泵浦的 YAG 激光器的发展为成熟的 YAG 激光器技术注入了新的活力,展现出更加诱人的应用前景,在军事领域(激光测距、激光雷达、激光制导等)、激光工业加工、激光医疗和科学研究等方面得到广泛的应用。

YAG 激光器是军用装备中应用最广泛的一种激光器,主要用作激光雷达、激光测距、激光制导和激光对抗等方面。由于它具有测量精度极高,抗电子干扰能力强等将点,使武器系统的瞄准精度和杀伤威力大大提高,在雷达面临反辐射导弹、电子战、低空超低空突防和隐身目标严重威胁的情况下,采用激光系统可以增强武器装备的战斗力和生存能力,起到武器装备能力倍增器的作用,其军事效能已在多次实战中得到验证。YAG 激光器在工业中的应用主要是用于材料加工,如切割、焊接、打孔等,不仅使加工质量得到提高,而且提高了工作效率;在医疗方面的应用,主要是作为手术刀,使手术不出血或很少出血,而且可以作一般手术刀无法或难以进行的手术,如脑血管、心血管及眼科手术等。除此之外,YAG 激光器还可以为科学研究提供一种精确而快捷的研究手段。

Nd: YAG 晶体是目前综合性能最为优异的激光晶体。激光波长 1 064 nm,广泛用于军事、工业和医疗等行业,对于闪光灯泵浦的激光器而言,泵浦灯的发射光谱实际是一个宽带连续谱,只有少数的光谱峰和 Nd 离子吸收峰相匹配,所以一般的灯泵浦只利用了很少部分的光谱能量,效率较低。在 Nd: YAG 晶体的基础上添加 Ce 离子形成 Ce: Nd: YAG 是利用 Ce 离子能对紫外光谱区光子能量产生很好的吸收,并且将能量以无辐射跃迁的方式传递给 Nd 离子,从而增加了光谱的利用率,因此激光棒效率高、阈值低、重复频率特性好。另外,它将对 Nd: YAG 而言有害的紫外辐射(长时间的紫外辐射,会在 Nd: YAG 晶体内形成色心,从而降低晶体的激光性能)进行了有效的利用,因此抗紫外辐射,甚至可不用特殊的滤紫外石英套管。Ce: Nd: YAG 因掺 Ce 以后晶体呈黄色,所以又叫黄棒。

Yb: YAG 是 3 价镱离子(Yb^{3+})掺入钇铝石榴石(YAG)基质中形成的一种产生 1.03 μm 近红外激光的激光晶体,其与 Nd: YAG 属于同一种基质,但由于掺杂不同而导致生长工艺有所不同。掺镱 YAG 由于量子效率高(91%),晶体光谱简单,无激发态吸收和上转换,且无荧光浓度猝灭,掺杂浓度高(可

达 30at.% 以上), 有较长的荧光寿命 (0.91 ms), 吸收带带宽 (18 nm) 比 Nd: YAG 的 (<4 nm) 宽得多, 能与二极管的泵浦波长有效耦合。在相同的输入功率下, Yb: YAG 泵浦生热仅为 Nd: YAG 的 1/4。而且 YAG 基质的物化特性综合性能最为优良, 所以 Yb: YAG 已成为最引人注目的固体激光介质之一, LD 泵浦的高功率 Yb: YAG 固体激光器成为新的研究热点, 并将其视为发展高效、高功率固体激光器的一个主要方向。

Er: YAG 激光波长为 2.94 μm , 此波段激光较之 CO_2 激光的 10.6 μm 更易被水、Ca、P 等所吸收, 多用于切开、切除多水分的身体软组织及骨切术, 性能大大优于 CO_2 激光刀。目前较多研究治疗牙周病及利用 Er: YAG 激光器代替高速涡轮牙钻, 实施对牙体硬组织的切割等, 这方面有应用前景并可作关节游离体摘除、炎性滑膜摘除、半月板切除、经皮穿刺椎间盘减压术等。Er 浓度为 50at.%, Ho 和 Tm 激光器有很大的市场潜力。由于 Ho 和 Tm 激光输出波长在 2 μm 左右, 与水的吸收峰相接近, 有极好的对人体组织切割和凝血效果, 可以用普通光纤传输, 是理想的手术激光光源。人体组织对 2 μm 激光吸收率高, 几乎比 Hd: YAG 高 3 个数量级。所以用 Ho: YAG 激光器进行医疗手术时, 不但可以提高手术效率和精度, 而且可使热损伤区域减至更小。钛晶体产生的自由光束可消除脂肪而不会产生过大的热量, 从而减少对健康组织产生的热损伤, 据报道, 美国用钛激光治疗青光眼, 可以减少患者手术的痛苦。美国已批准 20 多种 2 μm 激光在医疗临床使用, 可治疗多种疾病。2 μm 激光对人眼安全, 大气穿透好, 可作为激光雷达光源, 其综合性能优于 Nd: YAG 和 CO_2 激光器。

1.4 Cr^{4+} : YAG 晶体在固体激光器的应用

1. Cr^{4+} : YAG 晶体作为激光器的调 Q 晶体

在固体激光器中, 为了获得高功率、高性能和高稳定的激光输出, 常常采用调 Q 技术, 调 Q 脉冲激光器是应用最为广泛的脉冲激光器之一, 调 Q 技术有主动调 Q 和被动调 Q 两大类。可饱和吸收材料是一种非线性介质, 可作为激光器的被动调 Q 开关, 它对腔内激光的吸收是随着光场强度而发生变化的, 当光场较弱时其对光的吸收很强, 因此光通过率就很低, 当光场强度增加时其吸收就减少, 当光强达到特定的值时其饱和光透过率达 100%, 使强度最大的激光脉冲经受最小的损耗, 这样就可以得到输出功率很高的调 Q 脉冲。在激光器中, 饱和吸收材料有染料、色心材料和掺 4 价铬的系列材料等。 Cr^{4+} : YAG 晶

体在 $850 \sim 1150 \text{ nm}$ 范围内有一个很宽的吸收带并具有良好的可饱和吸收特性,特别适合作为钕激光器的被动调 Q 开关,是一种非常理想的调 Q 开关材料。

从 20 世纪 90 年代开始, Cr^{4+} : YAG 晶体作为激光器的调 Q 晶体得到了广泛的研究,这种调 Q 激光器容易实现高峰值输出功率、高脉冲重复频率和高稳定的激光脉冲输出,同时能制作出结构简单、体积小、性能优良的全固化激光器。应用 Cr^{4+} : YAG 晶体作为被动调 Q 开关,利用 Nd: YAG 可产生 1064 nm 的红外激光,也可以对其输出激光波长转换,倍频产生绿光输出,对这类激光器腔进行优化设计,还可制作成微芯片激光器,使其调 Q 脉冲更窄,并且能实现单纵模运转,可以广泛用于激光雷达、激光测距、遥视、非线性光学处理、材料加工、三维成像和目标识别等方面。

采用 Cr^{4+} : YAG 晶体作被动调 Q 晶体制作固体激光器虽有不同设计方式,但其基本原理都基本相同。1997 年, A. Agnesi 等人采用 10 W 的光纤耦合二极管对 Nd^{3+} : YAG 进行端面泵浦,选用 Cr^{4+} : YAG 晶体作饱和吸收晶体进行激光特性的研究,他们采用端面泵浦耦合方式,激光晶体所需长度很短,与厚度同样很薄的 Cr^{4+} : YAG 晶体 Q 开关结合,大大减小了激光器腔长,缩小了激光器的体积,并对腔设计结构进行了优化,获得了 TEM_{00} 模,最大输出单脉冲能量大约是 $200 \mu\text{J}$,脉宽 17 ns ,重复频率 6 kHz ,其中峰值功率为 11.76 kW ,平均输出功率可达 1.2 W 的激光脉冲。他们对平均输出功率进行优化,获得了最大平均输出功率 1.92 W 、脉冲宽度为 32 ns 、重复频率为 20 kHz 的激光脉冲输出。

2. Cr^{4+} : Nd^{3+} : YAG 自调 Q 晶体

将 Cr^{4+} 和 Nd^{3+} 共同掺杂于同一 YAG 基质内,制成 Cr^{4+} : Nd^{3+} : YAG 晶体,它把激光器的增益介质 Nd 的吸收特性与 Cr 的可饱和吸收特性结合到了一起,用 Cr^{4+} : Nd^{3+} : YAG 晶体作为激光工作物质可以输出很稳定的单纵模自调 Q 激光,其输出的脉冲幅度也非常稳定。用它做成自调 Q 激光器,可使激光器结构更简单,体积更小。1993 年, Shiqun li 等人率先报道了 Cr^{4+} : Nd^{3+} : YAG 自调 Q 激光器;2000 年,中科院上海光学精密仪器研究所报道了采用二极管泵浦的 Cr^{4+} : Nd^{3+} : YAG 自调 Q 激光器。泵浦源采用光纤耦合的 AlGaAs-GaAs 单量子阱激光器,泵浦波长 808 nm , Cr^{4+} : Nd^{3+} : YAG 晶体做成平凹几何形状,后腔镜凹面的曲率半径是 80 mm ,镀上一层薄膜对 808 nm 有高透过率,对 1064 nm 有高反射率,前腔镜平面镀上一层对 1064 nm 有 95% 的反射率、对 808 nm 是全反射的薄膜作为输出耦合镜,调 Q 脉冲用一个硅光电倍增管来探测,用一个 400 MHz 的 Tektronix TDS 380 型数字示波器来记录波形,用激光功率计来测量

激光输出功率。在这个实验里他们获得了稳定的调 Q 脉冲输出, 脉冲宽度是 50 ns, 峰值功率大约 100 W, 输出脉冲能量是 5 μ J, 斜效率高达 20%。

3. Cr^{4+} : YAG 晶体作为激光增益介质

Cr^{4+} : YAG 晶体用于激光器增益介质的研究开始于 1988 年, 由 Angert 等人报道, 1991 年第一台 Cr^{4+} : YAG 激光器问世。由于 Cr^{4+} : YAG 晶体具有良好的导热特性、高的损伤阈值、稳定的化学性质以及吸收截面大、饱和光强小、掺杂浓度高、无退化现象、寿命长等特点, Cr^{4+} : YAG 激光器能在室温下工作, 能连续运转, 输出的激光脉冲宽度可达几十个 fs, 单脉冲输出功率可达数百毫瓦, Cr^{4+} : YAG 激光器系统的发射谱中心是 1400 nm, 其输出激光的可调谐波段是 1335 ~ 1635 nm, 处于人眼的安全波段和光通信低损耗区域。

Cr^{4+} : YAG 激光器可广泛用于光纤通信领域、信息光电子学领域, 也是物理学、化学、生物学、光电子学以及激光光谱学等学科对微观世界进行研究, 揭示新的超快过程的一种非常重要的光源, 它在非线性光学和频谱学方面也有着广泛的应用。 Cr^{4+} : YAG 激光器所产生的超短脉冲在光电子器件的瞬态特性研究和光纤传输特性测量方面, 在电光取样系统、超高速数字通信系统、时分复用系统、波分复用系统、光孤子通信系统以及量子通信中都具有无可比拟的优越性。 Cr^{4+} : YAG 激光器在半导体电子器件和电信器件的特性值测量, 在遥感技术和气体跟踪监视器方面也有着非常广泛的应用。

1993 年, 由 Hergen Eilers 等人报道了 Cr^{4+} : YAG 激光器在 3 种不同泵浦模式下的激光特性。这个激光器的实验是在 3 种不同泵浦模式下进行的, Cr^{4+} : YAG 晶体被纵向泵浦, 由一个调 Q 的 Nd: YAG 激光器、长脉冲的 Cr, Nd: GSGG 激光器和连续 Nd: YAG 激光器分别作为泵浦源。在这个实验里, 研究了在不同泵浦光入射能量的情况下输出激光的调谐范围和输出脉冲的输出功率、脉宽和斜效率, 输出脉冲和泵浦脉冲的时延。

1997 年, B.C.Collings 和 K.Bergman 报道了一种被动锁模 Cr^{4+} : YAG 激光器, 在这种激光器里可产生基态孤子脉冲。在锁模激光器里, 群速度色散(GVD)和自相位调制(SPM)在激光腔里都存在, 它们相互作用相互抵消, 脉冲就有可能形成光孤子。他们设计了一个短腔 Cr^{4+} : YAG 激光器, 采用饱和布拉格反射镜(SBR)作为锁模装置, 晶体一端镀有高反射膜, 另一面做成布儒斯特面, 一个曲率半径为 10 cm 的高反射折叠镜 RC 提供像散的补偿, 一个曲率半径为 7.5 cm 的 0.2% 输出耦合镜 OC 将这腔膜聚焦到 SBR 的表面上。为了补偿正常 GVD, 在腔内两个曲率镜之间插入两个等边的布儒斯特棱镜。在 1525 nm 这个

中心波长位置,他们得到重复频率为 2.7 GHz,输出功率为 82 mW,脉宽为 200 fs 的基态孤子脉冲。

1999 年,由 I.T.Sorokina 等人报道了在室温下直接由二极管泵浦的连续波调谐 Cr^{4+} :YAG 激光器。在这个实验里, Cr^{4+} :YAG 晶体的工作温度是 16°C,晶体的一面镀有二向色性介质,在激光区域有高反射性而在泵浦光区域具有高透过性,晶体另一面镀有在激光区域防反射的膜。得到了如下结果,其波长调谐范围是 1 415~1 535 nm,输出激光功率可达 200 mW,斜效率只有 4.8%。2003 年,A.J.Alcock 等人在这个实验基础上进行改进,二极管直接泵浦的 Cr^{4+} :YAG 激光器其波长调谐范围可以达 197 nm,从 1 356~1 553 nm,可获得最大输出功率为 260 mW。

2001 年,T.R.Schibli 等人报道了 Cr^{4+} :YAG 微芯片激光器。它用一个可靠的二极管泵浦的 Nd:YVO₄ 激光器作为泵浦光源,为了避免有害反射进入泵浦源,在泵浦光的前方安放了一个光隔离器,一个 1/2 波片调节泵浦光的偏振方向,泵浦光束的腰斑半径和位置由一个望远镜控制,光斑模半径可从 20~120 μm 变化,微芯片激光器谐振腔由 Cr^{4+} :YAG 晶体和在晶体两边的两个平面镜构成, Cr^{4+} :YAG 晶体长 8.2 mm,一个是输出耦合镜,另一个对 Cr^{4+} :YAG 发射光谱具有高反射性,最后一个二向色光分束器分离激光光束。在这个实验中得到了基本重复频率为 10 GHz,脉冲宽度为 200 fs,平均输出功率为 300 mW 的激光输出。

2002 年,D.J.Ripin 等人报道了 20 fs 脉冲的 Cr^{4+} :YAG 激光器。在这个激光器里双啁啾镜用作 Cr^{4+} :YAG 激光器中宽带高阶色散补偿,激光器采用 Z 型折叠激光腔,激光晶体长 2 cm,直径 3 mm,晶体两侧面是布儒斯特面,泵浦源采用 Nd:YVO₄ 激光器,晶体在 13°C 恒温下工作,晶体两边是曲率半径为 10 cm 的双啁啾镜(DCM),从正常入射旋转 16° 进行像散补偿,其激光腔 Z 型一臂长 70 cm,包含另外一个 DCM 和一个无啁啾的高反射镜,另一臂长为 50 cm,包含一个宽带输出耦合镜。在这个激光器中可以产生低于 20 fs 的超短激光脉冲,谱线峰值在 1 450 nm,半极范围是 1 310~1 500 nm,平均功率为 400 mW,重复频率为 110 MHz。

2003 年,A.A.Lagatsky 等人研制了一台紧致自启动被动锁模飞秒 Cr^{4+} :YAG 激光器。在这个激光器中,采用 Yb 光纤激光器进行泵浦,使用 SBR 锁模自启,输出脉冲脉宽 120 fs,平均输出功率 95 mW,中心波长在 1 528 nm,带宽 22 nm。

2004 年,由 C.G.Leburn 等人研制了一种紧致高重复频率的飞秒 Cr^{4+} :YAG 激光器。采用 Yb 光纤激光器进行泵浦,产生的脉冲宽度是 80 fs,重复频率是 4 GHz,中心波长调谐范围在 1 505~1 550 nm。激光器系统里腔内只包括三个