

激光材料科学 与技术前沿

上海交通大学出版社

激光材料科学与技术前沿

徐 军 主编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书以最近 10 余年来激光材料的研究热点——LD 泵浦全固态激光材料为主题,结合作者的研究成果,对这类激光材料国内外最新研究成果进行较全面和系统的总结,并对未来发展趋势进行展望。按结构形态(晶态和非晶态)和功能特性进行分类,分别总结了不同材料的制备、缺陷、结构、能级分裂、光谱和激光特性。特别着重论述激光材料的微观结构、晶格点阵、光谱性能和激光性能之间相互作用的规律和物理机理,显示我国在该领域中的研究水平。

本书是一本着重于基础研究的科学专著,对从事激光材料、固体物理、激光技术基础研究的科技人员具有参考价值;也可供大专院校有关专业的师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光材料科学与技术前沿/徐军主编. —上海:上海

交通大学出版社,2007

(材料科学前沿文库)

ISBN 978-7-313-04733-5

I. 激... II. 徐... III. 激光材料—研究
IV. TN244

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 038719 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

激光材料科学与技术前沿

徐 军 主 编

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

常熟市文化印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:22.5 字数:561 千字

2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-04733-5/TN·124 定价:60.00 元

版权所有 侵权必究

前言

激光材料是激光技术发展的核心和基础,具有里程碑的意义和作用(“一代材料、一代器件”):20世纪60年代第一台红宝石晶体激光器问世,激光诞生;70年代掺钕钇铝石榴石,固体激光开始大力发展;80年代钛宝石晶体,使超短、超快和超强激光成为可能,飞秒激光科学技术蓬勃发展,并渗透到各基础和应用学科领域;90年代碲酸钕晶体,固体激光的发展进入新时期——全固态激光科学技术……进入新世纪,20世纪60年代初出现的激光和激光科学技术,正以其强大的生命力推动着光电子技术和产业的发展,激光材料也在单晶、玻璃、光纤、陶瓷等四方面全方位迅猛展开,如微-纳米级晶界,完整性好、制作工艺简单的微晶激光陶瓷和结构紧凑、散热好、成本低的激光光纤,正在向占据激光晶体首席达40年之久的Nd:YAG发出强有力的挑战,激光材料也已从最初的几种基质材料发展到数十种,是受到各国政府、科学界乃至企业界高度重视的领域。

在此背景下,2005年11月15~16日在上海举行了第66期东方科技论坛学术研讨会,论坛主题为“晶态和非晶态激光材料及其应用战略”。中国科学院上海光学精密机械研究所干福熹院士、徐军研究员、山东大学蒋民华院士和天津大学姚建铨院士担任大会执行主席,并与中材人工晶体研究院沈德忠院士、中国科学院上海光学精密机械研究所范滇元院士和中国科学院北京理化技术研究所吴以成院士共同主持了论坛学术报告会和专题讨论会。

本次研讨会汇聚了全国范围内该领域的精英专家,参加本次研讨会的代表有来自中科院上海光学精密机械研究所、山东大学、中科院上海硅酸盐研究所、中科院福建物质结构研究所、天津大学、中材人工晶体研究院、中科院北京理化技术研究所、中科院物理研究所、中国电子科技集团公司第十一研究所、复旦大学、南开大学、华东师范大学、长春理工大学、中国工程物理研究院、上海大学、烽火通信科技股份有限公司、江苏阿尔发光电科技有限公司、中科院基础局、国家自然科学基金委、上海市科技项目管理中心等单位的近60位专家、学者。

本次研讨会分别就21世纪人工晶体的发展战略,传统激光晶体与激光玻璃的发展规律和趋势,具有微纳结构的微晶激光陶瓷、非晶态激光光纤和光子晶体光纤面临的研制难题和发展策略,国家重大激光工程对激光材料的需求和牵引等专题作了报告,并展开了广泛而深入的讨论。在本次研讨会的基础上,我们组织出版了《激光材料科学与技术前沿》一书。

本书主要由参加本次研讨会的部分中青年专家、学者执笔。本书按结构形态(晶态和非晶态)和功能特性进行分类,分别总结了不同激光材料的制备、缺陷、结构、能级分裂、光

谱和激光特性。特别着重论述激光材料的微观结构、晶格点阵、光谱性能和激光性能之间相互作用的规律和物理机理。同时,本书也是作者所在集体在激光材料领域最近几年的研究成果的总结。通过全面而广泛地引用国内外公开发表的研究结果,以及最新的研究进展,力求使本书具有系统性、完整性和新颖性。但由于作者了解的面和专业知识的局限性,可能遗漏了不少重要内容,希望读者,特别是从事激光材料研究、开发和生产的专业人士指正。

编著者

2006年12月于上海

目 录

1	激光晶体材料	1
1.1	引言	1
1.2	激光晶体的现状和发展趋势	2
1.2.1	蓝绿紫和可见光激光材料	2
1.2.2	中红外激光材料	3
1.2.3	1 μm 波段高功率、大能量激光材料	4
1.2.4	LD 抽运超快激光晶体	6
1.3	结论和建议	10
	参考文献	11
2	激光透明陶瓷	14
2.1	引言	14
2.2	激光透明陶瓷的种类与性能	15
2.2.1	单组分氧化物	15
2.2.2	氧化物固溶体	17
2.3	激光透明陶瓷的制备优势与制备技术	20
2.3.1	激光透明陶瓷的性能与制备优势	20
2.3.2	粉体合成技术	21
2.3.3	陶瓷材料的成型	24
2.3.4	烧结技术	25
2.4	几种重要激光陶瓷的研究	28
2.4.1	氧化钇透明陶瓷	28
2.4.2	YAG 透明陶瓷样品	29
2.4.3	其他氧化物透明陶瓷的制备	31
2.5	激光透明陶瓷的前景展望	32
	参考文献	33
3	光子晶体光纤	36
3.1	引言	36
3.2	光子晶体的性质及相关应用	36
3.3	光子晶体光纤	37
3.4	光子晶体光纤的导光机理	39
3.4.1	带隙波导型光子晶体光纤导光机理	39

3.4.2	有效折射率型光子晶体光纤的大模面积和无截止单模特性	41
3.5	光子晶体光纤的制作方法	43
3.5.1	堆叠法	43
3.5.2	挤压法	45
3.5.3	钻孔和溶胶-凝胶法	46
3.6	光子晶体光纤的性质和应用	47
3.6.1	带隙波导型光子晶体光纤的性质和应用	47
3.6.2	有效折射率型光子晶体光纤的性质和应用	52
	参考文献	54
4	液体激光	61
4.1	研究背景	61
4.1.1	激光应用简史	61
4.1.2	发展方向和研究热点	62
4.2	液体激光及其介质	62
4.2.1	染料液体激光	63
4.2.2	稀土液体激光	64
4.3	小结与展望	71
	参考文献	71
5	有机激光材料与器件	73
5.1	研究背景	73
5.2	有机激光及介质	74
5.2.1	有机染料激光	74
5.2.2	有机稀土激光	78
5.2.3	有机共轭聚合物激光	81
5.3	小结与展望	90
	参考文献	90
6	微片激光晶体和器件	94
6.1	引言	94
6.2	微片激光介质评估	95
6.2.1	Nd^{3+} 激光晶体	95
6.2.2	Yb^{3+} 激光晶体	97
6.3	微片激光晶体的生长及其光谱性能分析	98
6.3.1	$\text{Nd}^{3+}:\text{LaB}_3\text{O}_6$ 晶体	98
6.3.2	系列 Yb^{3+} 浓度铝硼酸盐晶体	100
6.3.3	Yb^{3+} 离子辐射陷阱和荧光浓度猝灭效应分析	103
6.4	微片激光器件的介质优化研究	108

6.4.1	不同泵浦方式下 Nd^{3+} 激光晶体的对比与选择	108
6.4.2	Yb^{3+} 微片激光介质的最佳浓度与厚度分析	110
6.5	微片激光实验研究	111
6.5.1	不同泵浦方式 $\text{NdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 微片激光比较	111
6.5.2	利用解理晶体获得免加工微片激光介质	113
6.6	讨论	115
	参考文献	116
7	上转换激光晶体	121
7.1	引言	121
7.2	上转换过程	122
7.2.1	激发态吸收上转换	122
7.2.2	能量转移上转换	123
7.2.3	光子雪崩上转换	124
7.2.4	同步多光子吸收上转换	125
7.3	上转换激光晶体	126
7.3.1	稀土离子掺杂上转换晶体材料	126
7.3.2	过渡金属离子掺杂上转换晶体材料	132
7.4	新型多光子吸收上转换激光晶体	133
7.4.1	稀土 $\text{Ce}^{3+}(4f^1)$ 离子掺杂上转换晶体	134
7.4.2	过渡金属 $\text{Cr}^{3+}(3d^3)$ 离子掺杂上转换晶体	138
7.4.3	自激活 VO_4^{3-} 阴离子上转换晶体	140
7.5	总结与展望	141
7.5.1	铜系离子和过渡金属离子掺杂材料	142
7.5.2	低声子能量施主材料	142
7.5.3	玻璃陶瓷和纳米晶材料	142
7.5.4	室温操作	142
7.5.5	高上转换效率	142
	参考文献	143
8	可调谐激光晶体	151
8.1	过渡金属离子掺杂的可调谐激光晶体	152
8.1.1	Co^{2+} 掺杂可调谐激光晶体	152
8.1.2	Cr^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Cr^{4+} 掺杂可调谐激光晶体	152
8.1.3	$\text{Mn}^{6+}(3d^1 \text{ 结构})$ 掺杂可调谐激光晶体	156
8.2	稀土离子掺杂的可调谐激光晶体	156
8.2.1	$\text{Pr}^{3+}(4f^2)$ 掺杂激光晶体	157
8.2.2	Nd^{3+} 掺杂激光晶体	157
8.2.3	$\text{Tm}^{3+}(4f^{12})$ 掺杂激光晶体	161

8.2.4	Tm^{3+} 、 Yb^{3+} 双掺杂激光晶体	162
8.2.5	$\text{Er}^{3+}(4f^{11})$ 掺杂激光晶体	163
8.2.6	Yb^{3+} 掺杂激光晶体	163
参考文献		167
9	被动调 Q 与自调制激光	174
9.1	引言	174
9.2	基本原理	174
9.2.1	理想的可饱和吸收体	174
9.2.2	四能级可饱和吸收体	175
9.2.3	被动调 Q 速率方程	176
9.3	被动 Q 开关和调 Q 激光	177
9.3.1	被动 Q 开关	177
9.3.2	被动调 Q 激光	184
9.4	自调制激光晶体	188
9.4.1	Cr^{4+} , $\text{Nd}:\text{YAG}$ 晶体	188
9.4.2	Cr^{4+} , $\text{Yb}:\text{YAG}$ 晶体	190
9.4.3	Yb^{3+} , $\text{Na}^+:\text{CaF}_2$ 晶体	192
9.4.4	其他自调 Q 激光晶体	194
参考文献		194
10	自倍频激光晶体	202
10.1	概述	202
10.2	$\text{Nd}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 晶体	205
10.2.1	晶体结构	206
10.2.2	晶体生长	207
10.2.3	晶体性能	208
10.3	$\text{Nd}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$	209
10.3.1	晶体生长	209
10.3.2	晶体性能	210
10.3.3	晶体的激光自倍频效应	211
10.4	$\text{Yb}^{3+}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ ($\text{Yb}^{36}:\text{YAB}$)	212
10.4.1	晶体生长	212
10.4.2	晶体性能	214
10.5	$\text{YAB}:\text{Er}^{3+}, \text{Tb}^{3+}, \text{Dy}^{3+}, \text{Sm}^{3+}, \text{Tm}^{3+}$ 晶体	220
10.5.1	$\text{Er}^{3+}:\text{YAB}$ 晶体	221
10.5.2	$\text{Dy}^{3+}:\text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 晶体	222
10.5.3	$\text{Tb}^{3+}:\text{YAB}$ 晶体	225
10.5.4	$\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YAB}$ 晶体的上转换性能研究	226

10.5.5 $\text{Ho}^{3+}, \text{Yb}^{3+} : \text{YAl}_3(\text{BO}_3)_4$ 晶体的上转换性能研究	227
10.5.6 $\text{Tm} : \text{YAB}$ 晶体	229
参考文献	230

11 掺 Er^{3+} 的 $1.54\mu\text{m}$ 激光材料与器件

11.1 概述	233
11.1.1 $1.54\mu\text{m}$ 激光的重要性	233
11.1.2 实现 $1.54\mu\text{m}$ 激光的运转方法	234
11.1.3 $1.54\mu\text{m}$ 掺 Er^{3+} 激光器技术的研究与进展	235
11.2 掺 Er^{3+} 的 $1.54\mu\text{m}$ 激光材料的发展	238
11.2.1 掺 Er^{3+} 激光材料的发展总述	238
11.2.2 掺 Er^{3+} 的 $1.54\mu\text{m}$ 激光材料简介	239
11.3 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃发光性质研究	241
11.3.1 J-O 理论介绍	241
11.3.2 吸收光谱和荧光光谱	243
11.3.3 Raman 光谱	244
11.3.4 能级寿命、增益、吸收与发射截面测量	245
11.3.5 上转换发光性质研究	246
11.3.6 共掺磷酸盐玻璃中 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 的能级跃迁	246
11.4 $1.54\mu\text{m} \text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃激光器	248
11.4.1 LD 抽运连续 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃激光器的理论和实验研究	248
11.4.2 LD 抽运被动调 Q $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃激光器的理论和实验研究	255
11.4.3 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃激光器及其激光运转技术介绍	259
11.5 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光纤及其在光纤放大器和光纤激光器中的应用	261
11.5.1 短长度、高增益 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤的理论研究	262
11.5.2 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤放大器实验研究	265
11.5.3 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐光纤激光器实验研究	266
11.6 $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}$ 共掺磷酸盐玻璃光波导放大器	266
11.7 结束语	267
参考文献	267

12 激光晶体生长

12.1 晶体生长技术	275
12.1.1 晶体生长方法简介	275
12.1.2 晶体生长控制技术的发展	278
12.2 激光晶体生长	285

12.2.1 金属氧化物激光晶体·····	286
12.2.2 氟化物激光晶体·····	306
12.2.3 其他重要的激光晶体·····	311
12.3 结束语·····	329
参考文献·····	329

1 激光晶体材料

1.1 引言

激光材料是激光技术发展的核心和基础,具有里程碑的意义和作用,特别是激光晶体在激光技术发展的各个关键阶段均起了举足轻重的作用:20世纪60年代第一台红宝石($\text{Cr}:\text{Al}_2\text{O}_3$)晶体激光器问世,激光诞生^[1];70年代掺钕钇铝石榴石($\text{Nd}:\text{YAG}$)晶体^[2]问世,使固体激光开始大力发展;80年代掺钛蓝宝石($\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$)晶体问世,使超短、超快和超强激光成为可能,飞秒(fs)激光技术蓬勃发展并渗透到各基础和应用学科领域^[3];90年代掺钕钒酸钇($\text{Nd}:\text{YVO}_4$)晶体^[4]问世,使固体激光的发展进入新时期——全固态激光技术……。进入21世纪,上世纪60年代初出现的激光和激光技术,正以其强大的生命力推动着光电子技术和产业的发展,激光材料也在单晶、玻璃、光纤、陶瓷等4方面全方位迅猛展开,如微纳米级晶界、完整性好、制作工艺简单的多晶激光陶瓷^[5]和结构紧凑、散热好、成本低的激光光纤^[6],正在向占据激光晶体首席达40年之久的 $\text{Nd}:\text{YAG}$ 发出强有力的挑战。“热容”激光、“超快”激光等新概念、新技术也不断涌现,“流体”、“有机”、“纳米”、“光子晶体”激光等面临突破,受到各国政府、科学界乃至企业界的高度重视。

成为世界先进制造业、信息产业强国是我国21世纪的发展战略目标,实现该目标的关键之一是必须能提供基础性的激光材料及其元器件。我国在科研、先进制造业、能源、医疗、国防等众多领域亦将拥有规模巨大的激光及其元器件的应用市场需求。但是目前的现状是:①高技术含量、高附加值的激光器基本从国外进口;②军用“杀手锏”激光武器仍然处于跟踪、模仿阶段,其中主要原因之一是我国对激光器的核心和基础——激光材料的基础研究薄弱,总体上仍然摆脱不了“跟”的状态;③高能强激光武器,超短、超快和超强激光及其在科学技术中的应用,与DPL全固态激光等三个方向已列入我国《国家中长期科学和技术发展规划》。特别是“惯性约束聚变点火工程(2020年)”已确定为《国家中长期科学和技术发展规划》的16项重大专项之一。

围绕激光和光电子产业中的关键性、基础性、带动性技术——激光材料的基础科学问题进行系统的研究,对我国未来高技术产业和国防建设有“不受制于人”的重大战略意义和现实意义。为此,2005年11月15~16日第66期东方科技论坛《晶态和非晶态激光材料及其应用战略》在上海召开,包括8位院士在内的近40位全国范围内激光材料领域的精英专家和激光、激光工程专家一致呼吁:把激光材料的基础科学研究作为国家科技发展战略目标之一,国家和地方各部门应加大科研投入,发挥我国在晶体生长工艺等方面的优势,联合起来,在若干前沿和关键领域取得突破^[7]。

1.2 激光晶体的现状和发展趋势

目前为止,实用化的激光晶体也已从最初的几种基质材料发展到数十种,并在各个方面获得了实际应用。但就其应用范围和广度来说,主要有“三大基础激光晶体”,即掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)、掺钕钒酸钇(Nd:YVO₄)和掺钛蓝宝石(Ti:Al₂O₃)晶体。其中:中、高功率激光应用主要是 Nd:YAG,低功率小型化激光应用主要是 Nd:YVO₄,可调谐、超快激光应用主要是 Ti:Al₂O₃。在以上“三大基础激光晶体”及其相关材料方面,我国科学家在过去 40 余年中也取得了重要成果:如“色心”YAG^[8-9]、“黄棒”Ce,Nd:YAG^[10]、Cr⁴⁺,Yb:YAG^[11-12];Ti:Al₂O₃ 温梯法晶体生长技术^[13-14]和 Nd:YVO₄ 晶体生长技术突破等^[15]。特别是我国 Nd:YVO₄ 晶体生长技术的突破是对国际激光技术的重大贡献^[4]。“色心”YAG 晶体(后被确认为 Cr⁴⁺:YAG)已被国际上广泛应用于各类 1 μ m 波段激光的被动调 Q 开关,在激光打标、测距和加工等领域获得实际应用,它的发现、发表和应用要比俄罗斯和美国早 5 年以上^[16-17]。

纵观激光晶体材料的应用现状和发展前景,今后激光晶体的主要发展趋势是需迫切发展如下 4 个方面(图 1-1),并将取得突破和实际应用:①面向全色显示、光存储、光刻等应用的蓝绿紫和可见光激光晶体;②面向人眼安全、遥感、光通信、医疗等应用的中红外激光晶体;③面向先进制造技术、“新概念”激光武器等应用的 1 μ m 波段高功率、大能量激光晶体;④DPL 超快激光增益和放大介质晶体。以上 4 个方向中,高功率、大能量全固态激光晶体材料和 DPL 超快激光晶体材料又是覆盖其他方向、带有共性基础科学问题的关键方向。

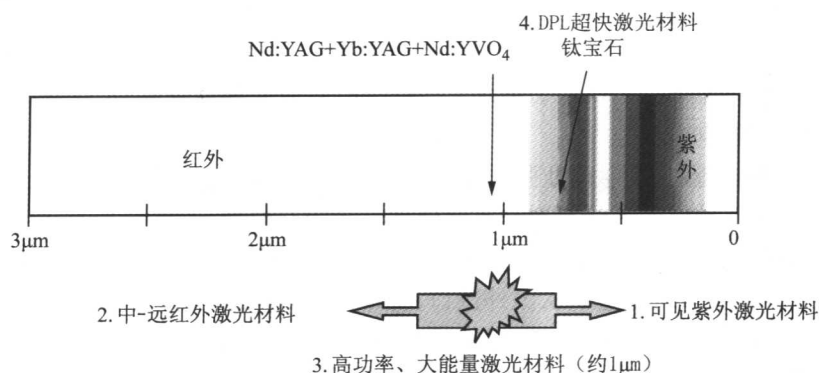


图 1-1 激光晶体材料的 4 大发展方向

1.2.1 蓝绿紫和可见光激光材料

目前实现蓝绿紫和可见光波段激光均采用间接的手段(非线性倍频),至今尚未有合适的材料,但预计将首先在光纤或晶体中实现高效上转换激光输出。目前,采用激光晶体产生可见光激光的主要途径有:①LD 泵浦的腔内倍频 1 μ m 波段激光;②自倍频激光晶体;③近红外 LD 泵浦上转换可见光激光等。LD 泵浦腔内倍频 Nd³⁺ 激光是目前最成熟的一种技术,一般采用 Nd:YLF 或 Nd:YVO₄ 晶体作为激光介质,KTP 或 LBO 为倍频材料,产生 532nm 绿色激光。Nd:YAB、Yb:YAB 自倍频绿光激光器也是目前性能较好的激光光源,用自倍频激光器实现绿光输出比腔内倍频激光器在原理上简单,是一种比较实用和经济的方法。与 Nd:YAB 相

比, Yb:YAB 由于在倍频波段没有自吸收, 因此是最有希望获得实用化的自倍频晶体, 当前存在的主要问题是晶体质量较差。以 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 、 Tm^{3+} 为激活离子的红外泵浦上转换可见光激光具有良好的应用前景, 一直是人们努力研究的方向。早在 1971 年, Bell 实验室的 Johnson 等采用 960nm 泵浦 Yb^{3+} , Er^{3+} : BaY_2F_8 和 Yb^{3+} , Ho^{3+} : BaY_2F_8 晶体分别获得了 670nm 和 551.5nm 的可见光激光发射^[18]。1997 年, 采用钛宝石泵浦 Er^{3+} , Yb^{3+} : LiYF_4 获得了 37mW 的 551nm 激光输出^[19]。2002 年, 采用钛宝石泵浦 Er^{3+} : LiLuF_4 获得了 213mW 的绿色激光输出, 斜效率为 35%^[20]。一般情况下, 基质声子能量越低越有利于能量上转换发光, 在 Ba_2ErCl_7 和 $\text{Cs}_3\text{Er}_2\text{Cl}_9$ 等新晶体中获得了强度比 Er : LiYF_4 大两个数量级的上转换绿光^[21]。

1.2.2 中红外激光材料

2~5 μm 的中红外波段覆盖 H_2O 、 CO_2 等几个重要的分子吸收带, 在医学、遥感、激光雷达和光通信等方面有着重要的应用。激光波长位于这一波段的激活离子主要有 Fe^{2+} 、 Cr^{2+} 、 Tm^{3+} 、 Er^{3+} 、 Ho^{3+} 等离子, 通常采用的基质晶体主要有 ZnSe 、 YAG 和 LiYF_4 。1.55 μm 的钕玻璃和掺 Er 、 Tm 、 Ho 的 2 μm 波段医疗用晶体激光已实用化, 但更高效率的 DPL1.55 μm 、2 μm 和 3~5 μm 波段的新晶体和光纤材料是中红外激光发展的瓶颈。

早在 1965 年, Johnson 等人在贝尔(Bell)实验室就首次实现钨灯泵浦 Tm : YAG 晶体产生激光振荡^[22], 由于当时振荡是在低温条件下(77K 和 85K)进行的, 阈值很高, 为 200~500J, 因此 Tm : YAG 激光器的进一步研究没有引起重视。1997 年, 美国利弗莫尔国家实验室采用 805nm 的 LD 端面泵浦 Tm : YAG 获得了 115W 的 2 μm 连续激光输出, 斜效率高达 40%^[23]。但 Tm : YAG 晶体的各吸收带都很窄(~4nm), LD 泵浦需要很好的冷却系统。同时, Tm : YAG 晶体的激光性能受温度影响很大, 温度猝灭现象较严重, 对激光晶体也需要采用良好的冷却方式。

Ho^{3+} : YAG 性质类似于 Tm^{3+} : YAG , 但无法采用高亮度的 LD 进行泵浦。位于 Ho^{3+} 吸收带内发射波长为 1.9 μm 的 LD, 具有非常宽的发射带(>12nm)和低的亮度, 因此不能与 Ho : YAG 有效耦合。采用 Tm^{3+} 为敏化剂的 Tm , Ho : YAG 在 LD 泵浦作用下 2.1 μm 平均输出功率达 10W, 但存在严重的热透镜效应。2000 年, Budni 等采用 LD 泵浦的输出功率为 36W 的 Tm : YLF 激光器共振泵浦 Ho : YAG 获得 19W 的连续激光输出^[24]。采用合适的离子组合或基质晶体实现 LD 泵浦的高效率 Ho^{3+} 激光运转存在很大的发展空间。

Er^{3+} 除了 1.5 μm 激光外, 3 μm 波段激光也被广泛应用。1996 年, LD 泵浦 Er (15%): YLF 获得 1.1W 的 2.8 μm 的激光输出, 斜效率为 35%^[25]。LD 泵浦 Er (50%): YAG 也获得了 1.15W 的 2.94 μm 激光^[26]。为了获得 Er^{3+} 的 3 μm 激光, 一个必要的条件是必须高浓度掺杂(一般>10 at. %*)。这是因为低浓度掺杂使 Er^{3+} 离子 3 μm 激光的上能级 $^4\text{I}_{11/2}$ 寿命小于下能级 $^4\text{I}_{13/2}$, 激光发射是自终止的。当掺杂浓度增加时, 由于 Er^{3+} 离子之间的交叉弛豫作用, 激光上、下能级的寿命均下降, 而后的下降速率大于前者。因此, 当 Er 离子的浓度增加到一定程度时, 下能级寿命变得小于上能级, 从而有利于 3 μm 激光运转。众所周知, Er 离子高浓度掺杂条件下存在强烈的能量上转换, 因此激光效率必然受到限制。可以设想, 采用合适的去激

* at. % 为原子百分浓度。

发离子共掺(如 Ce^{3+}),与 Er 离子的 $^4I_{13/2}$ 能级形成共振能量转移,可以大幅度地降低该能级的寿命,从而在适中的掺杂浓度下实现 Er 离子 $3\mu m$ 高效的激光运转。

1.2.3 $1\mu m$ 波段高功率、大能量激光材料

此类材料以石榴石(Nd:YAG、Yb:YAG)晶体和陶瓷为主,还有 Nd:GGG 晶体和 Yb-玻璃光纤。与 Nd:GGG 相比,Nd:YAG 在热性能和物化性能方面较卓越,如其热透镜效应仅是 Nd:GGG 的 $1/2$;热应力极限下,Nd:YAG 的激光输出理论值比 Nd:GGG 高出 $1/3$ 。如能突破 Nd:YAG 晶体生长中心无应力集中区——即“核芯”区,意义将十分重大,可避开美国利弗莫尔(LLNL)国家实验室的“高能量猝发固体热容激光器”专利^[27],且技术路线好于 Nd:GGG。2006 年 3 月,美国利弗莫尔国家实验室用 LD 泵浦的 Nd:YAG 陶瓷激光器的输出功率已经达到 67kW,这是目前国际上最高功率的固体热容激光器^[28]。2004 年,德国 Trumpf 公司的 Yb:YAG 圆盘激光器的输出功率已经达到 6kW。国内:中国科学院上海光学精密机械研究所(以下简称为中科院上海光机所)于 1995 年前后在国内率先开展 Yb:YAG 晶体研究^[29,30],并与法国 LULI 实验室联合正在发展 LD 泵浦 Yb:YAG 平均输出 kW 级、100J(ns)的 LUCIA 激光系统,2005 年实现 Nd:YAG 的大于 2kW 输出。2005 年清华大学 LD 泵浦 Yb:YAG 晶体获得大于 1kW 的连续激光输出^[31]。2006 年中国工程物理研究院也已报道 LD 泵浦 Nd:YAG 固体热容激光输出大于 3kW。上海硅酸盐研究所对激光陶瓷的研究始于 2000 年,最近在国内首次实现激光输出^[32]。近日上海光机所制备出直径为 85mm 无核心的 Nd:YAG 晶体盘片,光学均匀性较好,晶体质量较好。

按照美国利弗莫尔国家实验室的热容激光武器方案,其功率必须达到 100kW 以上,Nd:YAG 晶体或陶瓷的直径至少必须 $\phi 160mm$ 以上。所以,大直径优质激光晶体或陶瓷是发展高能强激光的瓶颈。

高平均功率(HAP)输出的固体激光器(SSL)在工业、科学和军事等领域都有着非常诱人的应用前景。设计高功率固体激光器的主要困难有两个^[33]:对泵浦过程中无法避免的废热进行处理以及消除由于将废热去除而导致的后果。在激光工作过程中如果不对增益介质冷却,就会导致其温度升高,使得增益系数降低,最终导致不能工作。去除废热就会引起热透镜、机械应力及其他许多问题的产生,进而可能使激光光束质量下降、降低激光输出功率,甚至可能导致固体激光增益介质的破裂。

针对高功率固体激光器上述两个发展瓶颈,解决的方法有两个:一是由于产生废热是不可避免的,所以要尽量消除由于消除废热而引起的后果。我们必须减小热量和热流密度,减小热流的传导路程和对激光场的影响。几年来,关于这方面的研究有比较多的方法和设计模型,总体上的发展趋势是:从快体介质向具有大比表面积的薄片和纤维介质、从静止介质向运动介质、从固体介质向流动介质。已形成比较理想的设计模型有:盘片激光、固体热容激光、光纤激光。

1.2.3.1 盘片激光

盘片激光是从一个大面上将热量导走,并且热流的距离非常短,即使用大的泵浦能量也不会盘片产生大的温度梯度。如果盘片的直径远大于厚度,则热流可以看作是沿一维方向的并且平行于激光方向,这样就会大大地降低热机械效应^[34]。

过去的 10 年里,德国斯图加特大学的科学家们用微片激光的概念,使得二极管泵浦的固

体激光器的激光输出得到了很大的发展^[35]。利用 $224\mu\text{m}$ 厚, 9% 掺杂的 Yb:YAG 晶体获得了 647W, 光光效率为 51%, 最近他们又获得了 2kW 的光。德国 Rofin-Sinar 公司已经利用二极管泵浦的 Yb:YAG 盘片晶体获得了 4.4kW 的激光输出; 用二极管泵浦的 Nd:YAG 晶体棒获得了 6kW 的激光输出。2000 年, 日本的 MITI Project^[36] 宣称他们已经用棒状和盘片状 Nd:YAG 分别获得了平均 3.3kW, 峰值为 13kW 的激光输出。Boeing 公司^[37] 致力于 CAMIL 技术发展, 考虑使用 Nd:YAG、Nd:GGG、Nd:Glass、Yb:S-FAP 等激光增益介质并制作成紧凑结构, 构建激光放大器和激光振荡器结构; CAMIL 技术的一个主要优点: 可以获得较宽范围的激光平均功率值, 提升功率可以通过增加口径尺寸或激光振荡器中模块数量获得。

Trumpf(Plymouth, MI) 产生 LD 泵浦 1kW 连续波的薄片激光器, 谐振腔中由两个薄片组成, 光束质量 6-mm-mrad, 输出可以耦合到直径为 $150\mu\text{m}$ 的光纤中去; 目前 Trumpf 最新的薄片激光器包含 4 个薄片, 独立泵浦, 输出为 4 kW, 光束质量 7-mm-mrad, 输出可以耦合到直径为 $200\mu\text{m}$ 的光纤中去, 发射 1030nm。

2004 年, 中国工程物理研究院用两块 $\phi 13\text{mm} \times 1\text{mm}$ 的 Nd(1.4at. %):YAG 薄片, 采用之字形, 平凹腔稳腔结构, 获得了峰值功率为 1440W, 平均为 216 W 的准连续激光输出^[38]。

1.2.3.2 固体热容激光

大多数固体激光器系统在工作时连续冷却, 以避免热损伤。废热从激光介质内传至表面, 由水等冷却剂带走, 这样做的后果就是在激光增益介质中产生大的温度梯度。大的温度梯度会导致机械应力、物理变形、光学畸变, 最终会使光学元件断裂。所以高功率固体激光器面临的主要问题是泵浦过程中的热破坏。传统激光器采用发光过程中同时冷却的方法, 很容易造成在激光介质中产生热机械应力。这种应力断裂极限决定着激光器的最高输出能量。固体热容激光器(SSHCL)的创新之处就是激光工作过程中(10~20s)是绝热过程, 停止泵浦后再冷却激光工作物质。因此固体热容激光器表面的温度就会高于中心温度。因此, 废热在热容激光介质中的淀积是压应力, 而传统激光器为张应力。理论分析表明: 压应力的破坏阈值为张应力的 5 倍以上。因而固体热容激光器可以工作于更高的温度状态。

1995 年, Walters 等人发表了关于固体热容激光器的研究文章, 1996 年 6 月, 美国利弗莫尔国家实验室的 Albrecht 等人申请了“高能量促发固体热容激光器”的专利。1998 年 Albrecht 在“Laser and Particle Beams”中发表了一篇文章中详细介绍固体热容盘片激光的概念和理论计算。最近美国利弗莫尔国家实验室利用 4 片 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 25\text{mm}$ 的 Nd:YAG 陶瓷获得了 25kW 的激光输出, 同时他们用 5 片获得了 37kW 的激光输出, 但是没有给出光束质量, 可能光束质量不好。

2005 年中科院上海光机所用自己发明的温梯法生长的 Nd:YAG 晶体, 用热容方案获得了 2kW 的激光输出。由于温度梯度法生长 Nd:YAG 激光晶体可以避免传统的提拉法生长 Nd:YAG 晶体时所遇到的晶体中间存在核心问题, 从而提供大尺寸晶片, 这是一个非常有前途的发展方向。

1.2.3.3 高平均功率光纤激光^[39]

与传统的固体激光器相比, 光纤激光器的工作介质极其细长, 这种几何形状使得光纤激光器具有非常多的优点: ①工作介质的表面积、体积比很大。在同样体积下, 光纤激光器的表面积比其他块状工作物质大 2~3 个数量级, 散热效果好。②由于是波导结构, 激光模式由纤芯直径 d 和数值孔径 N. A. 决定, 不受介质中无用热的影响。因此在光纤激光器中不存在块状

工作物质中的热效应影响激光光束质量的问题。③纤芯直径很小,容易实现均匀的高平均功率密度泵浦,激光器效率高、阈值低。④采用双包层结构大大提高了泵浦效率。

当前连续工作的光纤激光器的输出功率已经可以与块状工作物质媲美,百瓦、千瓦级的光纤激光器比块状工作介质激光器更容易获得高光束质量。但继续再增加功率就变得困难了,特别是脉冲 Q 开关工作,由于纤芯横截面积小,高峰值功率可能造成破坏及非线性效应,所以限制了输出能量。

2003 年 SPI 公司与英国南安普顿大学采用大模芯径掺 Yb 光纤,纤芯直径 $43\mu\text{m}$,数值孔径为 $N.A. = 0.09$,归一化频率 $\nu = 11$,获得了 1.01kW 连续激光输出,斜效率 80% ,由于纤芯直径较大,已经不是基模工作了。

2005 年 3 月,IPG 公司在网上公布采用纤芯直径 $19\mu\text{m}$ 的掺 Yb 光纤获得 2kW , $M^2 < 1.2$ 的连续激光输出。 $19\mu\text{m}$ 的纤芯直径基模工作是完全可能的。

1.2.4 LD 抽运超快激光晶体

DPL(LD 直接泵浦)是超快激光增益和放大介质晶体。飞秒激光以其特有的超短脉冲(10^{-15}s)、高峰值功率和宽光谱等特点,在超快光谱学、微电子加工、光钟、计量、全息、高容量和高速度光通信等众多领域具有广泛的潜在应用(图 1-2)^[40]。20 世纪 90 年代发展起来的基于钛宝石晶体的飞秒激光器是目前可以获得最短脉冲、使用最多的超快激光装置。然而,钛宝石振荡源或放大级需要的 532nm 泵浦源具有体积大、电效率低,特别是价格昂贵等缺点,限制了其作为商用飞秒激光器向便携式、低成本方向的发展,制约了其作为工业和民用产品广泛推广和应用。

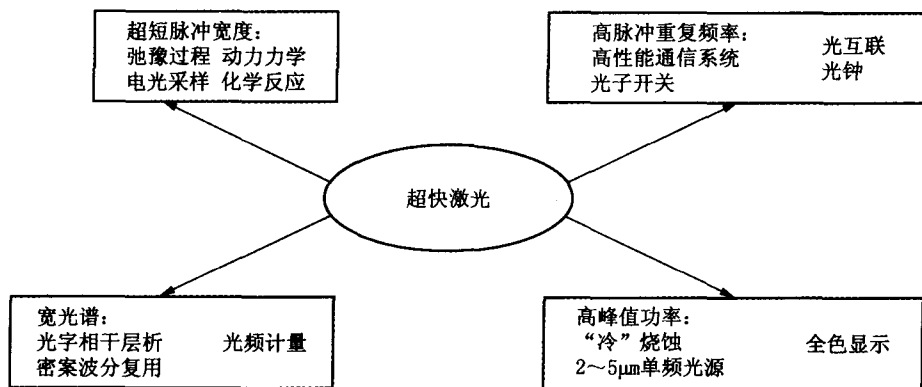


图 1-2 超快激光的应用示意图

可以预测,随着具有更加优异综合性能基质晶体的出现,考虑到超快激光器在加工、医疗等方面应用的独特优势,LD 泵浦全固态超快激光器不但在科研,而且在工业化技术上的应用也必将获得突破。

开展 LD 可直接泵浦的掺(Yb 镱)激光晶体和全固态飞秒激光器的研究已成为开发新一代紧凑型、高效率、低成本飞秒激光器的热点^[41-44]。与 Nd^{3+} 等其他稀土离子不同,由于 Yb^{3+} 离子的 $4f$ 壳层电子受外界影响大,在晶场中具有强的电-声子耦合效应,掺 Yb 激光介质普遍具有较宽的吸收和发射带,有利于 LD 泵浦和产生超短脉冲。另外, Yb^{3+} 的电子构型为 $4f^{13}$, 掺 Yb 激光晶体仅有两个电子态,基态 $^2F_{7/2}$ 和激发态 $^2F_{5/2}$, 由于在 $^2F_{5/2}$ 这个上能级之上不存在